

**MARCUS VINÍCIUS REZENDE JÚNIOR**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM  
EQUIPAMENTO PARA  
MEDIÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À  
FRAGILIZAÇÃO POR HIDROGÊNIO PELO MÉTODO  
RSL**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2018**

**MARCUS VINÍCIUS REZENDE JÚNIOR**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM EQUIPAMENTO PARA  
MEDIÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À  
FRAGILIZAÇÃO POR HIDROGÊNIO PELO MÉTODO RSL**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientadora: Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia

Co-orientador: Prof. Dr.-Ing. Sinésio D. Franco

**UBERLÂNDIA – MG**

**2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

R467a      Rezende Júnior, Marcus Vinícius, 1991-  
2018      Avaliação do desempenho de um equipamento para medição da  
susceptibilidade à fragilização por hidrogênio pelo método RSL [recurso  
eletrônico] / Marcus Vinícius Rezende Júnior. - 2018.

Orientadora: Rosenda Valdés Arencibia.

Coorientador: Sinésio Domingues Franco.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1236>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. 2. Corrosão e anticorrosivos. 3. Proteção  
catódica. 4. Hidrogênio. I. Valdés Arencibia, Rosenda, (Orient.). II.  
Franco, Sinésio Domingues, 1962- (Coorient.). III. Universidade Federal  
de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
IV. Título.

---

CDU: 621

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
Telefone: (34) 3239-4282 - [www.posgrad.mecanica.ufu.br](http://www.posgrad.mecanica.ufu.br) - [secpoemec@mecanica.ufu.br](mailto:secpoemec@mecanica.ufu.br)



## TERMO

**ALUNO:** Marcus Vinicius Rezende Júnior

**MATRÍCULA:** 11622EMC013

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:** Materiais e Processos de Fabricação **LINHA DE PESQUISA:** Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)

**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA:** NÍVEL MESTRADO

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** "Avaliação do Desempenho de um Equipamento para Medição da Susceptibilidade à Fragilização por Hidrogênio pelo Método RSL"

**ORIENTADORA:** Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia

**COORDENADOR:** Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada na Sala de Reuniões do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste - Bloco 5F, Campus Santa Mônica, em 16 de agosto de 2018, às 14:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia (orientadora) - UFU

Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco (coorientador) - UFU

Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho - UFU

Dr. Marcelo Torres Piza Paes - Petrobras

Dr. Raimundo Cabral de Medeiros - Villares Metals

Uberlândia, 16 de agosto de 2018



Documento assinado eletronicamente por **Rosenda Valdes Arencibia, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/08/2018, às 16:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Louriel Oliveira Vilarinho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/08/2018, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sinesio Domingues Franco, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/08/2018, às 16:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Raimundo Cabral de Medeiros, Usuário Externo**, em 16/08/2018, às 16:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Torres Piza Paes, Usuário Externo**, em 17/08/2018, às 09:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0646496** e o código CRC **AA6BA018**.





*Dedico este trabalho à minha querida família,  
Lindeia, Marcus, Fernanda, Katuxa (in  
memoriam), Mel (in memoriam), Estrela e à minha  
amada esposa, Marline.*



*N'essayez pas de devenir une personne de réussite,  
mais plutôt une personne de valeur – Albert Einstein*

*Je ne perds jamais, soit je gagne, soit j'apprends – Nelson Mandela*

*Por uma educação que nos ajude a pensar e  
não que nos ensine a obedecer – Autor desconhecido*

*On n'a que le bien qu'on se fait – Proverbe*

*Be a good person but don't waste time to prove it – Unknown author*

*Trabalhe em silêncio, deixe que o seu sucesso faça barulho – Dale Carnegie*

*La plus dure décision qui soit est de choisir entre laisser tomber  
et RÉESSAYER ENCORE PLUS FORT – Auteur inconnu*

*Tout est possible à qui rêve, ose, travaille, et n'abandonne jamais – Xavier Dolan*

*Quando je suis allé à l'école, ils m'ont demandé ce que je voulais être quand je  
serais grand. J'ai répondu « heureux ». Ils m'ont dit que je n'avais pas compris la  
question, j'ai répondu qu'ils n'avaient pas compris la vie – John Lennon*

*Falar é prata, calar é ouro – Provérbio*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo o que me oferece, sobretudo, a minha família e uma esposa atenciosa e linda em todos os sentidos. Agradeço à minha família que sempre me apoiou continuamente durante toda a minha vida e em todas as minhas escolhas, pessoais e profissionais: minha mãe Lindeia, meu pai Marcus, minha irmã Fernanda e as três cadelas que tivemos (temos) em casa: Katuxa (*in memoriam*), Mel (*in memoriam*) e Estrela. Não tenho palavras para agradecer à minha esposa Marline, que me acompanhou durante todos esses anos, sempre com muita paciência, compreensão e apoio em todos os momentos. Muito obrigado por compreender as minhas intensas jornadas semanais no LTAD ao longo desses dezesseis meses, por inúmeras e inúmeras vezes ultrapassando cem horas por semana de trabalho intenso. Hoje, posso dizer que todo esse sacrifício valeu a pena.

Agradeço aos meus amigos franceses (não conseguiria citar todos aqui), italianos, alemães, suíços, africanos, belgas, russos, norte-americanos, húngaros, lituaneses e todas as outras nacionalidades que porventura não mencionei, mas que foram fontes de aprendizado para mim desde muito cedo. Eu não poderia deixar de agradecer aos inúmeros profissionais e amigos franceses, responsáveis por grande parte dos conhecimentos que possuo como engenheiro e com quem aprendi a trabalhar com ética, responsabilidade e seriedade.

Agradeço à *Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques*, pela formação de engenheiro que obtive como duplo diploma e à Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Agradeço aos meus orientadores pela oportunidade do trabalho e à equipe do LTAD. Agradeço a PETROBRAS pelo projeto, a CAPES, pela bolsa de estudos, e aos membros da banca julgadora da dissertação.

Agradeço ao professor Alexandre, da Universidade de Caxias do Sul, pelas explicações do teste de repetibilidade e reprodutibilidade (R&r), além dos professores da Faculdade de Engenharia Química, Marcos e Gláucia, pelas explicações de análise de variância e do teste R&r; do professor Quintiliano, da Faculdade de Matemática, pela ajuda com o teste R&r; da professora Karina, da Faculdade de Engenharia Mecânica, pela ajuda com o programa Minitab; do professor José Daniel, pela ajuda com o método de lixamento da raiz do entalhe. Agradeço ao Laboratório de Tribologia e Materiais, onde realizei os tratamentos térmicos e a medição de dureza de todos os corpos de prova, em especial, à Ângela. Agradeço à Ione e à Roberta, da Faculdade de Engenharia Química, pelo fornecimento contínuo de água destilada para preparação do fluido eletrolítico dos inúmeros experimentos.

Agradeço à Rejane, da portaria principal da UFU (Campus Santa Mônica), e aos vigilantes da DIVIG (Divisão de Vigilância) pela atenção nas inúmeras vezes que fui ao LTAD durante a madrugada ou em horários não comerciais, para iniciar os experimentos e para realizar o controle dimensional e geométrico dos corpos de prova. Agradeço à Ana Maria, da biblioteca, e à Maria de Fátima, da Central de Línguas, pela atenção.

Agradeço à FAU (Fundação de Apoio Universitário), representada pela Adriana, Alba e Ilária, pela rapidez em tratar de questões burocráticas, especialmente no que diz respeito à fabricação dos corpos de prova.

Agradeço aos professores e técnicos da Faculdade de Engenharia Mecânica que pude conhecer melhor, quando fui presidente da edição de aniversário do POSMEC 2016 30 anos (Simpósio dos alunos de pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFU), sobretudo aos professores Márcio, Gilmar, Valder, Rosemar, Elaine, Leonardo, Ana Marta e Francisco, bem como as secretárias Kelly, Lucimara e Cristiane, ao técnico Luiz, ao Henrique, do Centro de Estudos, Pesquisas e Projeto Econômico-Sociais, e a professora Valéria, da Faculdade de Engenharia Química.

Agradeço ainda a todos que não foram citados aqui, mas que contribuíram indiretamente para o sucesso do meu trabalho.

Por fim, agradeço a todos os brasileiros que indiretamente pagam as bolsas dos alunos de graduação e pós-graduação nas universidades federais, afim de propiciar a realização de pesquisas científicas e o desenvolvimento tecnológico e intelectual do Brasil.

REZENDE JÚNIOR, M. V. **Avaliação do desempenho de um equipamento para medição da susceptibilidade à fragilização por hidrogênio pelo método RSL**. 2018. 360 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## Resumo

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho metrológico de um equipamento para caracterização da susceptibilidade à fragilização pelo hidrogênio através do método de carregamento em patamares progressivos sob meio assistido. Para tanto, foram verificadas duas configurações do equipamento, a primeira com célula de carga de 20 kN, utilizada em corpos de prova com dimensões nominais iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm e a segunda com célula de carga de 1 kN, utilizada em corpos de prova com dimensões nominais iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm. Os parâmetros metrológicos estimados em ambos os casos, foram os seguintes: tendência, exatidão, incerteza expandida, repetibilidade, histerese e erro de não linearidade. Além disso, foi investigado o efeito da seção transversal do corpo de prova, raio de arredondamento da raiz do entalhe e dureza do corpo de prova na determinação do valor de PFFS (*Point of Fast Fracture Strength*) e na susceptibilidade à fragilização por hidrogênio por meio de um planejamento fatorial completo  $2^1 \times 2^1 \times 3^1$ . O teste de repetibilidade e reprodutibilidade (R&r) do equipamento resultou em um valor de % GR&r (fator de repetibilidade e reprodutibilidade) igual a 6,17 %, indicando que o equipamento é adequado para realização de testes. A avaliação das duas configurações do equipamento mostrou que as células de carga de 20 kN e de 1 kN utilizadas para medição da força apresentaram excelentes propriedades metrológicas, tanto no carregamento, quanto no descarregamento. Os resultados da análise de variância, considerando os três fatores investigados, mostraram que apenas o fator seção transversal tem efeito estatisticamente significativo na determinação do valor de PFFS do aço AISI 4140 nas condições investigadas. As análises de variância adicionais, efetuadas separadamente para cada valor nominal de seção transversal, revelaram que para corpos de prova com dimensões nominais iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, o raio de arredondamento e a dureza do corpo de prova provocaram efeitos significativos na determinação do valor de PFFS.

---

*Palavras-chave: rising step load, susceptibilidade à fragilização por hidrogênio, desempenho metrológico, proteção catódica, aço AISI 4140, ANOVA.*

REZENDE JÚNIOR, M. V. **Evaluation of the performance of an equipment to measure susceptibility to hydrogen embrittlement by RSL method.** 2018. 360 f. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

## Abstract

This study aimed to evaluate the metrological performance of an equipment to characterize the susceptibility of materials to hydrogen embrittlement using the rising step load method. This equipment was verified in two configurations, the first one with a load cell of 20 kN used for specimens with nominal dimensions of 30 mm x 30 mm x 200 mm and the second one with a 1 kN load cell used for test specimens with nominal dimensions of 10 mm x 10 mm x 60 mm. Different metrological parameters were estimated in both configurations: bias, accuracy, expanded uncertainty, repeatability, hysteresis and linearity. Moreover, the effect of the specimen cross-section, notch radius and specimen hardness on the determination of the PFFS (*Point of Fast Fracture Strength*) value and the susceptibility to hydrogen embrittlement using a full factorial design  $2^1 \times 2^1 \times 3^1$  was determined. The gage repeatability and reproducibility (GR&r) of the equipment resulted in a % GR&r value of 6.17 %, indicating that the equipment is an acceptable measurement system. The evaluation of the two equipment configurations showed that the load cells of 20 kN and 1 kN used to measure the force had excellent metrological properties, both in loading and unloading phase. The analysis of variance results considering the three investigated factors showed that only the cross-section factor has statistically significant effect in determining the PFFS value of AISI 4140 steel under the present test conditions. Further analyses of variance, performed separately for each cross section nominal value, showed that for specimens with nominal dimensions of 10 mm x 10 mm x 60 mm, the notch radius and the hardness of the specimen caused statistically significant effects on the determination of the PFFS value.

---

*Keywords: rising step load, hydrogen embrittlement susceptibility, metrological performance, cathodic protection, AISI 4140 steel, ANOVA.*



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Fragilização por hidrogênio em um parafuso revestido de cromo duro (HERRING, 2010) .....	2
Figura 1.2: Esquema do equipamento RSL patenteado (RAYMOND, 1996, modificado) .....	3
Figura 2.1: Ilustração da presença do hidrogênio na estrutura do ferro. Interstícios octaédricos dos sistemas cúbico de face centrada (a) e cúbico de corpo centrado (b) (LANDOLT, 1993) .....	24
Figura 2.2: Sítios aprisionadores de hidrogênio no material: a) Solução sólida, b) Par hidrogênio-soluto, c) Atmosfera de discordância, d) Acúmulo no contorno de grão, e) Acúmulo na interface matriz-partícula, f) Hidrogênio recombinado em vazios (THOMPSON, 1980, modificado) .....	24
Figura 2.3: Mecanismo de difusão de hidrogênio no material (HERRING, 2010, modificado) .....	25
Figura 2.4: Fratura em parafuso revestido com cromo duro (HERRING, 2010) .....	25
Figura 2.5: Exemplo de corpo de prova do teste DCB (XIE <i>et al.</i> , 1999, modificado) .....	29
Figura 2.6: Equipamento que opera pelo método RSL e seus principais componentes: atuador eletromecânico (17), braço de carregamento (23), suporte (15), cuba eletrolítica (91) e corpo de prova (35) (RAYMOND, 1996) .....	31
Figura 2.7: Geometria do corpo de prova no teste RSL (RAYMOND, 1996) .....	32
Figura 2.8: Modelo de perfil de CPPAM e determinação do patamar de $P_{TH}$ (ASTM F1624, 2012, modificado) .....	34
Figura 2.9: Tipos de queda de força observados em testes de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio e interpretação do patamar de $P_{TH}$ (ASTM F1624, 2012, modificado) .....	35

Figura 2.10: Método de extrapolação para determinação do patamar de $P_{TH}$ no caso de quedas de força do tipo A (ASTM F1624, 2012, modificado).....	35
Figura 2.11: Esquema de funcionamento do processo EDM (BLEYS <i>et al.</i> , 2006) ....	39
Figura 2.12: Diferentes camadas de um aço rápido usinado por eletroerosão: AB – camada refundida discreta; BC – camada refundida uniforme; CD – zona termicamente afetada (ZTA) e DE – material base (FERNANDES, 1999) .....	40
Figura 3.1: Equipamento RSL 2 e componentes 1 – computador para execução da rotina de hidrogenação; 2 – painel de comando; 3 – reservatório para purga do fluido eletrolítico; 4 – potenciostato; 5 – braço; 6 – barra de segurança; 7 – cuba eletrolítica; 8 – corpo de prova, 9 – <i>encoder</i> incremental rotativo; 10 – célula de carga e 11 – bancada de testes .....	43
Figura 3.2: Esquema representando um corpo de prova, com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, submetido a flexão a quatro pontos e principais componentes do RSL 2 .....	45
Figura 3.3: Esquema geral de funcionamento do equipamento RSL 2 .....	46
Figura 3.4: Dimensões e tolerâncias dos corpos de prova com seção transversal de 30 mm x 30 mm e raio do entalhe de 250 $\mu$ m .....	48
Figura 3.5: Dimensões e tolerâncias dos corpos de prova com seção transversal de 30 mm x 30 mm e raio do entalhe de 80 $\mu$ m .....	48
Figura 3.6: Dimensões e tolerâncias dos corpos de prova com seção transversal de 10 mm x 10 mm e raio do entalhe de 250 $\mu$ m .....	49
Figura 3.7: Dimensões e tolerâncias dos corpos de prova com seção transversal de 10 mm x 10 mm e raio do entalhe de 80 $\mu$ m .....	49
Figura 3.8: Chapas de aço AISI 4140 utilizadas para fabricação dos corpos de prova	50
Figura 3.9: Amostras utilizadas nas análises de composição química com indicação das cinco regiões observadas .....	51
Figura 3.10: Direção de usinagem do entalhe para corpos de prova com seção transversal retangular (ASTM E1823, 2013, modificado) .....	52
Figura 3.11: Amostras para análises da direção de laminação e da microestrutura ....	52

Figura 3.12: Leiaute da identificação das faces das chapas para análise metalográfica .....	53
Figura 3.13: Posição do corpo de prova para usinagem do entalhe pelo processo de eletroerosão a fio (a) Ilustração esquemática; (b) Foto do processo de usinagem do entalhe de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm .....	56
Figura 3.14: Refratômetro utilizado para medição do índice Brix do fluido dielétrico .....	57
Figura 3.15: Aparelho lixador/polidor portátil utilizado para lixamento da raiz do entalhe .....	58
Figura 3.16: Imagem da medição do raio da raiz lixada do entalhe de um corpo de prova no microscópio óptico .....	60
Figura 3.17: Corpo de prova fixado na mesa de medição da máquina de medir por coordenadas durante a medição dos desvios de orientação, com indicação da origem do sistema de coordenadas no ponto 0 .....	61
Figura 3.18: Uso de adaptadores para testes em corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm .....	64
Figura 3.19: Adaptadores e roletes para testes em corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm .....	65
Figura 3.20: Distâncias e diâmetros envolvidos no cálculo da tensão mecânica no corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm .....	66
Figura 3.21: Distâncias e diâmetros envolvidos no cálculo da tensão mecânica do corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm .....	67
Figura 3.22: Configuração de ponte completa para verificação da tensão mecânica calculada – a) montagem para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm; b) montagem para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm .....	74
Figura 3.23: Configuração do teste para verificação da tensão calculada instantaneamente pelo programa SURISEL (a) célula de carga de 20 kN; (b) célula de carga de 1 kN .....	75
Figura 3.24: Montagem do RSL 2 para realização dos testes de CPPAM em corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm .....	80

Figura 3.25: Configuração da proteção catódica de corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm .....	81
Figura 3.26: Etapas de preparação metalográfica da amostra para análise da camada refundida no MEV (a) corpo de prova entalhado; (b) corte da amostra para embutimento; (c) amostra embutida, lixada e polida com a marcação de esmalte condutor para inserção no MEV .....	83
Figura 3.27: Imagem MEV da raiz não lixada do entalhe de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, raio do entalhe igual a 250 $\mu$ m e dureza igual a 40 HRC, com destaque na região de análise da camada refundida .....	84
Figura 3.28: Esquema geral do experimento .....	86
Figura 3.29: Diagrama de Ishikawa da operação do RSL 2 .....	88
Figura 4.1: Vistas gerais (Fig. 4.1a e Fig. 4.1b) e em detalhes (Fig. 4.1c e Fig. 4.1d) da face referente à superfície das chapas .....	91
Figura 4.2: Vistas gerais (Fig. 4.2a e Fig. 4.2b) e em detalhes (Fig. 4.2c e Fig. 4.2d) da face referente ao comprimento das chapas .....	92
Figura 4.3: Vistas gerais (Fig. 4.3a e Fig. 4.3b) e em detalhes (Fig. 4.3c e Fig. 4.3d) da face referente à largura das chapas .....	93
Figura 4.4: Valores médios de dureza Rockwell C dos corpos de prova 30 mm x 30 mm x 200 mm com dureza nominal igual a 36 HRC (Fig. 4.4a), 40 HRC (Fig. 4.4b) e 44 HRC (Fig. 4.4c), com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %) .....	95
Figura 4.5: Valores médios de dureza Rockwell C dos corpos de prova 10 mm x 10 mm x 60 mm com dureza nominal igual a 36 HRC (Fig. 4.5a), 40 HRC (Fig. 4.5b) e 44 HRC (Fig. 4.5c), com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %) .....	96
Figura 4.6: Valores médios de dureza Rockwell C de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e dureza superficial igual a 35 HRC .....	97

Figura 4.7: Valores de erro em porcentagem obtidos na verificação da tensão mecânica calculada instantaneamente pelo programa SURISEL com célula de carga de 20 kN, com teste de carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm .....	98
Figura 4.8: Valores de erro associados à força medida pela célula de carga de 20 kN obtidos no teste de verificação, com carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, com barra de erros representando a incerteza expandida (95,45 %) para o carregamento .....	99
Figura 4.9: Valores de erro máximo obtidos, em porcentagem, com relação à força medida no teste de verificação da célula de carga de 20 kN, com teste de carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm .....	100
Figura 4.10: Valores de ângulo medidos pelo <i>encoder</i> obtidos no teste de verificação da célula de carga de 20 kN, com teste de carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, com barra de erros representando a incerteza expandida (95,45 %) para o carregamento .....	101
Figura 4.11: Valores de tensão obtidos no teste de verificação da célula de carga de 20 kN, com carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, com barra de erros representando a incerteza expandida (95,45 %) para o carregamento .....	102
Figura 4.12: Valores de erro máximo obtidos, em porcentagem, na verificação da tensão mecânica calculada instantaneamente pelo programa SURISEL com célula de carga de 20 kN, no teste de verificação de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm .....	103
Figura 4.13: Valores de erro em porcentagem obtidos na verificação da tensão mecânica, calculada instantaneamente pelo programa SURISEL com célula de carga de 1 kN, com teste de carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm .....	104

Figura 4.14: Valores de erro associados à força medida pela célula de carga de 1 kN obtidos no teste de verificação, com carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, com barra de erros representando a incerteza expandida (95,45 %) para o carregamento .....	105
Figura 4.15: Valores de erro máximo obtidos, em porcentagem, com relação à força medida no teste de verificação da célula de carga de 1 kN, com teste de carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm .....	106
Figura 4.16: Valores de ângulo medidos pelo <i>encoder</i> obtidos no teste de verificação da célula de carga de 1 kN, com teste de carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, com barra de erros representando a incerteza expandida (95,45 %) para o carregamento .....	107
Figura 4.17: Valores de tensão obtidos no teste de verificação da célula de carga de 1 kN, com teste de carregamento e descarregamento do corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, com barra de erros representando a incerteza expandida (95,45 %) para o carregamento .....	108
Figura 4.18: Valores de erro máximo, em porcentagem, obtidos na verificação da tensão mecânica calculada instantaneamente pelo programa SURISEL com célula de carga de 1 kN, no teste de verificação com carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm .....	109
Figura 4.19: Resultados obtidos nos testes de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, em função da força no corpo de prova .....	112
Figura 4.20: Resultados obtidos nos testes de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, em função da tensão no corpo de prova .....	113
Figura 4.21: Representação gráfica da Tab. 4.5 para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm (a) Valores de PFFS obtidos; (b) Valores de tensão mecânica calculados; (c) Valores de $K_I$ calculados .....	115

Figura 4.22: Resultados obtidos nos testes de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, em função da força no corpo de prova .....	116
Figura 4.23: Resultados obtidos nos testes de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, em função da tensão no corpo de prova .....	117
Figura 4.24: Representação gráfica da Tab. 4.6 para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm (a) Valores de PFFS obtidos; (b) Valores de tensão mecânica calculados; (c) Valores de $K_I$ calculados .....	119
Figura 4.25: Resultados obtidos nos testes de CPPAM, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, dureza igual a 36 HRC e raios de arredondamento do entalhe iguais a 80 $\mu\text{m}$ (Fig. 4.25a) e a 250 $\mu\text{m}$ (Fig. 4.25b) .....	121
Figura 4.26: Resultados obtidos nos testes de CPPAM, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, dureza igual a 40 HRC e raios de arredondamento do entalhe iguais a 80 $\mu\text{m}$ (Fig. 4.26a) e a 250 $\mu\text{m}$ (Fig. 4.26b) .....	122
Figura 4.27: Resultados obtidos nos testes de CPPAM, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, dureza igual a 44 HRC e raios de arredondamento do entalhe iguais a 80 $\mu\text{m}$ (Fig. 4.27a) e a 250 $\mu\text{m}$ (Fig. 4.27b) .....	123
Figura 4.28: Representação gráfica das Tabs. 4.7 e 4.8 para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, no patamar de $P_{TH}$ (a) Valores de força obtidos; (b) Valores de tensão mecânica calculados; (c) Valores de $K_{TH}$ calculados ..	126
Figura 4.29: Valores de corrente e tensão elétricas obtidos no teste CPPAM de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm .....	127
Figura 4.30: Resultados obtidos nos testes de CPPAM, para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, dureza igual a 36 HRC e raios de arredondamento do entalhe iguais a 80 $\mu\text{m}$ (Fig. 4.30a) e a 250 $\mu\text{m}$ (Fig. 4.30b) .....	129
Figura 4.31: Resultados obtidos nos testes de CPPAM, para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, dureza igual a 40 HRC e raios de arredondamento do entalhe iguais a 80 $\mu\text{m}$ (Fig. 4.31a) e a 250 $\mu\text{m}$ (Fig. 4.31b) .....	130
Figura 4.32: Resultados obtidos nos testes de CPPAM, para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, dureza igual a 44 HRC e raios de arredondamento do entalhe iguais a 80 $\mu\text{m}$ (Fig. 4.32a) e a 250 $\mu\text{m}$ (Fig. 4.32b) .....	131

Figura 4.33: Representação gráfica das Tabs. 4.9 e 4.10 para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, no patamar de $P_{TH}$ (a) Valores de força obtidos; (b) Valores de tensão mecânica calculados; (c) Valores de $K_{TH}$ calculados ..	134
Figura 4.34: Valores de corrente e tensão elétricas obtidos no teste de CPPAM de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm .....	135
Figura 4.35: Valores de derivada calculados para cada patamar de teste de CPPAM, para um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, raio do entalhe igual a 80 $\mu$ m e dureza igual a 36 HRC .....	136
Figura 4.36: Imagem realizada no MEV da superfície da raiz não lixada de um entalhe, com comprimento igual a 30 mm e raio igual a 250 $\mu$ m .....	137
Figura 4.37: Imagem realizada no MEV da superfície da raiz lixada de um entalhe, com comprimento igual a 30 mm e raio igual a 250 $\mu$ m .....	138
Figura 4.38: Imagem da medição realizada no MEV, na raiz não lixada do entalhe de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm e raio do entalhe igual a 250 $\mu$ m .....	139
Figura 4.39: Imagem realizada no MEV do mecanismo de fratura de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, dureza igual a 36 HRC e raio do entalhe igual a 250 $\mu$ m, após teste de determinação do valor de PFFS .....	140
Figura 4.40: Imagem realizada no MEV do mecanismo de fratura de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, dureza igual a 44 HRC e raio do entalhe igual a 80 $\mu$ m, após teste de CPPAM .....	141
Figura 4.41: Gráfico de resíduos x valores observados de força, para o teste de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm .....	144
Figura 4.42: Gráfico de resíduos x valores preditos de força, para o teste de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm .....	144
Figura 4.43: Gráfico de valores preditos x valores observados de força, para o teste de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm .....	145



Figura 4.44: Gráfico de resíduos x valores observados de redução de força (%), para os testes de CPPAM para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm .....	150
Figura 4.45: Gráfico de resíduos x valores preditos de redução de força (%), para os testes de CPPAM para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm .....	150
Figura 4.46: Gráfico de valores preditos x valores observados de redução de força (%), para os testes de CPPAM para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm .....	151

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Critérios de aceitabilidade e interpretações do teste R&r .....	15
Tabela 2.2: Perfis de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio, em função da dureza do corpo de prova (ASTM F1624, 2012) .....	32
Tabela 3.1: Matriz do planejamento fatorial completo $2^1 \times 2^1 \times 3^1$ proposta .....	44
Tabela 3.2: Valores de <i>offset</i> e tecnologia utilizados em cada passe de usinagem dos entalhes dos corpos de prova pelo processo de eletroerosão a fio, para ambos os raios de arredondamento do entalhe (80 $\mu\text{m}$ e 250 $\mu\text{m}$ ) .....	55
Tabela 3.3: Tabela das condições de usinagem para cada tecnologia de usinagem .....	56
Tabela 3.4: Configuração padrão dos testes de determinação do valor de PFFS para todos os corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm .....	78
Tabela 3.5: Configuração padrão dos testes de CPPAM para todos os corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm .....	78
Tabela 4.1: Composição química das amostras retiradas das chapas de aço AISI 4140 utilizadas para fabricação dos corpos de prova .....	93
Tabela 4.2: Parâmetros metrológicos do RSL 2 na medição da força pelas células de carga de 20 kN e de 1 kN, nos testes de verificação das montagens do RSL 2 com carregamento e descarregamento ao ar .....	113
Tabela 4.3: Parâmetros metrológicos do ângulo, medido nos testes de verificação das montagens do RSL 2, com carregamento e descarregamento, ao ar, para as células de carga de 20 kN e de 1 kN .....	113
Tabela 4.4: Parâmetros metrológicos da tensão calculada, nos testes de verificação das montagens do RSL 2, com carregamento e descarregamento, ao ar, para as células de carga de 20 kN e de 1 kN .....	114

Tabela 4.5: Resultados de PFFS, tensão máxima, $K_{TH}$ e incerteza expandida (95,45 %) da força e da tensão máxima para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm .....	117
Tabela 4.6: Resultados de PFFS, tensão máxima, $K_{TH}$ e incerteza expandida (95,45 %) da força e da tensão máxima para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm .....	121
Tabela 4.7: Valores de força, tensão no patamar de $P_{TH}$ e incerteza expandida (95,45 %) dos testes hidrogenados para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm .....	127
Tabela 4.8: Valores de $K_{TH}$ para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, nos testes de CPPMA que determinaram o patamar de $P_{TH}$ .....	128
Tabela 4.9: Valores de força, tensão no patamar de $P_{TH}$ e incerteza expandida (95,45 %) dos testes hidrogenados para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm .....	133
Tabela 4.10: Valores de $K_{TH}$ para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, nos testes de CPPMA que determinaram o patamar de $P_{TH}$ .....	134
Tabela 4.11: Resultados da ANOVA completa para os testes de determinação do valor de PFFS, com confiabilidade estatística igual a 95 % .....	142
Tabela 4.12: Resultados da ANOVA reduzida para os testes de determinação do valor de PFFS, com confiabilidade estatística igual a 95 % .....	146
Tabela 4.13: Resultados da ANOVA para os testes de determinação do valor de PFFS para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, com confiabilidade estatística igual a 95 % .....	146
Tabela 4.14: Resultados da ANOVA para os testes de determinação do valor de PFFS para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, com confiabilidade estatística igual a 95 % .....	147
Tabela 4.15: Resultados da ANOVA completa para a redução percentual de força devido à fragilização por hidrogênio, com confiabilidade estatística igual a 95 % .....	148
Tabela 4.16: Resultados da ANOVA reduzida para a redução percentual de força devido à fragilização por hidrogênio, com confiabilidade estatística igual a 95 % .....	152

Tabela 4.17: Resultados do teste R&r para os testes de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm .....	153
--	-----

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

### Símbolos latinos

$b$	Largura do corpo de prova
$d_{A1}$	Distância entre o topo do adaptador superior e o centro do furo do rolete mais acima no adaptador superior do corpo de prova no RSL 2
$d_{A2}$	Distância entre a base do adaptador inferior e o centro do furo do rolete mais abaixo no adaptador inferior do corpo de prova no RSL 2
$d_1$	Distância vertical entre o centro do eixo de giro do braço e o centro do furo do rolete mais abaixo no braço no RSL 2
$d_3$	Distância horizontal do eixo de giro do braço em relação ao eixo central do corpo de prova no RSL 2
$d_6$	Distância vertical entre o centro do rolete inferior do braço de carregamento e o centro do rolete superior do suporte do corpo de prova no RSL 2
$d_s$	Maior distância vertical entre centros dos furos dos roletes do suporte do corpo de prova no RSL 2
$d_B$	Maior distância vertical entre centros dos furos dos roletes do braço no RSL 2
$E_{máx}$	Erro máximo associado à tensão mecânica e à medição de força no corpo de prova no RSL 2
$E$	Módulo de elasticidade do material do corpo de prova no RSL 2
$F$	F-valor de uma distribuição de Fisher
$F$	Força medida pela célula de carga no RSL 2
$F_a$	Força aplicada pelo atuador linear do RSL 2
$\bar{F}_{CF}$	Média aritmética dos valores de força lidos pela célula de carga
$GP$	Índice que indica se o pulso elétrico é quadrado ou não no processo de usinagem por eletroerosão a fio
$h$	Base do entalhe: altura do corpo de prova subtraída da profundidade do entalhe no RSL 2

$k$	Fator de abrangência
$K_p$	Constante proporcional dos controladores PID de força e posição
$K_i$	Constante integral dos controladores PID de força e posição
$K_d$	Constante derivativa dos controladores PID de força e posição
$K_I$	<i>Mode I stress intensity factor</i>
$K_{TH}$	<i>Threshold stress strength factor</i>
$K_{ISSC}$	<i>Critical stress intensity factor</i>
H0	Hipótese nula
H1	Hipótese alternativa
$IP$	Índice relacionado à corrente elétrica no processo de usinagem por eletroerosão a fio
$L_{CP}$	Comprimento do corpo de prova
$M$	Mensurando em questão
$OFF$	Tempo de duração entre dois pulsos durante o qual não há passagem de corrente elétrica no processo de usinagem por eletroerosão a fio
$ON$	Tempo de duração do pulso elétrico no processo de usinagem por eletroerosão a fio
p	p-valor
$P_{MAX}$	Força máxima de ruptura do corpo de prova em carregamento contínuo e livre de hidrogênio
$P_{TH}$	Força limite de ruptura
$R_a$	Rugosidade média
$R_q$	Rugosidade média quadrática
$SV$	Índice relacionado ao valor padrão da tensão elétrica em vazio no processo de usinagem por eletroerosão a fio
$u_c$	Incerteza padrão combinada
U	Incerteza padrão expandida
$x$	Coeficiente que acompanha o cosseno do ângulo de giro do braço do equipamento, na equação de cálculo da tensão mecânica no corpo de prova no RSL 2
$y$	Coeficiente que acompanha o seno do ângulo de giro do braço do equipamento, na equação de cálculo da tensão mecânica no corpo de prova no RSL 2
$\overline{X}$	Média aritmética dos valores obtidos durante a medição em questão
$X$	Eixo de medição da máquina de medir por coordenadas e do projetor de perfil
$Y$	Eixo de medição da máquina de medir por coordenadas e do projetor de

	perfil
Z	Eixo vertical de medição da máquina de medir por coordenadas
°Bx	Índice Brix
//	Desvio de paralelismo entre as faces dos corpos de prova
⊥	Desvio de perpendicularidade entre as faces adjacentes dos corpos de prova

## Símbolos gregos

$\Delta A$	Correção associada à ampliação da objetiva utilizada no projetor de perfil e no microscópio óptico
$\Delta E_a$	Correção associada ao erro de apalpamento na máquina de medir por coordenadas
$\Delta Hist_F$	Correção associada à histerese apresentada pela célula de carga quando submetida à tração no RSL 2
$\Delta IC_s$	Correção associada à incerteza de calibração do <i>encoder</i> no RSL 2
$\Delta IC_F$	Correção associada à incerteza de calibração da célula de carga
$\Delta IC$	Correção associada à calibração do sistema de medição em questão
$\Delta Lin_F$	Correção associada ao desvio de linearidade apresentado pela célula de carga quando submetida à tração no RSL 2
$\Delta R_s$	Correção associada à resolução do <i>encoder</i> no RSL 2
$\Delta R_F$	Correção associada à resolução da célula de carga no RSL 2
$\Delta R$	Correção devido à resolução do sistema de medição em questão
$\alpha$	Nível de significância
$\alpha$	Erro do tipo I
$\beta$	Erro do tipo II
$\varepsilon$	Deformação no corpo de prova no RSL 2
$\theta$	Ângulo de giro do braço medido pelo <i>encoder</i> no RSL 2
$\overline{\theta}$	Média aritmética dos ângulos medidos pelo <i>encoder</i> no RSL 2
$\phi_S$	Diâmetro do furo do rolete inferior (no suporte) do RSL 2
$\phi_B$	Diâmetro do furo do rolete superior (braço) do RSL 2
$\phi_{A1}$	Diâmetro do furo do rolete mais acima no adaptador superior do corpo de prova no RSL 2
$\phi_{A2}$	Diâmetro do furo do rolete mais abaixo no adaptador inferior do corpo de prova no RSL 2

## Siglas e abreviaturas

AV	<i>Appraiser Variation</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
AMS	<i>Aerospace Material Standards</i>
ANOVA	Análise de variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BTD	Baixa Taxa de Deformação
CEP	Controle Estatístico de Processo
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CPPAM	Carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio
CTOD	<i>Crack Tip Opening Displacement</i>
DCB	<i>Double Cantilever Beam</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i>
EHT	<i>Electron High Tension</i>
EV	<i>Equipment Variation</i>
<i>et al</i>	<i>et alius</i>
f.e.m.	Força eletromotriz
GDS	<i>Glow-discharge optical emission spectroscopy</i>
GR&r	<i>Gage Repeatability and Reproducibility</i>
GUM	<i>Guide to the expression of uncertainty in measurement</i>
HBM	<i>Hottinger Baldwin Messtechnik</i>
HRC	Dureza Rockwell C
iGPS	<i>Intelligent Global Pooling Systems</i>
INM	Instituto Nacional de Metrologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISO/IEC	<i>International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission</i>
ISO/TS	<i>International Organization for Standardization / Technical Specification</i>
JCGM	<i>Joint Committee for Guides in Metrology</i>



LabView	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
LECO	<i>Laboratory Equipment Corporation</i>
LTAD	Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MMC	Máquina de medir por coordenadas
MSA	<i>Measurement Systems Analysis</i>
NACE	<i>National Association of Corrosion Engineers</i>
ndc	Número de categorias distintas
Nital	<i>Solution of nitric acid and alcohol</i>
PFFS	<i>Point of Fast Fracture Strength</i>
PPR	Pulsos por revolução
PV	<i>Part Variation</i>
R	Repetibilidade
r	Reprodutibilidade
R&r	Repetibilidade e reprodutibilidade
RMS	<i>Root Mean Square in microinches</i>
RPM	Rotações por minuto
RS232	<i>Recommended Standard 232</i>
RSL	<i>Rising Step Load</i>
RSL 1	Equipamento utilizado em outra dissertação
RSL 2	Equipamento utilizado neste trabalho
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SE	<i>Secondary electrons</i>
SFH	Susceptibilidade à fragilização por hidrogênio
SPT	<i>Small Punch Test</i>
SURISEL	Programa supervisor do RSL 2
TV	<i>Total Variation</i>
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia
ZTA	Zona termicamente afetada

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I: Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Fragilização por hidrogênio .....	1
1.2. Avaliação de sistemas de medição .....	3
1.3. Objetivos gerais .....	5
1.4. Objetivos específicos .....	6
1.5. Justificativa .....	6
1.6. Organização do trabalho .....	7
<b>CAPÍTULO II: Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>9</b>
2.1. Avaliação do desempenho metrológico de sistemas de medição .....	9
2.1.1. <i>Teste de repetibilidade e reprodutibilidade (R&amp;r)</i> .....	14
2.2. Análise de variância (ANOVA) .....	18
2.3. Planejamento de experimentos .....	20
2.4. Incerteza de medição .....	21
2.4.1. <i>Método GUM</i> .....	22
2.4.2. <i>Método de Monte Carlo</i> .....	22
2.5. Fragilização por hidrogênio e seus mecanismos .....	23
2.5.1. <i>Teoria da pressão</i> .....	26
2.5.2. <i>Teoria da decoesão</i> .....	26

2.5.3. Teoria da plasticidade localizada .....	27
2.5.4. Teoria da formação de hidretos .....	27
2.6. Métodos de análise da susceptibilidade à fragilização por hidrogênio .....	28
2.6.1. Teste de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio (CPPAM) .....	30
2.7. Proteção catódica .....	37
2.7.1. Proteção catódica galvânica .....	37
2.7.2. Proteção catódica por corrente impressa .....	38
2.8. Usinagem por eletroerosão .....	39
2.8.1. Camada refundida e zona termicamente afetada .....	40
<b>CAPÍTULO III: Procedimento Experimental .....</b>	<b>42</b>
3.1. Planejamento dos experimentos .....	42
3.2. Fabricação dos corpos de prova .....	47
3.2.1. Caracterização do material das chapas de aço AISI 4140 .....	50
3.2.2. Análise metalográfica de amostras das chapas de aço AISI 4140 .....	51
3.2.3. Tratamento térmico dos corpos de prova .....	53
3.2.4. Usinagem do entalhe nos corpos de prova .....	54
3.3. Controle dimensional e geométrico dos corpos de prova .....	58
3.3.1. Procedimento de medição da rugosidade do entalhe .....	58
3.3.2. Medição da topografia em um corpo de prova .....	59
3.3.3. Procedimento de medição do raio de arredondamento do entalhe .....	59
3.3.4. Procedimento de medição das dimensões, ângulos e tolerâncias de orientação .....	60
3.3.5. Avaliação da incerteza de medição durante o controle dimensional e geométrico dos corpos de prova .....	62
3.4. Procedimento experimental .....	63
3.4.1. Configuração do equipamento .....	63

3.4.2. Cálculo da tensão mecânica no corpo de prova .....	65
3.4.3. Metodologia para realização dos testes de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio (CPPAM) no RSL 2 .....	68
3.4.4. Fontes de erro na operação do RSL 2 .....	69
3.5. Verificação das duas montagens do RSL 2 .....	71
3.5.1. Cálculo da incerteza associada à força medida pela célula de carga .....	76
3.5.2. Cálculo da incerteza associada ao ângulo medido pelo encoder .....	77
3.5.3. Cálculo da incerteza de medição associada à tensão mecânica .....	77
3.6. Testes dos corpos de prova com carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio (CPPAM) .....	79
3.6.1. Hidrogenação dos corpos de prova .....	82
3.7. Análise dos corpos de prova no microscópio eletrônico de varredura (MEV) ....	83
3.7.1. Análise do efeito do lixamento na raiz do entalhe dos corpos de prova ..	84
3.7.2. Análise da espessura da camada refundida na raiz do entalhe .....	84
3.7.3. Análise dos mecanismos de fratura dos corpos de prova .....	85
3.8. Análise de variância e teste de repetibilidade e reprodutibilidade .....	86
<b>CAPÍTULO IV: Resultados e Discussões .....</b>	<b>90</b>
4.1. Caracterização do material dos corpos de prova .....	90
4.1.1. Resultados da análise de composição química do aço AISI 4140 .....	90
4.1.2. Resultados da análise metalográfica do aço AISI 4140 .....	91
4.1.3. Resultados da medição de dureza dos corpos de prova .....	94
4.1.4. Resultados do controle dimensional e geométrico dos corpos de prova ..	98
4.2. Resultados da verificação das montagens do RSL 2 .....	98
4.2.1. Resultados obtidos na verificação da célula de carga de 20 kN .....	99
4.2.2. Resultados obtidos na verificação da célula de carga de 1 kN .....	104

4.3. Resultados obtidos nos testes de determinação do valor de PFFS .....	112
4.3.1. Resultados obtidos nos testes com carregamento contínuo ao ar, para determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm .....	112
4.3.2. Resultados obtidos nos testes com carregamento contínuo ao ar, para determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm .....	117
4.4. Testes de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio .....	121
4.4.1. Testes de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio (CPPAM) para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm .....	121
4.4.2. Testes de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio (CPPAM) para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm .....	128
4.5. Resultados de análise dos corpos de prova no microscópio eletrônico de varredura (MEV) .....	137
4.5.1. Resultados da análise do efeito do lixamento na raiz do entalhe dos corpos de prova .....	138
4.5.2. Resultados da análise de camada refundida .....	139
4.5.3. Resultados da análise dos mecanismos de fratura dos corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm .....	140
4.6. Resultados de análise de variância (ANOVA) .....	142
4.6.1. Resultados da análise de variância para testes de determinação do valor de PFFS .....	142
4.6.2. Resultados da análise de variância para testes de CPPAM .....	149
4.7. Resultados do teste R&r .....	153
<b>CAPÍTULO V: Conclusões .....</b>	<b>155</b>
Aspectos metrológicos .....	155
Susceptibilidade à fragilização por hidrogênio do aço AISI 4140 .....	157
Análise estatística (ANOVA) .....	157

<i>Métodos de medição desenvolvidos</i> .....	158
<i>Análise dos corpos de prova no MEV</i> .....	158
<b>CAPÍTULO VI: Sugestões de Trabalhos Futuros</b> .....	<b>159</b>
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>160</b>
<b>Apêndice I: Desenhos técnicos para fabricação dos corpos de prova</b> .....	<b>179</b>
<b>Apêndice II: Procedimento desenvolvido para lixamento da raiz do entalhe dos corpos de prova</b> .....	<b>182</b>
<b>Apêndice III: Procedimento de medição da rugosidade da raiz do entalhe no interferômetro</b> .....	<b>185</b>
<b>Apêndice IV: Determinação da resolução da medição com microscópio óptico</b> .....	<b>190</b>
<b>Apêndice V: Verificação da ferramenta “círculo” do microscópio óptico utilizada na medição do raio de arredondamento do entalhe</b> .....	<b>196</b>
<b>Apêndice VI: Rotina MATLAB para cálculo do perfil de carregamento em patamares dos corpos de prova</b> .....	<b>201</b>
<b>Apêndice VII: Rotina MATLAB para cálculo dos coeficientes <math>x</math> e <math>y</math> da equação da tensão mecânica no corpo de prova</b> .....	<b>202</b>
<b>Apêndice VIII: Valores dos coeficientes calculados <math>x</math> e <math>y</math> da equação da tensão mecânica no corpo de prova</b> .....	<b>204</b>
<b>Apêndice IX: Rotinas MATLAB para cálculo da incerteza associada à tensão mecânica no corpo de prova no ensaio de verificação (20 kN e 1 kN)</b> .....	<b>206</b>
<b>Apêndice X: Controle dimensional e geométrico dos corpos de prova</b> .....	<b>215</b>
<b>Apêndice XI: Tabelas da verificação das duas montagens do equipamento</b> .....	<b>246</b>

<b>Apêndice XII: Equações para cálculo do fator de intensificação de tensão mecânica (<math>K_{TH}</math>) em corpos de prova uni entalhados e em esforço de flexão a quatro pontos (<i>4-point Bend Single Edge Notched</i>) .....</b>	<b>254</b>
<b>Apêndice XIII: Rotina MATLAB para determinação numérica do patamar de <math>P_{TH}</math> .....</b>	<b>257</b>
<b>Anexo I: Características do módulo de aquisição de dados HBM QuantumX MX840B .....</b>	<b>261</b>
<b>Anexo II: Certificado de calibração do espectrômetro de emissão óptica por plasma induzido .....</b>	<b>262</b>
<b>Anexo III: Certificado de calibração do forno terceirizado .....</b>	<b>273</b>
<b>Anexo IV: Características técnicas da máquina de eletroerosão a fio .....</b>	<b>284</b>
<b>Anexo V: Certificado de calibração do refratômetro .....</b>	<b>289</b>
<b>Anexo VI: Características técnicas da lixadora e polidora portátil .....</b>	<b>292</b>
<b>Anexo VII: Certificado de calibração do interferômetro .....</b>	<b>299</b>
<b>Anexo VIII: Certificado de calibração do traçador de alturas digital .....</b>	<b>303</b>
<b>Anexo IX: Certificado de calibração do desempenho .....</b>	<b>305</b>
<b>Anexo X: Certificado de calibração do termohigrômetro digital .....</b>	<b>307</b>
<b>Anexo XI: Certificado de calibração do projetor de perfil .....</b>	<b>309</b>
<b>Anexo XII: Certificado de calibração da máquina de medir por coordenadas .....</b>	<b>313</b>
<b>Anexo XIII: Certificado de calibração da célula de carga de 20 kN .....</b>	<b>317</b>

<b>Anexo XIV: Certificado de calibração da célula de carga de 1 kN .....</b>	<b>319</b>
<b>Anexo XV: Declaração de conformidade do <i>encoder</i> incremental rotativo .....</b>	<b>321</b>
<b>Anexo XVI: Certificado de calibração dos extensômetros .....</b>	<b>322</b>
<b>Anexo XVII: Características do potenciostato modelo PGSTAT204 da Metrohm ..</b>	<b>323</b>
<b>Anexo XVIII: Certificado de verificação do MEV .....</b>	<b>324</b>



# CAPÍTULO I

## Introdução

Neste capítulo é apresentada uma breve introdução sobre a fragilização por hidrogênio, avaliação de sistemas de medição, objetivos gerais, objetivos específicos, justificativa e organização do trabalho.

### 1.1. Fragilização por hidrogênio

A corrosão tem sido a mais importante causa que conduz à deterioração dos materiais. Considerando-se que as reações de corrosão são espontâneas, o fenômeno é um produto do determinismo termodinâmico (DUTRA; NUNES, 2011). Dentre os métodos de combate à corrosão, destaca-se a proteção catódica por eliminar por completo praticamente todos os processos de corrosão e, conseqüentemente, tornar o material metálico imune ao seu ataque. A proteção catódica consiste na transformação da estrutura metálica que se deseja proteger, no cátodo de uma pilha artificial, de modo a tornar as reações de corrosão termodinamicamente impossíveis e, portanto, evitando a deterioração do material (DUTRA; NUNES, 2011), polarizando o cátodo em um potencial em que o mesmo é mantido. Por outro lado, a proteção catódica causa fragilização por hidrogênio. Parkins *et al.* (1982) e Hongchi *et al.* (2015) destacaram que a proteção catódica tem sido um dos principais causadores de fragilização por hidrogênio. A Figura 1.1 ilustra um parafuso revestido com cromo duro, fragilizado por hidrogênio.



Figura 1.1: Fragilização por hidrogênio em um parafuso revestido de cromo duro (HERRING, 2010)

Exemplos de setores da indústria que experimentam os efeitos nocivos do método de proteção catódica são a indústria naval e aplicações de perfuração e produção em campos de petróleo, pela necessidade de utilização de aços de alta resistência mecânica (maiores do que 1 000 MPa). Ao se aplicar proteção catódica para controlar a corrosão do aço, ocorre a absorção de hidrogênio da água do mar e a resistência mecânica do material diminui (CWIEK, 2009). Em outro setor relevante para a economia, o de óleo e gás, também é possível identificar prejuízos importantes devido à fragilização por hidrogênio. Estima-se que 25 % das falhas que ocorrem neste tipo de indústria são provocadas por fraturas associadas ao hidrogênio (SILVA *et al.*, 2007). Aços de alta resistência mecânica e com durezas mais elevadas são mais susceptíveis à fragilização por hidrogênio (NANNINGA, 2005, NANNINGA *et al.*, 2010, CHEN *et al.*, 2014). Pereira *et al.* (2015) mostraram que a susceptibilidade à fragilização pelo hidrogênio está fortemente ligada à microestrutura e, principalmente, ao nível de tensões internas do material.

Raymond (1996) patenteou um equipamento que permite a avaliação da susceptibilidade à fragilização por hidrogênio (SFH) de aços de elevada resistência mecânica, como o aço AISI 4140 amplamente utilizado na indústria de óleo e gás. Este equipamento possibilita a realização de testes de carregamento em patamares progressivos sob meio assistido (*rising step load* – RSL), por meio da solicitação mecânica de um corpo de prova com seção transversal quadrada ou circular com um entalhe em “V”, protegido catodicamente e imerso em um fluido eletrolítico (geralmente água destilada e cloreto de sódio, com concentração igual a 3,5 % grau técnico), que age como fonte de hidrogênio para o corpo de

prova. Utilizando-se patamares de força, com cada patamar sendo incrementado com 5 % do valor da força de fratura de um corpo de prova testado ao ar livre em carregamento contínuo, o corpo de prova é carregado mecanicamente, sob hidrogenação, até a sua fratura ou até atingir o tempo limite de ensaio. A Figura 1.2 apresenta um esquema do equipamento mencionado.

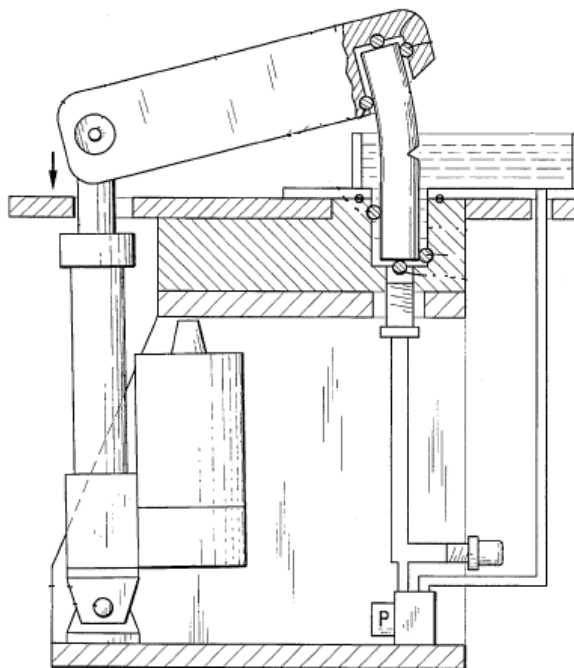


Figura 1.2: Esquema do equipamento RSL patenteado (RAYMOND, 1996, modificado)

## 1.2. Avaliação de sistemas de medição

Embora as normas ASTM F519 (ASTM, 2017) e ASTM F1624 (ASTM, 2012) especifiquem critérios para fabricação dos corpos de prova e para a operação do RSL, respectivamente, estas não apresentam procedimentos para efetuar a avaliação do desempenho metrológico do mesmo.

Avaliar o comportamento metrológico de um sistema de medição é um importante aspecto de muitas atividades de melhoria da qualidade e de processos. Nos últimos anos, após a introdução das normas ISO 9000 (ISO, 2015), ISO/TS 16949 (ISO, 2009) e do programa Seis Sigma, as pessoas que efetuam o controle de qualidade passaram a se concentrar mais fortemente no sistema de medição utilizado, bem como nos problemas de repetibilidade e

reprodutibilidade associados (PAN, 2006). Erros de medição estão principalmente associados a quatro fatores, quais sejam: instrumentos de medição, operadores, peças medidas e ambiente de medição. Nesse contexto, a avaliação da variabilidade do processo desempenha um papel fundamental na melhoria da qualidade, pois apenas com um sistema de medição que tem repetibilidade e reprodutibilidade aceitáveis é que a adequação do processo de medição pode ser determinado (PAN, 2004).

Medições realizadas em laboratórios de universidades e em ambientes industriais ocorrem usualmente sob condições significativamente menos controladas do que as existentes por ocasião da calibração do sistema de medição em um laboratório de metrologia credenciado pelo INMETRO. Instabilidades ambientais (vibração mecânica transmitida pelo ar e pelo solo, variações de temperatura ambiente, partículas suspensas no ar, entre outros), diferenças entre operadores, características do mensurando e outros aspectos da produção são fortes fatores de influência que podem levar a incerteza do processo de medição para níveis muito acima dos encontrados nas condições de calibração (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

Mesmo sob as condições mais severas, sistemas de medição têm de ser capazes de fornecer resultados de medições confiáveis ao longo do tempo, sem as quais não é possível garantir a qualidade dos processos de produção. Nesse contexto, é conveniente observar a medição como um processo industrial, cujas características podem se modificar com o tempo, mas devem ser mantidas dentro de limites aceitáveis. Assim como um processo de produção deve produzir bens de qualidade, um processo de medição deve produzir resultados de medições de qualidade, isto é, resultados de medições confiáveis (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008). Em muitos processos, as peças são medidas para garantir que certas especificações sejam atendidas. Contudo, a interpretação destas medições pode ser errônea se o sistema de medição em si não é adequado (STEVENS *et al.*, 2010).

Um sistema ideal de medição produz resultados de medições corretos a cada vez que é usado, possuindo as seguintes propriedades estatísticas: variância zero e probabilidade nula de classificar erroneamente qualquer produto medido. Entretanto, o sistema de medição está sujeito a variações que são devidas a causas comuns e causas especiais, que devem ser conhecidas, investigadas e reduzidas para diminuir a sua influência sobre o processo (AIAG, 2010). As variações devido a causas comuns constituem a variabilidade natural do processo e não podem ser totalmente eliminadas, apenas reduzidas, enquanto que a variabilidade devido a causas especiais deve ser eliminada (SLACK *et al.*, 2002). O processo estará estatisticamente controlado se a variabilidade natural for constante (COSTA *et al.*, 2004).

Para melhor controle e melhoria contínua dos processos de produção, a avaliação do desempenho e da qualidade de sistemas de medição é uma questão primordial (RUNJE *et al.*, 2017).

As técnicas de calibração possuem papel muito importante na avaliação do desempenho metrológico dos sistemas de medição. Geralmente normas técnicas são elaboradas especificando os procedimentos que devem ser utilizados para esta finalidade. Entretanto, não foram encontradas normas especificamente desenvolvidas para calibração de equipamentos que operam pelo método RSL. Ainda, não foram encontrados na literatura trabalhos abordando a avaliação do desempenho dos mesmos.

Neste contexto, surgiu a proposta do presente trabalho, que tem como objetivo principal avaliar o desempenho de um equipamento, denominado RSL 2, utilizado para análise da susceptibilidade à fragilização por hidrogênio pelo método RSL do aço AISI 4140. Para tanto, foram efetuados testes de verificação das duas montagens do equipamento e um teste de repetibilidade e reprodutibilidade (R&r) foi igualmente aplicado. Os efeitos de três fatores (seção transversal do corpo de prova, raio de arredondamento da raiz do entalhe e dureza) nos testes do RSL 2 foram estatisticamente avaliados, por meio de um planejamento fatorial completo  $2^1 \times 2^1 \times 3^1$ . Apresenta-se, ainda, a estimativa do erro máximo associado à força e à tensão mecânica, bem como a avaliação da incerteza de medição por meio da aplicação do método proposto no JCGM 100 (BIPM *et al.*, 2008) e o cálculo do erro, histerese, não-linearidade, precisão, com avaliação qualitativa da exatidão.

### 1.3. Objetivos gerais

Este trabalho teve como objetivos gerais:

- Avaliar o desempenho de um equipamento denominado RSL 2 utilizado para análise da susceptibilidade à fragilização por hidrogênio, pelo método RSL, de aços de alta resistência mecânica;
- Investigar por meio de um planejamento fatorial completo  $2^1 \times 2^1 \times 3^1$  e uma análise de variância (ANOVA) o efeito das variáveis seção transversal do corpo de prova, raio de arredondamento da raiz do entalhe e dureza do corpo de prova nos valores de força obtidos durante os testes no RSL 2 com corpos de prova de aço AISI 4140.

#### 1.4. Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Desenvolver um procedimento para obtenção da rugosidade  $R_q$  da raiz do entalhe dos corpos de prova, exigida na norma ASTM F519 (ASTM, 2017);
- Desenvolver um procedimento para medir a rugosidade  $R_q$  da raiz do entalhe dos corpos de prova, exigida na norma ASTM F519 (ASTM, 2017);
- Desenvolver um procedimento para medir o raio de arredondamento da raiz do entalhe dos corpos de prova, exigida na norma ASTM F519 (ASTM, 2017);
- Por meio da aplicação do teste de repetibilidade e reprodutibilidade (R&r), avaliar a repetibilidade e a reprodutibilidade do RSL 2;
- Quantificar a espessura da camada refundida gerada na raiz do entalhe dos corpos de prova, durante o processo de eletroerosão a fio;
- Analisar os mecanismos de fratura dos corpos de prova submetidos ao teste de carregamento contínuo ao ar e ao teste de carregamento progressivo em patamares assistido pelo meio (CPPAM).

#### 1.5. Justificativa

Os impactos nocivos da fragilização por hidrogênio são diversos, dentre eles podem ser citados: nucleação, crescimento e propagação de trincas (GINGEL, 1997); nucleação, crescimento e propagação de trincas na forma de degraus, levando o componente mecânico à fratura (OKAMOTO, 2010); falha devido à tensão mecânica resultante nas pequenas regiões de empilhamento de discordâncias com ultrapassagem do limite de ruptura do material (STROE, 2006). Quando o hidrogênio atinge uma concentração crítica na estrutura cristalina de ligas metálicas que possuem titânio, vanádio, zircônio, nióbio, tântalo, magnésio ou urânio, pode formar hidretos frágeis que diminuem a tenacidade do metal (STROE, 2006).

Desta forma, o desenvolvimento de pesquisas que visam o entendimento da susceptibilidade à fragilização por hidrogênio dos mais variados metais é essencial para diminuir os impactos negativos que esta acarreta.

Neste contexto, um primeiro equipamento que opera segundo o método RSL foi projetado e fabricado no LTAD (RSL 1), com alguns testes preliminares conduzidos por

Martiniano (2016). Este autor realizou experimentos utilizando corpos de prova de aço AISI 4140 com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, raio de arredondamento do entalhe igual a 250  $\mu\text{m}$  e dureza superficial igual a 40 HRC.

Assim sendo, fez-se necessário conduzir novos experimentos utilizando-se o aço AISI 4140 e variando-se os valores dos fatores (seção transversal do corpo de prova, raio de arredondamento do entalhe e dureza do corpo de prova) de forma que fosse possível identificar se estes fatores afetam de forma estatisticamente significativa os valores de tensão mecânica, bem como avaliar a reprodutibilidade dos resultados dos testes conduzidos no equipamento disponível, denominado RSL 2.

Duas dificuldades encontradas por Martiniano (2016) consistiram na impossibilidade de atender o requisito de acabamento superficial da raiz do entalhe dos corpos de provas (rugosidade  $Rq = 0,81 \mu\text{m}$ ) especificado na norma ASTM F519 (ASTM, 2017), utilizando o processo de eletroerosão a fio para fabricação do entalhe dos corpos de prova e medir a rugosidade na raiz do entalhe do corpo de prova. Consequentemente, neste trabalho dois processos adicionais foram propostos, desenvolvidos e validados para atender esses requisitos.

## **1.6. Organização do trabalho**

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre avaliação do desempenho metrológico de sistemas de medição; planejamento de experimentos; incerteza de medição; fragilização por hidrogênio e seus mecanismos; métodos de análise de susceptibilidade à fragilização por hidrogênio com ênfase no teste de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio (CPPAM); proteção catódica; usinagem por eletroerosão.

No terceiro capítulo é apresentado o procedimento experimental utilizado nesta dissertação, dividido em planejamento dos experimentos; fabricação dos corpos de prova; controle dimensional e geométrico dos corpos de prova; procedimento experimental; verificação das duas montagens do equipamento; testes dos corpos de prova com carregamento em patamares; análise dos corpos de prova no microscópio eletrônico de varredura (MEV); análise de variância e teste de repetibilidade e reprodutibilidade.

O quarto capítulo aborda os resultados de caracterização do material dos corpos de prova (análise da microestrutura e composição química), de verificação do equipamento e os resultados de queda percentual de força decorrentes dos testes de hidrogenação em cada condição, além das micrografias dos corpos de prova efetuadas no MEV, dos resultados de análise de variância e os resultados obtidos no teste de repetibilidade e reprodutibilidade.

O quinto capítulo apresenta as conclusões do presente trabalho.

O sexto capítulo apresenta as sugestões de trabalhos futuros.



# **CAPÍTULO II**

## **Revisão Bibliográfica**

Neste capítulo serão apresentados os seguintes tópicos: avaliação do desempenho metrológico de sistemas de medição; planejamento de experimentos; incerteza de medição; fragilização por hidrogênio e seus mecanismos; métodos de análise de susceptibilidade à fragilização por hidrogênio com ênfase no teste de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio (CPPAM); proteção catódica e usinagem por eletroerosão.

### **2.1. Avaliação do desempenho metrológico de sistemas de medição**

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) (INMETRO, 2012b), um sistema de medição é definido como o conjunto de um ou mais instrumentos de medição e frequentemente outros dispositivos, compreendendo, se necessário, reagentes e insumos, montado e adaptado para fornecer informações destinadas à obtenção dos valores medidos, dentro de intervalos especificados para grandezas de naturezas especificadas.

Para o Grupo de Ação da Indústria Automotiva (AIAG, 2010) um sistema de medição é o conjunto de instrumentos ou dispositivos de medição, padrões, operações, métodos, dispositivos de fixação, *software*, pessoal, ambiente e premissas usadas para quantificar a unidade de medição ou corrigir a avaliação da característica que está sendo medida, ou seja, o processo completo utilizado para obter um resultado de medição.

AIAG (2010) relatou que o Controle Estatístico de Processo (CEP) é normalmente usado para monitorar a capacidade de medição de um processo, e que o CEP não é apenas uma ferramenta útil, mas uma parte essencial para garantia de qualidade, pois sem boa

avaliação da capacidade e da confiabilidade da medição, os resultados de medição não podem ser considerados confiáveis (CHEN *et al.*, 2008).

A Análise do Sistema de Medição (*Measurement Systems Analysis* - MSA) desenvolvido pela AIAG é um procedimento sistemático que identifica os componentes das variações, nas avaliações de precisão e exatidão, dos instrumentos de medição usados em um sistema de medição (HE *et al.*, 2011). A MSA também pode ser definida como um método matemático e experimental, para determinar o quanto a variabilidade de um sistema de medição contribui para a variabilidade total do mesmo. A principal função do MSA é verificar se um sistema de medição é adequado ou não, no intuito de avaliar ou controlar um determinado processo ou produto, e se possível, identificar as causas da não adequação do sistema. Devido à importância dos dados para as atividades de gerenciamento de processos, é imprescindível que as medições realizadas para a coleta de dados sejam confiáveis, com o intuito de garantir que as ações a serem tomadas, baseadas nas análises dos dados de medição, sejam realmente adequadas (MENEZES, 2013).

Desde a adoção da MSA em 1991 por três importantes fabricantes de automóveis norte-americanos (*General Motors*, *Ford* e *Daimler/Chrysler*) e pela Sociedade Americana de Qualidade (*American Society for Quality*), esta abordagem passou a ser bastante utilizada no meio industrial. Além disso, com os vários problemas que podem surgir durante a fabricação de alta tecnologia, orientada para funções e produtos de ultra-precisão, a precisão dos sistemas de medição recebeu maior atenção na literatura (STEVENS *et al.*, 2010).

Os objetivos da MSA são: determinar a extensão da variabilidade presente na operação de um instrumento, identificar as fontes de variabilidade em um sistema de medição e avaliar a capacidade de um instrumento de medição (BURDICK *et al.*, 2003). A MSA é um importante elemento do programa Seis Sigma e da ISO/TS 16949 (LI; AL-REFAIE, 2008). Ela é utilizada para avaliar a confiabilidade de algumas variáveis de entrada importantes e dos principais dados de saída nos processos, permitindo a compreensão das variações causadas por operadores, máquinas, materiais, métodos ou meio ambiente e, em seguida, utilizar os dados analisados como referência para definir e implementar ações de melhoria (AIAG, 2010; AL-REFAIE; BATA 2010). A qualidade dos dados de medição está relacionada com as propriedades estatísticas das múltiplas medições obtidas de um sistema de medição operando sob condições estáveis. Uma das razões que mais contribui para a baixa qualidade dos dados é a variabilidade excessiva (AIAG, 2010).

Como em todos os processos, o sistema de medição é impactado por fontes de variação aleatórias e sistemáticas, que podem ocorrer devido a causas comuns e a causas especiais. As potenciais fontes de variação devem ser corretamente identificadas e eliminadas, para que a variação do sistema de medição seja controlada. A identificação de tais fontes pode ser concretizada por meio de diversos métodos como, por exemplo, o diagrama de causa e efeito ou diagrama de Ishikawa e o diagrama de árvore de falhas (AIAG, 2010).

É importante mencionar que todos os elementos de um sistema de medição (parâmetros de entrada e saída, padrões, operadores, programas computacionais, equipamentos de medição, procedimentos, fatores ambientais, entre outros) podem afetar a variação dos resultados e contribuir para a capacidade ou capacidade do sistema de medição. A capacidade do sistema de medição pode ser caracterizada pela quantificação de sua exatidão e precisão (RUNJE *et al.*, 2017). A exatidão de um sistema de medição é definida como o grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro de um mensurando (INMETRO, 2012; ASTM E177, 2014; ASTM E456, 2017; ASTM E691, 2018). A exatidão de medição não é uma grandeza e não lhe é atribuído um valor numérico. Uma medição é dita mais exata quando fornece um erro de medição menor (INMETRO, 2012).

Por sua vez, erro de medição é a diferença entre o valor medido de uma grandeza e o valor de referência (INMETRO, 2012; ASTM E177, 2014; ASTM E456, 2017; ASTM E691, 2018). Caso se suponha que um mensurando é representado por um único valor verdadeiro ou um conjunto de valores verdadeiros de amplitude desprezível, o erro de medição é desconhecido. É importante não confundir erro de medição com erro de produção ou erro humano (INMETRO, 2012). A exatidão do sistema de medição possui três componentes: *bias* (tendência ou viés), linearidade e estabilidade.

A precisão de um sistema de medição é definida como o grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas. A precisão de medição é geralmente expressa numericamente por características como o desvio padrão, a variância ou o coeficiente de variação, sob condições especificadas de medição (INMETRO, 2012; ASTM E177, 2014; ASTM E456, 2017; ASTM E691, 2018). A precisão do sistema de medição possui três componentes: precisão em condições de repetibilidade, precisão em condições intermediárias e precisão em condições de reprodutibilidade.

Desta forma a avaliação do desempenho metrológico dos sistemas de medição é de suma importância para a garantia da rastreabilidade dos mesmos. Esta avaliação pode ser

realizada por meio de procedimentos de calibração. Geralmente normas técnicas regionais, nacionais ou internacionais são elaboradas especificando os procedimentos que devem ser utilizados para esta finalidade. Entretanto, não foram encontradas normas especificamente desenvolvidas para a calibração de RSL. Ainda, não foram encontrados na literatura trabalhos abordando a avaliação do desempenho do mesmo. Neste contexto a estimativa de parâmetros metrológicos que caracterizam o sistema de medição surge como alternativa para avaliação do desempenho metrológico do mesmo.

ISO 10012 (ABNT, 2004) e ISO 14253-1 (ISO, 2017) trazem recomendações e definem os requisitos para verificar a confiabilidade metrológica de sistemas de medição que operam na produção. Algumas das normas são baseadas em análise de balanços de incerteza do processo de medição, como a norma ISO/TS 16949 (ISO, 2009). Em outras, a confiabilidade metrológica é comprovada por meio de análises da capacidade estatística do processo de medição (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008). A norma ISO 9001 (ISO, 2015) define de forma abrangente que a incerteza de medição nas atividades de inspeção e testes deve ser conhecida e compatível com as exigências de confiabilidade requeridas.

A norma ISO 10012 (ISO, 2004) traz a recomendação de que, ao medir e utilizar resultados, devem ser levadas em consideração todas as contribuições significativas na incerteza do processo de medição, incluindo aquelas atribuídas ao sistema e às influências dos operadores, dos procedimentos e do ambiente.

A norma ISO 14253-1 (ISO, 2017) define que a incerteza do processo de medição deve ser levada em consideração quando é analisada a conformidade de um processo ou de um produto diante de sua especificação. Essa recomendação leva em conta a redução da faixa de aceitação provocada pela presença da incerteza do processo no controle de qualidade. A parte 2 da norma ISO/TS 14253-2 (ISO, 2011) define uma metodologia para determinar a incerteza do sistema de medição na calibração e a incerteza do processo em operação.

Vale ressaltar que as normas da família ISO 9000 não garantem a obtenção de resultados de medição confiáveis, por tal motivo em 2005, a ISO/IEC 17025 foi oficialmente apresentada como a norma que regulamentaria a atuação dos laboratórios responsáveis pela realização de testes e calibrações. Desde a sua publicação, o conceito de incerteza de medição de testes tornou-se uma questão-chave para os laboratórios e seus clientes, pois, antes de 2005, apenas laboratórios de metrologia estavam diretamente envolvidos na quantificação da incerteza de medição (DÉSENFANT; PRIEL, 2017). Para reduzir as incertezas, a ISO/IEC 17025 (ABNT, 2017) foi formulada para avaliar erros do tipo I ( $\alpha$ ), que são o risco de

fabricantes julgarem produtos conformes como produtos defeituosos, e erros do tipo II ( $\beta$ ), que são o risco de consumidores julgarem produtos defeituosos como produtos conformes. Na prática, um sistema de medição não permite a obtenção das dimensões exatas do mensurando, mas fornece medições que se desviam com uma determinada amplitude do valor verdadeiro (AL-REFAIE; BATA 2010), além da presença de incertezas relacionadas à medição (PAN, 2004).

Alvarado (2010) avaliou o desempenho metrológico do sistema de medição iGPS (medição de grandes volumes), comparando as incertezas associadas às medições efetuadas por dois tipos de sensores: *mini-vector bars* e *iProbe*. O primeiro deles forneceu valores de incerteza menores do que os especificados no manual do fabricante, enquanto que o segundo apresentou valores de incerteza quatro vezes maiores do que os tolerados.

Theodoro *et al.* (2016) analisaram a incerteza de medição de um sensor de pressão piezelétrico, submetido a um sinal em forma de degrau. Os quatro parâmetros de resposta do sensor, utilizados para avaliação metrológica do sensor foram o *overshoot*, o tempo para atingir o *overshoot*, a frequência natural não amortecida e a relação de amortecimento. Utilizando o método de Monte Carlo com 1 000 000 iterações, os autores concluíram que a relação de amortecimento era a variável que mais contribuía para a incerteza de medição de pressão.

Brewer *et al.* (2015) observaram a repetibilidade e a estabilidade de eletrodos de Ag/AgCl para medição de pH fabricados nos Institutos Nacionais de Metrologia (INM) de 12 países, visando a obtenção da rastreabilidade dos sensores. O desvio padrão associado aos resultados de medição de 10 laboratórios foi menor do que o desvio padrão máximo, estabelecido em critérios internacionais de aceitação do sensor. A partir dos resultados obtidos, foram efetuados novos estudos que evidenciaram que, um novo processo de fabricação de um sensor em um determinado país, produz resultados com menores desvios padrão e, portanto, com maior repetibilidade. Os autores destacam que este estudo foi a primeira comparação para fornecer informações quantitativas sobre as diferenças no desempenho de eletrodos de Ag/AgCl preparados em INMs, fornecendo rastreabilidade para medição de pH. Os autores destacam ainda que isto constitui um passo importante para compreender a influência do método de fabricação na repetibilidade e no desempenho do sensor e que o estudo será utilizado para melhorar futuros métodos de comparação internacional na medição de pH.

A fim de reduzir as variações em um processo, é necessário identificar e quantificar as fontes de variação, a fim de compreender melhor o sistema de medição utilizado. Ao operar um sistema de medição, o erro de medição pode ser atribuído a várias fontes. Faz-se necessário realizar um estudo do sistema de medição, denominado como *Gage Repeatability and Reproducibility* (GR&r ou % GR&r) (AIAG, 2010; PANDIRIPALLI, 2010).

### 2.1.1 Teste de repetibilidade e reprodutibilidade (R&r)

A estimativa da repetibilidade e da reprodutibilidade de testes é uma etapa importante do processo de validação dos sistemas de medição, embora às vezes esquecido e negligenciado. O estudo ou teste R&r é muito utilizado de forma conclusiva para verificar a adequabilidade do sistema de medição (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

A repetibilidade de medição de um instrumento (R) é a precisão de medição sob um conjunto de condições de repetibilidade, as quais incluem o mesmo procedimento de medição, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições de operação e o mesmo local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período (INMETRO, 2012; ASTM E177, 2014; ASTM E456, 2017; ASTM E691, 2018).

A reprodutibilidade de medição de um instrumento (r) é a precisão de medição conforme um conjunto de condições de reprodutibilidade, as quais incluem diferentes locais, diferentes operadores, diferentes sistemas de medição e medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares (INMETRO, 2012; ASTM E177, 2014; ASTM E456, 2017; ASTM E691, 2018).

A reprodutibilidade é tipicamente definida como a variação das médias das medições feitas por diferentes operadores, utilizando-se um mesmo instrumento de medição, na medição de uma característica de uma mesma peça. Isto pode ser observado para instrumentos manuais, influenciados pela habilidade do operador. Entretanto, isto não é observado para processos de medição automatizados onde o operador não é a maior fonte de variação. Por esta razão, a reprodutibilidade é denominada como a variação média entre sistemas ou entre diferentes condições de medição (AIAG, 2010) ou, ainda, diferentes turnos de trabalho ou alterações de processo (CORTEZ *et al.*, 2016).

Como um componente da avaliação dos testes, as estimativas da repetibilidade e da reprodutibilidade de um teste são necessárias para avaliar a robustez e a transferência do método entre laboratórios (CARAGUEL *et al.*, 2009). Um instrumento de medição

perfeitamente calibrado pode ser incapaz de medir um produto ou controlar um processo. A capacidade do sistema de medição deve ser avaliada através de estudos de repetibilidade e reprodutibilidade (BURDICK *et al.*, 2003; PEDOTT, 2010).

Segundo Shiau (2000), Al-Refaie e Bata (2010) e Wang e Chien (2010), o estudo usado para medir as componentes de variação de uma análise do sistema de medição é chamado de *Gage Repeatability and Reproducibility* (GR&r), em que pretende-se determinar se a variabilidade do sistema de medição é menor do que a variabilidade do processo monitorado. Montgomery e Runger (1993b) indicaram que um sistema de medição deve desempenhar um papel ativo em ações de melhoria de qualidade realizadas pelas organizações, e que o estudo R&r deve ser usado para identificar as fontes de variações dentro dos processos de medição e quantificar essas variações.

Na aplicação do teste R&r, a porcentagem que cada fator representa na variação total do sistema é calculada e os valores são expressos em porcentagem de contribuição (PEDOTT, 2010). Porcentagens de contribuição de R&r (% GR&r) são consideradas aceitáveis se situadas entre 0 e 10 %; podem ser consideradas aceitáveis dependendo da importância de sua aplicação se situadas entre 10 % e 30 %, e são consideradas não aceitáveis se forem maiores do que 30 % (REGO, 1995). A Tabela 2.1 exhibe os critérios de aceitabilidade do teste R&r.

Tabela 2.1: Critérios de aceitabilidade e interpretações do teste R&r

<b>% GR&amp;r</b>	<b>Aceitabilidade do sistema de medição</b>	<b>Interpretação</b>
< 10 %	Aceitável	Nenhuma ação é requerida, o sistema de medição está conforme
10 % < % GR&r < 30 %	Depende da aplicação	A decisão deve ser tomada analisando-se a aplicação do sistema de medição, custo de reparo, manutenção e melhorias técnicas, com aprovação do cliente
> 30 %	Não aceitável	O sistema de medição não está conforme e ações de melhoria devem ser tomadas, como treinamento de pessoal, diminuição de erros de montagem, etc

O estudo do teste R&r pode ser efetuado utilizando-se várias técnicas. Os três principais métodos utilizados são o método da amplitude (*range method*), o método da média e amplitude (*average and range method*) e o método da ANOVA (AIAG, 2010).

Com exceção do método da amplitude, a análise efetuada é semelhante independentemente do método escolhido. O método da ANOVA é mais completo porque permite a obtenção do possível efeito de interações, o que não é realizável nos outros métodos. Entretanto, este método é mais complicado do que os outros dois e requer esforços computacionais e conhecimentos estatísticos consideráveis.

O método da amplitude fornece uma aproximação rápida da variabilidade de medição. Este método fornecerá apenas um panorama geral do sistema de medição, não decompondo a variabilidade em repetibilidade e reprodutibilidade. É normalmente usado como uma ferramenta de verificação rápida para verificar se o valor de R&r não foi alterado (AIAG, 2010). Montgomery e Runger (1993) afirmaram que o método da amplitude é menos preciso pois não separa a contribuição da variabilidade entre repetibilidade e reprodutibilidade.

O método da média e amplitude fornece uma estimativa de repetibilidade e da reprodutibilidade de um sistema de medição, avaliando as medições de um mesmo mensurando. Ao contrário do método da amplitude, esta abordagem permite a decomposição da variabilidade do sistema de medição em dois componentes separados, repetibilidade e reprodutibilidade (AIAG, 2010). O método consiste no cálculo de parâmetros estatísticos por meio de equações simples, apresentadas e explicadas no manual da MSA (AIAG, 2010). A vantagem em se utilizar o método da média e amplitude consiste nos cálculos que são feitos manualmente e, portanto, não induzir o usuário a erros de interpretação que poderiam ocorrer caso um programa ou um pacote estatístico fosse utilizado, como na abordagem do método da ANOVA.

O método da ANOVA é uma técnica estatística padrão e pode ser utilizada para analisar o erro de medição e outras fontes de variabilidade dos dados. Nessa abordagem, a variância pode ser decomposta em quatro categorias: peças, operadores, interação entre peças e operadores e erro de replicação. Qualquer configuração experimental pode ser analisada e as variâncias podem ser estimadas com mais precisão, com a obtenção de mais informações (como o efeito da interação entre peças e operadores) a partir dos dados experimentais. As desvantagens em utilizar-se o método da ANOVA são: os cálculos numéricos são mais



complexos, exigindo conhecimento estatístico e um computador com pacotes estatísticos para definição das equações de entrada e interpretação dos resultados.

Não são observadas diferenças significativas na utilização do método da média e amplitude e no método da ANOVA, podendo-se escolher entre os dois métodos para avaliar o erro de medição de um sistema (AIAG, 2010).

Al-Refaie e Bata (2010) sugeriram um procedimento de avaliação do sistema de medição e da capacidade do processo utilizando um estudo R&r com quatro índices ou critérios de qualidade, a saber: taxa de precisão à tolerância (P/T), relação sinal ruído (SNR), taxa de discriminação (DR) e índices de capacidade ( $C_p$  e  $C_{pk}$ ). Costa *et al.* (2005) propuseram a utilização do estudo R&r para projetar e avaliar um sistema de medição para avaliação quantitativa da ondulação superficial do papel. Lyu e Chen (2008) avaliaram a repetibilidade e a reprodutibilidade de um sistema de medição para dados do tipo atributo (não contínuas, divididas em quantitativas discretas, nominais e ordinais).

Peruchi *et al.* (2014) realizaram uma revisão sobre os principais métodos de teste R&r e relataram os trabalhos recentes publicados. Os autores destacaram as vantagens do método da ANOVA e suas aplicações e descreveram o uso da ANOVA multivariada, com aplicações. Dentre as principais, podem-se destacar trabalhos relacionados a testes em processos produtivos, processos automatizados de inspeção e testes de qualidade.

Zúñiga (2013) e Piratelli-Filho *et al.* (2014) aplicaram testes de repetibilidade e reprodutibilidade para avaliar o desempenho de um *scanner* laser. O teste R&r proposto foi executado por meio da aplicação de um planejamento de experimentos hierárquico com três variáveis. A análise foi efetuada por meio da análise de variância (ANOVA) e as variâncias associadas às variáveis foram determinadas. O teste permitiu determinar as variâncias associadas à repetibilidade e à reprodutibilidade, além de um índice R&r. De Mello *et al.* (2014) avaliaram a repetibilidade e a reprodutibilidade no processo de afiação de bits de HSS pelo método da média e amplitude. Os autores obtiveram um valor de % GR&r igual a 48 %, o que permitiu identificar fontes de erro na operação de afiação dos bits.

Barbé *et al.* (2016) utilizaram o teste R&r para avaliar as medições de duas características, comprimento axial do globo ocular e o diâmetro equatorial do cristalino, em 108 cachorros com catarata, via ecografia setorial de 10 MHz em modo B. Foram utilizados dois observadores, de modo que a repetibilidade foi avaliada por meio da comparação de quatro medições realizadas na mesma imagem, pelo observador A, e a reprodutibilidade foi estimada por meio da comparação entre as medições efetuadas pelos dois observadores, na

mesma imagem, com confiabilidade igual a 95 %. Os autores encontraram coeficientes de variação de repetibilidade menores do que 5 % para ambas as características. Com relação aos coeficientes de variação de reprodutibilidade, para o comprimento axial do globo ocular foi obtido um valor menor do que 10 %, ao passo que para o diâmetro equatorial do cristalino foi obtido um valor maior do que 10 %, com diferenças significativas entre as medições efetuadas pelos dois observadores. Os autores ressaltaram que a medição do diâmetro equatorial do cristalino de cachorros com catarata, via ecografia setorial de 10 MHz em modo B, deve ser realizada com cuidado, visto os erros de reprodutibilidade observados.

Zanobini *et al.* (2016) fizeram um estudo do teste R&r sublinhando que a repetibilidade e a reprodutibilidade são características importantes na avaliação de um sistema de medição e que o teste R&r permite entender quais são os fatores decisivos em um sistema de medição, viabilizando a averiguação e o controle estatístico da estabilidade do processo. Ottobelli *et al.* (2015) avaliaram a repetibilidade e a reprodutibilidade de um aparelho de bioressonância, utilizado para medir a pressão intraocular e concluíram que os dois parâmetros eram aceitáveis.

Reinstein *et al.* (2006) avaliaram a precisão, a repetibilidade e a reprodutibilidade das medições de dimensões laterais de um *scanner* digital de ultrassom com alta frequência. Os autores justificaram que as dimensões laterais são uma importante variável para determinar o comprimento de lentes intraoculares e um fator relevante na operação do *scanner*. Utilizou-se um micrômetro para medir as dimensões de um objeto com 10,80 mm de largura e avaliar a precisão do *scanner*. As medições realizadas por um operador experiente (especialista) e um operador recém-treinado foram utilizadas para estimar a reprodutibilidade do equipamento, enquanto que o desvio padrão das medições foi utilizado para avaliar a repetibilidade. Por meio de uma análise de variância, os autores concluíram que as medições efetuadas pelos dois operadores foram estatisticamente iguais. Os autores concluíram ainda, através de um gráfico R&r, que a repetibilidade e a reprodutibilidade do equipamento eram aceitáveis.

## **2.2. Análise de variância (ANOVA)**

Segundo a ISO 3534 (ISO, 1999), a análise da variância (ANOVA) é definida como a técnica que consiste na separação da variação total de uma variável de resposta em componentes significativos, associados a fontes específicas de variação. Esta é uma das mais

poderosas ferramentas de análise estatística já desenvolvida (DUNCAN, 1965). Em análises laboratoriais, os modelos de análise de variância têm sido utilizados para verificar a variabilidade associada a sistemas de medição (AIAG, 2010) e auxiliar na validação de métodos (FILIPE, 2007). Dentre as ferramentas utilizadas encontra-se o modelo da ANOVA com um fator ou com múltiplos fatores que decompõe as variâncias em repetibilidade e reprodutibilidade (CHUI *et al.*, 2004).

Ao utilizar a ANOVA, algumas hipóteses devem ser assumidas: as amostras são aleatórias e independentes, as populações têm distribuição normal e as variâncias populacionais são iguais. Além disso, considera-se que os resíduos têm média zero, que são aleatórios e que têm distribuição normal. Basicamente, dois conceitos estão envolvidos na lógica da ANOVA: o teste de hipóteses e a distribuição de probabilidade Fisher-F com um determinado nível de significância ( $\alpha$ ), geralmente igual a 5 % nas aplicações de engenharia.

Duas hipóteses são testadas na análise de variância, a saber:

- Hipótese nula ( $H_0$ ): as médias populacionais são iguais
- Hipótese alternativa ( $H_1$ ): as médias populacionais são diferentes, ou seja, pelo menos uma das médias é diferente das demais.

A hipótese nula  $H_0$  é aquela inicialmente assumida como verdadeira. A hipótese alternativa  $H_1$  é a contradição de  $H_0$ . A hipótese nula será rejeitada e a hipótese alternativa será aceita apenas se a evidência da amostra sugerir que  $H_0$  é falsa. Se a amostra não contradisser fortemente  $H_0$ , continuar-se-á a acreditar na verdade da hipótese nula. Em resumo, as duas conclusões possíveis de uma análise do teste de hipóteses são rejeitar  $H_0$  ou não rejeitar  $H_0$  (DEVORE, 2006).

O critério que definirá a aceitação ou a não aceitação da hipótese nula  $H_0$  é a análise do p-valor, definido como a probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou mais extrema àquela observada em uma amostra, supondo que a hipótese nula é verdadeira. Se o p-valor for menor do que o valor de  $\alpha$ , a hipótese de nulidade  $H_0$  é rejeitada e conclui-se que há uma diferença sistemática existente, com os valores das médias que se diferem do ponto de vista estatístico. Caso contrário, não se rejeita a hipótese de nulidade  $H_0$ , inferindo-se que não existem evidências de que as médias são significativamente diferentes, no nível de significância escolhido.

### 2.3. Planejamento de experimentos

Experimentos ou testes são realizados em variados campos do conhecimento para investigação de um processo ou um sistema específico. Formalmente, um experimento é um teste ou série de testes em que as variáveis de entrada de um processo ou sistema são propositalmente modificadas, a fim de observarem-se as mudanças nas variáveis de saída (MONTGOMERY, 2009). Antes de executar um experimento, é necessário entender de forma clara quais são os objetivos procurados (MONTGOMERY, 2009b). Em um mundo altamente capitalista e globalizado, experimentos são realizados visando-se a redução de custos, melhoria da qualidade, aumento da produtividade e redução de tempo, maximizando-se o desempenho do processo e do sistema a fim de progressos técnicos em novos produtos.

De forma geral, o planejamento de experimentos (*design of experiments*) conta com três princípios básicos: a aleatorização, a replicação e a blocagem. Aleatorizar, como o próprio nome sugere, consiste em garantir a distribuição equânime de todos os fatores não considerados, no intuito de evitar vícios de experimentação, erros tendenciosos e a fim de que a amostra seja a mais representativa possível da população de estudo. Replicar consiste em repetir o experimento nas mesmas condições, permitindo a obtenção do erro experimental. Finalmente, a blocagem é uma técnica utilizada industrialmente com o objetivo de aumentar a precisão de um experimento (NETO *et al.*, 2001).

O planejamento fatorial é indicado para a fase inicial do procedimento experimental quando há necessidade de se definir os fatores mais importantes e estudar os efeitos sobre a variável resposta (BUTTON, 2005). Para a execução de um planejamento fatorial, deve-se especificar os fatores e níveis do mesmo (BARROS NETO *et al.*, 2007).

Algumas das vantagens da utilização do planejamento fatorial são: redução do número de testes sem prejuízo à qualidade da informação; estudo simultâneo de diversas variáveis, com separação dos seus efeitos; determinação da confiabilidade dos resultados; realização da pesquisa em etapas, em um processo iterativo de acréscimo de novos testes; seleção das variáveis que influenciam um processo com número reduzido de testes; representação do processo estudado através de expressões matemáticas e elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos (BUTTON, 2005; PERALTA-ZAMORA *et al.*, 2005).

Para avaliar os resultados dos experimentos realizados, métodos e técnicas estatísticas são utilizados. Os objetivos dessas ferramentas são garantir estatisticamente que as informações são confiáveis e que os recursos disponíveis para experimentação são bem

utilizados (COLEMAN, MONTGOMERY, 1993; MONTGOMERY, 2009). Também é possível identificar as variáveis do processo e atribuir valores às variáveis influentes do processo, minimizando a variabilidade da resposta de interesse e os efeitos das variáveis não controladas (BUTTON, 2012).

## **2.4. Incerteza de medição**

O resultado de uma medição deve incluir o valor atribuído ao mensurando e a incerteza da medição associada a esse valor. A incerteza de medição é um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações disponíveis (INMETRO, 2012). A incerteza do resultado de uma medição é consequência da falta de conhecimento exato do valor do mensurando. Os instrumentos possuem uma precisão finita, de modo que, para um determinado instrumento, há sempre uma variação mínima do parâmetro que pode ser detectado. Esta quantidade mínima é chamada de resolução (ZÚÑIGA, 2013).

Após a correção dos erros sistemáticos identificados, o resultado de uma medição é uma estimativa do valor do mensurando, oriunda da incerteza proveniente dos erros aleatórios e da correção imperfeita dos erros sistemáticos (BIPM *et al.*, 2008). Embora o conceito de incerteza de medição seja tradicionalmente reservado para medições de alta precisão executadas em laboratórios de metrologia, muitos clientes e padrões de sistemas de qualidade requerem que a incerteza de medição seja conhecida e consistente com a capacidade de medição requerida de qualquer inspeção e equipamentos de testes e medições (PERUCHI, 2014).

O conceito de incerteza pode ser complicado para pessoas não-familiares com atividades técnicas. Atualmente é reconhecido na comunidade científica que é tão importante expressar a incerteza de uma medição específica quanto relatar o próprio resultado da medição. Também é evidente que uma medição ou um resultado de medição sem uma avaliação de sua confiabilidade é completamente inútil, pois é impossível avaliar a comparação entre diferentes medidas do mesmo mensurando ou parâmetro sem conhecer a incerteza associada (DÉSENFANT; PRIEL, 2017).

Os dois principais métodos utilizados para calcular-se a incerteza de medição são o método GUM, baseado na lei de propagação de incertezas (INMETRO, 2012b) e a simulação pelo método de Monte Carlo (ISO GUM 95) (INMETRO, 2008).

#### 2.4.1. Método GUM

O método GUM, considerado o documento padrão para avaliação de incerteza de medição, fornece conceitos internacionalmente aceitos, recomendações e o procedimento para avaliação da incerteza desde 1993 (DÉSENFANT; PRIEL, 2017). Uma revisão recente do método foi feita no âmbito da JCGM (*Joint Committee for Guides in Metrology*). Quando uma medição é efetuada, objetiva-se a determinação do valor do mensurando, isto é, o valor da grandeza específica submetida à medição (INMETRO, 2012). Definir corretamente o mensurando (variável de saída), o método e o procedimento de medição são fatores de extrema importância. O mensurando deve ser definido com completeza suficiente, relativa à exatidão requerida. Independentemente do mensurando escolhido e do sistema de medição utilizado, existem erros em todo e qualquer processo de medição. Todas as grandezas que influenciam o resultado de medição devem ser identificadas na etapa inicial do cálculo da incerteza (BIPM *et al.*, 2008).

As componentes de incerteza devem ser reconhecidas, sendo que a sua quantidade e tipo dependem do sistema de medição, do mensurando e do nível de exatidão requerido. Condições ambientais (temperatura, vibrações mecânicas, pressão, umidade relativa do ar, local), operacionais (operadores capacitados ou não), relacionadas aos equipamentos e às calibrações, ao método de medição, ao número de medições, dentre outros fatores, podem constituir fontes de incerteza de um sistema de medição. A utilização de um diagrama de causa e efeito é útil na identificação dos fatores relevantes para cálculo da incerteza (INMETRO, 2008).

#### 2.4.2. Método de Monte Carlo

O método GUM admite que o modelo é linear e que o mensurando tem distribuição normal. Além disso, determinar o número de graus de liberdade efetivos e calcular as derivadas parciais para a determinação da incerteza padrão combinada pode ser uma tarefa complexa. Um método alternativo para cálculo de incerteza associada à medição é o método de Monte Carlo, que é uma técnica de simulação estatística que utiliza sequências numéricas aleatórias e combinação de distribuições com o objetivo de desenvolver simulações

(INMETRO, 2008). O método de Monte Carlo, que se originou de uma amostragem estatística, foi apresentado pela primeira vez por Metropolis e Ulam (1949) e tem sido amplamente utilizado para modelar sistemas complexos (GARCIA *et al.*, 2012), com a adoção do mesmo por vários autores para medir a confiabilidade de um sistema, devido às vantagens de conveniência e precisão (YEH *et al.*, 2010; YEH; SUN, 2013).

A avaliação da incerteza pelo método de Monte Carlo é realizada seguindo-se as etapas: definição do mensurando; elaboração do diagrama de causa e efeito; estimativas das incertezas das fontes de entrada; identificação das funções densidade de probabilidade, correspondentes a cada fonte de entrada; seleção do número de iterações; escolha da função densidade de probabilidade e estimativa da incerteza expandida (INMETRO, 2008).

## **2.5. Fragilização por hidrogênio e seus mecanismos**

O hidrogênio é um gás não poluente e o elemento mais abundante na natureza. As principais fontes de hidrogênio, tanto natural como sintético, são os hidrocarbonetos e a eletrólise da água. A extração e o processamento de hidrogênio, bem como o desenvolvimento de materiais capazes de armazenar o hidrogênio como combustível, são aspectos de grande relevância para a economia mundial (ROSADO, 2011).

A presença de hidrogênio na estrutura dos aços pode assumir três formas principais quais sejam: dissolvido intersticialmente como hidrogênio atômico (H), precipitado na forma de hidrogênio molecular ( $H_2$ ) e precipitado na forma de diferentes compostos ( $CH_4$ ,  $H_2O$ ,  $TiH_2$ , etc.) (ROSADO, 2011).

A fragilização é um fenômeno que causa perda de ductilidade, tenacidade e resistência do material, o fragilizando. Ela é dividida em fratura induzida pelo meio, corrosão sob tensão, fragilização por hidrogênio, corrosão-fadiga e metal líquido (HERRING, 2010).

O átomo de hidrogênio, devido ao seu pequeno volume, pode difundir-se e ocupar interstícios dentro do material com facilidade. Como exemplo a Fig. 2.1 ilustra o hidrogênio presente na estrutura do ferro.

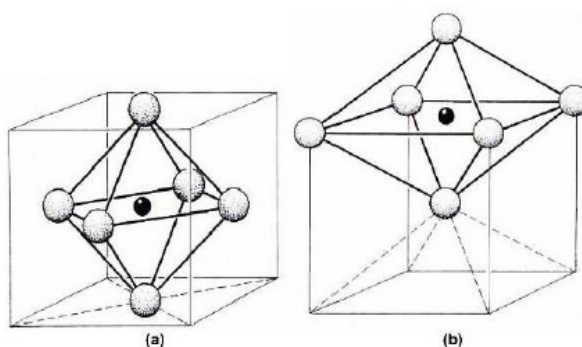


Figura 2.1: Ilustração da presença do hidrogênio na estrutura do ferro. Interstícios octaédricos dos sistemas cúbico de face centrada (a) e cúbico de corpo centrado (b) (LANDOLT, 1993)

Contornos de grão, poros, vacâncias, precipitados e discordâncias têm a capacidade de reter o hidrogênio, funcionando como sítios aprisionadores ou armadilhas de hidrogênio (DAYAL, 2003). Estas regiões atuam como concentradores de tensão mecânica e possuem baixa resistência à penetração do hidrogênio. O hidrogênio é atraído devido à maior energia de ligação entre o hidrogênio e estas armadilhas, resultando em um maior tempo de permanência do hidrogênio nestes locais, quando comparado com um sítio normal de difusão (FERRIS, 1988). A Figura 2.2 exibe as diferentes interações entre o hidrogênio e a microestrutura do material.

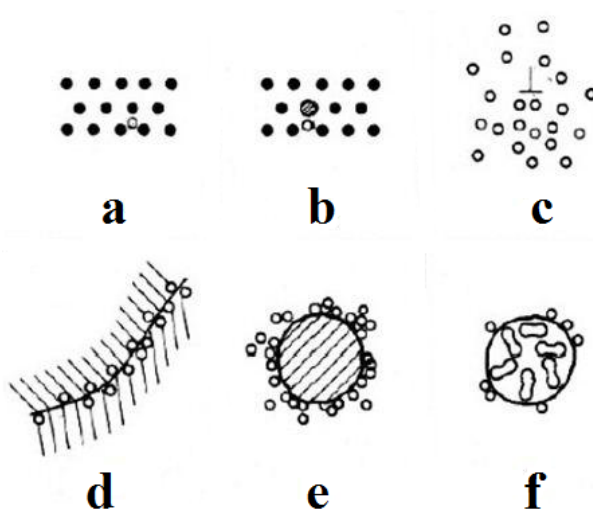


Figura 2.2: Sítios aprisionadores de hidrogênio no material: a) Solução sólida, b) Par hidrogênio-soluto, c) Atmosfera de discordância, d) Acúmulo no contorno de grão, e) Acúmulo na interface matriz-partícula, f) Hidrogênio recombinado em vazios (THOMPSON, 1980, modificado)



Em ambientes onde existe abundância de hidrogênio como, por exemplo, atmosferas hidrogenadas e ambientes aquosos, a molécula de hidrogênio se dissocia formando hidrogênio iônico ( $H^+$ ). O hidrogênio é então adsorvido na superfície do material em contato com o mesmo e ocorre a difusão no estado sólido, com a penetração do hidrogênio na microestrutura do material, propiciando a concentração de tensão mecânica e de hidrogênio. A Figura 2.3 ilustra este processo.

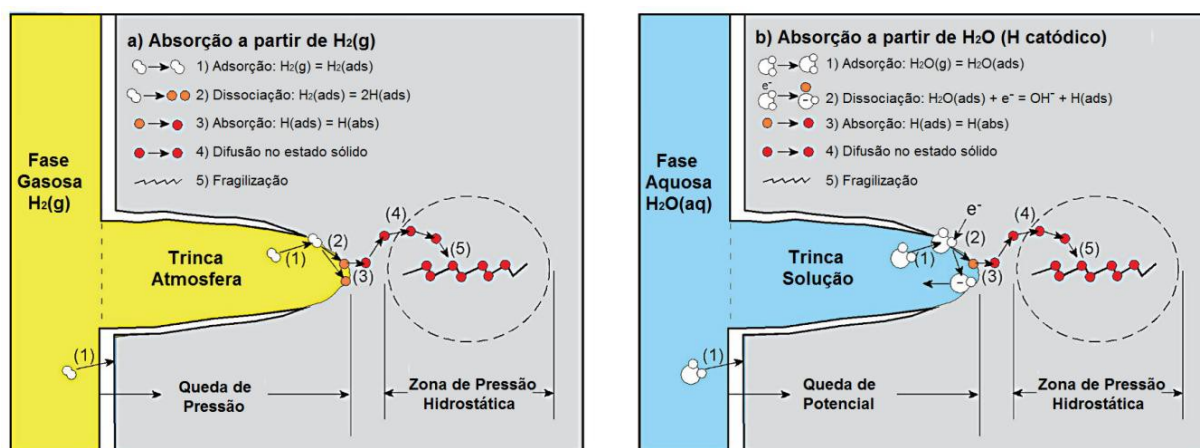


Figura 2.3: Mecanismo de difusão de hidrogênio no material (HERRING, 2010, modificado)

A difusão do hidrogênio em um determinado material provoca a concentração de tensões e, conseqüentemente, o aparecimento de defeitos e discontinuidades no mesmo, podendo alterar a sua microestrutura e propiciando a fragilização do material. A fragilização por hidrogênio é um fenômeno severo que afeta quase todos os metais e ligas, dependendo do meio em que estão inseridos (BARNOUSH *et al.*, 2010). Apesar da grande quantidade de estudos realizados sobre a fragilização por hidrogênio, este fenômeno não é completamente compreendido (STROE, 2006). Quanto maior for a quantidade de hidrogênio retida no material, maior será a queda de tenacidade, podendo gerar trincas mesmo se o limite elástico do material não for ultrapassado. A Figura 2.4 ilustra a fratura em um componente mecânico.



Figura 2.4: Fratura em parafuso revestido com cromo duro (HERRING, 2010)

A introdução de hidrogênio nos aços pode ocorrer mediante carregamento catódico, na presença de soluções eletrolíticas ou em atmosferas gasosas em alta pressão contendo hidrogênio (BROWN *et al.*, 1987). A evolução eletroquímica do hidrogênio atômico (H) faz parte de uma reação catódica, em que cátions de hidrogênio hidratados ( $H_3O^+$ ) migram por difusão em direção ao cátodo, em que o cátion sofre redução passando para hidrogênio na forma atômica (ROSADO, 2011). Esta reação pode ser expressa segundo a Eq. (2.1), em que  $M$  representa o metal:



Parte do hidrogênio atômico próxima à superfície do metal recombina-se na forma molecular ( $H_2$ ) e abandona a superfície metálica. A outra parte dos átomos de hidrogênio passa por uma reação de absorção que penetra na superfície do material (STROE, 2006).

Embora a fragilização dos materiais, proveniente da introdução de hidrogênio em sua microestrutura, seja um efeito conhecido, não existe um consenso para explicar como este fenômeno ocorre. A seguir são descritas as principais teorias a respeito da fragilização por hidrogênio.

### 2.5.1 Teoria da pressão

Esta teoria fundamenta-se na recombinação do hidrogênio iônico ( $H^+$ ) em hidrogênio molecular ( $H_2$ ) aglomerado nos defeitos do material. A molécula de hidrogênio, por se encontrar no estado gasoso, aumenta a pressão interna ( $>10^5$  atm) devido ao maior volume do hidrogênio, expandindo a cavidade do material onde o hidrogênio se encontra e propiciando o aparecimento e a propagação de trincas (GINGEL, 1997). No caso da ausência de tensão mecânica externa aplicada, podem ocorrer o aparecimento e a propagação das trincas na forma de degraus, o que acarreta a fratura do componente mecânico (OKAMOTO, 2010).

### 2.5.2 Teoria da decoesão

A teoria da decoesão considera a existência de uma concentração crítica de átomos de hidrogênio, que interagem com os elétrons responsáveis pela ligação metálica (MURI, 2009), reduzindo a resistência do material e possibilitando a fratura frágil por clivagem (TROIANO, 1960).

A base da teoria da decoesão se fundamenta na possibilidade de ocorrência da fragilização por hidrogênio sem considerável deformação local. Por meio de cálculos

termodinâmicos e teóricos da distribuição eletrônica de sistemas cristalinos na presença de hidrogênio, é possível explicar a fratura frágil, mas esta teoria não explica a fratura com deformação plástica (STROE, 2006).

Trabalhos com medições da constante de elasticidade (MAZZOLAI, 1985; MAGERL *et al.*, 1975) e curvas de dispersão de fônons (SPRINGER, 1978) evidenciam o fortalecimento entre as ligações dos retículos cristalinos. Ainda, estes autores afirmam que quando o hidrogênio age como soluto, não ocorre enfraquecimento das ligações atômicas.

### 2.5.3 Teoria da plasticidade localizada

A criação de regiões de deformação plástica localizada conduz ao aumento da mobilidade de discordâncias devido à presença do hidrogênio. A plasticidade localizada é causada devido à redução de interação entre as discordâncias e outros obstáculos ou entre as próprias discordâncias (STROE, 2006). As discordâncias passam então a se mover mais próximas umas das outras bem como de outros obstáculos, criando empilhamentos de discordâncias mais densos. Consequentemente, regiões de alta deformação (onde o hidrogênio aumentou a mobilidade das discordâncias) são criadas, cercadas por uma região menos dúctil, onde há empilhamento de discordâncias (STROE, 2006). Quando a tensão mecânica resultante nas pequenas regiões de empilhamento de discordâncias ultrapassa o limite de ruptura do material, ocorre a falha.

### 2.5.4 Teoria da formação de hidretos

O hidrogênio, quando atinge uma concentração crítica na estrutura cristalina de ligas metálicas que possuem titânio, vanádio, zircônio, nióbio, tântalo, magnésio ou urânio (tendem a formar hidretos), pode formar hidretos frágeis o que acarreta na diminuição da tenacidade do material. Esse fenômeno é facilitado pela presença de trincas, onde a concentração de hidrogênio é máxima (STROE, 2006). Os hidretos são formados inicialmente no campo de tensões da trinca. O aumento das dimensões destes hidretos dá-se pela nucleação e crescimento de novos hidretos que se unem, formando hidretos maiores e não pelo crescimento individual (SOFRONIS *et al.*, 2001).

## 2.6. Métodos de análise da susceptibilidade à fragilização por hidrogênio

Existem diferentes métodos para avaliação da susceptibilidade dos aços à fragilização por hidrogênio, dentre elas, citam-se o teste de tração com baixa taxa de deformação (BTD), a nanoindentação instrumentada, o carregamento em patamares progressivos sob meio assistido (*rising step load* - RSL), o deslocamento da abertura da trinca (*crack tip opening displacement* - CTOD), a carga constante, a deformação por punção (*small punch test* - SPT), o teste de *Double Cantilever Beam* (DCB), entre outros.

O teste de tração com baixa taxa de deformação fornece uma estimativa da susceptibilidade de um material à fragilização por hidrogênio (STROE, 2006). Este teste é empregado, por exemplo, para avaliar o desempenho de materiais em meios assistidos, efeitos de tratamentos térmicos, constituintes químicos do ambiente, inibidores químicos e efeitos térmicos (ASTM G129, 2013). A principal vantagem do teste BTD é permitir o controle da taxa de deformação sobre o material para equilibrar o efeito do meio e as tensões mecânicas no material (PHULL, 2003). Entretanto, a taxa de deformação lenta constitui uma desvantagem devido ao tempo longo de teste (BALLESTEROS, 2009).

A nanoindentação instrumentada permite caracterizar propriedades mecânicas locais de pequenos volumes ou filmes finos. As heterogeneidades presentes na escala atômica podem ter um efeito significativo nos resultados dos testes de indentação efetuados em escala nanométrica (BARNOUSH, 2007). Pequenos volumes de material são ensaiados e múltiplos testes podem ser realizados em um único grão, permitindo uma caracterização mais abrangente da área deformada e possibilitando a realização de testes em áreas livres de defeitos (BARNOUSH, 2007). As desvantagens da nanoindentação instrumentada são: limitação de teste a algumas centenas de nanômetros; custo elevado e dificuldade de aplicação *in-situ* ou em amostras grandes (LI *et al.*, 2007).

O teste de deslocamento da abertura da trinca (*crack tip opening displacement* - CTOD), como o próprio nome sugere, é baseado na medição do deslocamento da abertura da trinca como parâmetro crítico do processo de fratura (FORTES, 2003) por meio do carregamento mecânico de um corpo de prova entalhado com uma pré-trinca de fadiga. Duas respostas podem ser inferidas: o crescimento instável (*pop-in*) e o crescimento estável da trinca (ASTM E1820, 2017). No teste, o crescimento da abertura da trinca é monitorado. O fator de intensificação de tensão mecânica ( $K_I$ ) é calculado por meio de uma equação de análise de tensão linear-elástica, recomendada pela norma ASTM E1681 (ASTM, 2013).

O teste de carga constante consiste na aplicação de um esforço mecânico em um corpo de prova com uma taxa de carregamento constante até à ocorrência da fratura, durando entre 200 e 5000 horas (LINDVALL, 2009). A estimativa da fragilização por hidrogênio do corpo de prova é comumente obtida por meio do tempo necessário para a falha do mesmo (LINDVALL, 2009).

A deformação por punção (*small punch test*) consiste em se deformar, com um punção, um corpo de prova com dimensões diminutas e cujas bordas são fixadas em um dispositivo (CUESTA; ALEGRE, 2011). Por meio deste teste, a dureza, o limite de escoamento e o limite de resistência à tração do material podem ser obtidos (GUDURU *et al.*, 2005). O teste é realizado em corpos de prova de um mesmo material, em duas condições, hidrogenada e não hidrogenada, a fim da obtenção da curva de força *versus* deslocamento do punção e das propriedades mecânicas dos corpos de prova em ambas as condições para efeitos de comparação.

O teste *Double Cantilever Beam* (DCB), especificado pela norma NACE TM0177 (NACE, 2005), é realizado com um corpo de prova retangular, onde são usinados uma abertura em uma das extremidades para inserção de uma cunha (idealmente fabricada com o mesmo material do corpo de prova) e entalhes laterais que vão do início da abertura até a extremidade oposta. A abertura e os entalhes laterais dividem o corpo de prova em duas partes que podem ser consideradas como vigas. A Figura 2.5 ilustra um exemplo de corpo de prova DCB.

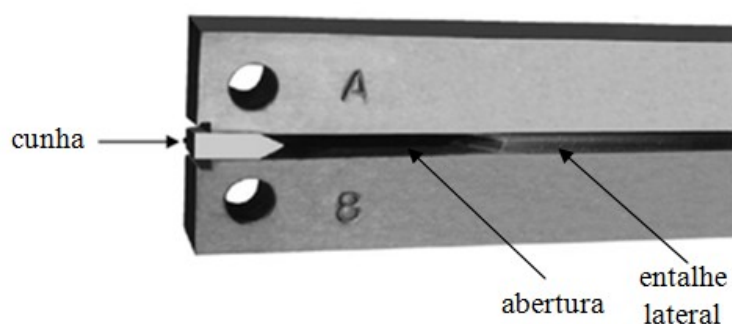


Figura 2.5: Exemplo de corpo de prova do teste DCB (XIE *et al.*, 1999, modificado)

Por se tratar de um teste em um corpo de prova de parada de trinca, o teste DCB fornece um resultado quantitativo para o  $K_{TH}$  ( $K_{ISSC}$ ) em 14 dias (NACE TM0177, 2005). Além disso, as grandes dimensões do corpo de prova dificultam sua retirada em algumas configurações e, dependendo das condições de teste, apresenta uma tendência de desvio da trinca para um dos braços do corpo de prova (*side cracking*).

### 2.6.1 Teste de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio (CPPAM)

O método de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio (CPPAM), também conhecido como *Rising Step Load* (RSL) e desenvolvido por Raymond (1996), possui uma vantagem em relação aos outros, que consiste em testes com duração significativamente menor, o que representa menores custos envolvidos.

O teste de CPPAM consiste, como o próprio nome sugere, na aplicação progressiva em patamares de força em um corpo de prova submetido à hidrogenação, resultado da proteção catódica do corpo de prova. Nozari (2002) observou que em certo valor crítico de potencial eletroquímico, o material satura-se de hidrogênio, implicando em um valor aproximadamente constante de susceptibilidade à fragilização por hidrogênio. Martiniano (2016) observou que no caso do aço AISI 4140, esse valor crítico de tensão é igual à -1,2 V com relação ao eletrodo de Ag/AgCl, o que maximiza a susceptibilidade à fragilização por hidrogênio do aço AISI 4140 (a queda de resistência mecânica é maior durante os testes).

A norma ASTM F1624 (ASTM, 2012) estabelece a força e o tempo de patamar que devem ser utilizados em aços, durante a realização dos testes de carregamento em patamares progressivos sob meio assistido, em função da dureza do material. Por sua vez, a norma ASTM F519 (ASTM, 2017) define as tolerâncias dimensionais e geométricas dos corpos de prova que devem ser utilizados nesse teste.

Um croqui do equipamento utilizado no teste RSL é ilustrado na Fig. 2.6. Ele é constituído basicamente por: um atuador, que gera a força de tração a ser aplicada no braço de carregamento; por um braço de carregamento, que transfere a força do atuador para o corpo de prova; por um suporte, encarregado de engastar e flexionar o corpo de prova e por uma célula eletrolítica utilizada para hidrogenar o corpo de prova.

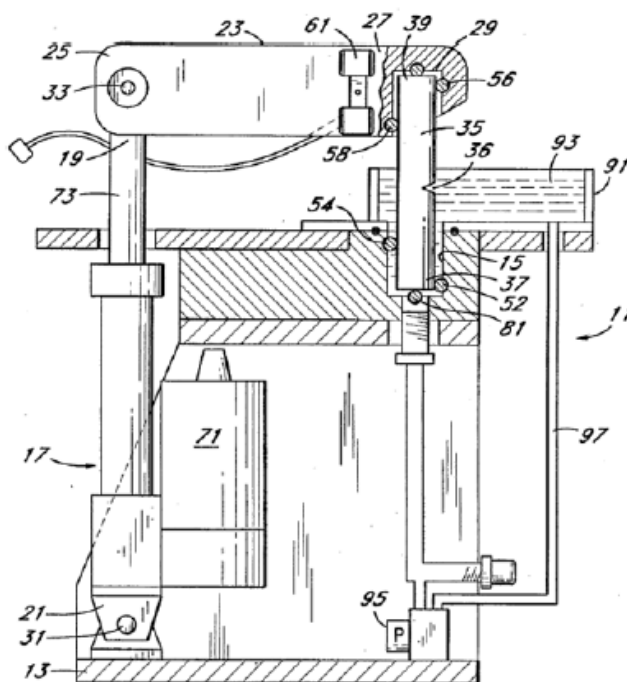


Figura 2.6: Equipamento que opera pelo método RSL e seus principais componentes: atuador eletromecânico (17), braço de carregamento (23), suporte (15), cuba eletrolítica (91) e corpo de prova (35) (RAYMOND, 1996)

A força aplicada pelo movimento de recuo do atuador é transferida ao corpo de prova pelo braço de carregamento, ocorrendo a flexão daquele a quatro pontos. O corpo de prova deve ser previamente entalhado (Fig. 2.7), de modo que ocorra concentração local de tensão mecânica e de hidrogênio no mesmo, localizando a trinca na raiz do entalhe.

Para que o entalhe seja tensionado mecanicamente em decorrência da flexão do corpo de prova, o comprimento  $L1$  deve ser maior do que o  $L2$ , bem como o comprimento  $L3$  deve ser maior do que o  $L4$ , a fim de ter-se um braço de momento entre a superfície de apoio (57) e a extremidade do corpo de prova (39) e entre a superfície de apoio (53) e a extremidade do corpo de prova (37). A fim de simplificar a montagem adota-se  $L1 = L3$  e  $L2 = L4$ .

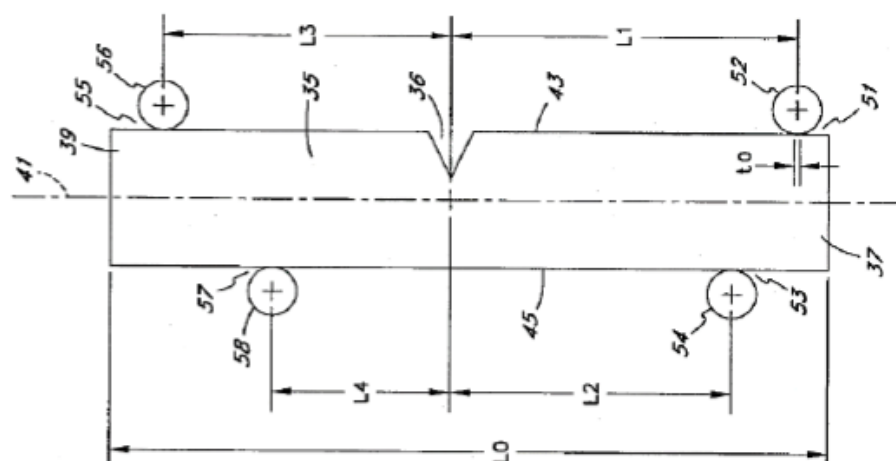


Figura 2.7: Geometria do corpo de prova no teste RSL (RAYMOND, 1996)

A norma ASTM F1624 (ASTM, 2012) especifica os requisitos básicos para realização dos testes, quais sejam: valor da força aplicada, tempo de permanência em cada patamar de força e o número mínimo de corpos de prova que deve ser utilizado para a realização do teste em uma determinada condição (quatro no mínimo).

Por sua vez a norma ASTM E8/E8M (ASTM, 2016) especifica as condições de teste de um corpo de prova entalhado e livre de hidrogênio, que deve ser carregado continuamente até a ruptura com uma taxa de carregamento constante. Este teste tem como objetivo a determinação da força limite de ruptura (*point of fast fracture strength* - PFFS) que representa a força máxima de ruptura (P<sub>MAX</sub>) do corpo de prova livre de hidrogênio. Posteriormente, os corpos de prova são testados com carregamento mecânico em patamares sob meio assistido e a força na qual se iniciou a propagação da trinca devido à fragilização por hidrogênio é inferida do gráfico de força versus tempo.

O número de patamares e o tempo de permanência em cada patamar de força aplicada dependem da dureza do corpo de prova, conforme mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Perfis de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio, em função da dureza do corpo de prova (ASTM F1624, 2012)

Intervalo de dureza do corpo de prova	Perfil de carregamento
$\geq 33$ HRC à 45 HRC	(10/5/2,4)
$> 45$ HRC à 54 HRC	(10/5/1,2)
$> 54$ HRC	(20/5/1)



O perfil de carregamento é denotado como ( $\# / \% P_{MAX} / horas$ ), em que  $\#$  simboliza o número de patamares,  $\% P_{MAX}$  é o incremento de força aplicada em cada patamar e *horas* é a unidade para expressar o tempo de duração de cada patamar. No caso de corpos de prova com dureza entre 33 HRC e 45 HRC, o perfil de carregamento aplicado é (10/5/2,4). Tem-se então 10 patamares com duração de duas horas cada um, com uma força que é incrementada em cada patamar com 5 % da força máxima (força essa representada pelo PFFS ou  $P_{MAX}$ ) e, em seguida, tem-se mais 10 patamares com duração de quatro horas cada um e incrementados em cada patamar em 5 % da força máxima. Cada teste pode então durar até 60 horas. A taxa de carregamento deve ser suficientemente lenta para permitir ao hidrogênio de se difundir e induzir trincas que se manifestarão como uma queda da força (ASTM F1624, 2012).

Existem duas possibilidades de término do teste. A primeira é quando o tempo limite do teste (60 horas) é atingido. A outra possibilidade ocorre quando existe uma redução da força no corpo de prova medida por uma célula de carga e que corresponde a 5 % do valor de PFFS, o que evidencia o início da propagação de uma trinca (ASTM F1624, 2012).

De acordo com a norma ASTM F1624 (ASTM, 2012), uma queda de 5 % de  $P_{MAX}$  na força indica o aparecimento de trinca. Entretanto, se o corpo de prova possuir uma taxa de crescimento de trinca mais lenta, deve-se considerar um valor menor para o critério de queda de força.

Em uma dada condição, o intuito do teste de PFFS e dos três testes de CPPAM é determinar o patamar de força denominado  $P_{TH}$  (*threshold load*) que antecede o início de propagação da trinca, ou seja, é o patamar com força praticamente constante (horizontal, sem apresentar uma inclinação pronunciada) que antecede o primeiro patamar onde uma queda de força é observada, traduzida por uma inclinação com uma forma convexa.

A Figura 2.8 mostra o modelo de perfil de CPPAM para corpos de prova com valores de dureza situados entre 33 HRC e 45 HRC.

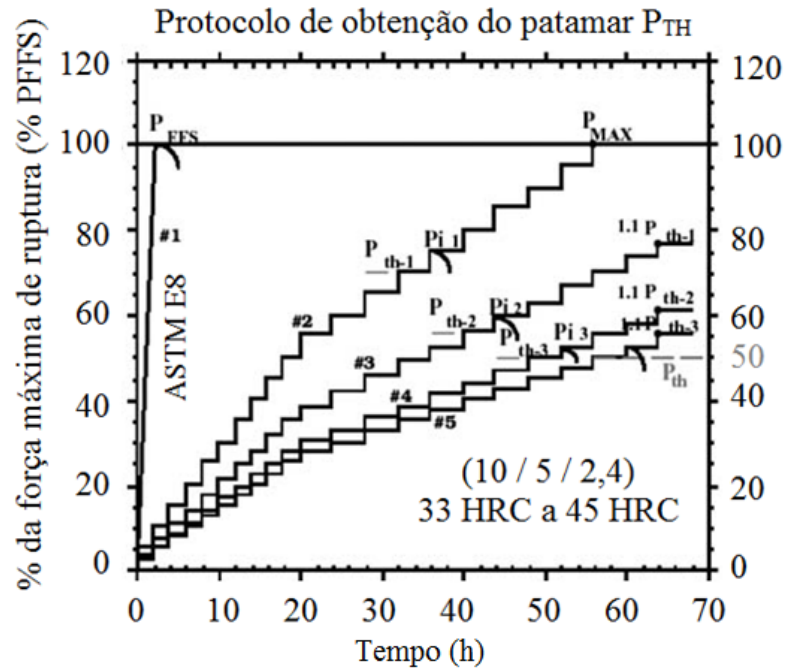


Figura 2.8: Modelo de perfil de CPPAM e determinação do patamar de  $P_{TH}$  (ASTM F1624, 2012, modificado)

No teste de CPPAM o atuador linear do equipamento, vinculado ao braço, opera em controle de posição ao iniciar um patamar de carregamento, ou seja, ao iniciar efetivamente um patamar de força, o atuador não recua ou avança, mantendo a sua posição constante. A célula de carga acoplada ao braço é responsável por medir a queda de força, sensível à sua resolução, quando o corpo de prova inicia o processo de trincamento. Entre um patamar e outro, o controle de força substitui o controle de posição, na medida em que a força de cada patamar deve ser atingida com exatidão, sem ultrapassar ou estar aquém de tal valor.

A força associada ao início de crescimento da trinca/fratura é definida no patamar de força em que a convexidade foi observada, conforme ilustra a Fig. 2.9, sendo denotada por  $P_i$ , na queda de força do tipo A. No caso de queda na força com a forma côncava (tipo B), infere-se que o limite de escoamento do material foi atingido ou ultrapassado na ponta da trinca e que ocorreu fluência (*cold creep*), não significando fratura ou ruptura devido à fragilização por hidrogênio. No caso da observação de um ponto de inflexão na curva de força (tipo C), a força observada nesta transição ( $P_i$ ) é associada à força de início de nucleação da trinca e o valor de  $P_{TH}$  é o valor da força do patamar imediatamente anterior (ASTM F1624, 2012).

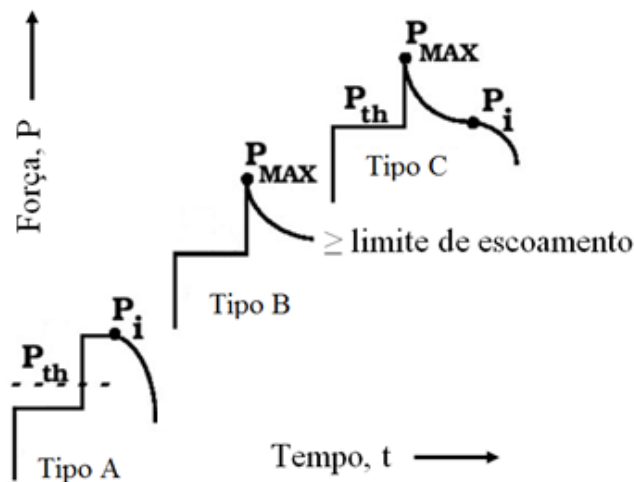


Figura 2.9: Tipos de queda de força observados em testes de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio e interpretação do patamar de  $P_{TH}$  (ASTM F1624, 2012, modificado)

Se a força for mantida apenas por uma fração de tempo do patamar (denotada por  $x$  na Fig. 2.10), o valor de  $P_{TH}$  não é o valor de força do patamar imediatamente anterior ao patamar de queda da força, mas um valor corrigido, conforme ilustra a Fig. 2.10.

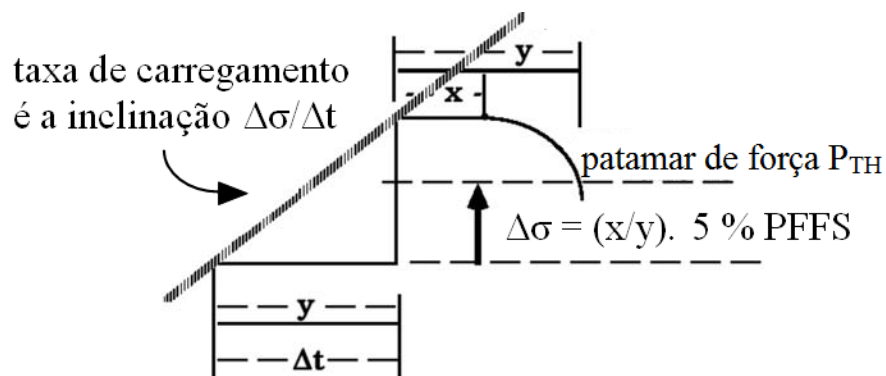


Figura 2.10: Método de extrapolação para determinação do patamar de  $P_{TH}$  no caso de quedas de força do tipo A (ASTM F1624, 2012, modificado)

O incremento de força ( $\Delta\sigma$ ) a ser adicionado ao valor de força do patamar anterior (que teve comportamento constante ao longo do tempo, denotado por  $y$  na Fig. 2.10) para determinação do valor de  $P_{TH}$  é dado por uma fração do patamar de força onde a queda ocorreu, mostrada na Eq. (2.2).

$$\Delta\sigma = \left(\frac{x}{y}\right) \cdot (5 \% \text{ PFFS}) \quad (2.2)$$

Em uma determinada condição, os testes podem ser finalizados quando for observada uma diferença de, no máximo, 5 % do valor de PFFS entre os patamares de  $P_{TH}$  de dois testes subsequentes (ASTM F1624, 2012). Segundo a norma ASTM F1624 (ASTM, 2012), se for observada uma diferença de até 5 % do valor de PFFS entre os patamares de  $P_{TH}$  do primeiro e do segundo testes hidrogenados, ainda faz-se necessário efetuar o terceiro teste hidrogenado naquela condição, não significando que o pesquisador poderá finalizar a análise após a realização do segundo teste. Ainda, caso seja observada uma diferença maior do que 5 % do valor de PFFS entre os patamares de  $P_{TH}$  do segundo e do terceiro testes hidrogenados, os testes devem continuar até que o critério seja atendido (ASTM F1624, 2012).

A taxa de deformação do teste RSL deve estar situada entre  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e  $10^{-8} \text{ s}^{-1}$  (ASTM G129, 2013). A taxa de deformação pode ser calculada dividindo-se a taxa de carregamento (inclinação  $\Delta\sigma/\Delta t$  da Fig. 2.10) do teste pelo módulo de elasticidade do material do corpo de prova.

A norma ASTM F1624 (ASTM, 2012) recomenda a realização de análises de fractografia nos corpos de prova para verificação do mecanismo de fratura devido à fragilização por hidrogênio.

As principais vantagens do teste RSL são: realização de testes de flexão e de tração; flexibilidade da geometria do corpo de prova (seções quadradas ou redondas, parafusos) e menores tempos de teste. Baboian (2005) comparou o desempenho dos testes RSL e BTB, sendo que no teste RSL ele obteve resultados em 60 horas, enquanto que o teste BTB teve uma duração de 720 horas. Este fato indica uma redução de tempo na ordem de 92 %. As principais desvantagens do teste RSL é que não é possível repetir o teste em um mesmo corpo de prova, visto que o teste é destrutivo, além da impossibilidade de testar vários corpos de prova ao mesmo tempo. Além disso, corpos de prova com dimensões maiores representam custos mais elevados e maiores dificuldades de manuseio, além dos corpos de prova apresentarem tolerâncias dimensionais e geométricas normatizadas, com fabricação e preparação longa dos mesmos.

## 2.7. Proteção catódica

Em 1823, Humphry Davy foi o primeiro usuário da proteção catódica, utilizando anodos de estanho, ferro e zinco para proteger partes de cobre do casco de navios de madeira (MORGAN, 1965). Com o desenvolvimento da indústria do petróleo, aumentou-se a demanda de combustíveis líquidos e gasosos de modo que, na década de 1920, a fim de economizar no transporte dos combustíveis, empresas principalmente nos Estados Unidos e no Oriente Médio investiram em oleodutos e gasodutos construídos com tubos de aço, enterrados sem proteção, com posteriores problemas de oxidação (DUTRA, 2011).

A proteção catódica surgiu como uma opção e a fim de desenvolvimento da técnica, foi fundada em 1936, nos Estados Unidos, a *Mid-Continent Cathodic Protection Association* que mais tarde transformou-se na *National Association of Corrosion Engineers*, atualmente a *NACE International* (MORGAN, 1965). No Brasil, o emprego da proteção catódica data da década de 1960 com o desenvolvimento da PETROBRAS, para proteção de oleodutos submarinos, instalações portuárias, oleodutos e gasodutos. Sem o advento da proteção catódica, não seria viável a manutenção de milhões de quilômetros de tubulações enterradas e submersas, instalações portuárias em estrutura metálica e embarcações, desde os pequenos barcos até os superpetroleiros (MATTHEW, 2001).

A proteção catódica é a técnica que consiste na transformação da estrutura metálica que se deseja proteger no catodo de uma pilha artificial, de modo a tornar as reações de corrosão termodinamicamente impossíveis e, conseqüentemente, evitar a deterioração do material (IEC, 1988). Existem dois métodos para aplicação do sistema de proteção catódica: o método galvânico ou por anodos de sacrifício e o método por corrente impressa (IEC, 1988). Ambos são fundamentados no mesmo princípio: aplicação de corrente elétrica na estrutura, através do eletrólito.

### 2.7.1 Proteção catódica galvânica

Na proteção catódica galvânica, a corrente elétrica é promovida pela força eletromotriz existente entre o metal a proteger e outro metal escolhido para anodo (geralmente ligas de zinco, magnésio ou alumínio, por apresentarem a maior diferença de potencial em relação aos aços), como resultado de seus diferentes potenciais eletroquímicos (DUTRA, 2011). Para que a corrente elétrica aplicada na estrutura a proteja, é necessário que a resistência global do circuito seja baixa, ou seja, que a resistividade elétrica do eletrólito seja baixa (como da água

do mar), até 6000  $\Omega$ .cm para anodos de magnésio (MACKEY, 1975) e 1500  $\Omega$ .cm para anodos de alumínio e de zinco (PEABODY, 1967).

Esta técnica é utilizada principalmente para estruturas de pequeno porte, pois caso contrário a massa de anodos requerida seria muito grande (DUTRA, 2011). As principais vantagens da proteção catódica galvânica são os baixos custos de instalação e manutenção bem como o não requerimento de suprimento de corrente alternada no local. Por sua vez, as suas principais desvantagens são a dependência da corrente elétrica fornecida em relação à pequena diferença de potencial entre os anodos e a estrutura a ser protegida, além da limitação de resistividade elétrica do meio, como solo, água do mar ou água doce (IEC, 1988).

### 2.7.2 *Proteção catódica por corrente impressa*

No sistema de proteção catódica por corrente impressa, a corrente elétrica é promovida por uma força eletromotriz (f.e.m.) de uma fonte geradora de corrente contínua (retificador, bateria ou gerador), utilizando um conjunto dispersor de corrente no eletrólito, constituído de anodos inertes (geralmente grafite, ferro-silício-cromo ou titânio platinizado/revestido), chamado de leito de anodos. Por ser um sistema compacto e econômico, é indicada para estruturas de médio e grande porte. As vantagens desta técnica consistem na ampla escolha da potência da fonte geradora e da f.e.m. necessária em função da resistividade elétrica do eletrólito (fornecendo e controlando maiores valores de correntes elétricas às estruturas); possibilidade de ser aplicada em qualquer eletrólito, mesmo naqueles com elevada resistividade elétrica; possibilidade de ser aplicado em estruturas não revestidas (IEC, 1988). As desvantagens desta técnica são a inspeção e manutenção periódicas dos retificadores (DUTRA, 2011), o dispêndio com energia elétrica e interferências com outras estruturas metálicas (IEC, 1988).

No uso do sistema de proteção catódica por corrente impressa, o polo negativo da fonte de energia deve ser ligado à estrutura a ser protegida e o polo positivo, ao leito de ânodos, caso contrário a estrutura será corroída (DUTRA, 2011).

A corrente necessária para proteção catódica depende de vários fatores, dentre eles pode-se citar a área a proteger e condições do revestimento; forma geométrica da estrutura a ser protegida e resistividade elétrica do meio eletrolítico (IEC, 1988).

Faz-se necessário verificar se a estrutura metálica está protegida da corrosão por meio da medição dos potenciais em relação ao eletrólito, com um voltímetro tendo o seu terminal negativo ligado à estrutura e o terminal positivo ligado a um eletrodo de referência, colocado

em contato com o eletrólito. Em instalações submersas, o eletrodo de prata/cloreto de prata (Ag/AgCl) é o mais utilizado e os valores de potencial elétrico devem ser iguais ou mais negativos do que - 0,80 V para assegurar proteção catódica (IEC, 1988).

## 2.8. Usinagem por eletroerosão

A usinagem por eletroerosão ou por descargas elétricas (EDM - *Electrical Discharge Machining*) é um processo indicado na usinagem de formas complexas em materiais condutores elétricos, sobretudo os que possuem dureza elevada e que possuem dimensões reduzidas, difíceis de serem usinados por processos convencionais, que vêm sendo substituídos pela EDM (GUITRAL, 1997). A eletroerosão é utilizada no setor de ferramentaria em geral como na fabricação de matrizes para estampagem, forjamento, fieiras para trefilação, extrusão e moldes plásticos (CRUZ *et al.*, 1999).

O processo EDM é um mecanismo de remoção de material por energia térmica, que gera um canal de plasma entre o catodo (peça) e o anodo (ferramenta) com temperaturas que podem atingir 10 000 K, iniciando o aquecimento e a fusão na superfície (ALBINSKI *et al.*, 1996). A corrente elétrica é propositalmente interrompida, com extinção temporária do fluxo de plasma e redução brusca da temperatura, possibilitando a circulação do fluido dielétrico que retira e transporta o material fundido da superfície em forma de partículas microscópicas (BLEYS *et al.*, 2006). A Figura 2.11 ilustra um esquema do processo EDM.

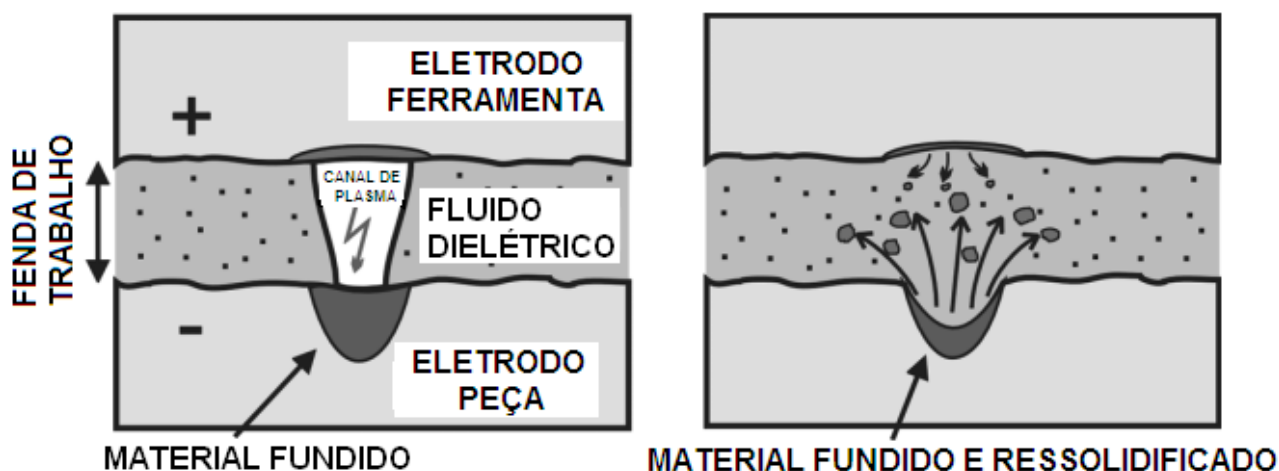


Figura 2.11: Esquema de funcionamento do processo EDM (BLEYS *et al.*, 2006)

### 2.8.1 Camada refundida e zona termicamente afetada

A camada refundida é intrínseca ao processo EDM e, apesar das novas tecnologias empregadas, a natureza térmica do processo EDM impede a sua total eliminação (ARANTES, 2001). Após a descarga elétrica, uma cratera é formada e material fundido se redeposita na superfície da cratera, devido à tensão superficial e ao resfriamento. O material fundido resfria-se devido às paredes frias da cratera e à refrigeração causada pelo fluido dielétrico. A camada refundida tende a ser carbonetada, mais frágil e também pode ser chamada de camada branca (LIMA, 1997). A Figura 2.12 exibe as diferentes camadas do aço rápido ABNT M2 usinado por eletroerosão.

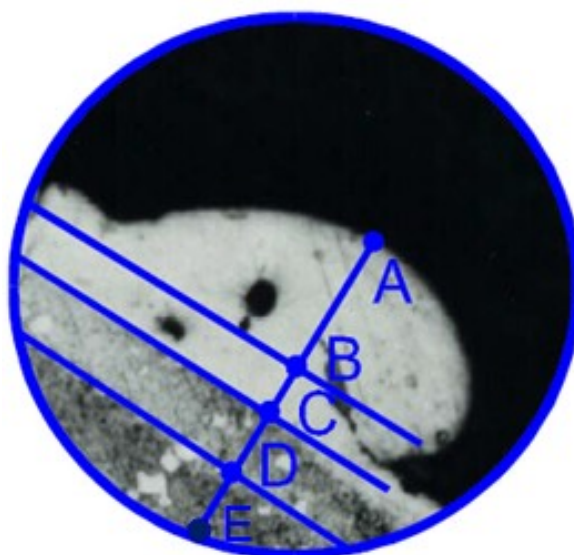


Figura 2.12: Diferentes camadas de um aço rápido usinado por eletroerosão: AB – camada refundida discreta; BC – camada refundida uniforme; CD – zona termicamente afetada (ZTA) e DE – material base (FERNANDES, 1999, modificado)

Abaixo da camada branca encontra-se a zona termicamente afetada (ZTA), que é parcialmente afetada pelas altas temperaturas. A dureza da camada refundida e da ZTA, imediatamente abaixo, dependem da corrente elétrica e da frequência utilizadas na usinagem, além da condutividade térmica do material (LIMA, 1997). A camada refundida pode afetar a estrutura e/ou a integridade da superfície usinada por EDM (FULLER, 1989). A dureza da zona termicamente afetada tende a ser maior do que a dureza do material base e a dureza da zona refundida tende a ser maior do que a dureza da zona termicamente afetada (HASÇALÝK; ÇAYDAS, 2004).



O aumento do pulso elétrico utilizado no processo de eletroerosão provoca um aumento na espessura da camada refundida (HUANG *et al.*, 1999; HASÇALÝK; ÇAYDAS, 2004; LEE; YUR, 2000) e igualmente na rugosidade da superfície usinada (HUANG *et al.*, 1999; YAN *et al.*, 2005; SPEDDING; WANG, 1997; SARKAR *et al.*, 2005; LIAO *et al.*, 1997; HASÇALÝK; ÇAYDAS, 2004; LIAO *et al.*, 2004; RAMAKRISHNAN; KARUNAMOORTHY, 2007). Maiores valores de energia por centelha acarretam em maiores valores de rugosidade superficial e espessura de camada refundida (HUANG *et al.*, 1999). A pressão de lavagem do fluido dielétrico tem um efeito insignificante na rugosidade da superfície usinada e na espessura de camada refundida (HUANG *et al.*, 1999; SARKAR *et al.*, 2005; LIAO *et al.*, 1997; HASÇALÝK; ÇAYDAS, 2004). O material do fio utilizado para erodir a superfície conforme o desenho de projeto pode se depositar na superfície usinada (WILLIAMS; RAJURKAR, 1991; FORDHAM *et al.*, 1997; HUANG *et al.*, 2006; HUANG *et al.*, 2004; HUANG *et al.*, 2003). A velocidade de alimentação do fio não influencia na rugosidade da superfície (HASÇALÝK; ÇAYDAS, 2004), mas fios mais tensionados tendem a produzir superfícies com rugosidades menores (LIAO *et al.*, 2004), embora o risco de rompimento do fio seja maior.

## CAPÍTULO III

### Procedimento Experimental

No presente capítulo é apresentada a metodologia empregada para avaliar o desempenho do equipamento RSL 2 utilizado para avaliação da susceptibilidade à fragilização por hidrogênio. Para um melhor entendimento a mesma foi dividida em oito etapas, a saber: planejamento dos experimentos; fabricação dos corpos de prova; controle dimensional e geométrico dos corpos de prova; procedimento experimental; verificação das duas montagens do equipamento; testes dos corpos de prova com carregamento em patamares; análise dos corpos de prova no microscópio eletrônico de varredura (MEV); análise de variância e teste de repetibilidade e reprodutibilidade.

#### 3.1. Planejamento dos experimentos

Neste trabalho é avaliado o desempenho do equipamento RSL 2 localizado no LTAD. A Figura 3.1 mostra uma foto do equipamento e seus principais componentes.

Para avaliar a repetibilidade e a reprodutibilidade do RSL 2, um teste de repetibilidade e reprodutibilidade (R&r) pelo método da média e amplitude foi realizado nos testes de determinação do valor de PFFS. Por meio da aplicação de uma análise de variância em um planejamento fatorial completo  $2^1 \times 2^1 \times 3^1$ , avaliou-se o efeito dos três fatores (seção transversal do corpo de prova, raio de arredondamento do entalhe e dureza do corpo de prova) na susceptibilidade à fragilização por hidrogênio e na determinação do valor de PFFS.

A Tabela 3.1 apresenta a matriz de planejamento fatorial completo  $2^1 \times 2^1 \times 3^1$ . De acordo com esta tabela foram considerados dois níveis do fator seção transversal (10 mm x 10 mm (-1) e 30 mm x 30 mm (+1)). Com relação ao fator raio de arredondamento do entalhe,

este foi igualmente avaliado em dois níveis, 80  $\mu\text{m}$  (-1) e 250  $\mu\text{m}$  (+1) e finalmente para o fator dureza do corpo de prova, foram considerados três níveis, 36 HRC (-1), 40 HRC (0) e 44 HRC (+1), totalizando 12 condições.

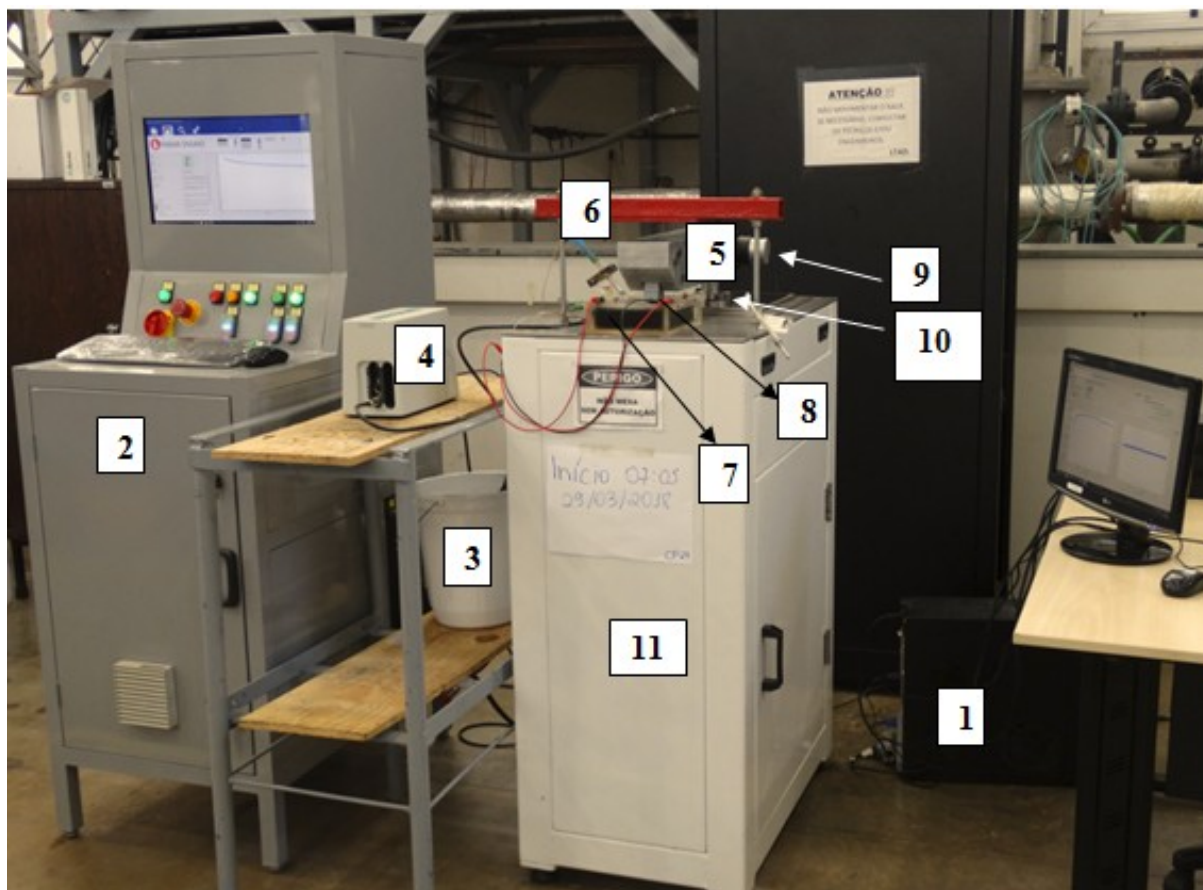


Figura 3.1: Equipamento RSL 2 e componentes 1 – computador utilizado para execução da rotina de hidrogenação; 2 – painel de comando; 3 – reservatório para purga do fluido eletrolítico; 4 – potenciostato; 5 – braço; 6 – barra de segurança; 7 – cuba eletrolítica; 8 – corpo de prova, 9 – *encoder* incremental rotativo; 10 – célula de carga e 11 – bancada de testes

Segundo a norma ASTM F1624 (ASTM, 2012), para cada condição devem ser realizados no mínimo quatro testes (não idênticos entre si, sendo um teste de determinação do valor de PFFS e outros três testes hidrogenados, de CPPAM), totalizando 48 testes. Como cada teste realizado pelo método RSL, nas condições desta dissertação, consome até 60 horas e a fabricação dos corpos de prova é dispendiosa, optou-se por utilizar o número mínimo de

corpos de prova estabelecido na norma ASTM F1624 (ASTM, 2012), a saber, quatro corpos de prova por condição.

Tabela 3.1: Matriz do planejamento fatorial completo  $2^1 \times 2^1 \times 3^1$  proposta

Condição	Seção transversal (mm <sup>2</sup> ) Fator 1	Raio do entalhe (μm) Fator 2	Dureza (HRC) Fator 3
7	-1 (10 x 10)	-1 (80)	-1 (36)
1	1 (30 x 30)	-1 (80)	-1 (36)
8	-1 (10 x 10)	1 (250)	-1 (36)
2	1 (30 x 30)	1 (250)	-1 (36)
9	-1 (10 x 10)	-1 (80)	0 (40)
3	1 (30 x 30)	-1 (80)	0 (40)
10	-1 (10 x 10)	1 (250)	0 (40)
4	1 (30 x 30)	1 (250)	0 (40)
11	-1 (10 x 10)	-1 (80)	+1 (44)
5	1 (30 x 30)	-1 (80)	+1 (44)
12	-1 (10 x 10)	1 (250)	+1 (44)
6	1 (30 x 30)	1 (250)	+1 (44)

O equipamento RSL 2 onde os testes foram conduzidos permite a realização de testes de flexão a quatro pontos (Fig. 3.2) em meio assistido segundo a norma ASTM F1624 (ASTM, 2012), em corpos de prova de seção quadrada. Com relação ao equipamento RSL 1 utilizado por Martiniano (2016), no RSL 2 houve a supressão da bomba peristáltica para recirculação do fluido eletrolítico, visto que em testes preliminares antes do início efetivo dos testes, com e sem bomba, não foi percebida nenhuma diferença aparente de desempenho na hidrogenação. Ocorreu monitoramento da temperatura dos testes por meio do emprego de uma sonda Pt-100 (faixa de medições possível de -200 °C a 650 °C, com erro máximo de medição da ordem de 0,2 °C para temperaturas situadas entre 4 °C e 60 °C (DIN IEC 751, 1983), mas a mesma não foi controlada utilizando-se um termostato, por exemplo, devido à pequena variação de temperatura observada na época de realização dos testes com carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio (CPPAM).

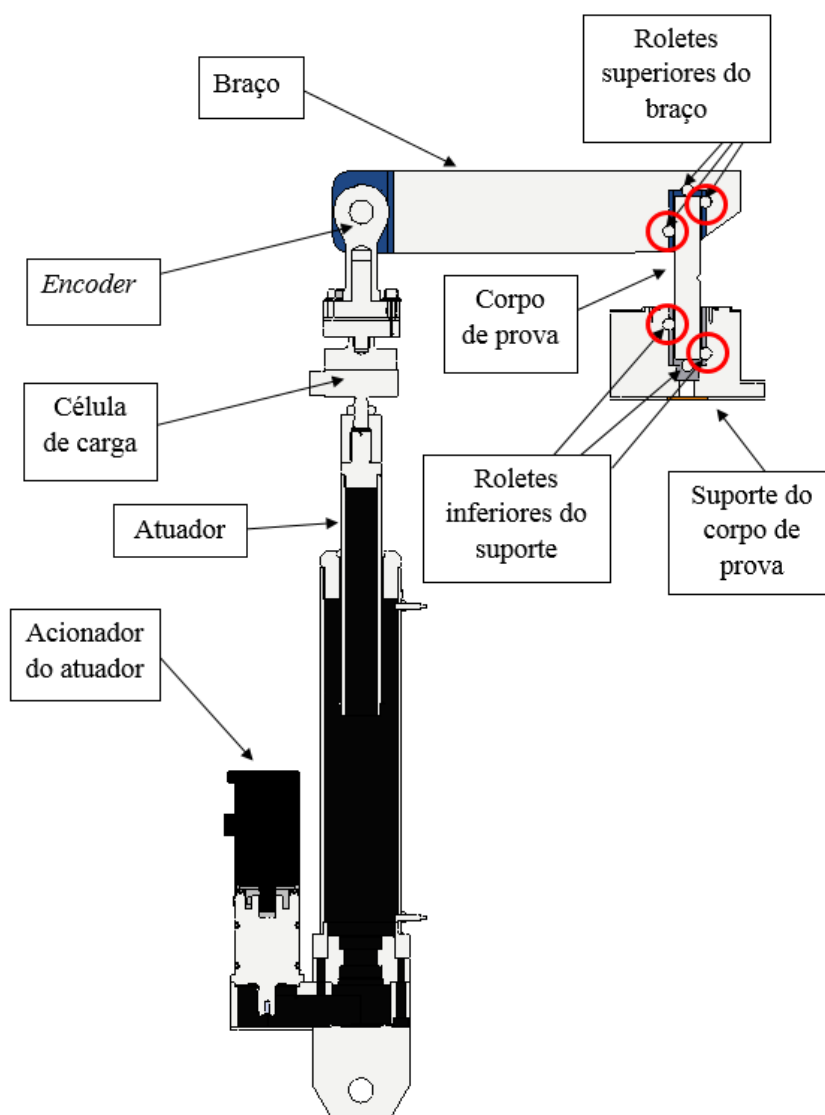


Figura 3.2: Esquema representando um corpo de prova, com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, submetido a flexão a quatro pontos e principais componentes do RSL 2

A Figura 3.3 mostra um esquema da configuração geral do RSL 2. Nesta configuração, a célula de carga, o *encoder*, o sensor de temperatura e o atuador são conectados ao módulo de aquisição QUANTUM X MX840B (vide informações técnicas do mesmo no Anexo I), que por sua vez é ligado ao computador do RSL 2, onde o operador configura e gerencia os testes. O módulo de aquisição MX840B é um amplificador universal com oito canais que possui uma interface de comunicação com o programa Labview®, plataforma utilizada para desenvolvimento do programa supervisor do RSL 2, o SURISEL, e é compatível com os sinais de cada sensor utilizado (célula de carga, *encoder* e sensor de temperatura). O

potenciostato, utilizado para realizar a hidrogenação dos corpos de prova através da cronoamperometria, independente do QUANTUM X.



Figura 3.3: Esquema geral de funcionamento do equipamento RSL 2

As configurações de alimentação, sensibilidade, unidade de medição e nome de cada sensor são realizadas diretamente através do programa CatmanEasy-AP® da HBM, fabricante do QUANTUM X MX840B. Assim, o programa supervisor SURISEL desenvolvido no Labview® faz apenas a leitura das características dos sensores e dos valores medidos através de bibliotecas de comunicação compatíveis fornecidas pela HBM. Dessa forma, os sensores podem ser configurados e testados de modo mais rápido e completo através do CatmanEasy-AP®, permitindo a utilização de qualquer sensor compatível com o QUANTUM X MX840B.

Durante a realização dos testes, a posição do atuador linear eletromecânico (modelo AA-054-01 do fabricante Kalatec, com capacidade de carga máxima igual a 20 kN) é controlada pelo *encoder* acoplado ao servomotor (modelo ECMA-CX-0807ES do fabricante

DELTA *Electronics*, com potência igual a 750 W) do equipamento. O *driver* (modelo ASD-A2-0721-M do fabricante DELTA *Electronics*) do atuador eletromecânico realiza a aquisição do ângulo medido pelo *encoder* do servomotor e disponibiliza o mesmo por meio da comunicação RS232. Assim, o programa desenvolvido no Labview® obtém a variação de ângulo medido utilizando a comunicação RS232 com o *driver* e realiza a conversão desse valor para obter o deslocamento do atuador. O *driver* do atuador utilizado comunica-se com a plataforma Labview® por meio da interface RS232. O controle de velocidade de deslocamento do atuador eletromecânico é realizado a partir do controle de velocidade de rotação do servomotor. Assim, o *driver* do atuador foi configurado para o modo de controle de velocidade.

O potencial elétrico é controlado utilizando-se um potenciostato, que possui interface USB e bibliotecas fornecidas pelo fabricante para controle e aquisição de dados do equipamento pela plataforma Labview®. Para maior flexibilidade de utilização do potenciostato, o mesmo foi conectado a um computador próprio para sua operação e utilizado exclusivamente para efetuar a hidrogenação dos corpos de prova, onde o programa fornecido pelo fabricante foi instalado.

### 3.2. Fabricação dos corpos de prova

Os corpos de prova para realização dos testes no equipamento RSL 2 foram fabricados em aço AISI 4140 tomando como base os requisitos da norma ASTM F519 (ASTM, 2017), as dimensões do equipamento existente e os fatores de estudo desta dissertação. Corpos de prova com seção transversal quadrada de 10 mm x 10 mm (e comprimento igual a 60 mm) e de 30 mm x 30 mm (e comprimento igual a 200 mm) foram utilizados. A profundidade e o ângulo de abertura do entalhe para ambas as configurações de corpos de prova foram definidos como sendo iguais a 3,6 mm e 90°, respectivamente. Dois raios de arredondamento do entalhe foram considerados: 80 µm e 250 µm. Três durezas foram avaliadas: 36 HRC, 40 HRC e 44 HRC. As Figuras 3.4 a 3.7 exibem as dimensões nominais dos corpos de prova, assim como as tolerâncias de projeto. Os desenhos técnicos para fabricação completa dos corpos de prova para testes no RSL 2 encontram-se no Apêndice I.

**Entalhe com raio de arredondamento nominal da raiz do entalhe igual a 250  $\mu$ m nos corpos de prova com dimensões nominais iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm**

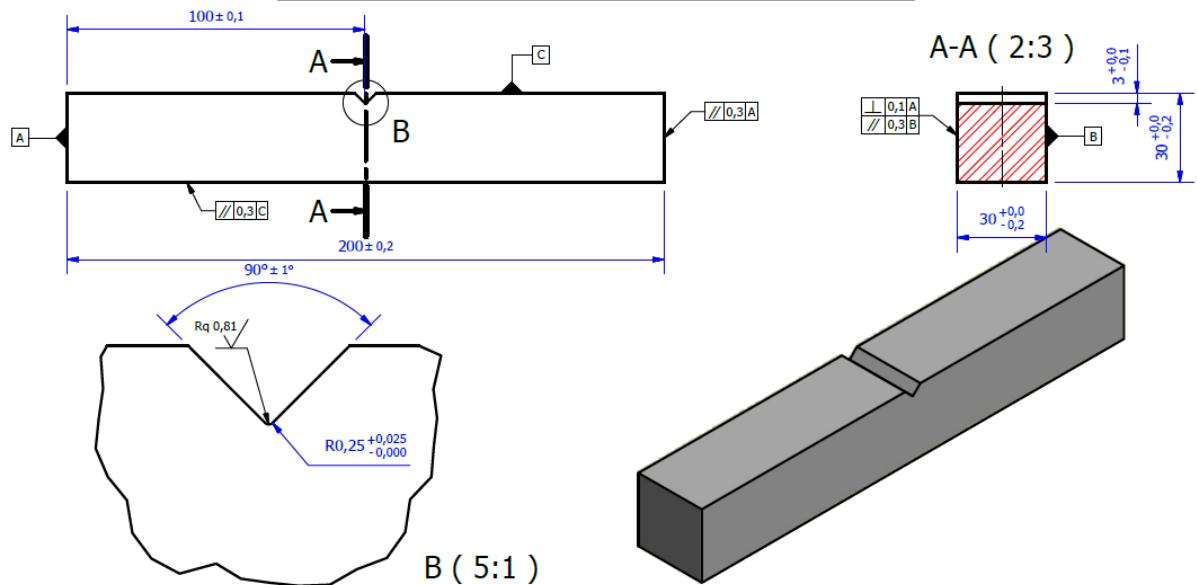


Figura 3.4: Dimensões e tolerâncias dos corpos de prova com seção transversal de 30 mm x 30 mm e raio do entalhe de 250  $\mu$ m

**Entalhe com raio de arredondamento nominal da raiz do entalhe igual a 80  $\mu$ m nos corpos de prova com dimensões nominais iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm**

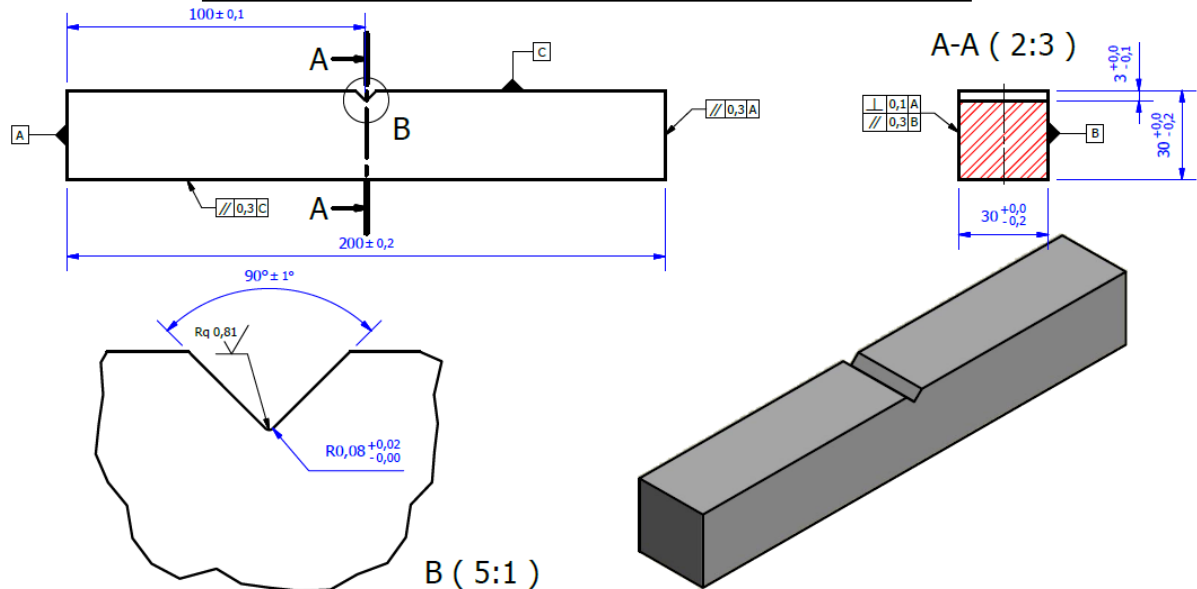


Figura 3.5: Dimensões e tolerâncias dos corpos de prova com seção transversal de 30 mm x 30 mm e raio do entalhe de 80  $\mu$ m



**Entalhe com raio de arredondamento nominal da raiz do entalhe igual a 250  $\mu$ m nos corpos de prova com dimensões nominais iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm**

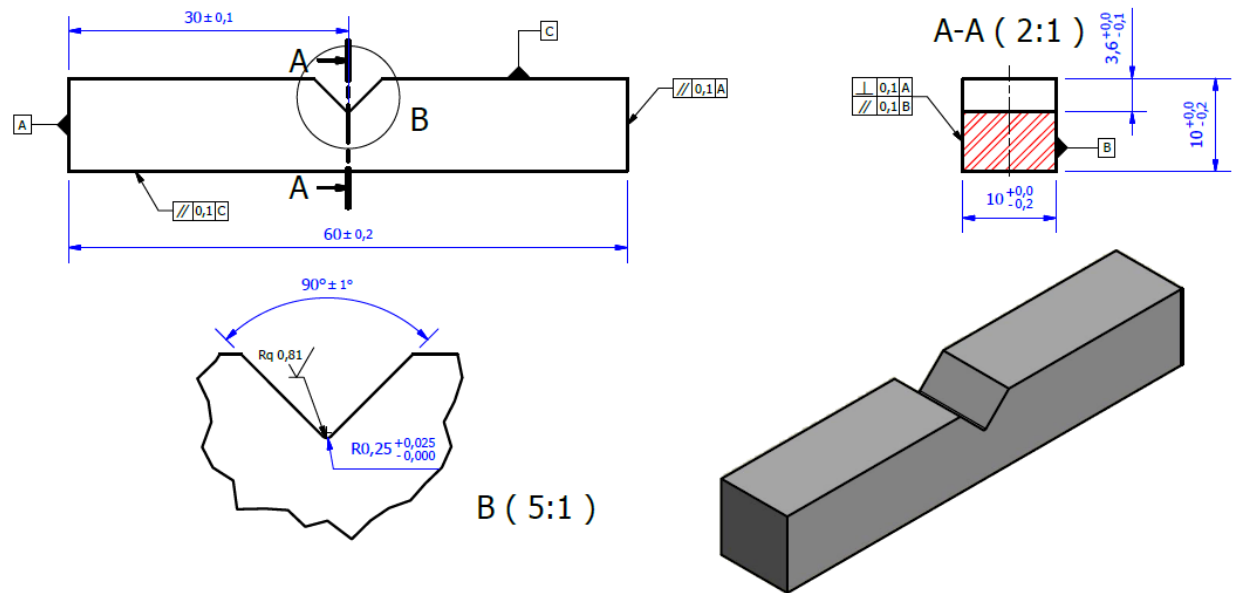


Figura 3.6: Dimensões e tolerâncias dos corpos de prova com seção transversal de 10 mm x 10 mm e raio do entalhe de 250  $\mu$ m

**Entalhe com raio de arredondamento nominal da raiz do entalhe igual a 80  $\mu$ m nos corpos de prova com dimensões nominais iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm**

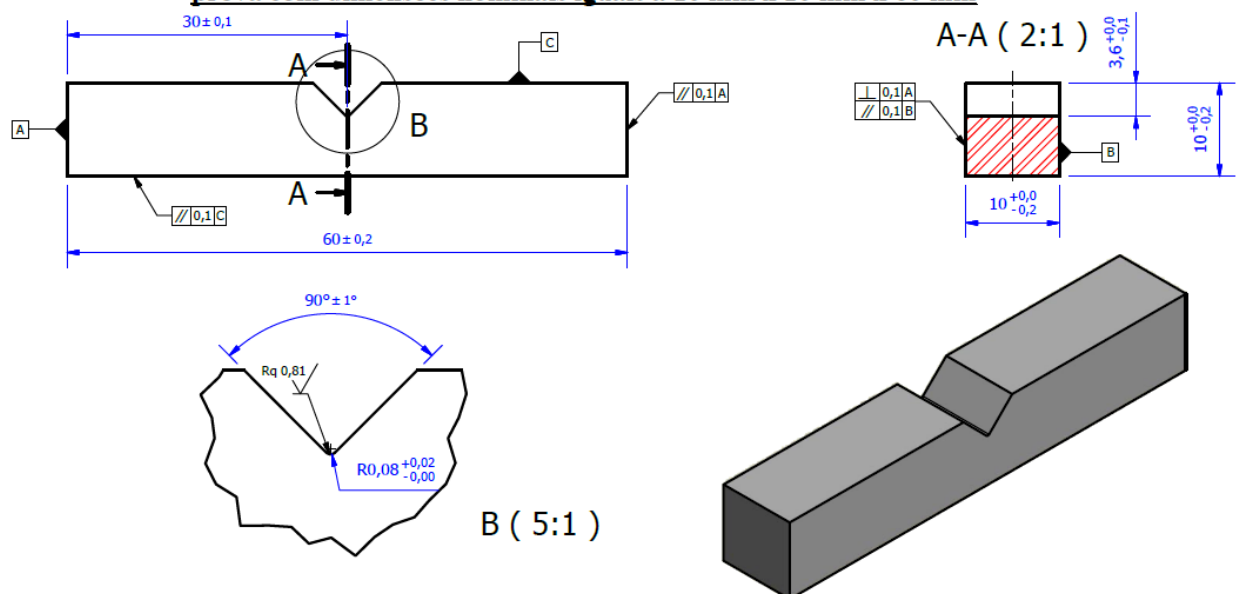


Figura 3.7: Dimensões e tolerâncias dos corpos de prova com seção transversal de 10 mm x 10 mm e raio do entalhe de 80  $\mu$ m

Cabe ressaltar que o raio do entalhe igual a 80  $\mu\text{m}$  não é previsto na norma ASTM F519 (ASTM, 2017). Ele foi proposto neste trabalho para aumentar o fator de concentração local de tensão, pela sua maior severidade, elevando o transporte de hidrogênio na região do entalhe nos testes de CPPAM.

Os corpos de prova foram fabricados a partir de duas chapas de aço AISI 4140, com dimensões iguais a 500 mm x 400 mm x 41 mm, Fig. 3.8. Estas foram inicialmente cortadas em uma serra de fita do fabricante FRANHO com fluido refrigerante solúvel LUZI ÓLEO 100 com diluição de 5 %. Em seguida, os mesmos passaram por uma operação de fresamento de topo em uma máquina CNC ROMI D1000. Foi utilizado um fluido de corte semissintético ITW RocolUltracut 370 AL e uma fresa do tipo bailarina do fabricante Black tools com quatro arestas cortantes. Posteriormente os corpos de prova foram tratados termicamente para se atingir as durezas desejadas. Foi deixado um sobremetal de 1 mm por face do corpo de prova, para compensar possíveis deformações, empenamentos e decarbonetações do mesmo, oriundos do tratamento térmico. Todos os corpos de prova foram retirados das chapas na mesma direção (no sentido do comprimento das chapas).



Figura 3.8: Chapas de aço AISI 4140 utilizadas para fabricação dos corpos de prova

### 3.2.1. Caracterização do material das chapas de aço AISI 4140

Para pré-caracterização do aço AISI 4140 utilizado para fabricar os corpos de prova, foi retirada uma amostra de cada chapa, a fim de analisar-se a composição química e a microestrutura das mesmas.

Para avaliar a composição química das chapas, a fim de verificar se elas correspondem ao material de projeto, foi utilizado um espectrômetro de emissão óptica com plasma

induzido, da marca LECO, modelo GDS 500, com resolução igual a 0,0001 % em peso, que consistiu na medição da radiação emitida pelos átomos após receberem energia de uma fonte externa. O certificado de calibração do espectrômetro de emissão óptica com plasma induzido encontra-se no Anexo II. A medição da composição química foi efetuada ao longo da espessura das chapas em cinco regiões de análise diferentes como mostra a Fig. 3.9, com o objetivo de verificar a existência de possíveis variações na composição química. Em cada região três medições foram executadas.

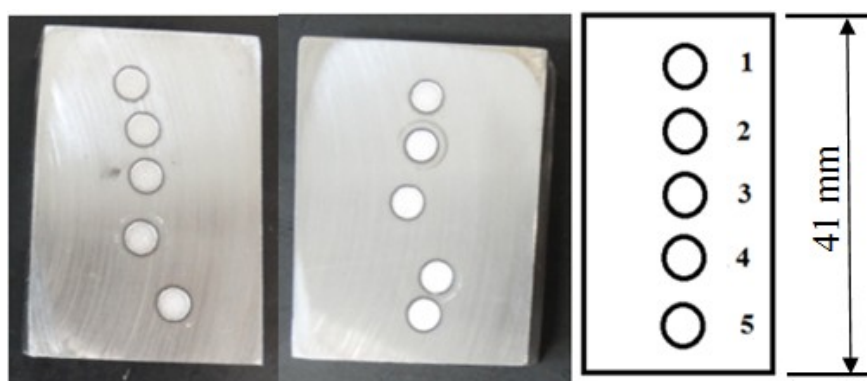


Figura 3.9: Amostras utilizadas nas análises de composição química com indicação das cinco regiões observadas

### 3.2.2. Análise metalográfica de amostras das chapas de aço AISI 4140

Os testes de análise de susceptibilidade à fragilização por hidrogênio foram executados seguindo-se os requisitos da norma ASTM F519 (ASTM, 2017). Por sua vez, a localização do entalhe no corpo de prova foi definida de acordo com a norma ASTM E1823 (ASTM, 2013).

De acordo com ASTM E1823 (ASTM, 2013), caso seja identificada uma clara direção de laminação ou bandeamento na chapa do material, o entalhe deve ser fabricado na direção S - C. Essas direções correspondem, respectivamente, à de laminação e à de espessura da chapa. A orientação correta, conforme a norma ASTM E1823 (ASTM, 2013), é indicada na Fig. 3.10.

Para identificar a direção de laminação das duas chapas utilizadas na fabricação dos corpos de prova, foram retiradas seis amostras, Fig. 3.11, visando à identificação da direção de deformação dos grãos e/ou das inclusões via análise metalográfica. As amostras foram embutidas por meio de uma embutidora automática do fabricante Arotec, modelo PRE30 e em seguida foram lixadas em uma lixadora do fabricante Arotec, modelo Aropol 2V com lixas de granulometria 220, 600 e 1200. Posteriormente, as amostras foram polidas em uma polidora

do fabricante Arotec, modelo Aropol E, com lubrificante de diamante sintético da marca Diapro e fabricante Struers, nas granulometrias de 6  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  e 0,04  $\mu\text{m}$  (sílica coloidal). As amostras foram analisadas no microscópio óptico primeiramente sem ataque químico, para identificação da direção das inclusões. Em seguida, as amostras foram atacadas quimicamente com o reagente Nital 2 %, para análise da microestrutura.

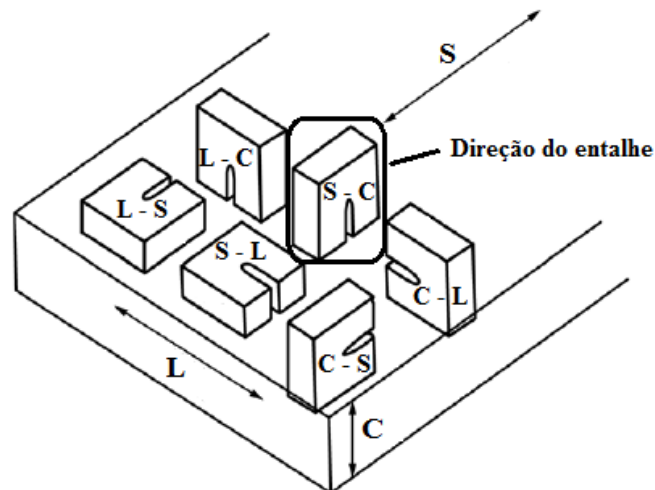


Figura 3.10: Direção de usinagem do entalhe para corpos de prova com seção transversal retangular (ASTM E1823, 2013, modificado)

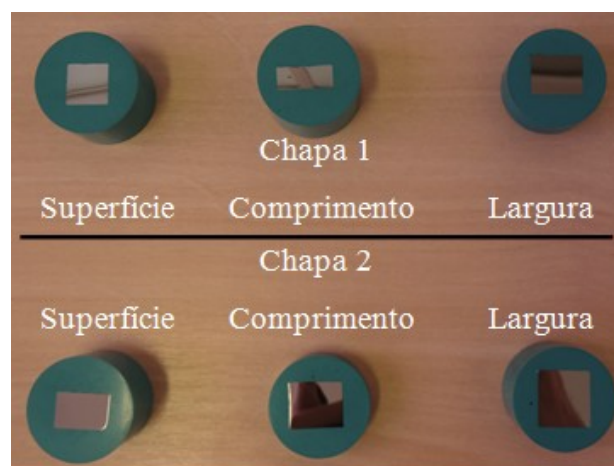


Figura 3.11: Amostras para análises da direção de laminação e da microestrutura

Em cada chapa, foram identificadas três faces: a face referente à superfície, a face correspondente ao comprimento e a face correspondente à largura das chapas. Um leiaute da identificação das faces das amostras para análise metalográfica é mostrado na Fig. 3.12.

A análise de textura dos grãos foi realizada com a objetiva de 5 X e a análise de microconstituintes com objetivas de 50 X e 100 X. As imagens foram obtidas em um microscópio óptico da marca Olympus, modelo BX51M, com registro de imagens utilizando-se uma câmera Zeiss, modelo AxioCam ICc5, integrada no microscópio.

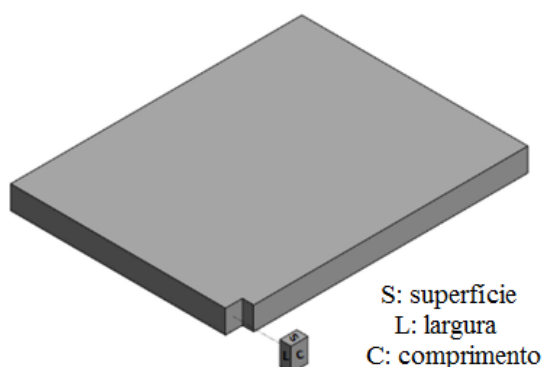


Figura 3.12: Leiaute da identificação das faces das chapas para análise metalográfica

### 3.2.3. Tratamento térmico dos corpos de prova

O tratamento térmico dos corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm foi terceirizado, enquanto que o dos corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm foi realizado em um dos laboratórios da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. A tolerância para cada uma das três durezas foi igual a  $\pm 1$  HRC e os corpos de prova foram posicionados verticalmente dentro do forno, a fim de minimizar possíveis deformações/empenamentos dos mesmos na realização da têmpera.

Para se atingir a dureza igual a 36 HRC, o tratamento térmico realizado foi de têmpera em óleo com austenitização a 870 °C, seguida de revenimento a uma temperatura igual a 570 °C. Por sua vez, para se atingir a dureza igual a 40 HRC, o tratamento térmico realizado foi o de têmpera em óleo com austenitização a 870 °C, seguida de revenimento a uma temperatura igual a 500 °C, enquanto que a dureza de 44 HRC foi alcançada por meio de um tratamento térmico que consistiu de têmpera em óleo com austenitização a 870 °C, seguida de revenimento a uma temperatura igual a 440 °C. Os tempos de austenitização foram iguais a uma hora. Para o revenimento dos corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm o tempo foi de uma hora e para os corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, igual a 30 minutos.

O forno terceirizado onde o tratamento térmico dos corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm foi realizado é do fabricante BRASIMET, código

70/80/100, ano 1998, termopar tipo N. A faixa de operação do mesmo é de 760 °C a 960 °C. O forno é calibrado semestralmente conforme requisito da norma aeroespacial AMS2750 (SAE, 1980), possuindo atmosfera protetora de argônio, a fim de evitar problemas de descarbonetação. O certificado de calibração do forno encontra-se no Anexo III.

O forno para realização do tratamento térmico dos corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm é do fabricante Jung, número 5786, ano 2008, modelo 2513, 2 fases, com tensão elétrica de 200 V e 18 A de corrente. A potência do forno é igual a 3,8 kW e sua temperatura máxima de operação é igual a 1300 °C.

Após o tratamento térmico, os corpos de prova foram novamente fresados na máquina CNC descrita anteriormente a fim de atender as tolerâncias especificadas no projeto. A velocidade de avanço foi igual a 450 m/mim, com profundidade de corte igual a 0,5 mm e 2500 RPM.

A dureza Rockwell C de todos os corpos de prova foi medida com um durômetro do fabricante Otto Wolpert-Werke G.m.b.H., número 6305, código 799. A resolução do equipamento é igual a 1 HRC, com faixa nominal de 99 HRC. Foi utilizada uma carga igual a 150 kgF, com um penetrador cônico de diamante com ângulo igual a 120°. Foram efetuadas três medições em cada corpo de prova, à temperatura ambiente. Antes de efetuar as medições de dureza dos corpos de prova, mediu-se três vezes a dureza de um padrão com dureza nominal de 61 HRC, obtendo-se uma média de 60 HRC, com desvio padrão igual a 1 HRC e incerteza expandida (95 %) igual a 2 HRC.

#### *3.2.4. Usinagem do entalhe nos corpos de prova*

O entalhe foi usinado em sete passes por meio do processo de eletroerosão a fio utilizando-se uma máquina da marca AgieCharmiles modelo FW2U, cujas informações técnicas encontram-se no Anexo IV. Durante o processo foi utilizado um fio de molibdênio com diâmetro igual a 0,12 mm e fluido de corte dielétrico em emulsão convencional Ero-Dic 206® do fabricante EromaEDM. O *offset* representa a espessura da camada de material que é retirada em cada passe, somada ao diâmetro do fio de molibdênio utilizado. O fio de molibdênio foi utilizado pois o desgaste do mesmo durante a usinagem é menor, quando comparado ao fio de cobre-tungstênio. Em cada um dos passes, uma determinada tecnologia de usinagem é utilizada, em função do desbaste ou do acabamento. Na Tabela 3.2 encontram-se os valores de *offset* da máquina de eletroerosão a fio e a tecnologia empregada em cada

passee, para entalhes com raio de arredondamento igual a 80  $\mu\text{m}$  ou 250  $\mu\text{m}$ , para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm.

Inicialmente foi efetuada a lavagem da cuba da máquina de eletroerosão a fio com água e do reservatório de fluido dielétrico com água e detergente neutro. Foi realizada a lubrificação das polias e dos rolamentos com desengripante Whitelub® do fabricante Orbi Química. Foram utilizados fio de molibdênio e fluido dielétrico totalmente novos, para que a superfície do entalhe não fosse contaminada, para evitar efeitos de oxidação, bem como para obter uma rugosidade menos elevada na raiz do entalhe. Para a fabricação dos entalhes dos corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, utilizou-se a tecnologia C401 nos dois primeiros passes (desbaste) e para a usinagem dos entalhes dos corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, utilizou-se a tecnologia C403 nos passes de desbaste.

Tabela 3.2: Valores de *offset* e tecnologia utilizados em cada passe de usinagem dos entalhes dos corpos de prova pelo processo de eletroerosão a fio, para ambos os raios de arredondamento do entalhe (80  $\mu\text{m}$  e 250  $\mu\text{m}$ )

Passe	Tipo	<i>Offset</i> (mm)	Tecnologia para corpos de prova 10 mm x 10 mm x 60 mm	Tecnologia para corpos de prova 30 mm x 30 mm x 200 mm
1	Desbaste	0,000	C401	C403
2		0,145	C401	C403
3	Acabamento	0,073	C822	
4		0,067	C822	
5		0,061	C823	
6		0,058	C823	
7		0,055	C823	

A especificação dos parâmetros de usinagem, para cada tecnologia de usinagem no processo de eletroerosão a fio, e o valor de rugosidade *Ra* de referência, sugerido pelo fabricante ao utilizar-se cada uma das tecnologias, encontram-se na Tab. 3.3.



Tabela 3.3: Tabela das condições de usinagem para cada tecnologia de usinagem

Tecnologia	<i>ON</i>	<i>OFF</i>	<i>IP</i>	<i>SV</i>	<i>GP</i>	<i>Ra</i> de referência
C401	3 $\mu$ s	3 $\mu$ s	2	1	0	2,6 $\mu$ m
C403	4 $\mu$ s	5 $\mu$ s	3	2	0	1,7 $\mu$ m
C822	6 $\mu$ s	4 $\mu$ s	3	1	0	1,3 $\mu$ m
C823	32 $\mu$ s	31 $\mu$ s	2	0	2	1,3 $\mu$ m

Na Tabela 3.3, *ON* significa o tempo de duração do pulso elétrico; *OFF* é o tempo de duração entre dois pulsos durante o qual não há passagem de corrente elétrica; *IP* é um índice relacionado à corrente elétrica e pode variar de 0,5 a 9,5; *SV* é um índice relacionado ao valor padrão da tensão elétrica em vazio, variando de 0 a 7 e *GP* indica se o pulso elétrico é quadrado (0) ou não (2).

A deposição da camada refundida nos entalhes durante a usinagem ocorre, sobretudo, nos últimos passes de acabamento, em que o aporte térmico e o volume de material removido são menores. Em processos de fabricação por eletroerosão a fio, pelo fato da peça ou do corpo de prova ser usinado na posição vertical (Fig. 3.13), o material refundido cai pela ação da força gravitacional e, dessa forma, a espessura da camada refundida produzida tende a ser menor do que em processos de eletroerosão por penetração.

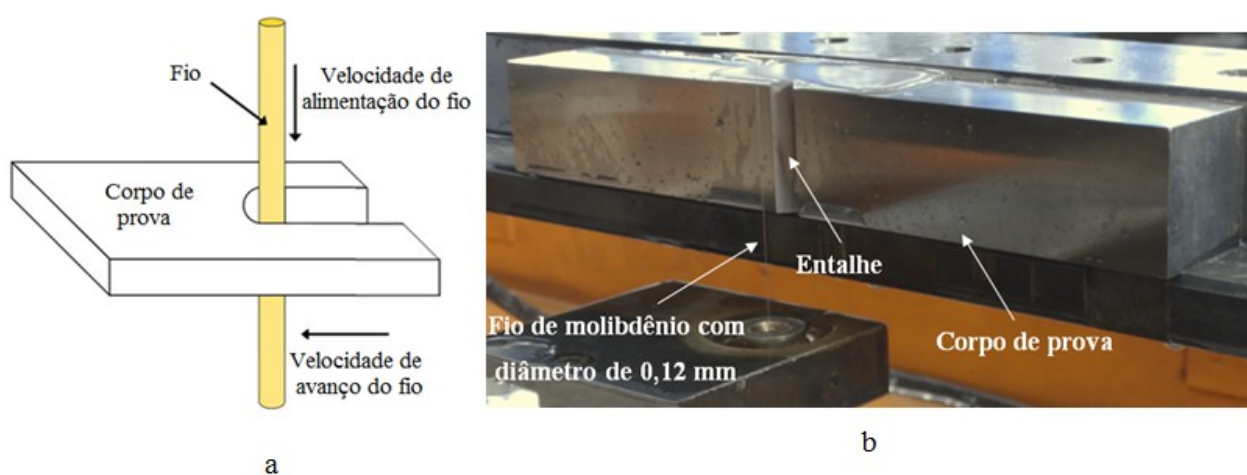


Figura 3.13: Posição do corpo de prova para usinagem do entalhe pelo processo de eletroerosão a fio (a) Ilustração esquemática; (b) Foto do processo de usinagem do entalhe de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm



No início de cada turno de usinagem, para garantir a correta dissolução do fluido dielétrico em água, mediu-se o índice Brix (rigidez dielétrica) do fluido de eletroerosão com um refratômetro digital portátil do fabricante Schmidt Haensch GmbH & Co (Fig. 3.14), modelo DHR FR1, número de série 08620821, número de referência igual a 200329, resolução igual a 0,1 °Bx e faixa de medição igual a 85 °Bx, com certificado de calibração mostrado no Anexo V.



Figura 3.14: Refratômetro utilizado para medição do índice Brix do fluido dielétrico

Martiniano (2016) observou a necessidade de desenvolvimento de procedimentos para efetuar o polimento e a medição da rugosidade do entalhe. Para obter a rugosidade da raiz do entalhe ( $R_q = 0,81 \mu\text{m}$  ou  $32 \text{ RMS}^1$ ) requerida na norma ASTM F519 (ASTM, 2017), foi aplicado um lixamento utilizando-se uma lixadora/polidora portátil do fabricante STRUERS modelo Transpol-2, Fig. 3.15. As características do equipamento são mostradas no Anexo VI.

<sup>1</sup>  $\text{RMS} = R_q$ , sendo que  $32 \text{ RMS}$  significa  $R_q = 32 \mu\text{in}$ . Como  $1 \mu\text{m} = 39,4 \mu\text{in}$ ,  $32 \text{ RMS} = 0,8128 \mu\text{m}$  (AGOSTINHO, 1977).

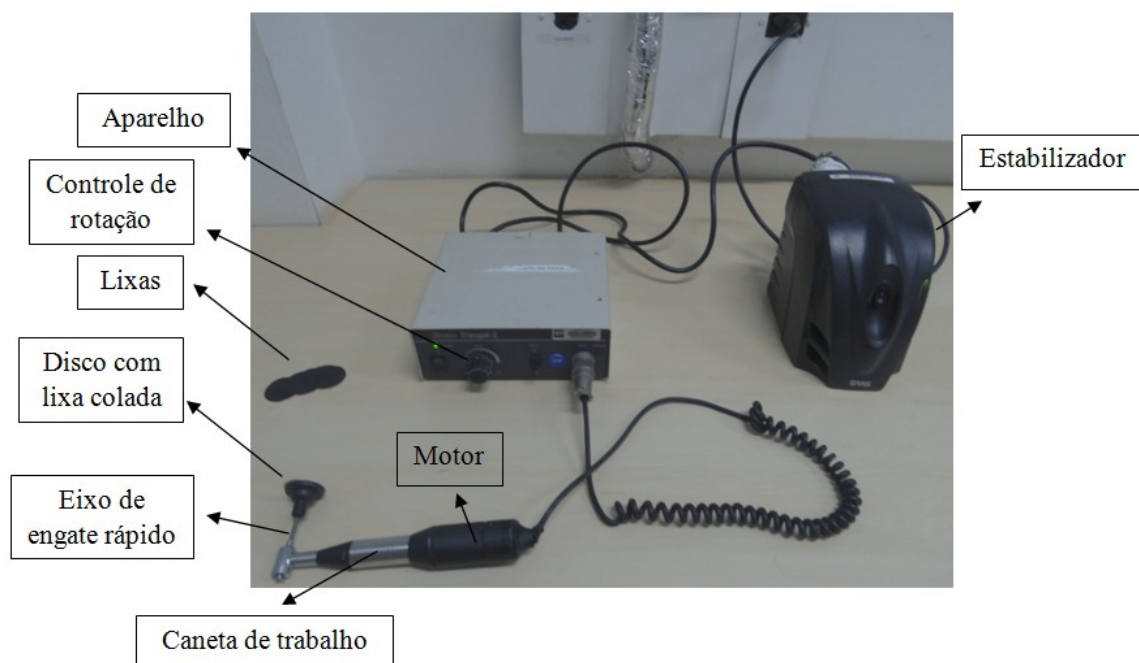


Figura 3.15: Aparelho lixador/polidor portátil utilizado para lixamento da raiz do entalhe

Foram utilizadas três lixas circulares com diâmetro de 32 mm e com granulometria 600, com uma duração da operação de lixamento de aproximadamente um minuto por lixa. A operação de lixamento foi realizada com cuidado a fim de evitar a alteração significativa da geometria e da profundidade do entalhe, sendo possível atender a especificação de rugosidade da raiz do entalhe utilizando-se apenas lixamento. O procedimento desenvolvido encontra-se no Apêndice II.

### 3.3. Controle dimensional e geométrico dos corpos de prova

O controle dimensional e geométrico dos corpos de prova foi efetuado visando verificar se as especificações de projeto foram atendidas.

#### 3.3.1. Procedimento de medição da rugosidade da raiz do entalhe

A rugosidade da raiz do entalhe e das faces ( $R_q = 1,60 \mu\text{m}$  ou 63 *RMS*) dos corpos de prova foi medida à temperatura ambiente com um interferômetro do fabricante Taylor Hobson, modelo Talysurf CLI 2000, com auxílio do programa Talysurf CLI 2000. Durante a medição foi utilizada luz branca, que permite efetuar medições com resolução de  $0,01 \mu\text{m}$ .

Este equipamento possui certificado de calibração N° 030/16 (Anexo VII) o qual declara uma incerteza expandida de  $\pm 0,30 \mu\text{m}$  para  $Ra = 6,00 \mu\text{m}$ , o que representa uma incerteza em porcentagem igual a 5 %.

De cada entalhe foi adquirida uma topografia considerando-se uma área igual a  $0,45 \text{ mm} \times 4,00 \text{ mm}$ . Os valores das ordenadas de 4000 pontos foram coletados em 226 linhas para obtenção da topografia. A velocidade de medição foi igual a  $100 \mu\text{m/s}$ . De cada topografia foram extraídos cinco perfis da raiz do entalhe.

O comprimento de amostragem adotado foi de  $0,8 \text{ mm}$  de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008). Cinco comprimentos de amostragem foram considerados, resultando em um comprimento de avaliação igual a  $4,0 \text{ mm}$ . O filtro Gaussiano foi aplicado no perfil bruto para retirada das ondulações e dos desvios de forma macrogeométricos. Os valores de  $Ra$  e  $Rq$  foram coletados. O procedimento desenvolvido para medição da rugosidade da raiz do entalhe dos corpos de prova encontra-se no Apêndice III.

### *3.3.2. Medição da topografia em um corpo de prova*

A topografia da face de um dos corpos de prova com seção transversal igual a  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  foi medida com o interferômetro especificado, considerando-se uma área nominal igual a  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ . Os valores das ordenadas e das abscissas de 8001 pontos foram coletados com espaçamento de  $0,5 \mu\text{m}$  para obtenção da topografia. A velocidade de medição foi igual a  $100 \mu\text{m/s}$ .

### *3.3.3. Procedimento de medição do raio de arredondamento do entalhe*

A medição do raio do entalhe foi efetuada em um microscópio óptico da marca Zeiss, modelo AxioCam ICc5, à temperatura ambiente controlada de  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ . Utilizando-se uma lente com ampliação de 10 X, registraram-se cinco imagens do raio do entalhe e, por meio do programa dedicado do equipamento, ajustou-se um círculo tangente, com raio conhecido, ao contorno do entalhe. A escolha da objetiva de 10 X é justificada no Apêndice IV. A Figura 3.16 ilustra uma imagem obtida durante a medição do raio do entalhe de um corpo de prova. O raio de arredondamento de todos os entalhes foi medido após o lixamento dos mesmos.



Figura 3.16: Imagem da medição do raio da raiz lixada do entalhe de um corpo de prova no microscópio óptico

Prévio às medições foi efetuada uma verificação da ferramenta círculo do microscópio óptico, por meio de um anel padrão de aço com diâmetro de valor convencional de 5,000 mm. Este anel padrão foi medido cinco vezes utilizando-se um aumento de 5 X. Os resultados obtidos e o cálculo da incerteza associada à medição são mostrados no Apêndice V.

#### 3.3.4. Procedimento de medição das dimensões, ângulos e tolerâncias de orientação

O comprimento, a largura e a altura dos corpos de prova foram medidos três vezes à temperatura ambiente de  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$  com um traçador de alturas digital da marca Mitutoyo, com resolução de 0,01 mm e faixa de medição de 300 mm, com certificado de calibração N° 8234/10 (Anexo VIII), o qual apresenta incerteza padrão de medição igual a 0,02 mm.

Foi utilizado um desempenho em granito com certificado de calibração número 06994/13 (Anexo IX) e igualmente um termohigrômetro digital, com resolução de 0,1  $^\circ\text{C}$  e faixa nominal de  $-20 ^\circ\text{C}$  a  $60 ^\circ\text{C}$ , com certificado de calibração número R4996/13 (Anexo X), emitido pelo Laboratório de Temperatura e Umidade da Elus Instrumentação. A incerteza associada à calibração é igual a 0,3  $^\circ\text{C}$  para o fator de abrangência ( $k$ ) igual a 2,00 e probabilidade de abrangência igual a 95,45 %.

A profundidade, o ângulo de abertura do entalhe e a base do entalhe (altura do corpo de prova subtraída da profundidade do entalhe) dos corpos de prova foram medidos cinco vezes à temperatura ambiente de  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$  com um projetor de perfil modelo PJ-A3000, marca Mitutoyo, com certificado de calibração N° 12137/12 (Anexo XI), com uma lente de ampliação de 10 X, resolução de 0,001 mm para as medições lineares e faixa nominal definida

pela capacidade dos eixos  $X$  e  $Y$ , igual a 50 mm para ambos os eixos. A resolução para medição de ângulos é de  $1'$  e a faixa nominal é igual a  $360^\circ$ . Para os eixos  $X$  e  $Y$ , a incerteza de medição é igual a 0,002 mm. Para a medição de ângulos, a incerteza de medição é igual a  $0^\circ 01'$ .

As tolerâncias de orientação dos corpos de prova (paralelismo e perpendicularidade) foram igualmente verificadas à temperatura ambiente de  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ , com uma máquina de medir a três coordenadas da marca Mitutoyo, modelo BR-M443, tipo ponte móvel, manual, com ponta única com esfera de rubi com 2 mm de diâmetro e certificado de calibração N° 07081/13 (Anexo XII). A resolução desta máquina é igual a 0,001 mm e volume de trabalho de  $400 \times 400 \times 300 \text{ mm}^3$ , definido pela faixa nominal das escalas dos eixos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , respectivamente. O programa dedicado à máquina é o MCosmos® 3.0.

De acordo com o certificado de calibração da máquina de medir por coordenadas, a incerteza linear associada ao eixo  $X$  é igual a  $(0,8 + L/1500) \mu\text{m}$  com  $k = 2,03$ , para o eixo  $Y$  é igual a  $(0,8 + L/3000) \mu\text{m}$  com  $k = 2,08$  e para o eixo  $Z$  a incerteza linear associada é igual a  $(0,9 + L/2900) \mu\text{m}$  com  $k = 2,11$ , em que  $L$  representa o valor da coordenada correspondente. O erro de apalpação é igual a  $(1,9 \pm 1,2) \mu\text{m}$  com  $k = 2,00$ . A probabilidade de abrangência é igual a 95 %.

A Figura 3.17 exibe um corpo de prova fixado na mesa da máquina de medir por coordenadas durante a medição das tolerâncias de orientação de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm. O sistema de coordenadas foi transferido para o corpo de prova e sua origem foi posicionada no ponto 0.

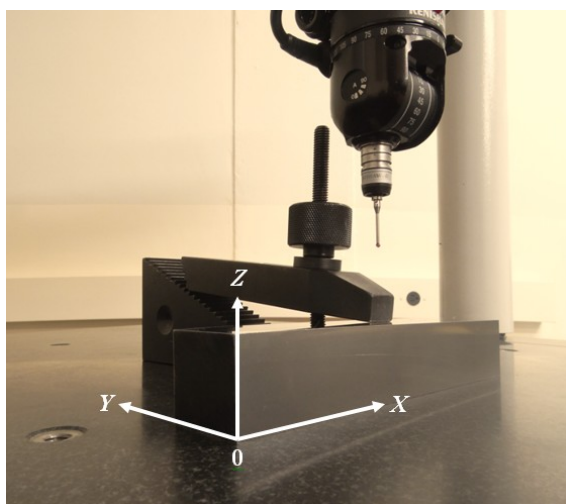


Figura 3.17: Corpo de prova fixado na mesa de medição da máquina de medir por coordenadas durante a medição dos desvios de orientação, com indicação da origem do sistema de coordenadas no ponto 0

### 3.3.5. Avaliação da incerteza de medição durante o controle dimensional e geométrico dos corpos de prova

A incerteza associada à medição dos diversos mensurando foi avaliada por meio da aplicação do método GUM proposto pelo INMETRO (2012a).

Para avaliação da incerteza associada à medição de dureza Rockwell C medida com durômetro, da rugosidade (parâmetros  $Rq$  e  $Ra$ ) da raiz do entalhe e das faces dos corpos de prova medida com interferômetro, do comprimento, largura e altura dos corpos de prova medidos com traçador de alturas e do ângulo de abertura do entalhe dos corpos de prova medido com projetor de perfil foi proposto o modelo matemático dado na Eq. (3.1).

$$M = \bar{X} + \Delta R + \Delta IC \quad (3.1)$$

Na Equação (3.1),  $M$  representa o mensurando em questão;  $\bar{X}$  é a média aritmética dos valores obtidos durante a medição em questão;  $\Delta R$  é a correção devido à resolução do sistema de medição em questão e  $\Delta IC$  é a correção associada à calibração do sistema de medição em questão.

Por sua vez, para determinação da incerteza associada à medição do raio de arredondamento do entalhe do corpo de prova medido com microscópio óptico, da profundidade do entalhe dos corpos de prova e da base do entalhe dos corpos de prova medida com projetor de perfil foi utilizado o modelo proposto na Eq. (3.2).

$$M = \bar{X} + \Delta R + \Delta IC + \Delta A \quad (3.2)$$

Na Equação (3.2),  $M$  representa o mensurando em questão;  $\bar{X}$  é a média aritmética dos valores obtidos durante a medição em questão;  $\Delta R$  é a correção devido à resolução do sistema de medição em questão;  $\Delta IC$  é a correção associada à calibração do sistema de medição em questão e  $\Delta A$  é a correção devido à ampliação da objetiva utilizada.

Por fim, a incerteza associada à medição das tolerâncias de orientação dos corpos de prova avaliadas na máquina de medir por coordenadas foi determinada utilizando-se o modelo proposto na Eq. (3.3).

$$M = \bar{X} + \Delta R + \Delta IC + \Delta E_a \quad (3.3)$$

Na Equação (3.3),  $M$  representa o mensurando em questão,  $\bar{X}$  denota a média aritmética dos valores obtidos durante a medição em questão,  $\Delta R$  representa a correção devido à resolução da máquina de medir por coordenadas,  $\Delta IC$  representa a correção devido à calibração da máquina de medir por coordenadas e  $\Delta E_a$  indica a correção associada ao erro de apalpamento.

Aplicando-se a lei de propagação de incertezas nos modelos matemáticos das Eqs. (3.1) a (3.3) e sabendo-se que as derivadas parciais são unitárias, obtém-se as Eqs. (3.4) a (3.6), que permitem estimar a incerteza padrão combinada associada a cada mensurando em questão.

$$u_c^2(M) = u^2(\bar{X}) + u^2(\Delta R) + u^2(\Delta IC) \quad (3.4)$$

$$u_c^2(M) = u^2(\bar{X}) + u^2(\Delta R) + u^2(\Delta IC) + u^2(\Delta A) \quad (3.5)$$

$$u_c^2(M) = u^2(\bar{X}) + u^2(\Delta R) + u^2(\Delta IC) + u^2(\Delta E_a) \quad (3.6)$$

### 3.4. Procedimento experimental

Neste item encontram-se as configurações do equipamento e a metodologia utilizada para a realização dos testes, bem como o cálculo da incerteza de medição relacionada à tensão mecânica.

#### 3.4.1. Configurações do equipamento

Para a realização dos testes com corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, a configuração da Fig. 3.2 foi utilizada. Para os testes com os corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, além da troca da célula de carga, fez-se necessário a utilização de dois adaptadores. A Figura 3.18 ilustra a configuração do equipamento nesse caso.

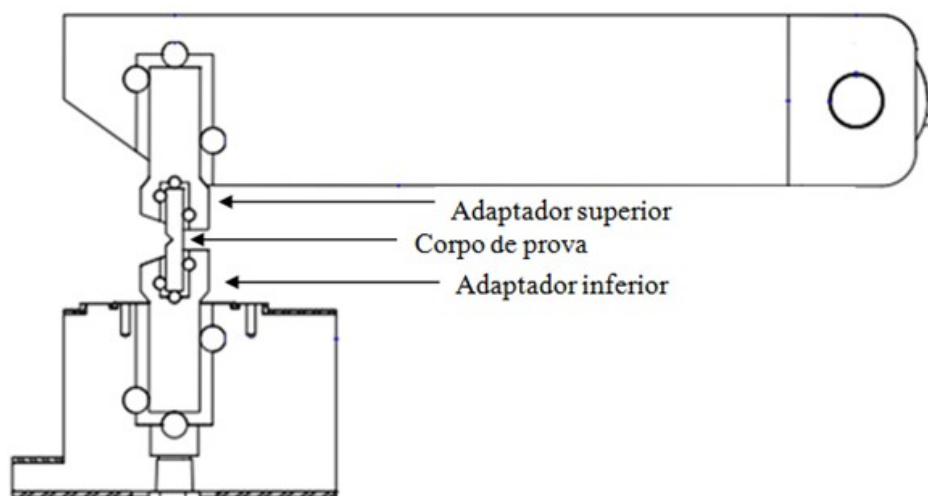


Figura 3.18: Uso de adaptadores para testes em corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm

Os adaptadores foram fabricados em aço AISI 420, com tratamento térmico de têmpera em óleo, austenitização a 1010 °C durante 30 minutos e revenimento a 360 °C durante uma hora, para obtenção de dureza igual a 49 HRC. Os adaptadores foram jateados com granalha de ferro e pintados com tinta epóxi cinza semi-brilhante Macropoxy HS 95 do fabricante Sherwin Williams, para minimizar os efeitos corrosivos da água do mar. A base do adaptador inferior não foi pintada, para possibilitar o contato elétrico do corpo de prova com o potenciostato (proteção catódica por corrente impressa). Para apoio dos corpos de prova e transferência dos esforços aos mesmos durante os testes, foram utilizados seis roletes (três situados no adaptador superior e três situados no adaptador inferior), fabricados em aço AISI 420, com o mesmo tratamento térmico utilizado nos adaptadores. A Figura 3.19 exhibe os adaptadores e os roletes utilizados para os testes com corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm.



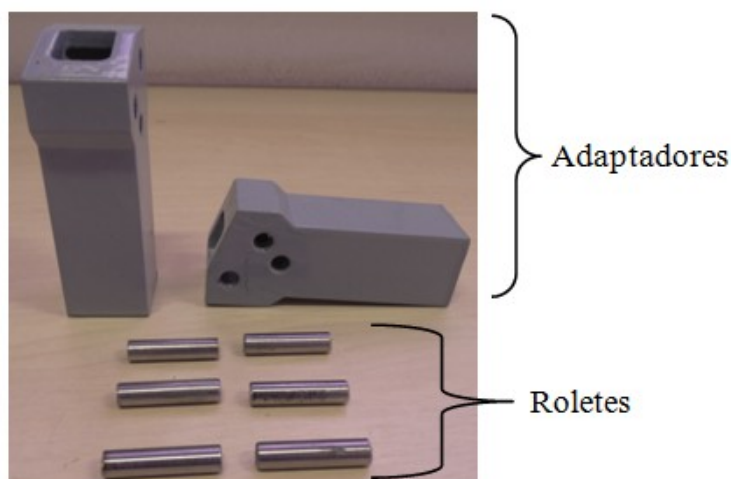


Figura 3.19: Adaptadores e roletes para testes em corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm

#### 3.4.2. Cálculo da tensão mecânica no corpo de prova

Conforme explicado em Martiniano (2016), na equação de cálculo da tensão mecânica no corpo de prova, algumas distâncias e diâmetros dos componentes do equipamento são utilizados, além da força medida durante o teste, do ângulo de rotação do braço, do comprimento e da largura do corpo de prova e da altura do corpo de prova subtraída da profundidade do entalhe. A Figura 3.20 ilustra as distâncias e diâmetros considerados no cálculo da tensão mecânica para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm. Estes foram medidos cinco vezes com a máquina de medir por coordenadas (exceto o comprimento do corpo de prova, indicado por  $L_{CP}$ , medido com um traçador de alturas digital).

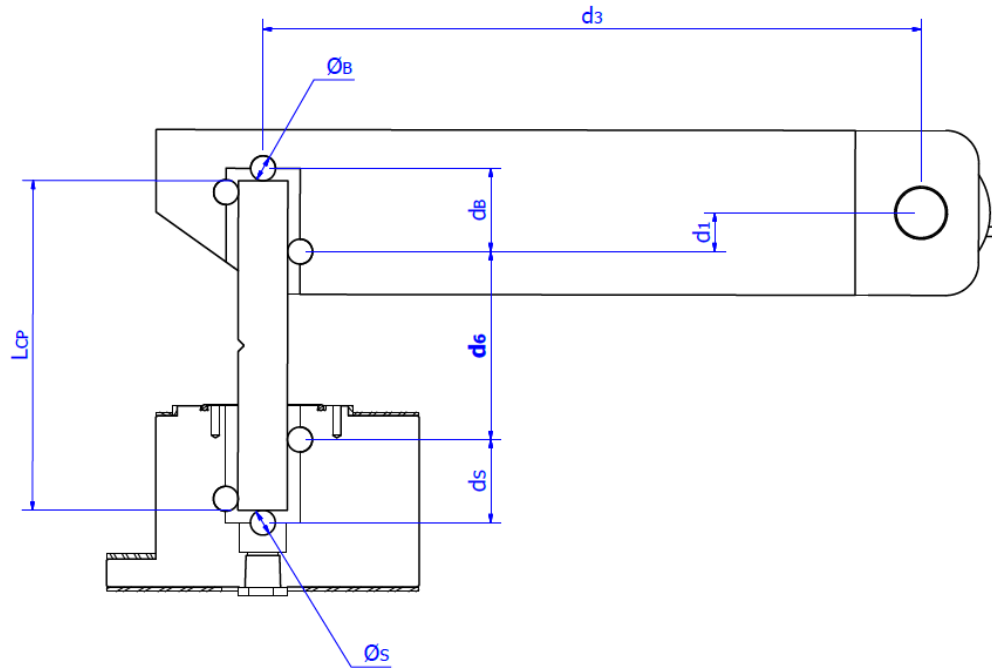


Figura 3.20: Distâncias e diâmetros envolvidos no cálculo da tensão mecânica no corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm

Para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, o cálculo de  $d_6$  foi efetuado segundo a Eq. (3.7), diferentemente do valor constante adotado por Martiniano (2016) para todos os testes. A única componente do cálculo de  $d_6$  que varia em função do corpo de prova é o seu próprio comprimento,  $L_{CP}$ .

$$d_6 = L_{CP} + \frac{\phi_S}{2} + \frac{\phi_B}{2} - d_S - d_B \quad (3.7)$$

Na Equação (3.7),  $L_{CP}$  indica o comprimento do corpo de prova;  $\phi_B$  representa o diâmetro do furo do rolete superior (braço);  $\phi_S$  é o diâmetro do furo do rolete inferior (suporte do corpo de prova);  $d_S$  é a maior distância vertical entre centros dos furos dos roletes do suporte do corpo de prova e  $d_B$  é a maior distância vertical entre centros dos furos dos roletes do braço.

A Figura 3.21 ilustra as distâncias envolvidas no cálculo da tensão mecânica para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, medidos cinco vezes com a



corpo de prova e  $\phi_{A2}$  é o diâmetro do furo do rolete mais abaixo no adaptador inferior do corpo de prova.

Tanto para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm quanto para 10 mm x 10 mm, a tensão é calculada segundo a Eq. (3.9) (PILKEY *et al.*, 2008).

$$\sigma = F_a \left[ \frac{3}{bh^2} (2 d_1 \sin \theta + 2 d_3 \cos \theta + d_6 \sin \theta) - \frac{\cos \theta}{bh} \right] \quad (3.9)$$

Na Equação (3.9),  $\sigma$  é a tensão nominal na direção longitudinal do corpo de prova;  $F_a$  é a força realizada pelo atuador linear;  $d_1$  representa a distância vertical entre o centro do eixo de giro do braço e o centro do furo do rolete mais abaixo no braço;  $d_3$  é a distância horizontal do eixo de giro do braço em relação ao eixo central do corpo de prova;  $d_6$  é a distância vertical entre os centros do furo do rolete mais abaixo do braço e do furo do rolete mais acima do suporte do corpo de prova;  $b$  representa a largura do corpo de prova;  $h$  representa a altura do corpo de prova subtraída da profundidade do entalhe (dimensão denotada “base do entalhe” neste trabalho) e  $\theta$  representa o ângulo de giro do braço em relação ao atuador.

### 3.4.3. Metodologia para realização dos testes de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio (CPPAM) no RSL 2

A seguir encontra-se o procedimento utilizado nesta dissertação para realização de todos os testes de CPPAM no RSL 2. Ao ligar o painel de controle do RSL 2, levantou-se manualmente o braço do equipamento em aproximadamente 180°, para referenciar o ângulo medido pelo *encoder*. O corpo de prova foi então posicionado no seu suporte e encaixado no furo quadrado do braço. O corpo de prova foi manuseado utilizando-se luvas de látex, para evitar contaminações do mesmo.

A seguir foi informado à rotina desenvolvida no programa MATLAB R2014b denominada “perfil de carregamento”, mostrada no Apêndice VI, o valor da força máxima de ruptura (PFFS) do corpo de prova ao ar. Com esta informação o programa criou automaticamente um documento de texto com o perfil em patamares para carregamento dos corpos de prova, seguindo o padrão (10, 5, 2,4). Em seguida iniciou-se o programa supervisor do RSL 2 (SURISEL) e o documento de texto gerado foi anexado no mesmo.

Para calcular os coeficientes da equação que calcula a tensão ( $\sigma$ ) para um determinado corpo de prova, deveu-se fazer uso de outra rotina desenvolvida no MATLAB R2014b intitulada “tensão” (Apêndice VII). Ao informar a largura do corpo de prova ( $b$ ), a altura do corpo de prova subtraída da profundidade do entalhe ( $h$ ) – grandeza denominada “base do entalhe” – e o comprimento do corpo de prova, a tensão foi calculada e fornecida em função da força medida ( $F_a$ ) pela célula de carga e do ângulo de rotação do braço ( $\theta$ ) medido pelo *encoder* incremental, conforme exprime a Eq. (3.10).

$$\sigma = F_a (x \cos \theta + y \sin \theta) \quad (3.10)$$

Na Equação (3.10),  $x$  e  $y$  são calculados pela rotina “tensão”. Os valores de  $x$  e  $y$  calculados para todos os corpos de prova encontram-se no Apêndice VIII.

Posteriormente, os valores de  $x$  e  $y$  calculados foram substituídos no programa SURISEL. O teste foi nomeado e o valor de redução de força (5 % do valor de PFFS naquela condição) foi informado como um dos critérios de parada do teste. Para referenciar a força do teste, o atuador foi recuado com baixas velocidades (da ordem de 2 mm/s) até que o corpo de prova estivesse na iminência de travamento entre o suporte e o braço, sem folgas. A barra de segurança foi colocada no equipamento e a cuba foi preenchida com a solução eletrolítica (água com sal com concentração de 3,5 %), até um nível pré-determinado e constante para todos os testes. Usando-se o programa NOVA disponível em um computador paralelo, a hidrogenação do corpo de prova foi iniciada. O nível de KCl do eletrodo de referência foi completamente preenchido. O teste pôde finalmente ser iniciado via programa SURISEL. Ao fim de cada teste, a solução eletrolítica foi descartada e a cuba foi limpa com o auxílio de um algodão embebido com álcool. Os parafusos que fixam os contra-eletrodos de grafite na tampa da cuba de acrílico, embora fossem fabricados em aço inoxidável, corroíam-se rapidamente por contaminação das porcas oxidadas e foram periodicamente trocados, bem como as conexões do tipo garra entre o potenciostato e tais parafusos.

#### 3.4.4. Fontes de erro na operação do RSL 2

Pode-se citar algumas fontes de erro na operação do RSL 2, que influenciam no resultado de tensão calculada e no desempenho da hidrogenação do corpo de prova. Algumas

delas são citadas a seguir, assim como algumas recomendações para que sejam introduzidas fontes adicionais de erro:

- Existem incertezas associadas às medições das dimensões dos corpos de prova, bem como da profundidade do entalhe e da dureza (sobretudo nos corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, em que o centro do corpo de prova é obrigatoriamente mais macio do que a superfície);
- Existem fontes de incerteza associadas às medições das distâncias e diâmetros dos componentes do RSL 2, utilizados na equação de cálculo da tensão no corpo de prova;
- A concentração e o volume de fluido eletrolítico (água destilada e sal) não são constantes em função do teste;
- O pH e o teor de oxigênio da solução eletrolítica não foram controlados ou medidos e a temperatura dos testes de CPPAM não foi controlada;
- Existem pequenas folgas entre o corpo de prova, o furo do braço e o suporte do corpo de prova, sobretudo quando adaptadores são utilizados para testes em corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm;
- Existem fontes de incerteza no ângulo medido pelo *encoder* incremental e na medição de força pela célula de carga;
- A vibração mecânica pode afetar os valores de força medidos, sobretudo quando forças reduzidas são utilizadas;
- O operador do RSL 2 não deve negligenciar o referenciamento do ângulo do braço do equipamento e da força medida pela célula de carga antes de iniciar os testes, uma vez que os valores de força e ângulo são variáveis significativas na equação de cálculo da tensão no corpo de prova;
- Existe a possibilidade de ocorrerem erros grosseiros como troca de dígitos na entrada da equação da tensão, digitação incorreta do número do corpo de prova ou erro de digitação no valor de redução de força utilizado para término do teste, além da seleção incorreta do arquivo de entrada para o perfil de carregamento em patamares do corpo de prova;
- Não preencher o nível de KCl no eletrodo de referência;
- Não posicionar corretamente o corpo de prova entre o suporte e o braço;

- Impurezas contidas na cuba eletrolítica podem afetar a hidrogenação, como lamelas de grafite que se desprendem dos contra-eletrodos (ASTM G5, 2014) ou pontos de corrosão dos parafusos dos contra-eletrodos que contaminam a cuba;
- A configuração do equipamento não é a mais adequada para testes em corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, devido às baixas forças utilizadas nestes testes (em alguns deles, os patamares iniciais são da ordem de 2 N), à necessidade da utilização de adaptadores e ao peso elevado do braço de carregamento (12 kg).

### 3.5. Verificação das duas montagens do RSL 2

A força aplicada nos corpos de prova foi medida por uma célula de carga que permite a utilização de forças de tração e compressão, fabricada em aço inoxidável e com compensação de força lateral, montada sobre o atuador. Nos corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, foi utilizada uma célula de carga da marca HBM, modelo U2B, com capacidade de 20 kN. O certificado de teste da célula de carga de 20 kN encontra-se no Anexo XIII. A força nos testes com corpos de prova seção transversal igual a 10 mm x 10 mm foi por sua vez medida com uma célula de carga calibrada da marca HBM, modelo U2b, com capacidade de 1 kN. O certificado de calibração da célula de carga de 1 kN encontra-se no Anexo XIV.

O controle de força do atuador é efetuado a partir da leitura dos valores medidos pela célula de carga e de um controlador PID (proporcional integral derivativo). Assim, foi adicionado no SURISEL um controlador PID que recebe como sinal de retroalimentação os valores medidos pela célula de carga e envia os comandos de velocidade para o *driver* do atuador, para manter a força constante e no valor de referência estabelecido.

O módulo de aquisição utiliza um conversor delta-sigma de 24 bits. Depois de adquirir o sinal, ocorre a filtragem digital do mesmo com um filtro Bessel cuja frequência de corte é definida em função da taxa de amostragem. Como a taxa de amostragem configurada no QUANTUM X é de 1000 Hz, esse filtro deve ter uma frequência de corte abaixo de 500 Hz. Portanto, o sinal tem resolução de 24 bits antes de passar pelo filtro. A faixa de medição utilizada pelo QUANTUM X é de +/- 5,0000 mV/V, o fundo de escala da célula de carga de

20 kN é de 2,0003 mV/V e o fundo de escala da célula de carga de 1 kN é de 2,0160 mV/V. Antes de passar pelo filtro, o sinal teria a seguinte resolução, expressa na Eq. (3.11):

$$R = \frac{f_{esc \text{ kN}}}{2^{24} \left( \frac{f_{esc \text{ mV/V}}}{5,0000 \text{ mV/V}} \right)} [kN] \quad (3.11)$$

Na equação (3.11),  $f_{esc \text{ kN}}$  é o fundo de escala da célula de carga em kN que pode ser 1 kN ou 20 kN e  $f_{esc \text{ mV/V}}$  é o fundo de escala da célula de carga em mV/V, igual a 2,0160 mV/V para a célula de carga de 1 kN e igual a 2,0003 mV/V para a célula de carga de 20 kN.

Como o sinal é filtrado depois de adquirido, a resolução final da célula de carga é definida em função da forma como o QUANTUM X considera a leitura antes e depois da filtragem. Se ele armazena o número na forma de inteiro de 32 bits, a resolução seria a mesma da Eq. (3.11), apenas substituindo 24 por 32. Porém, se ele armazena no formato de ponto flutuante, a resolução também seria extremamente pequena e função do valor lido. Como considerando 32 bits os valores de resolução obtidos são próximos de zero, optou-se por utilizar a Eq. (3.11). A célula de carga de 20 kN tem resolução de 2,979 mN e a célula de carga de 1 kN tem resolução de 0,147 mN.

Para ambas as montagens, o *encoder* incremental (não são realizadas medições de ângulo absolutas, mas relativas) utilizado para medir o ângulo de rotação do braço do RSL 2 é do tipo rotativo, do fabricante HEIDENHAIN, modelo ROD 426, com 2000 pulsos por revolução (PPR). O certificado de conformidade do *encoder* encontra-se no Anexo XV. Para cada giro de 360°, 2000 valores de ângulo são lidos em intervalos iguais. Logo, a resolução do *encoder* é de 0,18°. A precisão do *encoder* é igual a 0,009°, com faixa de operação de temperatura de -10 °C a 100 °C e com faixa de tensão de alimentação igual a  $(5 \pm 0,5)$  VDC. O controle de posição do atuador é efetuado a partir de um controlador PID e da leitura dos valores medidos pelo *encoder* do servomotor, que são posteriormente convertidos em valores de deslocamento. O controlador PID inserido no SURISEL recebe como sinal de retroalimentação os valores medidos de deslocamento e envia os comandos de velocidade para o *driver* do atuador, objetivando a manutenção da posição constante e no valor de referência estabelecido.



Independentemente da montagem, a verificação do RSL 2 consistiu na quantificação do erro entre a tensão instantânea no corpo de prova, calculada analiticamente pelo programa SURISEL do RSL, e a tensão lida em extensômetros colados nos corpos de prova e devidamente calibrados pelo fabricante, em ponte completa, segundo a Eq. (3.12). O objetivo do teste de verificação é avaliar se a força, medida pela célula de carga e o ângulo de giro do braço, medido pelo *encoder*, são adequados, por meio da comparação com a tensão lida por extensômetros e colados no corpo de prova.

$$Erro \text{ (%) } = 100 \left( \frac{\sigma_{ext} - \sigma_{calc}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \right) \quad (3.12)$$

Na Equação (3.12),  $\sigma_{ext}$  é a tensão lida nos extensômetros;  $\sigma_{calc}$  é a tensão instantânea calculada pelo programa supervisor do RSL de acordo com a Eq. (3.10) e  $\sigma_{m\acute{a}x}$  é a tensão máxima obtida no teste de verificação em questão.

A incerteza expandida (U) associada à tensão calculada foi determinada utilizando-se o método GUM via uma rotina criada no programa MATLAB R2014b (Apêndice IX). Foi estimado a repetibilidade das medições (desvio padrão) e igualmente o erro máximo ( $E_{m\acute{a}x}$ ) associado à tensão e à medição de força, por meio da Eq. (3.13).

$$E_{m\acute{a}x} = Erro \text{ (%) } + U \text{ (%) } \quad (3.13)$$

O erro da força medida pela célula de carga em questão foi estimado por meio da Eq. (3.14):

$$Erro = \bar{X} - VC \quad (3.14)$$

A cola utilizada para fixar os extensômetros nos corpos de prova foi a cola de secagem rápida modelo Z70 do fabricante HBM, que tem como princípio ativo o cianoacrilato. Para a verificação da célula de carga de 20 kN, o teste foi realizado em um corpo de prova de aço AISI 4140 não-entalhado com dureza igual a 36 HRC. Para a verificação da célula de carga de

1 kN, o teste foi realizado em um corpo de prova não-entalhado, no mesmo material, com dureza igual a 44 HRC.

Os extensômetros ou *strain gauges* são sensores que permitem a quantificação da deformação ( $\varepsilon$ ) observada nos corpos de prova (HOFFMANN, 1989). Como o módulo de elasticidade ( $E$ ) do aço AISI 4140 é conhecido, por meio de uma simples multiplicação, efetuada através do programa CatmanEasy-AP®, é possível obter-se a tensão no corpo de prova ( $\sigma$ ), segundo a Eq. (3.15).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.15)$$

Para ambas as montagens (corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm com célula de carga de 1 kN e corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm com célula de carga de 20 kN) foi utilizada uma configuração de ponte completa de quatro *strain gauges* uniaxiais da marca HBM modelo 1-LY41-1.5/120 (com certificado de calibração mostrado no Anexo XVI) em série, com resistência elétrica de 120  $\Omega$  e grade de medição nominal de 1,5 mm. A Figura 3.22 exhibe os extensômetros colados para cada uma das montagens.

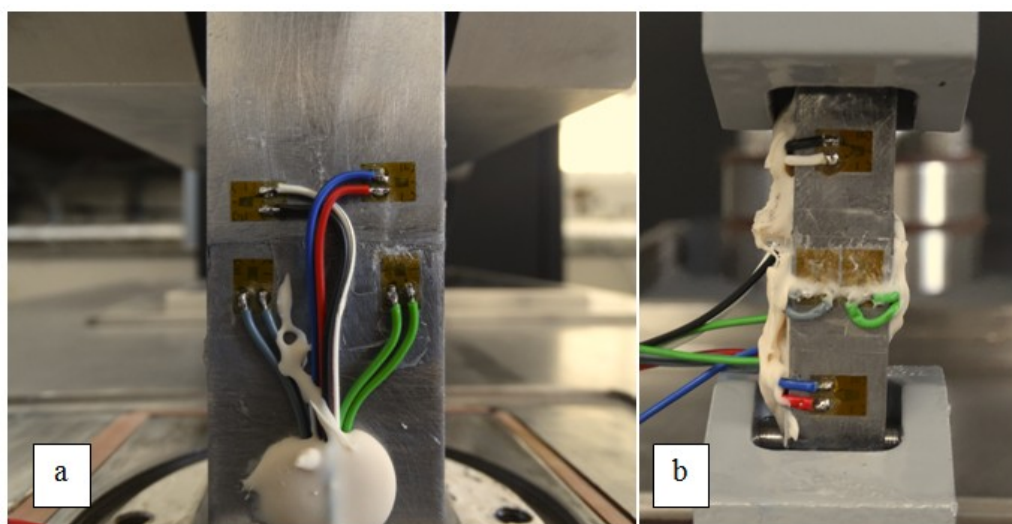
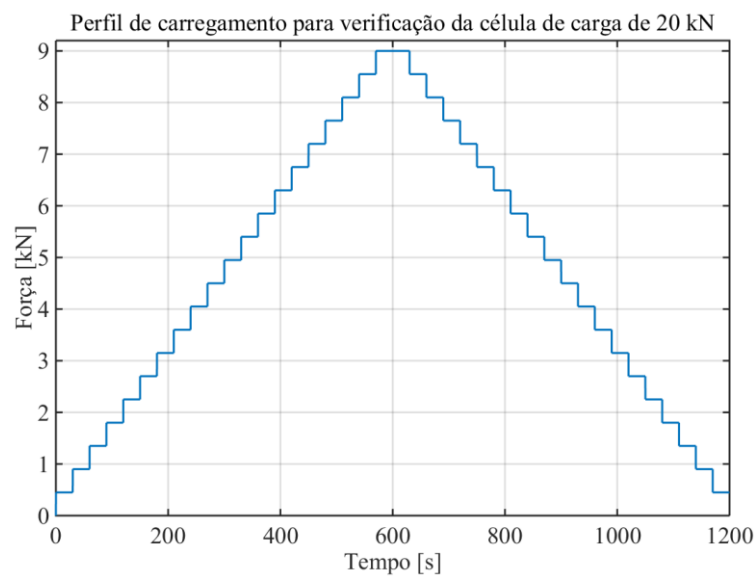
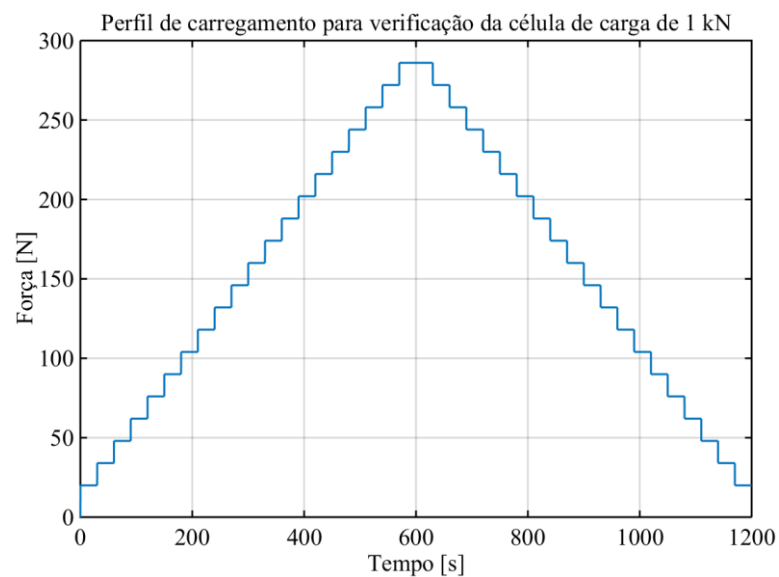


Figura 3.22: Configuração de ponte completa para verificação da tensão mecânica calculada – a) montagem para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm; b) montagem para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm

O teste de verificação da tensão consistiu em aplicar-se uma força em patamares no corpo de prova ao ar, com carregamento (20 patamares) e descarregamento (20 patamares) do corpo de prova. Cada patamar durou 30 s e foi incrementado em 5 % do valor da força máxima do teste. Para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, a força aplicada no corpo de prova variou de 0,5 a 9,0 kN, conforme mostra a Fig. 3.23a. Para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, a força aplicada no corpo de prova variou de 20 a 286 N, conforme mostra a Fig. 3.23b.



(a)



(b)

Figura 3.23: Configuração do teste para verificação da tensão calculada instantaneamente pelo programa SURISEL (a) célula de carga de 20 kN; (b) célula de carga de 1 kN

Vale ressaltar que utilizar uma célula de carga com faixa nominal de 500 N, para realização dos testes com corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, não convém no contexto desta dissertação, pois para corpos de prova com dureza mais elevada (44 HRC), a força atingida nos testes de determinação do valor de PFFS poderia ser próxima do fundo de escala desta célula de carga, o que a danificaria. O valor mínimo de faixa nominal, encontrado no mercado, para células de carga que atendem aos requisitos de fundo de escala, compatibilidade do sinal com o sistema de aquisição do RSL 2, sensibilidade, conexões de montagem e exatidão na medição para testes no RSL 2 é igual a 1 kN. Utilizar uma célula de carga não adaptada poderia comprometer a qualidade dos resultados, uma vez que não se conseguiria realizar a montagem e a medição de força nas condições especificadas no projeto.

### 3.5.1. Cálculo da incerteza associada à força medida pela célula de carga

O modelo matemático utilizado para estimar a incerteza associada à medição de força pela célula de carga é apresentado na Eq. (3.16).

$$F = \overline{F_{CF}} + \Delta R_F + \Delta IC_F + \Delta Hist_F + \Delta Lin_F \quad (3.16)$$

Na Equação (3.16),  $F$  representa a força medida pela célula de carga;  $\overline{F_{CF}}$  é a média das leituras de força efetuadas pela célula de carga;  $\Delta R_F$  é a correção associada à resolução da célula de carga;  $\Delta IC_F$  representa a correção associada à calibração da célula de carga;  $\Delta Hist_F$  é a correção associada à histerese da célula de carga quando submetida à tração e  $\Delta Lin_F$  é a correção associada ao desvio de linearidade da célula de carga quando submetida à tração. A Equação (3.16) foi utilizada tanto para calcular a incerteza associada à medição de força no patamar de  $P_{TH}$  quanto para estimar a incerteza associada à determinação da força máxima (PFFS) para cada condição. Nesse caso, optou-se por uma amostragem de 100 valores (5 s antes de atingir-se o PFFS em cada condição), com probabilidade de abrangência igual a 95,45 % (distribuição normal).

A Equação (3.17) mostra a aplicação da lei de propagação de incertezas na Eq. (3.16).

$$\begin{aligned}
u_c^2(F) = & \left( \frac{\partial F}{\partial \bar{F}_{CF}} \right)^2 u^2(\bar{F}_{CF}) + \left( \frac{\partial F}{\partial \Delta R_F} \right)^2 u^2(\Delta R_F) + \left( \frac{\partial F}{\partial \Delta IC_F} \right)^2 u^2(\Delta IC_F) + \\
& + \left( \frac{\partial F}{\partial \Delta Hist_F} \right)^2 u^2(\Delta Hist_F) + \left( \frac{\partial F}{\partial \Delta Lin_F} \right)^2 u^2(\Delta Lin_F)
\end{aligned} \quad (3.17)$$

### 3.5.2. Cálculo da incerteza associada ao ângulo medido pelo encoder

O modelo matemático utilizado para estimar a incerteza associada ao ângulo medido pelo *encoder* é apresentado na Eq. (3.18).

$$\theta = \bar{\theta} + \Delta R_e + \Delta IC_e \quad (3.18)$$

Na Equação (3.18),  $\theta$  representa o ângulo medido pelo *encoder*;  $\bar{\theta}$  representa a média das leituras de ângulo medido pelo *encoder*;  $\Delta R_e$  é a correção associada à resolução do *encoder* e  $\Delta IC_e$  é a correção associada à calibração do *encoder*.

A incerteza de calibração do *encoder* foi estimada aplicando-se o princípio apresentado por Vuolo (1996). A Equação (3.19) mostra a aplicação da lei de propagação de incertezas na Eq. (3.18).

$$u_c^2(\theta) = \left( \frac{\partial \theta}{\partial \bar{\theta}} \right)^2 u^2(\bar{\theta}) + \left( \frac{\partial \theta}{\partial \Delta R_e} \right)^2 u^2(\Delta R_e) + \left( \frac{\partial \theta}{\partial \Delta IC_e} \right)^2 u^2(\Delta IC_e) \quad (3.19)$$

### 3.5.3. Cálculo da incerteza de medição associada à tensão mecânica

Determinadas as incertezas associadas às variáveis de influência no cálculo da tensão no corpo de prova descrita na Eq. (3.9), determinou-se a incerteza expandida relacionada à tensão calculada utilizando-se o método GUM via a rotina criada no programa MATLAB R2014b (Apêndice IX). Foram calculados os valores de incerteza expandida da tensão no corpo de prova em cada patamar de força. A Eq. (3.20) resulta da aplicação da lei de propagação de incertezas na fórmula matemática de cálculo da tensão mecânica:

$$\begin{aligned}
u_c^2(\sigma) = & \left( \frac{\partial \sigma}{\partial F_a} \right)^2 u^2(F_a) + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial d_1} \right)^2 u^2(d_1) + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial d_3} \right)^2 u^2(d_3) + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial d_6} \right)^2 u^2(d_6) + \\
& + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial b} \right)^2 u^2(b) + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial h} \right)^2 u^2(h) + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} \right)^2 u^2(\theta)
\end{aligned} \tag{3.20}$$

Além da incerteza expandida associada à medição, outros parâmetros metrológicos foram estimados, dentre eles: exatidão (um parâmetro qualitativo, podendo ser classificado neste trabalho como regular, bom ou excelente), precisão, erro de histerese e erro de não linearidade.

A precisão ( $P$ ) da medição de força, da medição de ângulo e da tensão mecânica calculada no sistema foi estimada segundo a Eq. (3.21):

$$P = \pm 2 \cdot s \tag{3.21}$$

Em que  $s$  é o desvio padrão amostral em questão, com uma probabilidade de abrangência igual a 95,45 % (distribuição normal pois amostra com mais de 30 valores).

O erro de histerese ( $H$ ) da medição de força, da medição de ângulo e da tensão mecânica calculada no sistema foi quantificado segundo a Eq. (3.22):

$$H = |V_{Ci} - V_{Di}| \tag{3.22}$$

Em que  $V_{Ci}$  e  $V_{Di}$  representam os valores médios da grandeza em questão, obtidos no carregamento (subíndice  $Ci$ ) e no descarregamento (subíndice  $Di$ ) mecânico do corpo de prova, em cada ponto avaliado da sua faixa nominal. Um único valor de erro de histerese foi utilizado para caracterizar cada grandeza: o maior deles (a máxima diferença entre o carregamento e o descarregamento).

O erro de não linearidade ( $E_{NL}$ ) do sistema foi estimado ajustando-se uma curva, obtida por regressão linear, às curvas de erro no carregamento e descarregamento mecânico do corpo de prova, para cada uma das três grandezas em questão, segundo a Eq. (3.23):

$$E_{NL} = |V_R - V_M| \tag{3.23}$$

Em que  $V_R$  é o valor obtido pelo ajuste de regressão linear e  $V_M$  é o valor medido em questão. O erro de não linearidade foi calculado em cada ponto avaliado da faixa nominal, da grandeza em questão (força, ângulo ou tensão mecânica).

### 3.6. Testes dos corpos de prova com carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio (CPPAM)

Para determinação da força de referência (PFFS), foram realizados testes em corpos de prova ao ar, com uma taxa de carregamento constante conforme especificado na ASTM E8 (ASTM, 2016) e com controle de velocidade. A configuração padrão para realização dos testes de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm, encontra-se na Tab. 3.4.

Tabela 3.4: Configuração padrão dos testes de determinação do valor de PFFS para todos os corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm

	30 mm x 30 mm (20 kN)	10 mm x 10 mm (1 kN)
Velocidade de aproximação inicial	0,12 m/s	
Redução máxima de força	1 kN	400 N
Deslocamento total máximo do atuador	200 mm	
Força máxima	19,7 kN	900 N
Tempo para incremento de força	10 000 s	

Observando a Tab. 3.4, infere-se que a velocidade de aproximação inicial e o deslocamento total máximo do atuador, utilizados para ambos os valores de seção transversal, foram iguais a 0,12 m/s e a 200 mm, respectivamente. A redução máxima de força, utilizada para encerrar automaticamente o teste, foi igual a 1 kN e a 400 N para as células de carga de 20 kN e 1 kN, respectivamente. A força máxima que poderia ser aplicada nos corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm foi igual a 19,7 kN e a 900 N, respectivamente, em função do fundo de escala das células de carga, igual a 20 kN e a 1 kN, respectivamente. O tempo para incremento de força foi propositalmente escolhido como um valor alto, para que o carregamento do corpo de prova ocorresse de forma contínua como

especificado pela norma ASTM E8/E8M (ASTM, 2016), sem o início de um patamar de carregamento.

A configuração padrão para realização dos testes de CPPAM, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm, encontra-se na Tab. 3.5.

Tabela 3.5: Configuração padrão dos testes de CPPAM para todos os corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm

		30 mm x 30 mm (20 kN)	10 mm x 10 mm (1 kN)
Velocidade de aproximação inicial		0,12 m/s	
Deslocamento total máximo do atuador		200 mm	
Constantes do controlador PID de força	$K_p$	1,4651	$2,2766 \cdot 10^{-2}$
	$K_i$	0,005299	$3,8346 \cdot 10^{-5}$
	$K_d$	0,031299	$6,644 \cdot 10^{-4}$
Constantes do controlador PID de posição	$K_p$	5,6412	
	$K_i$	0,0281	
	$K_d$	0,0669	
Tempo para estabilização da força		40 s	
Taxa de aquisição do QUANTUM X		100 Hz	
Taxa de salvamento do QUANTUM X		20 Hz	

Observando a Tab. 3.5, infere-se que a velocidade de aproximação inicial e o deslocamento total máximo do atuador, utilizados para ambos os valores de seção transversal, foram iguais a 0,12 m/s e a 200 mm, respectivamente. A força aplicada pelo movimento de recuo do atuador linear do RSL 2 foi controlada por meio de um controlador PID de força durante 40 s. Após esse tempo, o controlador PID de posição foi acionado, para que a posição do atuador (e consequentemente do braço do equipamento) permanecesse constante, durante o patamar de força aplicado. Desse modo, foi possível mensurar a queda de força, monitorada pela célula de carga e característica da abertura de uma trinca no material. A taxa de aquisição do QUANTUM X foi configurada em 100 Hz (uma leitura de força e ângulo foi efetuada a cada 0,01 s), mas para limitar o tamanho dos arquivos de resultados e poupar a memória do computador do RSL 2, a taxa de salvamento das leituras do QUANTUM X foi ajustada em 20 Hz (uma leitura de força e ângulo é efetuada a cada 0,05 s), ou seja, a cada cinco leituras de força e ângulo efetuadas, quatro foram descartadas e apenas uma foi registrada.



Conforme ASTM F1624 (ASTM, 2012), nos testes de CPPAM o perfil de carregamento utilizado foi igual a (10/5/2,4). Para uma determinada condição, no primeiro teste de CPPAM, a força máxima (P<sub>MAX</sub>) foi considerada como sendo o PFFS. Nos testes subsequentes, a força máxima do teste foi configurada como  $P_{MAX} = 1,1 P_{TH}$ , onde  $P_{TH}$  é a força, do teste antecedente, no patamar de  $P_{TH}$ . O início de propagação da trinca, no entalhe do corpo de prova, é evidenciado pela queda na força medida pela célula de carga.

O teste foi conduzido até que o critério de parada estabelecido pela norma ASTM F1624 (ASTM, 2012) fosse atingido (queda de no mínimo 5 % do PFFS na força aplicada no corpo de prova). Caso esse critério não fosse observado até o final do teste, ou seja, se a queda percentual de força fosse inferior a 5 % do valor de PFFS naquela condição, o teste seria encerrado após 60 horas. A montagem do RSL 2 para a realização dos testes de CPPAM é mostrada na Fig. 3.24.

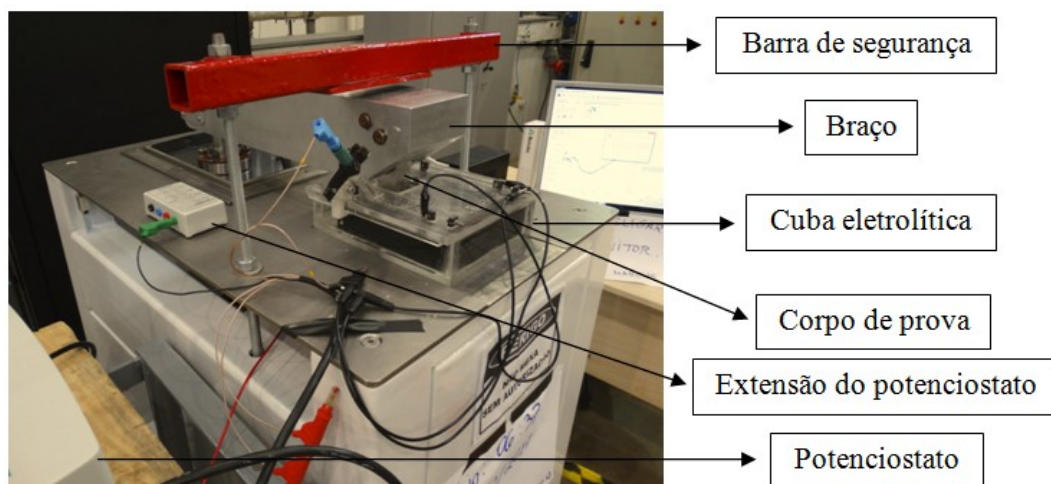


Figura 3.24: Montagem do RSL 2 para realização dos testes de CPPAM em corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm

A incerteza de medição associada ao cálculo da tensão nos testes de CPPAM foi efetuada segundo a rotina criada no programa MATLAB R2014b e apresentada no Apêndice IX. Considerando que, para cada condição, o teste de determinação do valor de PFFS e os três testes de CPPAM subsequentes visam à obtenção de um único valor de  $P_{TH}$  (sendo que este é considerado o patamar que represente o menor valor percentual do PFFS nos três testes de CPPAM), optou-se pelo cálculo da incerteza apenas no patamar de  $P_{TH}$  mais baixo, para cada uma das doze condições apresentadas na Tab. 3.1.

### *3.6.1. Hidrogenação dos corpos de prova*

Não foi efetuada a pré-hidrogenação de nenhum corpo de prova antes do início dos testes de CPPAM. A hidrogenação dos corpos de prova foi realizada como consequência da aplicação da proteção catódica por corrente impressa, com os mesmos submersos em um fluido eletrolítico (água destilada com 3,5 % de NaCl grau técnico). Foi escolhida a água destilada em vez da água deionizada, pois a quantidade de sal (NaCl) adicionada foi relativamente alta (181,34 g de sal para cada 5 L de água destilada), fazendo com que os possíveis íons presentes na água estivessem em quantidade muito pequena, sem interferência na condução dos testes.

A configuração utilizada para a aplicação do potencial nos corpos de prova foi a configuração a três eletrodos (eletrodo de trabalho, contra-eletrodo e eletrodo de referência). O eletrodo de referência utilizado foi o de Ag/AgCl modelo 6.0726.100 dupla junção, da marca Metrohm, com faixa de temperatura de 0 a 80 °C e preenchimento aquoso com solução de KCl 3 mol/L. Como contra-eletrodo, foram utilizadas três placas de grafite ligadas em série. O corpo de prova atua como o eletrodo de trabalho. A área superficial dos contra-eletrodos foi três vezes maior do que a área submersa dos corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e 45 vezes maior do que a área submersa dos corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, para limitar as reações eletroquímicas na superfície do corpo de prova (JONES, 1995).

A cuba foi fabricada a partir de uma chapa de acrílico com 8 mm de espessura. A altura da cuba é igual a 62 mm, com comprimento igual a 211 mm e largura igual a 167 mm, com volume igual a 1 L. A Figura 3.25 mostra a configuração da hidrogenação dos corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm.

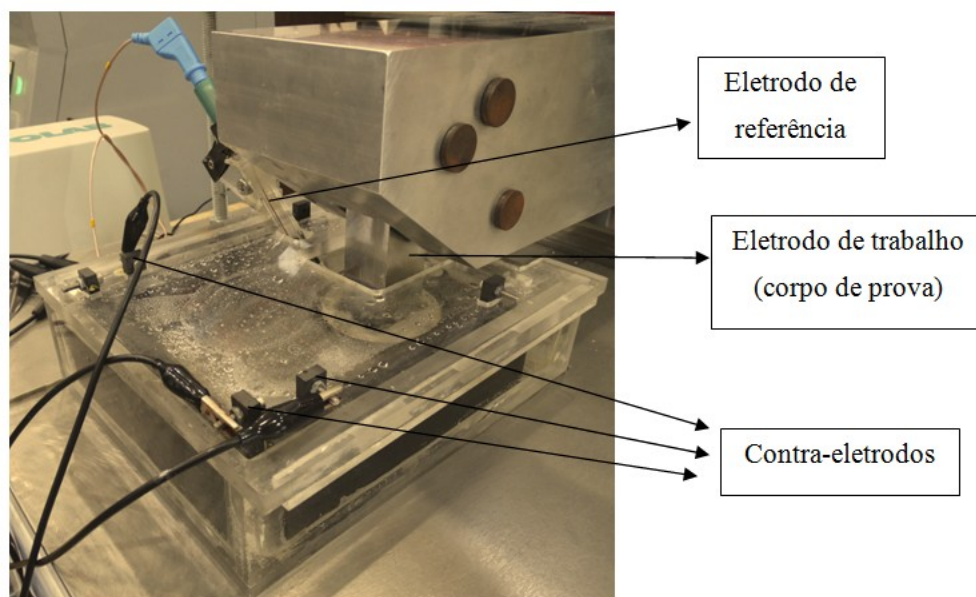


Figura 3.25: Configuração da proteção catódica de corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm

O potencial catódico foi aplicado em todos os testes de CPPAM utilizando-se um potenciostato da marca MetrohmAutolab, modelo PGSTAT 204, com faixa nominal de tensão igual a  $\pm 10$  V, faixa nominal de corrente igual a 100 mA to 10 nA, com corrente máxima de  $\pm 400$  mA e faixa de frequência de 1 MHz. A resolução da tensão elétrica é igual a 3  $\mu$ V e a comunicação com o computador dedicado ocorre via porta USB. As informações técnicas do potenciostato encontram-se no Anexo XVII. Foi realizada uma cronoamperometria utilizando-se o programa NOVA 2.0, para monitorar a corrente elétrica durante a aplicação do potencial no corpo de prova. Em todos os testes hidrogenados (CPPAM) realizados no âmbito desta dissertação foi empregado um potencial eletroquímico igual a 1,2 V.

### 3.7. Análise dos corpos de prova no microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Neste item são descritas as análises do efeito do lixamento na raiz do entalhe dos corpos de prova, bem como da camada refundida na raiz do entalhe, oriunda do processo de eletroerosão a fio e dos mecanismos de fratura dos corpos de prova testados.

### 3.7.1. *Análise do efeito do lixamento na raiz do entalhe dos corpos de prova*

Visando a determinação do efeito do lixamento da raiz do entalhe, proposto, desenvolvido e validado neste trabalho (Fig. 3.15), foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) do fabricante Zeiss, modelo SUPRA 40, número de série 3185 e resolução igual a 1,3 nm (o certificado de verificação do mesmo encontra-se no Anexo XVIII), para analisar a região da raiz do entalhe de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e raio de arredondamento do entalhe igual a 250  $\mu$ m. Foram realizadas imagens da raiz do entalhe antes e após o procedimento de lixamento da raiz do entalhe.

### 3.7.2. *Análise da espessura da camada refundida na raiz do entalhe*

Objetivando-se a quantificação da espessura da camada refundida, oriunda da fabricação do entalhe pelo processo de eletroerosão a fio, foi analisada no MEV a raiz não lixada do entalhe de um corpo de prova extra (Fig. 3.26a) com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, raio de arredondamento do entalhe igual a 250  $\mu$ m e dureza igual a 40 HRC.

Após a usinagem do entalhe, para que o corpo de prova pudesse ser embutido, o mesmo foi cortado via eletroerosão a fio em uma amostra menor, conforme ilustra a Fig. 3.26b, para evitar aquecimento do mesmo e vibrações que ocorreriam, por exemplo, no corte com uma cortadora metalográfica (Discotom) e que poderiam afetar a análise de camada refundida (provocando destacamento e redução da espessura da mesma).

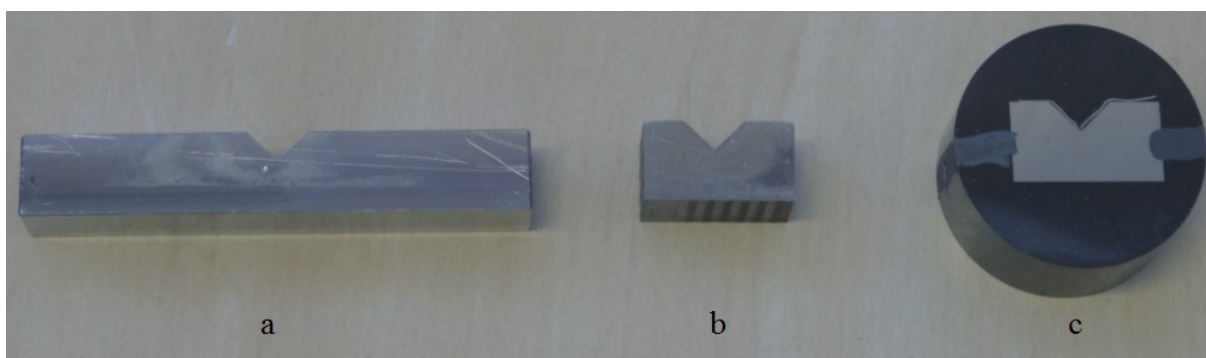


Figura 3.26: Etapas de preparação metalográfica da amostra para análise da camada refundida no MEV (a) corpo de prova entalhado; (b) corte da amostra para embutimento; (c) amostra embutida, lixada e polida com a marcação de esmalte condutor para inserção no MEV

Para proteger a superfície do entalhe durante a preparação metalográfica da amostra (sobretudo nas etapas de lixamento e polimento), foi utilizada a técnica de ancoragem da

superfície do entalhe do seguinte modo: aqueceu-se uma folha de alumínio na temperatura de 400 °C para facilitar a deformação e a maleabilidade da mesma após resfriamento. Aplicou-se cola Super Bonder® na superfície do entalhe e colou-se um pedaço de alumínio maleável na mesma para impedir que, durante as operações posteriores de lixamento e polimento da amostra embutida, a camada refundida se destacasse devido à sua fragilidade e à sua espessura reduzida. Em seguida, a amostra foi embutida e preparada metalograficamente seguindo-se as mesmas etapas descritas na seção 3.2.2. Para colocar a amostra no MEV, a mesma não foi metalizada, apenas foi realizada a ponte elétrica nas laterais da amostra com um esmalte condutor, visto que se faz necessário estabelecer o contato elétrico entre a amostra e o porta-amostra do MEV (a amostra deve ser eletricamente condutora) conforme exibe a Fig. 3.26c. Mediu-se cinco vezes a espessura da camada refundida, na raiz do entalhe da amostra, conforme mostra a Fig. 3.27.

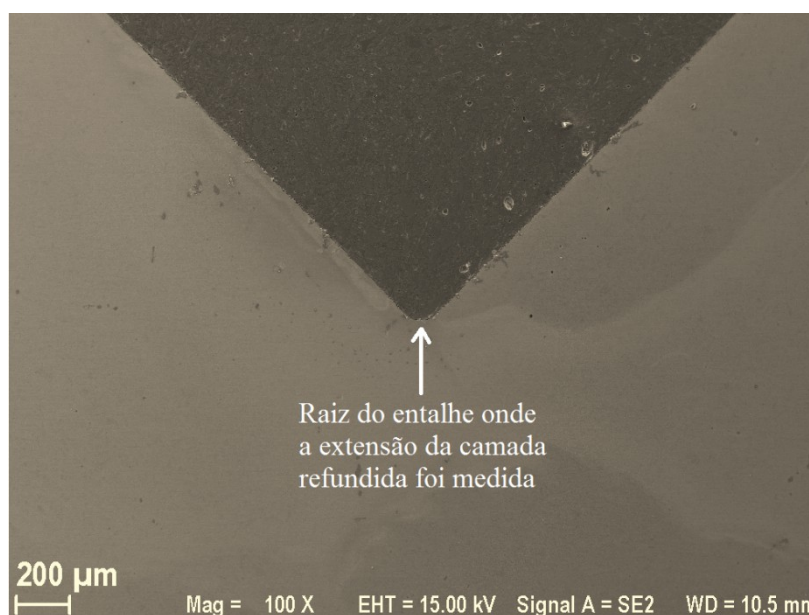


Figura 3.27: Imagem MEV da raiz não lixada do entalhe de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, raio do entalhe igual a 250 µm e dureza igual a 40 HRC, com destaque na região de análise da camada refundida

### 3.7.3. *Análise dos mecanismos de fratura dos corpos de prova*

Visando a identificação dos mecanismos de fratura dos corpos de prova, foram igualmente analisados no MEV dois corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm por condição de teste (raio de arredondamento do entalhe e dureza constantes). Devido às dimensões elevadas dos corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm,

optou-se por analisar apenas os corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, visto que teoricamente o mecanismo de fratura para dureza e raio do entalhe constantes é similar, independentemente das dimensões da seção transversal do corpo de prova, quando submetidos a mesma condição de hidrogenação.

Após o teste de CPPAM, os corpos de prova foram lavados no limpador ultrassônico, durante 8 minutos e com aquecimento. Após a lavagem, os mesmos foram secados com um secador de cabelos e imersos em nitrogênio líquido, à temperatura de -196 °C, durante 30 minutos. Com a queda brusca de temperatura, os corpos de prova fragilizaram-se e foram fraturados após um leve golpe aplicado com uma marreta. Optou-se por finalizar o processo de fratura dos corpos de prova por imersão em nitrogênio líquido ao invés de continuar o carregamento do corpo de prova, manualmente, no próprio equipamento, para evitar que o limite de força da célula de carga fosse atingido e que a mesma fosse danificada. Os corpos de prova foram armazenados em uma câmara de vácuo do fabricante Marconi, para evitar oxidação e contaminação dos mesmos.

Por uma questão de logística, os corpos de prova submetidos ao carregamento contínuo e ao ar (utilizados para determinar o valor de PFFS de cada condição) e os corpos de prova dos primeiros testes de CPPAM de cada condição foram analisados no MEV. Visto que no aço AISI 4140 verifica-se a transição dúctil-frágil após a imersão do corpo de prova no nitrogênio líquido, escolher o corpo de prova do segundo ou do terceiro testes de CPPAM não faria diferença. Foram realizadas imagens com aumento de 55 X para observação geral da região analisada e imagens com aumentos de 200 X, 500 X, 1000 X e 2000 X para investigação detalhada da região fraturada devido à fragilização por hidrogênio.

### **3.8. Análise de variância e teste de repetibilidade e reprodutibilidade**

No caso dos testes para avaliação da susceptibilidade à fragilização por hidrogênio pelo método RSL, os experimentos não são replicáveis, devido às alterações dos corpos de prova (testes destrutivos). Neste sentido, é importante garantir-se que todas as condições que englobam os testes sejam definidas, padronizadas e controladas: instruções de trabalho devem ser detalhadas e operacionalmente definidas, condições ambientais devem ser controladas em um nível adequado, equipamentos devem ser calibrados, com manutenção em dia, etc.

A análise de variância foi conduzida para avaliar o efeito dos fatores seção transversal, raio de arredondamento da raiz do entalhe e dureza dos corpos de prova nos testes de determinação do valor de PFFS e na susceptibilidade à fragilização por hidrogênio do aço AISI 4140, permitindo a identificação de efeitos significativos dos fatores ou de interações entre eles. Os fatores não significativos, com confiabilidade estatística igual a 95 %, foram eliminados um a um, começando-se com a eliminação dos fatores menos significativos (maiores valores de  $p$ ), a fim de confirmar se não havia nenhum outro efeito estatisticamente significativo.

Propuseram-se dois modelos matemáticos completos para representar o valor de PFFS e a queda percentual de força nos patamares hidrogenados de  $P_{TH}$ , com relação ao PFFS. Foi efetuada uma análise completa da distribuição dos resíduos, visando verificar se as suposições básicas de uma análise estatística (erros aleatórios, independentes e com distribuição normal, em torno de zero) foram atendidas. Todos os cálculos foram efetuados no programa STATISTICA.

Para efetuar o teste R&r, utilizou-se o método da média e amplitude (AIAG, 2010) nos testes de determinação do valor de PFFS, no qual foi avaliado o desempenho do RSL 2.

A Figura 3.28 exibe um esquema geral dos experimentos realizados, com identificação de cada uma das doze condições de teste. As condições foram testadas na ordem cronológica 1 até 12.

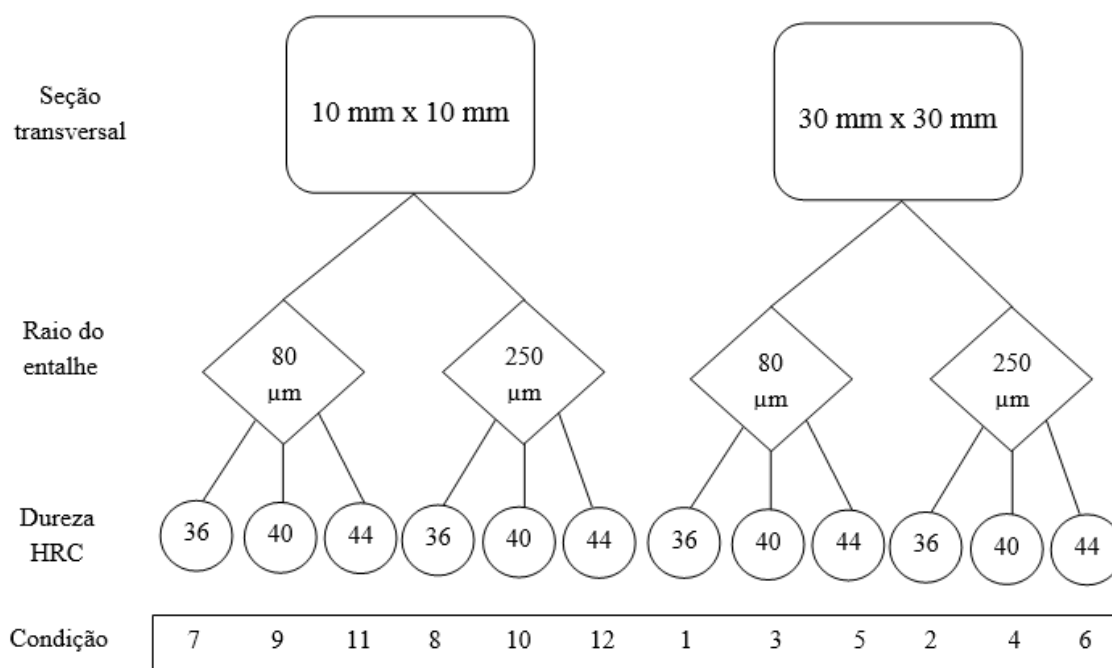


Figura 3.28: Esquema geral do experimento

O objetivo da aplicação do teste R&r não é identificar o fator mais significativo na determinação do valor de PFFS (essa função é desempenhada pela ANOVA), mas avaliar o desempenho do equipamento RSL 2, validando a montagem do mesmo e o método utilizado, identificando possíveis fontes de erros e problemas e sugerindo medidas corretivas, se preciso.

Para aplicação do teste as seguintes considerações foram necessárias:

- a) Foi avaliada apenas a força máxima, obtida nos testes de determinação do valor de PFFS, para as doze condições;
- b) Cada condição foi simplificada como sendo uma peça diferente;
- c) O raio de arredondamento do entalhe do corpo de prova em questão foi considerado como sendo o operador do teste R&r, visto que na análise de variância (Tab. 4.11) este fator foi o menos significativo e, em um equipamento automatizado como o RSL 2, se espera que a influência do operador seja pequena;
- d) A seção transversal e a dureza dos corpos de prova em questão foram consideradas como sendo a peça.

O valor determinado de PFFS, para cada condição, possui uma incerteza expandida associada. Assim sendo, consideraram-se três valores para uma mesma condição:  $PFFS - U$ ,  $PFFS$  e  $PFFS + U$ . Faz-se necessário a utilização de mais de um valor para cada condição, pois caso contrário a amplitude associada seria igual a zero e o método da média e amplitude não poderia ser aplicado.

A Figura 3.29 ilustra o diagrama de causa e efeito do RSL 2, também conhecido como diagrama 6M, diagrama espinha de peixe ou diagrama de Ishikawa. Nele é possível visualizar as causas de variabilidade presentes na operação do RSL 2, tanto nos testes com carregamento contínuo para determinação do valor de PFFS, quanto nos testes de CPPAM.



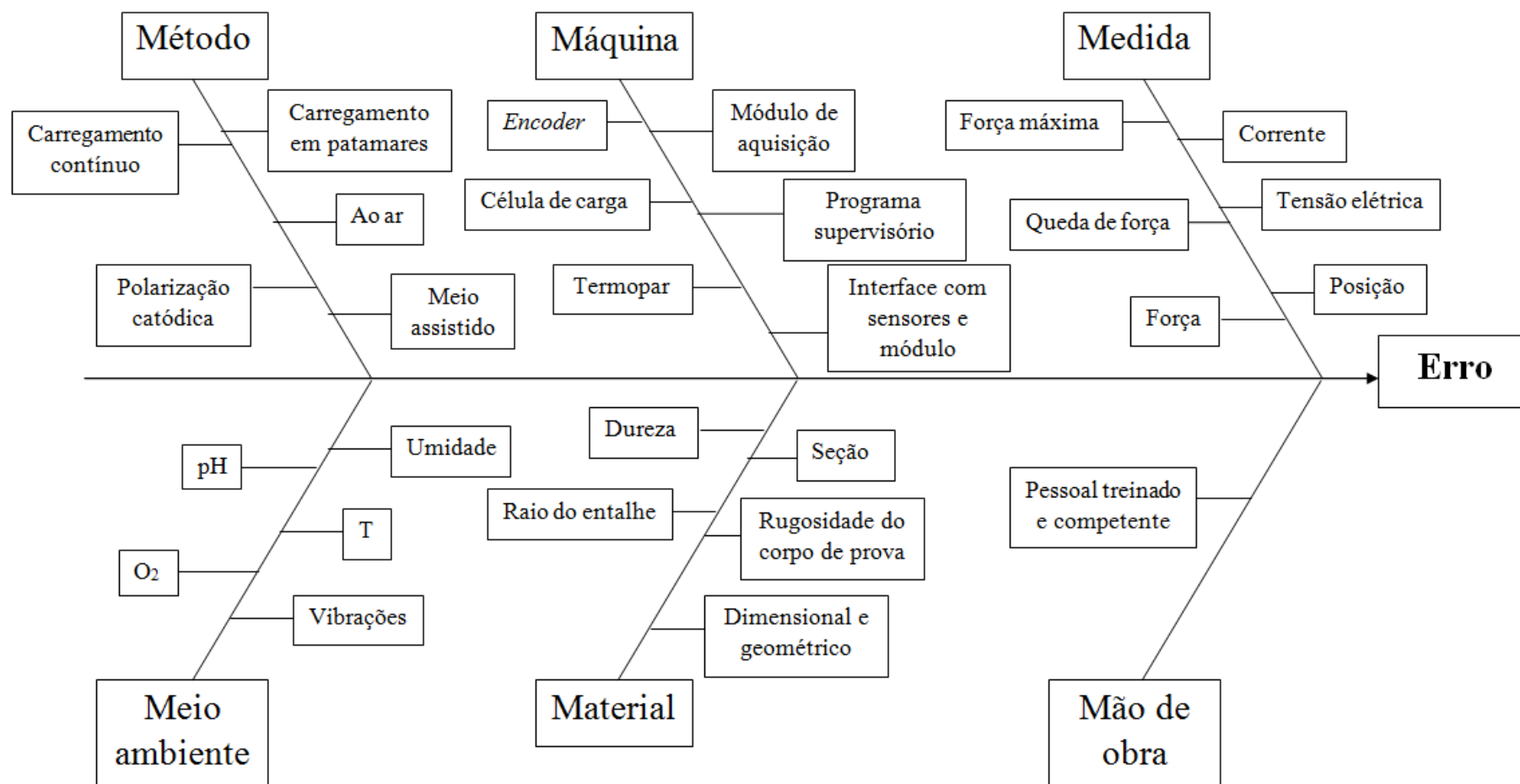


Figura 3.29: Diagrama de Ishikawa da operação do RSL 2

## **CAPÍTULO IV**

### **Resultados e Discussões**

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados do presente trabalho. Para melhor entendimento os seguintes tópicos são apresentados: caracterização do material dos corpos de prova, verificação do RSL 2, testes de determinação do valor de PFFS, testes com carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio, análise dos corpos de prova no MEV, ANOVA e teste R&r.

#### **4.1. Caracterização do material dos corpos de prova**

Neste item são apresentados os seguintes resultados relativos à caracterização do material dos corpos de prova: análise de composição química; análise microestrutural; medição de dureza; controle dimensional e geométrico.

##### *4.1.1. Resultados da análise de composição química do aço AISI 4140*

Os valores médios de composição química do aço AISI 4140 decorrentes de cinco análises realizadas ao longo da espessura das amostras das duas chapas, com três repetições de cada análise via espectrômetro de emissão ótica com plasma induzido, são exibidos na Tab. 4.1. Também são apresentados os valores de desvio padrão para uma confiabilidade de 68,27 %. As faixas de tolerância em porcentagem, para cada elemento químico, são especificadas nas normas ASTM A29/A29M (ASTM, 2016) e ASTM A506 (ASTM, 2016) e são designadas na Tab. 4.1 por limite superior e limite inferior, quando for o caso.

Tabela 4.1: Composição química das amostras retiradas das chapas de aço AISI 4140 utilizadas para fabricação dos corpos de prova

		% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mo	% P	% S
Chapa 1	Média	0,406	0,292	0,791	0,838	0,197	0,017	0,002
	Desvio padrão	0,008	0,002	0,006	0,012	0,002	0,001	0,001
Chapa 2	Média	0,404	0,292	0,794	0,851	0,201	0,017	0,003
	Desvio padrão	0,003	0,003	0,007	0,011	0,003	0,001	0,001
Limite inferior		0,380	0,150	0,750	0,800	0,150	-	-
Limite superior		0,430	0,350	1,000	1,100	0,250	0,035	0,040

A partir da Tab. 4.1, conclui-se que os valores percentuais dos elementos químicos encontram-se na faixa especificada nas normas ASTM A29/A29M (ASTM, 2016) e ASTM A506 (ASTM, 2016) para o aço AISI 4140. Não foram observadas variações relevantes nos valores de composição química das amostras, ao longo da espessura, conforme os valores pouco significativos de desvio padrão.

#### 4.1.2. Resultados da análise metalográfica do aço AISI 4140

As micrografias das duas chapas de aço AISI 4140, efetuadas no microscópio óptico, são exibidas nas Figs. 4.1 a 4.3. A partir das Figs. 4.1 a 4.3, conclui-se que não foram identificadas direções definidas de deformação dos grãos, dos microconstituintes e de inclusões. Adotou-se a orientação correspondente à direção S – C da Fig. 3.10 para a fabricação do entalhe de todos os corpos de prova para os testes no RSL 2.

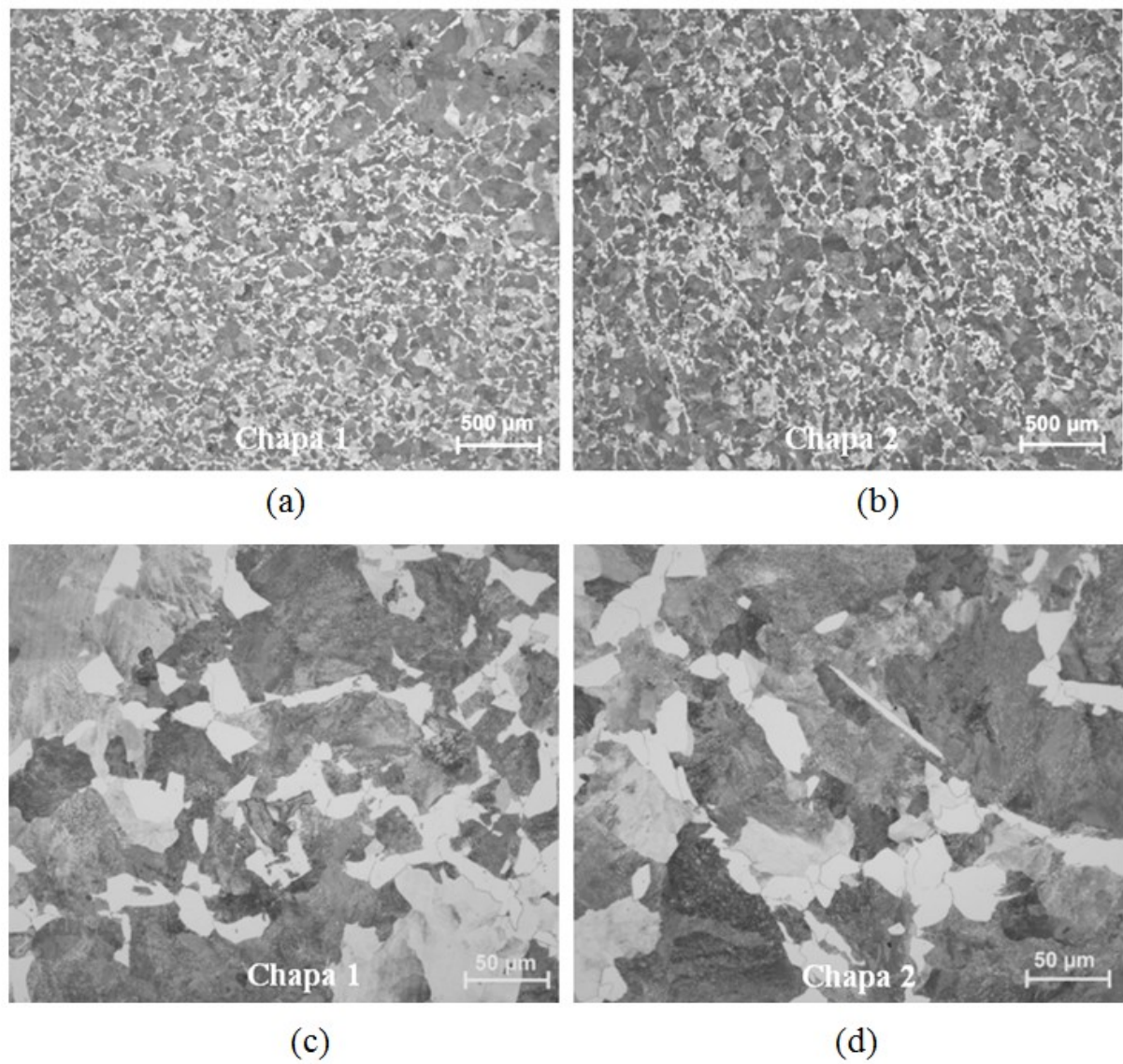


Figura 4.1: Vistas gerais (Fig. 4.1a e Fig. 4.1b) e em detalhes (Fig. 4.1c e Fig. 4.1d) da face referente à superfície das chapas

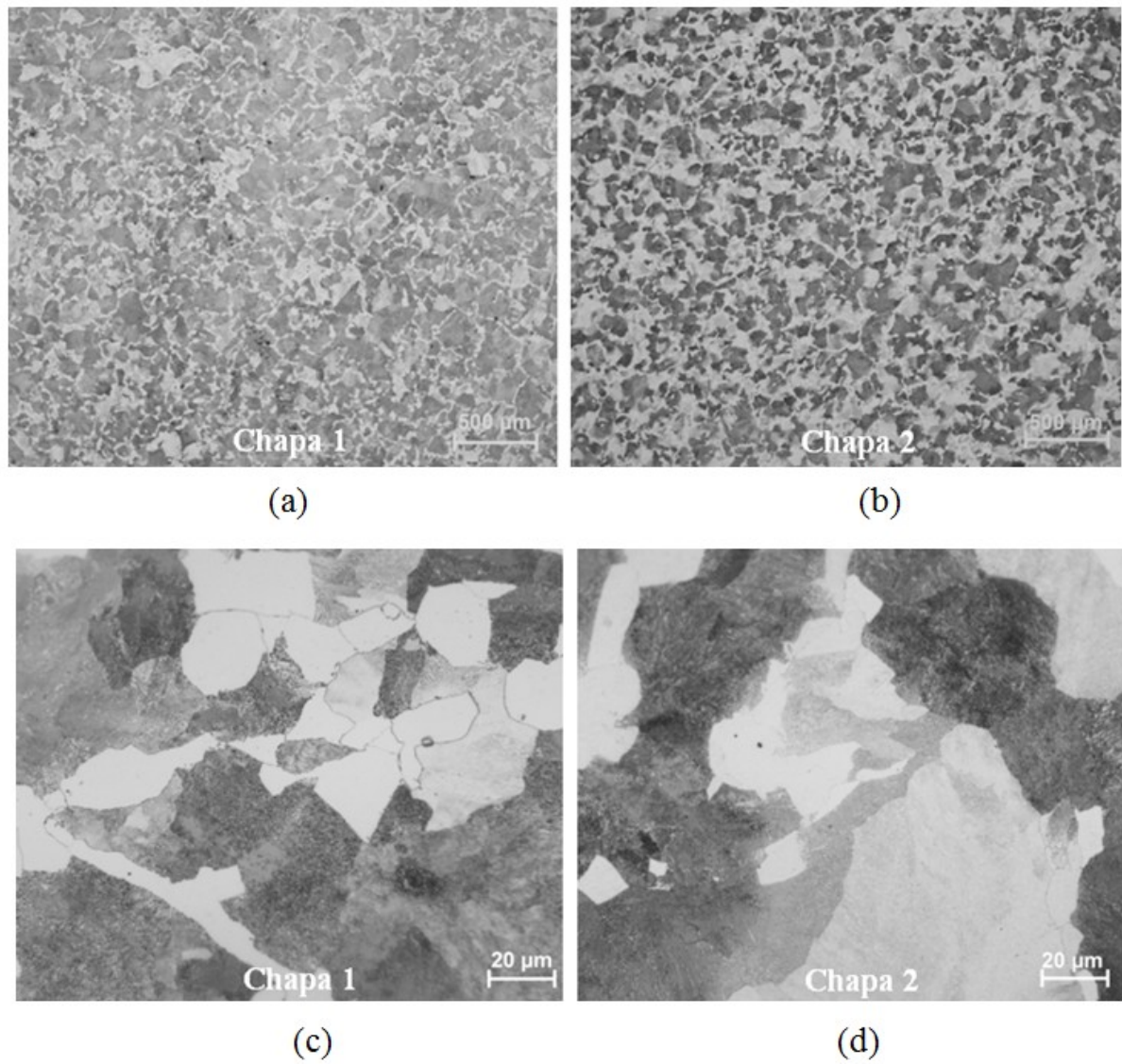


Figura 4.2: Vistas gerais (Fig. 4.2a e Fig. 4.2b) e em detalhes (Fig. 4.2c e Fig. 4.2d) da face referente ao comprimento das chapas



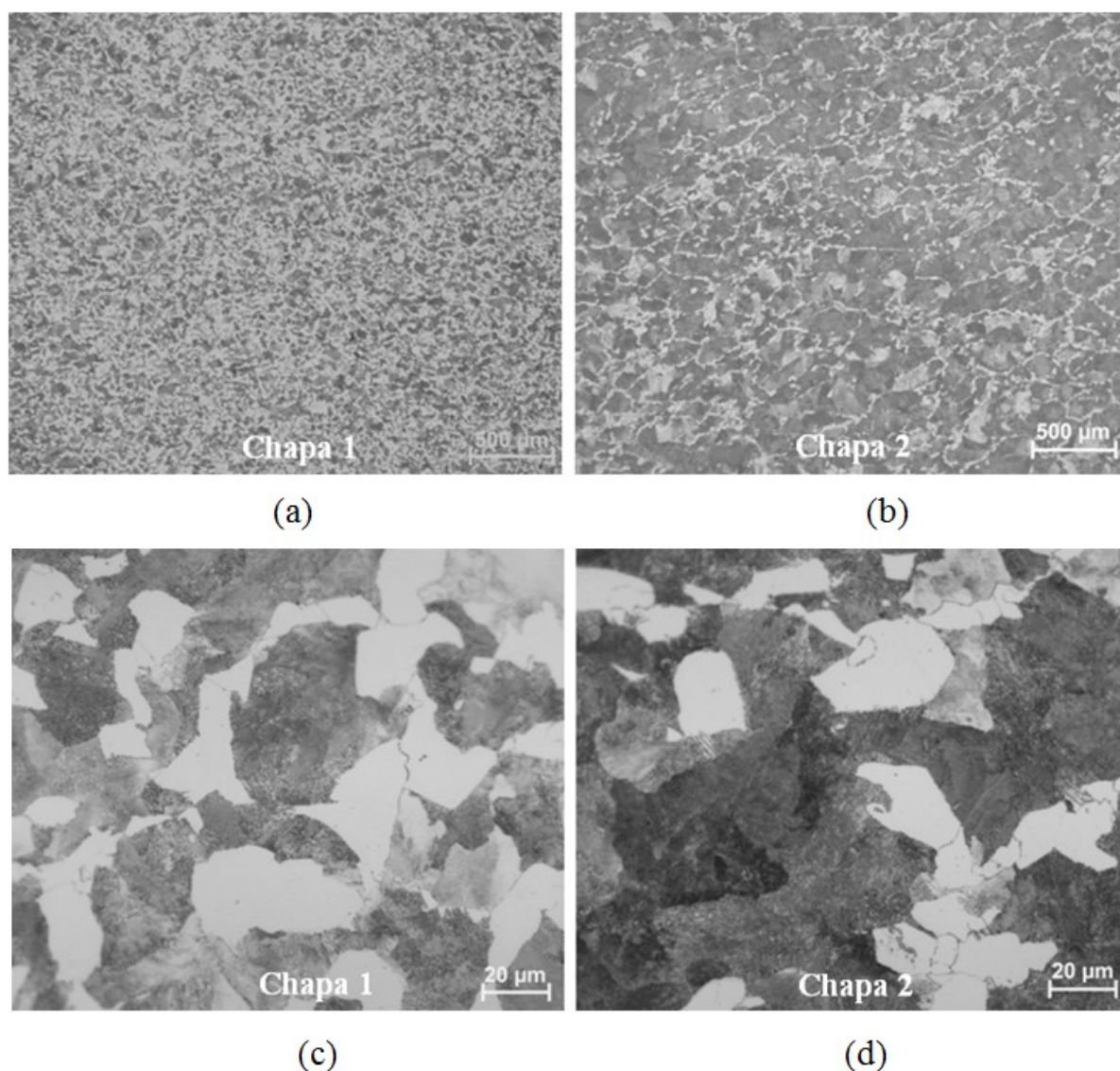


Figura 4.3: Vistas gerais (Fig. 4.3a e Fig. 4.3b) e em detalhes (Fig. 4.3c e Fig. 4.3d) da face referente à largura das chapas

#### 4.1.3. Resultados da medição de dureza dos corpos de prova

Os valores médios de dureza Rockwell C dos corpos de prova fabricados em aço AISI 4140 encontram-se nas Figs. 4.4 e 4.5. Nestas figuras são igualmente apresentados o valor da incerteza expandida (com probabilidade de abrangência igual a 95 %) e os limites inferior e superior de acordo com a tolerância atribuída aos valores de dureza no projeto:  $\pm 1$  HRC. Os valores médios são apresentados segundo recomendações da norma ASTM E18 (ASTM, 2017), que indica que os valores de dureza devem ser expressos com a mesma resolução do durômetro utilizado, evitando-se interpolações. Assim sendo, os valores médios

obtidos considerando três medições em cada corpo de prova foram arredondados simetricamente.

Observa-se nas Figs. 4.4 e 4.5 que nem todos os valores médios de dureza encontram-se dentro da tolerância especificada no projeto. Os elevados valores de incerteza expandida devem-se ao fato do durômetro apresentar resolução de 1 HRC.

Para medir a dureza com uma tolerância de  $\pm 1$  HRC, faz-se necessário a utilização de um sistema de medição com uma resolução de 0,2 HRC (a resolução do sistema de medição deve ser no mínimo 10 vezes melhor do que a tolerância do mensurando). Este requisito não foi atendido na medição realizada neste trabalho porque o durômetro utilizado possui resolução igual a 1 HRC. Além disso, a norma ASTM E18 (ASTM, 2017) expressa os valores de dureza Rockwell C como números inteiros, indicando que a resolução do durômetro utilizado deve ser considerada para definição do número de algarismos significativos no registro dos valores indicados por este.

A Figura 4.6 mostra os valores de dureza Rockwell C ao longo da espessura e da largura de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e dureza superficial igual a 35 HRC. A dureza foi medida em nove pontos diferentes, com 5 mm de distância entre as indentações a partir do centro.

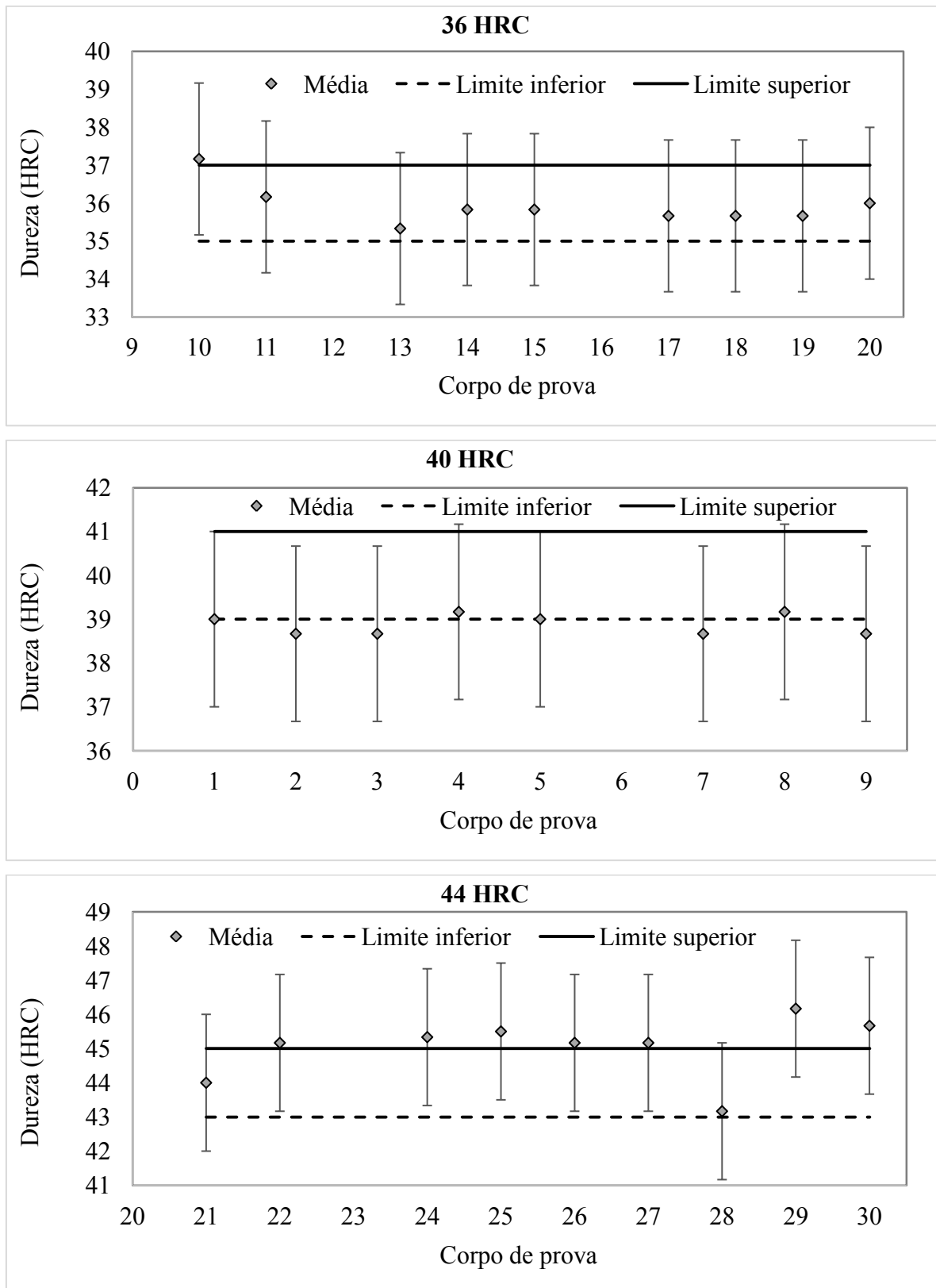


Figura 4.4: Valores médios de dureza Rockwell C dos corpos de prova 30 mm x 30 mm x 200 mm com dureza nominal igual a 36 HRC (Fig. 4.4a), 40 HRC (Fig. 4.4b) e 44 HRC (Fig. 4.4c), com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)



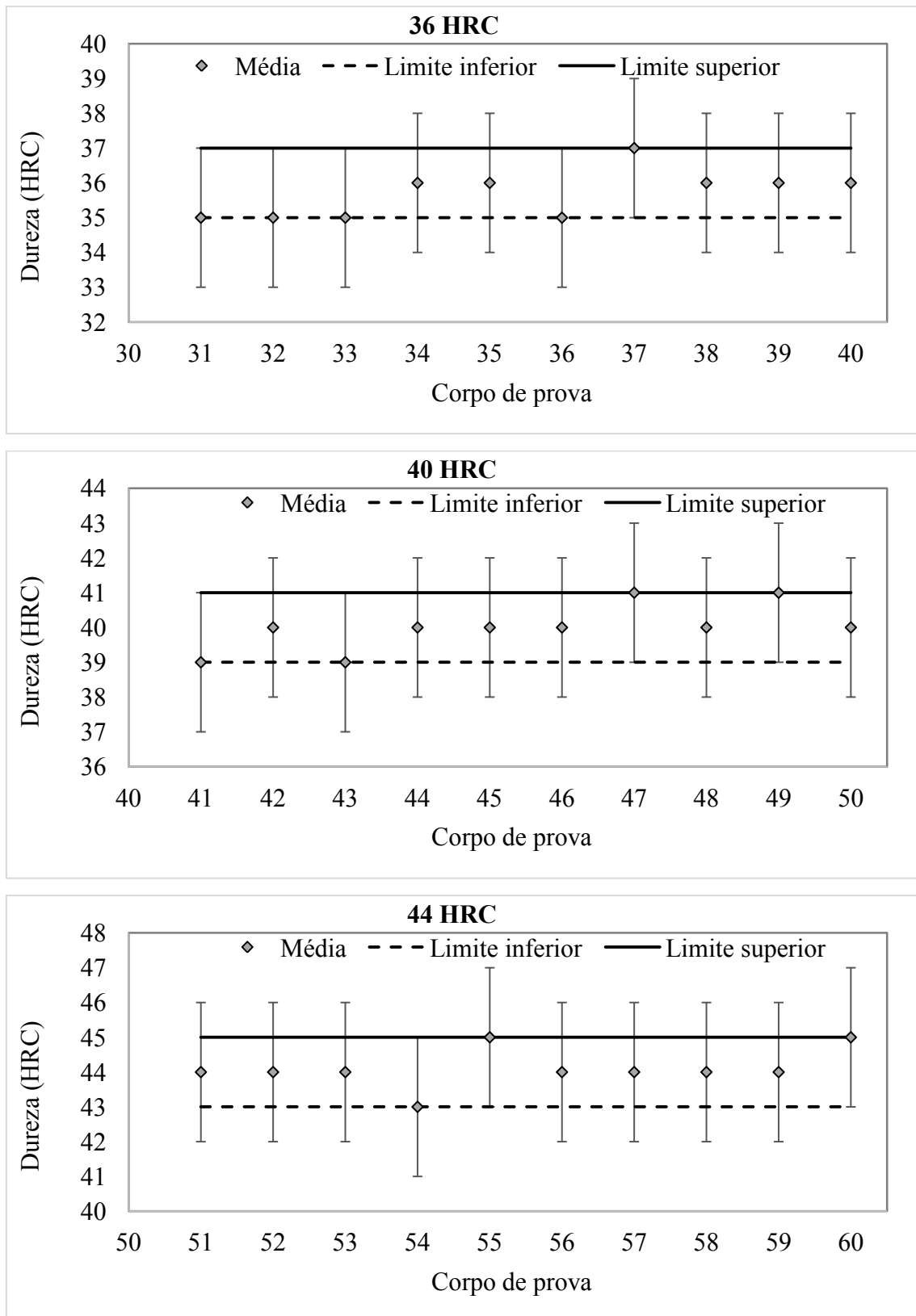


Figura 4.5: Valores médios de dureza Rockwell C dos corpos de prova 10 mm x 10 mm x 60 mm com dureza nominal igual a 36 HRC (Fig. 4.5a), 40 HRC (Fig. 4.5b) e 44 HRC (Fig. 4.5c), com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

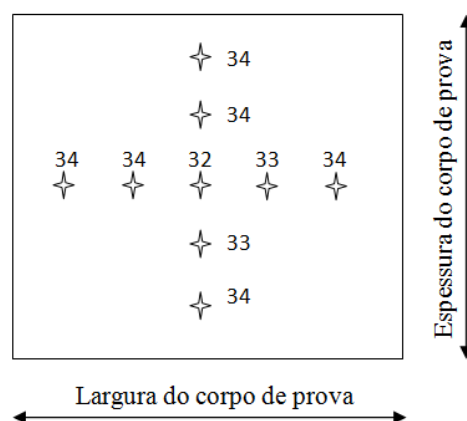


Figura 4.6: Valores médios de dureza Rockwell C de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e dureza superficial igual a 35 HRC

Infere-se da Fig. 4.6 que a teoria do endurecimento não uniforme (GROSSMAN, 1964; PEDRAZA *et al.*, 1979) foi confirmada: o centro do corpo de prova é mais macio (32 HRC) quando comparado à periferia (34 HRC) e à superfície do corpo de prova (35 HRC).

#### 4.1.4 Resultados do controle dimensional e geométrico dos corpos de prova

Os resultados obtidos durante o controle dimensional e geométrico de todos os corpos de prova testados são apresentados no Apêndice X. Estes incluem: rugosidade da raiz do entalhe dos corpos de prova; rugosidade das faces dos corpos de prova; raio de arredondamento do entalhe; comprimento dos corpos de prova; largura dos corpos de prova; altura dos corpos de prova; profundidade do entalhe; ângulo de abertura do entalhe; base do entalhe; desvio de paralelismo e desvio de perpendicularidade. Todos os corpos de prova encontraram-se nas faixas de tolerância especificadas, para cada uma das características acima citadas.

## 4.2. Resultados da verificação das montagens do RSL 2

Neste item são apresentados os resultados dos testes de verificação das duas montagens do RSL 2. A primeira montagem refere-se à célula de carga de 20 kN, utilizada para testes ao ar com carregamento contínuo (determinação do valor de PFFS) e testes de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio (CPPAM), para corpos de prova com seção

transversal igual a 30 mm x 30 mm. A segunda montagem diz respeito à célula de carga de 1 kN, utilizada para testes de determinação do valor de PFFS e testes de CPPAM para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm. Em ambas as montagens, o mesmo *encoder* incremental rotativo foi utilizado.

Ambos os testes de verificação foram efetuados ao ar, com carregamento e descarregamento do corpo de prova em patamares. Com relação à incerteza expandida (95,45 %) associada à força, ao ângulo e à tensão no corpo de prova para ambos os testes, a mesma foi apresentada graficamente na forma de barra de erros apenas para o carregamento, pois para o descarregamento observaram-se valores próximos de incerteza com a mesma tendência e, caso fossem plotados para o carregamento e o descarregamento, ocorreria sobreposição das barras de erro.

#### 4.2.1. Resultados obtidos na verificação da célula de carga de 20 kN

A Figura 4.7 mostra o erro percentual da tensão no corpo de prova (Eq. 3.12), observado durante a verificação da célula de carga de 20 kN.

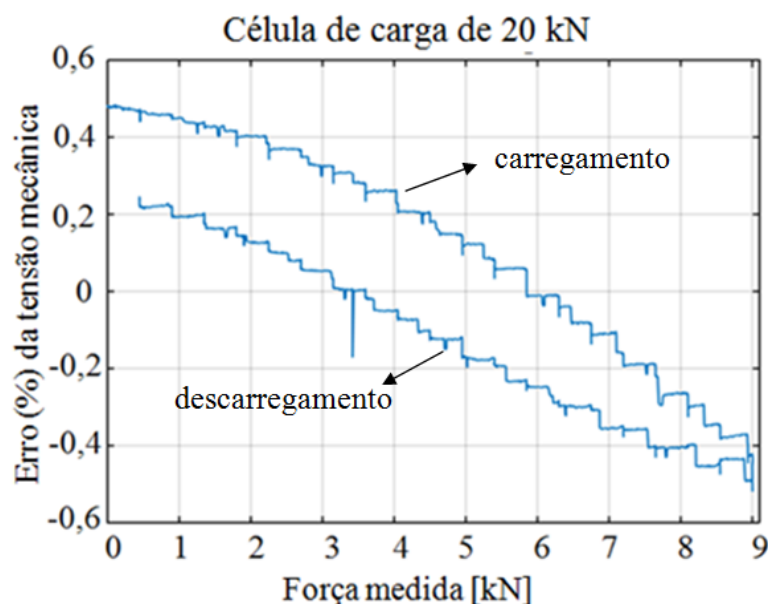


Figura 4.7: Valores de erro em porcentagem obtidos na verificação da tensão mecânica calculada instantaneamente pelo programa SURISEL com célula de carga de 20 kN, com teste de carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm

Observa-se na Fig. 4.7 que, em módulo, o maior valor de erro obtido foi igual a 0,48 % e a 0,52 % no carregamento e no descarregamento, respectivamente. Isto indica que a leitura da tensão instantânea, efetuada pelo programa SURISEL, tem um erro reduzido. Este fato é indicativo da excelente exatidão dos valores de tensão. A diferença observada no carregamento e no descarregamento pode ser explicada devido ao erro de histerese da medição de força pela própria célula de carga, além da histerese da cola utilizada para fixar os extensômetros. A cola pode ter sido deformada no carregamento, sem retornar ao seu estado inicial no descarregamento utilizando-se patamares de força com duração de 30 s cada.

A Figura 4.8 mostra os valores médios do erro associado à medição de força pela célula de carga de 20 kN. A tabela completa com os valores de média, desvio padrão (68,27 %) e incerteza expandida (95,45 %) da força medida pela célula de carga de 20 kN, encontra-se no Apêndice XI.

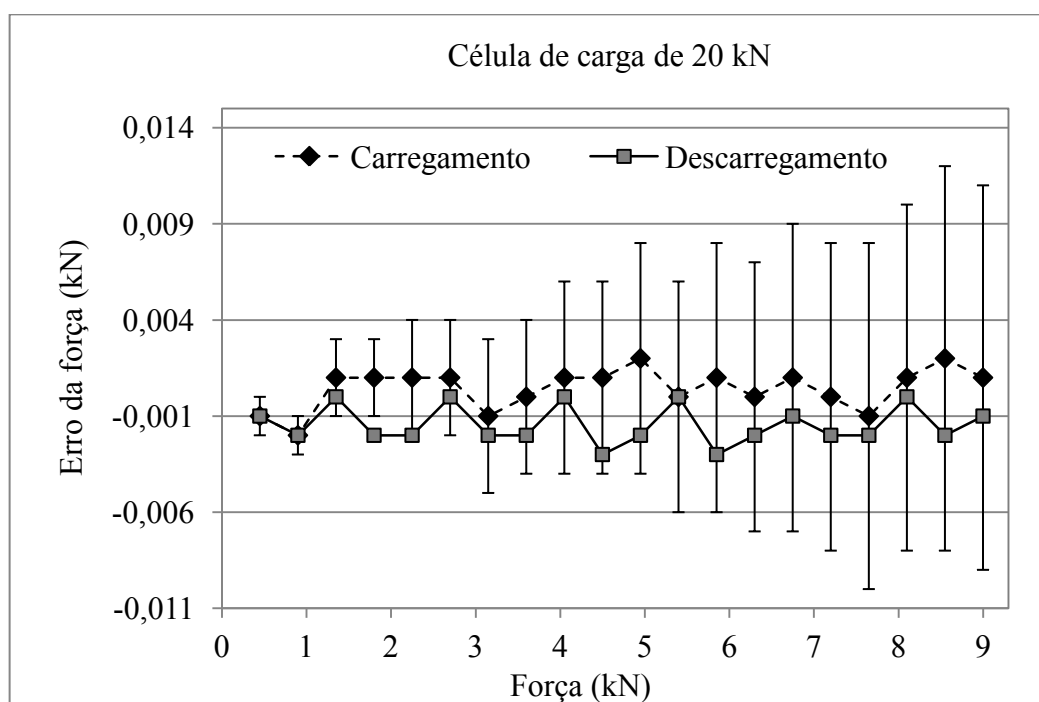


Figura 4.8: Valores de erro associados à força medida pela célula de carga de 20 kN obtidos no teste de verificação, com carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, com barra de erros representando a incerteza expandida (95,45 %) para o carregamento

Observa-se na Fig. 4.8 que os erros foram relativamente baixos, sendo menores do que 3 N, em módulo. Na condição mais crítica, o valor de erro próximo a 3 N foi obtido para um valor de força média medida igual a 4,5 kN, o que representa uma contribuição percentual

igual a 0,07 %. Isso indica que a exatidão dos valores de força medidos pela célula de carga de 20 kN é excelente. Por sua vez, o máximo valor de incerteza expandida obtido foi igual a 10 N para o patamar com força nominal igual a 9 kN, tanto no carregamento quanto no descarregamento, o qual representa um valor percentual igual a 0,11 % da força em questão. Este fato é indicativo da boa precisão dos valores de força medidos e condiz com o erro máximo indicado pelo fabricante da célula de carga, que é igual a 0,10 % do seu fundo de escala, ou seja, 20 N.

Na Figura 4.8 se observa ainda que o máximo valor de histerese da célula de carga de 20 kN na medição da força é de 4 N, valor este que pode ser considerado adequado. Por sua vez, a não linearidade observada foi de 1,89 N e de 1,81 N para o carregamento e o descarregamento do corpo de prova, respectivamente.

A Figura 4.9 mostra os valores de erro máximo observados durante o teste de verificação da célula de carga de 20 kN.

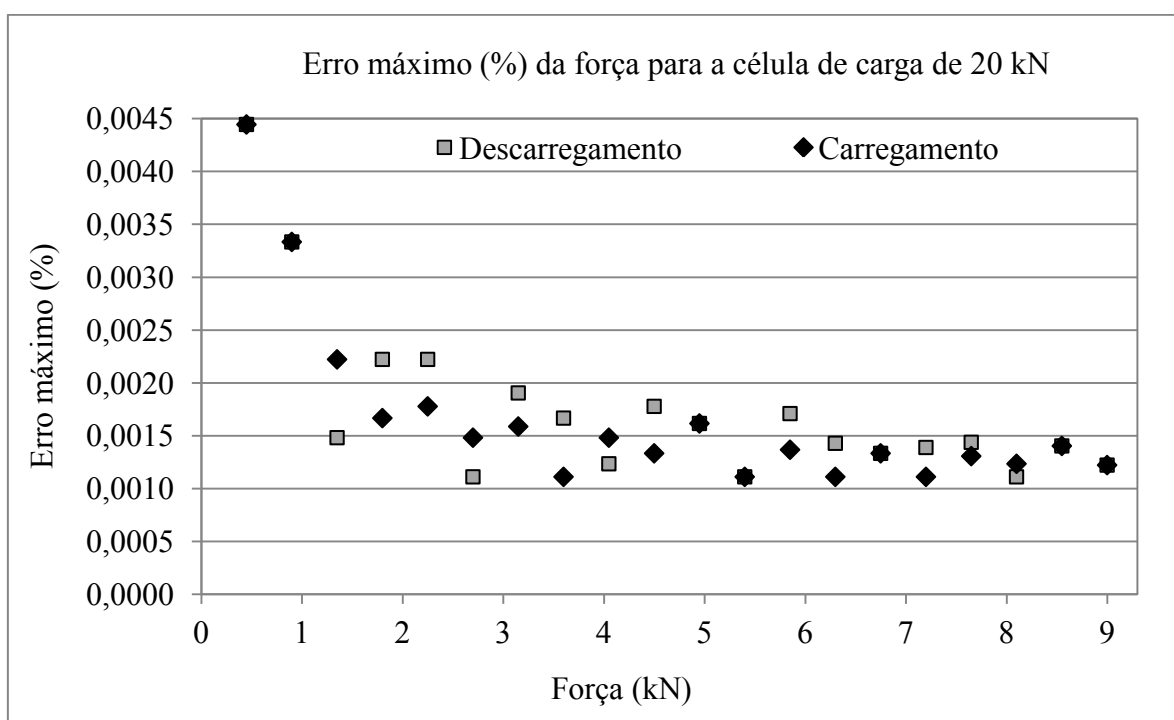


Figura 4.9: Valores de erro máximo obtidos, em porcentagem, com relação à força medida no teste de verificação da célula de carga de 20 kN, com teste de carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm

Percebe-se da Fig. 4.9 que o maior valor de erro máximo observado foi inferior a 0,005 %, para o patamar de força nominal igual a 0,45 kN, tanto no carregamento quanto no

descarregamento. O valor mais elevado do erro no patamar de força de início do teste pode ser explicado pelas folgas que ainda existiam entre o corpo de prova e o braço do equipamento. Ao recuar o atuador para aplicar a força no corpo de prova, essa folga diminuiu, apresentando melhor acomodação mecânica do corpo de prova no furo do braço.

A Figura 4.10 mostra os valores da média e da incerteza expandida (95,45 %) do ângulo medido pelo *encoder* incremental rotativo, no teste de verificação da célula de carga de 20 kN. A tabela completa com os valores de média, desvio padrão (67,28 %) e incerteza de medição expandida (95,45 %) do ângulo medido pelo *encoder* no teste de verificação da célula de carga de 20 kN encontra-se no Apêndice XI. Observa-se na Fig. 4.10 que a incerteza expandida associada à medição do ângulo do braço com o *encoder* foi constante e igual a  $0,21^\circ$ , o que representa aproximadamente 0,23 % do valor do ângulo, que variou menos de  $3^\circ$  ao longo do teste de verificação. A máxima histerese do *encoder* no teste de verificação da célula de carga de 20 kN foi igual a  $0,18^\circ$ , enquanto que o erro de não linearidade foi de  $0,09^\circ$  e  $0,19^\circ$  para o carregamento e o descarregamento, respectivamente.

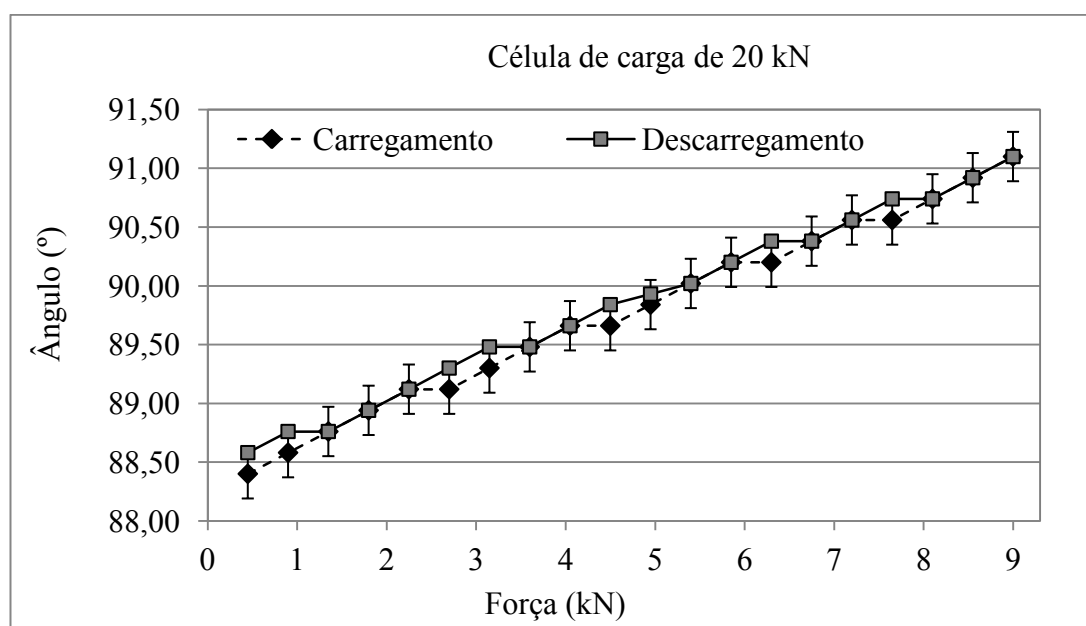


Figura 4.10: Valores de ângulo medidos pelo *encoder* obtidos no teste de verificação da célula de carga de 20 kN, com teste de carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, com barra de erros representando a incerteza expandida (95,45 %) para o carregamento

A Figura 4.11 ilustra os valores da média e da incerteza expandida (95,45 %) da tensão calculada, no teste de verificação da célula de carga de 20 kN. A tabela completa com os

valores de média, desvio padrão (67,28 %) e incerteza expandida (95,45 %) da tensão no corpo de prova, calculada no teste de verificação da célula de carga de 20 kN, encontra-se no Apêndice XI.

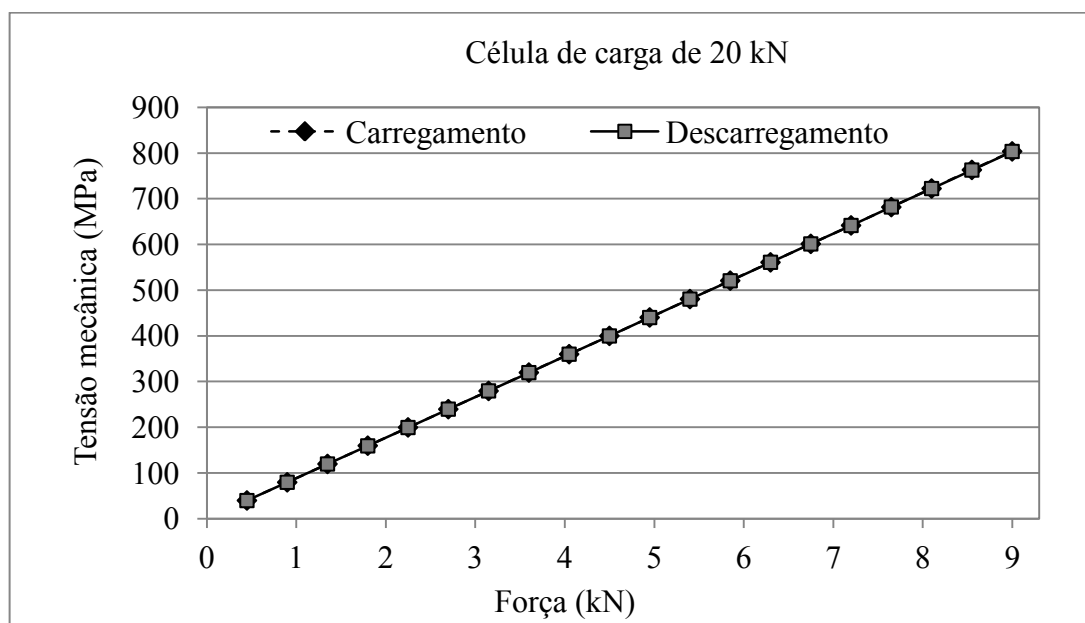


Figura 4.11: Valores de tensão obtidos no teste de verificação da célula de carga de 20 kN, com carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, com barra de erros representando a incerteza expandida (95,45 %) para o carregamento

O valor máximo de incerteza expandida associada à tensão no carregamento foi igual a 4,641 MPa para um valor médio de tensão igual a 803,661 MPa. No descarregamento, o valor máximo de incerteza expandida associada à tensão foi igual a 4,639 MPa para um valor médio de tensão igual a 803,507 MPa. Em ambos os casos a incerteza expandida representa um valor percentual igual a 0,58 %, indicando a excelente repetibilidade dos valores de tensão.

Com relação à contribuição máxima de incerteza, em porcentagem, no carregamento, a mesma foi obtida no patamar com tensão média igual a 39,726 MPa, o que representa uma contribuição igual a 0,69 %. No descarregamento, a contribuição máxima de incerteza, em porcentagem, foi obtida no patamar com tensão média igual a 39,507 MPa, o que também representa uma contribuição igual a 0,69 %. A máxima histerese da tensão calculada no teste de verificação da célula de carga de 20 kN foi igual a 0,444 MPa enquanto que o erro de não

linearidade foi de 1,14 MPa e 1,24 MPa para o carregamento e o descarregamento, respectivamente.

A Figura 4.12 exibe o gráfico de erro máximo da tensão, no teste de verificação da célula de carga de 20 kN.

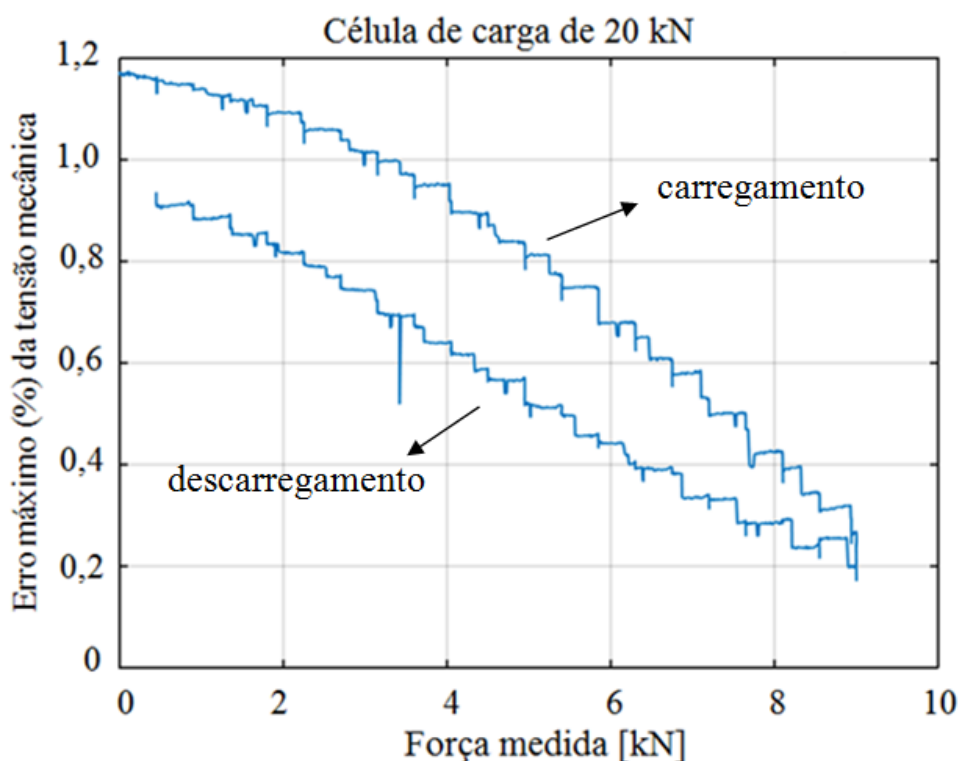


Figura 4.12: Valores de erro máximo obtidos, em porcentagem, na verificação da tensão mecânica calculada instantaneamente pelo programa SURISEL com célula de carga de 20 kN, no teste de verificação de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm

Infere-se da Fig. 4.12 que o maior valor de erro máximo relacionado à tensão, no corpo de prova para verificação da célula de carga de 20 kN, com teste de carregamento e descarregamento em patamares foi da ordem de 1,20 %. Este valor foi obtido no patamar inicial de carregamento do corpo de prova e pode ser explicado pelas folgas existentes entre o mesmo e o furo do braço do equipamento.

#### 4.2.2. Resultados obtidos na verificação da célula de carga de 1 kN

A Figura 4.13 exibe os valores de erro da tensão, em porcentagem, decorrentes da verificação da célula de carga de 1 kN.



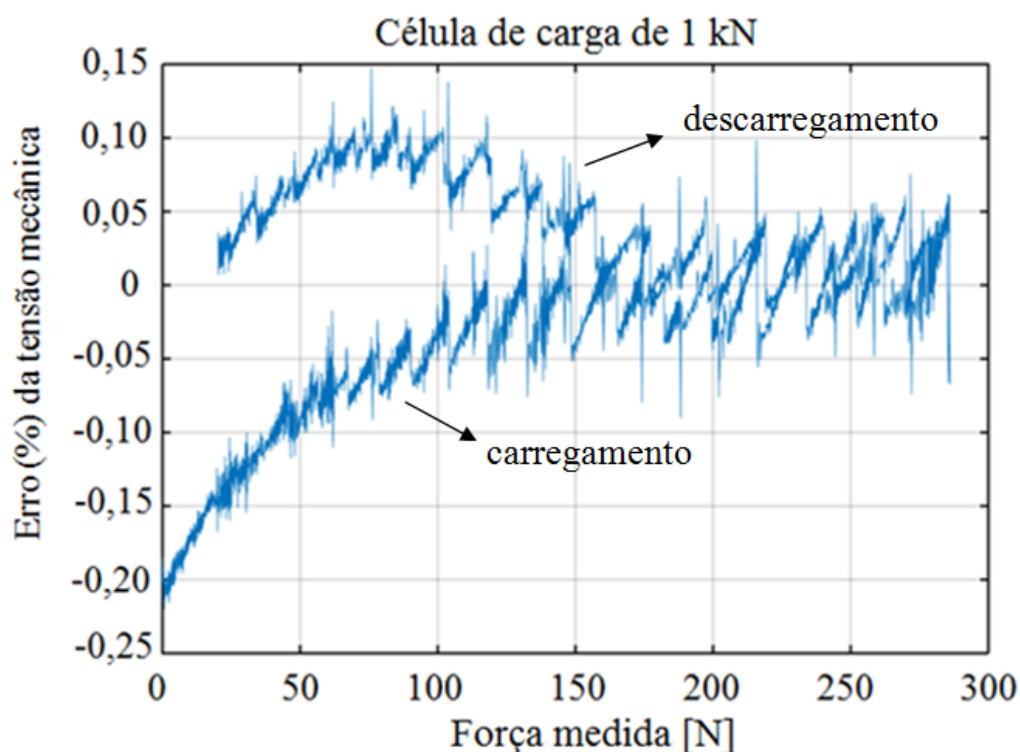


Figura 4.13: Valores de erro em porcentagem obtidos na verificação da tensão mecânica, calculada instantaneamente pelo programa SURISEL com célula de carga de 1 kN, com teste de carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm

Observa-se na Fig. 4.13 que, em módulo, o maior valor de erro obtido foi igual a 0,21 % e a 0,12 % no carregamento e no descarregamento, respectivamente. A diferença observada no carregamento e no descarregamento do corpo de prova pode ser novamente explicada devido à histerese da cola utilizada para fixar os extensômetros, além do erro de histerese inerente à medição de força pela célula de carga.

A Figura 4.14 exibe os valores da média e do erro associado à medição de força pela célula de carga de 1 kN. A tabela completa com os valores de média, desvio padrão (68,27 %) e incerteza expandida (95,45 %) da força medida pela célula de carga de 1 kN encontra-se no Apêndice XI.

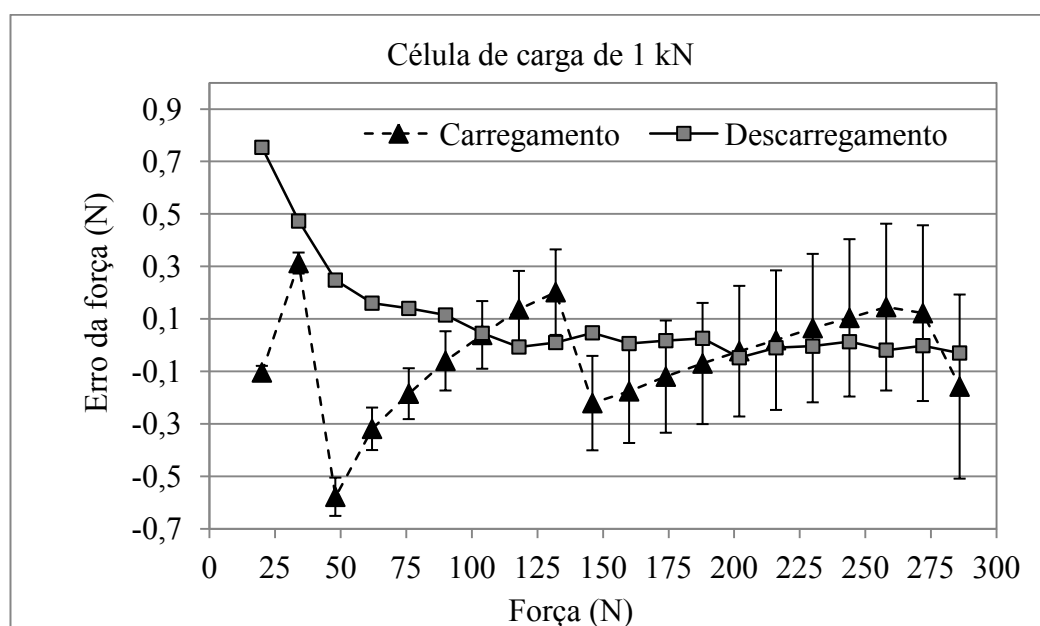


Figura 4.14: Valores de erro associados à força medida pela célula de carga de 1 kN obtidos no teste de verificação, com carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, com barra de erros representando a incerteza expandida (95,45 %) para o carregamento

Observa-se na Fig. 4.14 que os erros associados à força medida pela célula de carga de 1 kN foram relativamente baixos, situados entre 0,002 N e 0,754 N, em módulo. O valor de erro igual a 0,754 N foi obtido para um valor de força média medida igual a 20,754 N, o que representa uma contribuição percentual igual a 3,63 %. Isso indica que a exatidão dos valores de força é excelente e condiz com a informação do fabricante, de que o erro máximo da célula de carga é igual a 0,10 % do seu fundo de escala, ou seja, 1 N. O máximo valor de incerteza expandida obtido foi igual a 0,352 N, para o patamar com força igual a 286 N, o que representa um valor percentual igual a 0,12 %. A máxima histerese da força medida no teste de verificação da célula de carga de 1 kN foi igual a 0,858 N, enquanto que o erro de não linearidade foi de 0,441 N e 0,428 N para o carregamento e o descarregamento, respectivamente.

A Figura 4.15 ilustra os valores de erro máximo observados durante o carregamento e o descarregamento em patamares com relação à força medida, no teste de verificação da célula de carga de 1 kN.

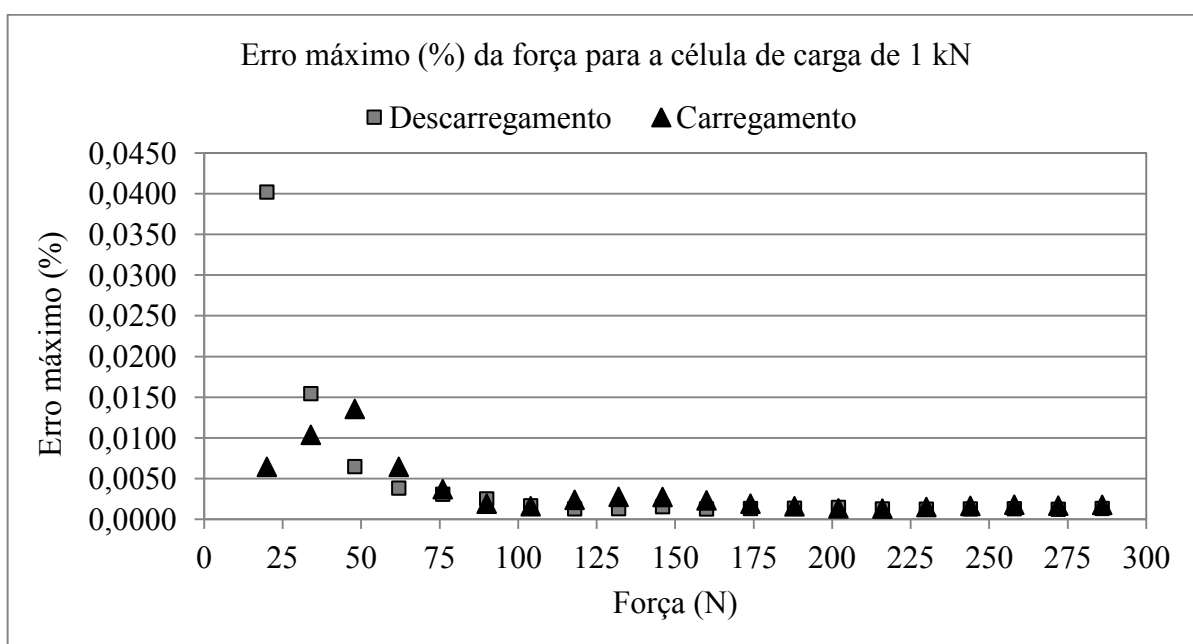


Figura 4.15: Valores de erro máximo obtidos, em porcentagem, com relação à força medida no teste de verificação da célula de carga de 1 kN, com teste de carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm

Percebe-se da Fig. 4.15 que o maior valor observado de erro máximo, em porcentagem, com relação à força medida no teste de verificação da célula de carga de 1 kN foi igual a 0,04 %, para o patamar de força de 20 N, no descarregamento. Menores valores de força tenderam a apresentar maiores valores de erro, devido ao fato de que os efeitos de influências externas como vibração mecânica transmitida pelo solo tornam-se mais evidentes.

A Figura 4.16 mostra os valores da média e da incerteza expandida (95,45 %) do ângulo medido pelo *encoder* incremental rotativo, no teste de verificação da célula de carga de 1 kN. A tabela completa com os valores de média, desvio padrão (67,28 %) e incerteza expandida (95,45 %) do ângulo medido pelo *encoder* no teste de verificação da célula de carga de 1 kN encontra-se no Apêndice XI. Observou-se que a incerteza expandida associada à medição do ângulo do braço com o *encoder* foi constante e igual a 0,21°, o que representa aproximadamente 0,23 % do valor do ângulo, que variou menos de 3° ao longo do teste de verificação. A máxima histerese do *encoder* no teste de verificação da célula de carga de 1 kN foi igual a 0,72° enquanto que o erro de não linearidade foi de 0,20° e 0,82° para o carregamento e o descarregamento, respectivamente.

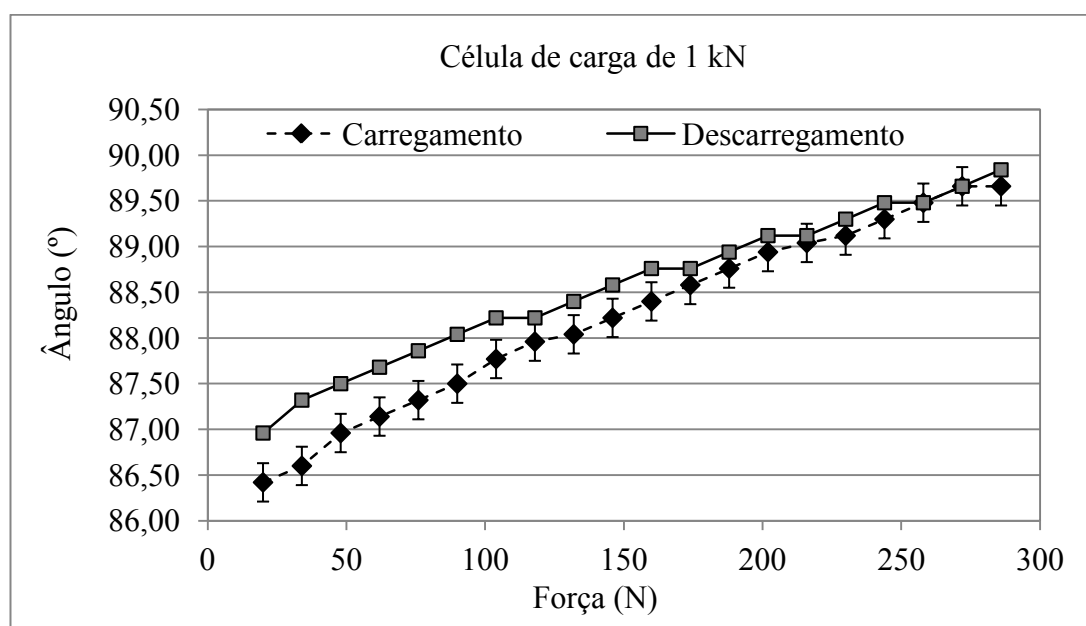


Figura 4.16: Valores de ângulo medidos pelo *encoder* obtidos no teste de verificação da célula de carga de 1 kN, com teste de carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, com barra de erros representando a incerteza expandida (95,45 %) para o carregamento

A Fig. 4.17 mostra os valores da média e da incerteza expandida (95,45 %) da tensão calculada, no teste de verificação da célula de carga de 1 kN. A tabela completa com os valores de média, desvio padrão (67,28 %) e incerteza expandida (95,45 %) da tensão no corpo de prova, calculada no teste de verificação da célula de carga de 1 kN encontra-se no Apêndice XI. A máxima histerese da tensão calculada no teste de verificação da célula de carga de 1 kN foi igual a 8,356 MPa enquanto que o erro de não linearidade foi de 5,045 MPa e 7,460 MPa para o carregamento e o descarregamento, respectivamente.

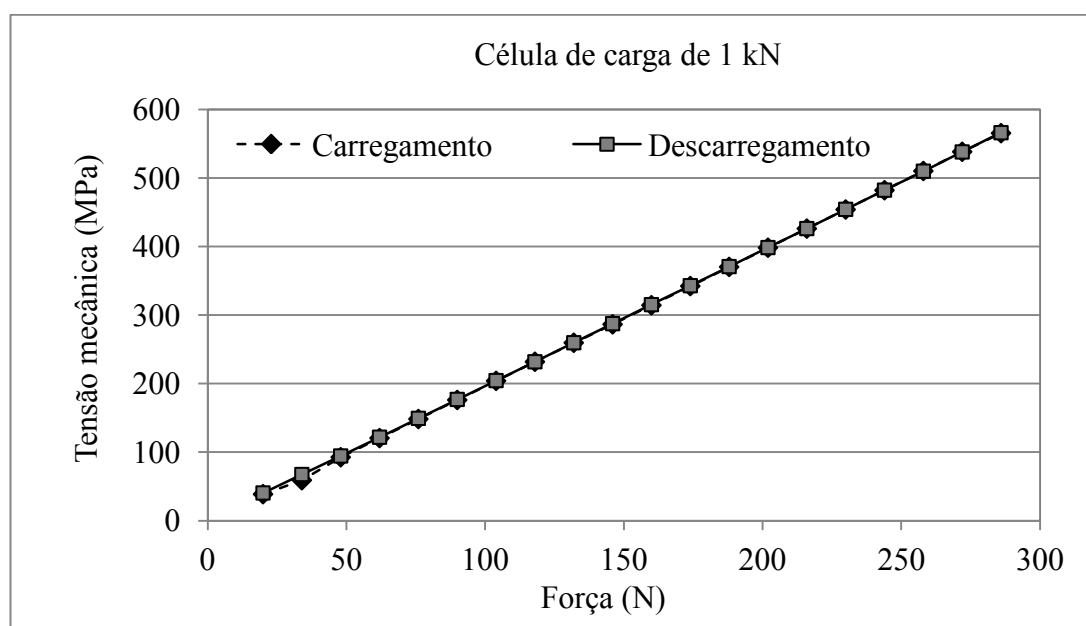


Figura 4.17: Valores de tensão obtidos no teste de verificação da célula de carga de 1 kN, com teste de carregamento e descarregamento do corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, com barra de erros representando a incerteza expandida (95,45 %) para o carregamento

O valor máximo de incerteza expandida associada ao cálculo da tensão no carregamento foi igual a 5,005 MPa para um valor médio de tensão igual a 565,498 MPa, o que representa um valor percentual igual a 0,88 %. No descarregamento, o valor máximo de incerteza expandida associada à tensão foi igual a 5,013 MPa para um valor médio de tensão igual a 566,166 MPa, o que representa um valor percentual igual a 0,88 %. A máxima incerteza percentual no carregamento foi obtida no patamar com tensão média igual a 92,662 MPa, o que representa uma contribuição igual a 0,89 %. No descarregamento, a máxima incerteza, em porcentagem, foi obtida no patamar com tensão média igual a 40,552 MPa, o que representa uma contribuição igual a 0,90 %.

A Figura 4.18 exibe o gráfico de erro máximo da tensão, no teste de verificação da célula de carga de 1 kN. O erro máximo foi calculado segundo a Eq. (3.13).

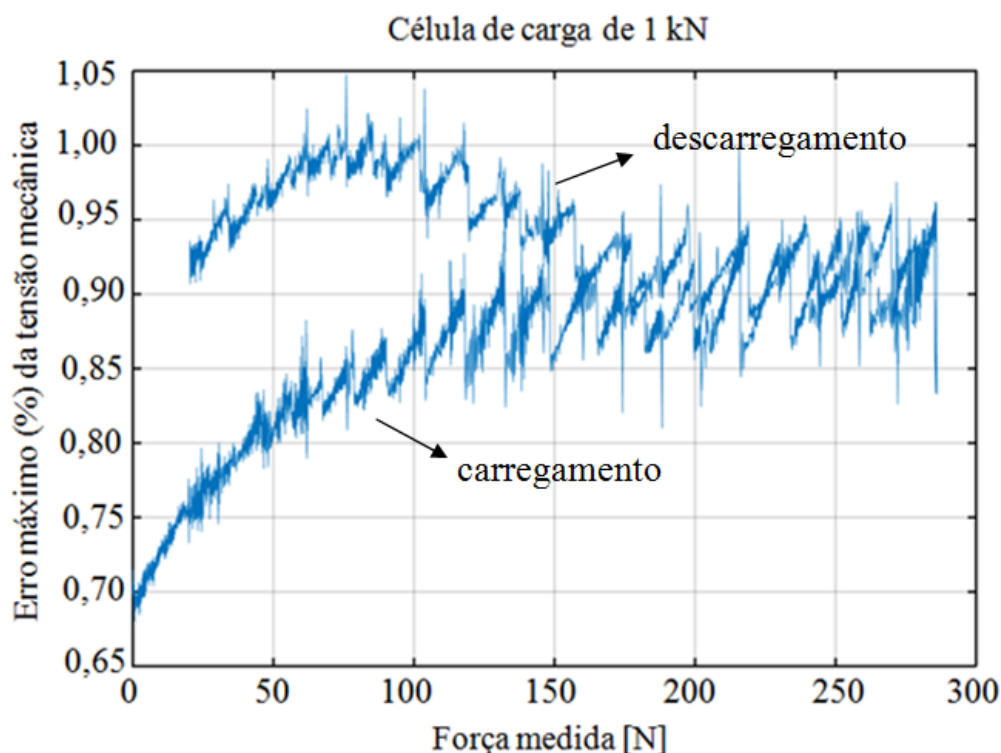


Figura 4.18: Valores de erro máximo, em porcentagem, obtidos na verificação da tensão mecânica calculada instantaneamente pelo programa SURISEL com célula de carga de 1 kN, no teste de verificação com carregamento e descarregamento de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm

Infere-se da Fig. 4.18 que o maior valor de erro máximo, relacionado à tensão no corpo de prova para verificação da célula de carga de 1 kN, com teste de carregamento e descarregamento em patamares foi da ordem de 1,03 %, o que constitui um valor reduzido.

Em termos gerais, conclui-se que os testes de verificação das duas montagens do RSL 2, com célula de carga de 20 kN para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e com célula de carga de 1 kN para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm produziram resultados aceitáveis, do ponto de vista de comparação da tensão quantificada por meio da colagem de extensômetros no corpo de prova, e a tensão calculada a partir das dimensões do corpo de prova, da força medida pela célula de carga e do ângulo de giro do braço, medido pelo *encoder* incremental. A exatidão dos valores de tensão, de força e de ângulo foi excelente, bem como a repetibilidade e a incerteza expandida associada.

Pode-se inferir que, por meio dos testes de verificação acima detalhados, o programa supervisor SURISEL do RSL 2, o programa CatmanEasy-AP® e o módulo de aquisição QUANTUM X são adequados para a instrumentação, controle, leitura e armazenamento de

dados dos testes com o material AISI 4140, nas condições especificadas. Pode-se igualmente concluir que os itens fabricados do RSL 2 (braço do equipamento, roletes, suporte do corpo de prova, estrutura do equipamento e da unidade de comando) atendem às especificações de projeto e são adequados para a realização de testes.

Os resultados resumidos para os parâmetros metrológicos dos testes de verificação das células de carga de 20 kN e 1 kN, encontram-se nas Tabs. 4.2 a 4.4.

Tabela 4.2: Parâmetros metrológicos do RSL 2 na medição da força pelas células de carga de 20 kN e de 1 kN, nos testes de verificação das montagens do RSL 2 com carregamento e descarregamento ao ar

	Célula de carga de 20 kN		Célula de carga de 1 kN	
	Carregamento	Descarregamento	Carregamento	Descarregamento
Erro (tendência)	2 N	3 N	0,691 N	0,754 N
Exatidão	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
U (95,45 %)	10 N	10 N	0,351 N	0,352 N
Precisão (95,45 %)	$\pm 4$ N	$\pm 1,6$ N	$\pm 0,752$ N	$\pm 0,726$ N
Erro máximo	0,0045 %	0,0045 %	0,040 %	0,015 %
Histerese	4 N		0,858 N	
Erro de não linearidade	2 N	2 N	0,441 N	0,428 N

Tabela 4.3: Parâmetros metrológicos do ângulo medido nos testes de verificação das montagens do RSL 2, com carregamento e descarregamento, ao ar, para as células de carga de 20 kN e de 1 kN

	Célula de carga de 20 kN		Célula de carga de 1 kN	
	Carregamento	Descarregamento	Carregamento	Descarregamento
U (95,45 %)	0,21°	0,21°	0,21°	0,21°
Precisão (95,45 %)	$\pm 0,18^\circ$	$\pm 0,18^\circ$	$\pm 0,18^\circ$	$\pm 0,18^\circ$
Histerese	0,18°		0,72°	
Erro de não linearidade	0,09°	0,19°	0,20°	0,82°

Tabela 4.4: Parâmetros metrológicos da tensão mecânica calculada nos testes de verificação das montagens do RSL 2, com carregamento e descarregamento, ao ar, para as células de carga de 20 kN e de 1 kN

	Célula de carga de 20 kN		Célula de carga de 1 kN	
	Carregamento	Descarregamento	Carregamento	Descarregamento
Erro da tensão	0,48 %	0,52 %	0,21 %	0,12 %
Exatidão	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
U (95,45 %)	4,641 MPa	4,639 MPa	5,005 MPa	5,013 MPa
Precisão (95,45 %)	$\pm 0,384$ MPa	$\pm 0,296$ MPa	$\pm 1,468$ MPa	$\pm 1,418$ MPa
Erro máximo	1,20 %	0,90 %	0,90 %	1,03 %
Histerese	0,444 MPa		8,356 MPa	
Erro de não linearidade	1,140 MPa	1,240 MPa	5,045 MPa	7,461 MPa

### 4.3. Resultados obtidos nos testes de determinação do valor de PFFS

Neste item encontram-se os resultados obtidos durante os testes com carregamento contínuo ao ar, para determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm.

#### 4.3.1. Resultados obtidos nos testes com carregamento contínuo ao ar, para determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm

Neste item encontram-se os resultados obtidos nos testes com carregamento contínuo ao ar, para determinação do valor de PFFS, utilizado como ponto de partida para os testes de CPPAM. A Figura 4.19 mostra as curvas de força obtidas no teste de determinação do valor de PFFS para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm.



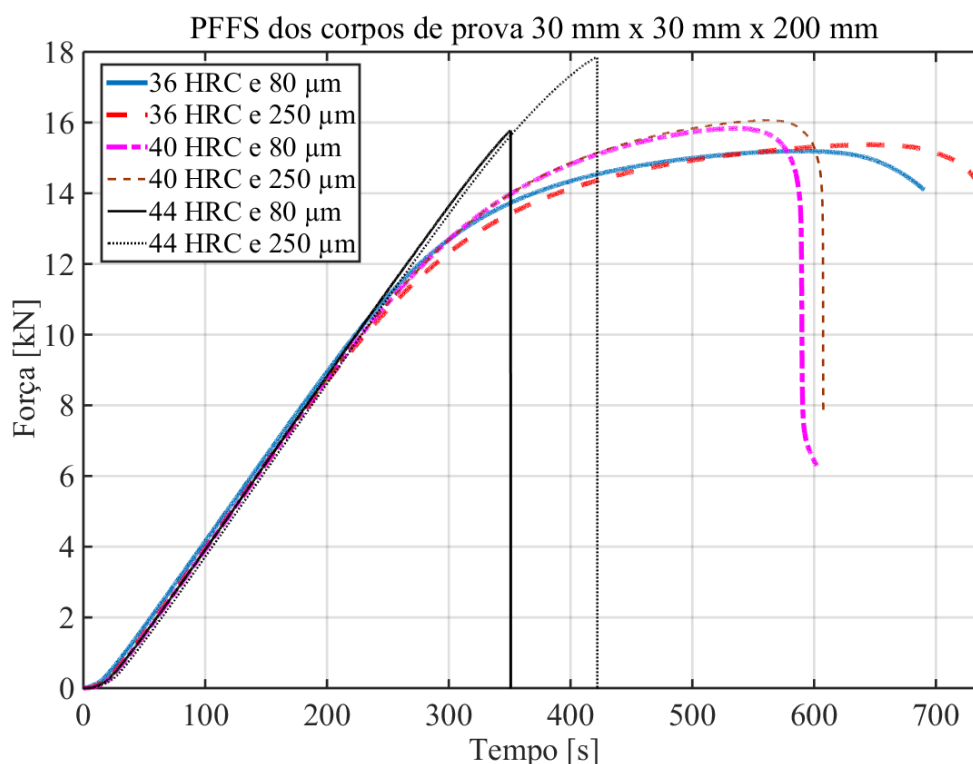


Figura 4.19: Resultados obtidos nos testes de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, em função da força no corpo de prova

Observa-se na Fig. 4.19 que para corpos de prova com valores de dureza mais elevados (44 HRC), a fratura é catastrófica e repentina, no fim do regime elástico. Observa-se igualmente que para um mesmo valor de raio do entalhe, corpos de prova mais duros são mais frágeis e, portanto, valores mais elevados de força são atingidos em menores tempos, uma vez que o corpo de prova deforma-se menos facilmente frente ao esforço aplicado, com menores deformações e inexistência de regime plástico. Como exemplo, para o corpo de prova com dureza igual a 44 HRC e raio do entalhe igual a 250  $\mu\text{m}$ , observou-se um valor de força máxima igual a 17,843 kN (atingido em 422 s) enquanto que para o corpo de prova com dureza igual a 36 HRC e mesmo raio do entalhe, verificou-se uma força máxima igual a 15,372 kN (obtida em 641 s), o que representa uma diferença percentual de força igual a 16,07 %.

Nota-se ainda na Fig. 4.19 que, mantendo constante a dureza do corpo de prova, um valor de raio do entalhe menor (80  $\mu\text{m}$ ) provocou um valor de força máxima menor e menores tempos foram gastos para se atingir essa força. Este fato está associado à maior concentração de tensão mecânica oriunda de um entalhe mais “agudo”, o que implica no favorecimento da fratura mecânica. Observou-se para o corpo de prova com dureza igual a 44 HRC e raio do

entalhe igual a 250  $\mu\text{m}$ , um valor de força máxima igual a 17,843 kN (atingido em 422 s) enquanto que para o corpo de prova com o mesmo valor de dureza e raio do entalhe igual a 80  $\mu\text{m}$ , verificou-se uma força máxima igual a 15,777 kN (obtida em 351 s), o que representa uma diferença percentual de força igual a 13,09 %.

A Figura 4.20 ilustra as curvas de tensão obtidas no teste de determinação do PFFS dos corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm. Observa-se novamente na Fig. 4.20 que para um mesmo valor de raio do entalhe, de modo geral em corpos de prova mais duros foram observados valores de tensão máxima mais elevados e obtidos em menores tempos, visto que os valores de força máxima atingidos foram igualmente maiores e ambas as grandezas são diretamente proporcionais, conforme a Eq. (3.9). Para um valor de dureza constante, para maiores valores de raio do entalhe (250  $\mu\text{m}$ ) obtiveram-se maiores valores de tensão máxima, observados em maiores tempos.

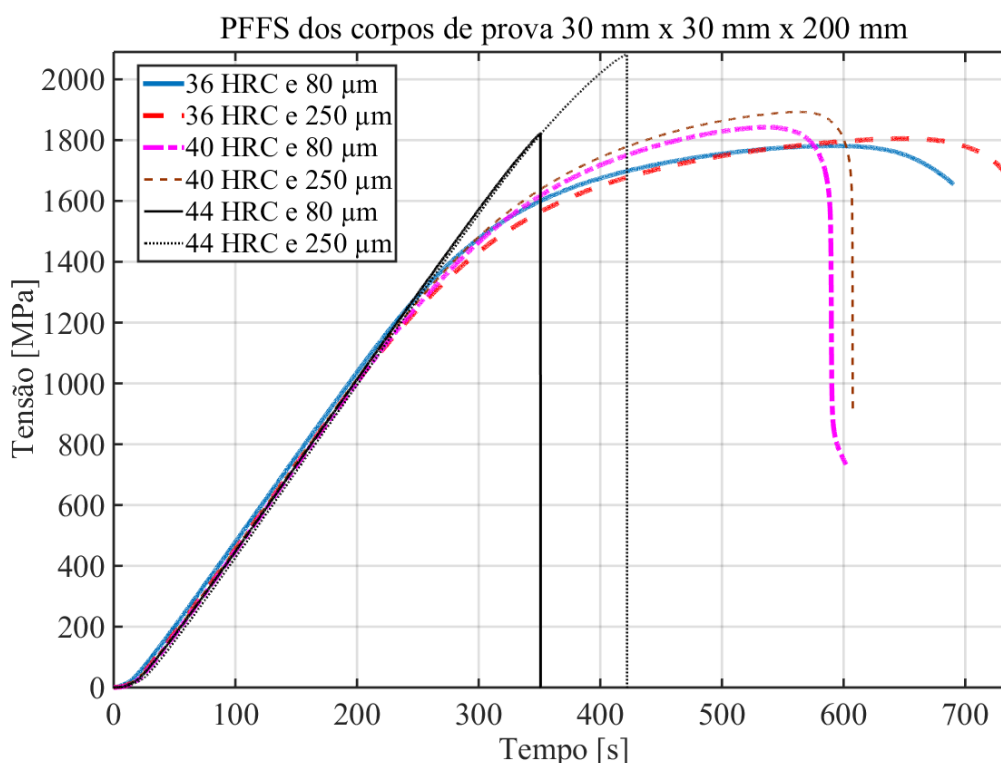


Figura 4.20: Resultados obtidos nos testes de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, em função da tensão no corpo de prova

A Tabela 4.5 mostra os valores de PFFS, da tensão e do fator de intensificação de tensão ( $K_I$  – modo I de carregamento) para todas as seis condições investigadas, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm.

Tabela 4.5: Resultados de PFFS, tensão máxima,  $K_I$  e incerteza expandida (95,45 %) da força e da tensão máxima para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm

Condição	Dureza (HRC)	Raio do entalhe ( $\mu\text{m}$ )	PFFS (kN)	U (kN)	Tensão (MPa)	U (MPa)	$K_I$ (MPa $\sqrt{m}$ )
1	36	80	15,189	0,017	1780,888	7,988	150,614
2	36	250	15,372	0,018	1805,039	8,278	152,651
3	40	80	15,834	0,018	1842,234	8,335	156,155
4	40	250	16,067	0,018	1893,348	8,685	161,186
5	44	80	15,777	0,018	1822,739	8,202	154,799
6	44	250	17,843	0,020	2081,765	9,444	176,897

Para facilitar a análise dos resultados apresentados na Tab. 4.5, a Fig. 4.21 foi construída. Observa-se na Fig. 4.21a que a força máxima (PFFS) aumentou com o incremento da dureza do corpo de prova de 36 HRC para 44 HRC e com o aumento do raio do entalhe de 80  $\mu\text{m}$  para 250  $\mu\text{m}$ . Para a condição mais crítica (raio do entalhe igual a 250  $\mu\text{m}$  e dureza igual a 44 HRC), a força máxima foi igual a 17,843 kN.

Para a tensão máxima e para o  $K_I$  (Figs. 4.21b e Fig. 4.21c) foi observada uma tendência de aumento para raio do entalhe de 250  $\mu\text{m}$  na medida em que a dureza aumentou, enquanto que para o raio do entalhe igual a 80  $\mu\text{m}$  não foi observada nenhuma tendência. A condição mais crítica foi novamente a condição 6 (raio do entalhe igual a 250  $\mu\text{m}$  e dureza igual a 44 HRC) para a qual a tensão máxima e o  $K_I$  assumiram valores de 2081,765 MPa e 9,444 MPa, respectivamente. Este fato pode ser justificado porque forças maiores foram obtidas e, conseqüentemente, a tensão foi maior, aumentando o valor de  $K_I$ . Quanto maior for o valor de  $K_I$ , maior é a intensificação de tensão. O detalhamento do cálculo de  $K_I$  encontra-se no Apêndice XII.

Com relação à incerteza expandida da força medida, o maior valor obtido foi igual a 0,020 kN o que representa 0,11 % do valor de força medido, Tab. 4.5. O maior valor de incerteza expandida da tensão foi igual a 9,444 MPa para um valor de tensão igual a 2081,765 MPa, o que representa 0,45 % daquele valor. Por sua vez, a contribuição percentual da incerteza associada ao valor de PFFS foi igual a 0,11 % para as seis condições da Tab. 4.5. A contribuição percentual da incerteza associada ao cálculo da tensão foi igual a 0,45 % para as seis condições investigadas.

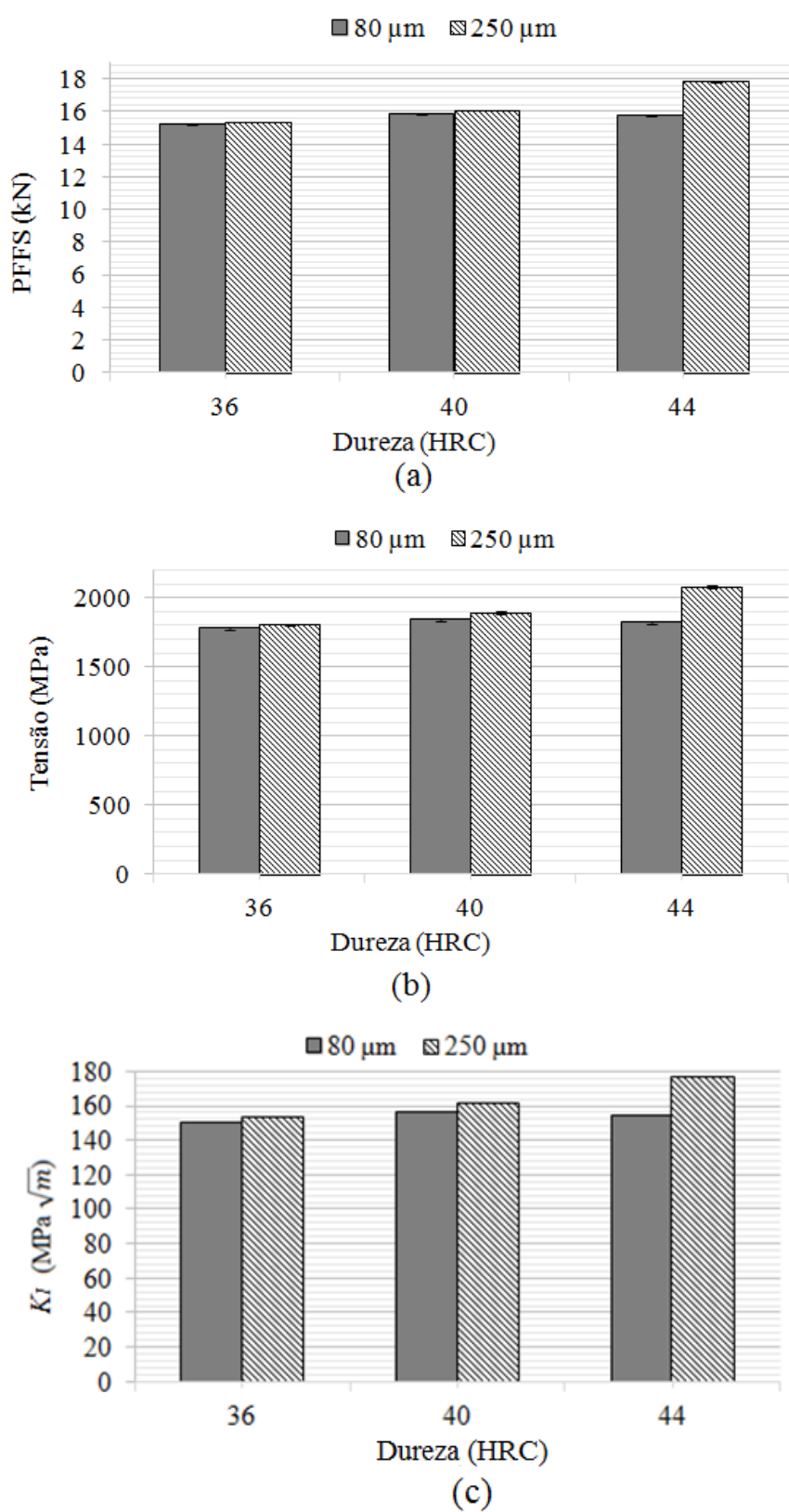


Figura 4.21: Representação gráfica da Tab. 4.5 para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm (a) Valores de PFFS obtidos; (b) Valores de tensão mecânica calculados; (c) Valores de  $K_I$  calculados

4.3.2. Resultados obtidos nos testes com carregamento contínuo ao ar, para determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm

A Figura 4.22 mostra as curvas de força obtidas no teste de determinação do valor de PFFS para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm.

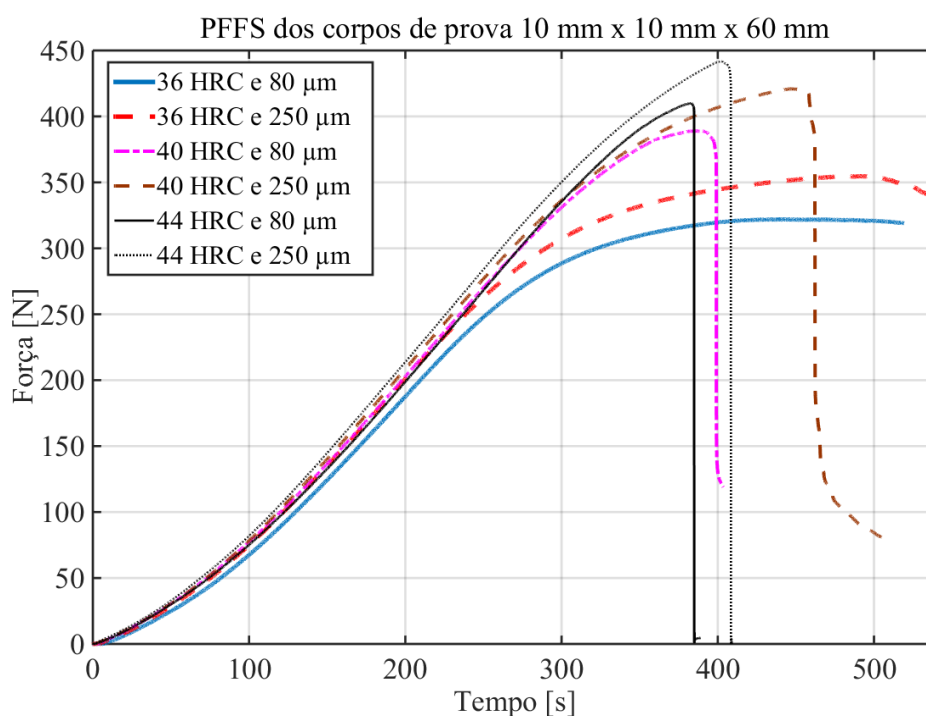


Figura 4.22: Resultados obtidos nos testes de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, em função da força no corpo de prova

Analisando-se a Fig. 4.22, infere-se que o mesmo comportamento observado nos corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm é identificado nos corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, no que diz respeito à relação entre dureza do corpo de prova e força atingida, para um mesmo valor de raio do entalhe: maiores valores de dureza implicam em maiores valores de força máxima obtidos em menores tempos. Para o corpo de prova com dureza igual a 44 HRC e raio do entalhe igual a 250 μm, observou-se um valor de força máxima igual a 448,055 N (atingido em 410 s) enquanto que para o corpo de prova com dureza igual a 36 HRC e mesmo raio do entalhe, verificou-se uma força máxima igual a 354,567 N (obtida em 494 s), o que representa uma diferença percentual de força igual a 26,37 %.

A relação entre menores valores de raio do entalhe (80 μm) e menores forças máximas atingidas, para valores constantes de dureza, também foi novamente constatado, observando-

se a Fig. 4.22. Para o corpo de prova com dureza igual a 36 HRC e raio do entalhe igual a 250  $\mu\text{m}$ , observou-se um valor de força máxima igual a 354,567 N (atingido em 494 s) enquanto que para o corpo de prova com o mesmo valor de dureza e raio do entalhe igual a 80  $\mu\text{m}$ , verificou-se uma força máxima igual a 321,929 N (obtida em 437 s), o que representa uma diferença percentual de força igual a 10,14 %.

A Figura 4.23 ilustra as curvas de tensão obtidas no teste de determinação do PFFS dos corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm.

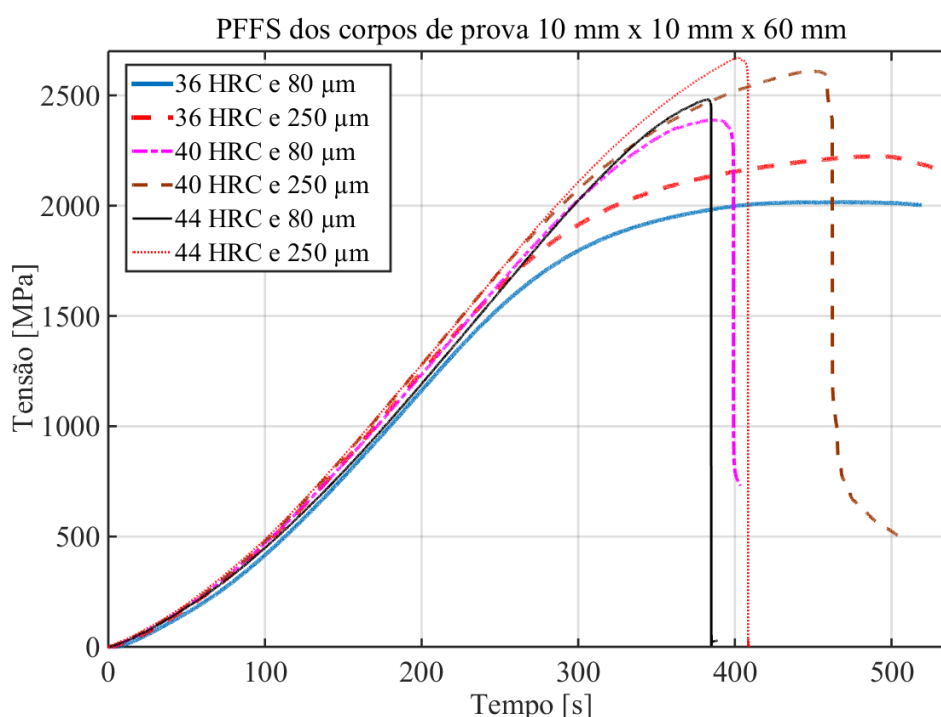


Figura 4.23: Resultados obtidos nos testes de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, em função da tensão no corpo de prova

Para um mesmo valor de raio do entalhe, em corpos de prova com dureza mais elevada (44 HRC) foram identificados valores de tensão máxima mais elevados e obtidos em menores tempos, como consequência de valores mais elevados de força máxima, Fig. 4.23. Para um valor de dureza constante, para maiores valores de raio do entalhe (250  $\mu\text{m}$ ) obtiveram-se maiores valores de tensão máxima, observados em maiores tempos.

A Tabela 4.6 mostra os valores obtidos de PFFS, da tensão e do fator de intensificação de tensão ( $K_I$ ) para todas as condições investigadas, para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm.

Tabela 4.6: Resultados de PFFS, tensão máxima,  $K_I$  e incerteza expandida (95,45 %) da força e da tensão máxima para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm

Condição	Dureza (HRC)	Raio do entalhe ( $\mu\text{m}$ )	PFFS (N)	U (N)	Tensão (MPa)	U (MPa)	$K_I$ ( $\text{MPa} \sqrt{m}$ )
7	36	80	321,929	0,361	2016,300	24,986	102,662
8	36	250	354,568	0,394	2223,500	27,471	112,981
9	40	80	389,084	0,433	2387,900	29,501	121,654
10	40	250	420,896	0,472	2609,800	32,219	132,036
11	44	80	409,951	0,460	2481,200	30,520	125,359
12	44	250	441,858	0,501	2669,700	32,983	134,535

Os resultados apresentados na Tab. 4.6 são mostrados em forma de gráfico na Fig. 4.24, para facilitar a análise. Observa-se na Fig. 4.24 que a força máxima (PFFS – Fig. 4.24a), a tensão máxima (Fig. 4.24b) e o  $K_I$  (Fig. 4.24c) aumentaram com o incremento da dureza do corpo de prova de 36 HRC para 44 HRC e com o aumento do raio do entalhe de 80  $\mu\text{m}$  para 250  $\mu\text{m}$ . A condição mais crítica em todos os casos foi a condição 12 (raio do entalhe igual a 250  $\mu\text{m}$  e dureza de 44 HRC) com valores de força máxima, tensão e  $K_I$  iguais a 441,858 kN, 2669,700 MPa e 134,535 MPa, respectivamente.

Com relação à incerteza expandida de medição da força, o maior valor obtido foi igual a 0,501 N o que representa 0,11 % do valor de força medido. O maior valor de incerteza expandida de cálculo da tensão foi igual a 32,983 MPa para um valor de tensão igual a 2669,700 MPa, o que representa 1,23 % daquele valor. A contribuição percentual da incerteza associada ao valor de PFFS foi igual a 0,11 % para as seis condições da Tab. 4.6. A contribuição percentual da incerteza associada ao cálculo da tensão foi igual a 1,23 % para as seis condições da mesma tabela. Percebe-se da Tab. 4.6 que valores maiores de dureza (44 HRC) implicam em maiores valores de  $K_I$  visto que forças maiores foram obtidas e, consequentemente, a tensão foi maior, aumentando o valor de  $K_I$ .

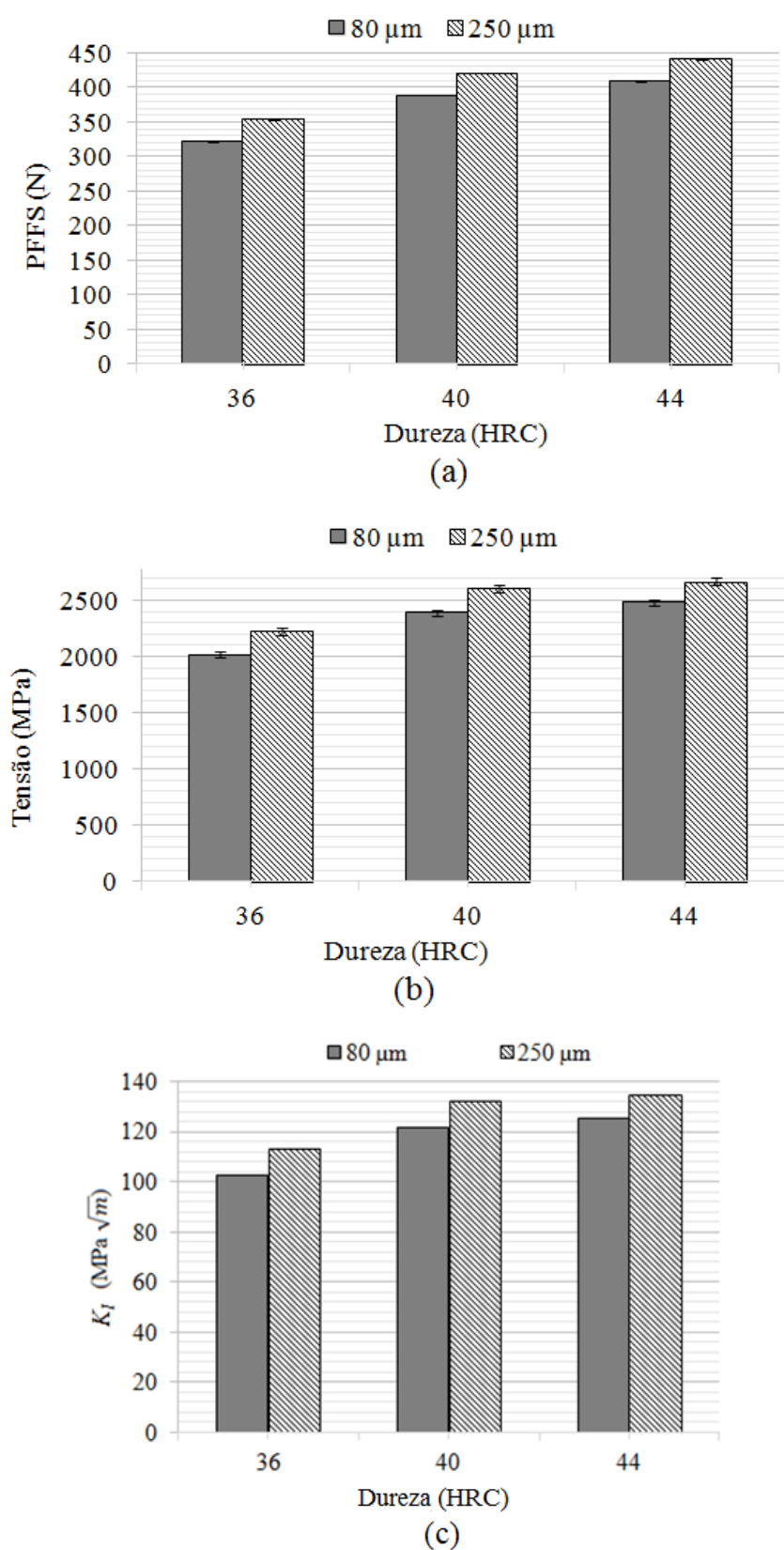


Figura 4.24: Representação gráfica da Tab. 4.6 para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm (a) Valores de PFFS obtidos; (b) Valores de tensão mecânica calculados; (c) Valores de  $K_I$  calculados

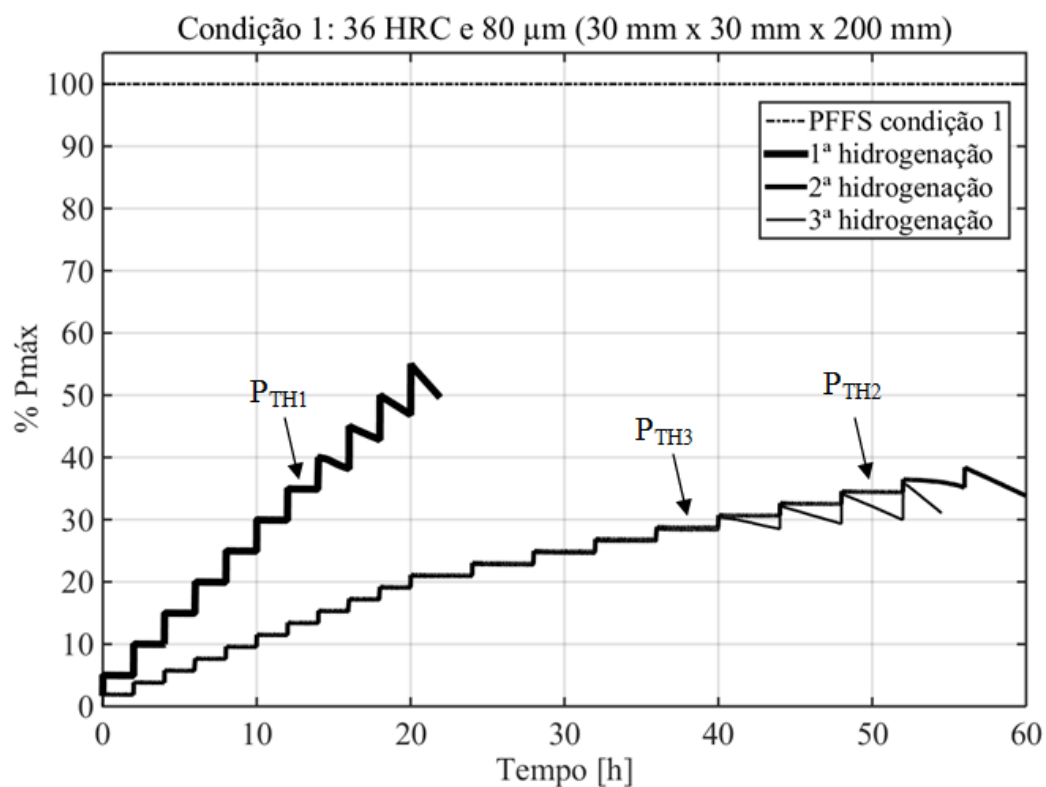


#### 4.4. Testes de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio

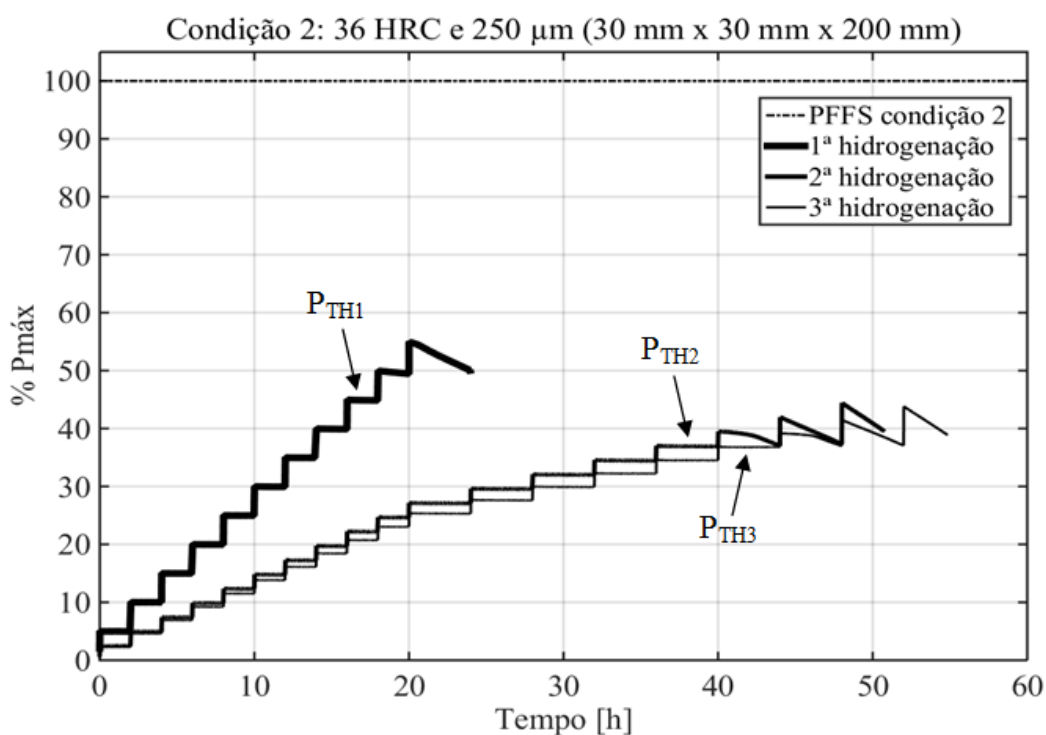
Neste item encontram-se os resultados obtidos nos testes de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio (CPPAM), para cada uma das 12 condições analisadas.

##### *4.4.1. Testes de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio (CPPAM) para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm*

As Figuras 4.25 a 4.27 mostram os resultados dos testes de CPPAM para os corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm para as diferentes condições investigadas, separados por valores de dureza. Observa-se nestas figuras que os patamares de  $P_{TH}$ , das curvas referentes aos três testes de CPPAM, ficaram próximas para todas as condições investigadas. Para a condição 1, a máxima diferença percentual observada entre dois testes subsequentes foi igual a 6,19 % do valor de PFFS, excedendo 5 %, Fig. 4.25a. Para todas as outras condições investigadas, as máximas distâncias entre os patamares de  $P_{TH}$  entre dois testes de CPPAM subsequentes (primeiro teste com o segundo teste e segundo teste com o terceiro teste) foram menores do que 5 % do valor de PFFS, sendo iguais a 0,11 % (Fig. 4.25b), 0,86 % (Fig. 4.26a), 1,88 % (Fig. 4.26b), 0,49 % (Fig. 4.27a) e 2,29 % (Fig. 4.27b) para as condições 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente. Estes resultados atendem a especificação da norma ASTM F1624 (ASTM, 2012).

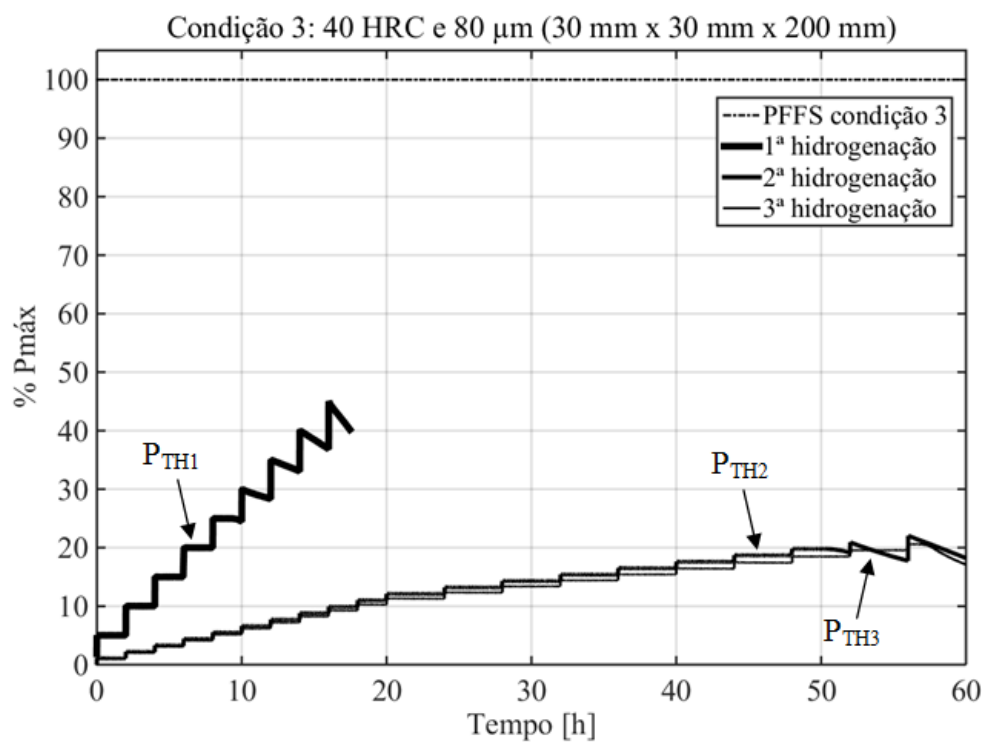


(a)

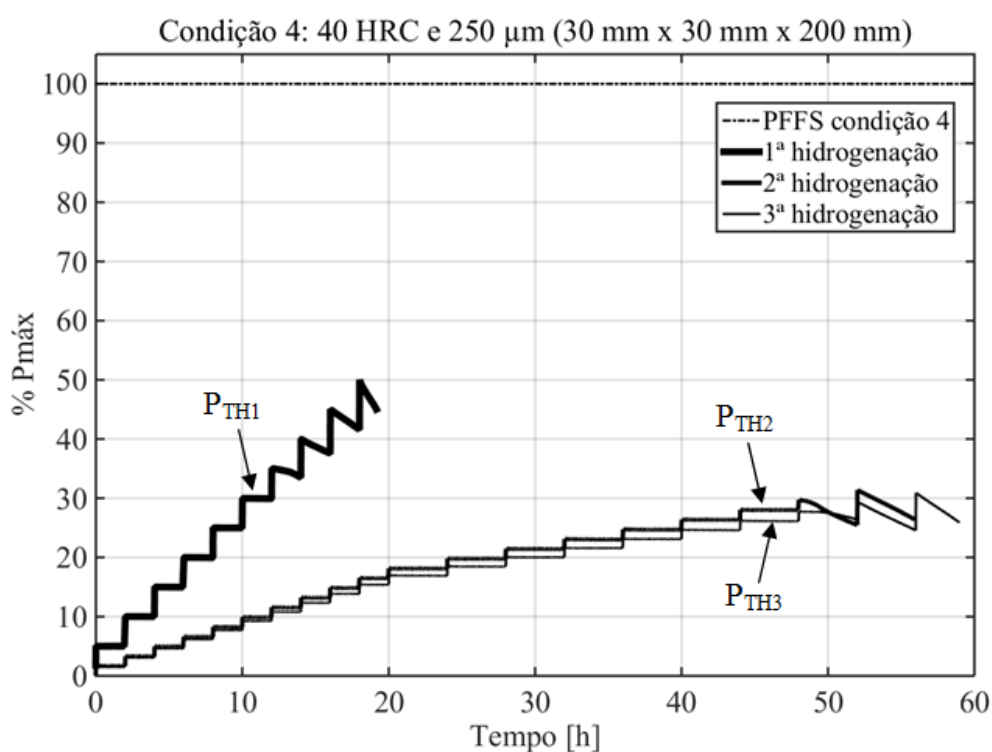


(b)

Figura 4.25: Resultados obtidos nos testes de CPPAM, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, dureza igual a 36 HRC e raios de arredondamento do entalhe iguais a 80  $\mu\text{m}$  (Fig. 4.25a) e a 250  $\mu\text{m}$  (Fig. 4.25b)

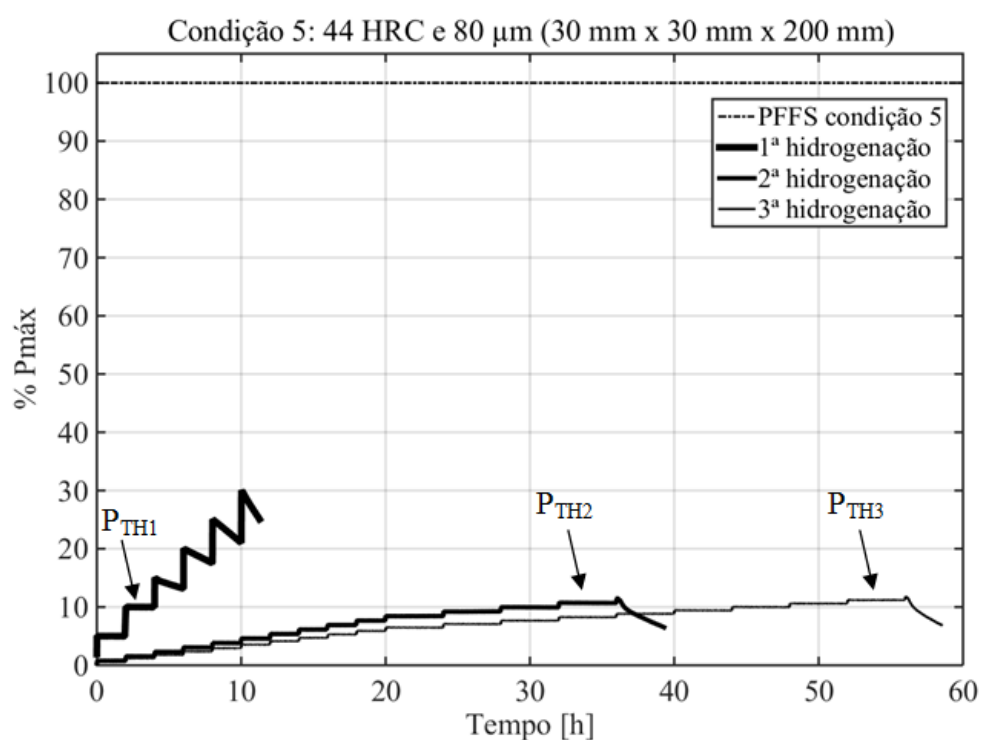


(a)

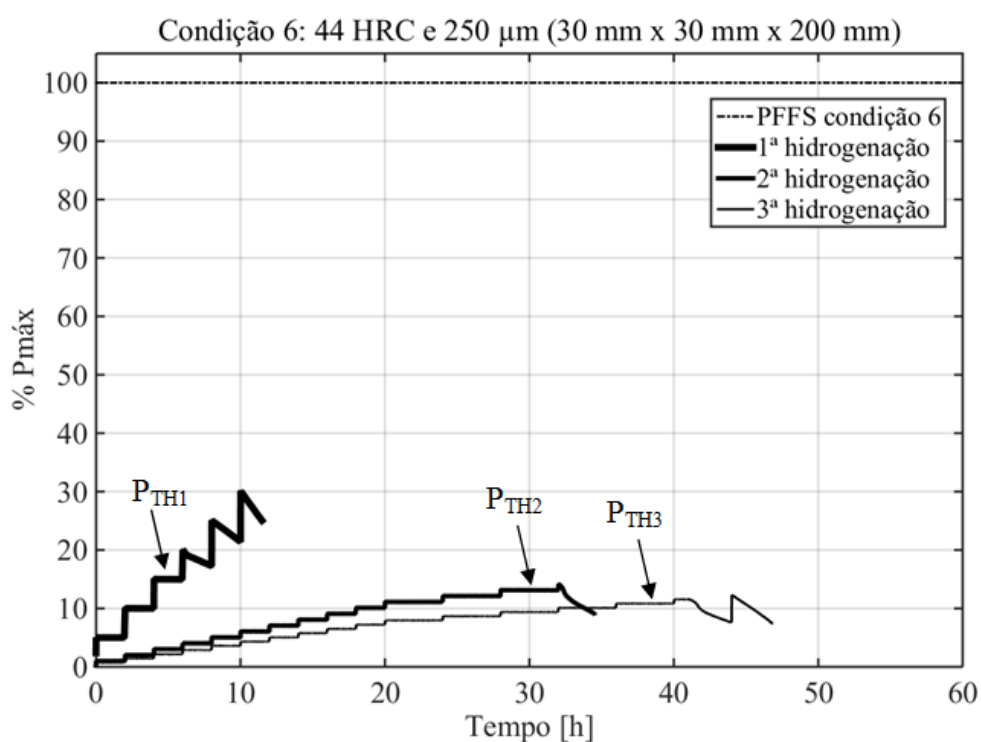


(b)

Figura 4.26: Resultados obtidos nos testes de CPPAM, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, dureza igual a 40 HRC e raios de arredondamento do entalhe iguais a 80  $\mu\text{m}$  (Fig. 4.26a) e a 250  $\mu\text{m}$  (Fig. 4.26b)



(a)



(b)

Figura 4.27: Resultados obtidos nos testes de CPPAM, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, dureza igual a 44 HRC e raios de arredondamento do entalhe iguais a 80  $\mu\text{m}$  (Fig. 4.27a) e a 250  $\mu\text{m}$  (Fig. 4.27b)

A Tabela 4.7 apresenta os resultados de força, tensão mecânica, redução percentual de força com relação ao PFFS no patamar de  $P_{TH}$  e a máxima diferença percentual entre o primeiro e o segundo testes hidrogenados e o segundo e o terceiro testes hidrogenados, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm.

Tabela 4.7: Valores de força, tensão no patamar de  $P_{TH}$  e incerteza expandida (95,45 %) dos testes hidrogenados para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm

Dureza HRC	Raio do entalhe ( $\mu\text{m}$ )	$P_{TH}$ (kN)	U (kN)	% PFFS	U (%) PFFS)	Tensão no $P_{TH}$ (MPa)	U (MPa)	Máxima diferença percentual
36	80	4,296	0,004	28,27	0,05	491,994	3,174	6,19 %
36	250	5,657	0,006	36,81	0,06	653,718	4,216	0,11 %
40	80	2,963	0,003	18,71	0,03	337,236	2,173	0,86 %
40	250	4,203	0,004	26,14	0,04	480,749	3,097	1,88 %
44	80	1,691	0,002	10,72	0,02	192,352	1,251	0,49 %
44	250	1,934	0,002	10,84	0,02	221,647	1,434	2,29 %

Na Tab. 4.7, a última coluna representa a máxima diferença percentual entre as reduções de força, observada entre dois testes subsequentes, ou seja, entre o primeiro e o segundo testes hidrogenados e entre o segundo e o terceiro testes hidrogenados, para uma dada condição (seção transversal, raio de arredondamento do entalhe e dureza do corpo de prova). Observa-se da Tab. 4.7 que para corpos de prova com dureza mais elevada (44 HRC), a redução percentual na resistência mecânica foi maior (da ordem de 10 %), o que configura uma situação crítica. Para um mesmo valor de dureza, menores valores de raio do entalhe (80  $\mu\text{m}$ ) implicaram em maiores reduções de força, devido à maior concentração de tensão e de hidrogênio presente na raiz do entalhe. Ao que tudo indica, a elevada ductilidade de corpos de prova mais macios (36 HRC) tende a diminuir a concentração de tensão mecânica na raiz do entalhe, devido à penetração do hidrogênio na microestrutura do material. Desse modo, a força requerida para fraturar tais corpos de prova, simbolizada pela coluna  $P_{TH}$  (kN) na Tab. 4.7, tende a ser maior.

A Tabela 4.8 exibe os valores do fator de intensificação de tensão limite ( $K_{TH}$  - *threshold*) para cada condição de teste de CPPAM que determinou o patamar de  $P_{TH}$ , para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm.

Tabela 4.8: Valores de  $K_{TH}$  para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, nos testes de CPPAM que determinaram o patamar de  $P_{TH}$

Dureza HRC	Raio do entalhe ( $\mu\text{m}$ )	$P_{TH}$ (kN)	$K_{TH} (MPa \sqrt{m})$
36	80	4,296	42,527
36	250	5,657	56,409
40	80	2,963	29,545
40	250	4,203	41,911
44	80	1,691	16,862
44	250	1,934	19,285

Os resultados apresentados nas Tabs. 4.7 e 4.8 são mostrados em forma de gráfico na Fig. 4.28, para facilitar a análise visual dos mesmos. Observa-se na Fig. 4.28 que para valores de dureza mais elevados (44 HRC), foram obtidos menores valores de  $K_{TH}$  visto que forças menores foram obtidas e, conseqüentemente, a tensão mecânica foi menor (Eq. 3.9), diminuindo o valor de  $K_{TH}$ .

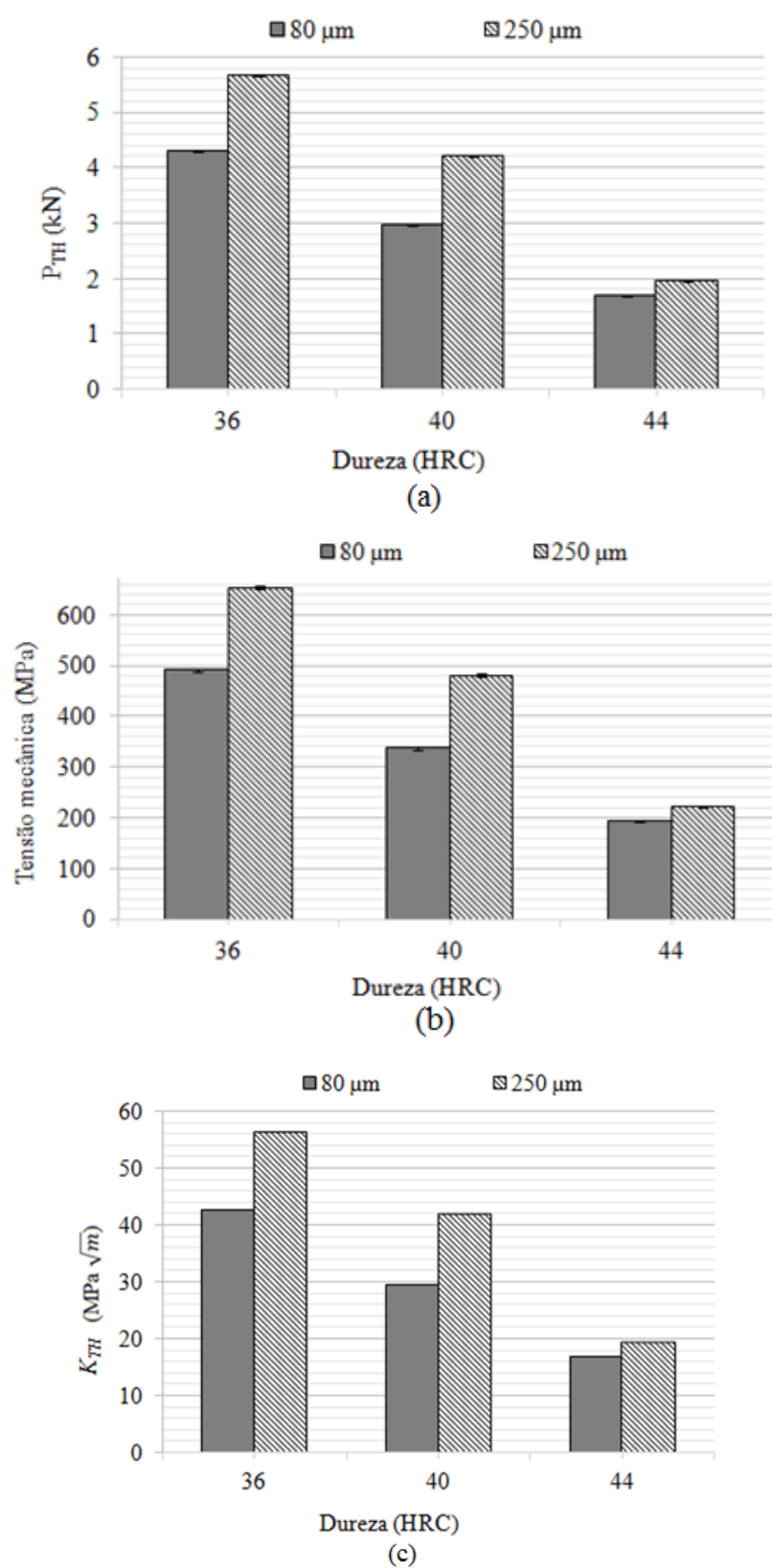


Figura 4.28: Representação gráfica das Tabs. 4.7 e 4.8 para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, no patamar de  $P_{TH}$  (a) Valores de força obtidos; (b) Valores de tensão mecânica calculados; (c) Valores de  $K_{TH}$  calculados

A Figura 4.29 mostra a corrente e a tensão elétricas do teste de CPPAM, em um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm.

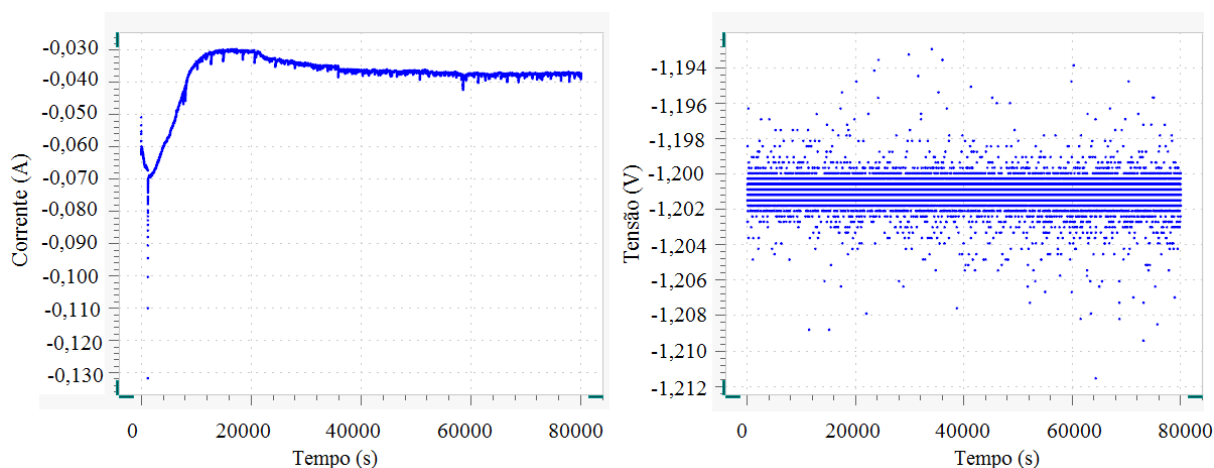


Figura 4.29: Valores de corrente e tensão elétricas obtidos no teste CPPAM de um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm

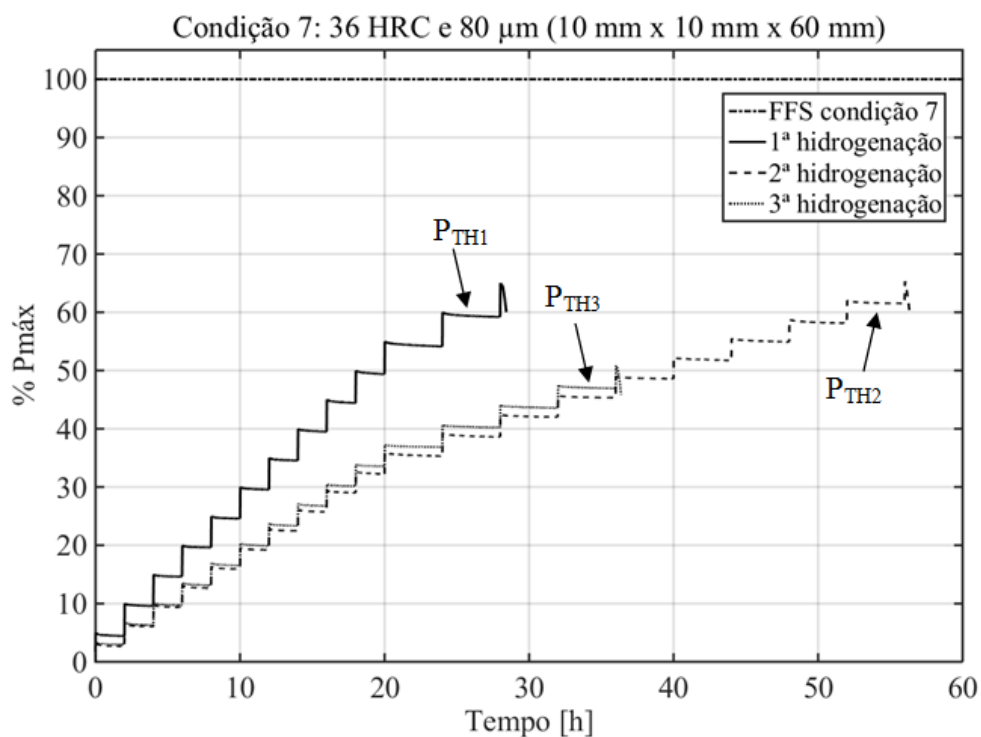
Observando-se a Fig. 4.29, verifica-se visualmente um valor de corrente elétrica média igual a 40 mA durante a cronoamperometria. Esse valor médio de corrente elétrica foi observado na maioria dos testes de CPPAM, nos corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm. Também é possível observar na Fig. 4.29 que a cronoamperometria foi realizada de forma eficaz visto que a tensão elétrica ficou praticamente constante, no valor de -1,200 V, o que maximiza a susceptibilidade à fragilização por hidrogênio do aço AISI 4140.

#### 4.4.2. Testes de carregamento em patamares progressivos assistido pelo meio (CPPAM) para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm

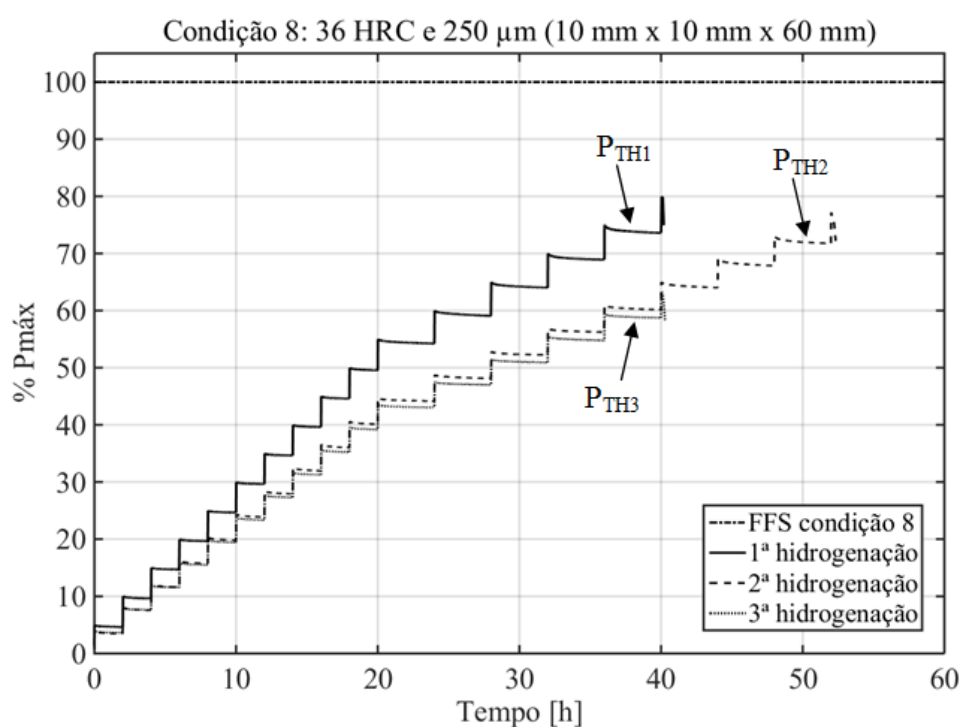
As Figuras 4.30 a 4.32 mostram os resultados dos testes de CPPAM para os corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm para as diferentes condições investigadas, separados por valores de dureza e raio de arredondamento do entalhe. Observa-se nestas figuras que nem todos os patamares de  $P_{TH}$ , referentes aos três testes de CPPAM, ficaram próximos em função da condição investigada. Para as condições 7, 8 e 10, a máxima diferença percentual observada entre dois testes subsequentes, em função do valor de PFFS, foi igual a 14,56 % (Fig. 4.30a), 13,08 % (Fig. 4.30b) e 6,62 % (Fig. 4.31b), respectivamente, excedendo 5 % como requerido na norma ASTM F1624 (ASTM, 2012). Para as outras condições investigadas, a máxima distância entre os patamares de  $P_{TH}$ , referentes a dois testes



de CPPAM subsequentes (primeiro teste com segundo teste e segundo teste com terceiro teste) foi menor do que 5 % do valor de PFFS, sendo iguais a 2,43 % (Fig. 4.31a), 0,34 % (Fig. 4.32a) e 0,45 % (Fig. 4.32b) para as condições 9, 11 e 12, respectivamente. Não foram realizados testes adicionais de CPPAM, pois não se dispunha de corpos de prova.

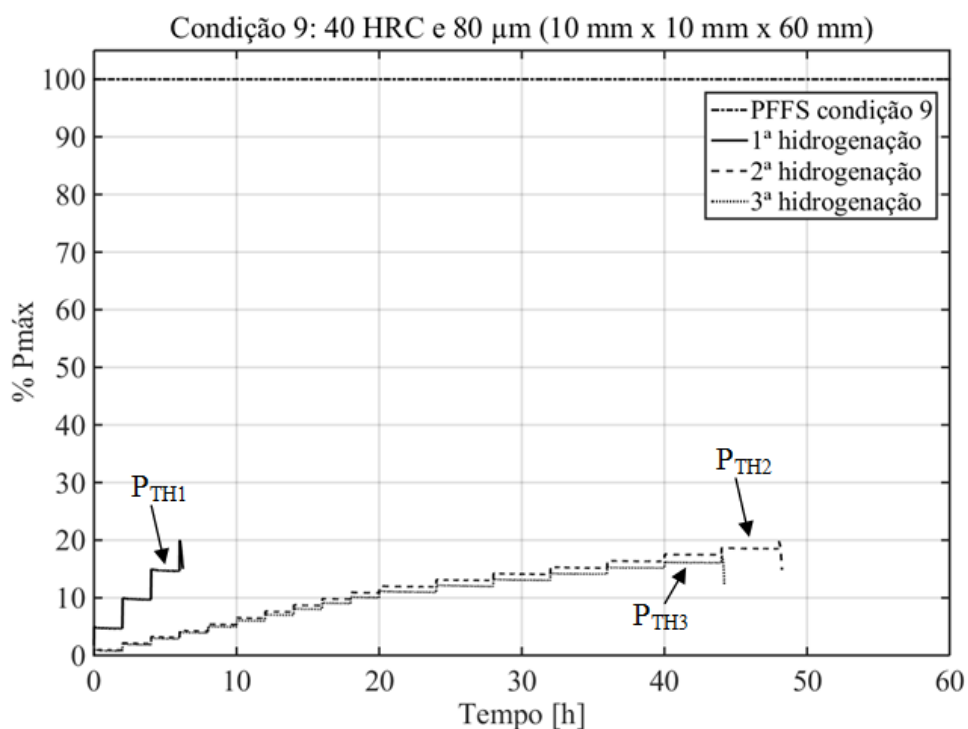


(a)

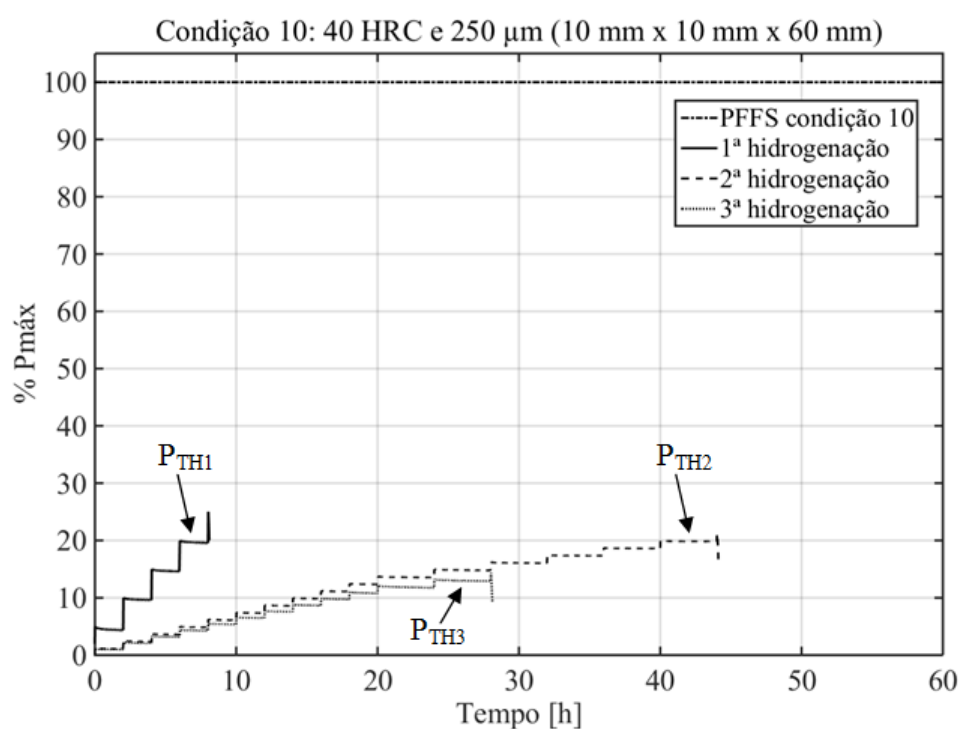


(b)

Figura 4.30: Resultados obtidos nos testes de CPPAM, para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, dureza igual a 36 HRC e raios de arredondamento do entalhe iguais a 80  $\mu\text{m}$  (Fig. 4.30a) e a 250  $\mu\text{m}$  (Fig. 4.30b)

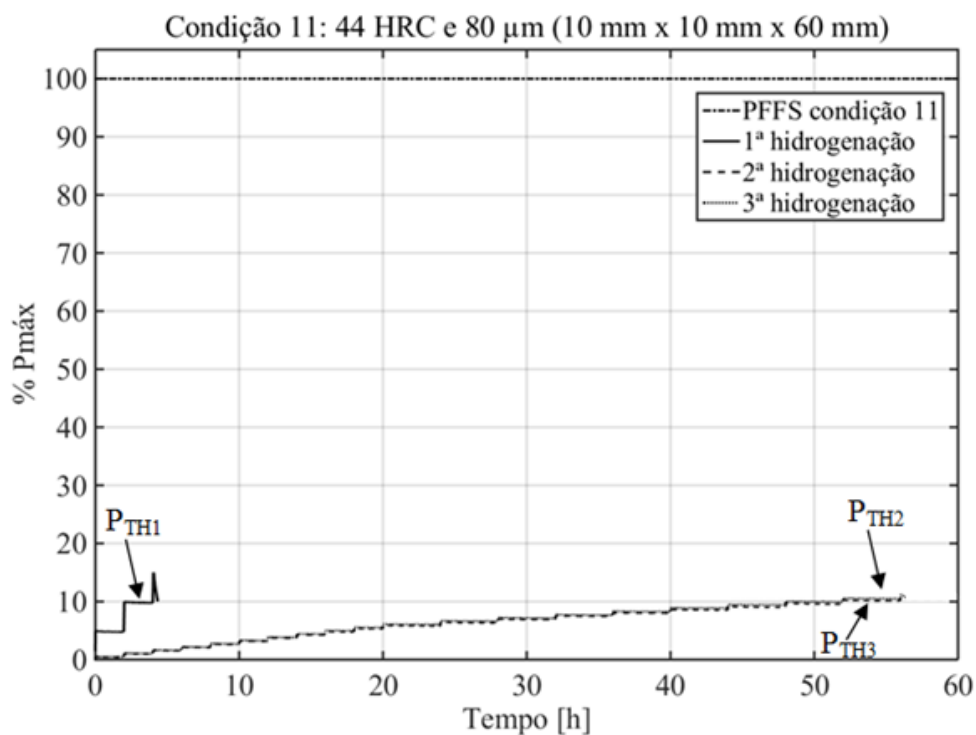


(a)

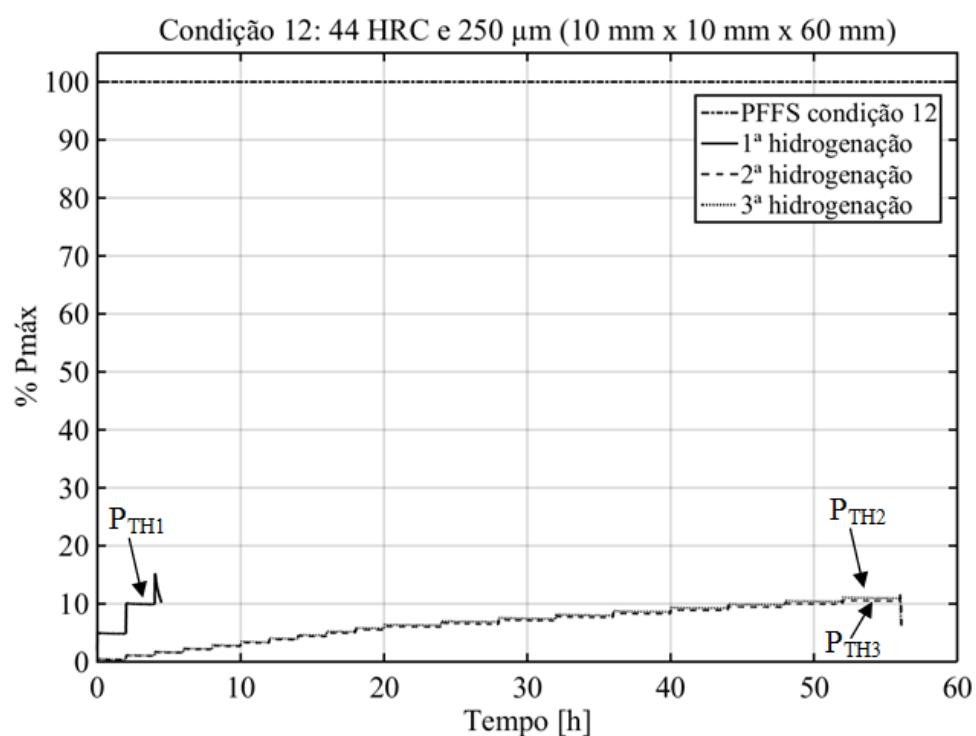


(b)

Figura 4.31: Resultados obtidos nos testes de CPPAM, para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, dureza igual a 40 HRC e raios de arredondamento do entalhe iguais a 80  $\mu\text{m}$  (Fig. 4.31a) e a 250  $\mu\text{m}$  (Fig. 4.31b)



(a)



(b)

Figura 4.32: Resultados obtidos nos testes de CPPAM, para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, dureza igual a 44 HRC e raios de arredondamento do entalhe iguais a 80  $\mu\text{m}$  (Fig. 4.32a) e a 250  $\mu\text{m}$  (Fig. 4.32b)

A Tabela 4.9 revela os resultados de força, tensão, redução percentual de força com relação ao PFFS no patamar de  $P_{TH}$  e a máxima diferença percentual entre o primeiro e o segundo teste hidrogenado e entre o segundo e o terceiro teste hidrogenado, para cada condição de teste com corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm.

Tabela 4.9: Valores de força, tensão no patamar de  $P_{TH}$  e incerteza expandida (95,45 %) dos testes hidrogenados para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm

Dureza HRC	Raio do entalhe ( $\mu\text{m}$ )	$P_{TH}$ (N)	U (N)	% PFFS	U (%) PFFS)	Tensão no $P_{TH}$ (MPa)	U (MPa)	Máxima diferença percentual
36	80	151,4	0,18	47,05	0,08	919,642	12,681	14,56 %
36	250	208,7	0,25	58,88	0,10	1293,038	17,829	13,08 %
40	80	57,23	0,08	14,72	0,03	339,445	4,671	2,43 %
40	250	54,71	0,08	13,23	0,02	337,323	4,651	6,62 %
44	80	40,26	0,09	9,83	0,03	231,375	3,187	0,34 %
44	250	44,03	0,10	9,97	0,03	271,236	3,694	0,45 %

Na Tab. 4.9, a última coluna representa a máxima diferença percentual entre as reduções de força, observada entre dois testes subsequentes, ou seja, entre o primeiro e o segundo testes hidrogenados e entre o segundo e o terceiro testes hidrogenados, para uma dada condição (seção transversal, raio do entalhe e dureza do corpo de prova constantes). Observa-se na Tab. 4.9 que para corpos de prova mais duros (44 HRC) ocorreu maiores reduções de resistência mecânica do corpo de prova, interpretadas na coluna “% PFFS”. Para um mesmo valor de dureza, identificaram-se igualmente menores valores de força e de tensão para menores valores de raio do entalhe (80  $\mu\text{m}$ ), devido à maior de concentração de tensão mecânica e de hidrogênio.

A Tabela 4.10 exibe os valores do fator de intensificação de tensão ( $K_{TH}$ ) para cada condição de teste hidrogenado que determinou o patamar de  $P_{TH}$ , para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm.

Tabela 4.10: Valores de  $K_{TH}$  para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, nos testes de CPPAM que determinaram o patamar de  $P_{TH}$

Dureza HRC	Raio do entalhe ( $\mu\text{m}$ )	$P_{TH}$ (N)	$K_{TH} (MPa \sqrt{m})$
36	80	151,4	46,097
36	250	208,7	63,541
40	80	57,23	17,429
40	250	54,71	16,657
44	80	40,26	12,243
44	250	44,03	13,407

Os resultados apresentados nas Tabs. 4.9 e 4.10 são mostrados em forma de gráfico na Fig. 4.33, para facilitar a análise visual dos mesmos. Observa-se na Fig. 4.33 que para valores de dureza mais elevados (44 HRC), foram obtidos menores valores de  $K_{TH}$  visto que forças menores foram obtidas (Tab. 4.9) e, conseqüentemente, a tensão mecânica foi menor, diminuindo o valor de  $K_{TH}$ .

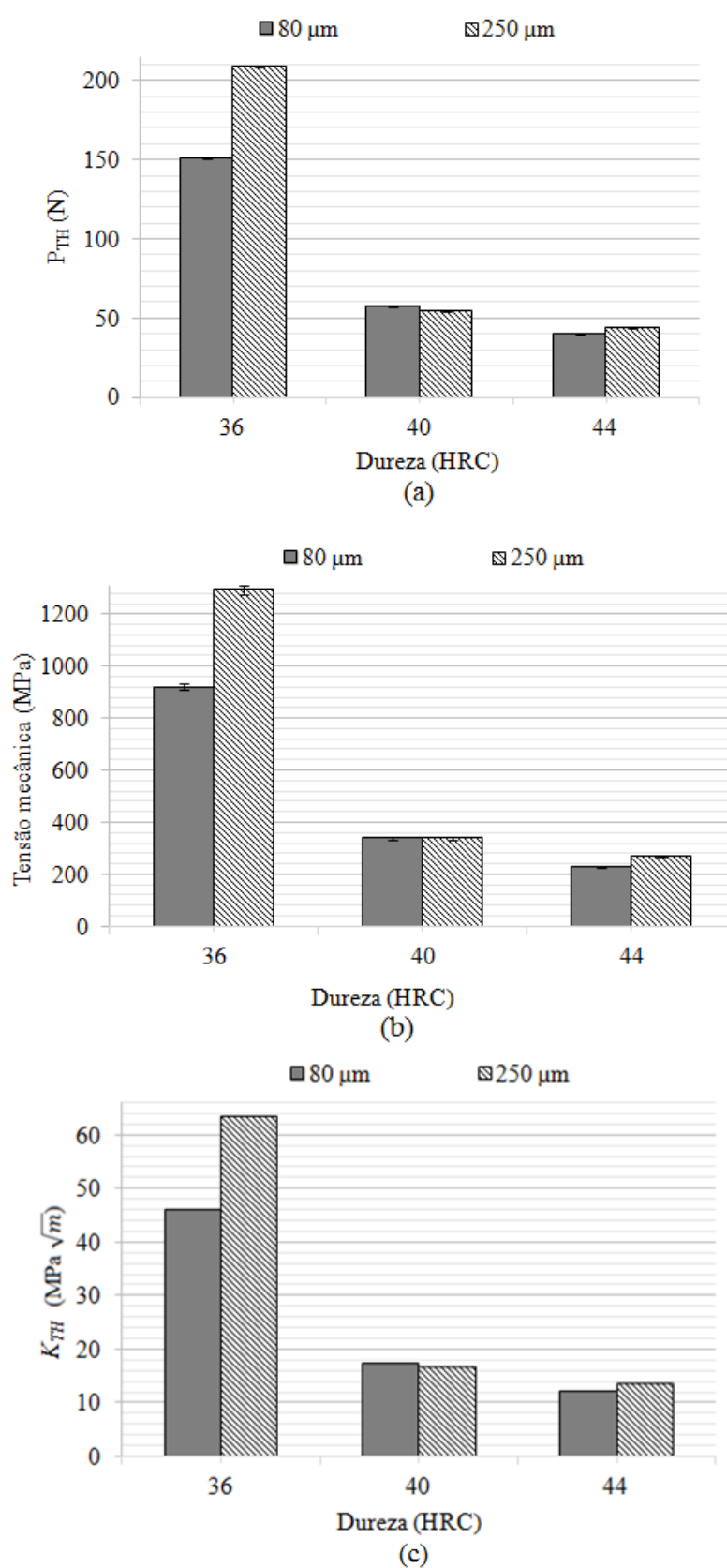


Figura 4.33: Representação gráfica das Tabs. 4.9 e 4.10 para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, no patamar de  $P_{TH}$  (a) Valores de força obtidos; (b) Valores de tensão mecânica obtidos; (c) Valores de  $K_{TH}$  calculados

Em todos os testes de CPPAM, realizados com corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm, observou-se quedas de força do tipo A (veja a Fig. 2.9).

A Figura 4.34 mostra a corrente e a tensão elétricas do teste de CPPAM de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm.

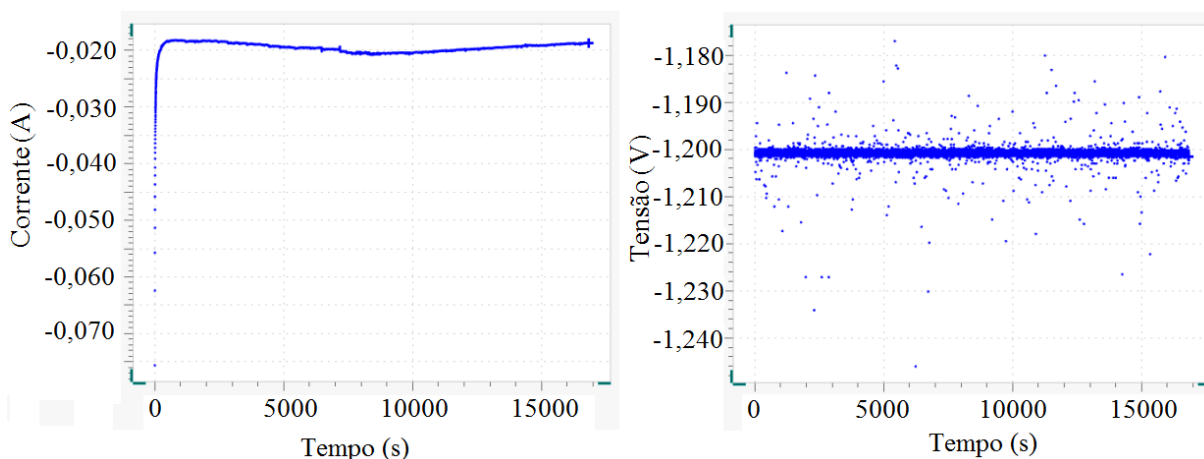


Figura 4.34: Valores de corrente e tensão elétricas obtidos no teste de CPPAM de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm

Observando-se a Fig. 4.34, verifica-se um valor de corrente elétrica média igual a 20 mA durante a cronoamperometria. Essa tendência confirmou-se em praticamente todos os testes de CPPAM de corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, em que se notou valores médios típicos de corrente elétrica iguais a 20 mA. Também é possível observar que a cronoamperometria foi realizada de forma eficaz visto que a tensão elétrica ficou praticamente constante, no valor de -1,200 V, o que maximiza a susceptibilidade por hidrogênio do aço AISI 4140.

Objetivando-se a comparação da definição de patamar de  $P_{TH}$  nos testes hidrogenados deste trabalho com a metodologia apresentada em Souza (2018) para estimação do patamar de  $P_{TH}$ , aplicou-se o método, detalhado no Apêndice XIII, nos testes de CPPAM. Como era de se esperar devido à análise visual das curvas de testes de CPPAM desta dissertação, que não deixam nenhuma dúvida quanto ao patamar efetivo de  $P_{TH}$ , em todos os testes houve coerência entre os patamares de  $P_{TH}$  considerados anteriormente à aplicação do método e após a interpretação dos gráficos do método. Vale lembrar que utilizar o método no caso do aço AISI 4140 é totalmente desnecessário, visto que as curvas de força dos testes de CPPAM podem ser analisadas visualmente, sem a adoção de métodos matemáticos. Ao que tudo



indica, não são percebidos patamares de força em que ocorre escoamento e que poderiam prejudicar a análise visual das curvas de força dos testes. A Figura 4.35 ilustra o gráfico obtido para um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, raio do entalhe igual a 80  $\mu\text{m}$  e dureza igual a 36 HRC.

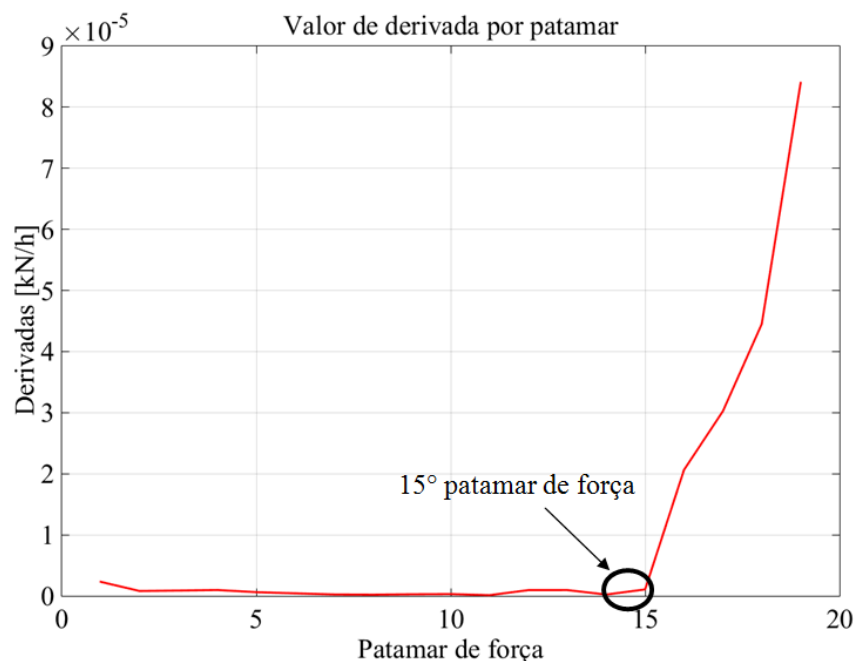


Figura 4.35: Valores de derivada calculados para cada patamar de teste de CPPAM, para um corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, raio do entalhe igual a 80  $\mu\text{m}$  e dureza igual a 36 HRC

Infere-se da Fig. 4.35 que o valor de derivada aumenta consideravelmente a partir do 16º patamar de força. Assim sendo, o 15º patamar de força corresponde ao  $P_{TH}$  do teste em questão. No Apêndice XIII encontram-se três outros gráficos construídos para análise do patamar de  $P_{TH}$  e não apresentados por Souza (2018).

#### 4.5. Resultados da análise dos corpos de prova no microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Neste item são apresentados os resultados, obtidos no MEV, da análise do efeito do lixamento na raiz do entalhe dos corpos de prova, além dos resultados da análise da espessura da camada refundida na raiz do entalhe, oriunda do processo de eletroerosão a fio. São

igualmente mostrados os resultados da análise dos mecanismos de fratura dos corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, para cada condição de teste.

#### *4.5.1. Resultados da análise do efeito do lixamento na raiz do entalhe dos corpos de prova*

A Figura 4.36 mostra a imagem realizada no MEV da superfície da raiz de um entalhe não lixado, com raio igual a 250  $\mu\text{m}$  e comprimento igual a 30 mm.

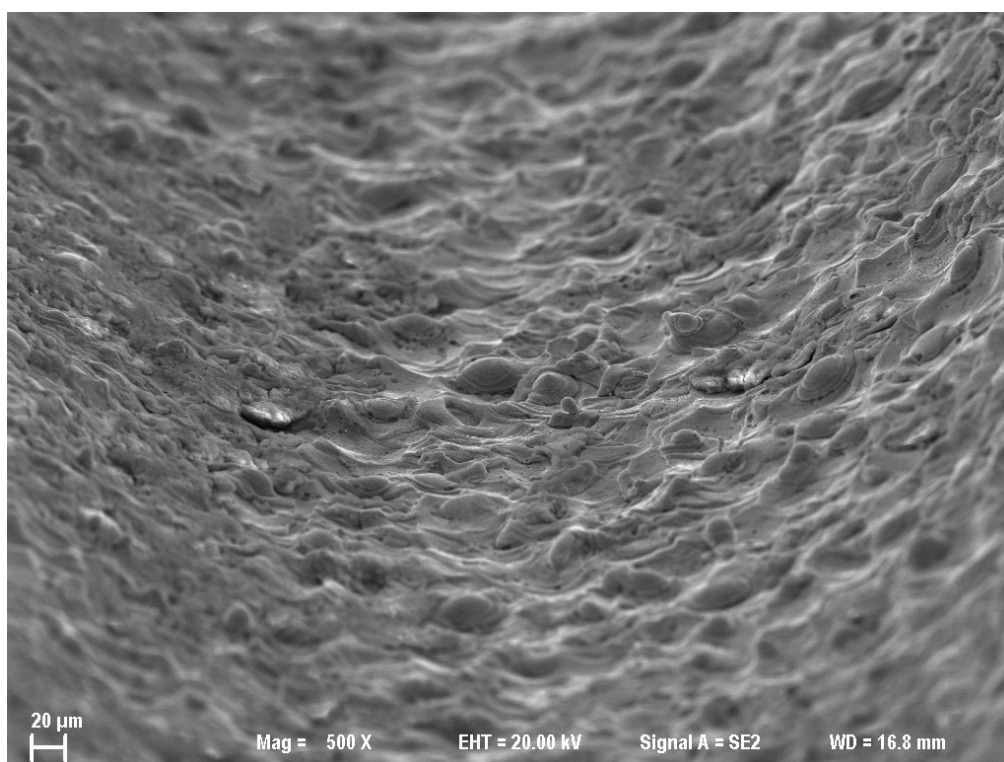


Figura 4.36: Imagem realizada no MEV da superfície da raiz não lixada de um entalhe, com comprimento igual a 30 mm e raio igual a 250  $\mu\text{m}$

Observando-se a Fig. 4.36, percebe-se que a superfície da raiz do entalhe fabricado pelo processo de eletroerosão a fio contém picos e asperidades, responsáveis pela elevada rugosidade da mesma, da ordem de  $R_q = 1,45 \mu\text{m}$ .

A Figura 4.37 ilustra a imagem realizada no MEV da superfície da raiz do entalhe da Fig. 4.35, mas após a realização da operação de lixamento da raiz do entalhe, desenvolvida no contexto desta dissertação e detalhada no Apêndice II. A rugosidade  $R_q$  da raiz do entalhe foi igual a 0,23  $\mu\text{m}$ .

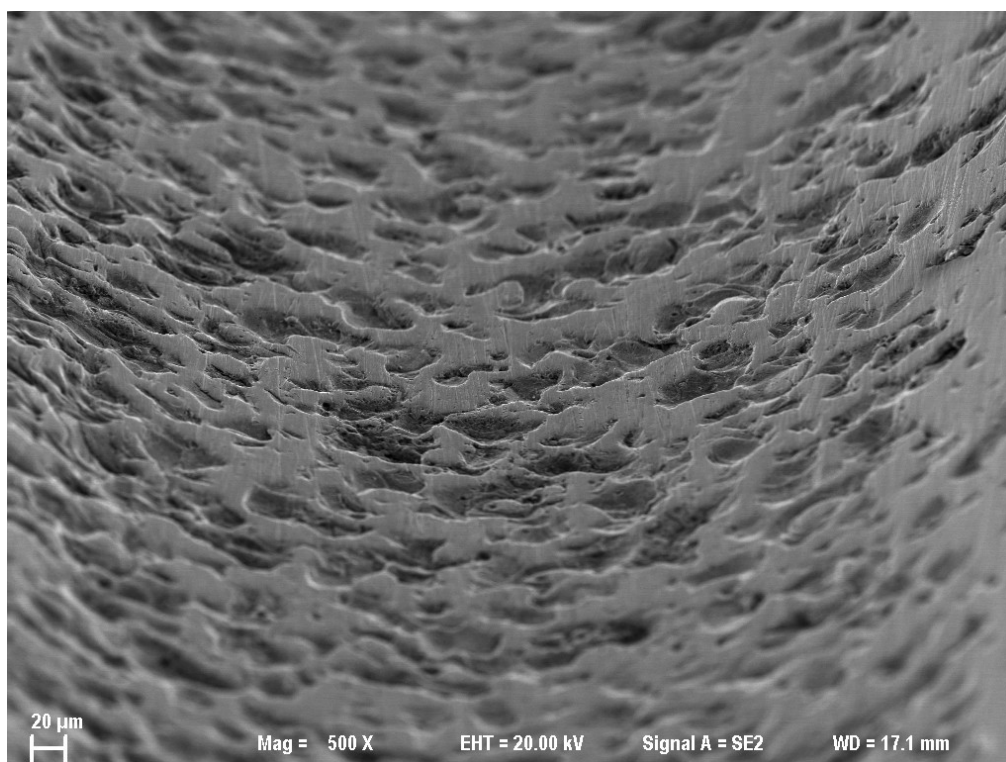


Figura 4.37: Imagem realizada no MEV da superfície da raiz lixada de um entalhe, com comprimento igual a 30 mm e raio igual a 250  $\mu\text{m}$

Observando a Fig. 4.37, percebe-se que o processo de lixamento da raiz do entalhe removeu apenas os picos de material.

#### *4.5.2. Resultados da análise de camada refundida*

A Figura 4.38 ilustra a imagem obtida no MEV, com as cinco medições efetuadas na raiz não lixada do entalhe, visando identificar a camada refundida bem como quantificá-la.

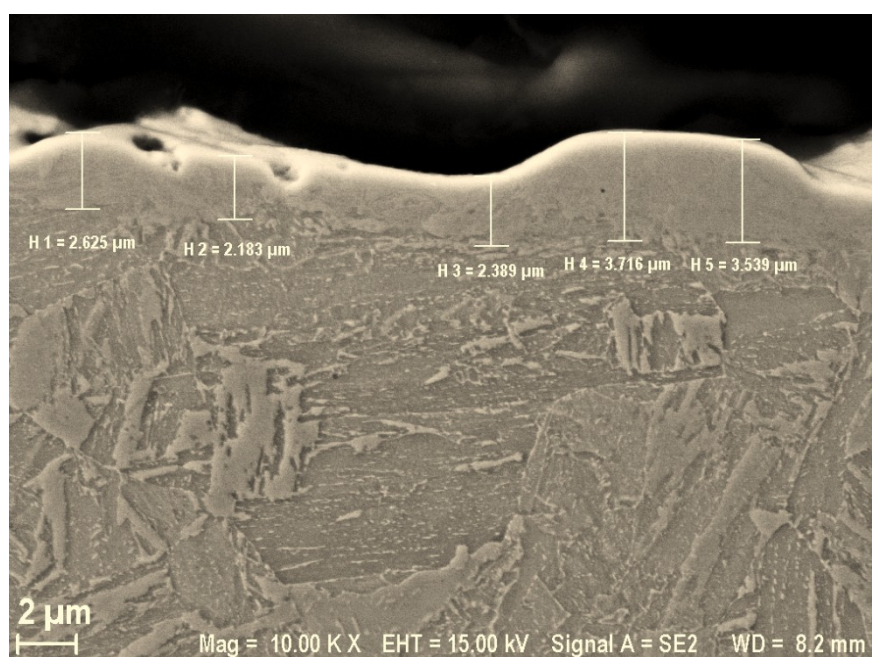


Figura 4.38: Imagem da medição realizada no MEV, na raiz não lixada do entalhe de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm e raio do entalhe igual a 250  $\mu\text{m}$

Na Fig. 4.38 é possível observar a existência de uma camada refundida muito fina em tom mais claro na imagem. O valor médio da espessura da camada refundida foi igual a 2,89  $\mu\text{m}$  com desvio padrão igual a 0,69  $\mu\text{m}$ , o que impossibilitou a realização de testes de microdureza e nanodureza na amostra.

#### *4.5.3. Resultados da análise dos mecanismos de fratura dos corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm*

A Figura 4.39 ilustra a imagem realizada no MEV do mecanismo de fratura de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, dureza igual a 36 HRC e raio do entalhe igual a 250  $\mu\text{m}$ , após a realização do teste de determinação do valor de PFFS.

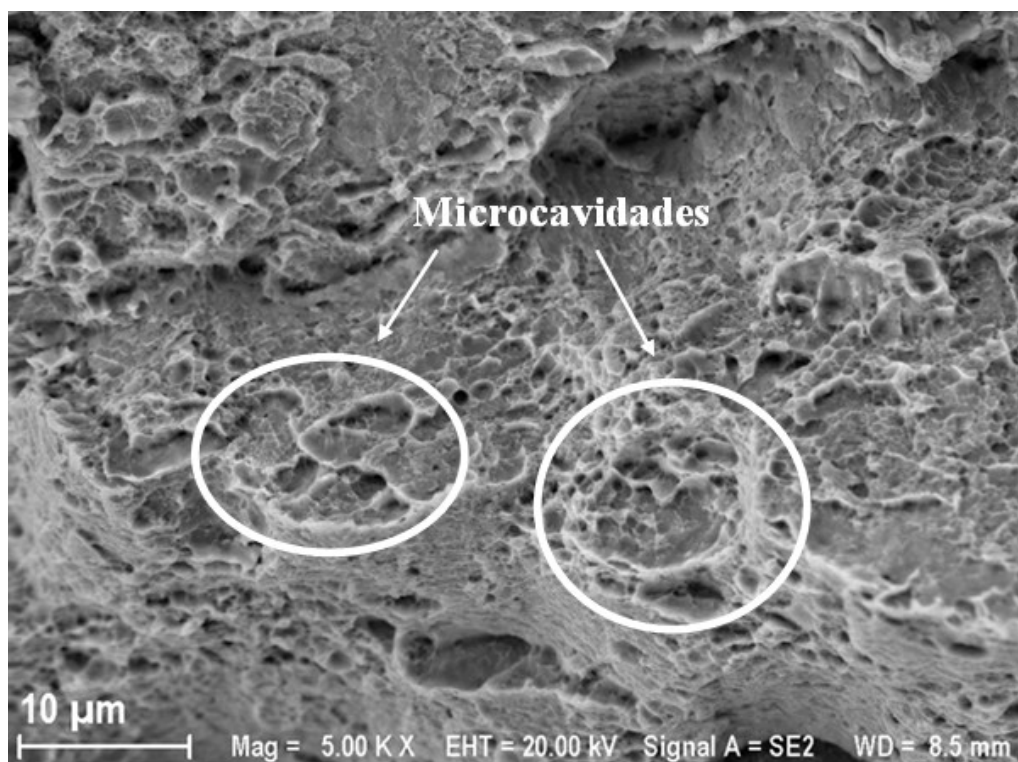


Figura 4.39: Imagem realizada no MEV do mecanismo de fratura de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, dureza igual a 36 HRC e raio do entalhe igual a 250 μm, após teste de determinação do valor de PFFS

A Figura 4.39 mostra que a fratura tem característica predominantemente dúctil, com a presença de *dimples* ou microcavidades. Esse padrão foi observado em todas as fraturas de corpos de prova que foram testados para determinação do valor de PFFS e por essa razão não serão reproduzidos nesta dissertação.

A Figura 4.40 mostra a imagem realizada no MEV do mecanismo de fratura de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, dureza igual a 44 HRC e raio do entalhe igual a 80 μm, após a realização de um teste de CPPAM.

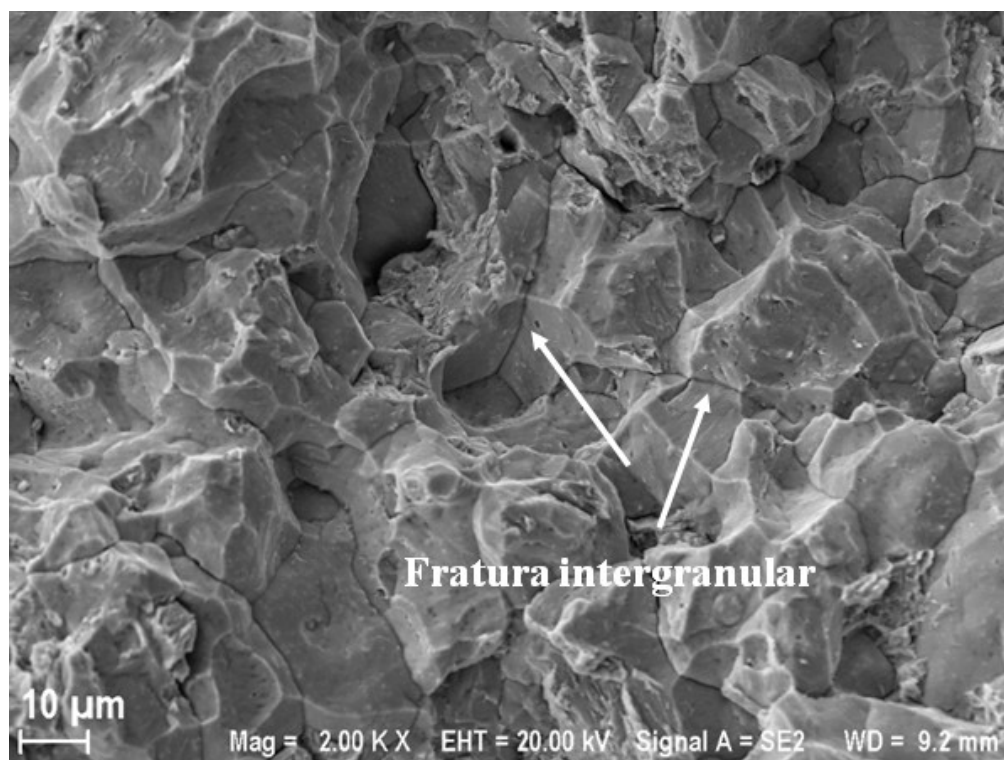


Figura 4.40: Imagem realizada no MEV do mecanismo de fratura de um corpo de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, dureza igual a 44 HRC e raio do entalhe igual a 80  $\mu$ m, após teste de CPPAM

Observando a Fig. 4.40, percebe-se que a fratura tem característica predominantemente frágil, com a presença de fratura intergranular. A penetração do hidrogênio na microestrutura do material o fragilizou, alterando o padrão de fratura do corpo de prova. Esse padrão foi observado em todas as fraturas de corpos de prova que foram testados com CPPAM e por essa razão não serão reproduzidos nesta dissertação.

#### 4.6. Resultados da análise de variância (ANOVA)

Neste tópico são apresentados os resultados de ANOVA para os testes de determinação do valor de PFFS com carregamento contínuo e para os testes de CPPAM.

##### 4.6.1. Resultados da análise de variância para testes de determinação do valor de PFFS

Os resultados da ANOVA completa para os testes de determinação do valor de PFFS e obtidos com o auxílio do programa STATISTICA encontram-se na Tab. 4.11. Foi

considerado um nível de confiabilidade estatística igual a 95 %. A variável de saída considerada foi igual à força máxima (PFFS), em N, obtida nos testes com carregamento contínuo ao ar, para cada uma das doze condições do planejamento experimental.

Tabela 4.11: Resultados da ANOVA completa para os testes de determinação do valor de PFFS, com confiabilidade estatística igual a 95 %

Fator	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	<i>F</i>	<i>p</i>	Efeito
<b>Seção</b>	<b>732345502</b>	<b>1</b>	<b>732345502</b>	<b>2541,097</b>	<b>0,000393</b>	<b>15624,19</b>
Raio	554166	1	554166	1,923	0,299881	429,79
Dureza (linear)	1307112	1	1307112	4,535	0,166948	808,43
Dureza (quadrático)	3402	1	3402	0,012	0,923399	-35,72
Seção x raio	474433	1	474433	1,646	0,328076	397,67
Seção x dureza (linear)	1039025	1	1039025	3,605	0,198009	720,77
Seção x dureza (quadrático)	9167	1	9167	0,032	0,874879	-58,63
Raio x dureza (linear)	443149	1	443149	1,538	0,340719	470,72
Raio x dureza (quadrático)	132837	1	132837	0,461	0,567223	-223,19
Erro	576401	2	288201			
Total	736885194	11				

A partir da Tab. 4.11 conclui-se que, para uma confiabilidade estatística de 95 %, o fator seção transversal do corpo de prova provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores de PFFS. Visto que o equipamento foi originalmente projetado para realização de testes em corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, ao que tudo indica, a configuração adaptada para realização de testes em corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm apresentará fatores ou interação entre fatores com efeitos estatisticamente significativos, com confiabilidade estatística igual a 95 %.

O modelo completo do sistema foi determinado por meio de uma regressão múltipla, expresso na Eq. (4.1). O coeficiente de determinação  $R^2$  do modelo foi igual a 0,9641, o que

indica que 96,41 % da variabilidade dos valores de PFFS é explicada pelo modelo proposto. Cabe ressaltar que o valor de  $R^2$  é usado como medida descritiva para avaliar o ajuste do modelo para os dados e que um valor elevado de  $R^2$  (próximo de 1) não implica que os dados estão bem ajustados pelo modelo.

$$\begin{aligned} PFFS = & 8177,99 + 7773,01 x_1 + 66,11 x_2 + 404,21 x_3 + \\ & + 35,72 x_3^2 + 198,84 x_1 x_2 + 360,39 x_1 x_3 + 58,63 x_1 x_3^2 + \\ & + 235,36 x_2 x_3 + 223,19 x_2 x_3^2 + \varepsilon \end{aligned} \quad (4.1)$$

Em que  $\varepsilon$  representa os resíduos e  $x_1, x_2$  e  $x_3$  são variáveis codificadas dadas pelas Eqs. (4.2) a (4.4).

$$x_1 = \frac{\text{seção (mm)} - 20}{10} \quad (4.2)$$

$$x_2 = \frac{\text{raio } (\mu\text{m}) - 165}{85} \quad (4.3)$$

$$x_3 = \frac{\text{dureza (HRC)} - 40}{4} \quad (4.4)$$

A Figura 4.41 exibe a distribuição dos resíduos em função do valor observado de força, para o quadro completo de ANOVA dos testes de determinação do valor de PFFS. Por sua vez, a Fig. 4.42 mostra a distribuição dos resíduos em função do valor predito de força.



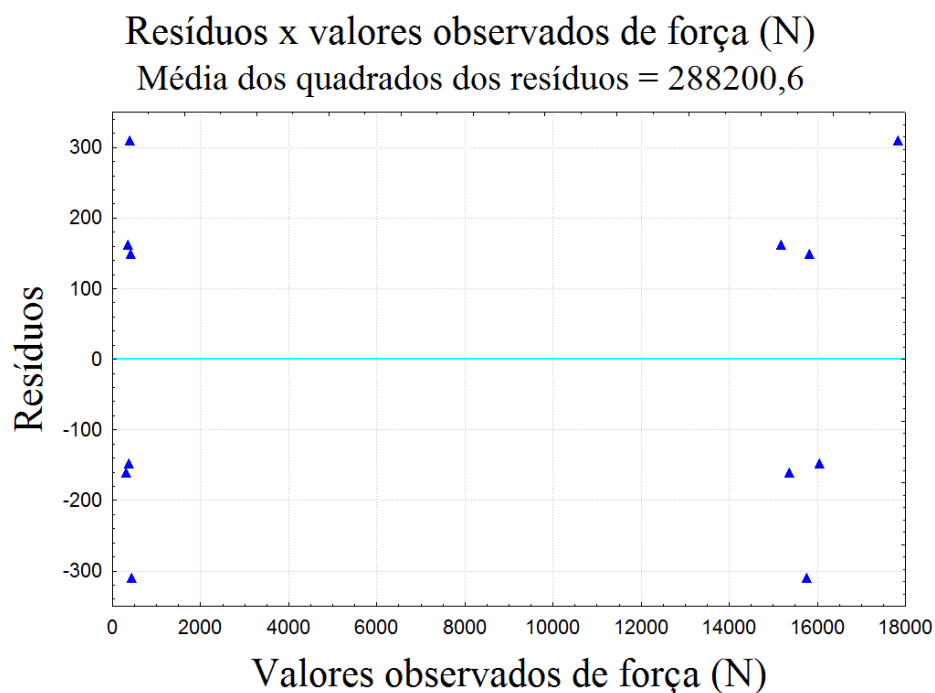


Figura 4.41: Gráfico de resíduos x valores observados de força, para o teste de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm

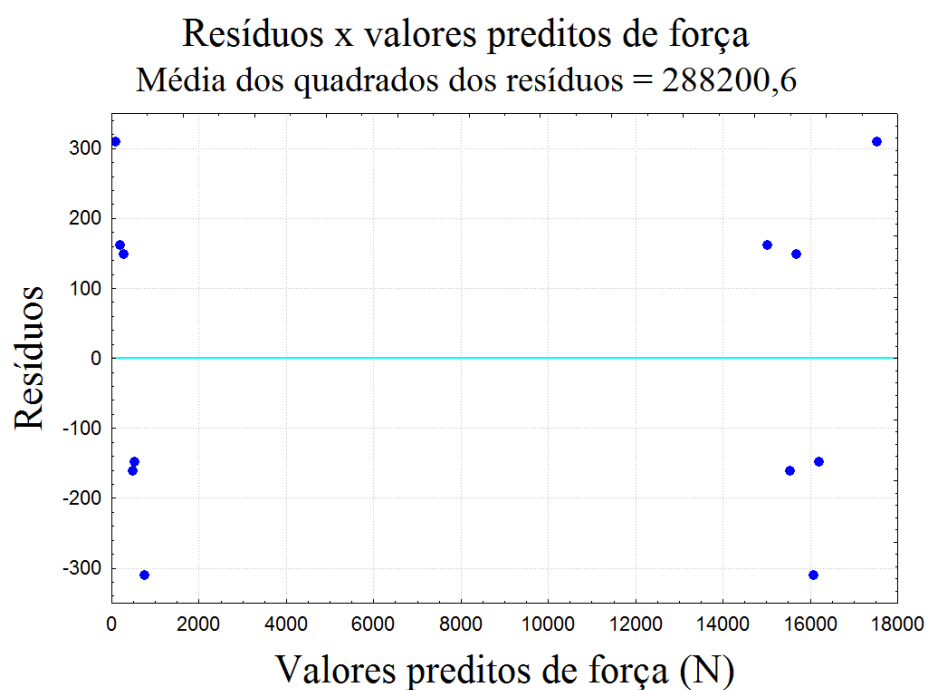


Figura 4.42: Gráfico de resíduos x valores preditos de força, para o teste de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm

Os resíduos estão distribuídos aleatoriamente em torno de zero em função do valor observado de força (Fig. 4.41), bem como em função dos valores preditos de força (Fig. 4.42).

O resultado deste teste de normalidade dos resíduos utilizando-se de um gráfico de probabilidade normal é apresentado na Fig. 4.43.

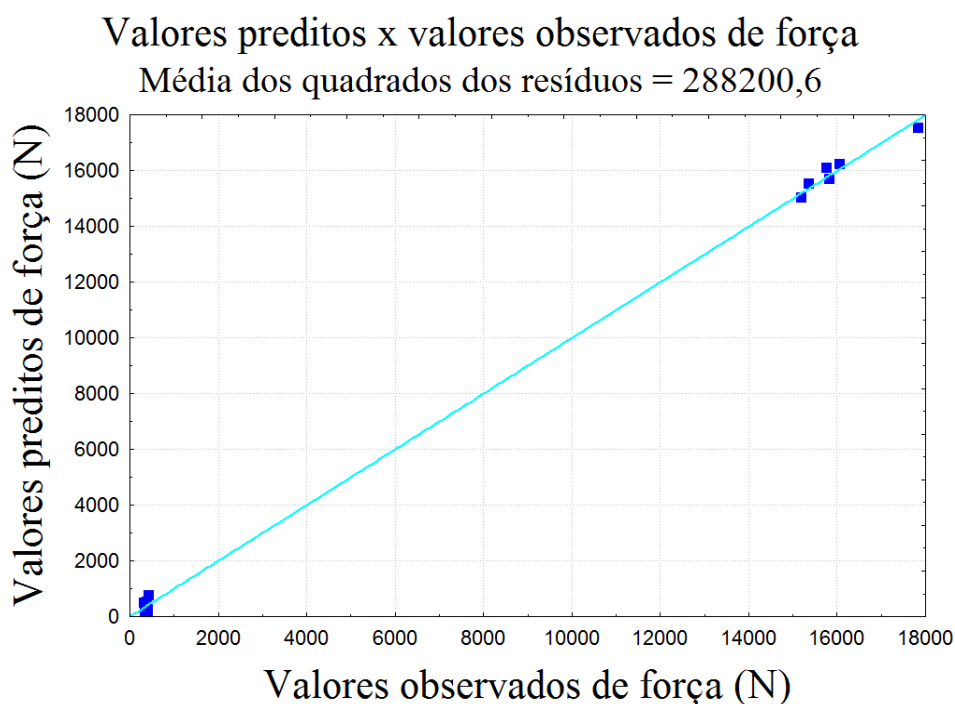


Figura 4.43: Gráfico de valores preditos x valores observados de força, para o teste de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm

Pode-se observar na Fig. 4.43 que os valores dos resíduos se encontram sobre a reta teórica ou muito próximos desta, indicando que a hipótese de normalidade da distribuição foi satisfeita.

Visando a obtenção de um quadro de ANOVA reduzido que exprima apenas o efeito dos fatores estatisticamente significativos na determinação do valor de PFFS, os efeitos não significativos foram eliminados um a um da Tab. 4.11, a partir daqueles menos significativos. Os resultados de ANOVA apenas com os efeitos significativos na determinação do valor de PFFS encontram-se na Tab. 4.12.

Tabela 4.12: Resultados da ANOVA reduzida para os testes de determinação do valor de PFFS, com confiabilidade estatística igual a 95 %

Fator	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	<i>F</i>	<i>p</i>	Efeito
<b>Seção</b>	<b>732345502</b>	<b>1</b>	<b>732345502</b>	<b>1613,205</b>	<b>0,00005</b>	<b>15624,19</b>
Erro	4539692	10	453969,2			
Total	736885194	11				

Infere-se da Tab. 4.12 que, ao avaliar a significância estatística dos testes de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm, apenas a seção transversal é significativa, com confiabilidade estatística de 95 %, confirmando os resultados da Tab. 4.11.

No quadro completo de ANOVA (Tab. 4.11), observou-se que o efeito da seção transversal do corpo de prova na força máxima, obtida nos testes de determinação do valor de PFFS, foi consideravelmente maior do que os outros efeitos. Para analisar, com confiabilidade estatística igual a 95 %, a significância dos efeitos dos fatores raio do entalhe e dureza, no valor de PFFS determinado para cada valor de seção transversal, foram realizadas duas análises de variância, uma para cada seção transversal. Os resultados da ANOVA apenas com corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm são mostrados na Tab. 4.13.

Tabela 4.13: Resultados da ANOVA para os testes de determinação do valor de PFFS para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, com confiabilidade estatística igual a 95 %

Fator	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	<i>F</i>	<i>p</i>	Efeito
Raio	1027052	1	1027052	3,8698	0,2994	827,47
Dureza (linear)	2338453	1	2338453	4,4279	0,2068	1529,20
Dureza (quadrático)	11869	1	11869	0,0447	0,8673	-94,35
Raio x dureza (linear)	886987	1	886987	3,3421	0,3186	941,80
Erro	265400	1	265400			
Total	4529760	5				

A partir da Tab. 4.13 conclui-se que, para uma confiabilidade estatística igual a 95 %, nem o raio do entalhe nem a dureza do corpo de prova provocaram efeitos estatisticamente significativos, na determinação do valor de PFFS para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm. O fato do entalhe de tais corpos de prova possuir exatamente as mesmas características nominais (profundidade, ângulo de abertura, rugosidade) dos entalhes dos corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, resulta que a seção líquida nominal do corpo de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm represente 88 % do valor de seção bruta nominal do mesmo. Dessa forma, ao que tudo indica a presença do entalhe nestes corpos de prova não favoreceu, com 95 % de confiabilidade estatística, a determinação do valor de PFFS, independentemente da dureza e do raio do entalhe avaliados.

A Tabela 4.14 apresenta os resultados da ANOVA para os testes de determinação de PFFS, apenas com corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, com confiabilidade estatística igual a 95 %.

Tabela 4.14: Resultados da ANOVA para os testes de determinação do valor de PFFS para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, com confiabilidade estatística igual a 95 %

Fator	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	<i>F</i>	<i>p</i>	Efeito
<b>Raio</b>	<b>1547,509</b>	<b>1</b>	<b>1547,509</b>	<b>21797,7</b>	<b>0,0043</b>	<b>32,1197</b>
<b>Dureza (linear)</b>	<b>7683,574</b>	<b>1</b>	<b>7683,574</b>	<b>108228,4</b>	<b>0,0019</b>	<b>87,6560</b>
<b>Dureza (quadrático)</b>	<b>700,062</b>	<b>1</b>	<b>700,062</b>	<b>9860,9</b>	<b>0,0064</b>	<b>22,9139</b>
Raio x dureza (linear)	0,134	1	0,134	1,9	0,4005	-0,3661
Erro	0,071	1	0,071			
Total	9931,351	5				

A partir da Tab. 4.14 conclui-se que, para uma confiabilidade estatística igual a 95 %, os fatores raio do entalhe e dureza do corpo de prova tiveram efeitos estatisticamente significativos, na determinação do valor de PFFS para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm. A seção líquida nominal do corpo de prova representa 64 % do valor da seção bruta nominal do mesmo, portanto, nesta condição o entalhe teve efeito

estatisticamente significativo na determinação do valor de PFFS, maximizando a influência da dureza do corpo de prova.

#### 4.6.2. Resultados da análise de variância para testes de CPPAM

Os resultados da ANOVA para os testes de CPPAM, obtidos com o auxílio do programa STATISTICA, encontram-se na Tab. 4.15. Foi considerado um nível de confiabilidade estatística igual a 95 %. A variável de saída considerada foi igual à redução de força percentual, no patamar de  $P_{TH}$ , com relação ao PFFS para cada uma das doze condições do planejamento experimental.

Tabela 4.15: Resultados da ANOVA completa para a redução percentual de força devido à fragilização por hidrogênio, com confiabilidade estatística igual a 95 %

Fator	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	<i>F</i>	<i>p</i>	Efeito
Seção	41,033	1	41,033	4,1084	0,1799	-3,6983
Raio	58,830	1	58,830	5,8904	0,1359	4,4283
<b>Dureza (linear)</b>	<b>2101,140</b>	<b>1</b>	<b>2101,140</b>	<b>210,3765</b>	<b>0,0047</b>	<b>-32,4125</b>
<b>Dureza (quadrático)</b>	<b>185,760</b>	<b>1</b>	<b>185,760</b>	<b>18,5992</b>	<b>0,0499</b>	<b>-8,3463</b>
Seção x raio	2,623	1	2,623	0,2626	0,6593	0,9350
<b>Seção x dureza (linear)</b>	<b>226,952</b>	<b>1</b>	<b>226,952</b>	<b>22,7235</b>	<b>0,0413</b>	<b>10,6525</b>
<b>Seção x dureza (quadrático)</b>	<b>221,373</b>	<b>1</b>	<b>221,373</b>	<b>22,1650</b>	<b>0,0422</b>	<b>9,1112</b>
Raio x dureza (linear)	50,552	1	50,552	5,0615	0,1533	-5,0275
Raio x dureza (quadrático)	3,190	1	3,190	0,3194	0,6289	-1,0938
Erro	19,975	2	9,988			
Total	2911,427	11				

O objetivo desta ANOVA era determinar se o efeito dos fatores ou a interação entre eles são significativos, com relação à fragilização por hidrogênio simbolizada pela maior queda percentual de força (patamar de  $P_{TH}$ ), observada nos três testes de CPPAM de cada condição.

A partir da Tab. 4.15 se conclui que, para uma confiabilidade estatística de 95 % os fatores dureza do corpo de prova, bem como a interação entre dureza e seção transversal do corpo de prova provocaram efeitos estatisticamente significativos nos valores de redução de força percentual, no patamar de  $P_{TH}$ , com relação ao PFFS. A análise de variância reduzida (eliminando-se os fatores não-significativos um a um) foi igualmente realizada e os resultados da Tab. 4.15 foram confirmados. Para corpos de prova que apresentam durezas mais elevadas a capacidade de se deformar plasticamente é menor e, conseqüentemente, a capacidade de absorção das tensões mecânicas geradas pela penetração do hidrogênio na microestrutura do material tende a diminuir. A microestrutura dos corpos de prova com dureza mais elevada tende a ser mais desorganizada e com maior presença de discordâncias, o que minimiza o movimento das mesmas por empilhamento de discordâncias. Ao penetrar na microestrutura do aço, o hidrogênio introduz tensões internas que resultam em pontos concentradores de tensão, que agem como facilitadores da nucleação da trinca de hidrogênio.

O modelo completo do sistema foi determinado por meio de uma regressão múltipla, expresso na Eq. (4.5). O coeficiente de determinação  $R^2$  do modelo foi igual a 0,9622. O modelo se ajusta a 96,22 % dos dados, o que indica excelente ajuste do modelo aos dados. Em outras palavras, 96,22 % da variabilidade da queda percentual de força podem ser estimadas pelo modelo.

$$\begin{aligned} \% FFS = & 18,2000 + 4,2250 \cdot x_1 + 1,4850 \cdot x_2 - 16,2063 \cdot x_3 + \\ & + 8,3463 \cdot x_3^2 + 0,4675 \cdot x_1 \cdot x_2 + 5,3262 \cdot x_1 \cdot x_3 - \\ & - 9,1113 \cdot x_1 \cdot x_3^2 - 2,5138 \cdot x_2 \cdot x_3 + 1,0938 \cdot x_2 \cdot x_3^2 + \varepsilon \end{aligned} \quad (4.5)$$

Em que  $\varepsilon$  representa os resíduos e  $x_1, x_2$  e  $x_3$  são variáveis codificadas dadas pelas Eqs. (4.2) a (4.4).

A Figura 4.44 mostra a distribuição dos resíduos em função do valor observado de redução de força (%), para o quadro completo de ANOVA dos testes de CPPAM. Por sua vez, a Fig. 4.45 mostra a distribuição dos resíduos em função do valor predito de redução de força (%).

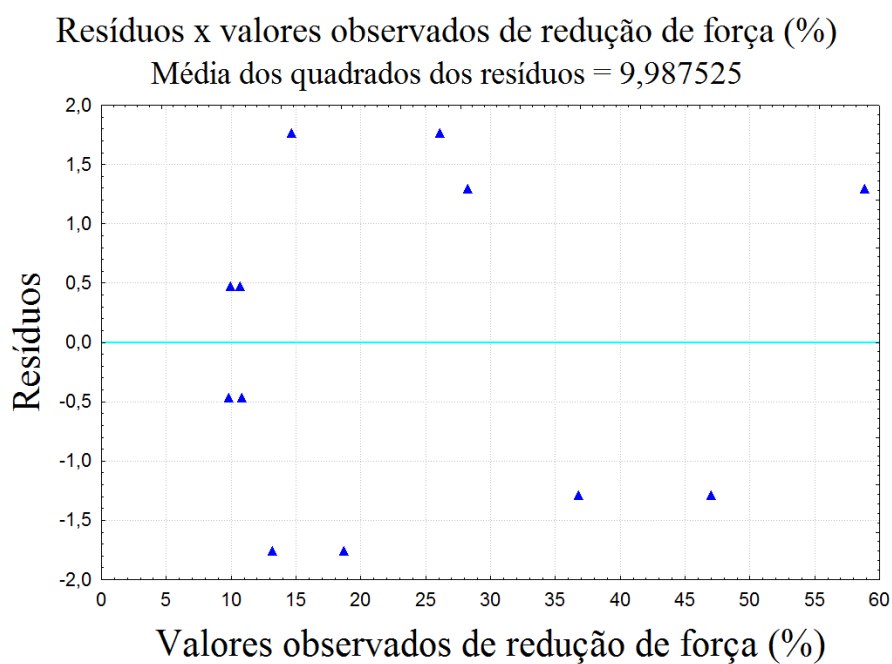


Figura 4.44: Gráfico de resíduos x valores observados de redução de força (%), para os testes de CPPAM para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm

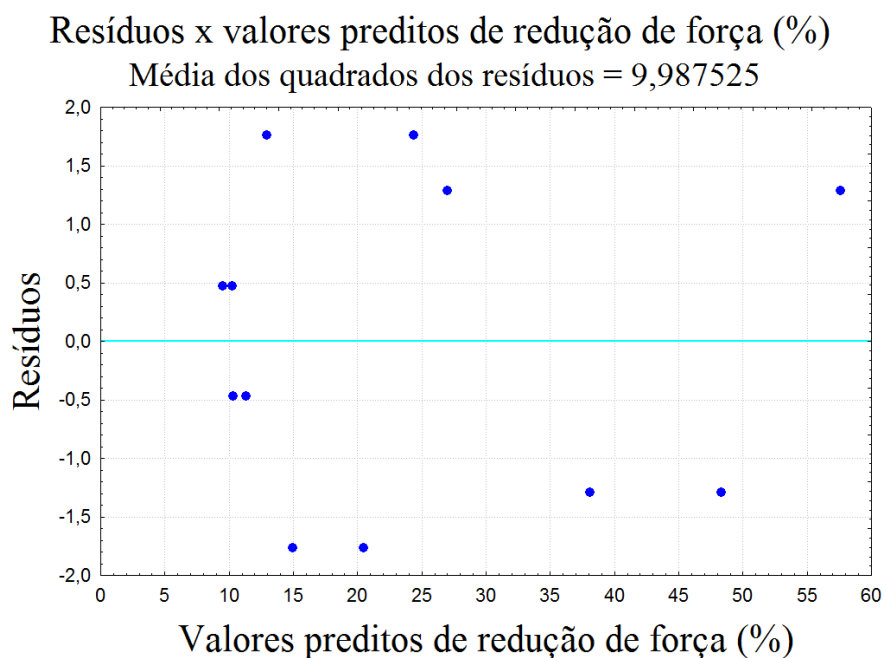


Figura 4.45: Gráfico de resíduos x valores preditos de redução de força (%), para os testes de CPPAM para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm

Os resíduos estão distribuídos aleatoriamente em torno de zero em função do valor observado de redução de força (%) (Fig. 4.44), bem como em função dos valores preditos de redução de força, em porcentagem (Fig. 4.45).

O resultado deste teste de normalidade dos resíduos utilizando-se de um gráfico de probabilidade normal é apresentado na Fig. 4.46.

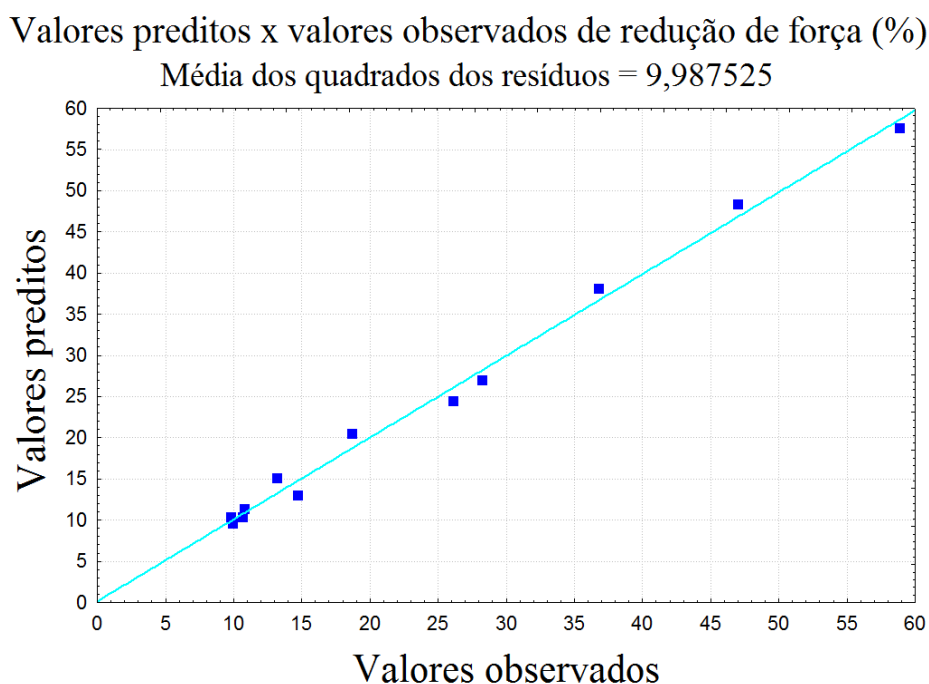


Figura 4.46: Gráfico de valores preditos x valores observados de redução de força (%), para os testes de CPPAM para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm

Pode-se observar na Fig. 4.46 que os valores dos resíduos se encontram sobre a reta teórica ou muito próximos desta, sendo indicativo de que a hipótese de normalidade da distribuição pode ser aceita.

Visando a obtenção de um quadro de ANOVA reduzido (que contenha apenas fatores com efeitos significativos) que exprima o valor de queda percentual de força, em relação ao PFFS, com relação aos testes de CPPAM efetuados neste trabalho, os efeitos não significativos foram eliminados um a um da Tab. 4.15, a partir daqueles menos significativos. Os resultados de ANOVA apenas com os efeitos significativos encontram-se na Tab. 4.16.



Tabela 4.16: Resultados da ANOVA reduzida para a redução percentual de força devido à fragilização por hidrogênio, com confiabilidade estatística igual a 95 %

Fator	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	<i>F</i>	<i>p</i>	Efeito
<b>Dureza (linear)</b>	<b>2101,140</b>	<b>1</b>	<b>2101,140</b>	<b>83,4719</b>	<b>0,00004</b>	<b>-32,4125</b>
<b>Dureza (quadrático)</b>	<b>185,760</b>	<b>1</b>	<b>185,760</b>	<b>7,3796</b>	<b>0,02991</b>	<b>-8,3463</b>
<b>Seção x dureza (linear)</b>	<b>226,952</b>	<b>1</b>	<b>226,952</b>	<b>9,0161</b>	<b>0,01986</b>	<b>10,6525</b>
<b>Seção x dureza (quadrático)</b>	<b>221,373</b>	<b>1</b>	<b>221,373</b>	<b>8,7945</b>	<b>0,02094</b>	<b>9,1112</b>
Erro	176,203	7	25,172			
Total	2911,427	11				

Infere-se da Tab. 4.16 que, ao avaliar a significância estatística dos valores de redução de força, nos testes de CPPAM para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm, apenas a dureza do corpo de prova e a interação entre seção transversal e dureza são significativas, com confiabilidade estatística de 95 %, confirmando os resultados da Tab. 4.15.

#### 4.7. Resultados do teste R&r

Os resultados do teste R&r para avaliar a repetibilidade e da reprodutibilidade do RSL 2 encontram-se na Tab. 4.17.

Tabela 4.17: Resultados do teste R&r para os testes de determinação do valor de PFFS, para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm e a 10 mm x 10 mm

Repetibilidade ( <i>Equipment Variation</i> - EV)	5,61
% EV	0,11
Reprodutibilidade ( <i>Appraiser Variation</i> - AV)	303,90
% AV	6,17
PV ( <i>Part Variation</i> )	4915,15
% PV	99,81
TV ( <i>Total Variation</i> )	4924,54
ndc	22,80
Número de peças	12
Número de operadores	2
Número de medições por peça	3
GR&r	303,95
% GR&r	6,17

Conclui-se da Tab. 4.17 que o valor percentual do parâmetro % GR&r foi igual a 6,17 %, indicando a aceitabilidade do desempenho do RSL 2, visto que o valor foi menor do que 10 %. O valor do número de categorias distintas (ndc) foi igual a 22,80, acima do valor mínimo estabelecido pela MSA (AIAG, 2010), igual a cinco. O foco principal de aplicação do teste R&r segundo a MSA (AIAG, 2010) são os sistemas de medição onde as leituras possam ser replicadas em cada peça. No presente estudo, não foi possível efetuar réplicas dos testes de determinação do valor de PFFS, devido ao caráter destrutivo dos testes, ao tempo e ao custo de fabricação de corpos de prova adicionais, entretanto, por meio da aplicação do teste R&r percebe-se que o desempenho do RSL 2 é aceitável. Conclui-se igualmente da Tab. 4.17 que a repetibilidade representa apenas 1,85 % da reprodutibilidade. Segundo a MSA (AIAG, 2010), se a repetibilidade do equipamento for consideravelmente maior do que a reprodutibilidade, o equipamento em questão necessita manutenção, troca ou redimensionamento, o que não foi observado para o RSL 2 no âmbito desta dissertação com a análise efetuada.

# CAPÍTULO V

## Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do presente trabalho, divididas em aspectos metrológicos, análise estatística (ANOVA), métodos de medição desenvolvidos e análise dos corpos de prova no MEV.

O desempenho do equipamento RSL 2, destinado a estimar a susceptibilidade à fragilização por hidrogênio do aço AISI 4140, foi avaliado por meio de testes de verificação das montagens do mesmo, além da aplicação do teste R&r. Um planejamento fatorial completo  $2^1 \times 2^1 \times 3^1$  foi proposto com os fatores seção transversal a dois níveis, raio de arredondamento da raiz do entalhe a dois níveis e dureza dos corpos de prova a três níveis.

As principais conclusões do presente trabalho foram:

### *Aspectos metrológicos:*

a) A avaliação das duas configurações do RSL 2 mostrou que as células de carga de 20 kN e de 1 kN utilizadas para medição da força apresentaram excelentes propriedades metrológicas tanto no carregamento quanto no descarregamento. São elas:

#### **Célula de carga de 20 kN:** Histerese de 4 N

- Carregamento (tendência igual a 2 N, excelente exatidão, U (95,45 %) igual a 10 N, precisão (95,45 %) de  $\pm 4$  N, erro máximo de 0,0045 %, e erro de não linearidade de 2 N);
- Descarregamento (tendência igual a 3N, excelente exatidão, U (95,45 %) igual a 10 N, precisão (95,45 %) de  $\pm 1,6$  N, erro máximo de 0,0045 %, e erro de não linearidade de 2 N).

**Célula de carga de 1 kN: Histerese de 0,858 N**

- Carregamento (tendência igual a 0,691 N, excelente exatidão, U (95,45 %) igual a 0,351 N, precisão (95,45 %) de  $\pm 0,752$  N, erro máximo de 0,040 %, e erro de não linearidade de 0,441 N);
- Descarregamento (tendência igual a 0,754 N, excelente exatidão, U (95,45 %) igual a 0,352 N, precisão (95,45 %) de  $\pm 0,726$  N, erro máximo de 0,040 %, e erro de não linearidade de 0,428 N).

b) O *encoder* incremental rotativo apresentou no carregamento e no descarregamento incerteza expandida (95,45 %) igual a  $0,21^\circ$  e precisão (95,45 %) de  $\pm 0,18^\circ$  para ambas as configurações do RSL 2. A histerese foi igual a  $0,18^\circ$  e a  $0,72^\circ$ , respectivamente, para as configurações com célula de carga de 20 kN e de 1 kN, enquanto que o erro de não linearidade foi de  $0,09^\circ$  e de  $0,19^\circ$  para o carregamento e o descarregamento, respectivamente, para célula de carga de 20 kN. Por sua vez, para célula de carga de 1 kN o erro de não linearidade foi igual a  $0,20^\circ$  e a  $0,82^\circ$ , respectivamente;

c) A avaliação da tensão mecânica calculada mostrou que as configurações com células de carga de 20 kN e de 1 kN apresentaram excelentes propriedades metrológicas tanto no carregamento quanto no descarregamento. São elas:

**Célula de carga de 20 kN: Histerese de 0,444 MPa**

- Carregamento (erro percentual da tensão mecânica igual a 0,48 %, excelente exatidão, U (95,45 %) igual a 4,641 MPa, precisão (95,45 %) de  $\pm 0,384$  MPa, erro máximo de 1,20 %, e erro de não linearidade de 1,140 MPa);
- Descarregamento (erro percentual da tensão mecânica igual a 0,52 %, excelente exatidão, U (95,45 %) igual a 4,639 MPa, precisão (95,45 %) de  $\pm 0,296$  MPa, erro máximo de 0,90 %, e erro de não linearidade de 1,240 MPa).

**Célula de carga de 1 kN: Histerese de 8,356 MPa**

- Carregamento (erro percentual da tensão mecânica igual a 0,21 %, excelente exatidão, U (95,45 %) igual a 5,005 MPa, precisão (95,45 %) de  $\pm 1,468$  MPa, erro máximo de 0,90 %, e erro de não linearidade de 5,045 MPa);
- Descarregamento (erro percentual da tensão mecânica igual a 0,12 %, excelente exatidão, U (95,45 %) igual a 5,013 MPa, precisão (95,45 %) de  $\pm 1,418$  MPa, erro máximo de 1,03 %, e erro de não linearidade de 7,461 MPa).

d) O valor de % GR&R, obtido por meio de um teste R&r aplicado nos testes de determinação do valor de PFFS, foi igual a 6,17 %, sendo indicativo de que o RSL 2 está conforme, segundo recomendações da MSA (AIAG, 2010). O valor do número de categorias distintas (ndc) foi igual a 22,80, e a repetibilidade constituiu 1,85 % da reprodutibilidade;

e) A avaliação das duas configurações do RSL 2 e o teste R&r aplicado permitiram afirmar que o programa supervisor do RSL 2, a interface utilizada para comunicação com os sensores, leitura e armazenamento dos dados, bem como o módulo de aquisição QUANTUM X são conformes. Por sua vez, os componentes mecânicos do RSL 2 (braço do equipamento, roletes, adaptadores, suporte do corpo de prova, bancada, estrutura de controle) também ficaram validados.

*Susceptibilidade à fragilização por hidrogênio do aço AISI 4140:*

f) Para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, a máxima fragilização (10,72 % do valor da força máxima) foi observada para dureza superficial igual a 44 HRC e raio de arredondamento da raiz do entalhe igual a 80  $\mu$ m;

g) Para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, a máxima fragilização (9,83 % do valor da força máxima) foi observada para dureza superficial igual a 44 HRC e raio de arredondamento da raiz do entalhe igual a 80  $\mu$ m.

*Análise estatística (ANOVA):*

h) A análise de variância considerando os três fatores investigados permitiu concluir, com 95 % de confiabilidade estatística, que apenas o fator seção transversal do corpo de prova tem efeito estatisticamente significativo na determinação do valor de PFFS do aço AISI 4140 nas condições investigadas. As análises de variância adicionais, efetuadas separadamente para cada valor nominal de seção transversal, revelaram que para corpos de prova com seção transversal igual a 30 mm x 30 mm, nem o raio de arredondamento do entalhe e nem a dureza do corpo de prova, com confiabilidade estatística igual a 95 %, são significativos. Por sua vez, para corpos de prova com seção transversal igual a 10 mm x 10 mm, o raio do entalhe e a dureza do corpo de prova provocaram efeitos significativos na determinação do valor de PFFS, com confiabilidade estatística igual a 95 %, nas condições investigadas;

i) A análise de variância, com confiabilidade estatística igual a 95 % e considerando os três fatores, permitiu concluir que apenas o fator dureza e a interação entre dureza e seção

transversal do corpo de prova têm efeitos estatisticamente significativos na fragilização por hidrogênio do aço AISI 4140, nas condições investigadas;

*Métodos de medição desenvolvidos:*

j) O método de lixamento da raiz do entalhe dos corpos de prova, desenvolvido no âmbito desta dissertação, se mostrou adequado, possibilitando a remoção apenas dos picos de material e asperidades mais pronunciados;

l) O método desenvolvido para medição da rugosidade da raiz do entalhe dos corpos de prova, desenvolvido no âmbito desta dissertação utilizando-se interferômetro, se mostrou adequado para caracterizar a rugosidade da raiz do entalhe;

m) O método desenvolvido para medição do raio de arredondamento da raiz do entalhe dos corpos de prova, com microscópio óptico, se mostrou adequado para medir o raio do entalhe;

*Análise dos corpos de prova no MEV:*

n) A espessura da camada refundida na raiz do entalhe, usinado por eletroerosão a fio, foi da ordem de 3  $\mu\text{m}$ . A obtenção de um valor reduzido deve-se à ação da gravidade, que diminui a quantidade de material aderido à superfície da raiz do entalhe, pois o corpo de prova é usinado na vertical, além da influência dos parâmetros de usinagem ou tecnologias da máquina de eletroerosão a fio;

o) A análise dos mecanismos de fratura de corpos de prova testados para determinação do PFFS revelou fratura predominantemente dúctil, com a presença de *dimples* ou microcavidades. Com relação aos corpos de prova testados com CPPAM, observou-se fratura predominantemente frágil, com a presença de fratura intergranular.

# CAPÍTULO VI

## Sugestões de Trabalhos Futuros

Neste capítulo são apresentadas as sugestões de trabalhos futuros, podendo-se citar:

- Estimar a influência da rugosidade  $Rq$  da raiz do entalhe na fragilização por hidrogênio, no aço AISI 4140 ou em outros materiais;
- Efetuar a médio e longo prazo outros testes de determinação do valor de PFFS, de CPPAM e de verificação no RSL 2, para avaliar a estabilidade do equipamento e a quantificação de parâmetros metrológicos do equipamento;
- Realizar testes de CPPAM com níveis controlados de pH,  $O_2$ , temperatura e umidade. É igualmente interessante realizar testes RSL com outros materiais e utilizar um sensor de emissão acústica que possibilite o reconhecimento do momento exato de abertura da trinca no material e identificação do patamar de  $P_{TH}$ , especialmente para materiais que apresentem escoamento localizado significativo;
- Avaliar a susceptibilidade à fragilização por hidrogênio de outros materiais variando os fatores do planejamento experimental, como por exemplo, temperatura, microestrutura, presença de revestimentos em geral nos materiais, pressão, injeção de  $CO_2$ , etc;
- Estimar o efeito de pré-hidrogenação nos corpos de prova, no sentido de entender melhor os tempos necessários de encharcamento de hidrogênio na raiz do entalhe, para corpos de prova com diferentes valores de seção transversal, raio de arredondamento do entalhe e dureza.

## Referências Bibliográficas

- ACAR, C.; DINCER, I. **Testing and performance evaluation of a hybrid photoelectrochemical hydrogen production system**. International Journal of Hydrogen Energy 42 (2017) 3605-3613. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.044>
- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. Edgard Blücher, 295 p, 1977.
- AIAG – AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP. **Measurement systems analysis reference manual**. 4<sup>a</sup> ed. Southfield: Chrysler Corporation, Ford Motor Company and General Motors Corporation, 229 p, 2010.
- ALBERTAZZI, A; SOUSA, A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. 1<sup>a</sup> Ed. Manole, 408 p, 2008.
- ALVARADO, B. H. L. **Avaliação do desempenho metrológico do sistema de medição iGPS**. Dissertação de mestrado em Sistemas Aeroespaciais e mecatrônica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 157 p, 2010.
- AL-REFAIE, A.; BATA, N. **Evaluating measurement and process capabilities by GR&R with four quality measures**. Measurement, Vol.43, pp. 842-851, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2010.02.016>
- ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics: fundamentals and applications**. 3<sup>a</sup> Ed. N.Y: CRC Press, 610 p, 2005. <https://doi.org/10.1201/9781420058215>
- ALBINSKI, K.; MUSIOL, K.; MIERNIKIEWICZ, A.; LABUZ, S.; MALOTA, M. **The temperature of a plasma used in electrical discharge machining**. Plasma Sources Sci. Technol. N.5, p 736-742. 1996. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/5/4/015>
- ARANTES, L. J. **Avaliação de fluidos dielétricos no processo de usinagem por descargas elétricas**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG. 74 p, 2001.



ASTM A29/A29M. **Standard specification for general requirements for steel bars, carbon and alloy, hot-wrought.** American Society for Testing and Materials, 2016.

ASTM A506. **Standard specification for alloy and structural alloy steel, sheet and strip, hot-rolled and cold-rolled.** American Society for Testing and Materials, 2016.

ASTM E140. **Standard hardness conversion tables for metals relationship among brinell hardness, vickers hardness, rockwell hardness, superficial hardness, knoop hardness, scleroscope hardness, and leeb hardness.** American Society for Testing and Materials, 2012.

ASTM E456. **Standard Terminology Relating to Quality and Statistics.** American Society for Testing and Materials, 2017.

ASTM E8/E8M. **Standard test methods for tension testing of metallic materials.** American Society for Testing and Materials, 2016.

ASTM E1681. **Standard test method for determining threshold stress intensity factor for environment-assisted cracking of metallic materials.** American Society for Testing and Materials, 2013.

ASTM E177. **Standard Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods.** American Society for Testing and Materials, 2014.

ASTM E18. **Standard test methods for Rockwell hardness of metallic materials.** American Society for Testing and Materials, 2017.

ASTM E1820. **Standard test method for measurement of fracture toughness.** American Society for Testing and Materials, 2017.

ASTM E1823. **Standard terminology relating to fatigue and fracture testing.** American Society for Testing and Materials, 2013.

ASTM E691. **Standard practice for conducting an interlaboratory study to determine the precision of a test method.** American Society for Testing and Materials, 2018.

ASTM F519. **Standard test method for mechanical hydrogen embrittlement evaluation of plating/coating and service environments.** American Society for Testing and Materials, 2017.

ASTM F1624. **Standard test method for measurement of hydrogen embrittlement threshold in steel by the incremental step loading technique.** American Society for Testing and Materials, 2012.

ASTM G5. **Standard reference test method for making potentiodynamic anodic polarization measurements.** American Society for Testing and Materials, 2014.

ASTM G129. **Standard practice for slow strain rate testing to evaluate the susceptibility of metallic materials to environmentally assisted cracking.** American Society for Testing and Materials, 2013.

BABOIAN, R. **Corrosion tests and standards manual: application and interpretation.** 2<sup>a</sup> ed. Baltimore, MD: ASTM International, 882 p, 2005.  
<https://doi.org/10.1520/MNL20-2ND-EB>

BAIN, E. C.; PAXTON, H. W. **Alloying elements in steel.** 2<sup>a</sup> Ed, Metals Park, American Society for Metals. 291 p, 1966.

BALLESTEROS, A. F. **Avaliação da resistência de juntas soldadas circunferenciais de aço API 5L X80 à corrosão sob tensão na presença de sulfetos e susceptibilidade à fragilização por hidrogênio.** Tese de Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 282 p, 2009.

BARBÉ, C.; HARRAN, N.; GOULLE, F. **Répétabilité et reproductibilité des mesures de longueur axiale du globe oculaire et de diamètre équatorial du**

**cristallin à l'échographie sectorielle 10 MHz chez le chien atteint de cataracte.** *Revue vétérinaire clinique* (2016) 51, 67—74.

BARNOUSH, A.; VEHOFF, H. **Recent developments in the study of hydrogen embrittlement: Hydrogen effect on dislocation nucleation.** *Acta Materialia*. V. 58, p. 5274-5285, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.05.057>

BARNOUSH, A. **Hydrogen embrittlement, revisited by in situ electrochemical nanoindentation.** Tese de Doutorado - Universität des Saarlandes, Saarbrücken. 288 p, 2007.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria.** 3. ed. Campinas: UNICAMP, 480 p, 2007.

BICER, Y.; DINCER, I. **Performance evaluation of a photoelectrochemical hydrogen production reactor under concentrated and non-concentrated sunlight conditions.** *International Journal of Hydrogen Energy* 43 (2018) 10258-10267. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.122>

BLEYS, P.; KRUTH, J-P.; LAUWERS, B.; SCHACHT, B.; BALASUBRAMANIAN, V.; FROYEN, L.; HUMBEECK, J. V. **Surface and sub-surface quality of steel after EDM.** *Advanced Engineering Materials*. N. 1-2, p. 15-25. 2006. <https://doi.org/10.1002/adem.200500211>

BOX, G. E. P., HUNTER, W. G., HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters. An introduction to design, data analysis and model building.** 1ª Ed., New York, John Wiley & Sons, 1978, ISBN 0-471-09315-7.

BREWER, P.J.; PANAGOULIA, D.; BROWN, R. J. C.; TROMANS, A.; REYES, A.; ARCE, M.; VOSPELOVA, A.; ROZIKOVÁ, M.; PRATT, K. W.; ASAKAI, T.; JAKOBSEN, P.T.; CAMÕES, M. F.; OLIVEIRA, C. S.; GODINHO, I.; SPITZER, P.; SANDER, B.; MÁRIÁSSY, M.; VYSKOCIL, L.; FISICARO, P.; STOICA, D.;

UYSAL, E. **International comparison on Ag/AgCl electrodes for pH measurement.** Measurement 66 (2015) 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.01.029>

BROWN, A.I; SCNEIDER, S.I. **Raw Materials.** Engineered Materials Handbook: Ceramic and Glasses. ASM International, Vol.4, p.43-51, 1987.

BURDICK, R.K.; BORROR, C.M.; MONTGOMERY, D.C. **A review of methods for measurement systems capability analysis.** Journal of Quality Technology, Vol. 35, No. 4, pp. 342-354, 2003. <https://doi.org/10.1080/00224065.2003.11980232>

BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados.** 2005. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/IM317/im317.html>>. Acesso em 11 abr. 2017.

BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados.** Programa Pós Graduação (Engenharia Mecânica), Campinas, SP, Brasil: UNICAMP, 2012.

CARAGUEL, C.; STRYHN, H.; GAGNÉ, N.; DOHOO, I.; HAMMELL, L. **Traditional descriptive analysis and novel visual representation of diagnostic repeatability and reproducibility: Application to an infectious salmon anaemia virus RT-PCR assay.** Preventive Veterinary Medicine, Amsterdam, v. 92, n. 2, p. 9-19. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2009.07.011>

CHEN, S.; ZHAO, M.; RONG, L. **Effect of grain size on the hydrogen embrittlement sensitivity of a precipitation strengthened Fe–Ni based alloy.** Materials Science & Engineering: A. v. 594, p. 98–102, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.11.062>

CHEN, K. S.; WU, C. H.; CHEN, S. C. **Criteria of determining the P/T upper limits of GR&r in MSA.** Quality & Quantity, Vol. 42, No. 1, pp. 23-33, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11135-006-9033-7>

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos.** 7ª ed. São Paulo: ABM. 599 p, 2002.

CHUI, Q.S.H.; BISPO, J.M.A.; IAMASHITA, C.O. **O papel dos programas interlaboratoriais para a qualidade dos resultados analíticos.** Química Nova, São Paulo, v.27, n.6, p.993-1003, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422004000600026>

COLEMAN, D. E.; MONTGOMERY, D C. **A systematic approach to planning for a designed industrial experiment.** Technometric, v.35, n.1, p.1-12. 1993. <https://doi.org/10.1080/00401706.1993.10484984>

CORTEZ, D. S.; ALMEIDA, F. A.; GOMES, J. H. F. **Estudo de R&R para validação do sistema de medição de um processo de confecção de bobinas de fio em uma indústria do ramo têxtil.** XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP. 21 p, 2016.

COSTA, F. B; EPPRECHT, E.; CARPINETTI, L. C. **Controle estatístico de qualidade.** São Paulo: Editora Atlas S.A., 2004.

CRUZ, C.; MALAQUIAS, E. S.; FERNANDES, I. A. **Introdução à usinagem não tradicional.** DEEME, UFU, Uberlândia-MG, p. 7-19, 1999.

CUESTA, I. I.; ALEGRE, J. M. **Determination of the fracture toughness by applying a structural integrity approach to pre-cracked Small Punch Test specimens.** Engineering Fracture Mechanics. v. 78, p. 289-300, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2010.09.004>

CWIEK, J. **Hydrogen degradation of high-strength steels.** Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. v. 37, n. 2, p. 193-212, 2009.

DAYAL, R.K.; PARVATHAVARTHINI, N. **Hydrogen embrittlement in power plant steels.** Aqueous Corrosion and Surface Studies Section, 28, Parts 3 & 4, pp. 431–451, 2003.

DE MELLO, A. V.; SILVA, R. B.; ARENCIBIA, R. V.; SILVA, G. H.; SOUZA, M. N.; FERNANDES, L. A. **Método das médias e amplitudes e análise de incerteza de**

**medição dos ângulos de bits de HSS afiados com rebolo de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .** Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria, 9 p, 2014.

DÉSENFANT, M.; PRIEL, M. **Reference and additional methods for measurement uncertainty evaluation.** Measurement 95 (2017) 339–344.  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.10.022>

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências.** São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.

DIN IEC 751. **Temperature/Resistance Table for Platinum Sensors.** Deutsches Institut für Normung. International Electrotechnical Commission. Industrial Platinum Resistance Thermometer Sensors. 1 Ed, 2 p, 1983.

DUNCAN, A. J. **Quality control and industrial statistics.** 3<sup>a</sup> Ed. Homewood, Illinois: Richard D. Irwin, Inc, 992 p, 1965.

DUTRA, A. C.; NUNES, L. P. **Proteção catódica. Técnica de combate à corrosão.** 5<sup>a</sup> Ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora Interciência, 2011.

DUTRA, R. C.; SOFIATTI, V.; SILVA, O. R. R. F.; ALBUQUERQUE JÚNIOR, A. M.; COSTA, F. X.; ARAÚJO, W. P. **Avaliação do desempenho operacional de um equipamento para descascamento de mamona da cultivar BRS Energia.** III Congresso Brasileiro de Mamona, João Pessoa, PB, 2008.

FERRIS, D.H.; TURNBULL, A. **Analysis of reversible and irreversible hydrogen trapping in metals.** Report DMA (A), 154. National Physical Laboratory, London, 1988.

FILIFE, E. **Validação dos métodos de calibração nos laboratórios nacionais de metrologia.** Encontro da sociedade portuguesa de metrologia, v.1. Caparica: Instituto Português da Qualidade, 11p, 2007.

FORDHAM, J.; PILKINGTON, R.; TANG, C. **The effect of different profiling techniques on the fatigue performance of metallic membranes of AISI 301 and Inconel 718**. International Journal of Fatigue, 19:487–501, 1997.

FORTES, C. **Mecânica da Fratura**. Contagem: Assistência Técnica de Consumíveis – ESAB BR. Apostila, 74 p, 2003.

FULLER, J. E. **Electrical Discharge Machining**. Metals Handbook, 9ª Ed. Vol. 16, p. 557-564, 1989.

GARCÍA-ALONSO, C. R.; ARENAS-ARROYO, E.; PÉREZ-ALCALÁ, G. M. **A macro-economic model to forecast remittances based on Monte-Carlo simulation and artificial intelligence**. Expert Systems with Applications, Vol. 39, pp. 7929-7937, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.108>

GINGEL, A. **A bibliographical study of hydrogen trapping and embrittlement in line pipe steels**. IRSID - UNISOR SACILOR, Rapport Interne, 1997.

GROSSMANN, M. A. **Transactions of the metallurgical society of AIME**. Vol. 150, 227 p, 1942.

GROSSMANN, M. A; BAIN, E. C. **Principles of heat treatment**. 5ª Ed, Metals Park, American Society for Metals, 1964.

GUDURU, R. K.; DARLING, K. A.; KISHORE, R.; SCATERGOOD, R. O.; KOCH, C. C.; MURTY, K. L. **Evaluation of mechanical properties using shear–punch testing**. Materials Science and Engineering A. v. 395, p. 307-314, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.12.048>

GUITRAL, E. B. **The EDM handbook**. Hanser Gardner Publication, Cincinnati. 306 p, 1997.

HASÇALÝK, A; ÇAYDAS, U. **Experimental study of wire electrical discharge machining of AISI D5 tool steel**. Journal of Materials Processing Technology, 148:362–367, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.048>

HE, S. G.; WANG, G. A.; COOK, D. F. **Multivariate measurement system analysis in multisite testing: An online technique using principal component analysis**. Expert Systems with Applications, Vol. 38, pp. 14602-14608, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.05.022>

HERRING, D. H. **Hydrogen embrittlement**. Disponível em: <<http://www.heat-treat-doctor.com/documents/hydrogen%20embrittlement.pdf>>. Acesso em: 2 fev 2017. Elmhurst, IL – EUA, 4p, 2010.

HOFFMANN, K. **An introduction to measurements using strain gages**. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 291p, 1989.

HONGCHI, M.; ZHIYONG, L.; CUIWEI, D.; HUIRU, W.; CAIYU, L.; XIAOGANG, L. **Effect of cathodic potentials on the SCC behavior of E690 steel in simulated seawater**. Materials Science & Engineering: A. v. 642, p. 22-31, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.05.109>

HUANG, C.; HSU, F.; KUO, H. **The surface characteristics of P/M high-speed steel (ASP 23) multi-cut with wire electrical discharge machining (WEDM)**. Journal of Materials Processing Technology, 140:298–302, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00765-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00765-9)

HUANG, C.; HSU, F.; YAO, S. **Microstructure analysis of the martensitic stainless steel surface fine-cut by the wire electrode discharge machining (WEDM)**. Materials Science and Engineering A, 371:119–126, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.277>

HUANG, J.; LIAO, Y.; HSUE W. **Determination of finish-cutting operation number and machining-parameters setting in wire-electrical discharge machining**. Journal



of Materials Processing Technology, 87:69–81, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00334-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00334-3)

HUANG, C.; SHIH, C.; LI, K.; CHANG, Y. **The surface alloying behavior of martensitic stainless steel cut with wire electrical discharge machine.** Applied Surface Science, 252:2915–2926, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.04.035>

IEC. **Sistemas de proteção catódica.** 1ª Ed., Rio de Janeiro, IEC, 221 p, 1988.

INMETRO. **A estimativa da incerteza de medição pelos métodos do ISO GUM 95 e de simulação de Monte Carlo.** INMETRO-DIMCI-DIMEC-LAPRE INMETRO. Nota técnica. 34 p, 2008.

INMETRO. **Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008.** Rio de Janeiro, RJ, 2012a. Disponível em: <[www.inmetro.gov.br](http://www.inmetro.gov.br)>.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados.** Rio de Janeiro, Brasil. 95 p, 2012b.

ISO 3534-3. **Statistics – vocabulary and symbols – part 3: design of experiments.** 2ª ed., Genève, International Organization for Standardization, 1999, pp. 31 (2.6) e 40-42 (3.4).

ISO/IEC 17025. **Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração.** ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro. 20 p, 2017.

ISO 9000. **Sistemas de gestão da qualidade – Fundamentos e vocabulário.** ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro. 41 p, 2015.

ISO 9001. **Quality management systems — Requirements.** ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro. 30 p, 2015.

ISO 10012. **Garantia da qualidade para equipamento de medição – Parte 2: Diretrizes para controle de processos de medição.** ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro. 26 p, 2004.

ISO 14253-1. **Geometrical product specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 1: Decision rules for proving conformity or nonconformity with specifications.** Genève, International Organization for Standardization, 48 p, 2017.

ISO/TS 14253-2. **Geometrical product specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 2: Guidance for the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification.** Genève, International Organization for Standardization, 42 p, 2011.

ISO/TS 16949. **Quality management systems — Particular requirements for the application of ISO 9001:2000 for automotive production and relevant service part organizations.** Genève, International Organization for Standardization, 48 p, 2009.

JCGM 101. **Evaluation of measurement data - supplement 1 to the guide to the expression of uncertainty in measurement - propagation of distributions using a Monte Carlo method.** 1<sup>a</sup> ed, 2008.

JONES, D. A. **Principles and prevention of corrosion.** 2. ed. N.J: Simon & Schuster. 572 p, 1995.

KERNION, S. J.; MAGEE, J. H.; WERLEY, T. N.; MAXWELL, P. **Hydrogen embrittlement susceptibility of precipitation strengthened ni-base superalloys.** Offshore Technology Conference, Texas – EUA, p. 1-8, 2014.

KERNION, S. J.; MAGEE, J. H.; WERLEY, T. N.; MAXWELL, P. **Measurement of hydrogen embrittlement resistance of alloys 718 and custom age 625 Plus® using the rising step load technique.** 8th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives, p. 1-13, 2014. <https://doi.org/10.4043/25177-MS>

LI, M. H.; AL-REFAIE, A. **Improving wooden parts' quality by adopting DMAIC procedure.** Quality and Reliability Engineering International, Vol. 24, pp. 351-360, 2008. <https://doi.org/10.1002/qre.905>

LI, Z.; GAO, S.; HERRMANN, K. **Development of a micro-miniature nanoindentation instrument.** Recent Advancement of Theory and Practice in Hardness Measurement. p. 13-16, 2007.

LEE, H.; YUR, J. **Characteristic analysis of EDMed surfaces using the Taguchi approach.** Materials and Manufacturing Processing, 15(6):781–806, 2000. <https://doi.org/10.1080/10426910008913021>

LIAO, Y.; HUANG, J.; SU, H. **A study on the machining-parameters optimization of wire electrical discharge machining.** Journal of Materials Processing Technology, 71:487–493, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00117-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00117-9)

LIAO, Y.; HUANG, J.; CHEN, Y. **A study to achieve a fine surface finish in wire-EDM.** Journal of Materials Processing Technology, 149:165–171, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.034>

LIMA, E. F. **Rugosidade e Integridade Superficial do Aço Rápido ABNT M2 Após Usinagem por Descargas Elétricas.** Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Uberlândia. 97 p, 1997.

LINDVALL, M. **Development of test methods for detection of hydrogen embrittlement in high-strength steel.** Thesis (Master of Science) – Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Division of Engineering Materials, Luleå University of Technology, Luleå, 2009.

LYU, J.; CHEN, M.N. **Gauge capability studies for attribute data.** Quality and Reliability Engineering International, v.24, p.71-82, 2008. <https://doi.org/10.1002/qre.868>

MACKEY, W. B. **Corrosion**. Vol. 2, Londres: L. L. Schreir. 11-32, 1978.

MARTINIANO, G. A. **Desenvolvimento de um equipamento para avaliação da susceptibilidade à fragilização por hidrogênio**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia. 159 p, 2016.

MATTHEW, V. **Cathodic protection: looking back and forward – Materials performance**. 40 (8): 18-23, 2001.

MENEZES, F. M. **MSA – análise dos sistemas de medição**. Apostila, 28 p, 2013.

METROPOLIS, N.; ULAM, S. **The Monte Carlo method**. Journal of the American Statistical Association, Vol. 44, No. 247, pp. 335-341, 1949.  
<https://doi.org/10.1080/01621459.1949.10483310>

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 7ª Ed. New York: John Wiley e Sons, 656 p, 2009.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. 6ª Ed. New York: John Wiley e Sons, 516p, 2009b.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Gauge capability analysis and designed experiments Part II: experimental design models and variance component estimation**. Quality Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 289-305, 1993.

MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. **Gauge capability and designed experiments part I: basic methods**. Quality Engineering, Vol. 6, No. 1, pp. 115-135, 1993b.

MORAES, M. A. F. **Desenvolvimento de planilhas eletrônicas para calcular incerteza de medição**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 118 p, 2011.

MORGAN, J. H. **Protection cathodique dans la lutte contre la corrosion**. 1. ed. Dunod, Paris. 395 p, 1965.

NACE Standard TM0177. **Laboratory testing of metals for resistance to sulfide stress cracking and stress corrosion cracking in H<sub>2</sub>S environments**. NACE International, 2005.

NANNINGA, N.; GROCHOWSKI, J.; HELDT, L.; RUNDMAN, K. **Role of microstructure, composition and hardness in resisting hydrogen embrittlement of fastener grade steels**. Corrosion Science. v. 52, n. 4, p. 1237–1246, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.12.020>

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos - pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2ª Ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2003.

NOZARI, L. H. S. **Influência da temperatura e da presença de H<sub>2</sub>S no comportamento mecânico e eletroquímico do aço API 5CT grau P110 em água do mar sintética**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 109 p, 2002.

OKAMOTO, M. A. **Danos causados pelo hidrogênio em aços API 5L X65 e X80**. Monografia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 78 f, 2010.

OTTOBELLI, L.; FOGAGNOLO, P.; FREZZOTTI, P.; DE CILLÀ, S.; VALLENZASCA, E.; DIGIUNI, M.; PADERNI, R.; MOTOLESE, I.; BAGAGLIA, S. A.; MOTOLESE, E.; ROSSETTI, L. **Repeatability and reproducibility of applanation resonance tonometry: a cross-sectional study**. BMC Ophthalmology (2015) 15:36. <https://doi.org/10.1186/s12886-015-0028-9>

PAN, J. N. **Determination of the optimal allocation of parameters for gauge repeatability and reproducibility**. International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 21, No. 6, pp. 672-682, 2004. <https://doi.org/10.1108/02656710410542061>

PAN, J. N. **Evaluating the gauge repeatability and reproducibility for different industries.** Quality & Quantity, Vol. 40, No. 4, pp. 499-518, 2006.  
<https://doi.org/10.1007/s11135-005-1100-y>

PANDIRIPALLI, B. **Repeatability and reproducibility studies: a comparison of techniques.** Dissertação de Mestrado – Wichita State University, 58 p, 2010.

PARKINS, R. N.; ELICES, M., SANCHEZ-GALVEZ, V.; CABALLERO, L. **Environment sensitive cracking of pre-stressing steels.** Corrosion Science. v. 22, n. 5, p. 379-405, 1982.

PEABODY, A. W. **Control of pipeline corrosion.** Houston, NACE. 120 p, 1967.

PEDRAZA, A. J.; COUTINHO, C. A. B.; SILVA, E. M. P. **Tratamentos térmicos dos aços.** Editora UFMG, Belo Horizonte, 1979.

PEDOTT, A. H. **Análise de dados funcionais aplicada ao estudo de repetitividade e reprodutibilidade: ANOVA das distâncias.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 131 p, 2010.

PERALTA-ZAMORA, P.; MORAIS, J. L.; NAGATA, N. **Por que otimização multivariada?** Engenharia Sanitária e Ambiental. V.10, n.2, p.106-110, 2005.  
<https://doi.org/10.1590/S1413-41522005000200003>

PEREIRA, R. L. **Curso de tratamentos térmicos dos metais.** São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos. 387 p, 1963.

PEREIRA, P. A. S.; FRANCO, C. S. G.; GUERRA FILHO, J. L. M.; SANTOS, D. S. **Hydrogen effects on the microstructure of a 2.25Cr1Moe0.25 V steel welded joint.** International Journal of Hydrogen Energy. v. 40, n. 47, p. 17136-17143, dez. 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.095>

PERUCHI, R. S. **MDMAIC um roadmap seis sigma multivariado**. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais. 170 p, 2014.

PILKEY, W. D.; PILKEY, D. F. **Peterson's stress concentration factors**. 3.ed. New Jersey: John Wiley & Sons. 554 p, 2008.

PIRATELLI-FILHO, A., ZÚÑIGA, L.D.O., ARENCIBIA, R.A. **Aplicação de testes de repetitividade e reprodutividade (R&R) para verificação de scanner laser 3D**. Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria, 4 p, 2014.

RAMAKRISHNAN, R; KARUNAMOORTHY, L. **Modeling and multi response optimization of Inconel 718 on machining of CNC WEDM process**. Journal of Materials Processing Technology, 2007. In Press: Accepted Manuscript. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.024>

RAYMOND, L. **Rising step-load test apparatus**. US n. 5.585.570, 12 out. 1994, 17 dez. 1996.

REED-HILL, R. E. **Physical metallurgy principles**. 2ª Ed. New York, D. Van Nostrand Company. 920 p, 1973.

REGO, J.R; COSTA-NETO, P.L.O. **Avaliação de sistemas de medição utilizando quadrados latinos**. Gestão e Produção. São Carlos, v.2, n.1, p. 70-86, 1995.

REINSTEIN. D. Z.; ARCHER, T. J.; SILVERMAN, R. H.; COLEMAN, J. **Accuracy, repeatability and reproducibility of Artemis very high-frequency digital ultrasound arc-scan lateral dimension measurements**. Journal Cataract Refract Surgery, Vol. 32, 2006.

ROSADO, D. B. **Comparação do efeito da fragilização por hidrogênio em aços com resistência à tração acima de 1000 MPa**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 92 p, 2011.

RUNJE, B.; NOVAK, A. H.; RAZUMIĆ, A. **Measurement system analysis in production process**. XVII International Scientific Conference on Industrial Systems, pp. 274-277, 2017.

SARKAR, S.; MITRA, S.; BHATTACHARYYA, B. **Parametric analysis and optimization of wire electrical discharge machining of titanium aluminide alloy**. Journal of Materials Processing Technology, 159:286–294, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.10.009>

SHIAU, Y. R. **Decision support for off-line gage evaluation and improving on-line gage usage**. Journal of Manufacturing Systems, v.19, p.318-331, 2000.

SILVA, A. G. S. G.; PONTE, H. A.; ARTEM, P. **Estudo da influência o hidrogênio permeado nas propriedades eletroquímicas do Nb/Nb205 para o desenvolvimento de um sensor**. In: 4º PDPETRO, 4, Campinas – SP. Artigos e Resumos. 10 p, 2007. Disponível em: < <http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/4/>>.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

SOFRONIS, P.; ROBERTSON, I. M.; LIANG, Y.; TETER, D. F.; ARAVAS, N. **Recent advances in the study of hydrogen embrittlement at the University of Illinois**. Ideals. Urbana, IL. 20 p, 2001.

SOUZA, D. E. F. **O efeito dos tratamentos térmicos e da severidade do entalhe na susceptibilidade à fragilização por hidrogênio do Inconel 718 avaliada pelo método de RSL**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia. 225 p, 2018. <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1177>

SPEDDING, T; WANG, Z. **Study on modeling of wire EDM process**. Journal of Materials Processing Technology, 69:18–28, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)00033-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)00033-7)



STEVENS, N. T.; BROWNE, R.; STEINER, S. H.; MACKAY, R. J. **Augmented measurement system assessment**. Journal of Quality Technology, Vol. 42, No. 4, pp. 388-399, 2010. <https://doi.org/10.1080/00224065.2010.11917835>

STROE, M. E. **Hydrogen embrittlement of ferrous materials**. Tese de Doutorado – Université Libre de Bruxelles, Bélgica. 252 p, 2006.

THEODORO, F. R. F.; REIS, M. L. C. C.; SOUTO, C. A.; BARROS, E. **Measurement uncertainty of a pressure sensor submitted to a step input**. Measurement 88 (2016) 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.03.043>

THOMPSON, A.W.; BERNSTEIN, I.M., 1980. **The role of metallurgical variable in hydrogen assisted environmental fracture**. Advances in Corrosion Science and Technology (eds.) FONTANNA, M.G.; STAEHLE, R.W. (New York: Plenum), vol. 7, pp. 53-173 apud DAYAL, 2003.

TROIANO, A. R. **The role of hydrogen and others interstitials in the mechanical behavior of metals**. Metallography, Microstructure, and Analysis. v. 5, n. 6, p. 557-569, 1960. <https://doi.org/10.1007/s13632-016-0319-4>

VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria de erros**. 2ª ed. São Paulo, SP, Brasil: Edgard Blucher, 1996.

WANG, F.K.; CHIEN, T.W. **Process-oriented basis representation for a multivariate gauge study**. Computers and Industrial Engineering, v.58, p.143-150, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.10.001>

WILLIAMS, R; RAJURKAR, K. **Study of wire electrical discharge machined surface characteristics**. Journal of Materials Processing Technology, 28:127–138, 1991. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(91\)90212-W](https://doi.org/10.1016/0924-0136(91)90212-W)

XIE Y.; ZHANG H.; LIU S.; YANG P.; LUO X. **A study on stress corrosion crack of thick-walled elbow in manifold for acid fracturing**. ASME. J. Pressure Vessel Technol, 1999.

YAN, B.; TSAI, H.; HUANG, F.; LEE, L. **Examination of wire electrical discharge machining of  $AL_2O_3/6061Al$  composites**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45:251–259, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.08.015>

YEH, W. C.; LIN, Y. C.; CHUNG, Y. Y. **Performance analysis of cellular automata Monte Carlo Simulation for estimating network reliability**. Expert Systems with Applications, Vol. 37, pp. 3537-3544, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.09.070>

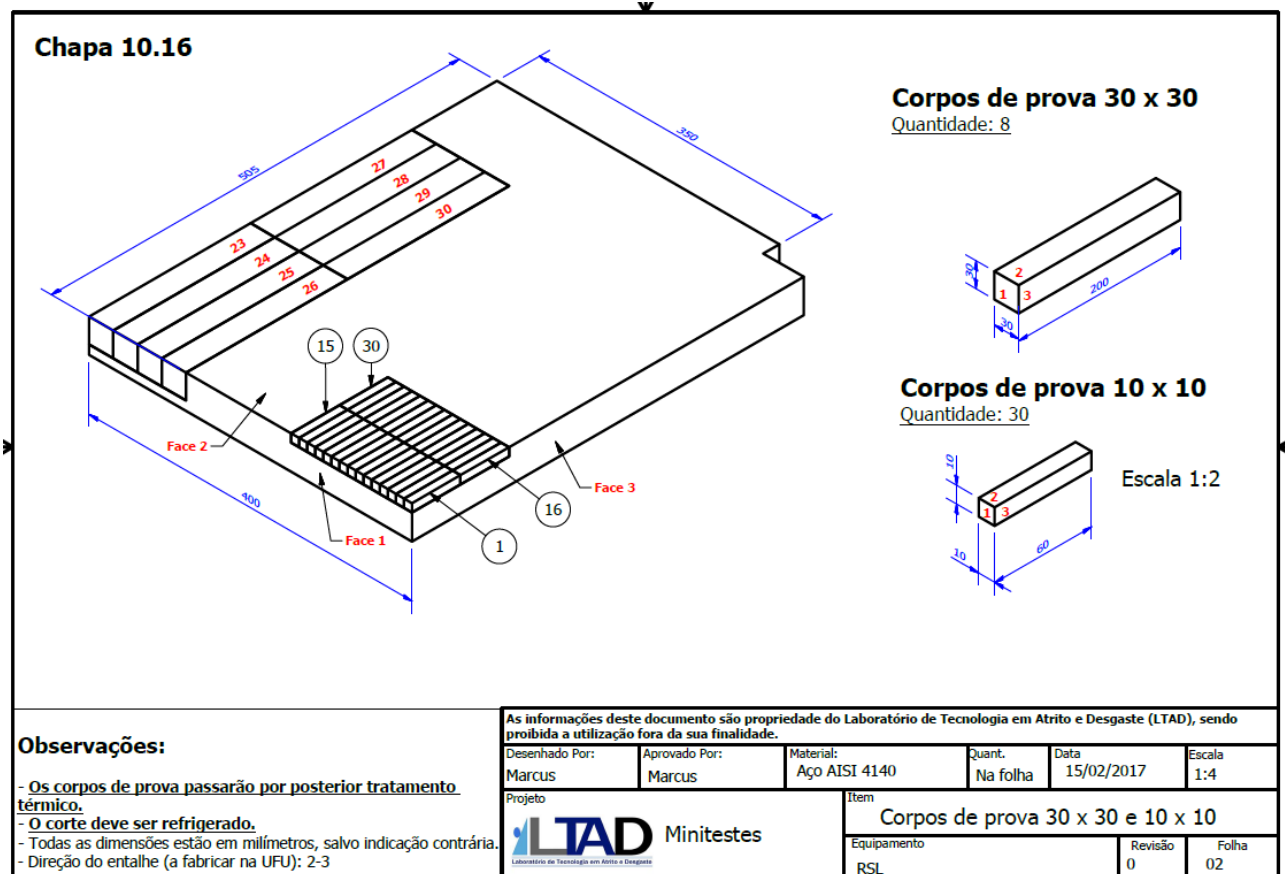
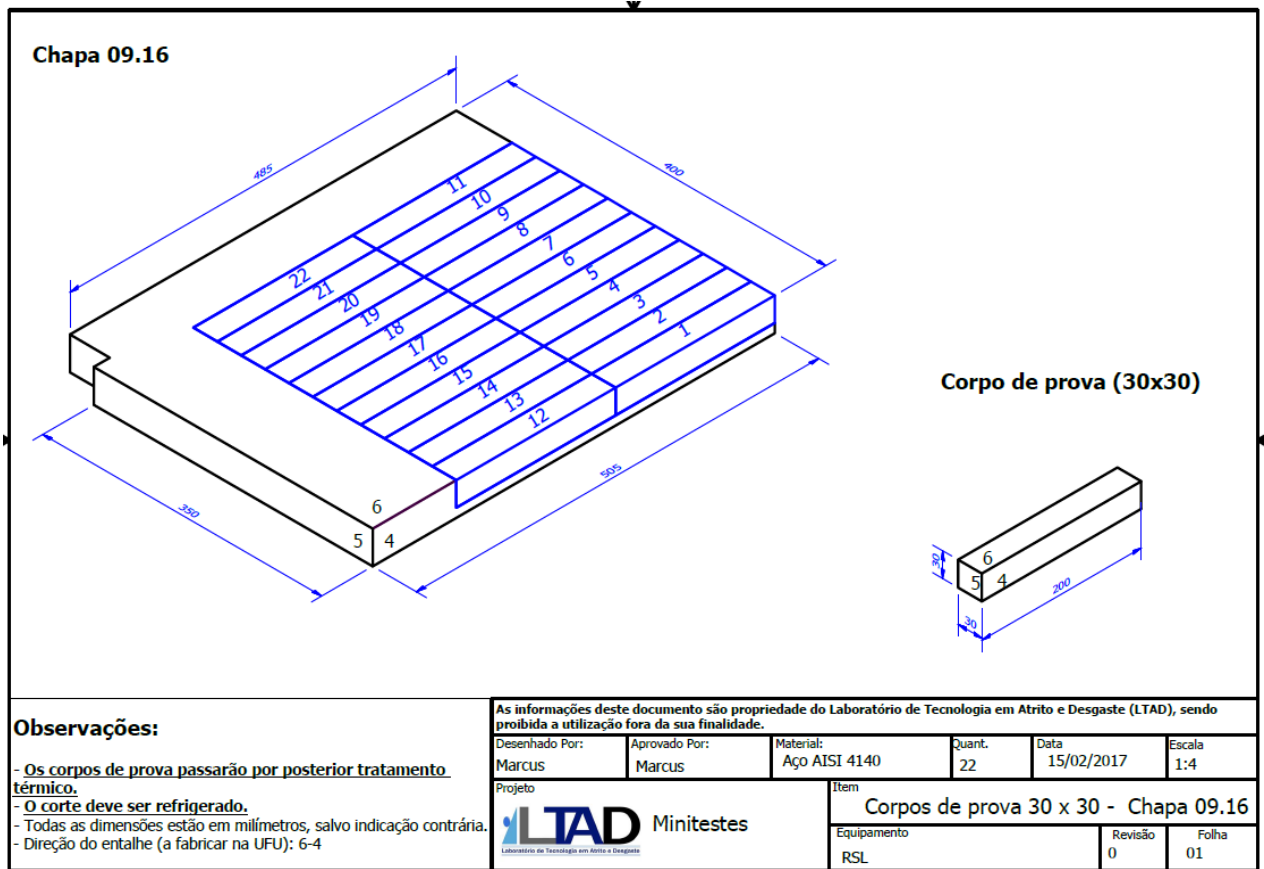
YEH, T. M.; SUN, J. J. **Using the Monte Carlo simulation methods in gauge repeatability and reproducibility of Measurement System Analysis**. Journal of Applied Research and Technology, Vol. 11, pp. 780-796, 2013. [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(13\)71585-2](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(13)71585-2)

YUKSEL, Y. E.; OZTURK, M.; DINCER, I. **Energetic and exergetic performance evaluations of a geothermal power plant based integrated system for hydrogen production**. International Journal of Hydrogen Energy 43 (2018) 78-90. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.002>

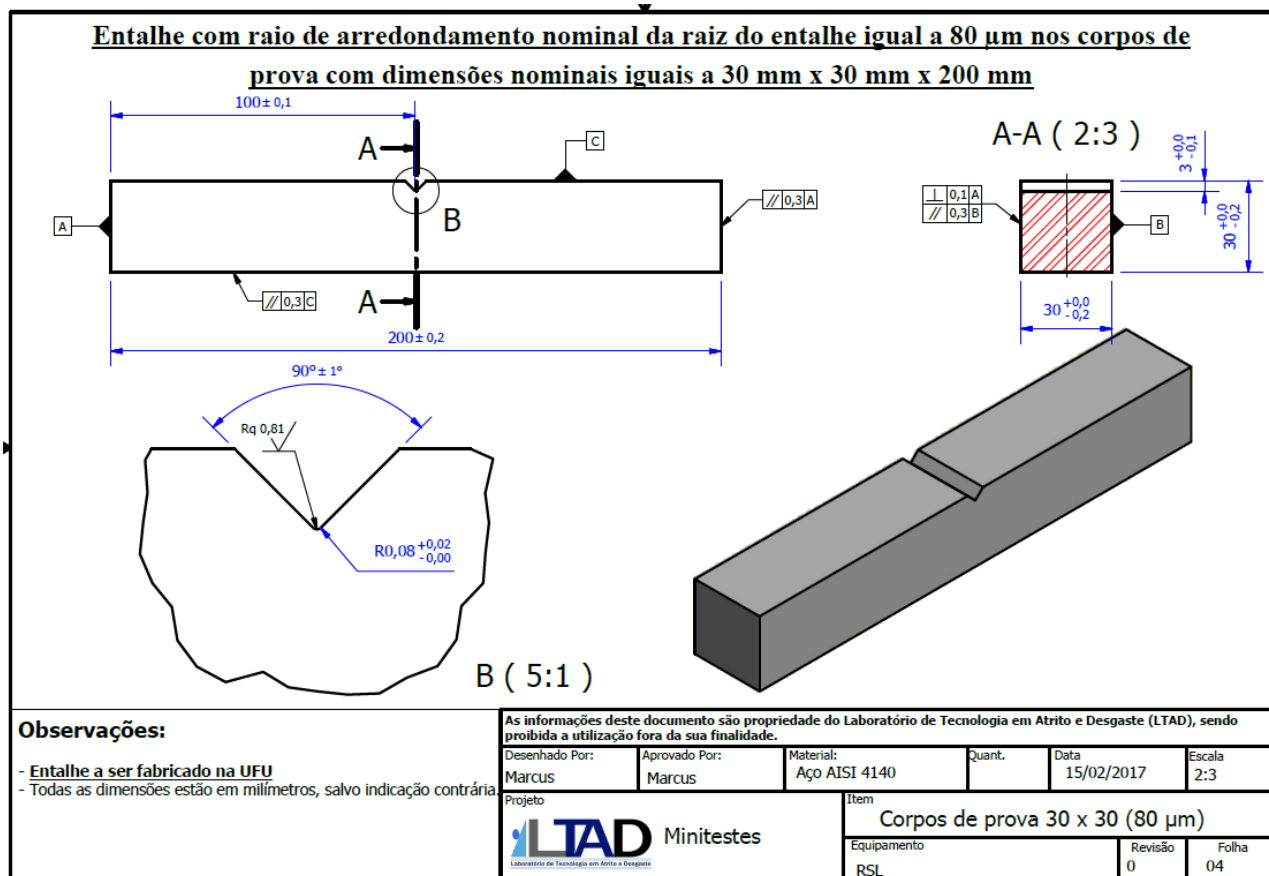
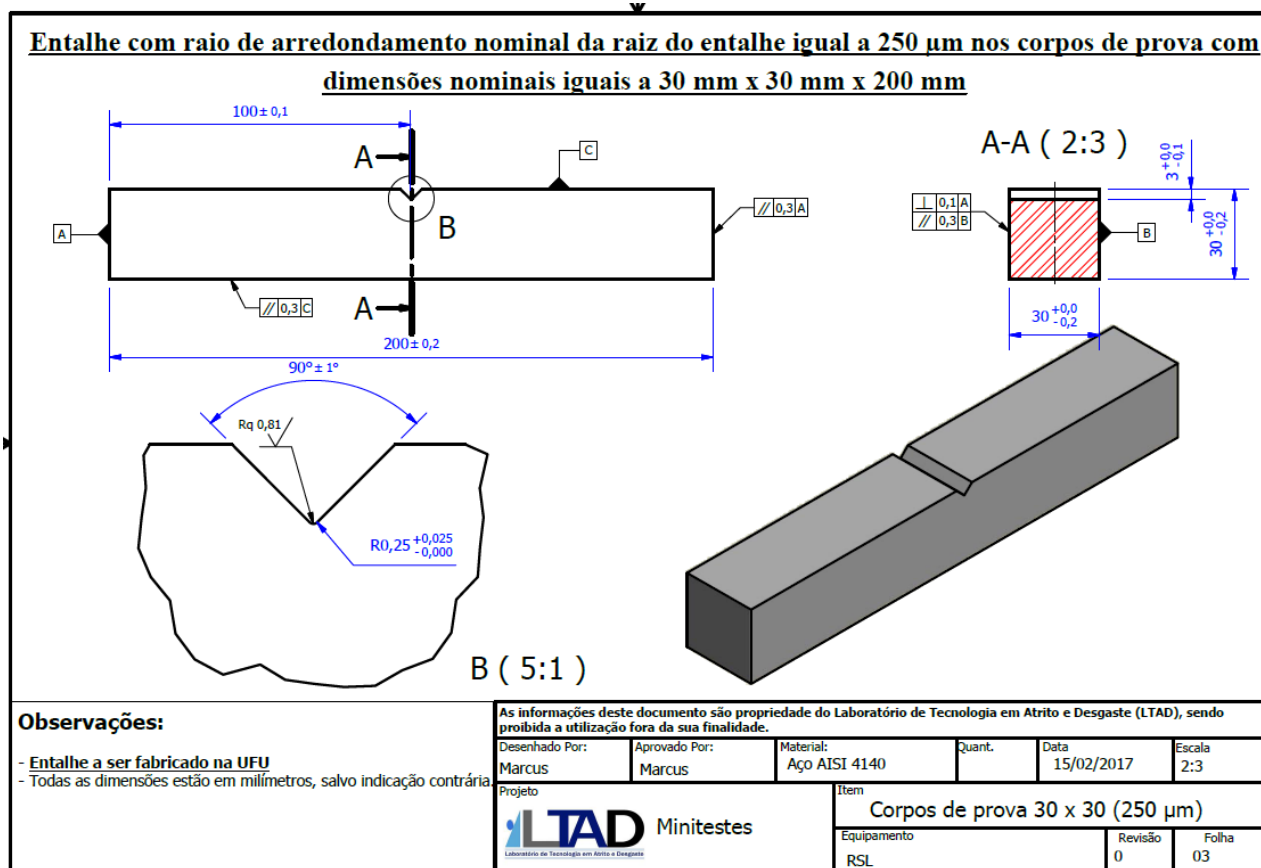
ZANOBINI, A.; SERENI, B.; CATELANI, M.; CIANI, L. **Repeatability and reproducibility techniques for the analysis of measurement systems**. Measurement 86 (2016) 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.02.041>

ZÚÑIGA, L. D. O. **Método de verificação do desempenho de scanners laser usando um artefato tridimensional**. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Distrito Federal. 83 p, 2013.

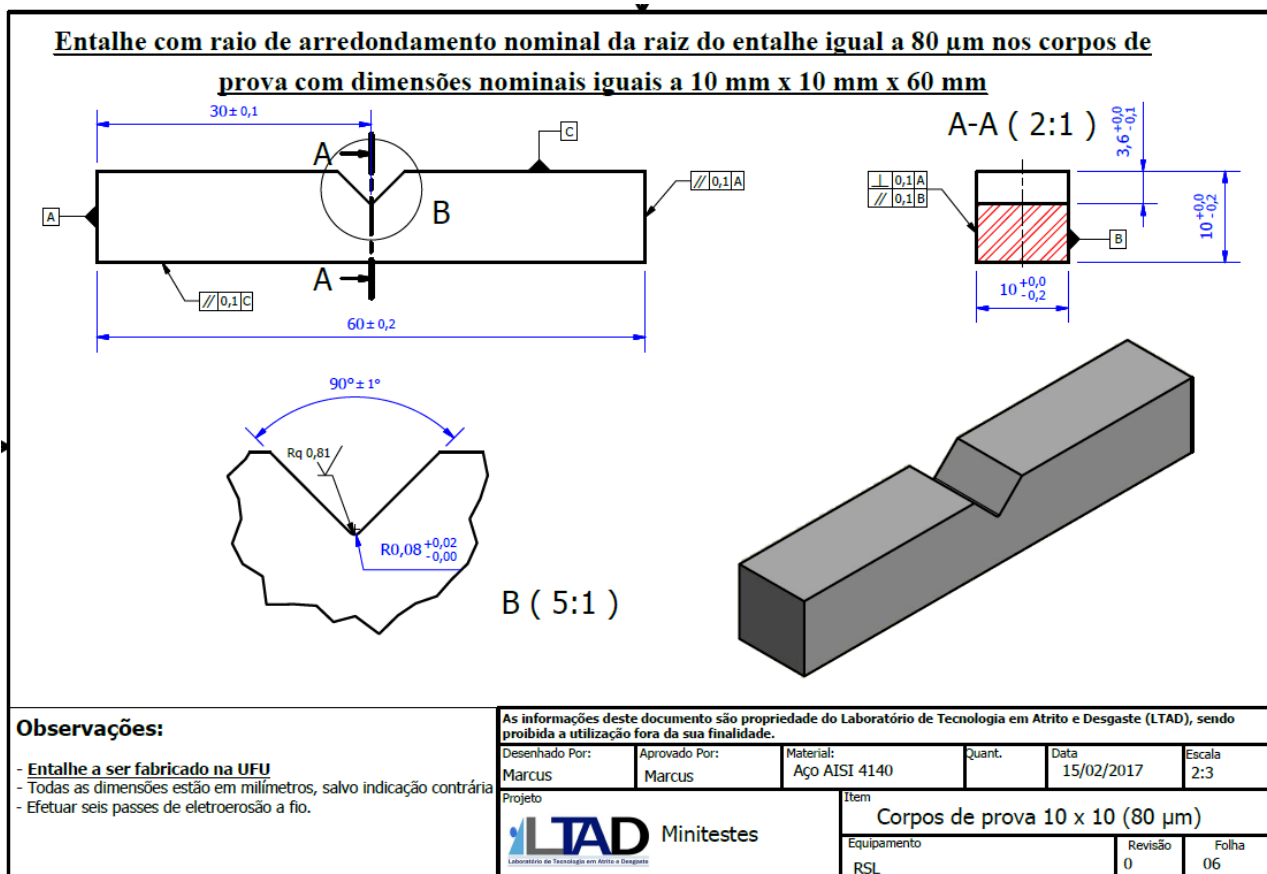
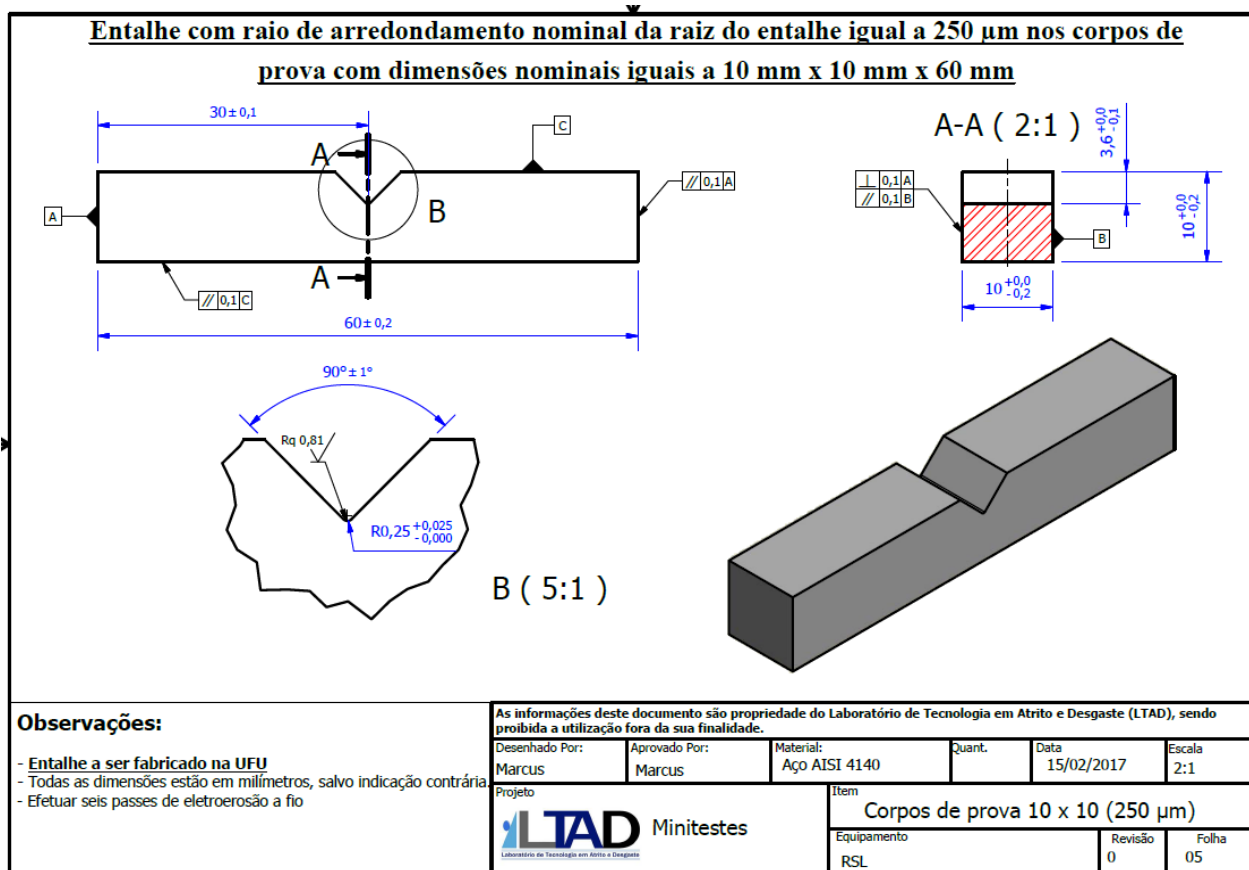
## Apêndice I: Desenhos técnicos para fabricação dos corpos de prova



# Apêndice I: Desenhos técnicos para fabricação dos corpos de prova (continuação)



# Apêndice I: Desenhos técnicos para fabricação dos corpos de prova (continuação)



## **A P Ê N D I C E II**

### **Procedimento desenvolvido para lixamento da raiz do entalhe dos corpos de prova**

Percebeu-se que a rugosidade  $Rq$  da raiz do entalhe dos corpos de prova imediatamente após a eletroerosão realizada com sete passes, sem nenhuma operação de lixamento adicional, era igual, em média, a  $1,45 \mu\text{m}$ .

Neste apêndice encontra-se o detalhamento do procedimento desenvolvido no âmbito desta dissertação para lixamento do entalhe dos corpos de prova, visando à obtenção da rugosidade  $Rq = 0,81 \mu\text{m}$ , recomendada na norma ASTM F519 (ASTM, 2017).

#### **2.1. Material necessário para lixamento da raiz do entalhe dos corpos de prova**

Os seguintes itens foram utilizados para lixar o entalhe dos corpos de prova:

- Luvas de látex para manuseio do corpo de prova;
- Superfície plana e limpa para apoio do corpo de prova, de forma que o operador realize o procedimento de modo ergonômico;
- Lixas d'água com granulometria 600, cortadas em forma de círculos com diâmetro de 32 mm;
- Béquer com água para lavagem do corpo de prova após a passagem de cada lixa;
- Lixadora/polidora portátil do fabricante STRUERS, composta da caneta de trabalho, do motor, do eixo de engate rápido, do disco de borracha e de um aparelho com controle de rotação do eixo de engate rápido;

- Estabilizador para evitar que oscilações na rede elétrica danifiquem o aparelho portátil;
- Álcool para limpeza do corpo de prova após a finalização do lixamento;
- Secador de cabelos para secagem do corpo de prova.

## 2.2. Procedimento de lixamento do entalhe dos corpos de prova

Imergiu-se o corpo de prova no béquer com água e apoiou-se o mesmo na superfície plana com uma das mãos, conforme ilustra a Fig. 2.1 (a). Ligou-se o aparelho portátil, com uma velocidade de rotação baixa e com a outra mão iniciou-se o procedimento de lixamento do entalhe (Fig. 2.1 (b)).

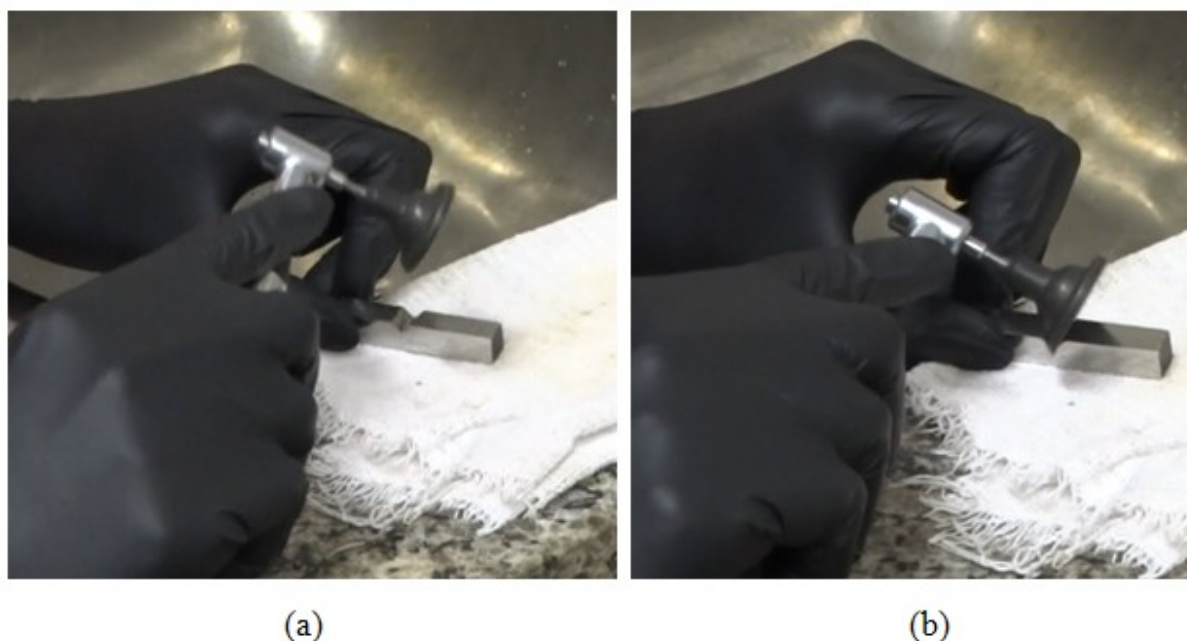


Figura 2.1: Início do procedimento de lixamento do entalhe (a) Posicionamento do corpo de prova; (b) aproximação inicial para lixamento do entalhe

Para evitar a alteração significativa da profundidade do entalhe, o lixamento do mesmo deu-se por aproximação, ou seja, “apoiou-se” a lixa na lateral ou parede do entalhe e aproximou-se a extremidade ou borda da lixa, de modo a não lixar a raiz do entalhe de modo “direto”. O manuseio da caneta de trabalho do aparelho foi realizado com cuidado e de forma

minuciosa, de modo semelhante à operação de uma caneta de alta rotação utilizada por um dentista. A duração total da operação de lixamento nesta etapa é de aproximadamente 10 s, com duas imersões do corpo de prova no béquer com água.

Apoiou-se a lixa na outra lateral do entalhe do corpo de prova e repetiu-se o procedimento do parágrafo anterior.

A lixa foi trocada duas vezes e repetiu-se o procedimento, com um tempo total de lixamento da ordem de 60 s, por corpo de prova.

Por fim, o corpo de prova foi lavado com álcool e secado.



## A P Ê N D I C E III

### Procedimento de medição da rugosidade da raiz do entalhe no interferômetro

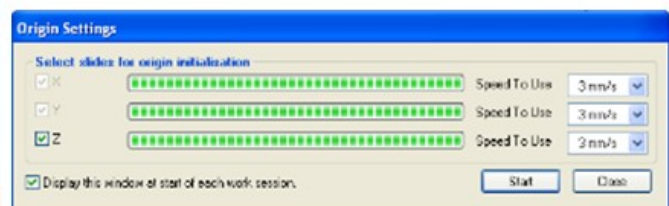
Neste apêndice encontra-se o detalhamento do procedimento de medição da rugosidade da raiz do entalhe dos corpos de prova, no interferômetro. Martiniano (2016) relatou que medir tal rugosidade era difícil e que um método de medição da mesma também necessitava ser desenvolvido.

O primeiro passo é limpar cuidadosamente a mesa de coordenadas do interferômetro, com a utilização de um pano umedecido com álcool. O operador deve ajustar o sensor para luz branca (CLA 300  $\mu\text{m}$ ) na estrutura do equipamento, Fig. A3.1a e então ligar o *nobreak*, o computador e o interferômetro. O próximo passo é lançar o programa Talysurf CLI 2000.

O operador deve então realizar o referenciamento dos eixos *X*, *Y* e *Z* do interferômetro, conforme ilustra a Fig. A3.1b.



a



b

Figura A3.1: Início da preparação para medição da rugosidade da raiz lixada do entalhe (a) seleção do sensor de luz branca; (b) referenciamento dos eixos *X*, *Y* e *Z* do interferômetro

O próximo passo é selecionar no programa o sensor de luz branca no campo “*Gauge selection*”. O operador pode em seguida colocar o corpo de prova na mesa de coordenadas do interferômetro, utilizando luvas de látex, para evitar contaminações do corpo de prova e

consequente oxidação. Deve-se manusear o corpo de prova com cuidado, para não riscar a superfície da mesa de coordenadas, sobretudo para corpos de prova de dimensões nominais iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, pela massa de aproximadamente 1,5 kg que pode danificar facilmente a superfície de apoio do corpo de prova.

Para posicionar o corpo de prova na orientação correta e evitar que ocorra perda de foco da luz branca durante a medição da rugosidade da raiz do entalhe lixada, faz-se necessário a utilização de um esquadro para alinhar o corpo de prova com a borda da mesa de coordenadas do interferômetro: esse é um detalhe que faz toda a diferença em uma medição bem sucedida, conforme ilustra a Fig. A3.2. É importante ressaltar que segundo o princípio da interferometria, a superfície a qual se deseja medir a rugosidade deve estar paralela ao sensor. Se houver qualquer inclinação, por menor que seja, ocorrerá perda de foco e a medição não será concluída com êxito. Não é necessário fixar o corpo de prova na mesa de coordenadas, mesmo para corpos de prova com dimensões nominais iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm.

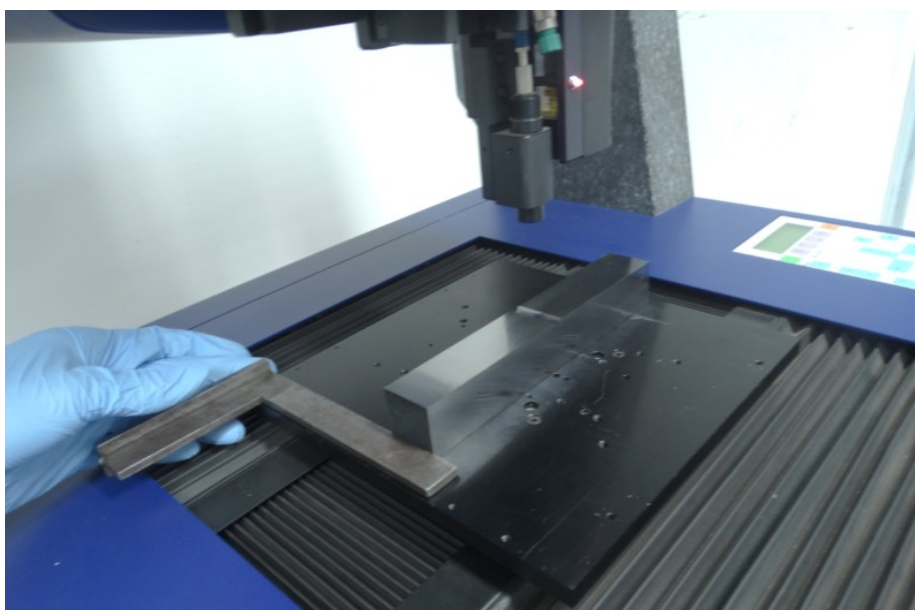


Figura A3.2: Alinhamento do corpo de prova com a borda da mesa de coordenadas do interferômetro por meio da utilização de um esquadro

O passo seguinte é alinhar e abaixar o sensor de luz branca do interferômetro em uma região na superfície da face superior do corpo de prova, próxima ao entalhe, Fig. A3.3a. O sensor deve ser abaixado até que o indicador de foco da luz branca, situado na estrutura do interferômetro, esteja situado na região central da escala (metade superior ou inferior) e na coloração verde, Fig. A3.3b. Faz-se necessário aproximar o sensor da face do corpo de prova

com cuidado, para evitar que a lente do sensor encoste na superfície de medição e se danifique.

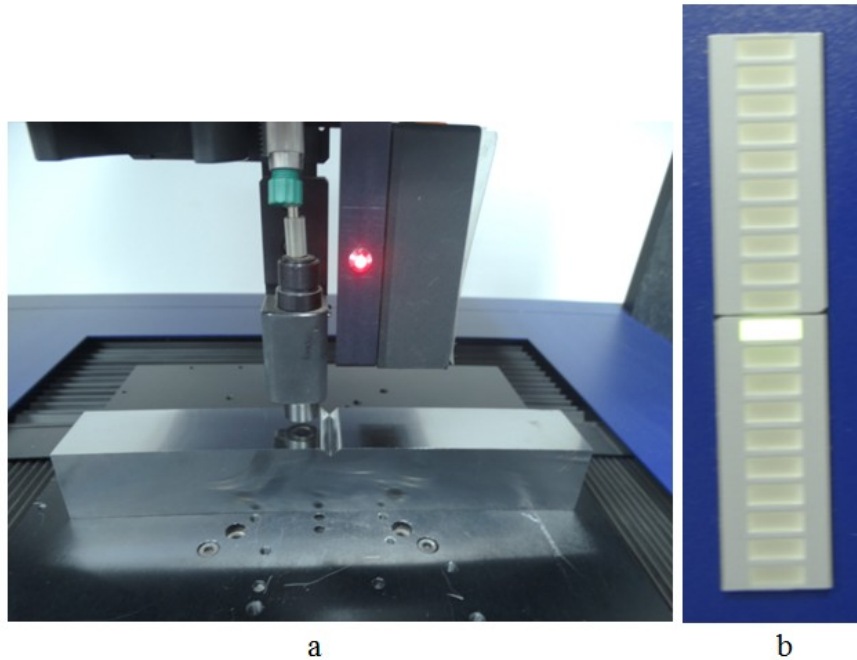


Figura A3.3: Pré-preparação da medição da rugosidade da raiz lixada do entalhe (a) aproximação inicial do sensor na superfície da face do corpo de prova; (b) escala de foco da luz branca, situada na estrutura do interferômetro

O operador pode então deslocar a mesa de coordenadas do interferômetro e alinhar o sensor de luz branca com a raiz lixada do entalhe, Fig. A3.4. O sensor deve ser aproximado da raiz lixada do entalhe até que o indicador de foco da luz branca esteja situado novamente na região central da escala e que possua a coloração esverdeada.

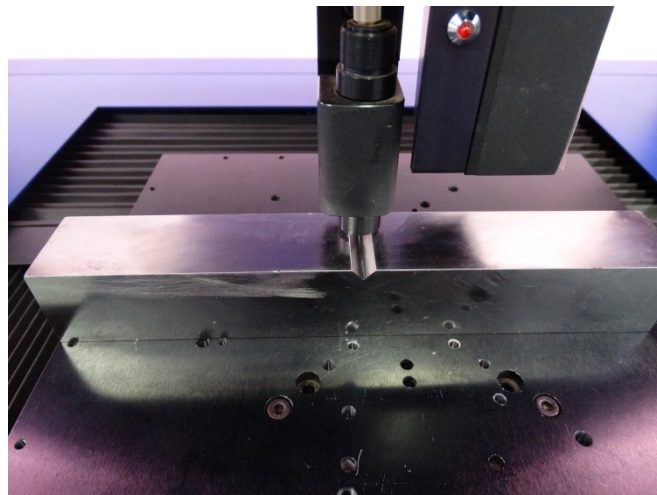


Figura A3.4: Posicionamento do sensor de luz branca do interferômetro na raiz do entalhe

O operador deve então referenciar a origem do sistema de coordenadas e iniciar a programação da área a ser escaneada pelo sensor de luz branca. A análise oeste-leste deve ser escolhida no menu do programa, com uma área de varredura igual a 4,00 mm (direção da largura do corpo de prova) em 4001 linhas x 0,45 mm (direção do comprimento do corpo de prova) em 151 linhas, o que corresponde a uma distância entre os pontos igual a 1  $\mu\text{m}$  e 3  $\mu\text{m}$ , respectivamente. A velocidade de medição deve ser igual a 100  $\mu\text{m/s}$ . Com todos esses parâmetros, a medição durará aproximadamente 2 horas e irá gerar um arquivo de resultados de 2,3 Mb, conforme ilustra a Fig. A3.5. O operador pode selecionar um *template* ou “receita” com os parâmetros já escolhidos, denominado “Medição da rugosidade da raiz do entalhe – Marcus.rcp” e salvo na base de dados do programa.

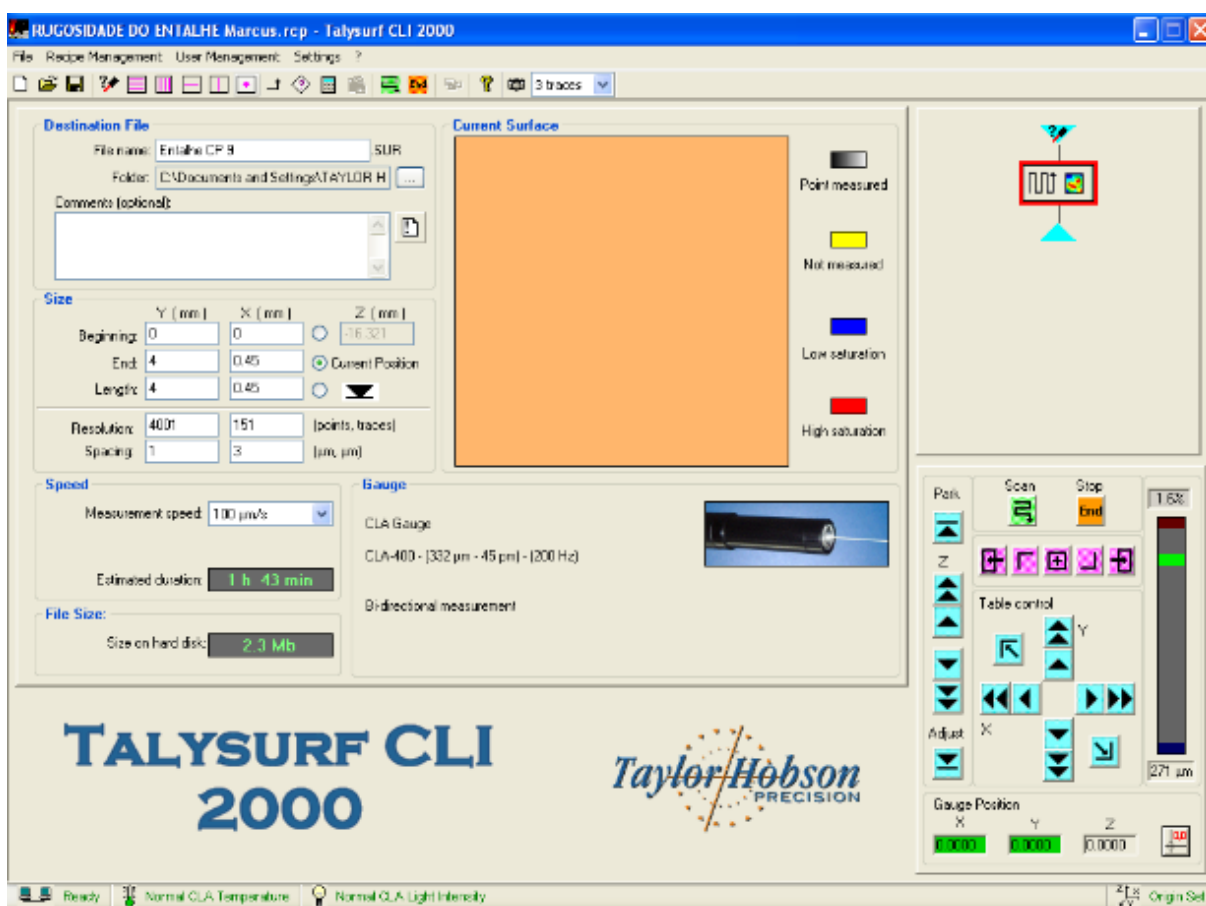


Figura A3.5: Tela do programa com escolha dos parâmetros de medição da rugosidade da raiz do entalhe dos corpos de prova, no interferômetro

Antes de iniciar a medição, é conveniente pressionar os botões de início e fim da medição no painel do interferômetro, Fig. A3.6, e observar se ocorrerá perda de foco na escala

de luz branca na estrutura do equipamento. Se isso ocorrer, é provável que a medição não seja conclusiva e que o operador deva escolher outro ponto inicial de medição na raiz lixada do entalhe do corpo de prova. A medição da rugosidade da raiz lixada do entalhe requer paciência, treinamento e experiência para ser bem sucedida.

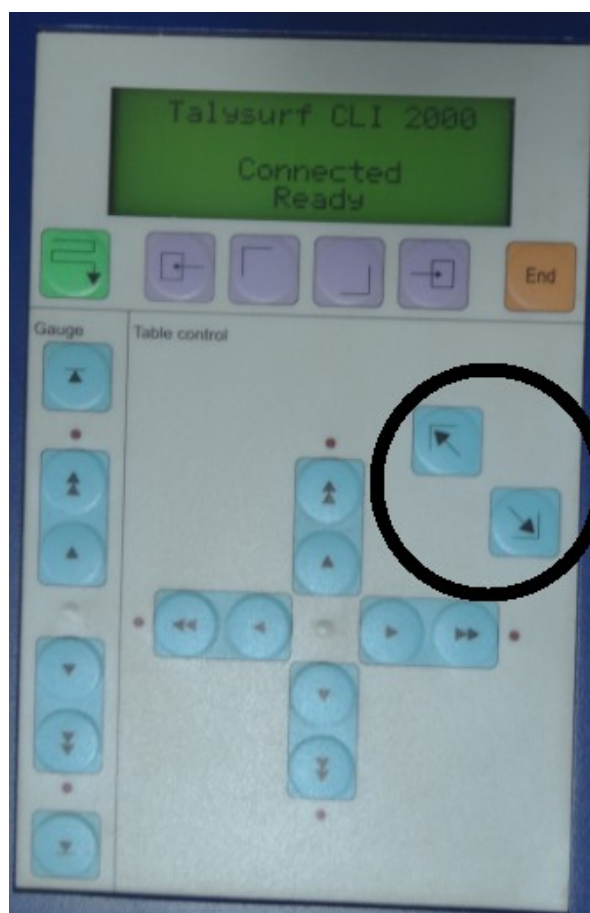


Figura A3.6: Tela do programa com escolha dos parâmetros de medição da rugosidade da raiz do entalhe dos corpos de prova, no interferômetro

## A P Ê N D I C E IV

### Determinação da resolução da medição com microscópio óptico

A fim de determinar a resolução da medição, para as diferentes lentes do microscópio óptico (5 X, 10 X, 20 X e 50 X) que permitem a completa visualização do raio de arredondamento do entalhe, foi utilizada uma régua de vidro do fabricante Carl Zeiss, com faixa nominal de 1 mm e resolução de 0,01 mm, Fig. A4.1a. Como a referida régua não possui certificado de calibração, os dados utilizados para o cálculo da incerteza associada à calibração do microscópio óptico foram obtidos conforme Vuolo (1996).

Uma imagem da escala da régua de vidro foi obtida utilizando-se cada uma das lentes especificadas, na posição horizontal e na posição vertical da régua de vidro. A Fig. A4.1b mostra um detalhe da imagem obtida da escala na posição horizontal com a lente de 50 X, enquanto que a Fig. A4.1c exibe um detalhe da imagem obtida da escala na posição vertical, com a mesma lente.

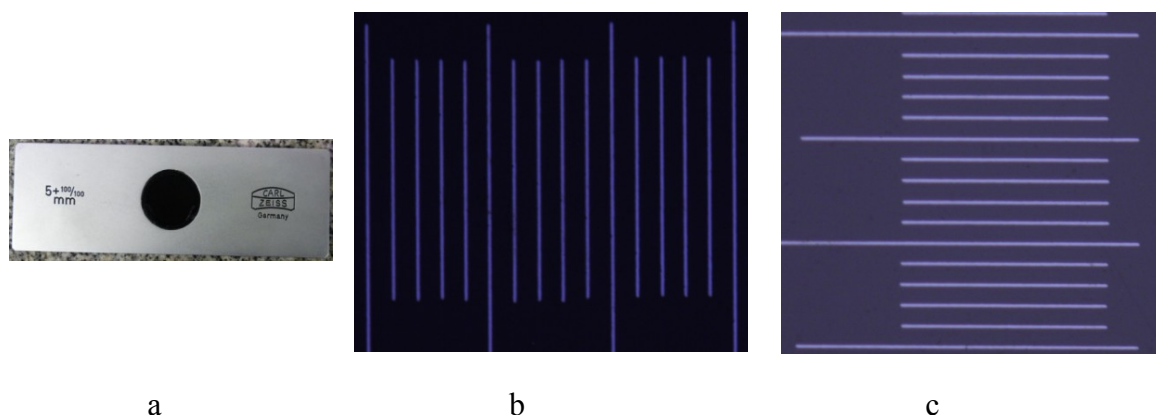


Figura A4.1: a) Régua de vidro utilizada; b) Escala da régua observada no microscópio óptico na posição horizontal com lente de 50 X; c) Escala da régua observada no microscópio óptico na posição vertical com lente de 50 X

A análise das imagens foi efetuada por meio do programa ImageJ. Foram traçadas cinco linhas com comprimento igual a 100  $\mu\text{m}$  e o número de pixels ocupado por cada linha foi determinado. Os resultados são exibidos na Tab. A4.1.

Tabela A4.1: Número de pixels ocupado por cada linha

Escala na posição horizontal				
Lente	5 X	10 X	20 X	50 X
Número de pixels 1	72,875	145,50	288,50	725,33
Número de pixels 2	73,000	145,00	288,50	726,67
Número de pixels 3	72,750	145,75	287,50	725,33
Número de pixels 4	72,875	145,25	289,50	728,00
Número de pixels 5	73,000	145,00	288,00	726,67
Média ( $\overline{Pih}$ )	72,900	145,30	288,40	726,40
Desvio padrão ( $s_h$ )	0,104	0,32	0,74	1,12
Escala na posição vertical				
Lente	5 X	10 X	20 X	50 X
Número de pixels 1	72,000	146,25	289,00	726,67
Número de pixels 2	71,833	145,50	288,50	728,00
Número de pixels 3	72,167	145,75	289,00	726,67
Número de pixels 4	72,500	145,25	288,50	728,00
Número de pixels 5	72,167	146,00	289,50	728,00
Média ( $\overline{Piv}$ )	72,133	145,75	288,90	727,47
Desvio padrão ( $s_v$ )	0,247	0,40	0,42	0,73

Analisando-se os valores de  $\overline{Pih}$  e  $\overline{Piv}$ , observa-se que existe uma diferença entre eles, embora se saiba que o pixel é quadrado. Essa discrepância deve-se à incerteza da medição utilizando-se o programa ImageJ. Para os cálculos da incerteza associada à determinação da resolução do microscópio óptico,  $\overline{Pih}$  será utilizado visto que o raio de arredondamento do entalhe será medido nessa posição.

A resolução da medição para cada lente é dada pela Eq. (A4.1), em que  $\overline{Pih}$  é a média do número de pixels ocupados pelas cinco linhas traçadas, na posição horizontal da escala da régua de vidro.

$$Rm = \frac{100 \text{ } \mu\text{m}}{Pih} \quad (\text{A4.1})$$

A Eq. (A4.1) permite igualmente a obtenção do comprimento do pixel ( $Cp$ ), pois a resolução da imagem é dada pelo mesmo.

A Tab. A4.2 exhibe os valores de resolução obtidos em cada caso, arredondados com duas casas após a vírgula.

Tabela A4.2: Valores de resolução para cada uma das lentes

Lente	Resolução = comprimento do pixel ( $Cp$ ) [ $\mu\text{m}$ ]
5 X	1,37
10 X	0,69
20 X	0,35
50 X	0,14

A Tab. A4.3 apresenta os valores calculados para o comprimento do pixel por meio da Eq. (A3.1), para cada uma das lentes.

Tabela A4.3: Valores do comprimento do pixel ( $Cp$ ) para cada uma das lentes [ $\mu\text{m}$ ]

Lente	5 X	10 X	20 X	50 X
$Cp$ 1	1,372	0,687	0,347	0,138
$Cp$ 2	1,370	0,690	0,347	0,138
$Cp$ 3	1,374	0,686	0,348	0,138
$Cp$ 4	1,372	0,688	0,345	0,137
$Cp$ 5	1,370	0,690	0,347	0,138
Média ( $\overline{Cp}$ )	1,371	0,688	0,347	0,138
Desvio padrão ( $s$ )	0,002	0,002	0,001	0,001

A Eq. (A4.2) indica como determinar a resolução do sistema de medição para uma dada aplicação, em função da tolerância de projeto.



$$R_{sist} \leq \frac{Tol}{10} \quad (A4.2)$$

Em que  $R_{sist}$  simboliza a resolução do sistema de medição em questão e  $Tol$  exprime a tolerância de projeto.

Para o raio de arredondamento do entalhe igual a 250  $\mu m$ , a tolerância de projeto antes do lixamento é igual a 25  $\mu m$ . Para o raio de arredondamento do entalhe igual a 80  $\mu m$ , esta tolerância é igual a 10  $\mu m$ . No caso mais crítico, a resolução do sistema de medição deve ser menor ou igual a 1  $\mu m$ , logo a lente de 10 X satisfaz esta condição.

A incerteza associada à determinação da resolução do microscópio óptico ( $Rm$ ) foi determinada aplicando-se o método descrito no *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* – GUM (BIPM et al. 2008), com probabilidade de abrangência igual a 95 %. Para tanto foi utilizado o modelo proposto na Eq. (A4.3).

$$Rm = \overline{Cp} + \Delta R + \Delta A + \Delta IC \quad (A4.3)$$

Em que  $\overline{Cp}$  denota o comprimento médio do pixel considerando-se cinco ciclos de medição,  $\Delta R$  representa a correção devido à resolução da régua de vidro,  $\Delta A$  indica a correção devido à ampliação da objetiva do microscópio óptico e  $\Delta IC$  representa a correção devido à incerteza associada à calibração da régua de vidro.

Aplicando-se a lei de propagação de incertezas na Eq. (A4.3) e assumindo-se que não existe correlação entre as variáveis, obtém-se a Eq. (A4.4), que expressa a incerteza padrão combinada da medição da resolução do microscópio óptico para cada uma das lentes.

$$u_c^2(Rm) = \left( \frac{\partial Rm}{\partial \overline{Cp}} \right)^2 u^2(\overline{Cp}) + \left( \frac{\partial Rm}{\partial \Delta R} \right)^2 u^2(\Delta R) + \left( \frac{\partial Rm}{\partial \Delta A} \right)^2 u^2(\Delta A) + \left( \frac{\partial Rm}{\partial \Delta IC} \right)^2 u^2(\Delta IC) \quad (A4.4)$$

As derivadas ou coeficientes de sensibilidade são expressos na Eq. (A4.5):

$$\left( \frac{\partial Rm}{\partial \overline{Cp}} \right) = \left( \frac{\partial Rm}{\partial \Delta R} \right) = \left( \frac{\partial Rm}{\partial \Delta A} \right) = \left( \frac{\partial Rm}{\partial \Delta IC} \right) = 1 \quad (A4.5)$$

A incerteza padrão associada ao comprimento médio do pixel  $u(\overline{Cp})$  foi calculada conforme a Eq. (A4.6), considerando-se a distribuição *t-Student* com  $n-1$  graus de liberdade e avaliação do tipo A. Nesta equação, a variável  $s$  representa o desvio padrão experimental e  $n$  o número de linhas analisado.

$$u(\overline{Cp}) = \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (\text{A4.6})$$

A incerteza padrão associada à correção devido à resolução da régua de vidro  $u(\Delta R)$  foi estimada considerando-se uma distribuição retangular com infinitos graus de liberdade. Neste caso foi efetuada uma avaliação do tipo B, Eq. (A4.7).  $N$  indica a ampliação da lente utilizada e  $R$  representa a resolução da régua de vidro.

$$u(\Delta R) = \frac{R}{\sqrt{3N}} \quad (\text{A4.7})$$

A incerteza padrão associada à ampliação da lente  $u(\Delta A)$  é estimada pela Eq. (A4.8). Foi utilizada uma avaliação do tipo B e uma distribuição normal com infinitos graus de liberdade. O valor do fator de abrangência ( $k$ ) foi considerado igual a 2.

$$u(\Delta A) = \frac{0,0001 \cdot \overline{Cp}}{k} \quad (\text{A4.8})$$

A incerteza padrão associada à calibração da régua de vidro  $u(\Delta IC)$  é estimada por Vuolo (1996), segundo a Eq. (A4.9), em que  $R$  representa a resolução da régua de vidro. Foi utilizada uma avaliação do tipo B e uma distribuição normal com infinitos graus de liberdade.

$$u(\Delta IC) = \frac{R}{2,00} \quad (\text{A4.9})$$

O número de graus de liberdade efetivos do sistema ( $\nu_{ef}$ ) é dado pela Eq. (A4.10).

$$v_{ef} = \frac{u_c^4(Cp)}{\sum_{i=1}^N \frac{u^4(y_i)}{v_i}} = \frac{u_c^4(Cp)}{\frac{u^4(\bar{X})}{n-1}} \quad (\text{A4.10})$$

A incerteza expandida ( $U$ ) é então calculada segundo a Eq. (A4.11).

$$U = k \cdot u_c \quad (\text{A4.11})$$

Em que  $k$  é o fator de abrangência, obtido por meio de uma tabela segundo a probabilidade de abrangência de 95 % adotada e o número de graus de liberdade efetivos do sistema.

A Tab. A4.4 exibe os resultados de incerteza padrão combinada, de incerteza expandida e o valor do fator de abrangência para cada uma das lentes, com probabilidade de abrangência de 95%.

Tabela A4.4: Valores de incerteza padrão combinada, de incerteza expandida e fator de abrangência para as lentes

Lente	$u_c$ [μm]	$U$ [μm]	$k$
5 X	5,131602	10,057939	1,96
10 X	5,033223	9,865117	1,96
20 X	5,008326	9,816320	1,96
50 X	5,001333	9,802613	1,96

## A P Ê N D I C E V

### **Verificação da ferramenta “círculo” do microscópio óptico utilizada na medição do raio de arredondamento do entalhe**

Visando verificar se as medições do raio de arredondamento do entalhe com a ferramenta “círculo” do microscópio óptico são confiáveis, mediu-se cinco vezes o raio de um anel padrão de aço com diâmetro nominal de 5,000 mm, Fig. A5.1a, com lente de 5 X. Devido ao valor elevado do diâmetro do anel padrão, não foi possível utilizar outras lentes. A ferramenta “círculo” presente no programa do microscópio óptico permite que um círculo, de raio conhecido, seja ajustado ao perfil circular exibido na imagem ampliada do anel padrão.



a



b

Figura A5.1: Medição do raio do anel padrão (a) no microscópio óptico com lente de 5 X

Na Fig. A5.2 é mostrada a imagem do anel padrão durante a medição 1.

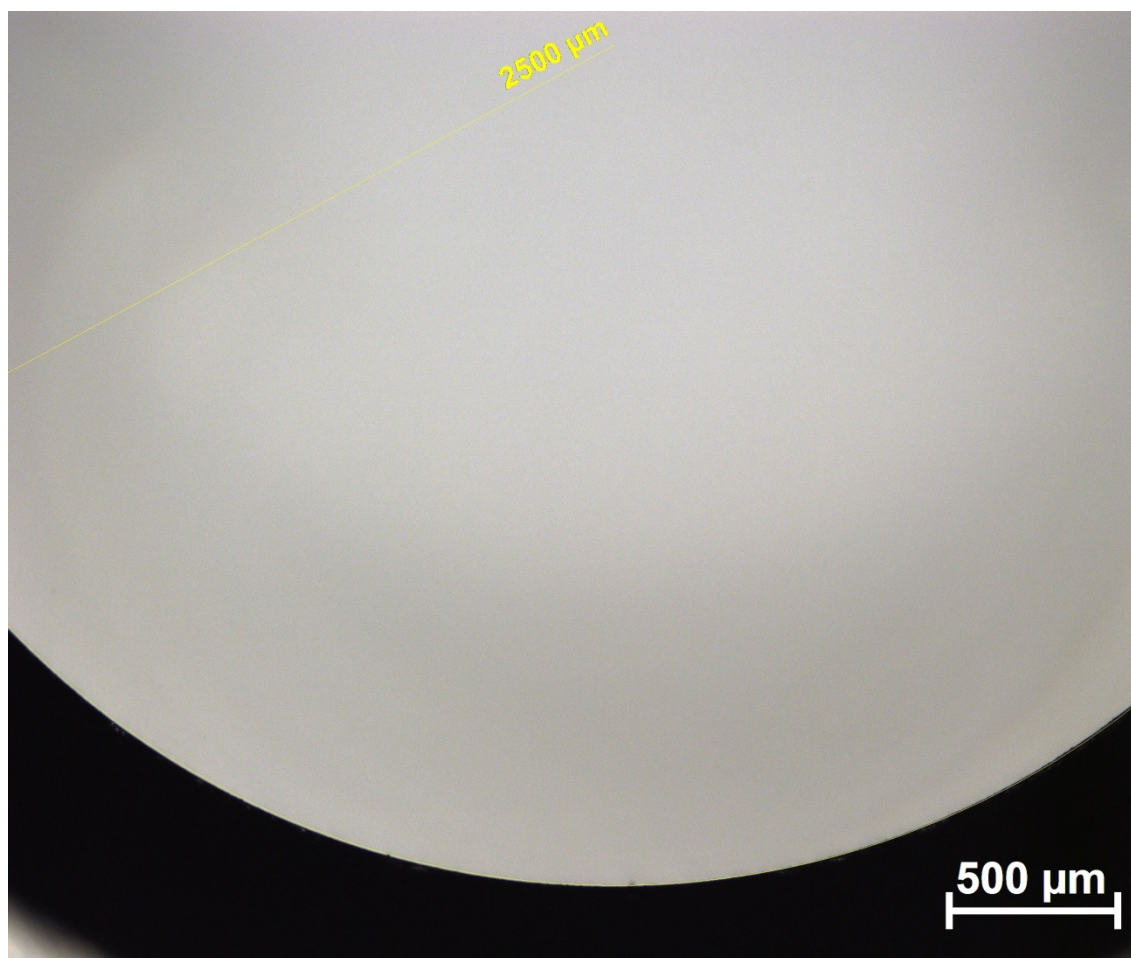


Figura A5.2: Ajuste de um círculo com raio conhecido ao diâmetro do anel padrão

O resultado das medições é exibido na Tab. A5.1.

Tabela A5.1: Valores de medição

Medição	Diâmetro interno ( $\mu\text{m}$ )
1	5000,00
2	5000,22
3	4999,96
4	5000,28
5	4999,82
Média	5000,06
Desvio padrão	0,19

A incerteza associada à medição do diâmetro interno do anel padrão ( $D$ ) foi determinada aplicando-se o método descrito no *Guide to the Expression of Uncertainty in*

*Measurement* - GUM (BIPM et al. 2008), com probabilidade de abrangência igual a 95 % por meio do modelo proposto na Eq. (A5.1).

$$D = \bar{X} + \Delta R + \Delta A + \Delta IC \quad (A5.1)$$

Em que a média das leituras é representada por  $\bar{X}$ , a correção devido à resolução da lente é dada por  $\Delta R$ , a correção devido à ampliação da objetiva é denotada por  $\Delta A$  e a correção associada à calibração do microscópio é indicada por  $\Delta IC$ .

Aplicando-se a lei de propagação de incertezas na Eq. (A5.1) e assumindo-se que não existe correlação entre as variáveis, obtém-se a Eq. (A5.2), que expressa a incerteza padrão combinada da medição do diâmetro interno do anel padrão.

$$u_c^2(D) = \left( \frac{\partial D}{\partial \bar{X}} \right)^2 u^2(\bar{X}) + \left( \frac{\partial D}{\partial \Delta R} \right)^2 u^2(\Delta R) + \left( \frac{\partial D}{\partial \Delta A} \right)^2 u^2(\Delta A) + \left( \frac{\partial D}{\partial \Delta IC} \right)^2 u^2(\Delta IC) \quad (A5.2)$$

As derivadas ou coeficientes de sensibilidade são expressos na Eq. (A5.3):

$$\left( \frac{\partial D}{\partial \bar{X}} \right) = \left( \frac{\partial D}{\partial \Delta R} \right) = \left( \frac{\partial D}{\partial \Delta A} \right) = \left( \frac{\partial D}{\partial \Delta IC} \right) = 1 \quad (A5.3)$$

A incerteza padrão associada à média das leituras  $u(\bar{X})$  foi calculada conforme a Eq. (A5.4), considerando-se a distribuição *t-Student* com  $n-1$  graus de liberdade e avaliação do tipo A. Nesta equação, a variável  $s$  representa o desvio padrão experimental e  $n$  o número de medições efetuado.

$$u(\bar{X}) = \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (A5.4)$$

A incerteza padrão associada à correção devido à resolução da lente  $u(\Delta R)$  foi estimada considerando-se uma distribuição retangular com infinitos graus de liberdade. Neste caso foi efetuada uma avaliação do tipo B, Eq. (A5.5).  $R$  indica a resolução da lente utilizada, obtida no Apêndice III.

$$u(\Delta R) = \frac{R}{2\sqrt{3}} \quad (\text{A5.5})$$

A incerteza padrão associada à ampliação da lente  $u(\Delta A)$  é estimada pela Eq. (A5.6). Foi utilizada uma avaliação do tipo B e uma distribuição normal com infinitos graus de liberdade.

$$u(\Delta A) = \frac{0,0001 \cdot \bar{X}}{2} \quad (\text{A5.6})$$

A incerteza padrão associada à calibração do microscópio  $u(\Delta IC)$  foi calculada no Apêndice III, para a lente de 5 X. Foi utilizada uma avaliação do tipo B e uma distribuição t-student.

O número de graus de liberdade efetivos do sistema ( $\nu_{ef}$ ) é dado pela Eq. (A5.7).

$$\nu_{ef} = \frac{u_c^4(D)}{\sum_{i=1}^N \frac{u^4(y_i)}{\nu_i}} = \frac{u_c^4(D)}{\frac{u^4(\bar{X})}{n-1}} \quad (\text{A5.7})$$

A incerteza expandida ( $U$ ) é então calculada segundo a Eq. (A5.8).

$$U = k \cdot u_c \quad (\text{A5.8})$$

Em que  $k$  é o fator de abrangência, obtido por meio de uma tabela segundo a probabilidade de abrangência de 95 % adotada.

A Tab. A5.2 exibe os valores de incerteza padrão combinada, de incerteza expandida e do fator de abrangência para a medição do diâmetro do anel padrão.

Tabela A5.2: Valores de incerteza padrão combinada, de incerteza expandida e fator de abrangência para a medição do diâmetro do anel padrão

$u_c$ [ $\mu\text{m}$ ]	$U$ [ $\mu\text{m}$ ]	$k$
5,153630	10,101114	1,96



## Apêndice VI: Rotina MATLAB para cálculo do perfil de carregamento em patamares dos corpos de prova

Utilizada para corpos de prova com dimensões nominais iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm ou a 30 mm x 30 mm x 200 mm

```
clear all
close all
clc

t=[0:1:300];

FFS=92.73 % CP 50(84,3 x 1,1)

FF=linspace(0,FFS,21);
tt=linspace(0,0,21);
for i=2:1:21
    if i>=1 && i<=11
        tt(i)=(i-1)*7200;
    else
        tt(i)=tt(i-1)+2*7200;
    end
end

for i=1:1:20
    for j=tt(i)+1:1:tt(i+1)
        Fs(j)=i*0.05*FFS;
    end
end

F=linspace(0,0,length(Fs)+1);

for i=1:length(Fs);
    F(i+1)=Fs(i);
end

t=t';
F=F';

Entrada(:,1)=tt;
Entrada(:,2)=FF;

for j=3:1:7
    for i=1:1:length(tt)
        Entrada(i,j)=0.0000;
    end
end
```

## Apêndice VII: Rotina MATLAB para cálculo dos coeficientes $x$ e $y$ da equação da tensão mecânica no corpo de prova

Corpos de prova com dimensões nominais iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm

```
function [] = tensao(b,h,L_CP,k) % (mm,mm,mm,sem unidade)

clc

syms Fa
syms teta

d1=24.009; %[mm]
d3=400.008; %[mm]

% Procedimento de cálculo de d6 para corpo de prova 10 mm x 10 mm x 60 mm

dA1=67.916;
rS=14.998/2;
dS=50.469;
rA1=7.0804/2;

dA2=67.536;
rB=14.992/2;
dB=50.472;
rA2=7.1264/2;

d6=L_CP+dA1+rS-dS+rA1+dA2+rB-dB+rA2

sig=k*Fa*((3/(b*h^2))*(2*d1*sin(teta)+2*d3*cos(teta)+d6*sin(teta))-
(cos(teta)/(b*h)));

% Fa[kN] ; teta [°] ; sig [MPa]

pretty(sig)

end
```

Corpos de prova com dimensões nominais iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm

```
function [] = tensao(b,h,L_CP,k) % (mm, mm, mm, sem unidade)

clc

syms Fa
syms teta

d1=24.009; %[mm]
d3=400.008; %[mm]

% Procedimento de cálculo de d6 para corpo de prova 30 mm x 30 mm x
200 mm

r1=14.992/2;
r2=14.998/2;
y1=50.472;
y2=50.469;
d6=L_CP+r1+r2-y1-y2

sig=1000*k*Fa*((3/(b*h^2))*(2*d1*sin(teta)+2*d3*cos(teta)+d6*sin(teta))-
(cos(teta)/(b*h)));

% Fa[kN] ; teta [°] ; sig [MPa]

pretty(sig)

end
```

**Apêndice VIII: Valores dos coeficientes calculados  $x$  e  $y$  da equação da tensão mecânica no corpo de prova**

Corpos de prova com dimensões nominais iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm

Corpo de prova	$x$	$y$
1	114,2660	23,4469
2	114,6626	23,5474
3	114,1663	23,4404
4	115,7165	23,7541
5	114,6646	23,5518
7	114,5929	23,5564
8	114,3240	23,4921
9	114,6959	23,5582
10	116,1216	23,8653
11	115,1533	23,6594
13	115,0238	23,6010
14	114,6659	23,5375
15	114,7778	23,5600
17	114,2882	23,4595
18	114,8320	23,5661
19	115,6562	23,7330
20	114,6861	23,5456
21	114,9541	23,6027
22	114,6057	23,5397
24	115,1203	23,6356
25	114,2737	23,4344
26	115,1103	23,6263
27	115,2518	23,6630
28	115,1218	23,6020
30	114,1842	23,4206

Corpos de prova com dimensões nominais iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm

Corpo de prova	$x$	$y$
31	5,9699	1,2329
32	6,0121	1,2419
33	5,9599	1,2313
34	6,1235	1,2647
35	6,1209	1,2646
36	6,2867	1,2983
37	6,1753	1,2754
38	5,9829	1,2363
39	5,9975	1,2392
40	5,8774	1,2144
41	5,7898	1,1957
42	5,8954	1,2177
43	5,9759	1,2352
44	5,9400	1,2265
45	5,9737	1,2347
46	6,0709	1,2534
47	5,8372	1,2065
48	6,1714	1,2742
49	6,1730	1,2746
50	6,1968	1,2800
51	6,1108	1,2622
52	6,1846	1,2775
55	6,0618	1,2517
56	6,0581	1,2510

# A P Ê N D I C E IX

## Rotinas MATLAB para cálculo da incerteza associada à tensão mecânica no corpo de prova no teste de verificação (20 kN e 1 kN)

```
% GUM: RSL 2 - MARCUS VINÍCIUS REZENDE JÚNIOR

% Cálculo da incerteza associada à medição de tensão no teste de
verificação da célula de carga de 20 kN

clear all
clc
tic

% Nomenclatura das variáveis

% Fa Força aplicada pelo atuador (Fa)
% b Largura da seção transversal (b)
% h Profundidade da seção transversal (h)
% d1 Distância vertical da força F1 (d1)
% d3 Distância horizontal do eixo de giro do braço de flexão em relação ao
eixo central do corpo de prova (d3)
% teta Ângulo do encoder (teta)
% Db Diâmetro do furo do rolete mais acima no braço (r2)
% db Maior distância vertical entre centros dos furos dos roletes do braço
(y2)
% L Comprimento do corpo de prova (L_CP)
% Dsi Diâmetro do furo do rolete mais abaixo no suporte do corpo de prova
(r1)
% dsi Maior distância vertical entre centros dos furos dos roletes do
suporte do corpo de prova (y1)

syms da2 Db db Da2 L da1 Dsi dsi Da1
d6_aux = L + Dsi + Db - dsi - db;

% Cálculo das derivadas parciais para d6 (Etapa 1)

dL = diff(d6_aux,L);
dDsi = diff(d6_aux,Dsi);
dDb = diff(d6_aux,Db);
ddsi = diff(d6_aux,dsi);
ddb = diff(d6_aux,db);
```

```

% Valores médios e incertezas-padrão

L = 200.5033; % OK
uL = 0.06; % OK
vL = 4; % OK

% Variáveis invariáveis

Db = 14.998; % OK
uDb = 0.002; % OK
vDb = 4; % OK

db = 50.469; % OK
udb = 0.003; % OK
vdb = 4; % OK

Dsi = 14.992; % OK
uDsi = 0.001; % OK
vDsi = 4; % OK

dsi = 50.472; % OK
udsi = 0.007; % OK
vdsi = 4; % OK

% Cálculo das derivadas parciais para d6 (Etapa 2)

dL = double(subs(dL));
dDb = double(subs(dDb));
ddb = double(subs(ddb));
dDsi = double(subs(dDsi));
ddsi = double(subs(ddsi));
d6_aux = double(subs(d6_aux));

% Cálculo de uc para d6

f5 = dL*uL;
f2 = dDb*uDb;
f3 = ddb*udb;
f7 = dDsi*uDsi;
f8 = ddsi*udsi;
f0 = [f5; f2; f3; f7; f8];
ud6 = sqrt(sum(f0.^2));
vd6 = ud6^4/(f5^4/vL + f2^4/vDb + f3^4/vdb + f7^4/vDsi + f8^4/vdsi);

syms Fa b h d1 teta d3 d6

Tensao = 1000*Fa*(3/(b*h^2)*(2*d1*sin(teta)+2*d3*cos(teta)+d6*sin(teta))-
cos(teta)/(b*h));

% Cálculo das derivadas parciais (Etapa 1)

dFa = diff(Tensao,Fa);
db = diff(Tensao,b);
dh = diff(Tensao,h);
dd1 = diff(Tensao,d1);
dteta = diff(Tensao,teta);

```

```

dd3 = diff(Tensao,d3);
dd6 = diff(Tensao,d6);

% Valores médios e incertezas-padrão

Fa = 3.1496; % OK
uFa = 0.0019635; % OK
vFa = 299; % OK

teta = (89.3-90)*pi/180; % OK
uteta = (0.104053)*pi/180; % OK
vteta = 299; % OK

b = 29.86667; % OK
ub = 0.02; % OK
vb = 4; % OK

h = 29.87; % OK
uh = 0.04; % OK
vh = 4; % OK
d6 = double(subs(d6_aux));

% Variáveis invariantes

d1 = 24.009; % OK
ud1 = 0.007; % OK
vd1 = 4; % OK
d3 = 400.008; % OK
ud3 = 0.016; % OK
vd3 = 4; % OK
Tensao = double(subs(Tensao));

% Cálculo das derivadas parciais (Etapa 1)

dFa = double(subs(dFa));
db = double(subs(db));
dh = double(subs(dh));
dd1 = double(subs(dd1));
dteta = double(subs(dteta));
dd3 = double(subs(dd3));
dd6 = double(subs(dd6));

% Cálculo de uc

f1 = dFa*uFa;
f2 = db*ub;
f3 = dh*uh;
f4 = dd1*ud1;
f5 = dteta*uteta;
f6 = dd3*ud3;
f7 = dd6*ud6;
f0 = [f1; f2; f3; f4; f5; f6; f7];
uc = sqrt(sum(f0.^2));
veff = uc^4/(f1^4/vFa + f2^4/vb + f3^4/vh + f4^4/vd1 + f5^4/vteta +
f6^4/vd3 + f7^4/vd6);
    if veff >= 100
        k = 2.00;
    else

```



```

        k = tinv(1-(0.05/2),floor(veff));
    end

% Cálculo de U

U = k*uc;

% Apresentação dos resultados

fprintf('RESULTADOS GUM');
fprintf('\n');
Colunas = {'G','DP','GL','CS','u','Contribuicao'};
Linhas = {'1','2','3','4','5','6','7'};
Grandeza = {'Fa' Fa 'N';'b' b 'mm';'h' h 'mm';'d1' d1 'mm';'teta' teta
'mm';'d3' d3 'mm';'d6' d6 'mm'};
DP = {'t de Student';'t de Student';'t de Student';'t de
Student';'Normal';'t de Student';'t de Student'};
GL = [vFa;vb;vh;vd1;vteta;vd3;vd6];
CS = {dFa;db;dh;ddl;dteta;dd3;dd6};
u = {uFa 'mm';ub 'mm';uh 'mm';udl 'mm';uteta 'mm';ud3 'mm';ud6 'mm'};
Contribuicao = (f0/uc).^2*100;
C_round = round(Contribuicao,1);
C_round = {C_round(1) '%';C_round(2) '%';C_round(3) '%';C_round(4)
'%';C_round(5) '%';C_round(6) '%';C_round(7) '%'};
AVALIACAO =
table(Grandeza,DP,GL,CS,u,C_round,'RowNames',Linhas,'VariableNames',Colunas
);
disp(AVALIACAO);
fprintf('Incerteza-padrão combinada = %1.6f MPa\n',uc);
fprintf('Graus de liberdade efetivos = %1.2f\n',veff);
fprintf('Fator de abrangência (k) = %1.2f\n',k);
fprintf('Incerteza expandida de medição = %1.6f MPa\n',U);
fprintf('\n');
fprintf('RESULTADO DA MEDIÇÃO = (%1.3f ± %1.3f) MPa\n',Tensao, U);
disp('95 % de probabilidade de abrangência')

```

```

% GUM: RSL 2 - MARCUS VINÍCIUS REZENDE JÚNIOR

% Cálculo da incerteza associada à medição de tensão no teste de
verificação da célula de carga de 1 kN

clear all
clc
tic

% Nomenclatura das variáveis

% Fa Força aplicada pelo atuador (Fa)
% b Largura da seção transversal (b)
% h Profundidade da seção transversal (h)
% d1 Distância vertical da força F1 (d1)
% d3 Distância horizontal do eixo de giro do braço de flexão em relação ao
eixo central do corpo de prova (d3)
% teta Ângulo do encoder (teta)
% da1 Distância entre o topo do adaptador superior e o centro do furo do
rolete mais acima no adaptador superior do corpo de prova (da1)
% Db Diâmetro do furo do rolete mais acima no braço (FIb)
% db Maior distância vertical entre centros dos furos dos roletes do braço
(db)
% Da2 Diâmetro do furo do rolete mais acima no adaptador superior do corpo
de prova (FIa1)
% L Comprimento do corpo de prova (LCP)
% da2 Distância entre a base do adaptador inferior e o centro do furo do
rolete mais abaixo no adaptador inferior do corpo de prova (da2)
% Dsi Diâmetro do furo do rolete mais abaixo no suporte do corpo de prova
(FIs)
% dsi Maior distância vertical entre centros dos furos dos roletes do
suporte do corpo de prova (ds)
% Da1 Diâmetro do furo do rolete mais abaixo no adaptador inferior do corpo
de prova (FIa2)

syms da2 Db db Da2 L da1 Dsi dsi Da1
d6_aux = (da1 + Db/2 - db + Da2) + L + (da2 + Dsi - dsi + Da1);

% Cálculo das derivadas parciais para d6 (Etapa 1)
dda1 = diff(d6_aux,da1);
dDb = diff(d6_aux,Db);
ddb = diff(d6_aux,db);
dDa2 = diff(d6_aux,Da2);
dL = diff(d6_aux,L);
dda2 = diff(d6_aux,da2);
dDsi = diff(d6_aux,Dsi);
ddsi = diff(d6_aux,dsi);
dDa1 = diff(d6_aux,Da1);

% Valores médios e incertezas-padrão

L = 79.85; % OK
uL = 0.02; % OK
vL = 4; % OK

% Variáveis invariantes

da1 = 67.916; % OK

```

```

uda1 = 0.002; % OK
vda1 = 4; % OK

Db = 14.998; % OK
uDb = 0.002; % OK
vDb = 4; % OK

db = 50.469; % OK
udb = 0.003; % OK
vdb = 4; % OK

Da2 = 7.0804; % OK
uDa2 = 0.01; % OK
vDa2 = 4; % OK

da2 = 67.536; % OK
uda2 = 0.004; % OK
vda2 = 4; % OK

Dsi = 14.992; % OK
uDsi = 0.001; % OK
vDsi = 4; % OK

dsi = 50.472; % OK
udsi = 0.007; % OK
vdsi = 4; % OK

Da1 = 7.1264; % OK
uDa1 = 0.01; % OK
vDa1 = 4; % OK

% Cálculo das derivadas parciais para d6 (Etapa 2)

dL = double(subs(dL));
dda1 = double(subs(dda1));
dDb = double(subs(dDb));
ddb = double(subs(ddb));
dDa2 = double(subs(dDa2));
dda2 = double(subs(dda2));
dDsi = double(subs(dDsi));
ddsi = double(subs(ddsi));
dDa1 = double(subs(dDa1));
d6_aux = double(subs(d6_aux));

% Cálculo de uc para d6

f1 = dda2*uda2;
f2 = dDb*uDb;
f3 = ddb*udb;
f4 = dDa2*uDa2;
f5 = dL*uL;
f6 = dda1*uda1;
f7 = dDsi*uDsi;
f8 = ddsi*udsi;
f9 = dDa1*uDa1;
f0 = [f1; f2; f3; f4; f5; f6; f7; f8; f9];
ud6 = sqrt(sum(f0.^2));

```

```
vd6 = ud6^4/(f1^4/vda2 + f2^4/vDb + f3^4/vdb + f4^4/vDa2 + f5^4/vL +
f6^4/vda1 + f7^4/vDsi + f8^4/vdsi + f9^4/vDa1);
```

```
syms Fa b h d1 teta d3 d6
Tensao = Fa*(3/(b*h^2)*(2*d1*sin(teta)+2*d3*cos(teta)+d6*sin(teta))-
cos(teta)/(b*h));
```

```
% Cálculo das derivadas parciais (Etapa 1)
```

```
dFa = diff(Tensao,Fa);
db = diff(Tensao,b);
dh = diff(Tensao,h);
dd1 = diff(Tensao,d1);
dteta = diff(Tensao,teta);
dd3 = diff(Tensao,d3);
dd6 = diff(Tensao,d6);
```

```
% Valores médios e incertezas-padrão
```

```
Fa = 19.8963; % OK
uFa = 0.0123350; % OK
vFa = 299; % OK
```

```
teta = (86.42-90)*pi/180; % OK
uteta = (0.104053)*pi/180; % OK
vteta = 299; % OK
```

```
b = 12.04; % OK
ub = 0.02; % OK
vb = 4; % OK
```

```
h = 10.01; % OK
uh = 0.02; % OK
vh = 4; % OK
```

```
d6 = double(subs(d6_aux));
```

```
% Variáveis invariáveis
```

```
d1 = 24.009; % OK
ud1 = 0.007; % OK
vd1 = 4; % OK
d3 = 400.008; % OK
ud3 = 0.016; % OK
vd3 = 4; % OK
Tensao = double(subs(Tensao));
```

```
% Cálculo das derivadas parciais (Etapa 1)
```

```
dFa = double(subs(dFa));
db = double(subs(db));
dh = double(subs(dh));
dd1 = double(subs(dd1));
dteta = double(subs(dteta));
dd3 = double(subs(dd3));
dd6 = double(subs(dd6));
```

```

% Cálculo de uc

f1 = dFa*uFa;
f2 = db*ub;
f3 = dh*uh;
f4 = dd1*ud1;
f5 = dteta*uteta;
f6 = dd3*ud3;
f7 = dd6*ud6;
f0 = [f1; f2; f3; f4; f5; f6; f7];
uc = sqrt(sum(f0.^2));
veff = uc^4/(f1^4/vFa + f2^4/vb + f3^4/vh + f4^4/vd1 + f5^4/vteta +
f6^4/vd3 + f7^4/vd6);
    if veff >= 100
        k = 2.00;
    else
        k = tinv(1-(0.05/2),floor(veff));
    end

% Cálculo de U

U = k*uc;

% Apresentação dos resultados

fprintf('RESULTADOS GUM');
fprintf('\n');
Colunas = {'G','DP','GL','CS','u','Contribuicao'};
Linhas = {'1','2','3','4','5','6','7'};
Grandeza = {'Fa' Fa 'N'; 'b' b 'mm'; 'h' h 'mm'; 'd1' d1 'mm'; 'teta' teta
'mm'; 'd3' d3 'mm'; 'd6' d6 'mm'};
DP = {'t de Student'; 't de Student'; 't de Student'; 't de
Student'; 'Normal'; 't de Student'; 't de Student'};
GL = [vFa; vb; vh; vd1; vteta; vd3; vd6];
CS = {dFa; db; dh; dd1; dteta; dd3; dd6};
u = {uFa 'mm'; ub 'mm'; uh 'mm'; ud1 'mm'; uteta 'mm'; ud3 'mm'; ud6 'mm'};
Contribuicao = (f0/uc).^2*100;
C_round = round(Contribuicao,1);
C_round = {C_round(1) '%'; C_round(2) '%'; C_round(3) '%'; C_round(4)
'%'; C_round(5) '%'; C_round(6) '%'; C_round(7) '%'};
AVALIACAO =
table(Grandeza, DP, GL, CS, u, C_round, 'RowNames', Linhas, 'VariableNames', Colunas
);
disp(AVALIACAO);
fprintf('Incerteza-padrão combinada = %1.6f MPa\n',uc);
fprintf('Graus de liberdade efetivos = %1.2f\n',veff);
fprintf('Fator de abrangência (k) = %1.2f\n',k);
fprintf('Incerteza expandida de medição = %1.6f MPa\n',U);
fprintf('\n');
fprintf('RESULTADO DA MEDIÇÃO = (%1.2f ± %1.2f) MPa\n',Tensao, U);
disp('95 % de probabilidade de abrangência')

```

**Rotina MATLAB para encontrar a média e o desvio padrão de grandezas dos testes  
(força, ângulo e tensão mecânica)**

```

clear all;
close all;
clc;

format long

load resultados_3.txt;

r=[resultados_3];

f=r(:,3);
a=r(:,6);
t=r(:,1);

ref1=129600;
ref2=144000;

for i=1:1:length(t)

if t(i)>=ref1 && t(i)<=ref2

    tt(i)=t(i);
    ff(i)=f(i);
    aa(i)=a(i);

end

end

for i=1:1:length(tt)
    if t(i)>=ref1 && t(i)<=ref2
        v=i;
        break
    end
end

for i=v:1:length(tt)
    ttt(i-(v-1))=tt(i);
    fff(i-(v-1))=ff(i);
    aaa(i-(v-1))=aa(i);
end

media_forca=mean(fff)
desvio_forca=std(fff)

media_angulo=mean(aaa)
desvio_angulo=std(aaa)

```

# **A P Ê N D I C E X**

## **Controle dimensional e geométrico dos corpos de prova**

Neste apêndice encontram-se os resultados do controle dimensional e geométrico dos corpos de prova, dividido em: rugosidade da raiz do entalhe; rugosidade das faces dos corpos de prova; topografia do corpo de prova; raio de arredondamento da raiz do entalhe; comprimento dos corpos de prova; largura dos corpos de prova; altura dos corpos de prova; profundidade do entalhe; ângulo de abertura do entalhe; base do entalhe; desvio de paralelismo e desvio de perpendicularidade. Além disso, é exibida a topografia da superfície de um corpo de prova.

### **10.1. Rugosidade da raiz do entalhe dos corpos de prova**

A Figura 10.1 exibe o perfil tridimensional de rugosidade, realizado no interferômetro, da raiz não lixada de um entalhe com raio de arredondamento igual a  $(250 \pm 2) \mu\text{m}$ .

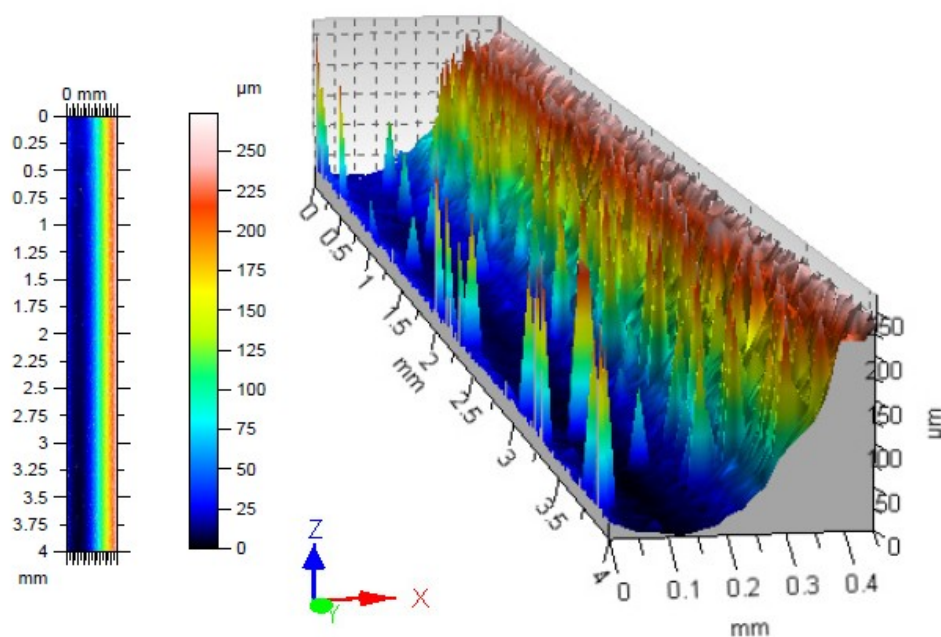


Figura 10.1: Perfil tridimensional de rugosidade da raiz de um entalhe não lixada

Na Figura 10.1 percebe-se a presença de alguns picos na superfície da raiz do entalhe, o que implica um elevado valor de rugosidade superficial da raiz do entalhe. O valor médio de rugosidade  $R_q$  obtido nesse caso foi igual a  $(1,85 \mu\text{m} \pm 0,14) \mu\text{m}$ .

A Figura 10.2 exibe o perfil tridimensional de rugosidade, realizado no interferômetro, da raiz lixada do mesmo entalhe da Fig. 10.1.



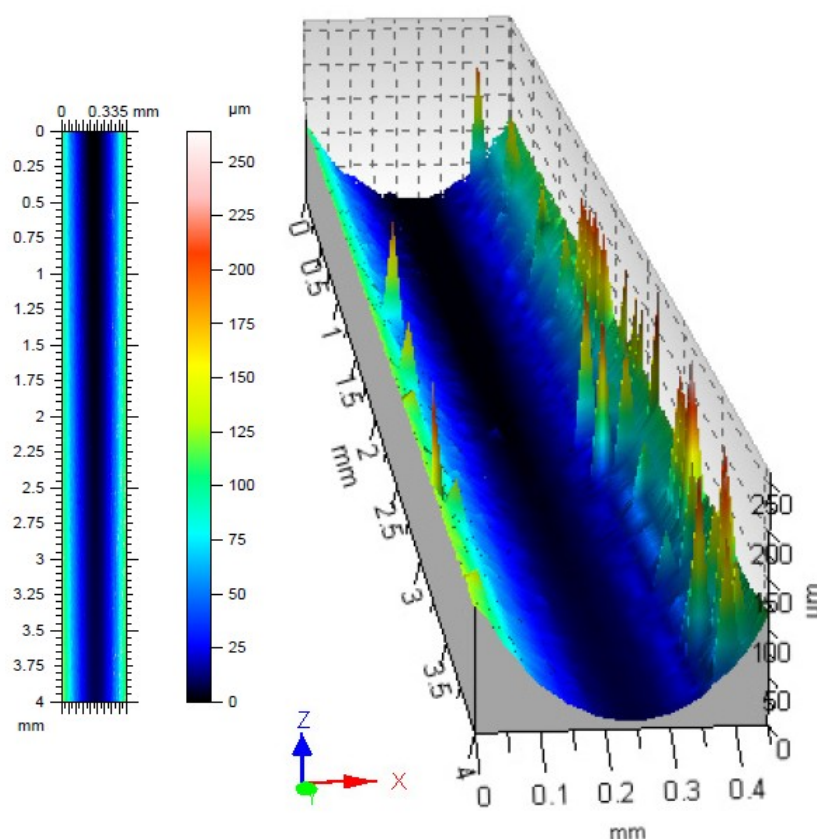


Figura 10.2: Perfil tridimensional de rugosidade da raiz lixada do entalhe

Na Figura 10.2 percebe-se que após o lixamento da raiz do entalhe, os picos anteriormente presentes na superfície da raiz do entalhe foram removidos, o que resulta um valor de rugosidade superficial menos elevado da raiz do entalhe. O valor médio de rugosidade  $R_q$  obtido nesse caso foi igual a  $(0,19 \mu\text{m} \pm 0,02) \mu\text{m}$ .

Os valores de rugosidade  $R_q$  e  $R_a$  da raiz do entalhe dos corpos de prova com dimensões 30 mm x 30 mm x 200 mm e 10 mm x 10 mm x 60 mm, são apresentados nas Figs. 10.3 a 10.6. Embora apenas a rugosidade  $R_q$  seja especificada pela norma ASTM F519 (ASTM, 2017), optou-se por apresentar igualmente os valores de  $R_a$  visto que esse parâmetro é bastante utilizado em Engenharia. Nas figuras são também apresentados a incerteza expandida (com probabilidade de abrangência igual a 95 %) e o valor da tolerância. O valor de referência (tolerância) para o parâmetro  $R_a$  foi utilizado como sendo 11 % menor do que o valor de  $R_q$ .

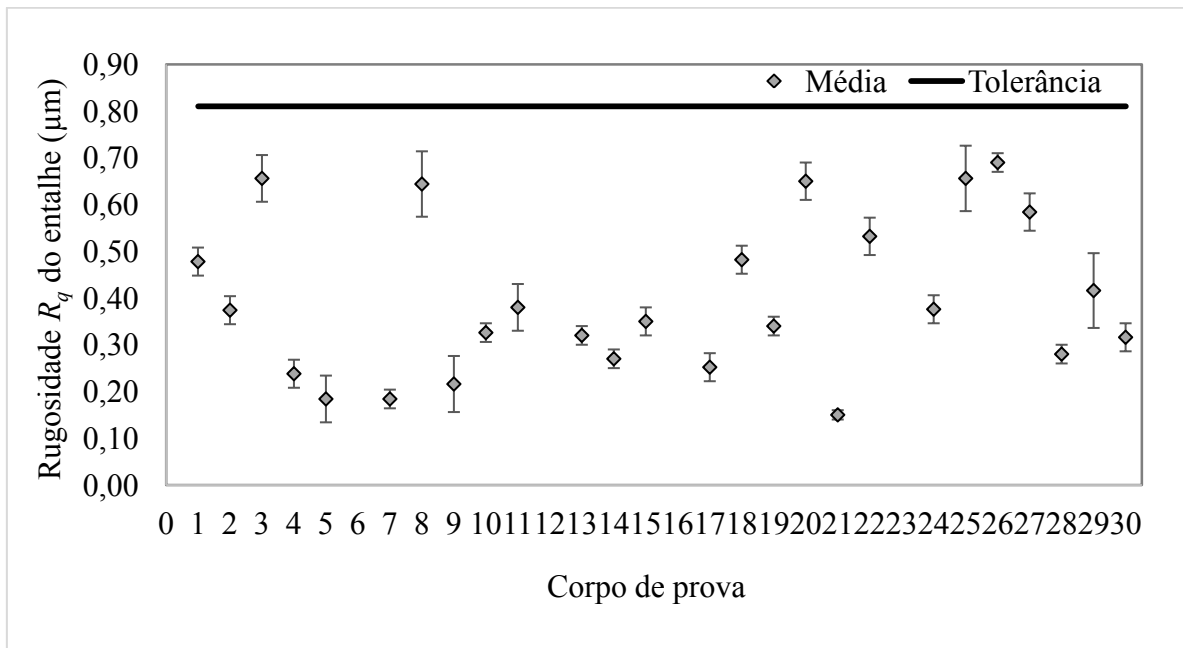


Figura 10.3: Valores médios da rugosidade  $R_q$  da raiz do entalhe dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

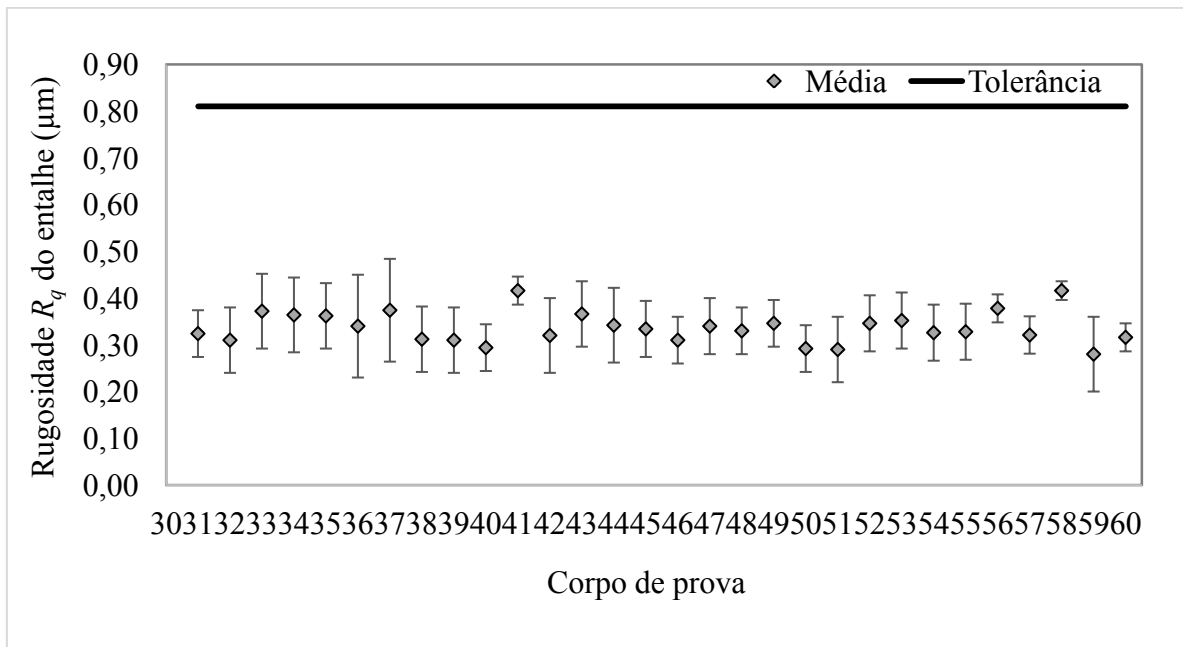


Figura 10.4: Valores médios da rugosidade  $R_q$  da raiz do entalhe dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

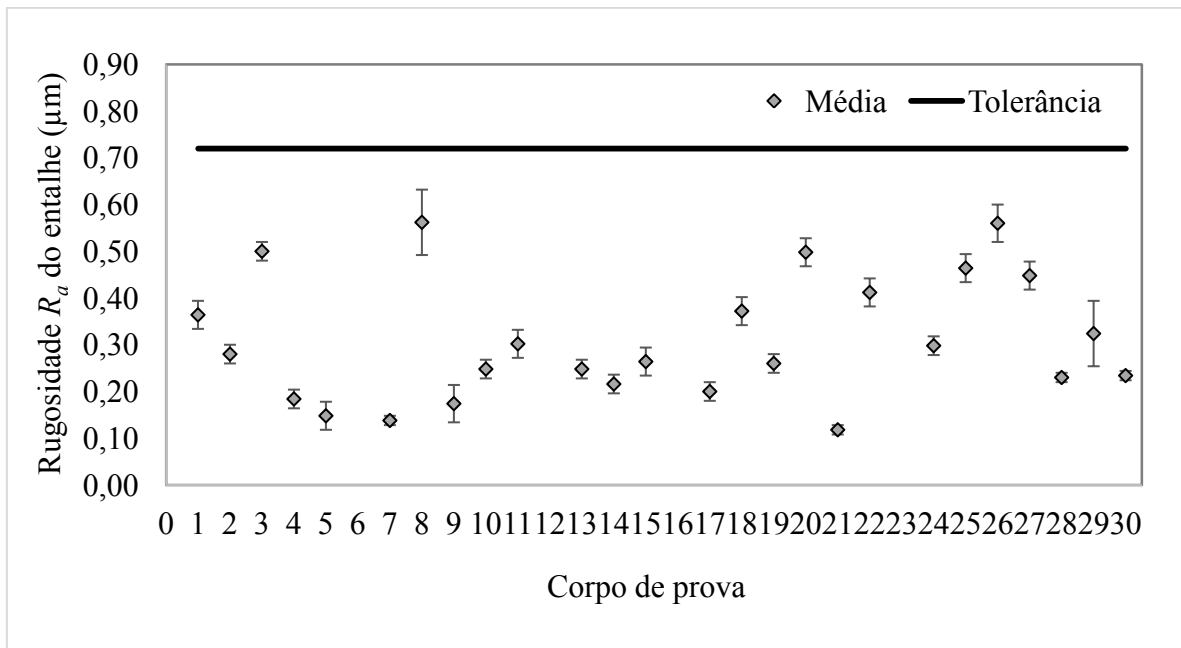


Figura 10.5: Valores médios da rugosidade  $R_a$  da raiz do entalhe dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

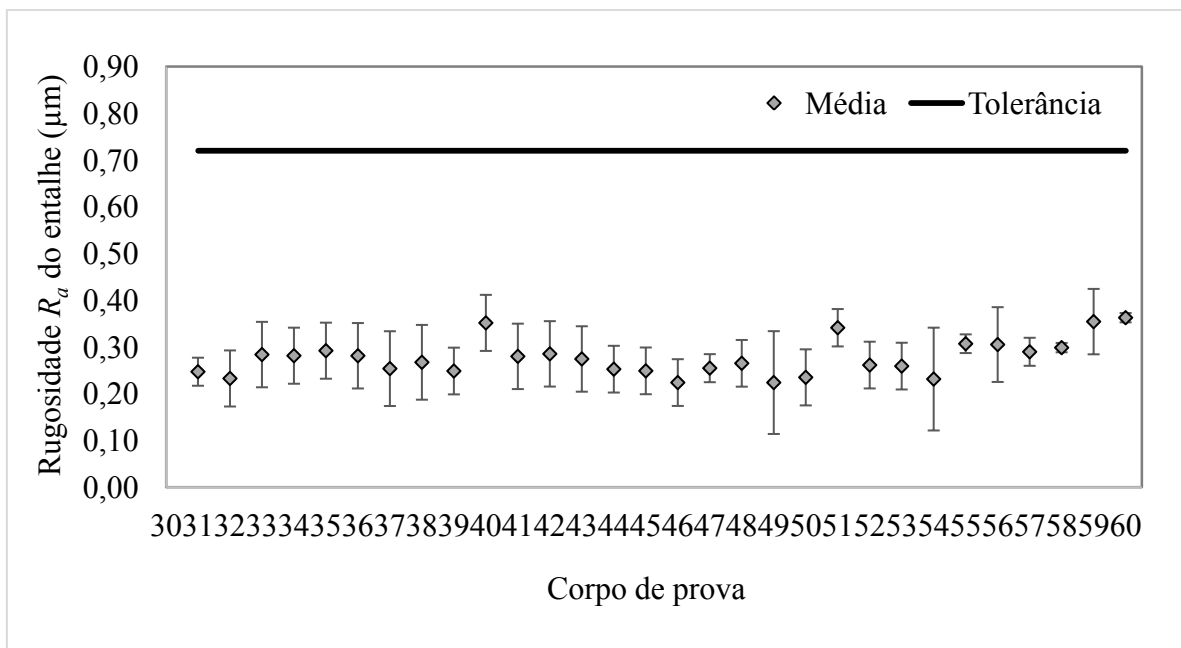


Figura 10.6: Valores médios da rugosidade  $R_a$  da raiz do entalhe dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

Observa-se das Figs. 10.3 a 10.6 que os valores obtidos para a rugosidade do entalhe encontram-se dentro da faixa de tolerância especificada pela norma ASTM F519 (ASTM, 2017). Como o processo de lixamento é manual e, portanto, menos controlado do que um processo automatizado, observa-se que a incerteza expandida apresenta valores significativamente maiores para alguns corpos de prova. Também se observa que os valores médios de rugosidade da raiz do entalhe para os corpos de prova com dimensões 10 mm x 10 mm x 60 mm (Figs. 10.4 e 10.6) variaram menos do que para os corpos de prova com dimensões 30 mm x 30 mm x 200 mm (Figs. 10.3 e 10.5). A justificativa para essa diferença encontra-se na ordem em que o lixamento foi realizado: primeiramente nos corpos de prova com dimensões 30 mm x 30 mm x 200 mm e meses mais tarde nos corpos de prova com dimensões 10 mm x 10 mm x 60 mm. Dessa forma o processo de lixamento nos corpos de prova com dimensões 10 mm x 10 mm x 60 mm foi mais bem dominado, pela experiência previamente adquirida.

## 10.2. Rugosidade das faces dos corpos de prova

Os valores obtidos de rugosidade  $R_q$  e  $R_a$  de cada uma das quatro faces dos corpos de prova com dimensões 30 mm x 30 mm x 200 mm e 10 mm x 10 mm x 60 mm, são apresentados nas Figs. 10.7 a 10.22. A tolerância da rugosidade  $R_q$  é definida na norma ASTM F519 (ASTM, 2017).

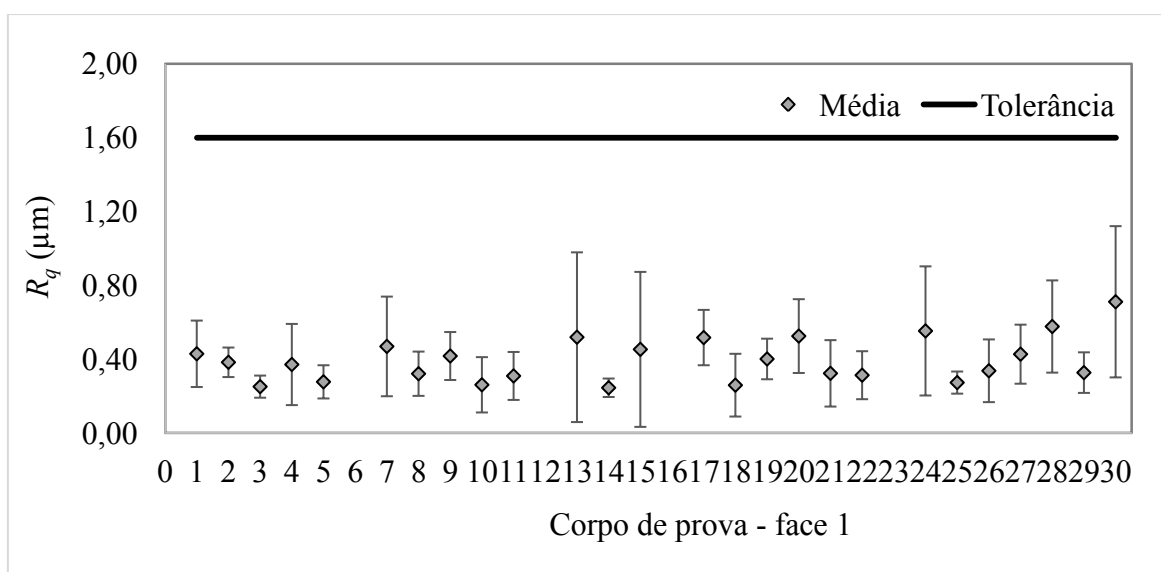


Figura 10.7: Valores médios de  $R_q$  da face 1 dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

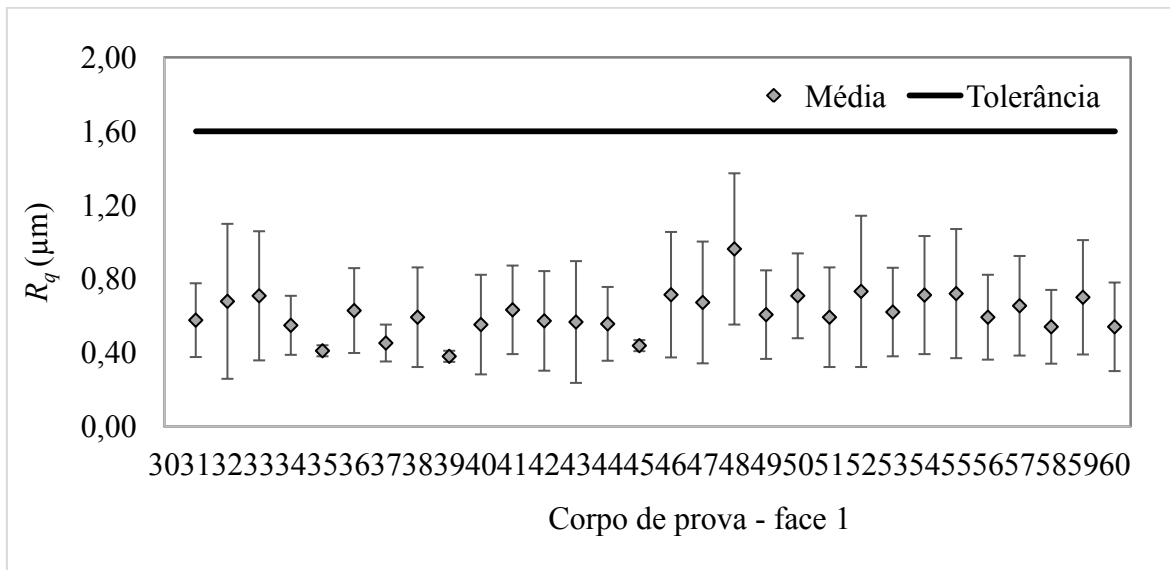


Figura 10.8: Valores médios de  $R_q$  da face 1 dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

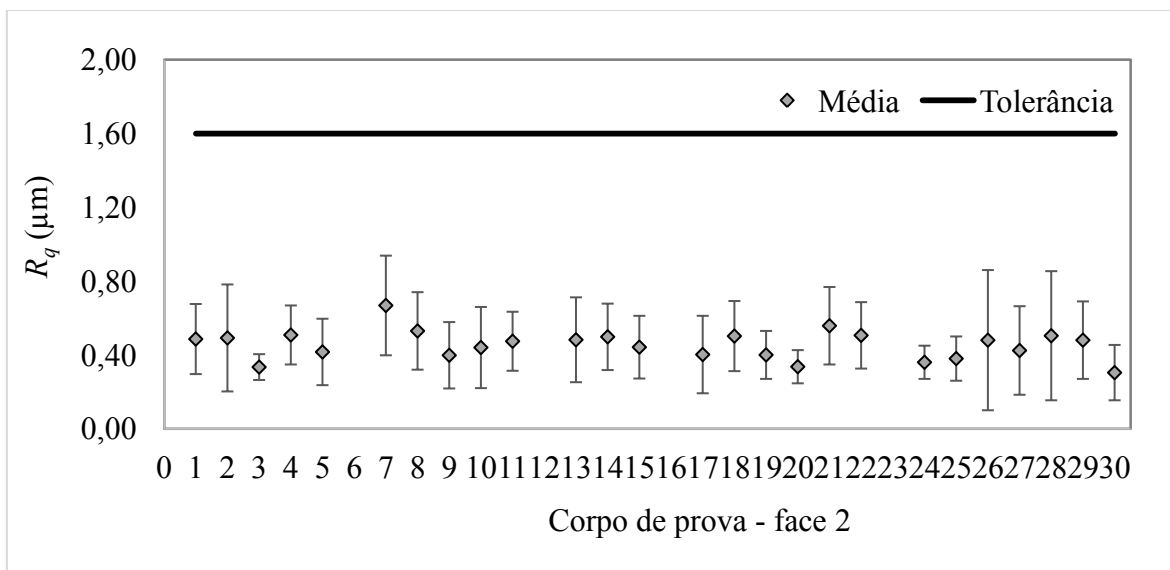


Figura 10.9: Valores médios de  $R_q$  da face 2 dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

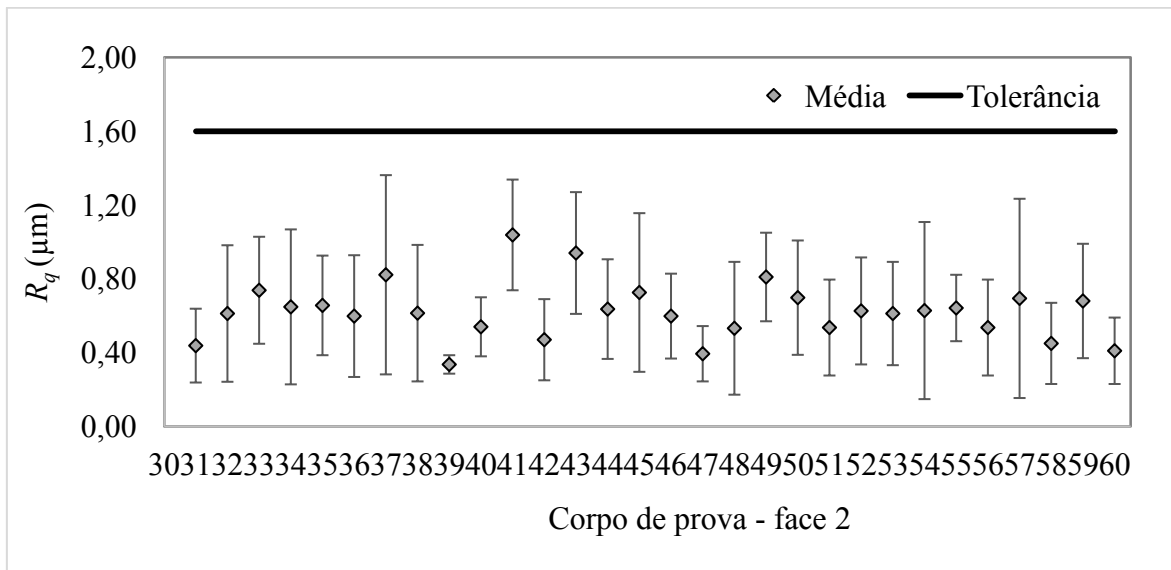


Figura 10.10: Valores médios de  $R_q$  da face 2 dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

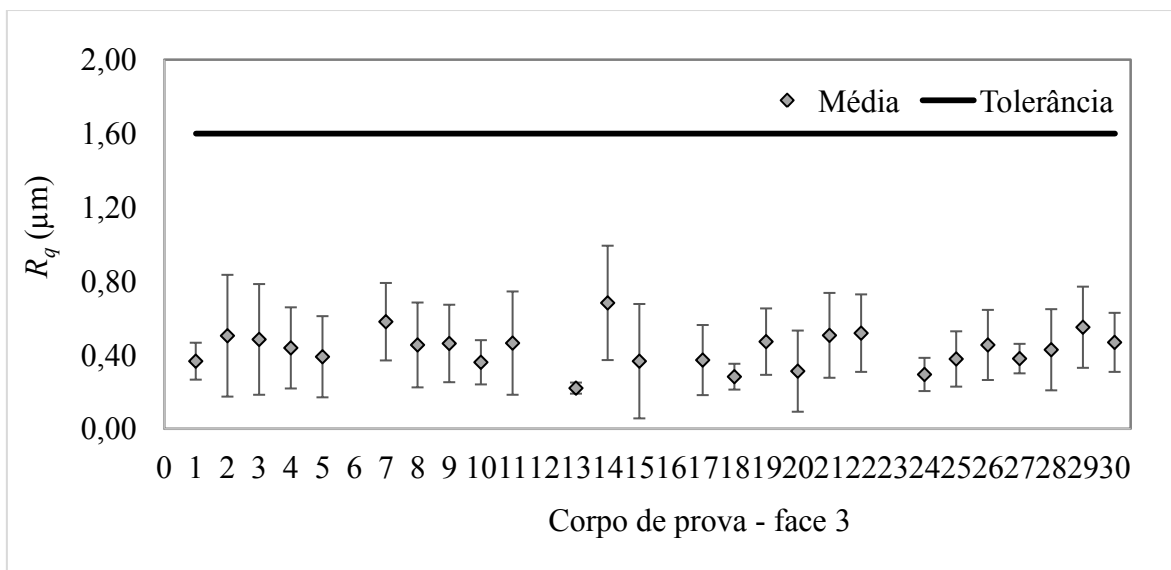


Figura 10.11: Valores médios de  $R_q$  da face 3 dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

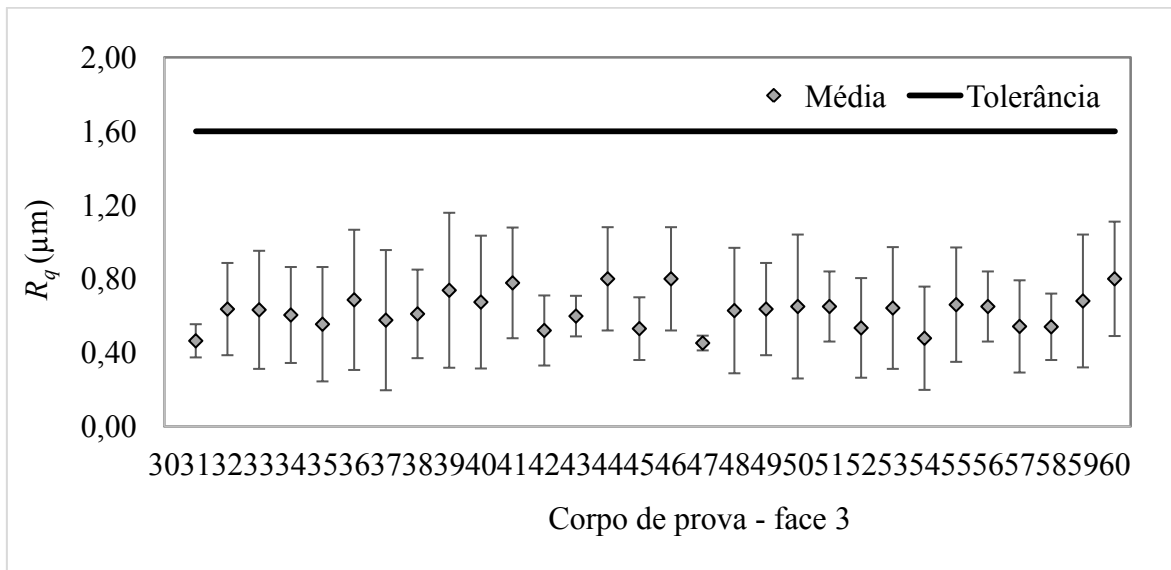


Figura 10.12: Valores médios de  $R_q$  da face 3 dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

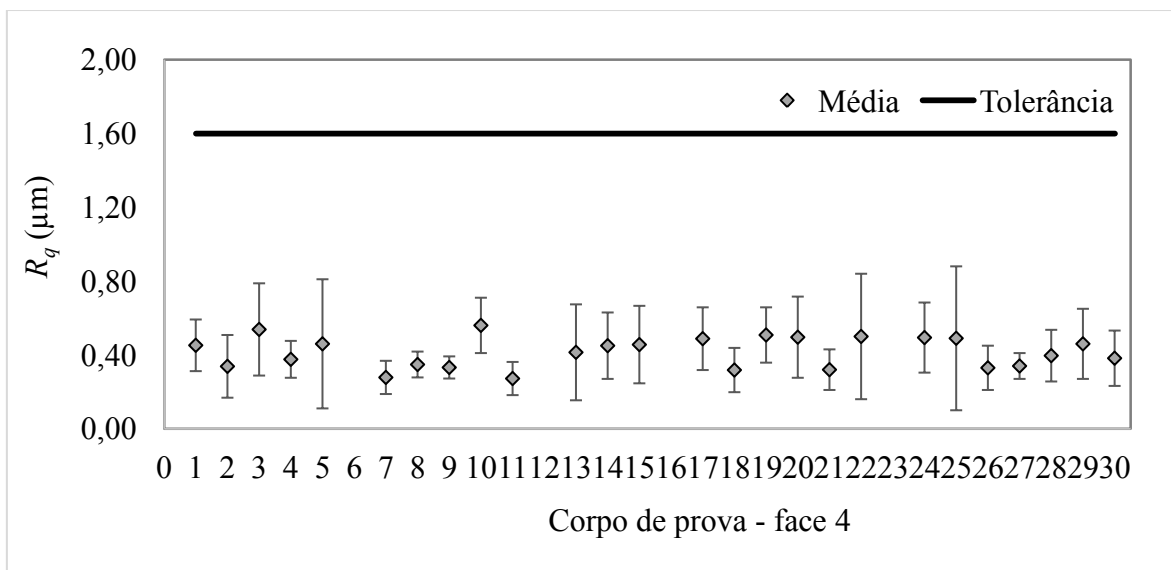


Figura 10.13: Valores médios de  $R_q$  da face 4 dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

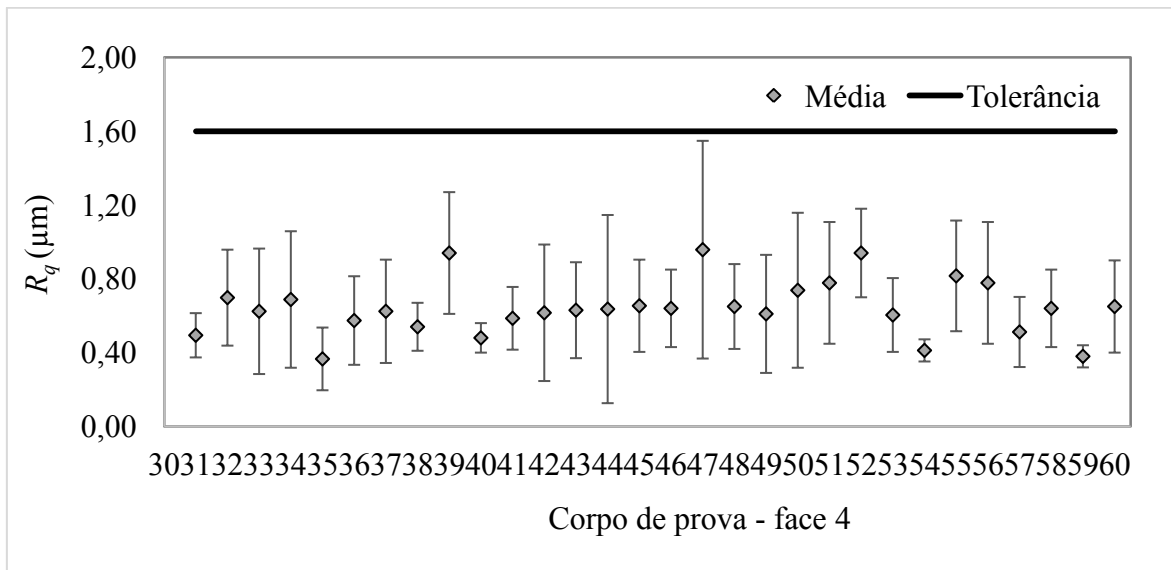


Figura 10.14: Valores médios de  $R_q$  da face 4 dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

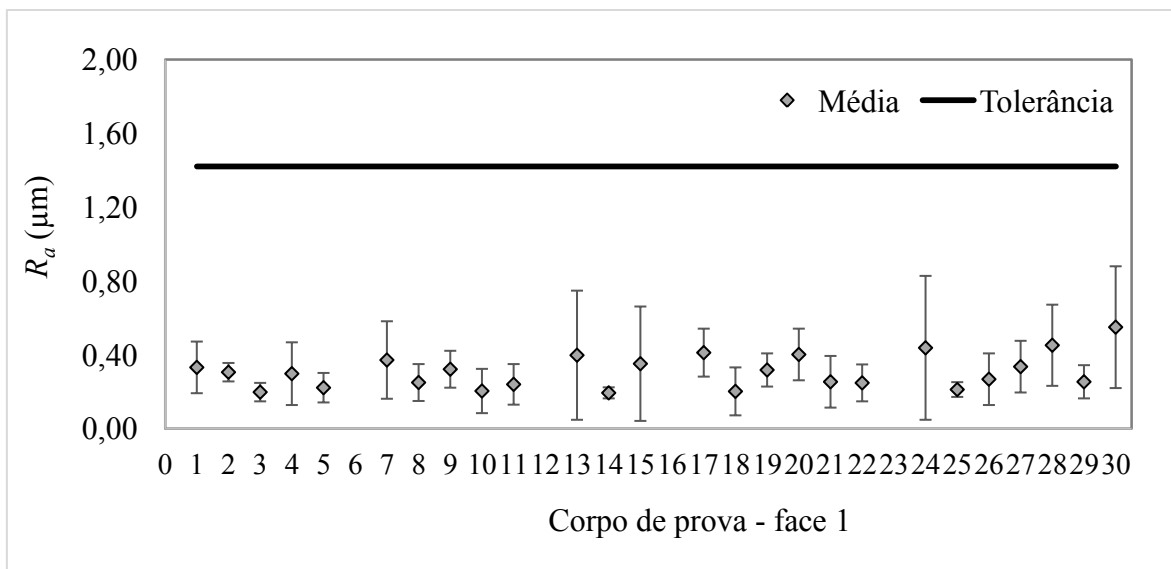


Figura 10.15: Valores médios de  $R_a$  da face 1 dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)



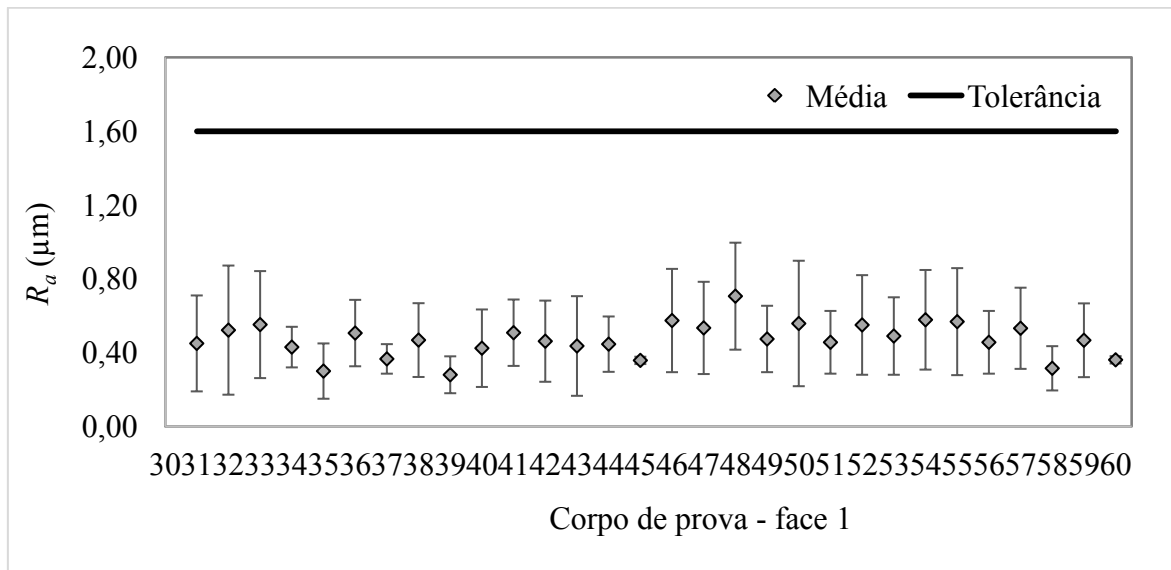


Figura 10.16: Valores médios de  $R_a$  da face 1 dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

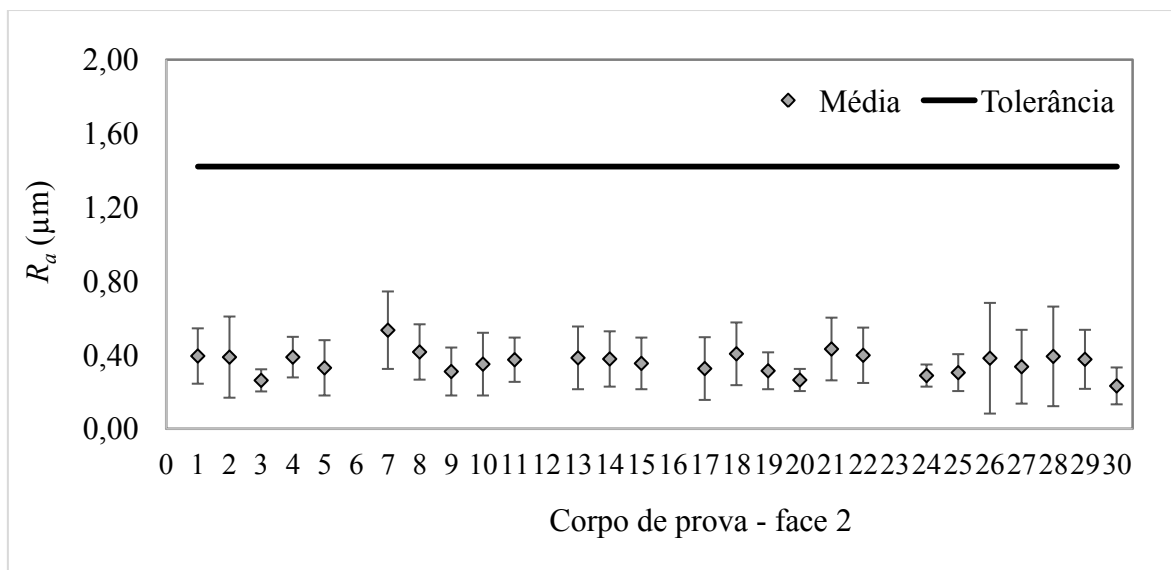


Figura 10.17: Valores médios de  $R_a$  da face 2 dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

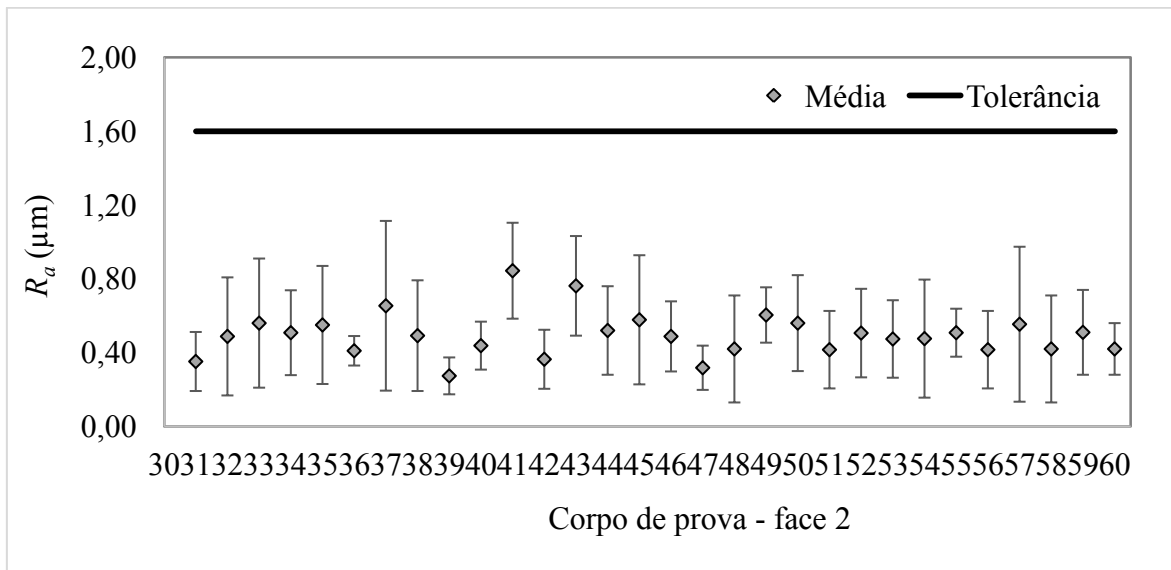


Figura 10.18: Valores médios de  $R_a$  da face 2 dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

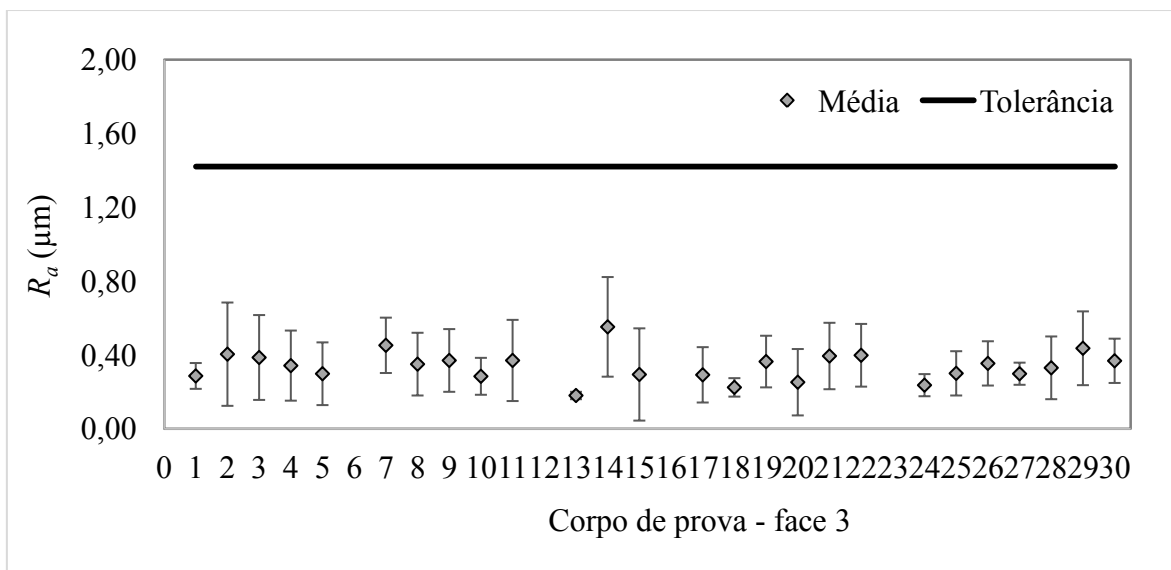


Figura 10.19: Valores médios de  $R_a$  da face 3 dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

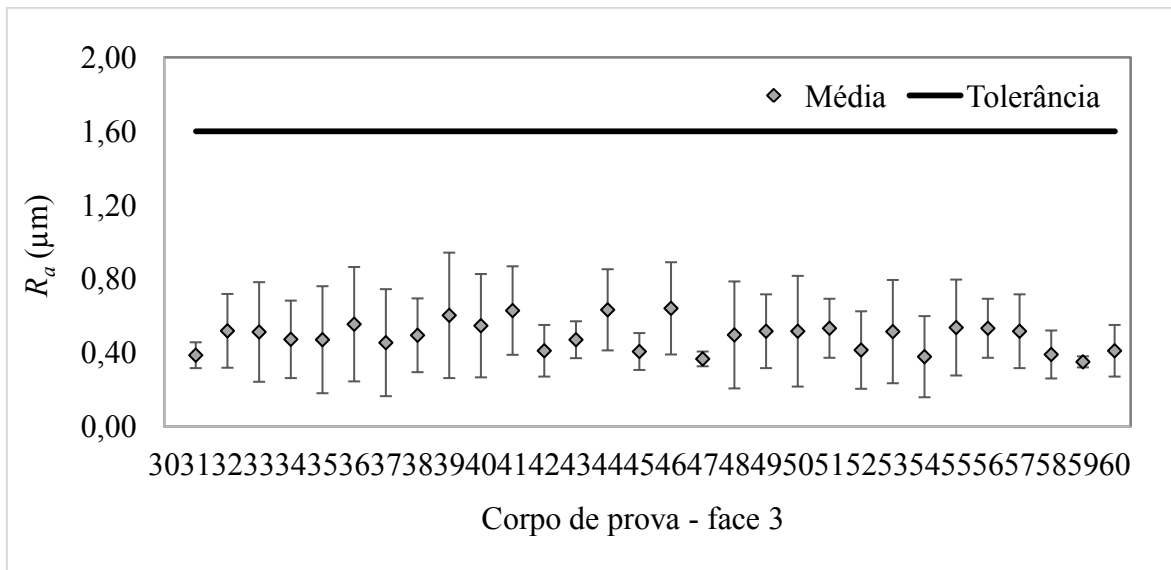


Figura 10.20: Valores médios de  $R_a$  da face 3 dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

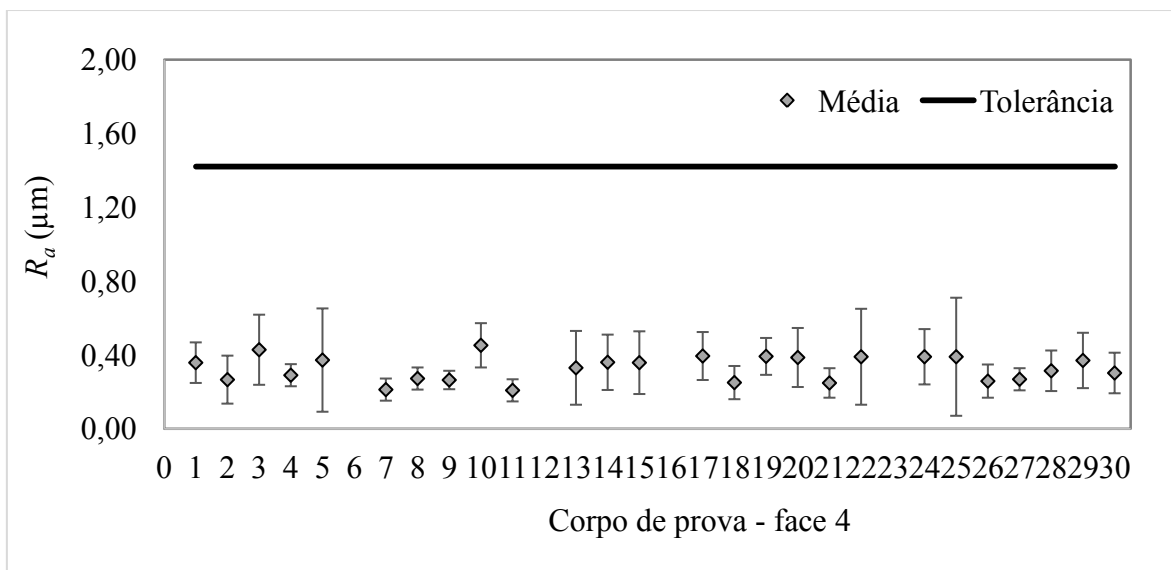


Figura 10.21: Valores médios de  $R_a$  da face 4 dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

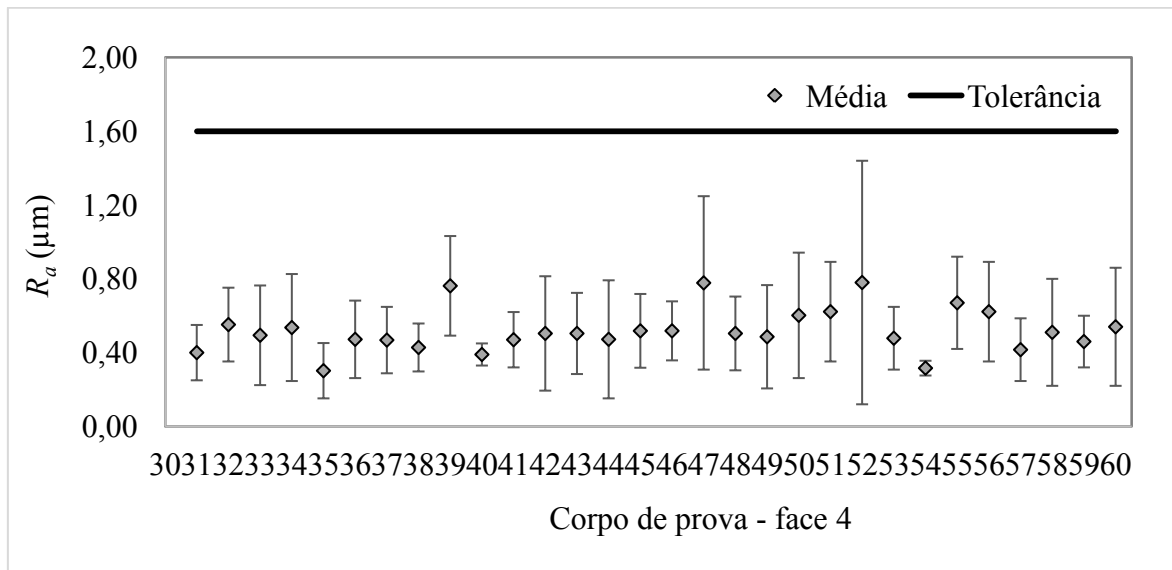


Figura 10.22: Valores médios de  $R_a$  da face 4 dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

Observa-se das Figs. 10.7 a 10.22 que os todos os valores obtidos para a rugosidade  $R_q$  das faces dos corpos de prova encontram-se dentro da faixa de tolerância especificada pela norma ASTM F519 (ASTM, 2017).

### 10.3. Raio de arredondamento da raiz do entalhe

As Figuras 10.23 a 10.26 exibem os valores obtidos na medição do raio de arredondamento da raiz do entalhe dos corpos de prova, com a ferramenta “círculo” do microscópio óptico.

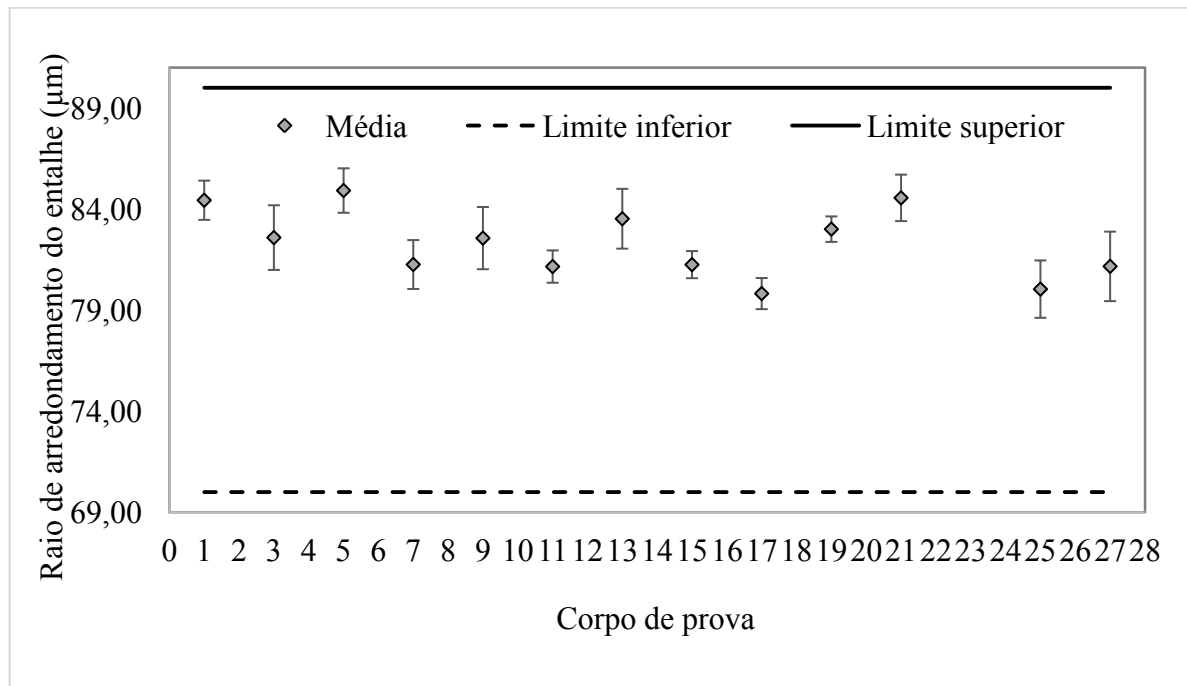


Figura 10.23: Valores médios do raio de arredondamento da raiz do entalhe dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm e raio nominal igual a 80 µm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

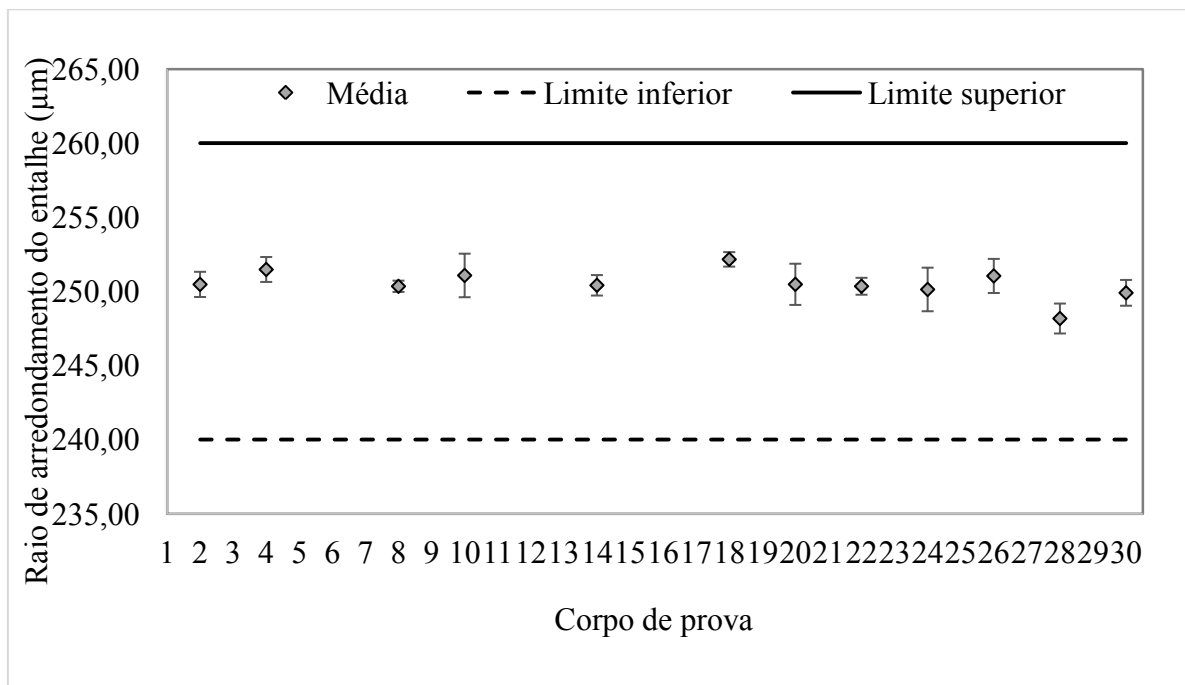


Figura 10.24: Valores médios do raio de arredondamento da raiz do entalhe dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm e raio nominal igual a 250 µm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

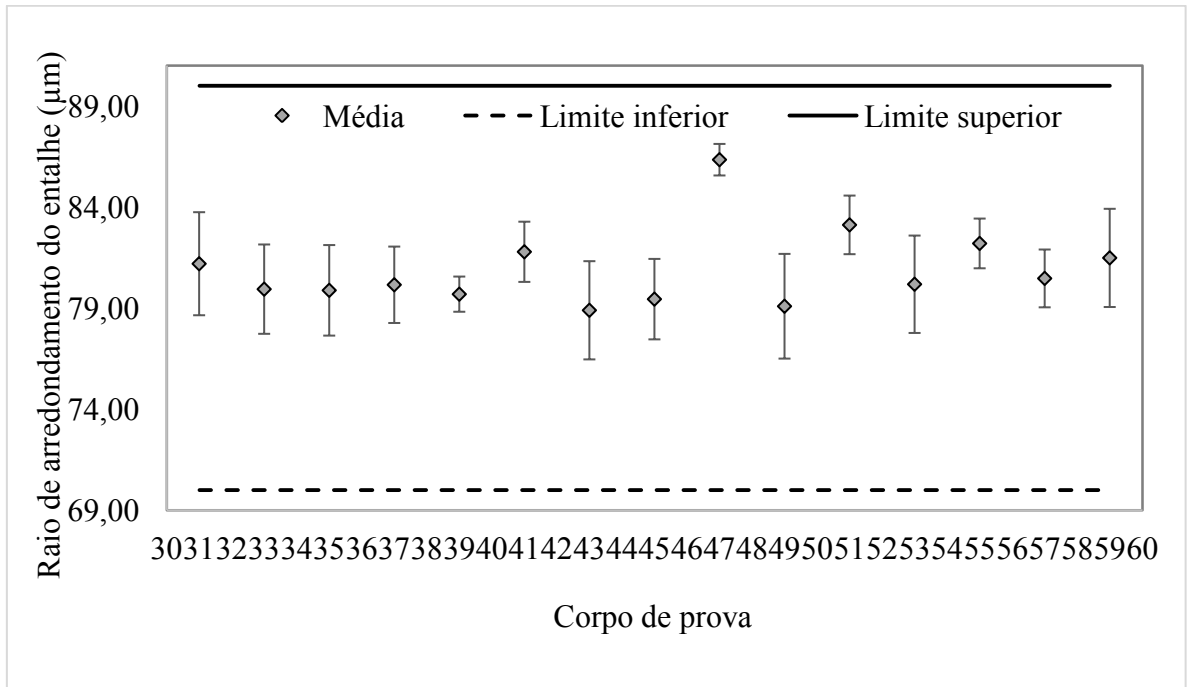


Figura 10.25: Valores médios do raio de arredondamento da raiz do entalhe dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm e raio nominal igual a 80 µm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

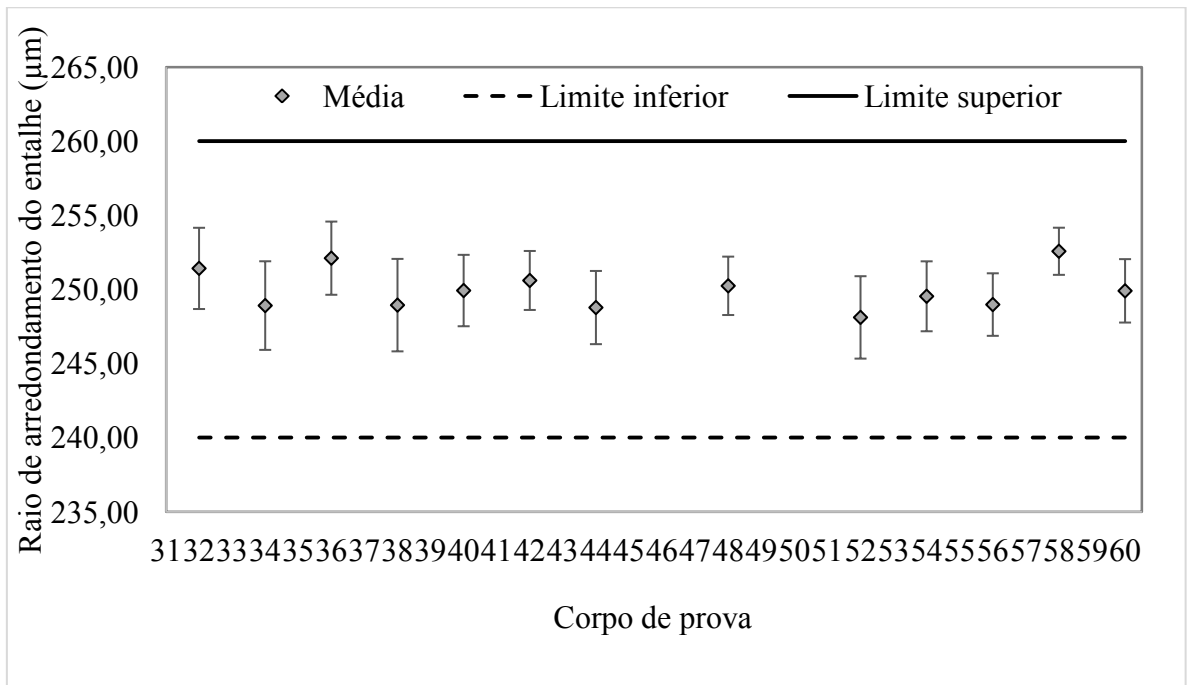


Figura 10.26: Valores médios do raio de arredondamento da raiz do entalhe dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm e raio nominal igual a 250 µm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

Conclui-se das Figs. 10.23 a 10.26 que as medições de raio de arredondamento da raiz do entalhe encontram-se dentro da faixa de tolerância especificada no projeto, após o lixamento da raiz do entalhe. Vale ressaltar que segundo a norma ASTM F519 (ASTM, 2017), a faixa de tolerância para o raio de arredondamento do entalhe é de 228  $\mu\text{m}$  até 279  $\mu\text{m}$ . Como um dos três fatores do planejamento fatorial completo proposto neste trabalho consiste em um raio de arredondamento da raiz do entalhe igual a 80  $\mu\text{m}$ , a norma ASTM F519 (ASTM, 2017) não pôde ser obedecida.

#### 10.4. Comprimento dos corpos de prova

As Figuras 10.27 e 10.28 exibem os valores médios obtidos na medição do comprimento dos corpos de prova com dimensões 30 mm x 30 mm x 200 mm e 10 mm x 10 mm x 60 mm, respectivamente. Os limites inferior e superior foram definidos no projeto dos corpos de prova, considerando-se as limitações físicas do equipamento.

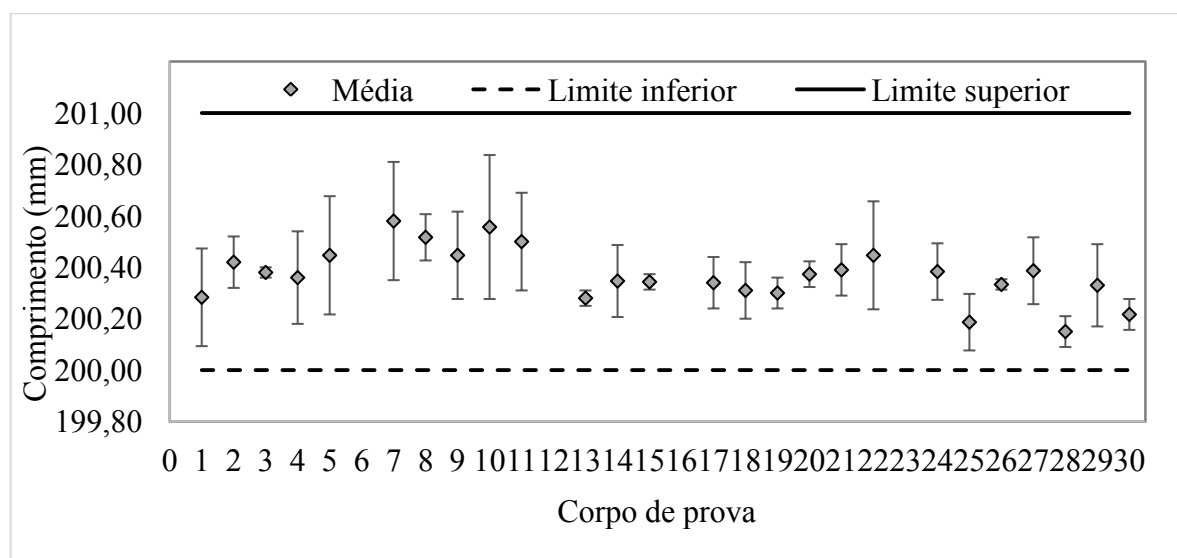


Figura 10.27: Valores médios do comprimento dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

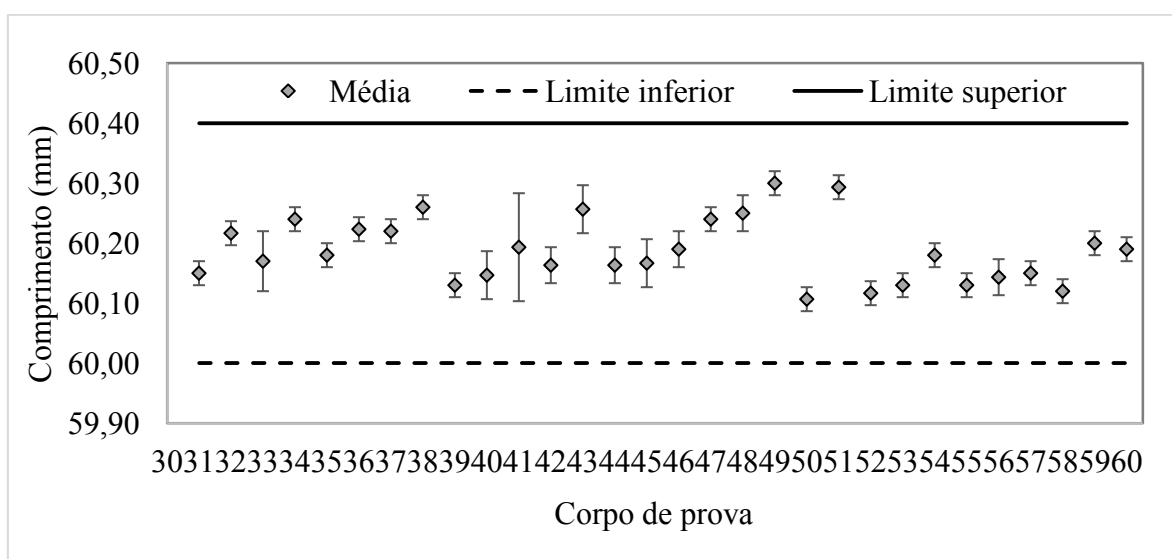


Figura 10.28: Valores médios do comprimento dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

Observa-se das Figs. 10.27 e 10.28 que as medições do comprimento dos corpos de prova encontram-se dentro da faixa de tolerância especificada no projeto. Vale ressaltar que segundo a norma ASTM F519 (ASTM, 2017), para corpos de prova com seção transversal de 10 mm x 10 mm, a faixa de comprimentos vai de 53,26 mm até 58,34 mm e que, para corpos de prova com seção transversal de 30 mm x 30 mm, a faixa de comprimentos vai de 159,78 mm até 175,02 mm. Se essas faixas de comprimento tivessem sido obedecidas, os corpos de prova não poderiam ser montados no equipamento, devido à limitação de distância entre o braço de carregamento do mesmo e a tampa da cuba que contém o fluido eletrolítico.

### 10.5. Largura dos corpos de prova

As Fig. 10.29 e 10.30 exibem os valores obtidos na medição da largura dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm e a 10 mm x 10 mm x 60 mm, respectivamente. Os limites inferior e superior foram definidos no projeto dos corpos de prova, considerando-se as limitações físicas do equipamento.



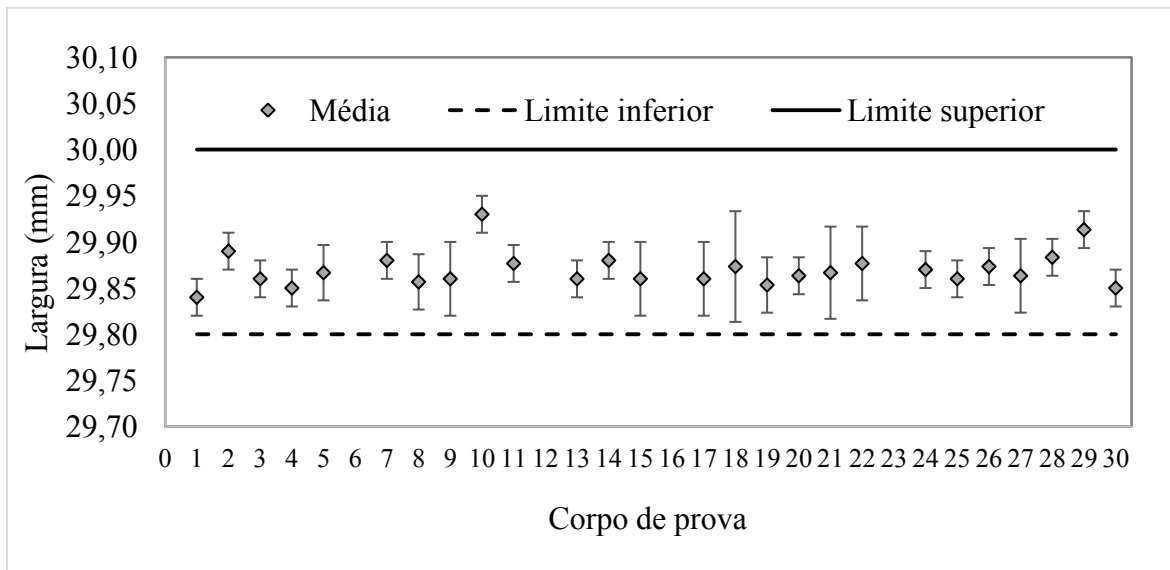


Figura 10.29: Valores médios da largura dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

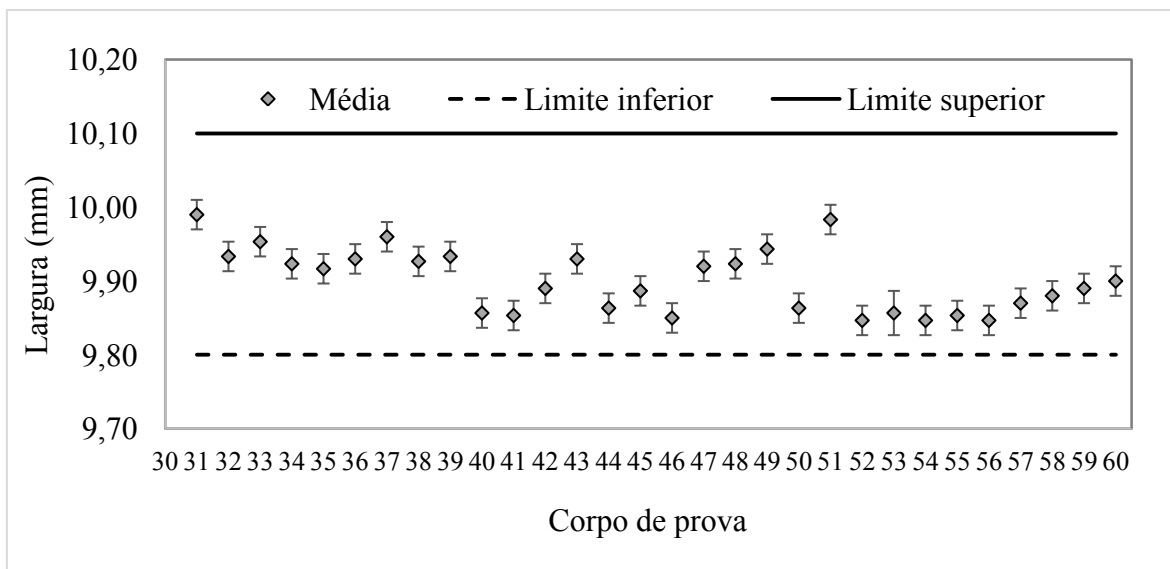


Figura 10.30: Valores médios da largura dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

Observa-se das Figs. 10.29 e 10.30 que as medições da largura dos corpos de prova encontram-se dentro da faixa de tolerância especificada no projeto.

### 10.6. Altura dos corpos de prova

As Fig. 10.31 e 10.32 exibem os valores obtidos na medição da altura dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm e a 10 mm x 10 mm x 60 mm, respectivamente. Os limites inferior e superior foram definidos no projeto dos corpos de prova, considerando-se as limitações físicas do equipamento.

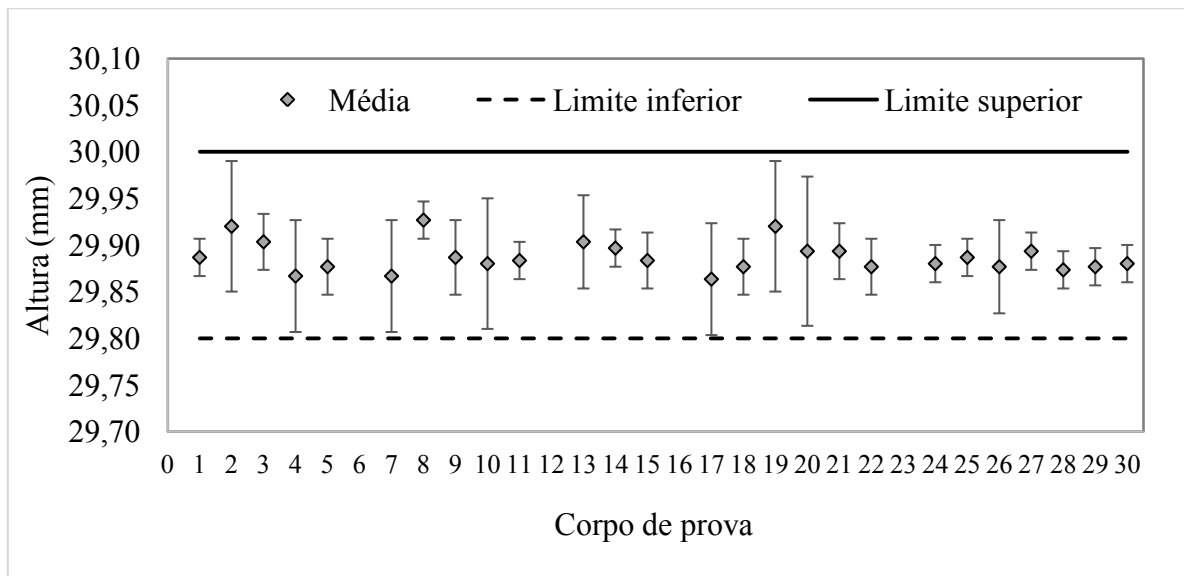


Figura 10.31: Valores médios da altura dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

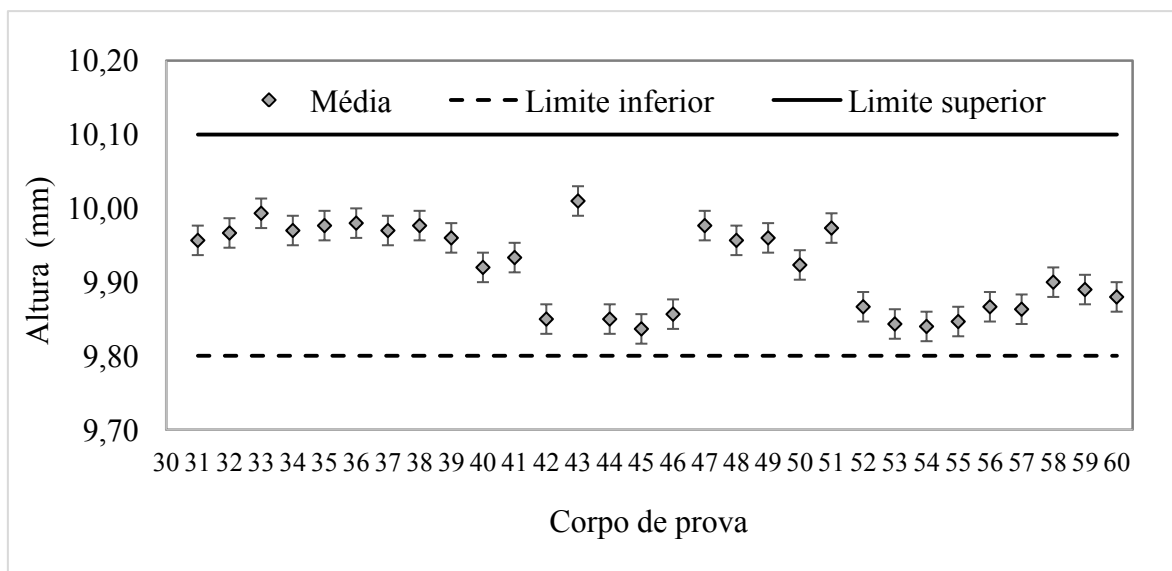


Figura 10.32: Valores médios da altura dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

Observa-se das Figs. 10.31 e 10.32 que as medições da altura dos corpos de prova encontram-se dentro da faixa de tolerância especificada no projeto.

### 10.7. Profundidade do entalhe

As Fig. 10.33 e 10.34 exibem os valores obtidos na medição da profundidade do entalhe dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm e a 10 mm x 10 mm x 60 mm, respectivamente. Os limites inferior e superior foram definidos no projeto dos corpos de prova.

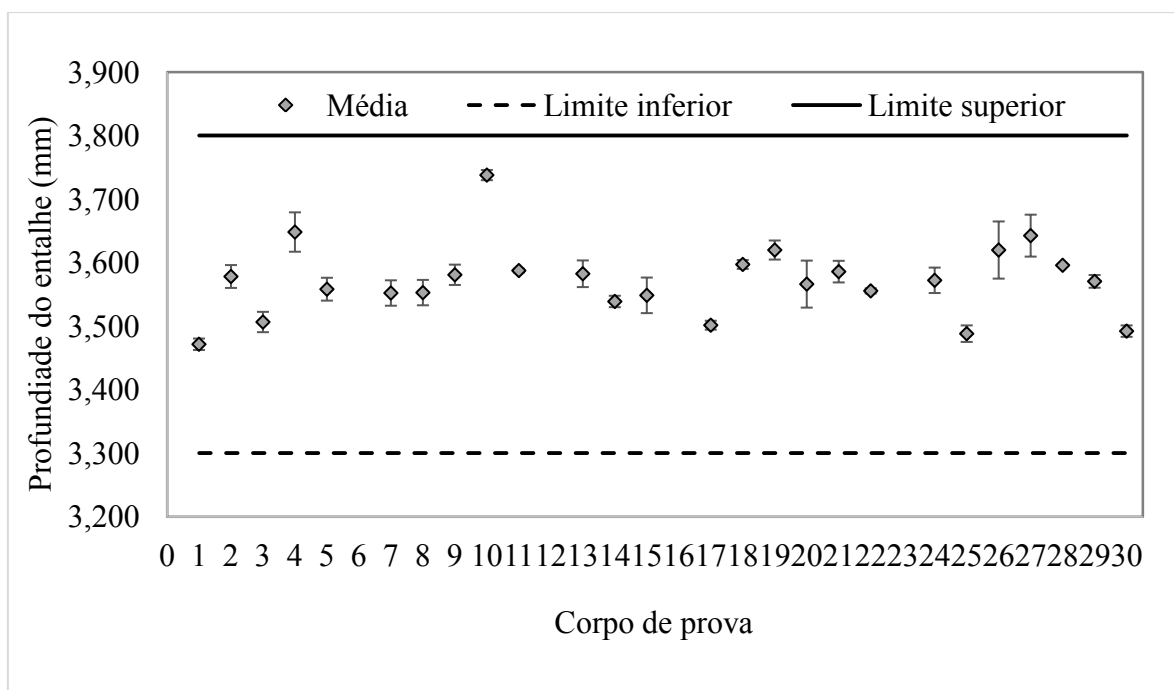


Figura 10.33: Valores médios da profundidade do entalhe dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

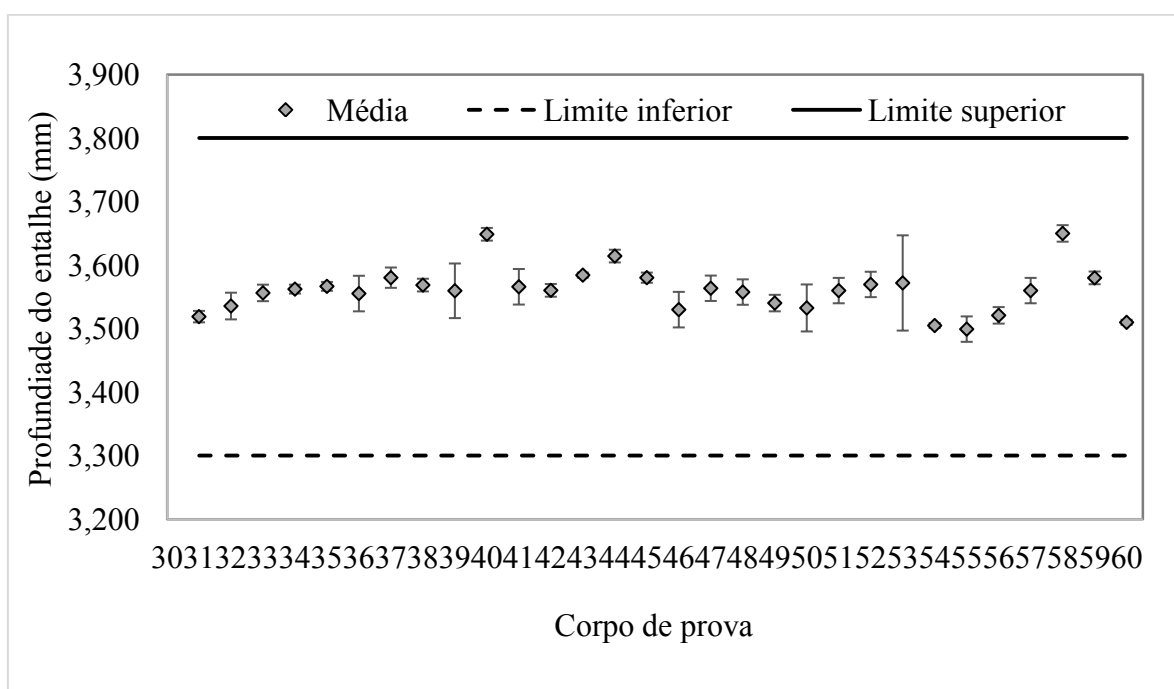


Figura 10.34: Valores médios da profundidade do entalhe dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

Conclui-se das Figs. 10.33 e 10.34 que os resultados das medições, da profundidade do entalhe dos corpos de prova, encontram-se dentro da faixa de tolerância especificada no projeto.

## 10.8. Ângulo de abertura do entalhe

As Fig. 10.35 e 10.36 exibem os valores obtidos na medição do ângulo de abertura do entalhe dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm e a 10 mm x 10 mm x 60 mm, respectivamente. Os limites inferior e superior foram definidos no projeto dos corpos de prova.

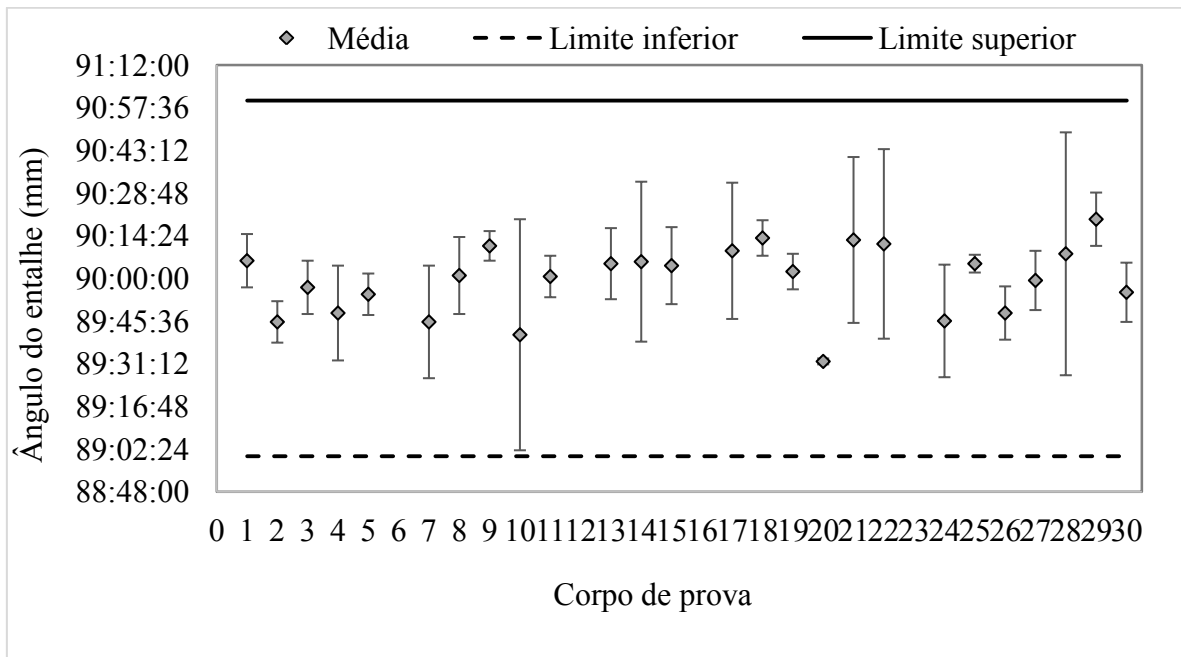


Figura 10.35: Valores médios do ângulo de abertura do entalhe dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

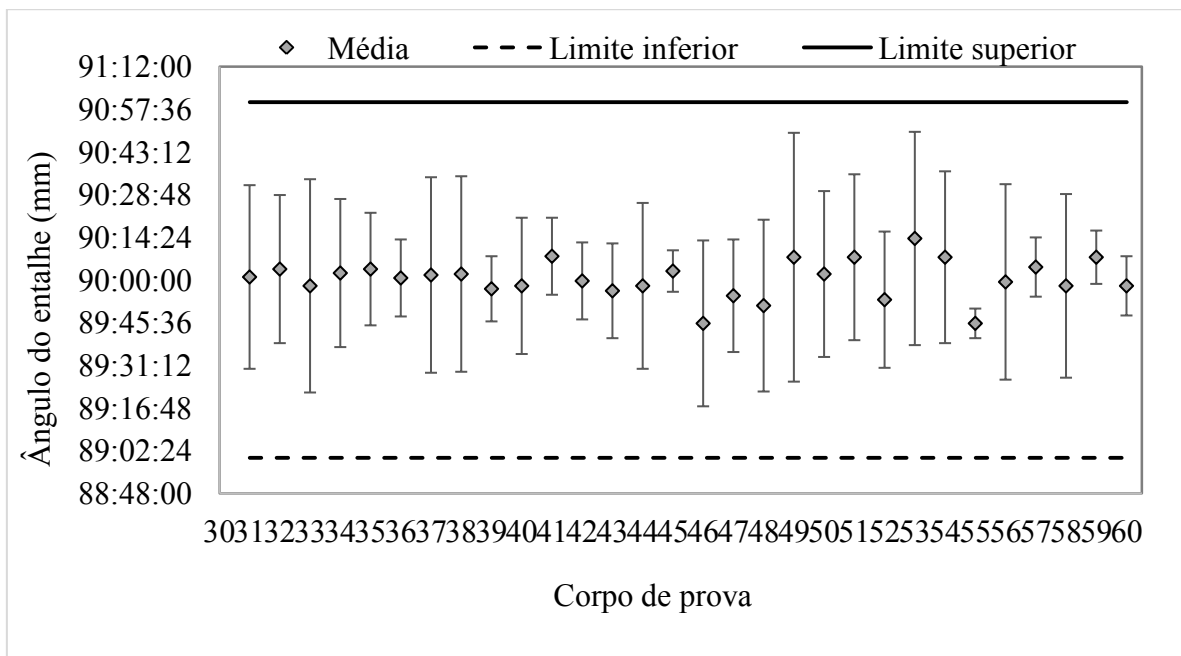


Figura 10.36: Valores médios do ângulo de abertura do entalhe dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

Infer-se das Fig. 10.35 e 10.36 que as medições do ângulo de abertura do entalhe dos corpos de prova encontram-se dentro da faixa de tolerância especificada no projeto.

### 10.9. Base do entalhe

A dimensão denotada “base do entalhe” é ilustrada na Fig. 10.37. Embora o seu valor não seja controlado pela norma ASTM F519 (ASTM, 2017), essa dimensão é uma variável de entrada da rotina desenvolvida no programa MATLAB R2014 para cálculo da equação da tensão. “Base do entalhe” nada mais é do que a altura do corpo de prova subtraída da profundidade do entalhe.

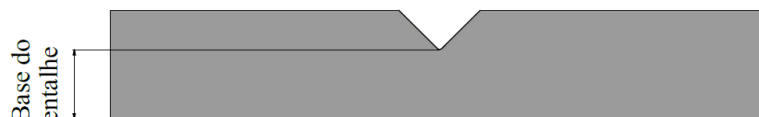


Figura 10.37: Identificação da dimensão “base do entalhe”

As Figuras 10.38 e 10.39 exibem os valores obtidos na medição da base do entalhe dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm e a 10 mm x 10 mm x 60 mm, respectivamente.

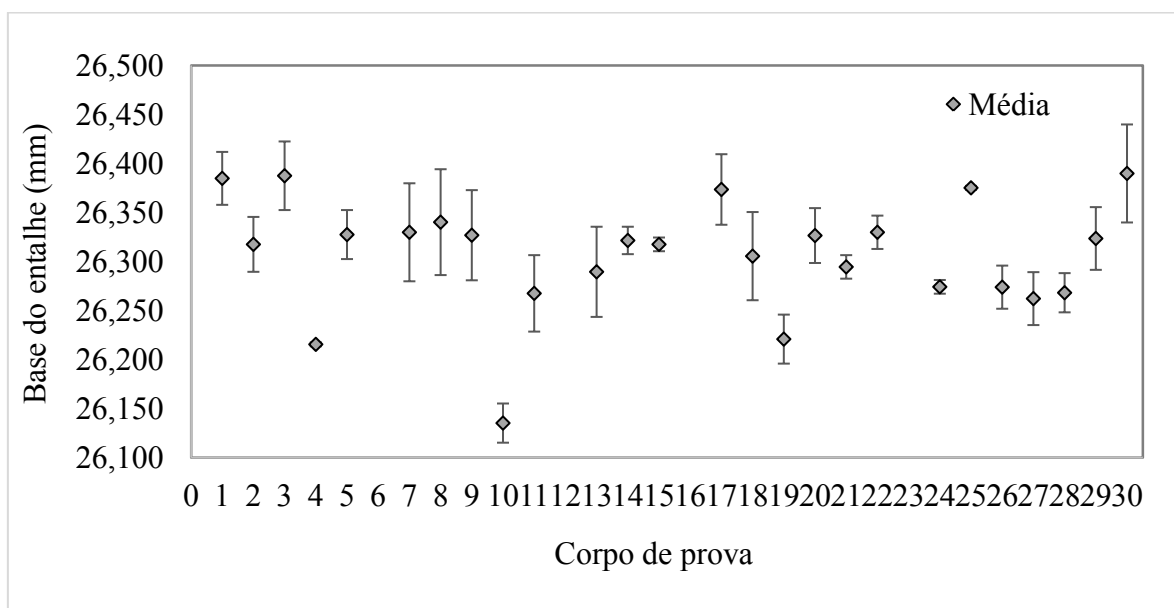


Figura 10.38: Valores médios da base do entalhe dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

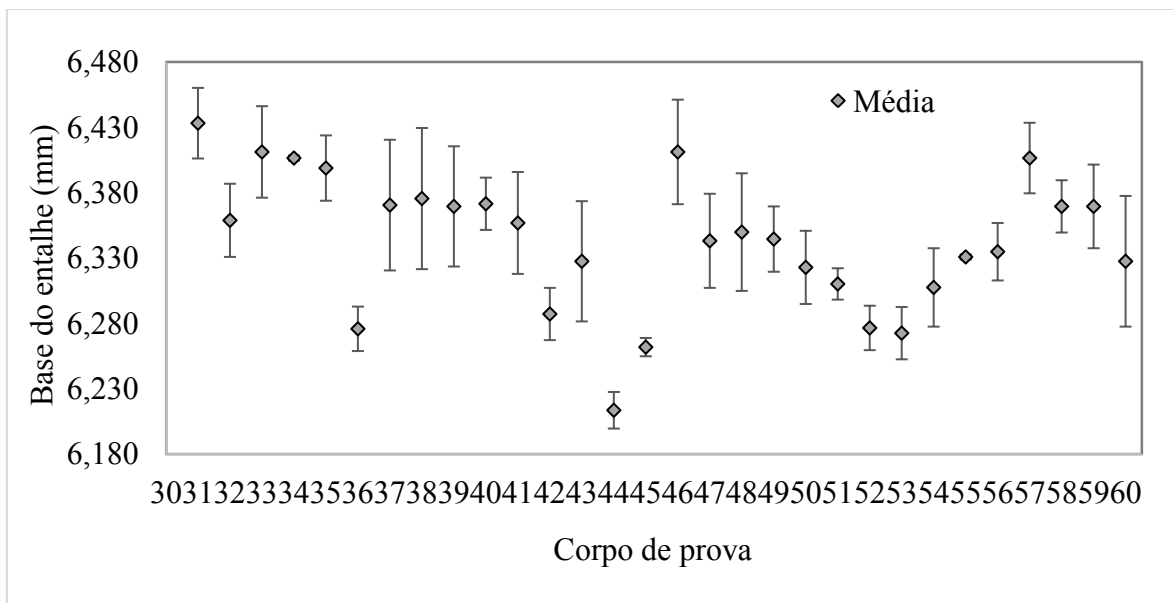


Figura 10.39: Valores médios da base do entalhe dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

Infer-se da Fig. 10.38 que as medições da base do entalhe dos corpos de prova encontram-se entre 26,100 mm e 26,450 mm, para corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm. Analisando-se a Fig. 10.39, observa-se que as medições da base do entalhe dos corpos de prova encontram-se entre 6,213 mm e 6,433 mm, para corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm.

#### 10.10. Desvio de paralelismo

A Figura 10.40 ilustra a nomeação das faces dos corpos de prova, para medição dos desvios de paralelismo e perpendicularidade. A face *A* é a face onde o entalhe foi fabricado, correspondente à superfície das chapas brutas de aço AISI 4140. A face *E* é onde a numeração lateral do corpo de prova foi marcada com punção, antes da usinagem do mesmo.

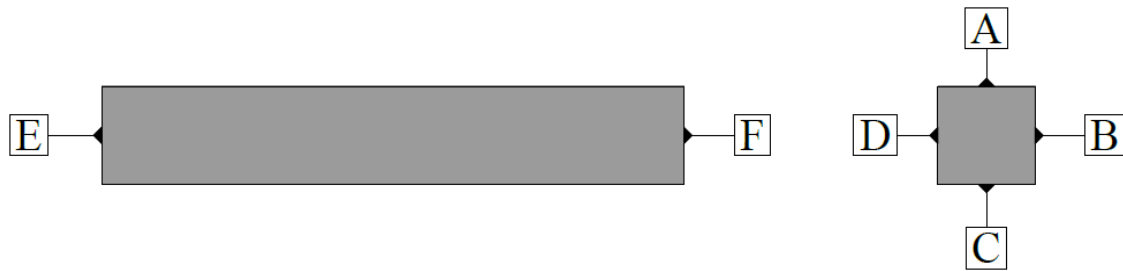


Figura 10.40: Identificação das faces dos corpos de prova para medição dos desvios de orientação

As Fig. 10.41 a 10.46 exibem os valores obtidos na medição dos desvios de paralelismo dos corpos de prova. Os limites inferior e superior foram definidos no projeto dos corpos de prova. O desvio de paralelismo dos corpos de prova não é citado na norma ASTM F519 (ASTM, 2017).

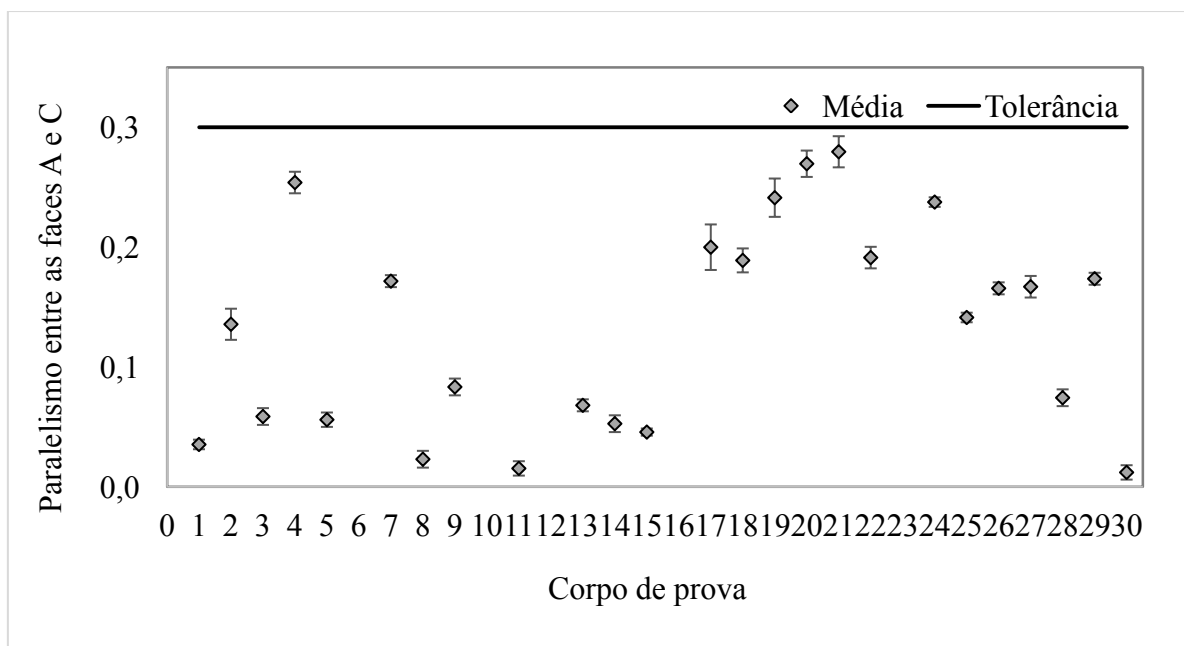


Figura 10.41: Desvio de paralelismo entre as faces A e C dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)



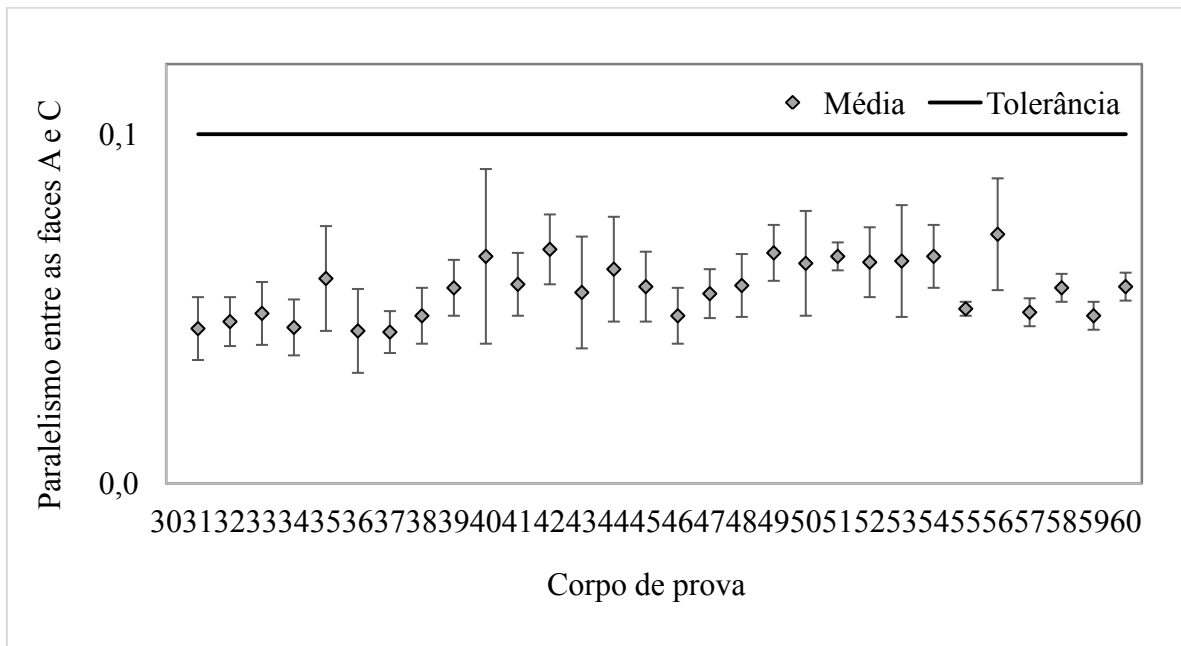


Figura 10.42: Desvio de paralelismo entre as faces A e C dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

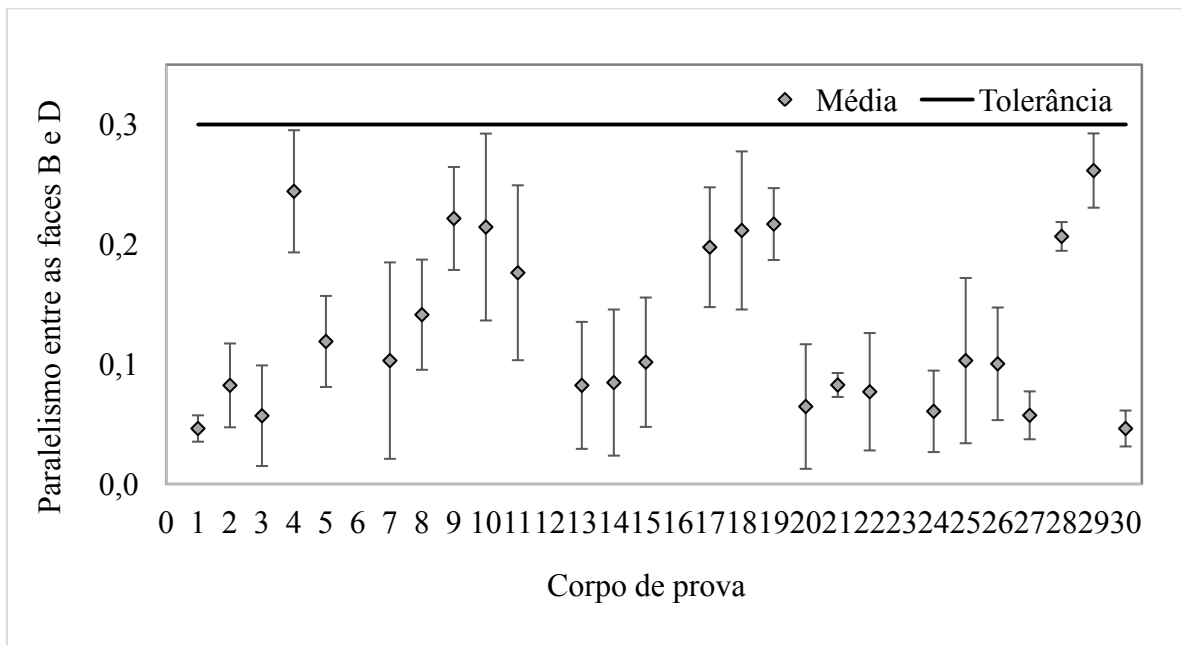


Figura 10.43: Desvio de paralelismo entre as faces B e D dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

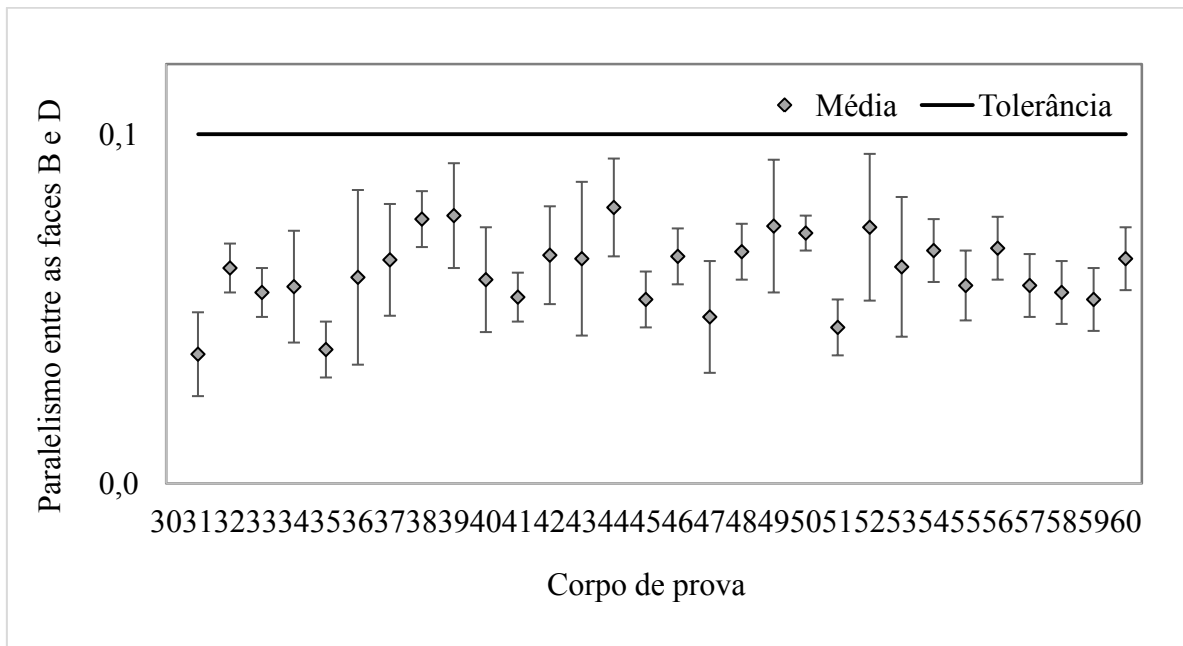


Figura 10.44: Desvio de paralelismo entre as faces B e D dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

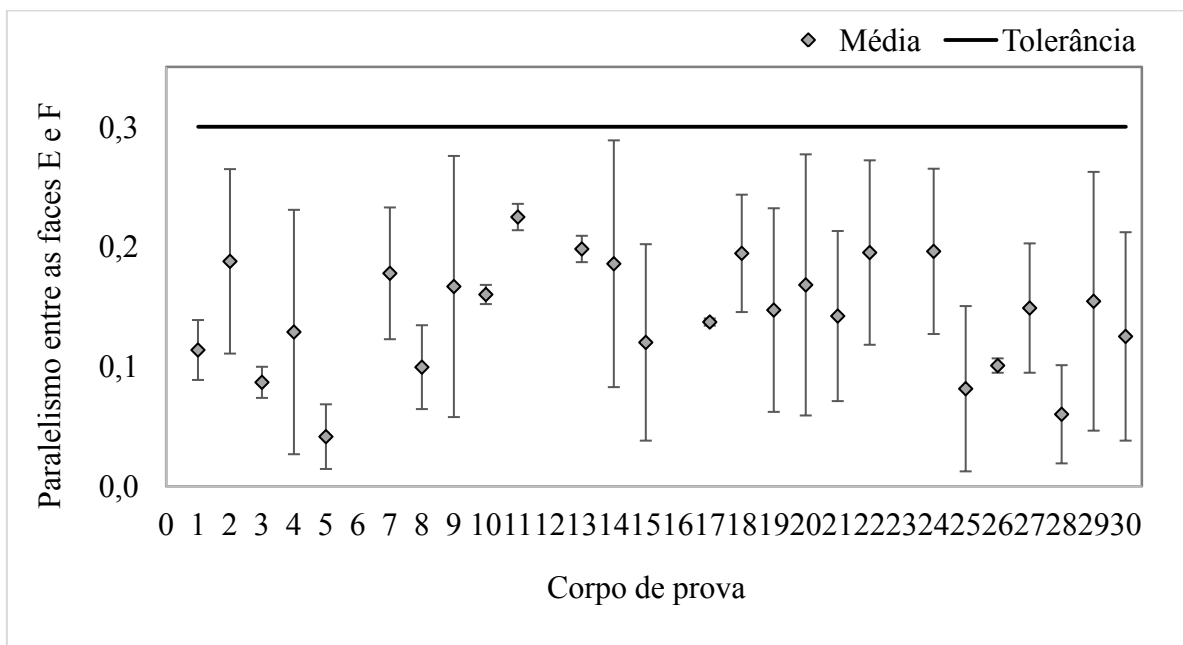


Figura 10.45: Desvio de paralelismo entre as faces E e F dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

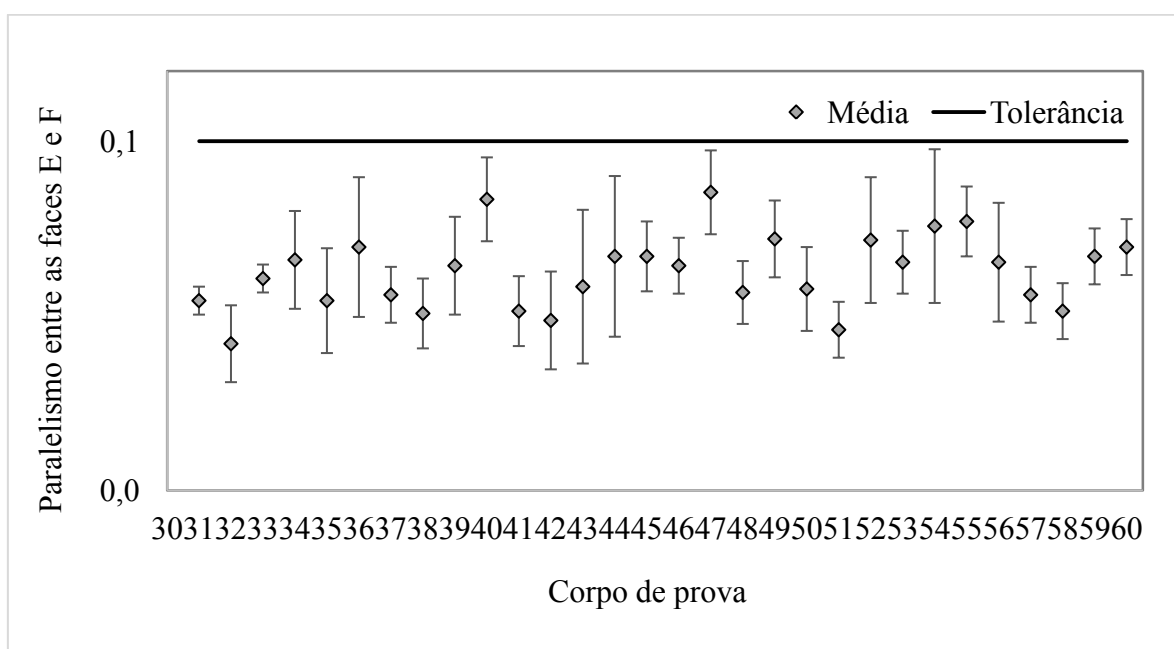


Figura 10.46: Desvio de paralelismo entre as faces E e F dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

Conclui-se das Figs. 10.41 a 10.46 que todos os corpos de prova encontram-se dentro da faixa de tolerância especificada no projeto, com relação aos desvios de paralelismo entre as faces paralelas dos mesmos.

### 10.11. Desvio de perpendicularidade

As Fig. 10.47 e 10.48 exibem os valores obtidos na medição dos desvios de perpendicularidade dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm e a 10 mm x 10 mm x 60 mm, respectivamente. Os limites inferior e superior foram definidos no projeto dos corpos de prova. O desvio de perpendicularidade dos corpos de prova não é citado na norma ASTM F519 (ASTM, 2017).

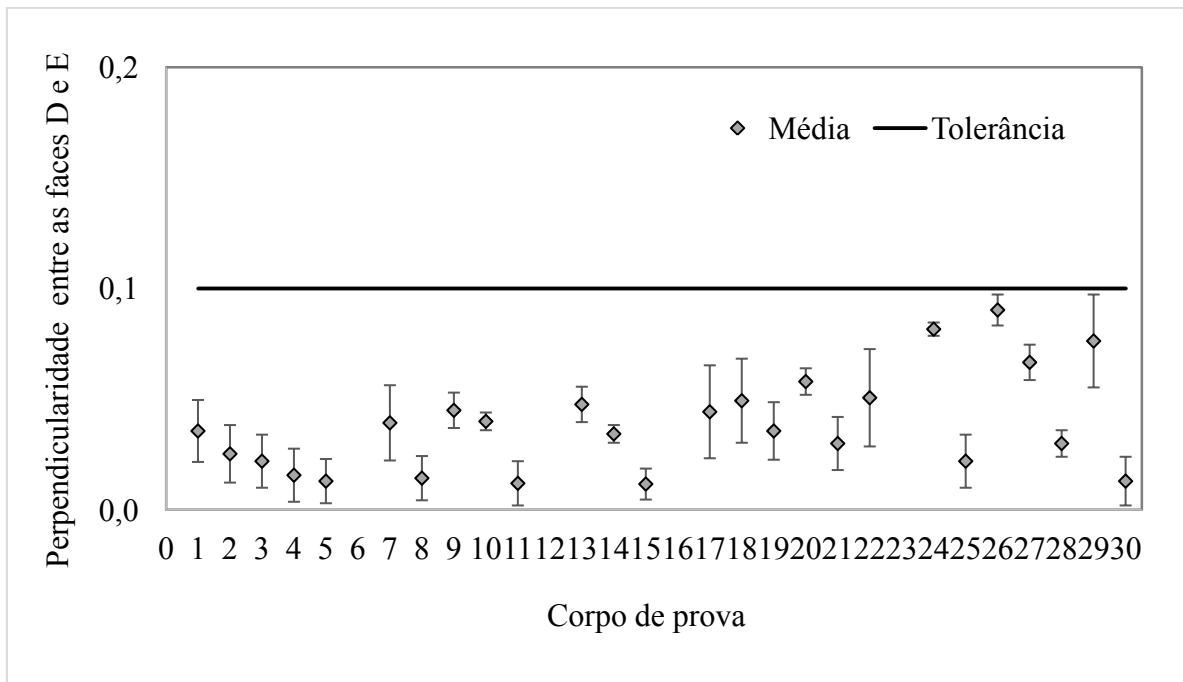


Figura 10.47: Desvio de perpendicularidade entre as faces D e E dos corpos de prova com dimensões iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

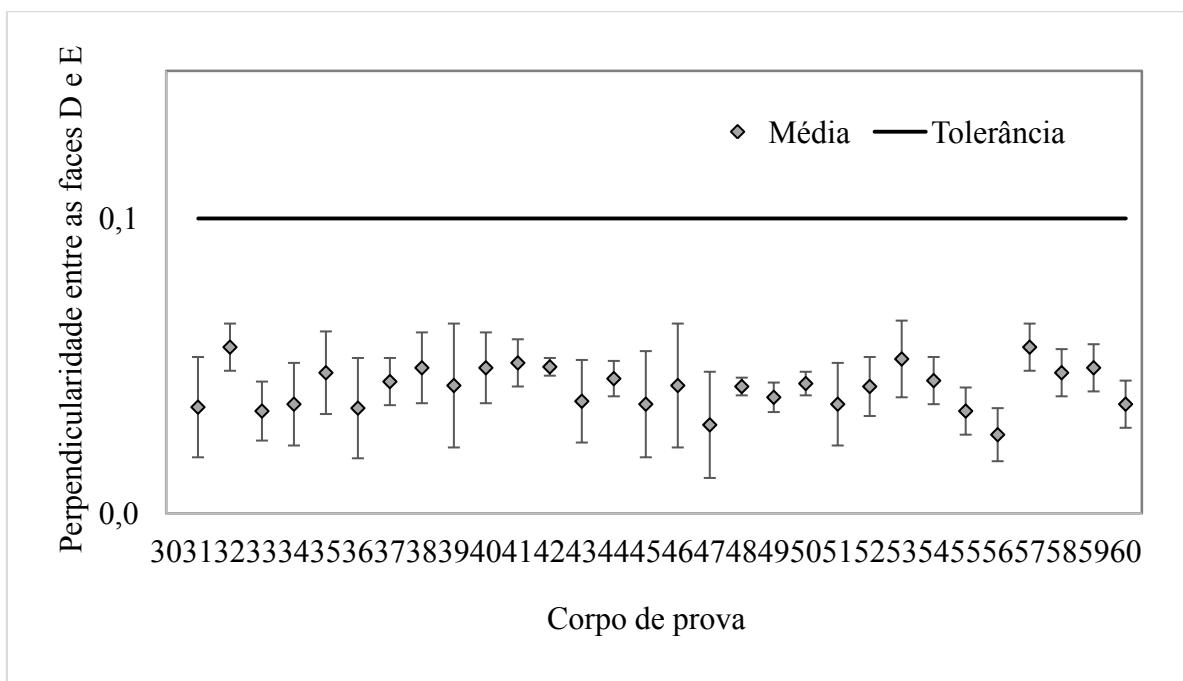


Figura 10.48: Desvio de perpendicularidade entre as faces D e E dos corpos de prova com dimensões iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm, com barra de erros indicando a incerteza expandida (95 %)

Conclui-se das Figs. 10.47 e 10.48 que as medições dos desvios de perpendicularidade de todos os corpos de prova encontram-se dentro da faixa de tolerância especificada no projeto.

### 10.12. Topografia de um corpo de prova

A Figura 10.49 ilustra uma topografia da face superior de um corpo de prova com dimensões 30 mm x 30 mm x 200 mm (face onde o entalhe foi fabricado).

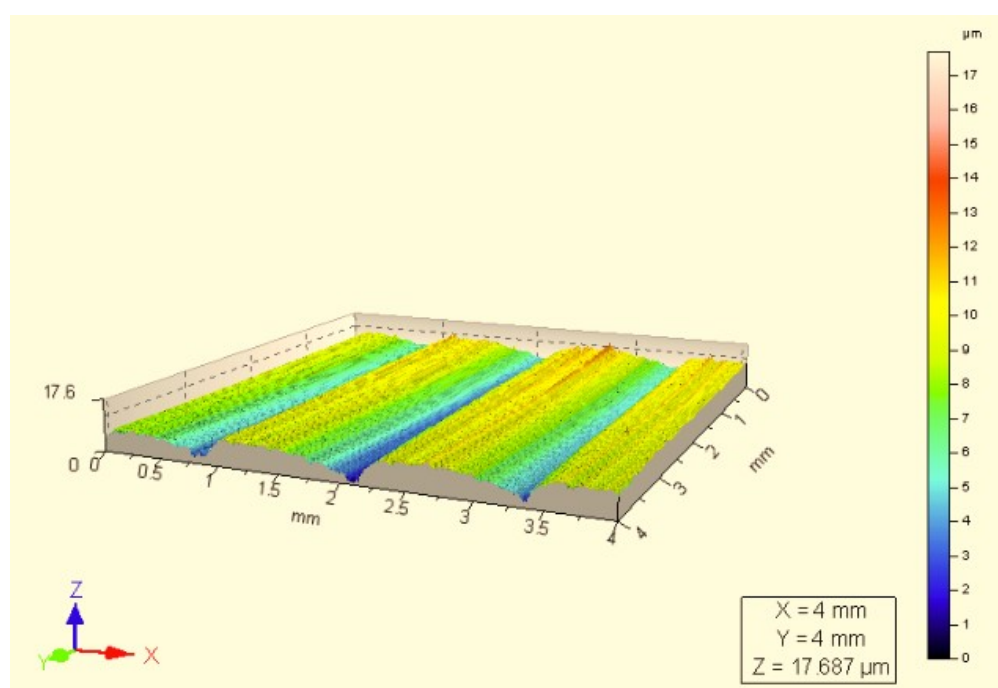


Figura 10.49: Topografia da face superior (onde o entalhe é fabricado) de um corpo de prova com dimensões 30 mm x 30 mm x 200 mm

Percebe-se na Fig. 10.49 um padrão cíclico na topografia do corpo de prova, decorrente do movimento de entrada e saída da fresa no material durante a usinagem de acabamento dos corpos de prova.

## **A P Ê N D I C E X I**

### **Tabelas da verificação das duas montagens do equipamento**

Observação: Foi apresentado um algarismo adicional no valor do desvio padrão da Tab. 11.1 uma vez que, se arredondado considerando-se a regra dos algarismos significativos, em alguns casos ele seria representado como zero, dificultando a avaliação da repetibilidade ao longo da faixa nominal da célula de carga em questão.

Observaram-se valores de desvio padrão reduzidos, situados entre 0,0001 kN e 0,0010 kN, o que indica boa repetibilidade do sistema. O máximo valor de desvio padrão obtido foi igual a 0,0010 kN para o patamar de força igual a 9,001 kN, representando 0,011 % do valor de força do patamar.

Tabela 11.1: Valor convencional (VC), média, erro, desvio padrão (68,27 %) e incerteza expandida (95,45 %) da força medida pela célula de carga de 20 kN no teste de verificação, com carregamento e descarregamento do corpo de prova com dimensões nominais iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm

Carregamento					Descarregamento				
VC (kN)	Força média (kN)	Erro (kN)	Desvio padrão (kN)	U (kN)	VC (kN)	Força média (kN)	Erro (kN)	Desvio padrão (kN)	U (kN)
0,450	0,449	-0,001	0,0003	0,001	9,000	8,999	-0,001	0,0003	0,010
0,900	0,898	-0,002	0,0003	0,001	8,550	8,548	-0,002	0,0003	0,010
1,350	1,351	0,001	0,0001	0,002	8,100	8,100	0,000	0,0003	0,009
1,800	1,801	0,001	0,0016	0,002	7,650	7,648	-0,002	0,0001	0,009
2,250	2,251	0,001	0,0003	0,003	7,200	7,198	-0,002	0,0003	0,008
2,700	2,701	0,001	0,0001	0,003	6,750	6,749	-0,001	0,0006	0,008
3,150	3,149	-0,001	0,0004	0,004	6,300	6,298	-0,002	0,0001	0,007
3,600	3,600	0,000	0,0006	0,004	5,850	5,847	-0,003	0,0003	0,007
4,050	4,051	0,001	0,0001	0,005	5,400	5,400	0,000	0,0007	0,006
4,500	4,501	0,001	0,0001	0,005	4,950	4,948	-0,002	0,0001	0,006
4,950	4,952	0,002	0,0003	0,006	4,500	4,497	-0,003	0,0003	0,005
5,400	5,400	0,000	0,0020	0,006	4,050	4,050	0,000	0,0006	0,005
5,850	5,851	0,001	0,0001	0,007	3,600	3,598	-0,002	0,0001	0,004
6,300	6,300	0,000	0,0003	0,007	3,150	3,148	-0,002	0,0002	0,004
6,750	6,751	0,001	0,0009	0,008	2,700	2,700	0,000	0,0004	0,003
7,200	7,200	0,000	0,0002	0,008	2,250	2,248	-0,002	0,0001	0,003
7,650	7,649	-0,001	0,0002	0,009	1,800	1,796	-0,002	0,0001	0,002
8,100	8,101	0,001	0,0004	0,009	1,350	1,350	0,000	0,0008	0,002
8,550	8,552	0,002	0,0002	0,010	0,900	0,898	-0,002	0,0003	0,001
9,000	9,001	0,001	0,0010	0,010	0,450	0,446	-0,001	0,0001	0,001

Tabela 11.2: Média, desvio padrão (68,27 %) e incerteza de medição expandida (95,45 %) do ângulo medido pelo *encoder* no teste de verificação da célula de carga de 20 kN, com carregamento e descarregamento do corpo de prova com dimensões nominais iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm

Carregamento			Descarregamento		
Ângulo médio (°)	Desvio padrão (°)	U (°)	Ângulo médio (°)	Desvio padrão (°)	U (°)
88,40	0,09	0,21	91,10	0,09	0,21
88,58	0,09	0,21	90,92	0,09	0,21
88,76	0,09	0,21	90,74	0,09	0,21
88,94	0,09	0,21	90,74	0,09	0,21
89,12	0,09	0,21	90,56	0,09	0,21
89,12	0,09	0,21	90,38	0,09	0,21
89,30	0,09	0,21	90,38	0,09	0,21
89,48	0,09	0,21	90,20	0,09	0,21
89,66	0,09	0,21	90,02	0,09	0,21
89,66	0,09	0,21	89,93	0,09	0,21
89,84	0,09	0,21	89,84	0,09	0,21
90,02	0,09	0,21	89,66	0,09	0,21
90,20	0,09	0,21	89,48	0,09	0,21
90,20	0,09	0,21	89,48	0,09	0,21
90,38	0,09	0,21	89,30	0,09	0,21
90,56	0,09	0,21	89,12	0,09	0,21
90,56	0,09	0,21	88,94	0,09	0,21
90,74	0,09	0,21	88,76	0,09	0,21
90,92	0,09	0,21	88,76	0,09	0,21
91,10	0,09	0,21	88,58	0,09	0,21

Observaram-se valores de desvio padrão praticamente constantes e iguais a 0,09°, o que representa 0,10 % do mínimo valor de ângulo (88,40°) e 0,09 % do máximo valor de ângulo (91,10°). Este fato é indicativo da excelente repetibilidade dos valores de ângulo obtidos.



Tabela 11.3: Média, desvio padrão (68,27 %) e incerteza expandida (95,45 %) associada ao cálculo da tensão mecânica no teste de verificação da célula de carga de 20 kN com carregamento e descarregamento do corpo de prova com dimensões nominais iguais a 30 mm x 30 mm x 200 mm

Carregamento			Descarregamento		
Tensão mecânica média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	U (MPa)	Tensão mecânica média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	U (MPa)
39,726	0,027	0,275	803,507	0,030	4,639
79,489	0,029	0,483	762,777	0,029	4,402
119,671	0,011	0,706	722,311	0,035	4,168
159,630	0,146	0,932	682,054	0,018	3,936
199,613	0,027	1,160	641,537	0,030	3,703
239,500	0,011	1,388	601,179	0,055	3,470
279,415	0,039	1,617	560,967	0,010	3,238
319,660	0,059	1,848	520,440	0,031	3,003
359,911	0,013	2,080	480,376	0,064	2,772
399,888	0,013	2,320	440,058	0,148	2,541
440,290	0,029	2,544	399,783	0,029	2,308
480,522	0,192	2,774	359,836	0,060	2,079
520,796	0,016	3,006	319,479	0,013	1,847
560,843	0,031	3,236	279,518	0,019	1,618
601,298	0,089	3,479	239,563	0,044	1,389
641,728	0,022	3,705	199,332	0,012	1,159
681,755	0,026	3,934	159,186	0,011	0,930
722,421	0,038	4,168	119,533	0,072	0,705
763,129	0,019	4,405	79,528	0,031	0,483
803,661	0,178	4,641	39,507	0,015	0,274

Foram observados valores de desvio padrão reduzidos, situados entre 0,010 MPa e 0,192 MPa. O máximo valor de desvio padrão obtido foi igual a 0,192 MPa para um valor correspondente de tensão mecânica igual a 480,522 MPa, o que representa 0,039 % do valor de tensão mecânica do patamar, indicando a excelente repetibilidade dos valores de tensão mecânica.

Tabela 11.4: Média, desvio padrão (68,27 %) e incerteza expandida (95,45 %) da força medida pela célula de carga de 1 kN no teste de verificação, com carregamento e descarregamento do corpo de prova com dimensões nominais de 10 mm x 10 mm x 60 mm

Carregamento					Descarregamento				
VC (N)	Força média (N)	Erro (N)	s (N)	U (N)	VC (N)	Força média (N)	Erro (N)	s (N)	U (N)
20,000	19,896	-0,104	0,030	0,025	286,000	285,970	-0,030	0,014	0,352
34,000	34,313	0,313	0,101	0,040	272,000	271,998	-0,002	0,035	0,334
48,000	47,422	-0,578	0,376	0,073	258,000	257,981	-0,019	0,027	0,317
62,000	61,681	-0,319	0,238	0,081	244,000	244,013	0,013	0,018	0,300
76,000	75,815	-0,185	0,205	0,097	230,000	229,996	-0,004	0,021	0,283
90,000	89,940	-0,060	0,171	0,113	216,000	215,990	-0,010	0,024	0,266
104,000	104,039	0,039	0,145	0,129	202,000	201,952	-0,048	0,027	0,248
118,000	118,137	0,137	0,116	0,146	188,000	188,026	0,026	0,014	0,231
132,000	132,202	0,202	0,101	0,163	174,000	174,017	0,017	0,029	0,214
146,000	145,779	-0,221	0,058	0,180	160,000	160,006	0,006	0,035	0,197
160,000	159,824	-0,176	0,075	0,197	146,000	146,047	0,047	0,040	0,180
174,000	173,880	-0,120	0,074	0,214	132,000	132,010	0,010	0,043	0,163
188,000	187,930	-0,070	0,068	0,231	118,000	117,993	-0,007	0,039	0,145
202,000	201,977	-0,023	0,067	0,249	104,000	104,045	0,045	0,058	0,128
216,000	216,019	0,019	0,062	0,266	90,000	90,115	0,115	0,071	0,111
230,000	230,065	0,065	0,058	0,283	76,000	76,140	0,140	0,071	0,094
244,000	244,104	0,104	0,058	0,300	62,000	62,160	0,160	0,120	0,078
258,000	258,145	0,145	0,056	0,318	48,000	48,248	0,248	0,184	0,063
272,000	272,122	0,122	0,080	0,335	34,000	34,473	0,473	0,261	0,052
286,000	285,842	-0,158	0,057	0,351	20,000	20,754	0,754	0,363	0,050

Valores de desvio padrão pouco expressivos foram observados, variando entre 0,014 N e 0,376 N, o que indica a excelente repetibilidade dos valores de força. O máximo valor de desvio padrão obtido foi igual a 0,376 N para um valor correspondente de força igual a 47,422 N, o que representa 0,79 % do valor médio de força medido no patamar.

Tabela 11.5: Média, desvio padrão (68,27 %) e incerteza de medição expandida (95,45 %) do ângulo medido pelo *encoder* no teste de verificação da célula de carga de 1 kN, com carregamento e descarregamento do corpo de prova com dimensões nominais iguais a 10 mm x 10 mm x 60 mm

Carregamento			Descarregamento		
Ângulo médio (°)	Desvio padrão (°)	U (°)	Ângulo médio (°)	Desvio padrão (°)	U (°)
86,42	0,09	0,21	89,84	0,09	0,21
86,60	0,09	0,21	89,66	0,09	0,21
86,96	0,09	0,21	89,48	0,09	0,21
87,14	0,09	0,21	89,48	0,09	0,21
87,32	0,09	0,21	89,30	0,09	0,21
87,50	0,09	0,21	89,12	0,09	0,21
87,77	0,09	0,21	89,12	0,09	0,21
87,96	0,09	0,21	88,94	0,09	0,21
88,04	0,09	0,21	88,76	0,09	0,21
88,22	0,09	0,21	88,76	0,09	0,21
88,40	0,09	0,21	88,58	0,09	0,21
88,58	0,09	0,21	88,40	0,09	0,21
88,76	0,09	0,21	88,22	0,09	0,21
88,94	0,09	0,21	88,22	0,09	0,21
89,04	0,09	0,21	88,04	0,09	0,21
89,12	0,09	0,21	87,86	0,09	0,21
89,30	0,09	0,21	87,68	0,09	0,21
89,48	0,09	0,21	87,50	0,09	0,21
89,66	0,09	0,21	87,32	0,09	0,21
89,66	0,09	0,21	86,96	0,09	0,21

Tabela 11.6: Média, desvio padrão (68,27 %) e incerteza de medição expandida (95,45 %) associada ao cálculo da tensão mecânica no teste de verificação da célula de carga de 1 kN com carregamento e descarregamento do corpo de prova com dimensões nominais de 10 mm x 10 mm x 60 mm

Carregamento			Descarregamento		
Tensão mecânica média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	U (MPa)	Tensão mecânica média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	U (MPa)
38,770	0,058	0,342	566,166	0,028	5,013
59,124	0,197	0,522	538,109	0,070	4,760
92,662	0,734	0,822	509,988	0,054	4,512
120,634	0,466	1,066	482,375	0,036	4,266
148,405	0,400	1,311	454,323	0,041	4,015
176,213	0,335	1,555	426,322	0,048	3,768
204,098	0,358	1,802	398,614	0,052	3,524
231,967	0,315	2,048	370,839	0,028	3,276
259,679	0,198	2,293	342,941	0,057	3,029
286,585	0,113	2,530	315,329	0,069	2,784
314,459	0,148	2,778	287,584	0,078	2,540
342,391	0,145	3,025	259,734	0,085	2,293
370,360	0,134	3,272	231,959	0,077	2,047
398,354	0,132	3,519	204,540	0,113	1,806
426,237	0,274	3,767	177,010	0,140	1,562
454,102	0,114	4,014	149,429	0,139	1,319
482,193	0,115	4,265	121,889	0,236	1,076
510,313	0,112	4,515	94,529	0,361	0,835
538,356	0,158	4,761	67,480	0,511	0,598
565,498	0,113	5,005	40,552	0,709	0,367

Foram observados valores reduzidos de desvio padrão associados à tensão mecânica no teste de verificação da célula de carga de 1 kN. Estes estão situados entre 0,028 MPa e 0,734 MPa. O

máximo valor de desvio padrão obtido foi igual a 0,734 MPa para um valor correspondente de tensão mecânica igual a 92,662 MPa, o que representa 0,79 % do valor de tensão mecânica do patamar, indicando a excelente repetibilidade dos valores de tensão mecânica.

## A P Ê N D I C E X I I

### **Equações para cálculo do fator de intensificação de tensão mecânica ( $K_{TH}$ ) em corpos de prova uni entalhados e em esforço de flexão a quatro pontos (4-point Bend Single Edge Notched)**

A seguir encontram-se as equações para cálculo do fator de intensificação de tensão mecânica ( $K_{TH}$ ), para corpos de prova uni entalhados e em esforço de flexão a quatro pontos, tal qual no teste de carregamento em patamares progressivos sob meio assistido. As equações foram apresentadas por KERNION *et al.* (2014) e ANDERSON (2005).

A Figura A12.1 ilustra um corpo de prova uni entalhado no centro.

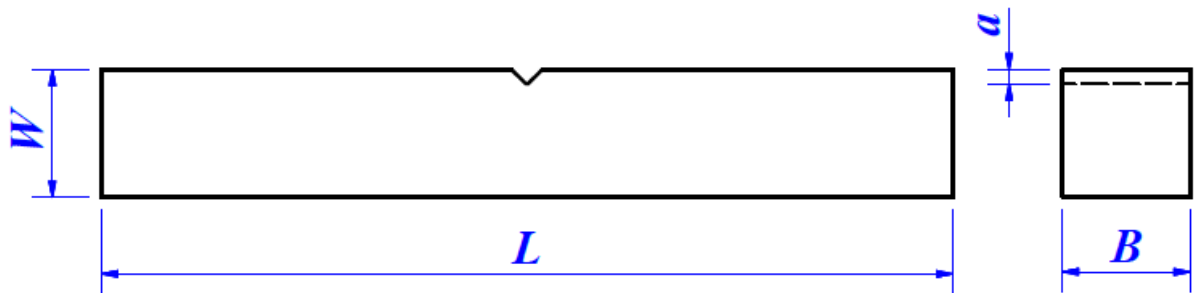


Figura A12.1: Corpo de prova uni entalhado com identificação de algumas dimensões

Na Fig. A12.1,  $B$  representa a largura do corpo de prova em questão;  $W$  corresponde à altura do corpo de prova,  $L$  denota o comprimento do corpo de prova e  $a$  significa a profundidade do entalhe do corpo de prova. A dimensão  $(W - a)$ , que representa a altura do corpo de prova subtraída da profundidade do entalhe, foi denotada como “base do entalhe” neste trabalho.

A tensão mecânica ( $\sigma$ ) do corpo de prova da Fig. A12.1 submetido à flexão a quatro pontos é dada pela Eq. (A12.1).

$$\sigma = F_a \left[ \frac{3}{BW^2} (2 d_1 \sin \theta + 2 d_3 \cos \theta + d_6 \sin \theta) - \frac{\cos \theta}{BW} \right] \quad (\text{A12.1})$$

Na Equação (A12.1),  $\sigma$  é a tensão mecânica nominal na direção longitudinal do corpo de prova;  $F_a$  é a força realizada pelo atuador;  $d_1$  representa a distância vertical entre o centro do eixo de giro do braço e o centro do furo do rolete mais abaixo no braço;  $d_3$  é a distância horizontal do eixo de giro do braço em relação ao eixo central do corpo de prova;  $d_6$  é a distância vertical entre os centros do furo do rolete mais abaixo do braço e do furo do rolete mais acima do suporte do corpo de prova;  $b$  representa a largura do corpo de prova;  $W$  representa a altura do corpo de prova e  $\theta$  representa o ângulo de giro do braço em relação ao atuador. Embora  $L$  não apareça na Eq. (A12.1), o comprimento do corpo de prova é uma das variáveis que compõem a equação de cálculo de  $d_6$ . Cabe ressaltar que a tensão mecânica calculada na Eq. (A12.1) considera a seção transversal bruta do corpo de prova, sem considerar a profundidade do entalhe. A Figura A12.2 ilustra as dimensões acima citadas de forma esquemática.

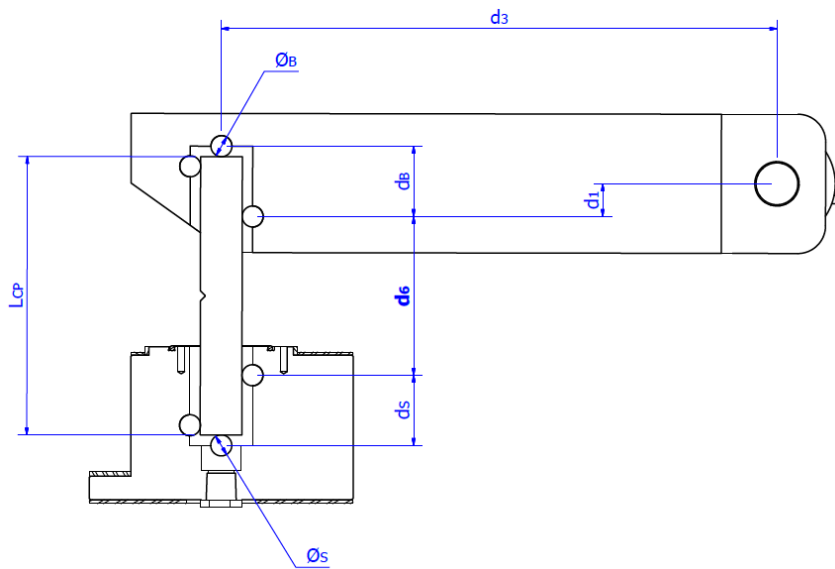


Figura A12.2: Distâncias envolvidas no cálculo da tensão mecânica de um corpo de prova uni entalhado em flexão a quatro pontos

O cálculo do fator de intensificação de tensão mecânica ( $K_{TH}$ ) é exibido na Eq. (A12.2).

$$K_{TH} = \sigma \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (\text{A12.2})$$

Em que a função polinomial  $f\left(\frac{a}{W}\right)$  é dada na Eq. (A12.3).

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 1,122 - 1,4\left(\frac{a}{W}\right) + 7,33\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 13,08\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 14\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (\text{A12.3})$$

As unidades de cada uma das variáveis são as seguintes:

$a, W$ : [m]

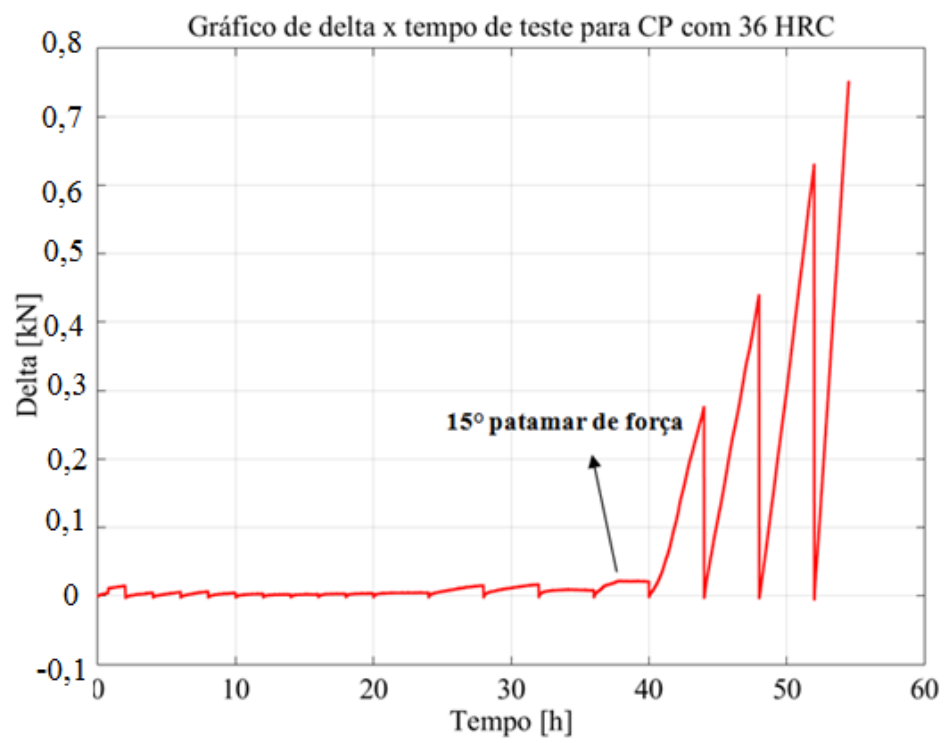
$\sigma$ : [MPa]

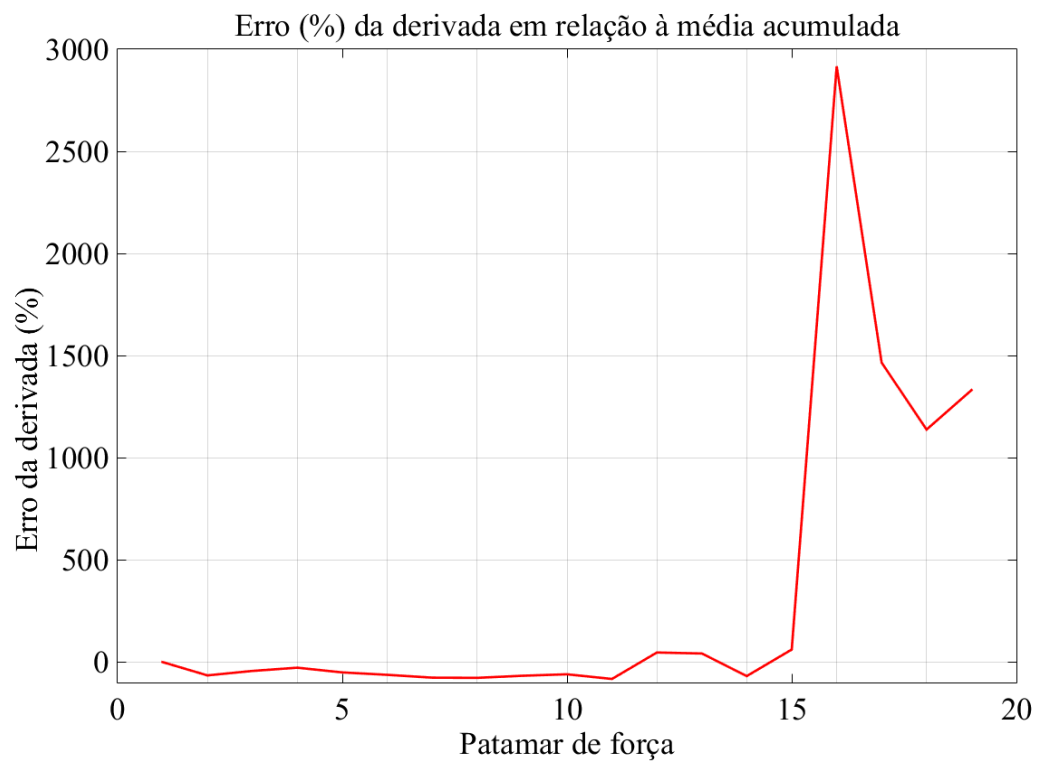
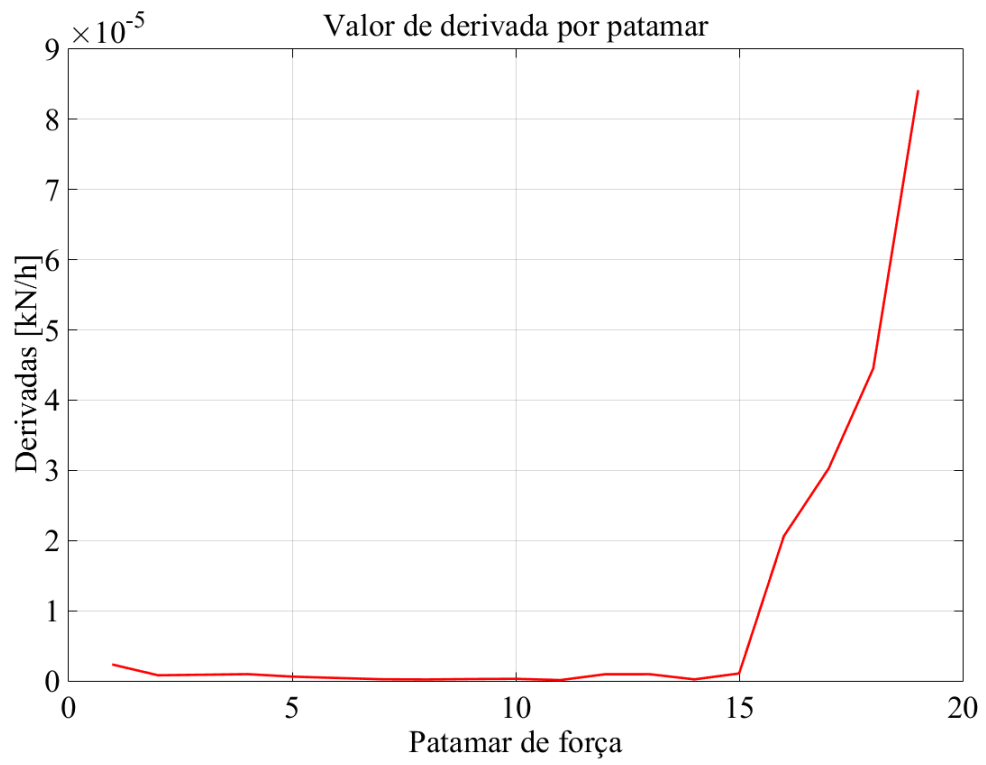
$K_{TH}$ : [ $MPa \sqrt{m}$  ]



## A P Ê N D I C E XIII

Rotina MATLAB para determinação numérica do patamar de  $P_{TH}$





```

clear all
close all
clc

format shortG

R = [];
files = dir('*.txt');
for aux = 1:numel(files)
    R = [R; load(files(aux).name)];
end
clear files

%%%%% PARTE 1: CONSTRUÇÃO DO VETOR DE RESULTADOS %%%%%

% Removendo o tempo negativo
Set_dif_zero = find(R(:,2),1,'first');
R2 = R(Set_dif_zero:end,:);

% Calculando o número de patamares
steps_realizados = sum(logical(diff(R2(:,4))));

% Limpando os outliers
inicio_step = find(logical(diff(R2(:,4))));
inicio_step = inicio_step + 1;
fim_step = find(logical(diff(R2(:,2))));
fim_step(end+1) = size(R2,1);
Manter = [];
for aux=1:steps_realizados
    Manter = [Manter, inicio_step(aux):fim_step(aux)];
end
Limpar = 1:size(R2,1);
Limpar(:,Manter) = [];
R2(Limpar,:) = [];
inicio_step = ones(steps_realizados,1);
inicio_step(2:end) = find(logical(diff(R2(:,4))));
inicio_step(2:end) = inicio_step(2:end) + 1;
fim_step = find(logical(diff(R2(:,2))));
fim_step(end+1) = size(R2,1);

% Calculando o delta
delta = R2(:,2) - R2(:,3);

%%%%% PARTE 2: ANÁLISE DO DELTA POR STEP %%%%%

% Calculando a média e a derivada temporal do delta para cada patamar
delta_medio = zeros(steps_realizados,1);
der = zeros(steps_realizados,1);
for aux=1:steps_realizados
    delta_medio(aux) = mean(delta(inicio_step(aux):fim_step(aux)));
    pol =
polyfit(R2(inicio_step(aux):fim_step(aux),1),delta(inicio_step(aux):fim_step(aux)),1);
    der(aux) = polyder(pol);
end

```

```

% Transformando em porcentagens
valor1 = zeros(steps_realizados,1);
valor2 = zeros(steps_realizados,1);
valor3 = zeros(steps_realizados,1);
for aux=1:steps_realizados-1
    valor1(aux+1) = 100*(delta_medio(aux+1) -
mean(delta_medio(1:aux)))/mean(delta_medio(1:aux));
    valor2(aux+1) = 100*(delta_medio(aux+1) -
delta_medio(aux))/delta_medio(aux);
    valor3(aux+1) = 100*(der(aux+1) - mean(der(1:aux)))/mean(der(1:aux));
end

% PARTE 3: APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS
resultados(:,1) = 1:steps_realizados;
resultados(:,2) = delta_medio;
resultados(:,3) = valor1;
resultados(:,4) = valor2;
resultados(:,5) = der;
resultados(:,6) = valor3;

fprintf('\n')
disp('          Step          Delta          Erro%m          Erro%a          Derivada
ErroDer%m')
disp(resultados);

figure
plot(R2(:,1)./3600,delta)
title('Subplot 1: Delta x Tempo')
xlabel('Tempo [h]')

figure
plot(resultados(:,5))
title('Subplot 2: Derivadas')
xlabel('Patamar de força')

figure
plot(resultados(:,3))
title('Subplot 3: erro (%) do delta em relação à media acumulada')
xlabel('Patamar de força')

figure
plot(resultados(:,6))
title('Subplot 4: erro (%) da derivada em relação à media acumulada')
xlabel('Patamar de força')

```

**Anexo I: Características do módulo de aquisição de dados HBM QuantumX  
MX840B**

Número de entradas	8, isoladas eletricamente entre si e da alimentação
Tecnologias de transdutores compatíveis	<i>Strain gauge full e half bridge</i>
	Quarter-bridge com 1-SCM-SG120/350
	Indutivo <i>full e half bridge</i>
	Piezoresistivo <i>full bridge</i>
	IEPE (ICP®)
	Transdutores potenciométricos
	Tensão (300 mV, 10 V, 60 V, até 300 V CAT II com 1-SCM-HV)
	Corrente (0 a 20 mA)
	Termorresistências (PT100, PT1000)
	Termopares (B, J, R, K, N, E, T, S) com junta fria no plug (1-THERMO-MXBOARD)
	Frequência
	Contagem de pulsos
	SSI
	<i>Encoder</i> incremental
	Receber ou enviar sinais de medida via CAN
Conversor A/D	24 bits Delta Sigma
Taxa de amostragem	0,1 a 40 000 Hz
Largura de banda do sinal	7,2 kHz
Filtro ativo passa baixa	Bessel, Butterworth, fase linear de 0,01 a 3 000 Hz (-3 dB), Filtro desativado
Identificação do transdutor	TEDS, IEEE 1451.4
Conector dos transdutores	D-SUB-15HD
Tensão de excitação do transdutor	5 a 24 VDC
Interfaces de comunicação	<i>Ethernet e FireWire</i>
Temperatura de operação	-20 a 65 °C
Classe de exatidão	<i>Strain gauge full bridge</i> : 0,05 % para sensibilidade de 5 mV/V ou 10 mV/V e excitação com frequência portadora de 4 800 Hz
	Voltagem na faixa de -10 V a 10 V: 0,05 %
	Corrente na faixa de -20 mA a 20 mA: 0,05 %
	PT 100 e PT 1000: 0,1 %

## Anexo II: Certificado de calibração do espectrômetro de emissão óptica por plasma induzido

# Analytical Reference Materials International

## *Provisional Certificate of Analysis*

### 975-101-318 Certified Reference Material

741490  
6-27-14

Grade: Haynes 230 / UNS N06230  
Part Number (Q.A. NO.): IARM 68D

Certificate Date: 06/18/2012      Certificate No.: 68D-06182012-IARM-P      Revision Date: 06/18/2012

#### Interpretation of Data

1. Certified values listed below reflect analysis results submitted by qualified analytical laboratories using a combination of methods and instrumentation that emulate actual methods and instrumental techniques currently utilized in the analytical community and are reported as % wt. unless otherwise noted.
2. Any data reported and enclosed by a parentheses ( ) is a "best estimate" and is NOT CERTIFIED. This data could not be quantified sufficiently for certification. It was however, reported by enough laboratories to be considered as potentially present in the matrix of the material being examined.
3. The "Inter-laboratory Analysis Program" (ILAP) utilized in the establishment of the data are an ongoing program with permanent membership. Certain elements may be selected by a consensus of the members for more extensive testing. Therefore the data in brackets [ ] indicates further testing is in process.
4. The "±Estimated Uncertainty" is enclosed by a parentheses ( ) below the individual element's concentration and is based on a Confidence Interval at 95%. Included in this estimated uncertainty, are the combined effects of method imprecision, material inhomogeneity, and any bias between methods.

**Important:** A "User Registration Card" accompanies all shipments. This card should be completed immediately upon receipt of materials with the appropriate user information. This is the only way in which ARMI can guarantee customer updates or possible data modifications!

Aluminum	Antimony	Boron	Carbon	Cobalt	Chromium	Copper	Iron	Lanthanum
[0.33] [(0.01)]		[0.004] [(0.0005)]	[0.099] [(0.002)]	[0.16] [(0.01)]	[21.6] [(0.1)]	[0.015] [(0.001)]	[1.11] [(0.02)]	[(0.011)]
Lead	Magnesium	Manganese	Molybdenum	Nitrogen	Niobium	Nickel	Oxygen	Phosphorus
	[0.006] [(0.001)]	[0.49] [(0.005)]	[1.29] [(0.01)]	[0.0483] [(0.0004)]	[0.029] [(0.001)]	[60.3] [(0.3)]	[(0.0005)]	[0.006] [(0.001)]
Silicon	Silver	Sulfur	Tantalum	Tin	Titanium	Tungsten	Vanadium	Zirconium
[0.42] [(0.01)]		[(0.0001)]	[(0.01)]		[0.011] [(0.0004)]	[14.1] [(0.1)]	[0.009] [(0.001)]	[0.003] [(0.001)]

The laboratories participating in the "Inter-Laboratory Analysis Program" (ILAP) and certification of this material are as follows:

Anderson Laboratories, Inc. - Greendale, WI	ATI Allvac, Lockport - Lockport, NY
ATI Allvac, Monroe - Monroe, NC	ATI Metals, Richland - Richland, WA
Exova - Los Angeles, CA	Haynes International, Inc. - Kokomo, IN
Huntington Alloys Corporation - Huntington, WV	Kalco Metals, Inc. - Wheatland, PA
Laboratory Testing, Inc. - Hatfield, PA	Leco Corporation - St. Joseph, MI
Special Metals IncoTest - Hereford, UK	ThyssenKrupp VDM USA - Florham Park, NJ

**Traceability:** All members of the "Inter-Laboratory Analysis Program" (ILAP) listed above validate test methods and instrument performance utilizing SRMs produced by the National Institute of Standards and Technology, (NIST) as well as other CRMs and RMs produced by recognized Certifying Bodies from around the world. The specific SRMs, CRMs, and RMs applicable to the material covered by this certificate are IARM 68A, BS 718A, H2-B, LECO 501-503, 502-257, 502-414, 502-456, , NIST 3102A, 3106, 3107, 3109A, 3128, 3131A, 3151, 3161A, IARM 68C, LECO 501-502, 501-503, 501-643, 501-644, NIST 349, 865, 3106, 3107, 3109A, 3114, 3127A, 3128, 3131A, 3162A, 3165, MBH 24XWASP3D, 215XHCSS, ALPHA AR511, AR669, HAS 22A, 200P, BICTA1, BCS 351, 454/1, 462/1, IH R5657, LECO 501-551, 502-102, NIST 899C, BCS CRM 346, IARM 68A, 68C, LECO 501-675, 502-102, IARM 68C, SYN 230H, QGFB, ALPHA AR881, LECO 501-991, , LECO 501-502, NIST 85, 864, 867, IARM 56D, 68B, 68C, 100B, LECO 501-644, IARM 68B, 68C, 234B, CT 1177, 1206, BS CSN-4, LECO 502-257, 502-456, , IARM 68B, LECO 501-676, , IARM 68B, LECO 501-503, 502-257, , ALPHA AR669.

A specific line of traceability is established to NIST and other Certifying Bodies for those elements that are noted as "Certified Values" on the Certificates of Analyses referenced above.

**See Reverse Side for Statistical Data and Additional Information Regarding this Material.**

700 Corporate Cr., Suite A • Golden, Colorado 80401 • Telephone (303) 216-2621 • FAX (303) 216-2649



## Anexo II: Certificado de calibração do espectrômetro de emissão óptica por plasma induzido (continuação)

The following data and accompanying statements represent all pertinent information reported in the ILAP as it applies to the chemical characterization of this material as of 06/18/2012.

STD	Al	B	C	Ca	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	N	Nb	Ni	O	P
1	0.32	0.004	0.100	0.13	21.76	0.014	1.07	0.0062	0.49	1.32	0.048	0.032	60.40	0.0004	0.0073
2	0.331	0.006	0.098	0.154	21.65	0.015	1.181	0.0060	0.479	1.263	0.0476	0.027	60.633	0.00035	0.005
3	0.33	0.0037	0.100	0.13	21.558	0.0160	1.06	0.0062	0.48	1.32	0.0485	0.030	59.836	0.0009	0.0068
4	0.327	0.0045	0.0990	0.166	21.381	0.013	1.116	0.0073	0.496	1.308	0.0484	0.0259	59.80	0.0008	0.0047
5	0.3460	0.0039	0.1022	0.1677	21.70	0.0161	1.0826	0.0054	0.4797	1.3026	0.0485	0.0207	60.44	0.00024	0.0075
6	0.305	0.0025	0.0975	0.193	21.535	0.0146	1.0564	0.0061	0.490	1.29	0.0482	0.0274	61.090	0.0004	0.0054
7	0.3465	0.0044	0.1022	0.1705	21.62	0.0131	1.087	0.0058	0.4966	1.2768	0.049	0.030	60.285		0.0064
8	0.323	0.0031	0.0937	0.184	21.490	0.014	1.140		0.490	1.282		0.0271	59.991		0.0067
9	0.3302		0.1035	0.128	21.593	0.0164	1.1425		0.4913	1.310		0.028	60.4		0.0062
10	0.324		0.0945	0.1489	21.624	0.0162	1.127		0.490	1.2833					0.0052
11	0.341		0.0996	0.190	21.606	0.0131	1.122		0.484	1.295					0.0054
12			0.100	0.195	21.617		1.125		0.492	1.287					
13			0.097	0.189						1.284					
14			0.2044												
Mean	0.3293	0.0038	0.0990	0.1594	21.5836	0.0147	1.1135	0.0060	0.4905	1.2931	0.0483	0.0286	60.3150	0.0005	0.0061
STDV	0.0120	0.0006	0.0029	0.0220	0.0926	0.0013	0.0341	0.0007	0.0074	0.0187	0.0004	0.0020	0.3987	0.0003	0.0010
Certified	0.33	0.004	0.099	0.16	21.6	0.015	1.11	0.006	0.49	1.29	0.0483	0.029	60.3	(0.0005)	0.006
95% C.I.	0.01	0.0005	0.002	0.01	0.1	0.001	0.02	0.001	0.005	0.0004	0.001	0.001	0.3		0.001
Methods	X,G,I,O	D,I,O	C	X,G,I,O	X,W,I,O	X,G,I,O	X,G,I,O	I,O	X,G,I,O	X,G,I,O	F	X,G,I,O	X,W,I,O	F	X,G,I,O

Legend: W = Classical, C = Combustion, F = Fusion, A = AA or GFAA, I = ICP or DCP, D = DC Arc, G = AES, X = XRF, G = GDAES or GDM5, H = Hollow Cathode AES

STD	S	Si	Ta	Ti	V	W	Ag	As	Bi	Ca	La	Pb	Sb	Sn	Zr
1	0.000253	0.40	0.0029	0.011	0.0068	13.99	0.00002	0.0015	0.0000007	0.0012	0.015	0.00006	0.00006	0.00017	0.004
2	0.0001	0.441	0.0236	0.0106	0.010	14.202	0.00002	0.00033	0.0006	0.0058	0.0114	0.0007	0.0002	0.0003	0.0009
3	0.000	0.41	0.0150	0.0117	0.0079	13.97	<0.00001		0.00001	0.001	0.009	0.00004	0.00006	0.00021	0.0013
4	0.0001	0.420	0.0186	0.0109	0.010	14.375	0.00001		0.00003	0.0003	0.0073	0.00006	0.0001	0.0001	0.0030
5	0.0001	0.4592	0.0114	0.010	0.0063	13.95	<0.0001		<0.00001	<0.0001	0.0100	0.00007		0.0145	0.0019
6	0.0001	0.428		0.0107	0.0122	14.096			<0.0001			<0.0001			0.0023
7	0.0001	0.426		0.011	0.008	14.22									0.0045
8		0.429		0.0114	0.0094	14.110									
9		0.4251			0.0067	14.160									
10		0.428				14.313									
11		0.405				14.120									
12		0.437				14.221									
Mean	0.0001	0.4215	0.0143	0.0109	0.0095	14.1439	0.0000	0.0009	0.0007	0.0021	0.0105	0.0002	0.0001	0.0031	0.0026
STDV	0.0001	0.0128	0.0078	0.0005	0.0016	0.1324	0.0000	0.0008	0.0013	0.0025	0.0029	0.0003	0.0001	0.0004	0.0013
Certified	(0.0001)	0.42	(0.01)	0.011	0.009	14.1				(0.01)					0.003
95% C.I.	0.01	0.0004	0.001	0.1											0.001
Methods	C	X,G,I,O	D,I,O	X,D,I,O	X,G,D,I,O	X,G,I,O				D,I,O					X,I,O

Legend: W = Classical, C = Combustion, F = Fusion, A = AA or GFAA, I = ICP or DCP, D = DC Arc, G = AES, X = XRF, G = GDAES or GDM5, H = Hollow Cathode AES

The International Standards Organization (ISO) definitions, expressed in ISO Guide 30-1992 list the following:

**Certifying Body:** Any technically competent body (organization or firm, public or private) that issues a reference material certificate, which provides the information, detailed in ISO Guide 31. The only generally accepted certifying body in the United States for primary standards - Standard Reference Materials (SRM) is the U. S. Department of Commerce, National Institute of Standards & Technology, (NIST), Gaithersburg, MD. All other certifying bodies in the United States produce Reference Materials (RM) or Certified Reference Materials (CRM).

**Reference Material (RM):** Material or substance one or more of whose property values are sufficiently homogeneous and well established to be used for the calibration of an apparatus, the assessment of a measurement method, or for assigning values to materials.

**Certified Reference Material (CRM):** Reference material, accompanied by a certificate, one or more of whose property values are certified by a procedure, which establishes its traceability to an accurate realization of the unit in which the property values are expressed, and for which each certified value is accompanied by an uncertainty at a stated level of confidence.

**Inter-Laboratory Analysis Program (ILAP):** Although ASTM Standard E691-87 applies to inter-laboratory studies to "Determine the Precision of a Single Test Method", it is also a well thought out and logical plan for conducting an inter-laboratory program involving multiple techniques. Therefore, the planning, conducting, analyzing, protocol, and treatment of data resulting from this inter-laboratory program were performed utilizing the guidelines established in ASTM E691-87.

**Methods of Analysis:** In view of the fact, that the "Inter-Laboratory Analysis Program" entails a wide variety of materials, no single analytical method would provide optimum data results. Therefore, the methods utilized were a combination of ASTM Standard Methods for classical wet chemistry, ICP, AA, Optical Emission, and X-Ray spectrometric methods. The determinations for Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen are the result of combustion and O/E instrument procedures.

**Expiration of Certification:** The certification of this IARM is valid indefinitely, within the uncertainty specified, provided the IARM is handled and stored in accordance with the instructions stated on this certificate. The certification is nullified if the IARM is damaged, contaminated, otherwise modified, or used in a manner for which it was not intended.

**Instructions for Use:** The test surface is the side opposite to the labeled surface, which includes the IARM number. The entire thickness of the unit is certified. However, the user is cautioned not to measure disks less than 2 mm thick when using X-ray fluorescence spectrometry. Each packaged disk has been prepared by finishing the test surface using a lathe. The user must determine the correct surface preparation procedure for each analytical technique. The user is cautioned to use care when either resurfacing the disk or performing additional polishing as these processes may contaminate the surface. When not in use, the material should be stored in a cool, dry location. This material was tested using both the solid disks and chips prepared from the disks. The certified values are considered representative of the overall average composition of the material. **Chips are not intended to be used for Nitrogen, or Oxygen analysis.**

**Selection of Materials:** A "batch" or "series" is defined as a single bar of one continuous length and heat. The majority of materials are in wrought condition; other methods of manufacture are utilized as a less desirable resort. ILAP samples are taken by removing a section, a minimum of, every one-twelfth of total length from the entire bar. A portion of the section is converted to chips and thin (pin) disk for analysis by classical wet chemistry, ICP, AA, and combustion procedures, and the balance remains as a thick disk for OES and X-Ray analysis. This systematic sampling procedure results in the homogeneity being reflected as a product of the overall statistics and certified data. This method of homogeneity testing is in accordance with ISO Guide 34, regarding the systematic selection and testing of a representative number of units for the assessment of homogeneity.

  
William D. Britt, General Manager  
Analytical Reference Materials International

Certificate No.: 68D-06182012-IARM-P  
Certificate Date: 06/18/2012  
Revision Date/No.: 06/18/2012

**Anexo II: Certificado de calibração do espectrômetro de emissão óptica por plasma  
induzido (continuação)**

975-101-558  
757114  
5-18-

# BRAMMER STANDARD COMPANY, INC.

Distributed by:  
Analytical Reference Materials International  
1 Perimeter Road, Suite 200  
Manchester, NH 03103 USA  
Tel: 603.935.4100, Fax: 603.935.4101  
Email: sales@armi.com

## Certificate of Analysis BS 189A

Certified Reference Material for Specialty Steel Grade AL6XN - UNS Number N08367

	Certified Value <sup>1</sup>	Estimate of Uncertainty <sup>2</sup>	Certified Values <sup>3</sup>	Certified Value <sup>1</sup>	Estimate of Uncertainty <sup>2</sup>
Al	0.0129	0.0007	N	0.198	0.004
As	0.0039	0.0007	Ni	23.8	0.1
C	0.0147	0.0009	O	0.0024	0.0004
Co	0.100	0.004	P	0.019	0.001
Cr	20.4	0.2	Si	0.30	0.01
Cu	0.184	0.004	Sn	0.0035	0.0005
Fe	[48.1]	0.2	Ti	0.0065	0.0007
Mn	0.639	0.009	V	0.054	0.001
Mo	6.04	0.03	W	0.037	0.003

	Reference Value	Estimate of Uncertainty	Reference Values <sup>3,4</sup>	Reference Value	Estimate of Uncertainty
Nb	0.13	0.02			

**Informational Values<sup>3,5</sup>**

B (0.0002)	Ca (0.0004)	S (0.001)	Zr (0.001)
------------	-------------	-----------	------------

<sup>1</sup> For each element, the certified value listed is the present best estimate of the true value based on the mean of the weighted results of an interlaboratory testing program. See page 4 for more information on its calculation.

<sup>2</sup> For each element, the uncertainty listed is based on a statistical evaluation of the contributions of homogeneity and the interlaboratory testing program. See page 4 for more information on its calculation.

<sup>3</sup> Values are given in weight percent. Values in brackets are reported by difference.

<sup>4</sup> Reference values are not certified and are provided for information only.

<sup>5</sup> Values in parentheses are not certified and are provided for information only.

The requirements of ISO Guides 31, 34, and 35 were followed for the preparation of this Certified Reference Material and certificate of analysis. This is a Certified Reference Material as defined by ISO Guide 30.

Brammer Standard Company, Inc., 14603 Benfer Road, Houston, TX 77069-2895  
Telephone: (281) 440-9396 Fax: (281) 440-4432 Website: [www.brammerstandard.com](http://www.brammerstandard.com)  
Certificate Number 189A-041015 Page 1/7



## Anexo II: Certificado de calibração do espectrômetro de emissão óptica por plasma induzido (continuação)

BS 189A		* Code for method		Certified values listed as weight percent							
Analysis	Al	As	C	Co	Cr	Cu	Fe	Mn			
1	10 0.0115	5 0.003433	1 0.013867	3 0.0933	3 19.95	5 0.1761	16 47.64333	10 0.55133			
2	3 0.0122	15 0.003477	1 0.014233	4 0.093567	14 19.95333	10 0.1779	16 47.75	4 0.617			
3	4 0.0124	5 0.003633	1 0.014467	14 0.095333	4 19.97667	4 0.178333	10 47.84333	8 0.620333			
4	14 0.012433	5 0.0041	1 0.014533	10 0.096	4 19.98547	10 0.18	16 48.11333	4 0.621			
5	4 0.0126	9 0.004867	3 0.0151	8 0.096433	13 19.995	4 0.18	13 48.187	4 0.627			
6	3 0.013		1 0.015247	4 0.096633	4 20.12333	4 0.180333	4 48.25333	3 0.63			
7	4 0.0133		1 0.0156	4 0.098067	10 20.20	14 0.185333	16 48.26327	10 0.63			
8	5 0.013733		3 0.016	3 0.10	13 20.26133	4 0.186367	14 48.50333	4 0.636333			
9	4 0.014067		1 0.0164	5 0.100567	3 20.34	3 0.19	16 48.74	4 0.638333			
10	3 0.014333			4 0.1027	10 20.37437	8 0.19267		4 0.6396			
11				4 0.108733	4 20.405	4 0.195333		10 0.64667			
12				4 0.11	10 20.47667			4 0.64667			
13				10 0.115467	4 20.54333			14 0.649			
14					4 20.56933						
Average	0.01285	0.00391	0.01469	0.0999	20.4043	0.1838	48.14	0.6388			
Std dev	0.00070	0.00028	0.00083	0.0025	0.0038	0.0045	0.10	0.0057			
H	0.0008	0.00049	0.0008	0.0022	0.12	0.0031	0.29	0.00715			
U <sub>1</sub>	0.0010	0.00056	0.0012	0.0033	0.12	0.0055	0.30	0.0091			
t-statistic	2.26	2.78	2.31	2.18	2.16	2.23	2.31	2.18			
U <sub>2</sub>	0.0024	0.0016	0.0027	0.0073	0.27	0.012	0.70	0.020			
U <sub>3</sub>	0.00075	0.00070	0.00090	0.0020	0.070	0.0037	0.23	0.0055			
Certified	0.0129	0.0039	0.0147	0.100	20.4	0.184	48.1	0.639			
Uncertainty	0.0007	0.0007	0.0009	0.004	0.2	0.004	0.2	0.009			
Tolerance	0.0024	0.0016	0.0027	0.007	0.3	0.012	0.7	0.02			

Analysis	Mo	N	Ni	O	P	Si	Sn				
1	4 5.958	2 0.186333	14 23.71	2 0.001775	4 0.016	4 0.22963	3 0.0028				
2	4 6.013333	2 0.194667	13 23.73533	2 0.00197	7 0.016133	10 0.283333	5 0.0029				
3	4 6.039817	2 0.195667	4 23.77333	2 0.002207	4 0.016467	4 0.287667	5 0.0029				
4	4 6.045333	2 0.199	3 23.81	2 0.002233	5 0.0173	3 0.29	5 0.003643				
5	4 6.049	2 0.200	4 23.84333	2 0.002333	3 0.019	10 0.29	4 0.003667				
6	4 6.057367	2 0.2007	4 23.87333	2 0.002533	4 0.019733	4 0.290267	5 0.003867				
7	3 6.06	2 0.2015	10 23.88333	2 0.0026	4 0.0199	10 0.297333	4 0.004				
8	10 6.06	2 0.2023	3 23.9	2 0.00289	10 0.02	5 0.2998					
9	3 6.09	2 0.203633	4 23.93		4 0.020767	6 0.308					
10	10 6.092633	2 0.204033	13 23.95		10 0.024033	4 0.321333					
11	14 6.093333		10 23.95077		14 0.024267	14 0.324					
12	4 6.106667		10 23.98			4 0.324667					
13			4 24.0922			3 0.325					
14			4 24.12167			4 0.346667					
Average	6.0408	0.1978	23.7738	0.002412	0.0190	0.3016	0.00352				
Std dev	0.0060	0.0044	0.0035	0.00081	0.0011	0.0048	0.00024				
H	0.041	0.0033	0.14	0.00041	0.0009	0.0043	0.00047				
U <sub>1</sub>	0.042	0.0055	0.14	0.00042	0.0014	0.0064	0.00053				
t-statistic	2.20	2.26	2.16	2.36	2.23	2.16	2.45				
U <sub>2</sub>	0.092	0.012	0.31	0.0010	0.0032	0.014	0.0013				
U <sub>3</sub>	0.027	0.0039	0.080	0.00035	0.0010	0.0037	0.00049				
Certified	6.04	0.198	23.8	0.0024	0.019	0.30	0.0035				
Uncertainty	0.03	0.004	0.1	0.0004	0.001	0.01	0.0005				
Tolerance	0.09	0.012	0.3	0.0010	0.003	0.01	0.0013				

## Anexo II: Certificado de calibração do espectrômetro de emissão óptica por plasma induzido (continuação)

BS 189A		* Code for method		Certified values listed as weight percent		
Analysis	Ti	V	W			
1	4	0.005433	10	0.047867	4	0.031633
2	4	0.005833	14	0.049467	3	0.0317
3	3	0.006	4	0.049867	14	0.0328
4	14	0.006133	5	0.0501	4	0.0346
5	4	0.007	4	0.0525	4	0.035867
6	5	0.0077	4	0.052667	5	0.037767
7			10	0.053	4	0.038883
8			4	0.053983	4	0.041333
9			3	0.054	4	0.043433
10			4	0.054867	7	0.043633
11			7	0.0550		
12			4	0.0597		
13			3	0.0613		
Average	0.00651		0.0537		0.0374	
Std dev	0.00033		0.0017		0.0013	
H	0.00059		0.0015		0.0013	
U <sub>1</sub>	0.00068		0.0023		0.0018	
t-statistic	2.57		2.18		2.26	
U <sub>2</sub>	0.0017		0.0050		0.0041	
U <sub>3</sub>	0.00071		0.0014		0.0013	
Certified	0.0065		0.054		0.037	
Uncertainty	0.0007		0.001		0.003	
Tolerance	0.0017		0.005		0.004	

BS 189A		* Code for method		Reference values listed as weight percent	
Analysis		Nb			
1	3	0.107			
2	4	0.108633			
3	14	0.113333			
4	10	0.133333			
5	4	0.141667			
6	4	0.146			
7	5	0.148733			
8	3	0.15			
9	10	0.15			
10	4	0.150583			
11	4	0.154333			
12					
13					
14					
Average		0.1344			
Std dev		0.0043			
H		0.0026			
U <sub>1</sub>		0.0050			
t-statistic		2.23			
U <sub>2</sub>		0.011			
U <sub>3</sub>		0.0030			
Reference		0.13			
Uncertainty		0.02			
Tolerance		0.01			



## Anexo II: Certificado de calibração do espectrômetro de emissão óptica por plasma induzido (continuação)

BS 189A		* Code for method		Informational values listed as weight percent			
Analysis	B	Ca	S	Zr			
1	3 0.00005	4 0.00034	1 0.0001	5 0.000233			
2	4 0.000197	3 0.00039	1 0.000233	3 0.001			
3	7 0.000303	4 0.00041	1 0.000287	4 0.001033			
4		4 0.000533	1 0.000293	4 0.0017			
5			1 0.0004				
6			2 0.000467				
7			1 0.001567				
8			3 0.0052				
Average	0.00018	0.00042	0.0011	0.0010			
Std dev	0.00012	0.00067	0.0030	0.0037			
H	0.00023	0.00026	0.00033	0.0003			
U <sub>1</sub>	0.00026	0.00072	0.0030	0.0037			
t-statistic	4.30	3.18	2.36	3.18			
U <sub>2</sub>	0.0011	0.0023	0.0072	0.012			
U <sub>3</sub>	0.00064	0.0011	0.0025	0.0059			
(Informational)	(0.0002)	(0.0004)	(0.001)	(0.001)			

For each element, in accordance with the requirements of ISO Guides 34 and 35, an effort must be made to account for the effects on the certified value of the uncertainty estimate from homogeneity testing (H) and the uncertainties of the contributing laboratories. The average (A) is calculated using a weighted mean where the reciprocal of the square of each laboratory's combined uncertainty (C<sub>L</sub>), calculated from its standard deviation (S<sub>L</sub>) and its uncertainty estimate (U<sub>L</sub>), is used as the weight (W<sub>L</sub>) for its mean (M<sub>L</sub>). The standard deviation (S) is calculated as the square root of the reciprocal of the sum of the weights. U<sub>1</sub> is the combined uncertainty from homogeneity and labs. U<sub>2</sub> is U<sub>1</sub> multiplied by the coverage factor (95 % t-statistic). U<sub>3</sub> is U<sub>2</sub> divided by the square root of the number of determinations (n). Thus:

$$C_L = \sqrt{S_L^2 + U_L^2} \quad W_L = \frac{1}{C_L^2} \quad A = \frac{\sum_{i=1}^n W_L M_L}{\sum_{i=1}^n W_L} \quad S = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n W_L}} \quad U_1 = \sqrt{H^2 + S^2} \quad U_2 = t \times U_1 \quad U_3 = \frac{U_2}{\sqrt{n}}$$

All but the final reported values are taken to two significant figures as determined by each quantity's uncertainty estimate. The final reported Uncertainty is U<sub>3</sub> rounded to one significant figure and represents the half width of the 95 % confidence interval for the Certified value. The final reported Certified value is A rounded to the same decimal place as the Uncertainty. The Tolerance is the half width of the 95 % confidence interval for measurements rounded to the same decimal place as the Uncertainty. The Uncertainty is a measure of the quality of the Certified value. The Tolerance is a measure of the expected performance of an analysis.

For further information regarding the confidence interval for the certified value see ISO Guide 35:2006 section 6.

### Analytical Method Codes:

1 Combustion (ASTM E1019)	7 Photometric	13 Titrimetric
2 Fusion (ASTM E1019)	8 Flame Atomic Absorption	14 DCP Atomic Emission
3 Spark Atomic Emission	9 GF Atomic Absorption	15 HG Atomic Fluorescence
4 ICP Atomic Emission	10 X-Ray Fluorescence	16 Difference
5 ICP Mass Spectrometry	11 GD Atomic Emission	
6 Gravimetric	12 GD Mass Spectrometry	

ICP = Inductively Coupled Plasma    GF = Graphite Furnace    GD = Glow Discharge  
DCP = Direct Current Plasma    HG = Hydride Generation

## Anexo II: Certificado de calibração do espectrômetro de emissão óptica por plasma induzido (continuação)

<u>Laboratory</u>	<u>Location</u>	<u>Registrar</u>	<u>Accreditation</u>
Brammer Standard Company, Inc.	Houston, TX	A2LA	17025, Guide 34
NSL Analytical	Cleveland, OH	ACLASS	17025
Laboratory Testing, Inc.	Hatfield, PA	PRI/Nadcap	17025
Elemental Analysis, Inc.	Lexington, KY	A2LA	17025
National Analysis Center For Iron And Steel	Beijing, China	CNAS	17025
Luvak Inc.	Boylston, MA	PRI/Nadcap	17025
LECO Corporation	St. Joseph, MI	A2LA	17025
Exova	Glendale Heights, IL	A2LA	17025
Instytut Metalurgii Zelaza	Gliwice, Poland	PCA	AB 554

A2LA = American Association for Laboratory Accreditation

ACLASS = ANSI-ASQ National Accreditation Board

BSI = British Standards Institution

CNAS = China National Accreditation Service

Nadcap = National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program

PCA = Polish Center For Accreditation

PRI = Performance Review Institute

**Analysis:** Chemical analyses were made on solid pieces and chips prepared by an end mill from representative samples for the certified portion of the lot in accordance with ASTM Standard Practice E1806. The laboratories participating in the testing followed the requirements of ISO Standard 17025.

**Traceability:** The following Certified Reference Materials were used to validate the analytical data: 12X356, 12X357, 12X3255, 12X43400, 12X72M24, 13X12855, 13X31254, 13X32101, 13XNCS3, 13XNSA11; 501-320, 501-501, 501-502, 501-504, 501-644, 501-646, 501-952, 501-953, 501-993, 502-197, 502-348, 502-414, AR 612B, 644, 646, 662, 673, 676, 712C, 875, 1632, 1647; BAS 55, 65, 464, 464/1, 474; BS H3C, 83E, 187D, 188A; CKD 166A, 181; ECRM 85, 86, 87; IARM 157C; IMZ 112, 504; JK 37; JSS 654-8, 655-13; SRM 33E, 101C, 101D, 101E, 123A, 285, 345, 348, 361, 362, 363, 367, 1162, 1186, 1225, 1230, 1261, 1413.

**Homogeneity:** This Certified Reference Material (CRM) was tested for homogeneity using ASTM Standard Method E826 and found acceptable. It was also examined by spark atomic emission spectrometry and found to be compatible with the following Reference Materials — 501-676, 502-416; BAS 464, 474; BS 81N, 83E, 188A; ECRM 196-2, 299-1; JK 37; JSS 654-8; NCS NS 11022; SRM 1230, 2171.

**Validity statement:** ISO Guide 31 states that the certification should contain an expiration date for all materials where instability has been demonstrated or is considered possible, after which the certified value is no longer guaranteed by the certifying body. The certification of BS 189A is valid indefinitely. The certification is nullified if this CRM is damaged, contaminated, or otherwise modified.

**Source:** The bar stock for this CRM was produced by ATI Allvac, Richburg, SC.

**Form:** This CRM is machined in the form of a disc, approximately 38 mm in diameter and 19 mm thick by Brammer Standard Company, Inc.

**Use:** This CRM is intended for use in spark atomic emission, glow discharge, and x-ray spectrometric methods of analysis. Refer to ISO Guide 33 for information about the use of Certified Reference Materials.

**Certified Area:** The entire depth of the CRM may be used.

Caution: As with any bar material, avoid spark atomic emission spectrometric burns in the center of the CRM (5 mm radius), as some segregation may be present.

**Sample Preparation:** For best analytical results, use the same method for preparing the analytical surface on all reference materials as used for production specimens. Avoid overheating the sample during surface preparation.

**Certificate Number:** The unique identification number for this certificate of analysis is 189A-041015. You may obtain information on revisions of certificates from the internet at [www.brammerstandard.com](http://www.brammerstandard.com)



## Anexo II: Certificado de calibração do espectrômetro de emissão óptica por plasma induzido (continuação)

**Safety Notice:** A Material Safety Data Sheet (MSDS) is not required for this material. This material will not release or otherwise result in exposure to a hazardous chemical, under normal conditions of use. Inquiries concerning this Reference Material should be directed to:

Brammer Standard Co., Inc. Phone: (281) 440-9396 Web: [www.brammerstandard.com](http://www.brammerstandard.com)  
 14603 Benfer Road  
 Houston, Texas 77069-2895 USA Fax: (281) 440-4432 Email: [contact@brammerstandard.com](mailto:contact@brammerstandard.com)

Brammer Standard Company, Inc., is accredited by the American Association For Laboratory Accreditation (A2LA) to ISO Guide 34 as a Reference Material Producer for the production of Certified Reference Materials and Reference Materials (Certificate Number 656.02)

Brammer Standard Company's Chemical Laboratory is accredited by A2LA to ISO Standard 17025. (Certificate Number 656.01)

By Certificate Number 10539, the Quality System of Brammer Standard Company, Inc., is registered to ISO 9001:2008 by National Quality Assurance (NQA), U.S.A.

The scopes of accreditation are listed on the website: [www.brammerstandard.com](http://www.brammerstandard.com)

### References:

Versions used were those available at the time of testing and characterization

- E826 Standard Practice for Testing Homogeneity of a Metal Lot or Batch in Solid Form by Spark Atomic Emission Spectrometry
- E1019 Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Fusion Techniques
- E1806 Standard Practice for Sampling Steel and Iron for Determination of Chemical Composition

ISO Standard 17025:2005 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories

ISO Standard 9001:2008 Quality Management Systems - Requirements

ISO Guide 30:1992 Terms and definitions used in connection with reference materials + 2008 amendment

ISO Guide 31:2000 Reference materials - Contents of certificates and labels

ISO Guide 33:2000 Uses of certified reference materials

ISO Guide 34:2009 General requirements for the competence of reference material producers

ISO Guide 35:2006 Reference Materials - General and statistical principles for certification

*ASTM documents available from ASTM, 1916 Race Street, Philadelphia, PA, 19103.*

*ISO Guides and Standards available from Global Engineering - [www.global.ihs.com](http://www.global.ihs.com)*

*Other useful documents available from NIST, U.S. Department of Commerce, Gaithersburg, MD 20899.*

NIST Special Publication 260-100, Handbook for SRM Users

Brammer Standard Company, Inc., 14603 Benfer Road, Houston, TX 77069-2895  
 Telephone: (281) 440-9396 Fax: (281) 440-4432 Website: [www.brammerstandard.com](http://www.brammerstandard.com)  
 Certificate Number 189A-041015 Page 6/7

**Anexo II: Certificado de calibração do espectrômetro de emissão óptica por plasma  
induzido (continuação)**

NIST Special Publication 829, Use of NIST Standard Reference Materials for Decisions on Performance of Analytical Chemical Methods and Laboratories

Certified by:

on April 10, 2014.

Beau K. Brammer

## Anexo II: Certificado de calibração do espectrômetro de emissão óptica por plasma induzido (continuação)

# SUS

Ulrich Nell, Feldstr. 23, D - 46149 Oberhausen, Tel. 0208/658535 Fax 0208/658536

### Setting-up sample

Approximate composition of R N 14 / 53, steel low alloy

Sample size approx. 40 mm dia. x 40 mm thickness

#### Composition:

Description in %

Carbon .....	0.05	Niobium .....	>0.4
Silicon .....	2.0	Lead .....	0.04
Manganese .....	0.21	Tin .....	0.02
Phosphor .....	>0.12	Titanium .....	0.07
Sulphur .....	0.07	Vanadium .....	0.5
Chromium .....	2.9	Tungsten .....	0.3
Molybdenum .....	0.5	Zirconium .....	0.003
Nickel .....	0.04	Calcium .....	<0.01
Aluminium .....	0.010	Antimony .....	0.02
Arsenic .....	0.07	Tantalum .....	0.16
Boron .....	<0.001	Tellurium .....	0.03
Cobalt .....	0.5	Bismuth .....	0.01
Copper .....	0.38	Nitrogen .....	>0.036

Intended use: routine drift correction for Spark-OES and XRF spectrometers

Supplied and produced by SUS Ulrich Nell

The sample was produced by powder metallurgy

#### Notes:

- This sample should be used only for checking and correcting the drift of spectrometers
- The concentration values presented are not certified as accurate, as this setting-up sample is not a reference material to be used for calibration
- The material has been checked for homogeneity and is suitable for Spark-OES spectrometers

Oberhausen, December 2012

502-454  
749954  
12-9-14

**Anexo II: Certificado de calibração do espectrômetro de emissão óptica por plasma  
induzido (continuação)**

**SUS**

502-510-501  
747524  
10-20-14

Ulrich Nell, Feldstr. 23, D - 46149 Oberhausen, Tel. 0208/658535 Fax 0208/658536

Certificate of Analyses for low - and high alloyed steels

	C Fe 1/11		C Fe 2/7		C Fe 3/6		C Fe 4/6	
	Average (%)	ASD %	Average (%)	ASD %	Average (%)	ASD %	Average (%)	ASD %
C	0,008	0,0003	0,296	0,002	0,046	0,00248	1,50	0,00482
Si	0,016	0,0017	0,45	0,003	0,44	0,00266	0,29	0,00182
Mn	0,068	0,0003	0,69	0,003	1,59	0,0159	0,37	0,00409
P	0,006	0,0002	0,042	0,0001	0,026	0,00072	0,018	0,00042
S	0,005	0,0002	0,013	0,0007	0,022	0,00070	0,008	0,00028
Cr	0,027	0,0003	0,59	0,004	17,95	0,0639	11,04	0,0921
Mo	0,0016	0,0001	0,31	0,003	2,10	0,0245	0,78	0,00254
Ni	0,022	0,0002	0,83	0,005	10,22	0,0279	0,75	0,00118
Al	<0,002		0,015	0,0004	<0,02		<0,02	
Co	0,0029	0,0001	0,053	0,0003	0,34	0,00163	0,03	0,00042
Cu	0,015	0,0001	0,36	0,002	0,26	0,00187	0,05	0,00021
Nb	<0,0005				0,50	0,00267	<0,02	
Ti	<0,0005		0,045	0,0005	0,02	0,00033	0,02	0,00017
V	<0,0005		0,33	0,002	0,10	0,00055	0,94	0,0127
W	<0,0001		0,038	0,001	0,05	0,00204	<0,02	
Pb	<0,0001							
Sn	<0,002		0,033	0,0003	0,02	0,00047	<0,02	
As	0,002	0,0002	0,045	0,0003				
Zr	<0,0001				<0,02			
Ca	<0,001		<0,001					
B	<0,0004		0,0015	0,0001			<0,002	
Sb								
N	0,0027	0,0001	0,0197	0,0002	0,084	0,0112	0,050	0,0138



ASD = absolute standard deviation (1s) of accuracy

Participating laboratory / Teilnehmendes Laboratorium :

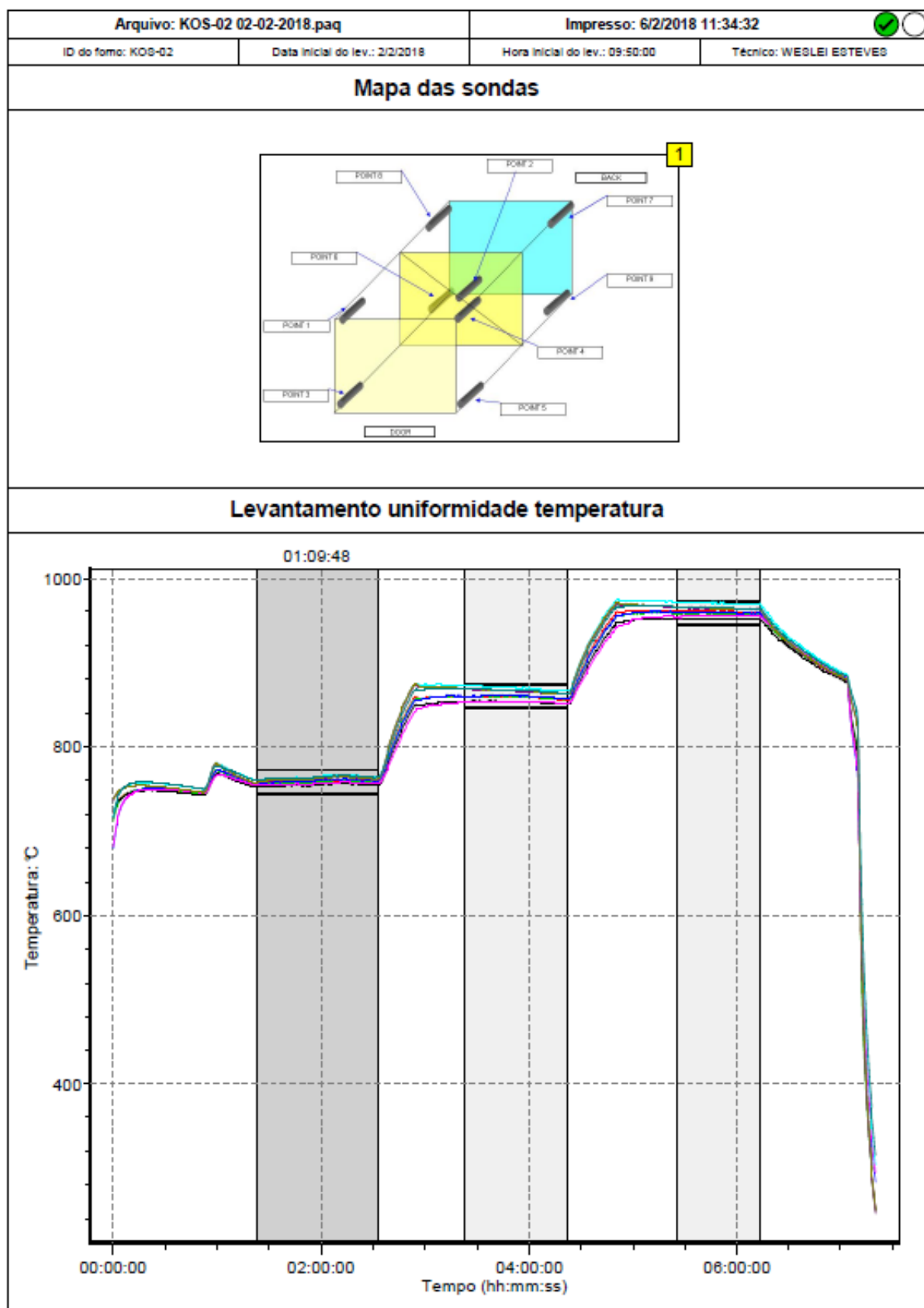
Thyssen - Krupp Stahl AG, D - Duisburg  
Revierlabor, D - Essen



### Anexo III: Certificado de calibração do forno terceirizado

Arquivo: KOS-02 02-02-2018.paq		Impresso: 6/2/2018 11:34:32		
ID do forno: KOS-02	Data inicial do lev.: 2/2/2018	Hora inicial do lev.: 09:50:00	Técnico: WESLEI ESTEVES	
		TUS		
<b>Detalhes levantamento</b>				
ID do forno	KOS-02			
Intervalo de operação do forno	760°C a 960°C			
Tolerância do levantamento	14,0			
Carretel de termopares/Lote nº	111/18, 112/18, 113/18, 114/18, 115/18, 116/18, 117/18, 118/18, 119/18			
Fatores de correção do termopar	ECIL 111-18 ate 119-18.cal			
Tipo de termopar	N			
Data inicial do lev.	2/2/2018			
Hora inicial do lev.	09:50:00			
Survey End Date	2/2/2018			
Survey End Time	17:10:00			
Data próximo levantamento				
Testando identificação da empresa				
Técnico	WESLEI ESTEVES			
ID do coletor	TestReg-03			
No. cert. calibração do coletor	25-01-2018			
Data de expiração	25/2/2018			
Fatores correção do coletor	TestReg-03 25-01-2018.lcf			
Intervalo de amostragem	0:30,00 (mm:ss,t)			
Volume processamento (AxCxL)				
Compatibilidade com (espec.)				
<b>Resultado levantamento uniformidade temperatura</b>				
Passou	<input type="checkbox"/>	Falhou	<input type="checkbox"/>	Ver notas
Testando assinatura da empresa	<input type="text"/>			
Aprovação da qualidade da organização	<input type="text"/>			
<b>Notas</b>				
<p>O PONTO MAIS QUENTE EM TODAS AS FAIXAS DE 760°A 960°C É O FUNDO INFERIOR ESQUERDO #6 E O MAIS FRIO É O PORTA SUPERIOR DIREITO #4.</p> <p>FORNO APROVADO EM TODAS AS FAIXAS APRESENTANDO UM DESVIO MÁXIMO DE +/- 14°C EM RELAÇÃO AO SET-POINT.</p>				

### Anexo III: Certificado de calibração do forno terceirizado (continuação)



## Anexo III: Certificado de calibração do forno terceirizado (continuação)

Arquivo: KOS-02 02-02-2018.paq

Impresso: 6/2/2018 11:34:32

ID do forno: KOS-02

Data Inicial do lev.: 2/2/2018

Hora Inicial do lev.: 09:50:00

Técnico: WESLEY ESTEVES

Levantamento uniformidade temperatura

Referência 1 (‰) Tempo levantamento 760,0 °C

#1 (°C)

#2 (°C)

#3 (°C)

#4 (°C)

#5 (°C)

#6 (°C)

#7 (°C)

#8 (°C)

#9 (°C)

Classe do forno

AM32750E: 3

Mínimo (°C)

754,3

755,6

757,1

762,7

755,2

761,1

757,6

757,6

760,9

Máximo (°C)

759,9

761,2

761,9

757,0

758,4

766,8

764,2

764,4

766,2

Média (°C)

757,5

758,3

759,5

755,0

756,5

764,2

761,6

761,9

763,8

Dispersão (°C)

5,6

5,6

4,8

4,3

3,2

5,7

6,6

6,8

5,3

Dispersão máxima (°C)

○—14,1—●

Desvio do definido (°C)

-0,1 -5,7

+1,2 -4,4

+1,9 -2,9

-3,0 -7,3

-1,6 -4,8

+6,8 +1,1

+4,2 -2,4

+4,4 -2,4

+6,2 +0,9

Ppk

2,82

2,96

3,51

2,68

3,73

2,14

2,52

2,45

2,49

Ppk geral

←—1,37—→

Referência 2 (‰) Tempo levantamento 860,0 °C

#1 (°C)

#2 (°C)

#3 (°C)

#4 (°C)

#5 (°C)

#6 (°C)

#7 (°C)

#8 (°C)

#9 (°C)

Classe do forno

AM32750E: 5

Mínimo (°C)

856,8

857,0

857,9

862,2

852,8

866,7

862,8

863,2

864,1

Máximo (°C)

860,5

861,5

861,8

855,5

855,1

873,0

868,4

869,6

868,8

Média (°C)

859,1

859,7

860,4

854,2

854,3

870,0

866,0

866,6

867,0

Dispersão (°C)

3,7

4,5

3,9

3,3

2,3

6,3

5,6

6,4

4,7

Dispersão máxima (°C)

○—20,8—●

Desvio do definido (°C)

+0,5 -3,2

+1,5 -3,0

+1,8 -2,1

-4,5 -7,8

-4,9 -7,2

+13,0 +6,7

+8,4 +2,8

+9,6 +3,2

+8,8 +4,1

Ppk

3,64

3,83

4,27

2,69

3,99

0,65

1,50

1,26

1,51

Ppk geral

←—0,72—→

Referência 3 (‰) Tempo levantamento 960,0 °C

#1 (°C)

#2 (°C)

#3 (°C)

#4 (°C)

#5 (°C)

#6 (°C)

#7 (°C)

#8 (°C)

#9 (°C)

Classe do forno

AM32750E: 5

Mínimo (°C)

959,1

956,3

957,7

961,3

954,0

970,1

963,4

964,2

964,7

Máximo (°C)

960,5

958,4

959,6

952,1

955,2

972,3

965,9

966,8

966,6

Média (°C)

959,9

957,4

958,8

951,7

954,8

971,2

964,7

965,4

965,8

Dispersão (°C)

1,4

2,1

1,9

0,8

1,2

2,2

2,5

2,8

1,9

Dispersão máxima (°C)

○—21,0—●

Desvio do definido (°C)

+0,5 -0,9

-1,6 -3,7

-0,4 -2,3

-7,9 -8,7

-4,8 -6,0

+12,3 +10,1

+5,9 +3,4

+6,8 +4,2

+6,6 +4,7

Ppk

12,19

6,28

8,12

10,73

10,44

1,66

4,00

4,24

4,41

Ppk geral

←—0,74—→

Medidas do levantamento

Fatores de correção de tempo e coletor aplicados

Referência 1 (‰) Tempo levantamento 780,0 °C

Tempo (hh:mm:ss)

#1 (°C)

#2 (°C)

#3 (°C)

#4 (°C)

#5 (°C)

#6 (°C)

#7 (°C)

#8 (°C)

#9 (°C)

01:22:00

754,3

756,1

757,5

752,7

755,6

761,0

757,5

757,5

760,9

01:22:30

754,3

755,9

757,3

752,7

755,4

761,1

757,6

757,6

760,9

01:23:00

754,5

755,7

757,3

752,9

755,4

761,3

757,7

757,9

761,0

01:23:30

754,7

755,7

757,3

753,0

755,4

761,5

758,0

758,2

761,2

01:24:00

754,9

755,7

757,4

753,2

755,4

761,6

758,1

758,5

761,3

01:24:30

754,9

755,7

757,3

753,2

755,3

761,7

758,2

758,6

761,3

01:25:00

754,8

755,6

757,1

753,0

755,2

761,7

758,3

758,6

761,3

01:25:30

754,8

755,0

757,3

752,8

755,2

761,4

758,3

758,6

761,2

01:26:00

754,8

756,1

757,4

752,8

755,2

761,4

758,2

758,4

761,2

01:26:30

754,8

755,9

757,3

753,0

755,2

761,3

758,2

758,5

761,2

01:27:00

755,0

755,9

757,4

753,1

755,2

761,5

758,4

758,6

761,3

01:27:30

755,3

756,0

757,6

753,3

755,3

761,8

758,7

759,0

761,5

01:28:00

755,5

756,2

757,6

753,5

755,3

762,1

759,1

759,5

761,8

01:28:30

755,7

756,4

757,8

753,7

755,3

762,3

759,5

759,8

762,1

01:29:00

756,1

756,9

758,1

753,9

755,6

762,5

759,7

760,0

762,3

01:29:30

756,1

757,0

758,2

753,9

755,6

762,5

759,8

760,0

762,3

01:30:00

756,0

756,9

758,1

753,9

755,6

762,4

759,8

760,0

762,2

01:30:30

756,0

756,7

758,0

753,8

755,4

762,3

759,7

759,9

762,1

01:31:00

756,0

756,6

757,9

753,8

755,4

762,3

759,6

760,0

762,1

01:31:30

756,0

756,6

757,9

753,7

755,3

762,4

759,7

760,1

762,2

01:32:00

756,1

756,7

757,9

753,8

755,4

762,6

759,9

760,3

762,3

01:32:30

756,3

757,0

758,1

753,9

755,6

762,7

760,1

760,4

762,5

01:33:00

756,4

757,2

758,3

754,0

755,7

762,8

760,2

760,6

762,6

01:33:30

756,5

757,1

758,3

754,1

755,6

762,9

760,4

760,7

762,7

01:34:00

756,5

757,1

758,3

754,1

755,6

762,9

760,4

760,8

762,7

01:34:30

756,6

757,1

758,3

754,1

755,6

763,0

760,5

760,8

762,7

01:35:00

756,5

757,0

758,2

754,1

755,5

762,9

760,3

760,7

762,7

01:35:30

756,3

756,8

758,0

753,9

755,5

762,8

760,2

760,6

762,5

01:36:00

756,1

756,7

758,0

753,8

755,3

762,6

760,0

760,3

762,4

01:36:30

756,1

756,6

757,9

753,8

755,3

762,5

759,9

760,2

762,3

01:37:00

756,1

756,6

758,1

753,9

755,4

762,5

759,8

760,2

762,3

01:37:30

756,3

756,8

758,2

754,0

755,5

762,6

760,0

760,3

762,4

### Anexo III: Certificado de calibração do forno terceirizado (continuação)

Arquivo: KOS-02 02-02-2018.paq

Impresso: 6/2/2018 11:34:32

ID do forno: KOS-02

Data inicial do lev.: 2/2/2018

Hora inicial do lev.: 09:50:00

Técnico: WESLEY ESTEVES

Medidas do levantamento

Fatores de correção de termopar e coletor aplicados

Tempo (hh:mm:ss)	#1 (°C)	#2 (°C)	#3 (°C)	#4 (°C)	#5 (°C)	#6 (°C)	#7 (°C)	#8 (°C)	#9 (°C)
01:38:00	756,5	756,9	758,3	754,1	755,5	762,9	760,3	760,6	762,7
01:38:30	756,8	757,5	758,7	754,1	755,8	763,1	760,7	760,9	762,9
01:39:00	756,9	757,9	758,9	754,1	755,9	763,2	760,9	761,1	763,0
01:39:30	757,1	757,9	758,9	754,3	756,0	763,3	761,0	761,1	763,1
01:40:00	757,1	757,7	759,0	754,5	756,0	763,4	761,0	761,3	763,2
01:40:30	757,1	757,6	759,0	754,5	756,0	763,5	761,0	761,4	763,3
01:41:00	757,2	757,7	759,0	754,6	756,1	763,4	761,0	761,4	763,2
01:41:30	757,1	757,9	759,1	754,5	756,1	763,3	760,9	761,2	763,2
01:42:00	756,9	757,5	758,8	754,4	755,9	763,1	760,7	761,0	763,0
01:42:30	756,7	757,3	758,7	754,3	755,8	763,0	760,5	760,8	762,8
01:43:00	756,6	757,1	758,5	754,2	755,7	763,0	760,4	760,7	762,8
01:43:30	756,6	757,1	758,6	754,3	755,7	763,0	760,5	760,8	762,8
01:44:00	756,8	757,4	758,7	754,3	755,9	763,2	760,7	761,0	763,0
01:44:30	757,1	757,9	759,0	754,3	756,0	763,3	761,0	761,2	763,2
01:45:00	757,2	757,9	759,0	754,4	756,0	763,5	761,2	761,5	763,3
01:45:30	757,3	758,2	759,3	754,5	756,2	763,6	761,4	761,6	763,4
01:46:00	757,3	758,4	759,3	754,5	756,2	763,6	761,4	761,6	763,4
01:46:30	757,2	758,2	759,2	754,5	756,2	763,5	761,3	761,5	763,4
01:47:00	757,1	758,0	759,2	754,5	756,0	763,4	761,2	761,3	763,3
01:47:30	757,1	757,9	759,0	754,5	755,9	763,4	761,1	761,3	763,3
01:48:00	757,0	757,9	759,1	754,5	756,0	763,3	761,1	761,3	763,2
01:48:30	757,1	758,2	759,2	754,3	756,1	763,3	761,2	761,3	763,3
01:49:00	757,0	757,9	759,0	754,1	755,9	763,3	761,2	761,3	763,2
01:49:30	757,0	757,8	758,9	754,1	755,8	763,4	761,2	761,4	763,3
01:50:00	757,1	757,8	758,8	754,2	755,8	763,4	761,2	761,5	763,3
01:50:30	757,1	757,8	759,0	754,3	755,8	763,5	761,2	761,5	763,3
01:51:00	757,0	757,7	758,9	754,3	755,8	763,5	761,1	761,5	763,3
01:51:30	757,0	757,8	758,9	754,2	755,8	763,3	761,0	761,3	763,2
01:52:00	756,7	757,5	758,7	754,0	755,7	763,1	760,7	761,0	762,9
01:52:30	756,6	757,3	758,6	754,0	755,6	763,0	760,5	760,8	762,8
01:53:00	756,5	757,2	758,5	754,0	755,5	762,9	760,4	760,7	762,8
01:53:30	756,6	757,1	758,5	754,0	755,5	763,0	760,5	760,8	762,8
01:54:00	756,7	757,3	758,7	754,2	755,6	763,2	760,6	761,0	762,9
01:54:30	756,9	757,4	758,8	754,3	755,6	763,5	761,0	761,2	763,1
01:55:00	757,2	757,9	759,0	754,5	755,9	763,7	761,3	761,6	763,4
01:55:30	757,6	758,4	759,4	754,7	756,2	764,0	761,7	761,9	763,7
01:56:00	757,9	758,5	759,5	755,0	756,4	764,4	762,0	762,3	763,9
01:56:30	758,1	759,0	759,9	755,1	756,6	764,6	762,4	762,6	764,2
01:57:00	758,3	759,0	760,0	755,2	756,7	764,9	762,6	762,9	764,4
01:57:30	758,4	759,0	760,1	755,4	756,8	765,1	762,7	763,0	764,6
01:58:00	758,4	759,2	760,1	755,4	756,9	765,1	762,8	763,1	764,6
01:58:30	758,3	759,2	760,1	755,3	756,9	765,0	762,6	762,8	764,5
01:59:00	758,2	758,9	760,0	755,3	756,8	764,9	762,4	762,7	764,4
01:59:30	758,1	758,8	760,0	755,3	756,8	764,9	762,3	762,5	764,3
02:00:00	758,1	759,1	760,1	755,4	756,9	764,8	762,4	762,6	764,4
02:00:30	758,3	759,0	760,2	755,6	756,9	765,1	762,5	762,8	764,5
02:01:00	758,6	759,1	760,4	755,8	757,0	765,4	762,8	763,2	764,8
02:01:30	758,9	759,4	760,6	756,1	757,3	765,7	763,2	763,6	765,1
02:02:00	759,2	759,5	760,8	756,3	757,4	766,0	763,4	763,9	765,3
02:02:30	759,3	759,6	760,9	756,5	757,5	766,1	763,5	764,0	765,4
02:03:00	759,2	759,5	761,0	756,5	757,5	766,0	763,4	763,8	765,3
02:03:30	758,9	759,3	760,7	756,3	757,3	765,8	763,2	763,6	765,2
02:04:00	758,7	759,2	760,4	756,1	757,0	765,6	763,0	763,3	764,9
02:04:30	758,5	758,9	760,2	755,9	756,9	765,5	762,7	763,2	764,8
02:05:00	758,4	758,9	760,1	755,8	756,9	765,4	762,6	763,1	764,7
02:05:30	758,4	758,9	760,1	755,8	756,9	765,5	762,7	763,2	764,8
02:06:00	758,6	759,1	760,3	756,1	757,1	765,7	762,9	763,5	765,0
02:06:30	759,0	759,6	760,7	756,3	757,4	765,8	763,3	763,6	765,3
02:07:00	759,3	760,1	761,1	756,4	757,6	766,1	763,6	764,0	765,5
02:07:30	759,5	760,5	761,3	756,4	757,8	766,2	763,9	764,0	765,6
02:08:00	759,5	760,4	761,3	756,3	757,8	766,2	763,8	764,0	765,6
02:08:30	759,3	760,5	761,3	756,2	757,8	766,1	763,7	763,9	765,5
02:09:00	759,2	760,1	761,2	756,2	757,8	766,0	763,6	763,7	765,4
02:09:30	759,2	760,1	761,3	756,3	757,8	766,0	763,5	763,8	765,4
02:10:00	759,2	760,3	761,4	756,3	757,9	766,0	763,6	763,8	765,5
02:10:30	759,2	760,1	761,2	756,4	757,8	766,1	763,6	763,9	765,5
02:11:00	759,3	760,3	761,4	756,5	758,0	766,2	763,8	763,9	765,7
02:11:30	759,5	760,6	761,6	756,5	758,1	766,3	763,9	764,0	765,8
02:12:00	759,5	760,9	761,7	756,4	758,2	766,3	764,0	764,1	765,8
02:12:30	759,5	761,0	761,8	756,4	758,3	766,2	764,0	764,1	765,8
02:13:00	759,5	761,2	761,9	756,3	758,3	766,3	764,0	764,0	765,8
02:13:30	759,6	761,0	761,9	756,5	758,3	766,4	764,0	764,1	765,9
02:14:00	759,7	760,7	761,8	756,9	758,4	766,6	764,1	764,2	766,0
02:14:30	759,9	760,7	761,8	757,0	758,3	766,7	764,1	764,3	766,1
02:15:00	759,7	760,4	761,7	756,9	758,2	766,8	764,2	764,4	766,2
02:15:30	759,6	760,2	761,5	756,9	758,1	766,6	763,9	764,3	766,0
02:16:00	759,4	760,0	761,4	756,8	758,0	766,4	763,7	764,1	765,8
02:16:30	759,1	759,9	761,2	756,5	758,0	766,1	763,3	763,7	765,5
02:17:00	758,8	759,6	760,9	756,2	757,7	765,8	762,9	763,3	765,2
02:17:30	758,5	759,3	760,6	756,1	757,5	765,7	762,7	763,1	765,0
02:18:00	758,5	759,1	760,4	756,1	757,4	765,6	762,6	763,0	764,9



## Anexo III: Certificado de calibração do forno terceirizado (continuação)

Arquivo: KOS-02 02-02-2018.paq					Impresso: 6/2/2018 11:34:32				
ID do forno: KOS-02		Data Inicial do lev.: 2/2/2018			Hora Inicial do lev.: 09:50:00		Técnico: WESLEI ESTEVES		
Medidas do levantamento									
Fatores de correção de termopar e coletor aplicados									
Referência 1 (°C) Tempo levantamento 780,0 °C									
Tempo (hh:mm:ss)	#1 (°C)	#2 (°C)	#3 (°C)	#4 (°C)	#5 (°C)	#6 (°C)	#7 (°C)	#8 (°C)	#9 (°C)
02:18:30	758,4	759,0	760,4	756,0	757,3	765,8	762,7	763,2	765,0
02:19:00	758,7	759,3	760,6	756,2	757,5	765,9	763,0	763,4	765,2
02:19:30	758,9	759,5	760,8	756,3	757,6	766,1	763,3	763,7	765,4
02:20:00	759,1	759,7	761,0	756,5	757,8	766,2	763,5	763,9	765,5
02:20:30	759,2	759,7	761,0	756,6	757,7	766,2	763,4	763,9	765,5
02:21:00	759,0	759,5	760,8	756,5	757,6	766,0	763,3	763,8	765,3
02:21:30	758,8	759,3	760,6	756,3	757,4	765,8	763,0	763,4	765,1
02:22:00	758,5	758,9	760,3	756,1	757,3	765,5	762,6	763,1	764,8
02:22:30	758,1	758,6	760,1	755,7	756,9	765,1	762,2	762,6	764,5
02:23:00	757,8	758,4	759,9	755,4	756,8	764,7	761,8	762,2	764,1
02:23:30	757,6	758,1	759,7	755,2	756,6	764,5	761,5	761,9	764,0
02:24:00	757,5	758,0	759,5	755,1	756,6	764,4	761,4	761,9	763,9
02:24:30	757,5	758,3	759,7	755,0	756,6	764,2	761,6	761,9	763,9
02:25:00	757,7	758,9	760,0	754,9	756,7	764,4	761,9	762,1	764,1
02:25:30	758,0	759,2	760,3	755,0	756,9	764,6	762,2	762,4	764,3
02:26:00	758,2	759,1	760,2	755,2	756,9	765,0	762,5	762,8	764,5
02:26:30	758,5	759,5	760,5	755,5	757,1	765,2	762,8	763,1	764,7
02:27:00	758,6	759,8	760,8	755,5	757,3	765,3	763,0	763,1	764,8
02:27:30	758,6	759,6	760,6	755,5	757,2	765,3	762,8	763,1	764,8
02:28:00	758,4	759,3	760,4	755,5	757,1	765,1	762,6	762,9	764,6
02:28:30	758,1	758,8	760,1	755,4	757,0	764,8	762,2	762,5	764,3
02:29:00	757,7	758,6	760,0	755,2	756,8	764,5	761,7	762,1	764,0
02:29:30	757,4	758,6	759,8	754,8	756,7	764,0	761,4	761,7	763,7
02:30:00	757,0	758,1	759,5	754,6	756,5	763,8	761,1	761,3	763,5
02:30:30	757,0	757,8	759,3	754,6	756,3	763,8	760,9	761,2	763,4
02:31:00	756,9	757,6	759,2	754,7	756,2	763,8	760,9	761,2	763,4
02:31:30	757,1	757,7	759,3	754,8	756,3	764,0	761,0	761,5	763,5
02:32:00	757,3	757,8	759,4	754,9	756,4	764,2	761,2	761,7	763,6
02:32:30	757,4	757,9	759,4	754,9	756,4	764,5	761,4	762,0	763,7
Referência 2 (°C) Tempo levantamento 880,0 °C									
Tempo (hh:mm:ss)	#1 (°C)	#2 (°C)	#3 (°C)	#4 (°C)	#5 (°C)	#6 (°C)	#7 (°C)	#8 (°C)	#9 (°C)
03:22:30	860,1	860,2	860,5	854,9	853,7	873,1	868,5	869,8	868,8
03:23:00	860,2	860,2	860,5	855,0	853,7	873,0	868,4	869,6	868,8
03:23:30	860,1	860,1	860,6	855,1	853,9	873,0	868,3	869,5	868,7
03:24:00	860,2	860,1	860,5	855,0	853,8	872,9	868,3	869,5	868,7
03:24:30	860,2	860,4	860,6	854,9	853,9	872,8	868,4	869,5	868,7
03:25:00	860,1	860,4	860,5	854,8	853,9	872,8	868,4	869,4	868,7
03:25:30	860,1	860,3	860,5	854,7	854,0	872,8	868,4	869,5	868,7
03:26:00	860,1	860,3	860,5	854,8	854,0	872,9	868,4	869,5	868,7
03:26:30	860,2	860,3	860,6	855,0	854,1	873,0	868,4	869,5	868,8
03:27:00	860,3	860,3	860,7	855,2	854,2	873,0	868,3	869,6	868,8
03:27:30	860,3	860,3	860,7	855,2	854,3	873,0	868,4	869,6	868,8
03:28:00	860,3	860,3	860,8	855,4	854,4	872,9	868,2	869,5	868,8
03:28:30	860,3	860,3	860,9	855,5	854,4	872,7	868,1	869,2	868,7
03:29:00	860,3	860,4	860,7	855,3	854,3	872,6	868,0	869,1	868,6
03:29:30	860,0	860,3	860,5	855,0	854,3	872,6	867,9	869,1	868,5
03:30:00	860,0	860,2	860,5	855,0	854,3	872,5	867,7	868,9	868,4
03:30:30	859,9	860,1	860,5	855,0	854,3	872,4	867,7	868,8	868,4
03:31:00	860,0	860,0	860,5	855,1	854,3	872,4	867,5	868,7	868,3
03:31:30	859,9	860,0	860,5	855,2	854,3	872,3	867,5	868,7	868,3
03:32:00	859,9	860,2	860,7	855,1	854,5	872,2	867,5	868,6	868,3
03:32:30	860,0	860,6	860,9	854,9	854,5	872,1	867,6	868,4	868,3
03:33:00	860,0	860,7	861,1	854,8	854,6	872,0	867,6	868,2	868,3
03:33:30	860,1	860,8	861,3	854,7	854,6	871,9	867,6	868,2	868,4
03:34:00	860,2	861,1	861,4	854,8	854,7	871,9	867,7	868,2	868,4
03:34:30	860,3	861,2	861,5	854,9	854,8	872,0	867,8	868,3	868,5
03:35:00	860,4	861,4	861,7	855,0	854,9	872,0	867,9	868,3	868,6
03:35:30	860,5	861,4	861,8	855,0	855,0	872,0	867,9	868,3	868,7
03:36:00	860,5	861,5	861,8	855,0	855,1	872,0	867,9	868,2	868,7
03:36:30	860,3	861,3	861,7	855,1	855,1	872,0	867,8	868,2	868,6
03:37:00	860,3	860,9	861,5	855,2	855,0	872,0	867,5	868,2	868,5
03:37:30	860,1	860,5	861,4	855,4	855,0	871,9	867,4	868,2	868,4
03:38:00	860,2	860,7	861,3	855,2	855,0	871,8	867,3	868,1	868,3
03:38:30	859,9	860,8	861,4	855,0	855,0	871,6	867,3	867,9	868,2
03:39:00	860,0	860,8	861,4	854,9	855,0	871,5	867,2	867,7	868,2
03:39:30	859,9	860,4	861,1	855,0	854,9	871,5	867,0	867,8	868,1
03:40:00	859,9	860,2	861,0	855,1	854,9	871,5	866,8	867,7	868,0
03:40:30	859,8	860,1	861,1	855,2	854,9	871,4	866,8	867,5	867,9
03:41:00	859,9	860,3	861,2	855,1	855,0	871,3	866,8	867,5	867,9
03:41:30	859,8	860,5	861,2	854,8	855,0	871,0	866,8	867,4	867,9
03:42:00	859,8	860,6	861,2	854,7	854,9	870,9	866,9	867,4	867,8
03:42:30	859,8	860,7	861,2	854,6	854,9	870,8	866,9	867,3	867,8
03:43:00	859,8	860,9	861,4	854,5	854,9	870,8	867,0	867,3	867,9
03:43:30	859,9	861,0	861,4	854,6	854,9	870,8	867,1	867,4	868,0
03:44:00	860,0	861,1	861,5	854,6	855,0	870,9	867,2	867,4	868,0
03:44:30	860,1	861,2	861,6	854,7	855,0	870,9	867,3	867,5	868,1
03:45:00	860,1	860,9	861,5	854,8	855,0	871,0	867,2	867,6	868,1
03:45:30	860,2	860,7	861,4	854,9	855,0	871,0	867,1	867,7	868,1
03:46:00	860,0	860,4	861,2	855,1	854,9	871,0	867,0	867,7	868,0

## Anexo III: Certificado de calibração do forno terceirizado (continuação)


Arquivo: KOS-02 02-02-2018.paq					Impresso: 6/2/2018 11:34:32				
ID do forno: KOS-02		Data inicial do lev.: 2/2/2018			Hora inicial do lev.: 09:50:00			Técnico: WESLEY ESTEVES	
Medidas do levantamento									
Fatores de correção de termopar e coletor aplicados									
Referência 2 (‰) Tempo levantamento 880,0 °C									
Tempo (hh:mm:ss)	#1 (°C)	#2 (°C)	#3 (°C)	#4 (°C)	#5 (°C)	#6 (°C)	#7 (°C)	#8 (°C)	#9 (°C)
03:46:30	859,9	860,1	860,9	855,0	854,8	870,9	866,8	867,7	867,8
03:47:00	859,7	860,4	861,0	854,8	854,8	870,7	866,8	867,4	867,7
03:47:30	859,7	860,5	861,2	854,6	854,9	870,5	866,7	867,1	867,7
03:48:00	859,7	860,7	861,2	854,5	854,9	870,4	866,7	867,0	867,7
03:48:30	859,7	860,8	861,3	854,5	854,9	870,4	866,7	867,0	867,6
03:49:00	859,8	860,8	861,3	854,6	855,0	870,4	866,7	867,0	867,7
03:49:30	859,9	860,8	861,4	854,6	855,0	870,4	866,8	867,0	867,7
03:50:00	859,9	860,5	861,3	854,8	854,9	870,5	866,7	867,2	867,7
03:50:30	859,9	860,2	861,1	854,9	854,9	870,5	866,6	867,3	867,7
03:51:00	859,9	860,4	861,2	854,9	854,9	870,5	866,6	867,2	867,7
03:51:30	859,8	860,5	861,2	854,8	855,0	870,4	866,6	867,1	867,6
03:52:00	859,8	860,3	861,0	854,8	854,9	870,3	866,4	867,0	867,5
03:52:30	859,6	860,4	861,1	854,7	854,9	870,2	866,3	866,9	867,5
03:53:00	859,6	860,5	861,1	854,6	854,9	870,0	866,3	866,8	867,4
03:53:30	859,6	860,6	861,2	854,3	854,9	870,0	866,3	866,7	867,4
03:54:00	859,5	860,5	861,1	854,3	854,8	870,0	866,3	866,7	867,3
03:54:30	859,5	860,1	860,7	854,5	854,7	870,1	866,2	866,8	867,3
03:55:00	859,5	859,8	860,7	854,7	854,7	870,1	866,1	866,8	867,3
03:55:30	859,6	860,0	860,8	854,7	854,8	870,1	866,2	866,8	867,3
03:56:00	859,7	860,1	861,0	854,7	854,9	870,1	866,3	866,8	867,4
03:56:30	859,7	860,0	860,8	854,9	854,9	870,2	866,2	866,8	867,3
03:57:00	859,6	859,9	860,7	854,9	854,8	870,2	866,2	867,0	867,3
03:57:30	859,6	860,2	860,9	854,7	854,9	870,2	866,3	866,9	867,4
03:58:00	859,7	860,5	861,1	854,5	855,0	870,1	866,3	866,9	867,4
03:58:30	859,7	860,6	861,1	854,4	855,0	870,1	866,3	866,8	867,4
03:59:00	859,6	860,3	860,9	854,5	854,9	870,1	866,2	866,8	867,3
03:59:30	859,5	859,9	860,6	854,5	854,8	870,2	866,1	866,9	867,2
04:00:00	859,4	859,8	860,5	854,6	854,7	870,2	866,1	867,0	867,2
04:00:30	859,5	859,7	860,5	854,8	854,8	870,1	866,0	866,9	867,2
04:01:00	859,5	859,8	860,6	854,7	854,9	870,0	865,9	866,8	867,1
04:01:30	859,3	859,6	860,4	854,5	854,7	869,9	865,8	866,6	867,0
04:02:00	859,2	859,5	860,2	854,4	854,6	869,9	865,7	866,6	866,9
04:02:30	859,2	859,4	860,2	854,4	854,6	869,8	865,6	866,5	866,8
04:03:00	859,2	859,6	860,3	854,3	854,6	869,7	865,6	866,4	866,8
04:03:30	859,2	860,0	860,6	854,2	854,7	869,6	865,7	866,2	866,9
04:04:00	859,3	859,9	860,6	854,3	854,7	869,5	865,7	866,2	866,8
04:04:30	859,2	859,6	860,4	854,4	854,7	869,5	865,6	866,3	866,8
04:05:00	859,1	859,4	860,2	854,2	854,5	869,3	865,4	866,2	866,6
04:05:30	858,9	859,5	860,2	854,0	854,5	869,0	865,2	865,8	866,4
04:06:00	858,6	859,6	860,1	853,6	854,3	868,7	864,9	865,4	866,2
04:06:30	858,5	859,4	860,0	853,3	854,3	868,4	864,6	865,0	865,9
04:07:00	858,1	858,7	859,6	853,3	854,0	868,2	864,3	864,8	865,7
04:07:30	857,9	858,3	859,3	853,2	853,9	868,1	864,0	864,7	865,5
04:08:00	857,8	858,2	859,2	853,3	853,8	868,0	863,8	864,5	865,3
04:08:30	857,8	858,5	859,2	853,1	853,8	867,7	863,8	864,3	865,2
04:09:00	857,6	858,5	859,2	852,9	853,7	867,5	863,8	864,1	865,1
04:09:30	857,5	858,3	859,1	852,8	853,6	867,4	863,6	864,0	865,0
04:10:00	857,4	858,4	859,1	852,6	853,6	867,2	863,6	863,8	864,8
04:10:30	857,3	858,4	859,1	852,5	853,5	867,0	863,5	863,7	864,8
04:11:00	857,3	858,5	859,1	852,4	853,5	867,0	863,5	863,6	864,7
04:11:30	857,3	858,5	859,1	852,3	853,4	866,9	863,5	863,6	864,7
04:12:00	857,3	858,5	859,1	852,3	853,4	866,9	863,5	863,6	864,7
04:12:30	857,3	858,4	859,1	852,3	853,4	867,0	863,5	863,6	864,7
04:13:00	857,2	858,4	859,0	852,4	853,4	866,9	863,4	863,5	864,7
04:13:30	857,3	858,5	859,1	852,4	853,5	867,0	863,5	863,6	864,7
04:14:00	857,3	858,3	859,1	852,4	853,4	867,0	863,5	863,6	864,7
04:14:30	857,3	857,8	858,9	852,7	853,4	867,2	863,4	863,7	864,7
04:15:00	857,3	857,6	858,8	852,8	853,3	867,2	863,3	863,9	864,7
04:15:30	857,3	857,8	858,8	852,7	853,3	867,2	863,4	863,8	864,7
04:16:00	857,2	857,7	858,6	852,6	853,2	867,2	863,3	863,8	864,6
04:16:30	857,1	857,5	858,5	852,7	853,2	867,1	863,2	863,7	864,5
04:17:00	857,0	857,4	858,4	852,7	853,2	867,0	863,0	863,6	864,4
04:17:30	856,9	857,6	858,5	852,5	853,2	866,9	863,0	863,4	864,4
04:18:00	856,9	857,5	858,4	852,4	853,0	866,8	863,0	863,4	864,3
04:18:30	856,9	857,2	858,2	852,4	852,9	866,9	862,9	863,5	864,2
04:19:00	856,9	857,1	858,0	852,5	852,9	866,9	862,9	863,6	864,2
04:19:30	856,9	857,1	858,0	852,5	852,8	867,0	862,9	863,6	864,2
04:20:00	856,8	857,0	857,9	852,5	852,8	866,9	862,8	863,6	864,2
04:20:30	856,8	857,1	857,9	852,4	852,8	866,9	862,8	863,6	864,1
04:21:00	856,8	857,2	858,0	852,4	852,9	866,8	862,8	863,4	864,1
04:21:30	856,8	857,3	858,2	852,4	852,9	866,7	862,8	863,3	864,1
04:22:00	856,8	857,6	858,3	852,2	853,0	866,7	862,9	863,2	864,1
04:22:30	856,9	857,8	858,5	852,1	853,0	866,6	862,9	863,2	864,2
Referência 3 (‰) Tempo levantamento 880,0 °C									
Tempo (hh:mm:ss)	#1 (°C)	#2 (°C)	#3 (°C)	#4 (°C)	#5 (°C)	#6 (°C)	#7 (°C)	#8 (°C)	#9 (°C)
05:24:30	960,1	957,3	958,6	952,0	954,1	972,4	965,7	966,8	966,6
05:25:00	960,1	957,3	958,5	952,1	954,2	972,3	965,7	966,8	966,6
05:25:30	960,0	957,3	958,4	951,7	954,0	972,3	965,7	966,8	966,6
05:26:00	960,0	957,7	958,6	951,6	954,1	972,1	965,8	966,6	966,5



### Anexo III: Certificado de calibração do forno terceirizado (continuação)


Arquivo: KOS-02 02-02-2018.paq					Impresso: 6/2/2018 11:34:32				
ID do forno: KOS-02		Data inicial do lev.: 2/2/2018			Hora inicial do lev.: 09:50:00		Técnico: WESLEI ESTEVES		
Medidas do levantamento									
Fatores de correção de termopar e coletor aplicados									
Referência 3 (‰) Tempo levantamento 880,0 °C									
Tempo (hh:mm:ss)	#1 (°C)	#2 (°C)	#3 (°C)	#4 (°C)	#5 (°C)	#6 (°C)	#7 (°C)	#8 (°C)	#9 (°C)
05:26:30	960,2	957,9	958,9	951,4	954,2	971,9	965,7	966,4	966,5
05:27:00	960,1	957,9	959,0	951,5	954,3	971,9	965,8	966,3	966,5
05:27:30	960,1	957,6	958,7	951,6	954,2	972,0	965,7	966,5	966,5
05:28:00	960,2	957,8	959,0	951,7	954,4	972,0	965,8	966,4	966,5
05:28:30	960,2	958,1	959,2	951,6	954,4	972,0	965,8	966,4	966,6
05:29:00	960,3	958,2	959,3	951,6	954,5	971,9	965,9	966,4	966,6
05:29:30	960,3	958,1	959,3	951,6	954,5	971,9	965,8	966,3	966,6
05:30:00	960,2	957,7	959,0	951,8	954,5	971,9	965,6	966,3	966,5
05:30:30	960,2	957,5	958,8	951,9	954,4	971,9	965,5	966,4	966,4
05:31:00	960,2	957,7	958,9	951,9	954,5	971,9	965,5	966,4	966,4
05:31:30	960,3	957,9	959,1	951,7	954,6	971,8	965,5	966,2	966,4
05:32:00	960,1	958,0	959,2	951,6	954,5	971,7	965,5	966,1	966,3
05:32:30	960,2	957,9	959,1	951,6	954,5	971,6	965,4	965,9	966,3
05:33:00	960,0	957,7	959,1	951,7	954,5	971,6	965,3	966,0	966,2
05:33:30	960,1	957,9	959,2	951,6	954,6	971,6	965,5	965,9	966,3
05:34:00	960,3	957,9	959,1	951,7	954,6	971,8	965,5	966,0	966,3
05:34:30	960,1	957,5	958,8	951,8	954,6	971,9	965,4	966,3	966,3
05:35:00	960,2	957,3	958,7	952,0	954,7	972,0	965,4	966,4	966,3
05:35:30	960,1	957,3	958,7	952,0	954,7	971,9	965,3	966,3	966,3
05:36:00	960,0	957,6	958,9	951,8	954,7	971,8	965,3	966,1	966,3
05:36:30	960,0	957,8	959,0	951,7	954,8	971,6	965,2	965,8	966,2
05:37:00	960,1	957,9	959,1	951,6	954,8	971,5	965,2	965,8	966,2
05:37:30	960,1	957,8	959,0	951,8	954,8	971,6	965,3	965,8	966,2
05:38:00	960,2	958,1	959,2	951,8	955,0	971,7	965,4	966,0	966,4
05:38:30	960,3	958,1	959,3	951,8	955,0	971,6	965,5	966,0	966,4
05:39:00	960,3	958,2	959,3	951,9	955,1	971,6	965,4	965,9	966,4
05:39:30	960,3	958,2	959,4	951,8	955,1	971,6	965,4	965,9	966,4
05:40:00	960,4	958,3	959,4	951,8	955,1	971,5	965,5	965,9	966,4
05:40:30	960,5	958,4	959,4	951,9	955,2	971,6	965,5	965,9	966,5
05:41:00	960,4	958,3	959,5	951,9	955,2	971,6	965,4	966,0	966,5
05:41:30	960,4	958,3	959,6	951,9	955,2	971,6	965,5	965,9	966,4
05:42:00	960,4	958,3	959,5	951,8	955,2	971,5	965,4	965,8	966,4
05:42:30	960,4	958,3	959,5	951,9	955,2	971,5	965,3	965,7	966,3
05:43:00	960,1	957,9	959,2	951,9	955,1	971,5	965,1	965,8	966,2
05:43:30	960,1	957,8	959,2	952,0	955,1	971,4	965,0	965,6	966,2
05:44:00	960,1	957,9	959,3	951,8	955,0	971,3	965,0	965,5	966,2
05:44:30	960,0	957,9	959,2	951,6	955,0	971,1	964,9	965,4	966,0
05:45:00	959,9	958,0	959,2	951,5	955,0	971,1	964,9	965,3	966,0
05:45:30	959,9	958,0	959,3	951,5	955,0	971,0	964,9	965,3	965,9
05:46:00	960,0	957,9	959,3	951,6	955,0	971,0	964,8	965,3	965,9
05:46:30	959,9	957,5	959,0	951,7	954,9	971,2	964,7	965,4	965,9
05:47:00	959,8	957,5	958,9	951,6	954,9	971,2	964,7	965,4	965,9
05:47:30	959,9	957,3	958,7	951,7	954,8	971,2	964,7	965,5	965,9
05:48:00	959,9	957,2	958,7	952,0	954,9	971,1	964,5	965,4	965,8
05:48:30	959,8	957,5	958,9	951,7	954,9	970,9	964,4	965,2	965,7
05:49:00	959,7	957,6	958,9	951,6	954,9	970,8	964,4	965,0	965,7
05:49:30	959,8	957,7	959,1	951,6	955,0	970,8	964,5	965,0	965,7
05:50:00	959,8	957,9	959,2	951,6	955,0	970,9	964,7	965,1	965,8
05:50:30	960,1	957,9	959,3	951,8	955,1	971,1	964,8	965,3	965,9
05:51:00	960,2	957,9	959,3	952,1	955,2	971,2	964,8	965,4	966,0
05:51:30	960,2	957,7	959,3	952,0	955,2	971,2	964,8	965,5	965,9
05:52:00	960,1	957,6	959,1	951,9	955,1	971,1	964,7	965,4	965,9
05:52:30	959,9	957,8	959,1	951,7	955,1	971,0	964,6	965,2	965,8
05:53:00	959,9	957,5	959,0	951,8	955,0	970,9	964,5	965,0	965,7
05:53:30	959,8	957,3	958,8	951,8	955,0	970,9	964,3	965,1	965,6
05:54:00	959,8	957,6	958,9	951,7	955,0	970,9	964,4	965,0	965,6
05:54:30	959,9	957,8	959,0	951,6	955,1	970,9	964,4	965,0	965,6
05:55:00	959,8	957,8	959,1	951,5	955,1	970,8	964,5	965,0	965,6
05:55:30	960,0	957,9	959,2	951,5	955,1	970,7	964,5	964,9	965,6
05:56:00	959,8	957,4	958,9	951,7	955,1	970,8	964,4	965,0	965,6
05:56:30	959,9	957,3	958,8	951,9	955,0	970,9	964,4	965,2	965,6
05:57:00	960,1	957,4	958,9	951,9	955,1	971,0	964,4	965,2	965,6
05:57:30	959,9	957,1	958,8	952,0	955,1	971,0	964,4	965,3	965,6
05:58:00	959,9	956,9	958,7	952,1	955,1	971,0	964,2	965,3	965,5
05:58:30	959,7	956,8	958,4	952,0	955,0	971,0	964,1	965,2	965,4
05:59:00	959,5	956,7	958,1	951,8	954,9	970,9	964,0	965,2	965,3
05:59:30	959,5	956,5	958,0	951,8	954,8	970,8	963,8	965,0	965,1
06:00:00	959,3	956,4	957,9	951,7	954,7	970,7	963,7	964,7	965,0
06:00:30	959,3	956,3	957,9	951,6	954,7	970,6	963,6	964,7	965,0
06:01:00	959,2	956,4	957,8	951,6	954,6	970,6	963,7	964,7	964,9
06:01:30	959,2	956,5	957,7	951,4	954,5	970,7	963,8	964,9	965,0
06:02:00	959,2	956,5	957,7	951,5	954,5	970,7	963,8	964,9	965,0
06:02:30	959,2	956,5	957,7	951,4	954,5	970,7	963,9	965,0	965,0
06:03:00	959,3	956,4	957,9	951,6	954,6	970,7	963,8	964,9	965,0
06:03:30	959,4	956,4	958,0	951,7	954,8	970,7	963,8	965,0	965,0
06:04:00	959,4	956,3	958,0	951,8	954,8	970,8	963,7	964,9	965,0
06:04:30	959,5	956,8	958,4	951,7	954,9	970,6	963,8	964,8	965,0
06:05:00	959,6	957,2	958,6	951,6	955,0	970,5	963,9	964,6	965,1
06:05:30	959,6	957,2	958,6	951,6	955,0	970,5	963,9	964,5	965,1
06:06:00	959,5	956,9	958,3	951,6	954,9	970,5	963,8	964,7	965,0
06:06:30	959,5	956,7	958,3	951,6	954,9	970,6	963,7	964,7	965,0

## Anexo III: Certificado de calibração do forno terceirizado (continuação)


Arquivo: KOS-02 02-02-2018.paq					Impresso: 6/2/2018 11:34:32					
ID do forno: KOS-02		Data inicial do lev.: 2/2/2018			Hora inicial do lev.: 09:50:00			Técnico: WESLEI ESTEVES		
<b>Medidas do levantamento</b>										
Fatores de correção de termopar e coletor aplicados										
Referência 3 (‰) Tempo levantamento 880,0 °C										
Tempo (hh:mm:ss)	#1 (°C)	#2 (°C)	#3 (°C)	#4 (°C)	#5 (°C)	#6 (°C)	#7 (°C)	#8 (°C)	#9 (°C)	
06:07:00	959,5	956,5	958,3	951,9	955,0	970,5	963,7	964,6	965,0	
06:07:30	959,2	956,5	958,0	951,8	954,8	970,5	963,6	964,7	964,9	
06:08:00	959,2	956,4	957,9	951,7	954,7	970,4	963,5	964,6	964,8	
06:08:30	959,1	956,3	957,8	951,6	954,6	970,3	963,4	964,5	964,7	
06:09:00	959,3	956,7	958,1	951,6	954,8	970,2	963,4	964,3	964,7	
06:09:30	959,3	956,8	958,1	951,5	954,8	970,2	963,4	964,2	964,7	
06:10:00	959,2	956,6	957,8	951,4	954,6	970,3	963,4	964,3	964,7	
06:10:30	959,2	956,6	957,8	951,3	954,5	970,2	963,5	964,5	964,7	
06:11:00	959,3	956,9	958,1	951,3	954,8	970,1	963,6	964,3	964,8	
06:11:30	959,3	956,8	958,2	951,5	954,8	970,2	963,6	964,3	964,8	
06:12:00	959,3	956,7	958,2	951,7	954,9	970,2	963,5	964,4	964,8	
06:12:30	959,5	957,1	958,5	951,7	955,0	970,1	963,6	964,3	964,9	
06:13:00	959,4	956,9	958,4	951,6	955,0	970,1	963,6	964,2	964,7	
<b>Fatores de correção do termopar</b>										
Detalhes calibração						Notas				
Calibrado por ECIL Tipo de termopar N Carretel/Números lotes 111/18 Data da calibração 12/1/2018 Sondas calibradas 1										
Calibração Ponto (°C)		Leitura		Correção						
		Início do carretel	Fim do carretel	Início do carretel	Fim do carretel					
120,1		119,6	119,6	0,5	0,5					
240,0		239,2	239,2	0,8	0,8					
361,3		360,2	360,2	1,1	1,1					
483,0		482,1	482,1	0,9	0,9					
605,1		604,3	604,3	0,8	0,8					
722,5		722,6	722,6	-0,1	-0,1					
839,9		840,7	840,7	-0,8	-0,8					
952,2		950,6	950,6	1,6	1,6					
1073,1		1070,4	1070,4	2,7	2,7					
Detalhes calibração						Notas				
Calibrado por ECIL Tipo de termopar N Carretel/Números lotes 112/18 Data da calibração 12/1/2018 Sondas calibradas 2										
Calibração Ponto (°C)		Leitura		Correção						
		Início do carretel	Fim do carretel	Início do carretel	Fim do carretel					
120,1		119,6	119,6	0,5	0,5					
240,0		239,2	239,2	0,8	0,8					
361,3		360,3	360,3	1,0	1,0					
483,0		482,1	482,1	0,9	0,9					
605,1		604,4	604,4	0,7	0,7					
722,5		723,1	723,1	-0,6	-0,6					
839,9		841,2	841,2	-1,3	-1,3					
952,2		958,6	958,6	-2,4	-2,4					
1073,1		1074,9	1074,9	-1,8	-1,8					




## Anexo III: Certificado de calibração do forno terceirizado (continuação)

Arquivo: KOS-02 02-02-2018.paq		Impresso: 6/2/2018 11:34:32		
ID do forno: KOS-02	Data inicial do lev.: 2/2/2018	Hora inicial do lev.: 09:50:00	Técnico: WESLEI ESTEVES	
<b>Fatores de correção do termopar</b>				
<b>Detalhes calibração</b>			<b>Notas</b>	
Calibrado por ECIL Tipo de termopar N Carretel/Números lotes 113/18 Data da calibração 12/1/2018 Sondas calibradas 3				
Calibração Ponto (°C)	<b>Leitura</b>		<b>Correção</b>	
	Início do carretel	Fim do carretel	Início do carretel	Fim do carretel
	120,1	119,6	119,6	0,5
	240,0	239,3	239,3	0,7
	361,3	360,2	360,2	1,1
	483,0	482,0	482,0	1,0
	605,1	604,3	604,3	0,8
	722,5	721,9	721,9	0,6
	839,9	839,8	839,8	0,1
	956,2	956,6	956,6	-0,4
1073,1	1075,3	1075,3	-2,2	
<b>Detalhes calibração</b>			<b>Notas</b>	
Calibrado por ECIL Tipo de termopar N Carretel/Números lotes 114/18 Data da calibração 12/1/2018 Sondas calibradas 4				
Calibração Ponto (°C)	<b>Leitura</b>		<b>Correção</b>	
	Início do carretel	Fim do carretel	Início do carretel	Fim do carretel
	120,1	119,4	119,4	0,7
	240,0	239,2	239,2	0,8
	361,3	360,6	360,6	0,7
	483,0	482,0	482,0	1,0
	605,1	604,1	604,1	1,0
	722,5	723,2	723,2	-0,7
	839,9	841,4	841,4	-1,5
	956,2	959,0	959,0	-2,8
1073,1	1075,7	1075,7	-2,6	
<b>Detalhes calibração</b>			<b>Notas</b>	
Calibrado por ECIL Tipo de termopar N Carretel/Números lotes 115/18 Data da calibração 12/1/2018 Sondas calibradas 5				
Calibração Ponto (°C)	<b>Leitura</b>		<b>Correção</b>	
	Início do carretel	Fim do carretel	Início do carretel	Fim do carretel
	120,1	120,0	120,0	0,1
	240,0	240,0	240,0	0,0
	361,3	361,1	361,1	0,2
	483,0	483,0	483,0	0,0
	605,1	605,0	605,0	0,1
	722,5	723,1	723,1	-0,6
	839,9	841,2	841,2	-1,3
	956,2	958,7	958,7	-2,5
1073,1	1075,3	1075,3	-2,2	

## Anexo III: Certificado de calibração do forno terceirizado (continuação)

Arquivo: KOS-02 02-02-2018.paq		Impresso: 6/2/2018 11:34:32		
ID do forno: KOS-02	Data inicial do lev.: 2/2/2018	Hora inicial do lev.: 09:50:00	Técnico: WESLEI ESTEVES	
<b>Fatores de correção do termopar</b>				
<b>Detalhes calibração</b>			<b>Notas</b>	
Calibrado por ECIL Tipo de termopar N Carretei/Números lotes 116/18 Data da calibração 12/1/2018 Sondas calibradas 6				
Calibração Ponto (°C)	<b>Leitura</b>		<b>Correção</b>	
	Início do carretei	Fim do carretei	Início do carretei	Fim do carretei
	120,1	119,5	119,5	0,6
	240,0	238,9	238,9	1,1
	361,3	360,6	360,6	0,7
	483,0	481,3	481,3	1,7
	605,1	603,3	603,3	1,8
	722,5	721,9	721,9	0,6
	839,9	838,6	838,6	1,3
	956,2	953,6	953,6	2,6
1073,1	1071,4	1071,4	1,7	
<b>Detalhes calibração</b>			<b>Notas</b>	
Calibrado por ECIL Tipo de termopar N Carretei/Números lotes 117/18 Data da calibração 12/1/2018 Sondas calibradas 7				
Calibração Ponto (°C)	<b>Leitura</b>		<b>Correção</b>	
	Início do carretei	Fim do carretei	Início do carretei	Fim do carretei
	120,1	119,6	119,6	0,5
	240,0	239,1	239,1	0,9
	361,3	360,7	360,7	0,6
	483,0	482,0	482,0	1,0
	605,1	604,3	604,3	0,8
	722,5	723,2	723,2	-0,7
	839,9	841,3	841,3	-1,4
	956,2	958,8	958,8	-2,6
1073,1	1075,3	1075,3	-2,2	
<b>Detalhes calibração</b>			<b>Notas</b>	
Calibrado por ECIL Tipo de termopar N Carretei/Números lotes 118/18 Data da calibração 12/1/2018 Sondas calibradas 8				
Calibração Ponto (°C)	<b>Leitura</b>		<b>Correção</b>	
	Início do carretei	Fim do carretei	Início do carretei	Fim do carretei
	120,1	119,6	119,6	0,5
	240,0	239,2	239,2	0,8
	361,3	360,5	360,5	0,8
	483,0	482,0	482,0	1,0
	605,1	604,3	604,3	0,8
	722,5	723,1	723,1	-0,6
	839,9	841,2	841,2	-1,3
	956,2	958,8	958,8	-2,6
1073,1	1074,9	1074,9	-1,8	

## Anexo III: Certificado de calibração do forno terceirizado (continuação)

Arquivo: KOS-02 02-02-2018.paq		Impresso: 6/2/2018 11:34:32								
ID do forno: KOS-02	Data inicial do lev.: 2/2/2018	Hora inicial do lev.: 09:50:00	Técnico: WESLEI ESTEVES							
<b>Fatores de correção do termopar</b>										
Detalhes calibração			Notas							
Calibrado por: ECIL Tipo de termopar: N Carretel/Números lotes: 119/18 Data da calibração: 12/1/2018 Sondas calibradas: 9										
	Calibração Ponto (°C)	Leitura		Correção						
		Início do carretel	Fim do carretel							
	120,1	119,6	119,6	0,5						
	240,0	239,3	239,3	0,7						
	361,3	360,3	360,3	1,0						
	483,0	482,1	482,1	0,9						
	605,1	604,5	604,5	0,6						
	722,5	723,1	723,1	-0,6						
	839,9	841,1	841,1	-1,2						
	956,2	956,2	956,2	-2,0						
	1073,1	1076,1	1076,1	-3,0						
<b>Fatores correção do coletor</b>										
Detalhes calibração			Notas							
ID do coletor: TestReg-03 Número certificado calibração: 25-01-2018 Calibração expira em: 25/2/2018 Tipo de termopar: N										
	Referência (°C)	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
	100,0	100,2	100,1	100,1	100,1	100,1	100,1	100,1	100,1	100,0
	200,0	200,1	200,1	200,1	200,0	200,1	200,1	200,0	200,1	200,1
	300,0	300,1	300,2	300,1	300,0	300,2	300,2	300,0	300,1	300,2
	400,0	400,1	400,2	400,1	400,1	400,2	400,2	400,1	400,1	400,2
	500,0	500,0	500,1	500,1	500,1	500,2	500,1	500,1	500,1	500,0
	600,0	600,0	600,0	599,9	600,0	600,4	600,0	600,0	600,1	600,0
	700,0	700,2	700,1	700,2	700,2	700,0	700,1	700,2	700,2	700,0
	800,0	800,2	800,1	800,0	800,2	800,1	800,1	800,2	800,2	800,1
	900,0	900,1	900,0	900,2	900,0	900,1	900,0	900,4	900,0	900,0
	1000,0	1000,0	1000,1	1000,0	1000,2	1000,2	1000,1	1000,0	999,9	1000,2
	1100,0	1100,0	1100,2	1100,2	1100,3	1100,2	1100,2	1100,1	1099,8	1100,2
	1200,0	1200,1	1200,3	1200,0	1200,0	1200,3	1200,3	1200,4	1199,9	1200,3

## Anexo IV: Características técnicas da máquina de eletroerosão a fio

# Technical Specifications

Machine		FW 2U
Travel X、Y、Z	mm	500 x 400 x 250
Travel U、V	mm	±18
Max.taper angle	°/mm	±3/180
Diameter of wire	mm	0,12 – 0,20
Machine dimension (W x D x H)	mm	1715 x 1790 x 2050
Cabinet dimension (W x D x H)	mm	685 x 935 x 1865
Total weight	kg	2680

Work tank		
Max. workpiece dimension	mm	800 x 500 x 300
Max. workpiece weight	kg	600
Work table dimension (W x D)	mm	800 x 500
Work tank (W x D x H)	mm	1200 x 740 x 150

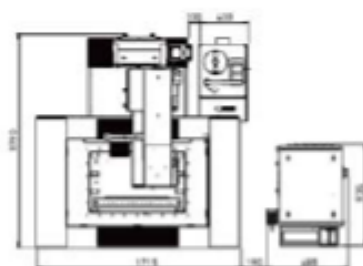
Dielectric unit		
Filter accuracy	µm	10
Dielectric unit capacity	l	50

Generator		
Max. machining speed	mm <sup>2</sup> /min	180
Best surface roughness Ra	µm	≤1.0

CNC	
CNC type	PC based controller - 80G Bytes HD
Communication	USB, LAN,RS232
Axis controlled	4 simultaneous
ISO code	Linear - circular - taper - 4 axis program with G&M codes
Language	English - Chinese - Portuguese - Spanish
Measurement unit	Metric - Inch
Handbox	Standard

Electrical supplies	
Standard	380V±10%, 50/60Hz, 2kVA
Room condition	15 ~ 30°C / 40 ~ 80%

Main options	
AC Motors for X,Y axes	
CAD/CAM	



FW 2U Floor space

## Anexo IV: Características técnicas da máquina de eletroerosão a fio (continuação)

### 1. Tecnologia de usinagem

#### 1.1 Tabelas de condições de usinagem

Estas configurações podem, no entanto, não cobrir todas as condições de usinagem. Se necessário, por favor diminua o parâmetro P para evitar o risco de quebra de fio.

C	*	*	*
	x	x	x
			x 10mm: espessuras das peças
			0: $\Phi 0.2$ fio de molibdénio — aço: usinagem precisa
			1: $\Phi 0.2$ fio de molibdénio — aço: identificação de usinagem
			2: $\Phi 0.2$ fio de molibdénio—cobre
			3: $\Phi 0.2$ fio de molibdénio—alumínio
			4: $\Phi 0.13$ fio de molibdénio — aço
			5: $\Phi 0.15$ fio de molibdénio — aço
			6: $\Phi 0.2$ fio de molibdénio—carboneto (não usado)
			7: Condições de usinagem de grupo

## **Anexo IV: Características técnicas da máquina de eletroerosão a fio (continuação)**

### **Cuidados com a máquina de eletroerosão**

**1** – Limpar a zona de trabalho após a realização da erosão. O TANQUE NÃO DEVE SER LIMPO COM DETERGENTE E PRODUTOS ORGANICOS, USAR O PRÓPRIO FLUIDO DIELÉTRICO PARA REALIZAR A LIMPEZA.

**2** – O sistema de fixação é composto por peças de alta precisão. Assim deverá ter grande cuidado. Tenha em mente que o aço temperado de alta qualidade só irá resistir à corrosão dentro de certos limites. Portanto, é necessário limpar cuidadosamente os elementos do sistema após cada utilização, bem como a base protetora montada na máquina de forma a salvaguardar-lhes até à próxima aplicação.

**3** – O tempo de substituição do fluido dielétrico é de dois a três meses, depende das horas de trabalho e os materiais usinados. Sempre que fizer a substituição do fluido, preencher a ficha afixada à máquina.

**4** – A rigidez dielétrica deve ser verificada todos os dias por um refratômetro, a leitura de concentração geral é entre 11,0 e 12,5, mais de 12,5, por favor, encha com água, inferior a 11,0, encha com dielétrico. Proporção da mistura do fluido dielétrico: 5,5 partes de água para cada parte de óleo dielétrico (**DIC 206**), ou seja, **cada abastecida colocar 33 litros de água e 6 litros do óleo dielétrico DIC 206.**

**5** – Cuidado ao fixar as peças no sistema de fixação da máquina. É expressamente proibido colidir peças nos suportes de fixação e o braço de transporte do fio.

**6** – Após utilizar a máquina lubrificar as polias e rolamentos com desengripante Whitelub® (polias e rolamentos frontais e traseiros).

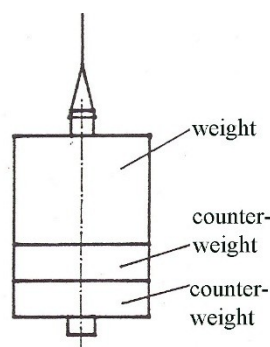
**7** – Os rolamentos das polias frontais devem ser substituídos a cada 150 horas de trabalho. Sempre que fizer a troca deve ser atualizado o tempo atual de trabalho total da máquina na ficha de manutenção.

**8** – É proibido colocar objetos sobre a mesa de deslocamento da máquina.

**9** – A máquina deve receber uma limpeza geral pelo menos uma vez na semana (remover poeiras, limpar polias, lubrificar rolamentos, limpeza do carretel, base, etc).

### 10 – Carga no fio:

Diâmetro do fio (mm)	Qtd de contrapesos
0,20	2
0,18—0,16	1
0,15—0,12	0



**11** – Boa precisão e boa rugosidade (precisão: 0,015, Ra: 2,5) podem ser alcançados nesta máquina quando todas as suas peças, tais como o sistema de acionamento do fio, tambor de fio, parâmetros de erosão, fluido de trabalho e assim por diante, são ajustadas para bom estado. Portanto, mantenha e ajuste a máquina regularmente para mantê-la em boas condições de trabalho. Só desta forma é que pode assegurar boa precisão e uma rugosidade satisfatória.

**12** – As experiências mostram que o efeito de corte é diferente para diferentes materiais. O resultado de cortar materiais gerais é muito melhor do que o de materiais especiais tais como ligas duras, cobre, alumínio. Os aspectos principais são os seguintes:

- a. eficiência de corte,
- b. precisão e rugosidade,
- c. desgaste de fio, rodas de guia e contatos,
- d. quando cortar ligas duras, as rodas de guia de cerâmica ou rodas de guia de aço devem ser usadas porque as rodas máquinas não são adequadas para cortar ligas duras.

**13** – Quando cortar ao longo de pequenos arcos ( $R < 2$ ), devido ao impacto de materiais e parâmetros de erosão, a usinagem de precisão pode ser reduzida, especialmente em materiais tais como o alumínio, cobre e ligas duras e assim por diante. Experiências indicam que ao cortar pequenos arcos, os parâmetros de pequena erosão podem ajudar a alcançar melhores resultados de precisão.

**14** – Após 12 horas de usinagem, é aconselhável ajustar de 3 a 5 mm no interior dos dois interruptores de limite do tambor de fio de ambos os lados para reduzir a pancada do tambor para impedir que uma possível fenda ou corte aconteça.

#### Anexo IV: Características técnicas da máquina de eletroerosão a fio (continuação)

**15** – Boas precisão e rugosidade (precisão: 0,015, Ra: 2,5  $\mu\text{m}$ ) podem ser alcançadas nesta máquina quando todas as suas peças, tais como o sistema de acionamento do fio, tambor de fio, parâmetros de erosão, fluido de trabalho e assim por diante, são ajustadas para bom estado. Portanto, mantenha e ajuste a máquina regularmente para mantê-la em boas condições de trabalho. Só desta forma é que pode assegurar boa precisão e uma rugosidade satisfatória.

**16** – As experiências mostram que o efeito de corte é diferente para diferentes materiais. O resultado de cortar materiais gerais é muito melhor do que o de materiais especiais tais como ligas duras, cobre, alumínio. Os aspectos principais são os seguintes:

- a. eficiência de corte,
- b. precisão e rugosidade,
- c. desgaste de fio, rodas de guia e contatos,
- d. quando cortar ligas duras, as rodas de guia de cerâmica ou rodas de guia de aço devem ser usadas porque as rodas máquinas não são adequadas para cortar ligas duras.





## Anexo V: Certificado de calibração do refratômetro

	<b>SCHMIDT HAENSCH</b> innovators by tradition since 1864
<b>Messprotokoll</b> <b>Measuring protocol</b>	

Gerätebezeichnung  
Instrument model

DHR FR1

Geräteseriennummer  
Instrument serial number

08620821

Auflösung / Resolution  
Genauigkeit / Precision

± 0.1 BX

Messbereich  
Measuring Range

00 – 85 Bx

Kalibriert durch:  
Calibrated by:  
Hecht

Datum:  
Date:  
15.05.2017

Geprüft durch:  
Controlled by:  
Hecht

Datum:  
Date:  
15.05.2017


Referenzgerät für Zuckerproben:  
Reference Equipment for Sugar Solutions:

Mettler Toledo Waage #e012  
Mettler Toledo Balance #e012

Umgebungstemperatur:  
Ambient Temperature:  
°C

Relative Feuchte:  
Relative Humidity:  
%

# Anexo V: Certificado de calibração do refratômetro (continuação)


**SCHMIDT  
HAENSCH**  
innovators by tradition since 1854


**Prüfergebnisse**  
**Control Results**

---

meas. Value / Bx	exp. Value / Bx	deviation / Bx	working Standard
0,0	0,0	0,0	0001
30,0	30,0	0,0	8818
60,0	60,0	0,0	8824

**Function and calibration of the instrument is verified:** ☒

**Datum / Date**  
**15.05.2017**

**Unterschrift / Signature**  


**Bestätigung**

**Confirmation**

Die Geräte halten die Herstelltoleranzen gemäß Spezifikationen der Datenblätter ein. Wir bestätigen, dass das oben identifizierte Gerät nach den vorgeschriebenen Verfahren geprüft wurde.  
 Alle Messmittel sind auf nationale Normale rückverfolgbar.  
 Das Schmidt und Haensch Qualitätsmanagement System ist nach ISO 9001/2008 zertifiziert  
 The equipment meets the manufacturing tolerances according to the specification data sheets. We confirm that the device identified above tested by the prescribed procedures.  
 All measuring devices are traceable to national standards.  
 The Schmidt & Haensch Quality Management System is certified per ISO 9001/2008.

Commerzbank AG  
 BLZ 100 800 00 Kto. 554 366 600  
 IBAN DE8810080000554366600  
 Swift BIC DRESDEFF100

Berliner Bank AG  
 BLZ 100 708 48 Kto. 523 238 400  
 IBAN DE15100708480523238400  
 Swift BIC DEUTDE33110

HR AG Chbg. HRA 14212  
 Pers. haft. Ges.: Kuchejda GmbH  
 Berlin HR AG Chbg. HRB 7141

Geschäftsführer: Mathis Kuchejda  
 Prokurist: Dipl.-Ing. Ingo Lohmann  
 Ust-IdNr. DE136655240  
 Steuer-Nr. 30/062/08204

**Anexo V: Certificado de calibração do refratômetro (continuação)****EC Declaration of Conformity**

Name of manufacturer: **SCHMIDT+HAENSCH**

Location of manufacturer: Waldstraße 80/81  
D - 13403 Berlin

We declare under our sole responsibility, that the product

Product name: **DHR-60B, DHR-90B, DHR-FR  
DHR-60 B1, DHR 85 B1, DHR FR1, DHR-C1, DHR-H1**

to which this declaration relates is in conformity with the following standards or other normative documents:

EN 61326-1/06 2010 Electrical equipment for measurement, control and laboratory use  
EMC requirements

EN 55011 2010 Industrial, scientific and medical equipment (Class B)

Electromagnetic compatibility (EMC)

EN 61000-4-2/01 2009 Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge  
immunity test

EN 61000-4-3/02 2008 Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency,  
electromagnetic field immunity test

Following the provisions of directives 2004/108/EC electromagnetic compatibility.

Function:

This refractometer is a digital measuring instrument. It is used for the determination of the refractive index of liquid media of low or high viscosity. It is mainly used for quick on-the-spot-control of process streams and the field analysis in fruit and vegetable plantations. There are two different models (measuring ranges) available.

The models in the practical design have available a temperature compensation within the range +10 to +70°C, a simple handling and only slightly susceptible to faults.

The CE mark was affixed: 10

Berlin, 15. April 2010



ppa. Dipl. Ing. Ingo Lehmann  
Plant Manager



I.V. Sükrü Yılmaz  
Head of Research & Development



**SCHMIDT+HAENSCH**

Opto electronic measuring instruments since 1864

## Anexo VI: Características técnicas da lixadora e polidora portátil

### 1. Contenu de l'emballage

#### Vérifier le contenu de l'emballage

La caisse de transport contient les pièces suivantes :

- 1 Transpol-2
- 1 Malette de transport avec bandoulière
- 1 Câble électrique
- 1 Moteur CC
- 1 Réducteur de vitesse
- 1 Poignée droite avec support pour la meule laminaire
- 1 Meule laminaire, granulométrie 80
- 1 Poignée à angle droit avec dispositif d'accouplement rapide pour les disques en caoutchouc
- 4 Disques en caoutchouc
- 1 Cône de feutre
- 1 Boîte carrée pour ranger les draps de polissage et le cône de feutre en service
- 3 Clefs pour le serrage de l'outil de prépolissage
- 1 Clef de serrage
- 1 Paire de lunettes de protection
- 2 Fusibles
- 1 Jeu de Modes d'emploi

#### Monter le moteur

- Insérer la fiche du câble du moteur dans la prise située sur la plaque frontale et serrer l'écrou.
- Assembler le moteur et le réducteur de vitesse en serrant soigneusement.

Si les pièces ne peuvent pas être vissées correctement l'une à l'autre, il est probable que la pièce d'entraînement du moteur ne soit pas correctement positionnée. En tournant l'arbre moteur, il est possible d'aligner les pièces et ensuite de les resserrer à l'aide d'une clef appropriée.

**Ne jamais utiliser la force!**

#### **IMPORTANT**

Le réducteur de vitesse doit rester monté sur le moteur, que l'on travaille avec la poignée droite ou la poignée à angle droit.

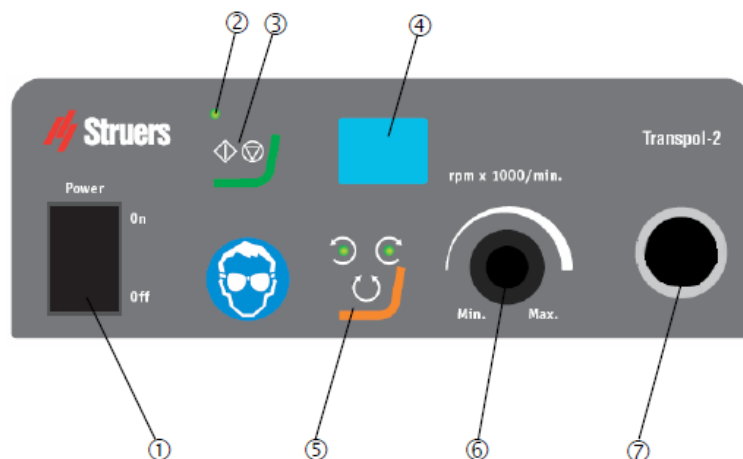
## Anexo VI: Características técnicas da lixadora e polidora portátil (continuação)

### 2. Opération

#### Se familiariser avec Transpol-2

Panneau frontal

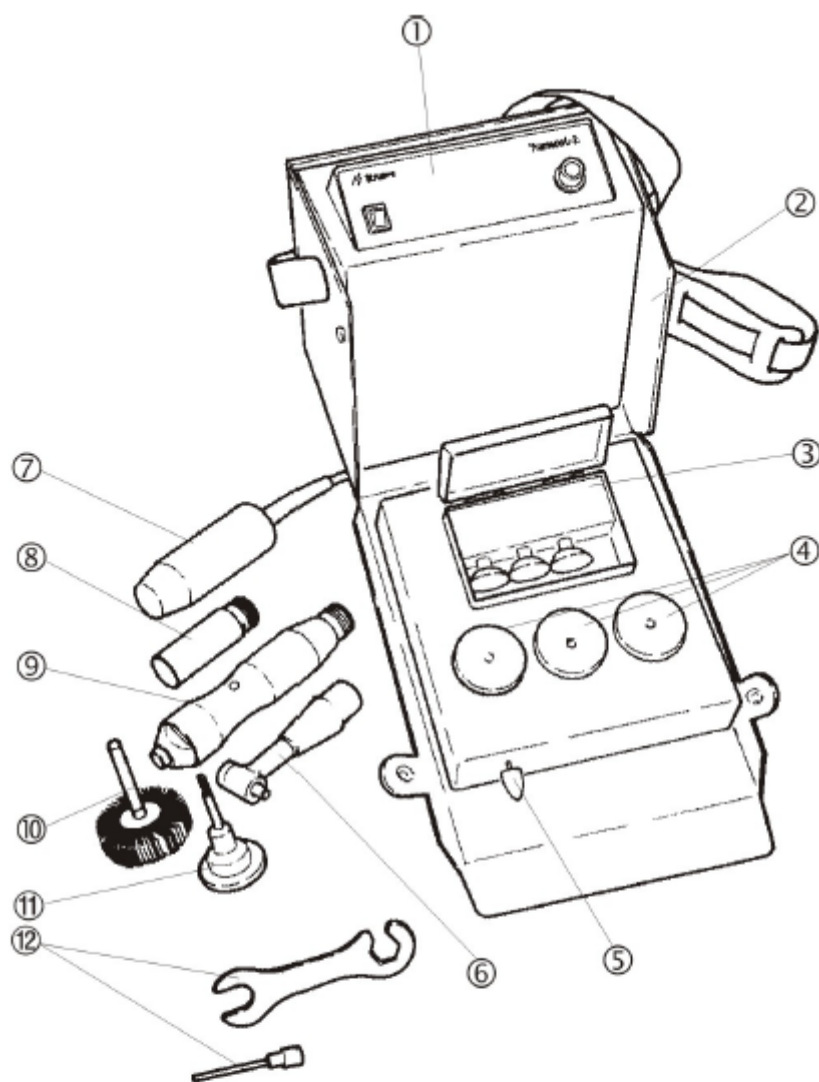
Prendre le temps de se familiariser avec l'emplacement et les noms des composants de Transpol-2:



- ① Interrupteur principal
- ② Indicateur de surcharge
- ③ Touche de mise en marche/ d'arrêt
- ④ Affichage vitesse
- ⑤ Touche de changement de sens et indicateurs de sens
- ⑥ Sélecteur de vitesse
- ⑦ Douille pour le câble du moteur



# Anexo VI: Características técnicas da lixadora e polidora portátil (continuação)



- ① Panneau frontal
- ② Malette de transport avec bandoulière
- ③ Boîtes pour le rangement des draps de polissage et du cône en feutre utilisé
- ④ Boîtes pour le rangement des disques de prépolissage et polissage neufs (les consommables sont à commander séparément)
- ⑤ Cône en feutre
- ⑥ Poignée à angle droit avec dispositif d'accouplement rapide pour les disques en caoutchouc
- ⑦ Moteur CC
- ⑧ Réducteur de vitesse
- ⑨ Poignée droite avec mandrin de serrage de 6 mm pour la meule laminaire
- ⑩ Meule laminaire
- ⑪ Disque en caoutchouc
- ⑫ Clef de serrage et tige de blocage pour serrer l'outil de prépolissage

## Anexo VI: Características técnicas da lixadora e polidora portátil (continuação)

<b>Prépolissage grossier</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Visser la poignée droite sur le réducteur de vitesse dans le même sens que celui dans lequel le réducteur de vitesse a été monté sur le moteur.</li> <li>■ Placer la meule laminaire dans le support de la poignée, insérer la tige de blocage dans le trou au centre de la poignée et serrer la meule laminaire dans le support à l'aide de la clef appropriée.</li> <li>■ Mettre le commutateur ON/OFF sur ON. L'affichage s'allume.</li> <li>■ Presser la touche de mise en marche/arrêt. Le moteur commence à tourner.</li> <li>■ Régler la vitesse à besoin. Un prépolissage grossier avec la meule laminaire demande la vitesse maximum.</li> </ul>
<b>Prépolissage et prépolissage fin</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Démonter la poignée droite (le réducteur de vitesse doit rester monté sur le moteur).</li> <li>■ Monter la poignée à angle droit et la serrer à l'aide d'une clef appropriée dans le même sens que celui dans lequel le réducteur de vitesse a été monté sur le moteur.</li> <li>■ Placer le disque en caoutchouc dans le dispositif d'accouplement rapide de la poignée à angle droit.</li> <li>■ Retenir la tête angulaire avec le pouce en tournant simultanément le disque en caoutchouc et le pressant en place.</li> <li>■ Choisir un papier SiC de granulométrie correcte. Oter le papier de protection du dos et presser le papier abrasif contre le disque en caoutchouc avec le pouce.</li> </ul> <p>Normalement, le prépolissage est effectué en 4 étapes (granulométrie 60, 120, 250, 500).</p>
<i>Temps de prépolissage</i>	En règle générale une étape de prépolissage doit durer deux fois plus longtemps que le temps nécessaire à éliminer les rayures de l'étape précédente.
<i>Vitesse de prépolissage</i>	La vitesse doit normalement être au maximum durant le prépolissage grossier pour ensuite diminuer avec les tailles de grain inférieures.
<i>Pression de prépolissage</i>	La pression dépend de la rugosité de la surface et de l'état du papier abrasif. Une surface non-préparée et un papier abrasif frais ne demandent qu'une faible pression.
<i>Conseils pratiques</i>	<p>Ne pas utiliser toute la surface du papier abrasif, mais prépolir sur le bord extrême du papier. Ceci assurera un meilleur prépolissage ainsi qu'un dessin de rayures plus uniforme.</p> <p>La poignée à angle droit, le réducteur et le moteur peuvent chauffer, mais cela n'est pas anormal. Etant donné que le réducteur de vitesse diminue la vitesse de rotation, de l'énergie se transforme en chaleur.</p> <p>Conserver les papiers abrasifs séparément des draps de polissage afin d'éviter que les particules de prépolissage ne contaminent les draps de polissage.</p>

## Anexo VI: Características técnicas da lixadora e polidora portátil (continuação)

### Polissage

Le polissage est réalisé avec DP-Paste, DP-Spray ou DP-Stick sur un drap de polissage en 2, 3 ou 4 étapes, selon le matériau, par exemple 15 µm, 6 µm, 3 µm et finalement 1 µm. Si la surface doit être particulièrement fine, l'on peut employer du diamant ¼ µm au polissage final, mais en général la préparation se termine par 3 µm.

Drap	Type de diamant
DP-Dur/ DP-Dac	Diamants 15 µm et 6 µm
DP-Mol	Diamants 3 µm et 1 µm
DP-Nap	Diamants ¼ µm

- Monter le drap sur le disque en caoutchouc en enlevant le papier de protection et en pressant le drap contre le disque en caoutchouc avec le pouce.
- Appliquer de la pâte diamantée ou du spray diamanté sur le drap.

Avant le polissage et entre les étapes de polissage individuelles, la surface à préparer doit être nettoyée à l'eau ou à l'alcool.

Durant le polissage, la vitesse du moteur doit être relativement basse pour éviter que les diamants ne soient projetés hors de la surface à préparer. Ajouter quelques gouttes de lubrifiant, du lubrifiant bleu pour les matériaux durs tels que l'acier, du lubrifiant rose pour les matériaux doux tels que l'aluminium et le laiton.

### Surcharge du moteur

Si le moteur est surchargé, le fusible interne va couper le courant au moteur qui s'arrêtera net. En même temps, l'indicateur de surcharge s'allumera.

L'appareil peut être remis en marche en mettant l'interrupteur principal sur OFF, puis sur ON.

## 4. Données techniques

Sujet	Spécifications	
Consommation courant max.	64 W	
Vitesse de rotation	Moteur avec réducteur: 100-7000 t/min env.	
Alimentation en courant	50/60 Hz	230 V
	50/60 Hz	120 V
Dimensions et poids (équipement complet dans une malette de transport)	Largeur	230 mm
	Profondeur	150 mm
	Hauteur	250 mm
	Longueur du câble	Jusqu'à 2 mètres
	Poids (accessoires compris)	5 kg



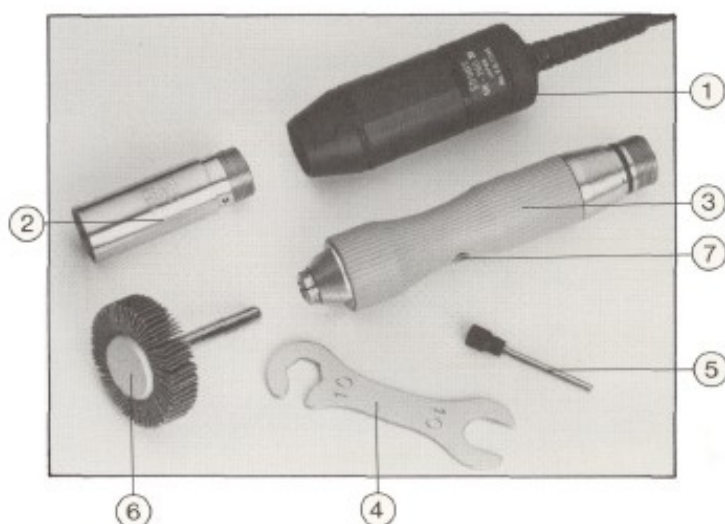
## Anexo VI: Características técnicas da lixadora e polidora portátil (continuação)

*Transpol-2*  
*Mode d'emploi*

# Spare parts list

Pos.	Description	Cat no.
	Carrying case with shoulder strap	437 MP 039
	Carbon brushes for motor	437 MP 040
	Motor cable NCL-26CD	437 MP 030

Mounting tools, motor (1 of 2)

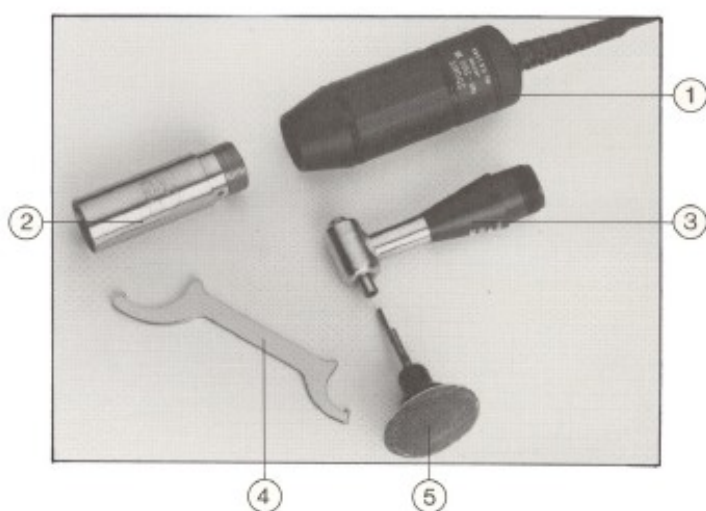


1	Motor NK-260-II	437 MP 029
2	Reduction gear RG-O1N	437 MP 034
3	Straight handle HG-200 N	437 MP 032
4	Spanner	437 MP 035
5	Lock pin	437 MP 036

## Anexo VI: Características técnicas da lixadora e polidora portátil (continuação)

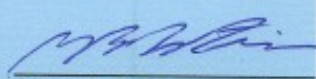
*Transpol-2*  
*Mode d'emploi*

Mounting tools, motor (2 of 2)



1	Motor NK-260-II	437 MP 029
2	Reduction gear RG-O1N	437 MP 034
3	Right angle handle IC-301	437 MP 031
4	Spanner	437 MP 037
	Fixture assembly for rubber disc for IC-301	437 MP 041
	Main shaft assembly for IC-301	437 MP 042
5	TRAHO Rubber disc	40800055

## Anexo VII: Certificado de calibração do interferômetro

		LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO		
<b>CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº :</b>		030/16		
<b>CARACTERÍSTICAS DO OBJETO</b>				
Cliente:	Universidade Federal de Uberlândia	Capacidade :	200 mm	
Objeto :	Medidor de Superfície	Menor Divisão :	0,01 µm	
Fabricante :	Taylor Hobson Limited	Ano de Fabricação :	NC	
Modelo :	CLI 2000	OS :	3720	
Número de Controle :	310.195	Número de Série :	2144DS	
<b>PROCEDIMENTOS E/OU NORMAS APLICADAS</b>				
Procedimento de Calibração :	Calibração efetuada baseada no manual de serviço do equipamento.			
<b>CONDIÇÕES DO ENSAIO</b>				
Temperatura :	20,0 +/- 1° C			
<b>PADRÃO(ÕES) UTILIZADO(S) NA CALIBRAÇÃO</b>				
Nº Série	Descrição	Identificação	Próxima Calibração	Nº Certificado / Emissor
112/1534	Padrão de Rugosidade	15	26.05.17	25707.1 / SOCIESC - RBC
<b>OBSERVAÇÕES GERAIS</b>				
<b>Notas:</b>				
1- A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padronizada combinada, multiplicada por um fator de abrangência k, para um nível de confiança de aproximadamente 95%. Os valores de k são apresentados na tabela de resultados.				
2- A reprodução deste certificado só poderá ser completa, para realização da reprodução parcial, somente com a aprovação por escrito do Laboratório de Calibração Taylor Hobson do Brasil.				
3- Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.				
4- O objeto referenciado no certificado encontra-se funcional e em condição de ser calibrado, mas não o isenta do controle metrológico estabelecido na Regulamentação Metrológica.				
Data da Calibração :	07.07.16			
Local da Calibração :	Laboratório Universidade Federal de Uberlândia			
Endereço do Cliente :	Av. João Naves de Avila, 2121. Bloco 1M, Campus Santa Monica.			
Data da Última Calibração:	NC			
CÓDIGO DO FORMULÁRIO:01.1281.009.001		 Fernando Lopez Técnico Calibrador		
		 Marcello B. Montagnani Responsável Técnico Data da Emissão: 29.07.16		
<b>Taylor Hobson do Brasil Ltda.</b> Rua Gaspar Lourenço, 605 - Vila Mariana - 04107-001 - São Paulo - SP Tel.(0XX11)5083-3846 - Fax.(0XX11)5083-3846 www.taylorhobson.com.br 1 de 3				



## Anexo VII: Certificado de calibração do interferômetro (continuação)



Certificado de Calibração

Nº : 030/16

## 1 - Resultados da Calibração de Rugosidade ( Ra ) antes dos ajustes (medidor com contato indutivo)

Faixa de Trabalho (mm)	Indicação no Padrão (µm)	Indicação no Instrumento (µm)	Erro de Indicação (µm)	Incerteza do Padrão +/- (µm)	Fator de Abrangência k	Incerteza Expandida +/- (µm)
2,50	5,99	5,78	-0,21	0,30	2,00	0,30
0,50	5,99	5,77	-0,22	0,30	2,00	0,30
0,10	5,99	5,67	-0,32	0,30	2,00	0,30

## 2 - Resultados da Calibração de Rugosidade ( Ra ) após os ajustes (medidor com contato indutivo) :

Faixa de Trabalho (mm)	Indicação no Padrão (µm)	Indicação no Instrumento (µm)	Erro de Indicação (µm)	Incerteza do Padrão +/- (µm)	Fator de Abrangência k	Incerteza Expandida +/- (µm)
2,50	5,99	6,00	0,01	0,30	2,00	0,30
0,50	5,99	6,00	0,01	0,30	2,00	0,30
0,10	5,99	6,00	0,01	0,30	2,00	0,30

## 3 - Resultados da Calibração de Rugosidade ( Ra ) antes dos ajustes (medidor laser sem contato) :

Faixa de Trabalho (mm)	Indicação no Padrão (µm)	Indicação no Instrumento (µm)	Erro de Indicação (µm)	Incerteza do Padrão +/- (µm)	Fator de Abrangência k	Incerteza Expandida +/- (µm)
10,00	5,99	5,94	-0,05	0,30	2,00	0,30

## 4 - Resultados da Calibração de Rugosidade ( Ra ) após os ajustes (medidor laser sem contato) :

Faixa de Trabalho (mm)	Indicação no Padrão (µm)	Indicação no Instrumento (µm)	Erro de Indicação (µm)	Incerteza do Padrão +/- (µm)	Fator de Abrangência k	Incerteza Expandida +/- (µm)
10,00	5,99	6,00	0,01	0,30	2,00	0,30

## OBSERVAÇÕES:

Gauge Indutivo - faixa de trabalho alta - 2,50 mm  
 Gauge Indutivo - faixa de trabalho média - 0,5 mm  
 Gauge Indutivo - faixa de trabalho baixa - 0,1 mm  
 Laser - faixa de trabalho - 10,0 mm  
 CLA - faixa de trabalho - 0,3 mm

Fernando Lopez  
 Técnico Calibrador

Marcello B. Montagnani  
 Responsável Técnico

Taylor Hobson do Brasil Ltda  
 Rua Gaspar Lourenço, 605 - Vila Mariana - 04107-001 - São Paulo - SP  
 Tel.(0XX11)5083-3846 - Fax.(0XX11)5083-3846  
 www.taylorhobson.com.br

## Anexo VII: Certificado de calibração do interferômetro (continuação)



Certificado de Calibração

Nº : 030/16

5 - Resultados da Calibração de Rugosidade ( Ra ) antes dos ajustes (medidor CLA) :

Faixa de Trabalho (mm)	Indicação no Padrão (µm)	Indicação no Instrumento (µm)	Erro de Indicação (µm)	Incerteza do Padrão +/- (µm)	Fator de Abrangência k	Incerteza Expandida +/- (µm)
0,3	5,99	5,94	-0,05	0,30	2,00	0,30

6 - Resultados da Calibração de Rugosidade ( Ra ) após os ajustes (medidor CLA) :

Faixa de Trabalho (mm)	Indicação no Padrão (µm)	Indicação no Instrumento (µm)	Erro de Indicação (µm)	Incerteza do Padrão +/- (µm)	Fator de Abrangência k	Incerteza Expandida +/- (µm)
0,3	5,99	6,00	0,01	0,30	2,00	0,30

7 - Resultados da Validação de Erro da Superfície :

Área (mm)	Valores (µm)	Tolerância +/- (µm)
195 X 195	0,0912	2
180 x 180	0,0889	2
150 x 150	0,0634	2
100 x 100	0,0475	2
50 x 50	0,0255	2

### OBSERVAÇÕES:

Gauge Indutivo - faixa de trabalho alta - 2,50 mm  
 Gauge Indutivo - faixa de trabalho média - 0,5 mm  
 Gauge Indutivo - faixa de trabalho baixa - 0,1 mm  
 Laser - faixa de trabalho - 10,0 mm  
 CLA - faixa de trabalho - 0,3 mm

Fernando Lopez  
Técnico Calibrador

Marcello B. Montagnani  
Responsável Técnico

Taylor Hobson do Brasil Ltda.  
 Rua Gaspar Lourenço, 605 - Vila Mariana - 04107-001 - São Paulo - SP  
 Tel.(0XX11)5083-3846 - Fax.(0XX11)5083-3846  
 www.taylorhobson.com.br  
 3 de 3

## Anexo VII: Características técnicas do interferômetro (continuação)

# Talysurf CLI

## 3D Surface Profiling Systems

### Specification

Capacity, Size and Weight		CLI 2000	
Measuring capacity L x W x H		200 x 200 x 200mm (7.9 x 7.9 x 7.9in)	
Axis traverse length X - Y - Z		200mm (7.9in)	
Axis resolution (data spacing X - Y)		0.5µm (20µin)	
Dimensions L x W x H (main instrument)		800 x 600 x 800mm (32 x 24 x 32in)	
Weight capacity		20kg (44lb)	
Weight (main instrument)		280kg (616lb)	
Measuring speed <sup>1</sup>		30, 15, 10, 5, 1, 0.5mm/s, (1.2, 0.6, 0.4, 0.2, 0.04, 0.02in/s)	
Positioning speed (X - Y axis)		30mm/s (1.2in/s) maximum	
Slide Straightness (single profile Length)		50mm (1.97in)	
Peak to Valley (Pt) uncorrected <sup>2</sup>		+ / - 0.6µm (24µin)	
Peak to Valley (Pt) corrected <sup>3</sup>		+ / - 0.3µm (12µin)	
Slide Flatness (area L x W)		50mm (1.97in)	
Peak to Valley (St) uncorrected <sup>2</sup>		+ / - 0.8µm (32µin)	
Peak to Valley (St) corrected <sup>3</sup>		+ / - 0.5µm (20µin)	
Gauge Type and Performance		Range	
Laser Triangulation 2000Hz scanning frequency		10mm (0.4in)	
Laser Triangulation 2000Hz scanning frequency		30mm (1.18in)	
Chromatic Length Aberration 5000Hz scanning frequency		3mm	
Chromatic Length Aberration 5000Hz scanning frequency		1mm	
Chromatic Length Aberration - HE 5000Hz scanning frequency		300µm	
Form Talysurf Inductive Gauge with 2µm radius diamond stylus		2.5 - 0.5 - 0.1mm (0.1 - 0.02 - 0.004in)	
Environment		Electrical supply	
Storage temperature	5°C to 40°C (41°F to 104°F)	Supply type	Alternating supply, singlephase with earth (3-wire system)
Storage humidity	10% to 80% Relative, non condensing.	Instrument and computer voltage	90V - 130V or 200V-260V (switch selectable)
Operating temperature:	18°C to 22°C (64°F to 72°F)	Frequency	47Hz to 63Hz
Operating humidity:	45% to 75% Relative, non condensing.	Supply voltage transients - width	Not less than 2µs and not greater than 20µs
Temperature gradient	<2°C (<3.60°F) per hour	Power consumption	500VA
Maximum RMS floor vibration	3µm/s (120µin/s) at <50Hz 6µm/s (240µin/s) at >50Hz		
Safety	EN 61010 - 1 : 2001		
EMC	EN 61000 - 6 - 4 : 2001, EN 61000 - 6 - 1 : 2001		

The above quoted technical data is for measurements taken in a metrology laboratory controlled environment: 20°C ± 1°C (68°F ± 1.8°F), draft free, and isolated from low frequency floor borne vibration.

Uncertainties and maximum permissible errors (MPE's) are at 95% confidence in accordance with recommendations in the ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1993). All errors are expressed as MPE's.

<sup>1</sup> This speed, although made available by the slide mechanism, is not compatible with the operation of all gauges. Traverse speeds of 0.5mm/s (0.02in/s) and less are recommended for surface texture measurements when using the inductive gauge.

<sup>2</sup> Straightness and flatness errors occur in a simple curve shape that can be removed using a polynomial of degree 2 using software included with the system.

<sup>3</sup> Software corrections do not significantly enhance roughness measurements.

<sup>4</sup> This is the maximum slope feasible in the measuring direction when using the laser or CLA Gauges.

<sup>5</sup> The included angle of the standard diamond stylus is 90°, other angles and tip radii can be provided

Note: Taylor Hobson pursues a policy of continual improvement due to technical developments. We therefore reserve the right to deviate from catalog specifications.



## Anexo VIII: Certificado de calibração do traçador de alturas digital

**Mitutoyo**  
*Mitutoyo Sul Americana Ltda.*

**LABORATÓRIO  
DE  
METROLOGIA**

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Calibração  
NBR ISO/IEC  
17025

**CAL 0031**

Pag.: 1 / 2

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 8234/10**

**Cliente :** " FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITÁRIO. "

**Endereço :** Avenida Engenheiro Diniz, 1178 - Uberlândia - MG.

**Ordem de serviço:** 051.297

**1 - Objeto Calibrado**

**MEDIDOR DE ALTURA DIGITAL**  
Fabricante: Mitutoyo  
Código: 570-312  
Nº. de Série: 03011935  
Faixa nominal : 300 mm  
Resolução : 0,01 mm  
Identificação do proprietário : Não consta

**2 - Padrões utilizados na Calibração:**

**Conjunto de Blocos padrão**  
Número : 03617  
Certificado N.º 0112/10 - RBC - Mitutoyo.  
Validade : 01/2011

**Padrão escalonado**  
Número : 320108  
Certificado N.º 0401/10 - RBC - Mitutoyo.  
Validade : 07/2010

**3 - Procedimento de Medição:** PML - 0023 Versão 1/3

O medidor de altura foi verificado contra um Padrão escalonado e Blocos-padrão, tomando a leitura da indicação no próprio contador do medidor de altura.

Data da Calibração: 26 de Junho de 2010

Carlos Kazuo Suetake  
Gerente do Depto de Garantia da Qualidade  
Data de Emissão: 26/06/10

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgnetmetro que avalia a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades - SI).  
A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.  
Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer cópias.

\*Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Telefone: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722  
\*Fábrica: Rod. Ind. Titânica, 1505 - Bairro Rafo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br  
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0029 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br

# Anexo VIII: Certificado de calibração do traçador de alturas digital (continuação)

**Mitutoyo**  
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 8234/10**

**REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO**

Pag.: 2 / 2

Laboratório de Calibração Acreditado pela CGCRE / INMETRO de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob Nº. 0031

**4 - Resultado da Calibração:** O resultado é a média das calibrações.

Padrão ( mm )	Indicação Instrumento ( mm )	Incerteza de Medição ( mm )
1,10	1,10	0,02
1,50	1,50	
1,90	1,90	
4,00	4,00	
8,00	8,00	
16,00	16,00	
20,00	20,00	
50,00	50,00	
75,00	75,00	
100,00	99,99	
150,00	149,99	
200,00	200,00	
250,00	250,00	
300,00	299,99	

**5 - Incerteza de Medição:**

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência  $k = 2,4$ , o qual para uma distribuição  $t$  com  $veff = 7$  graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

**6 - Nota :** Temperatura ambiente (  $20,0 \pm 0,5$  )°C.

©Laboratório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Telefone: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722  
 ©Fábrica: Rod. Ind. Tibiriçá, 1555 - Bairro Raíto - CEP: 06620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5836 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br  
 Laboratório: Tel.: (11) 4746-5850 - Fax: (11) 4746-5899 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br  
 Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5857 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br  
 Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br



## Anexo IX: Certificado de calibração do desempenho



### LABORATÓRIO DE METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

**Certificado de Calibração No. : 06994/13**

Cliente : " FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. "  
Endereço : Av. Amazonas, 2210, Campus Umuarama, Uberlândia, MG - Cep-38400-902

Ordem de Serviço No. : 035.766/002

#### 1 - INSTRUMENTO CALIBRADO

##### Desempeno de Granito

Fabricante : Mitutoyo  
Código : Sem identificação  
No. de Série : Sem identificação  
Capacidade : 1000 x 1000 mm  
Id. do Proprietário : 059606

#### 2 - PADRÃO DE REFERÊNCIA

##### Nível diferencial

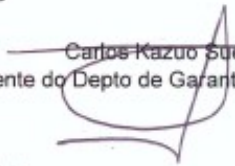
Modelo / Código : N/C  
No. de Série : 7319  
Certificado No. : 15363/12- RBC - Mitutoyo  
Validade : 12/2013

#### 3 - PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO : PML - 0044 Versão 1/2.

O desvio de planeza do desempenho foi determinado através da medição angular com a utilização de um Nível. O método consiste em obter com a ajuda do nível, as alturas dos pontos de referência definida no mapeamento.

Data de calibração : 28 de Maio de 2013

Data de emissão : 04 de Julho de 2013

  
Gerente do Depto de Garantia da Qualidade

pág.: 1 / 2

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo CGCRE que avalia a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades - SI).  
A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende de aprovação por escrito da Mitutoyo.  
Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer ítem.

\*Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722  
\*Fábrica: Rod. Indio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffle - CEP: 08520-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5506 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br  
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5950 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mail: ata@mitutoyo.com.br

# Anexo IX: Certificado de calibração do desempenho (continuação)

**Mitutoyo**  
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**Certificado de Calibração No. : 06994/13**

**REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO**

Laboratório de calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0031

**4- RESULTADO DA MEDIÇÃO : Mapeamento em (mm)**

0,8	0,4	-0,8	-2,4	-2,2	-2,3	-1,5	-0,8	0,0
-0,1	0,8			-3,4			0,8	0,1
-1,0		-0,8		-4,5		0,0		0,1
-2,0			-0,6	-2,7	0,3			-0,4
-2,5	-2,4	-1,9	-1,8	-0,4	-0,2	1,0	-0,1	-1,0
-2,7			1,4	-1,0	0,0			-0,7
-1,3		1,1		-2,4		-0,6		-0,5
-0,2	0,3			-3,4			-0,3	0,2
0,0	-0,6	0,0	-3,3	-3,6	-3,0	-2,4	-1,0	0,8

Erro de Planeza : 5,8  $\mu\text{m}$  Lado : dois apoios

**5 - INCERTEZA DE MEDIÇÃO :  $U = 2,9 \mu\text{m}$**

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência  $k = 2,25$ , para o qual uma distribuição  $t$  com  $V_{\text{eff}} = 11$  graus de liberdade efetivos correspondente a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

**6- Nota : Temperatura ambiente :  $(20,4 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$**

pág.: 2 / 2


\*Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722  
\*Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Ratto - CEP: 06620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5958 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br  
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5950 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5950 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0026 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br

## Anexo X: Certificado de calibração do termohigrômetro digital

		<i>Certificado de Calibração</i>		
		<i>Laboratório de Temperatura &amp; Umidade</i>		
		<i>Número do Certificado</i>		R4996/13 <i>Folha</i> 1 / 2
CONTRATANTE :	Universidade Federal de Uberlândia - UFU			
ENDEREÇO :	Av. João N. de Ávila, 2121, Bl. 1M - Campus Sta. Mônica - Uberlândia - MG			
INTERESSADO :	O mesmo			
ENDEREÇO :	O mesmo			
INSTRUMENTO :	<u>Termohigrômetro Digital</u>			
FABRICANTE :	Instrutherm			
MODELO :	HT-260			
IDENTIFICAÇÃO :	Não especificado			
NÚMERO DE SÉRIE :	06120362			
DATA DA CALIBRAÇÃO :	19/06/2013	LOCAL DA CALIBRAÇÃO:	Laboratório Elus	
PRÓXIMA CALIBRAÇÃO :	Determinado pelo cliente	TEMPERATURA DO AR :	23°C ± 5°C	
DATA DA EMISSÃO :	20/06/2013	UMIDADE RELATIVA AR :	45%UR a 70%UR	
PADRÕES UTILIZADOS :	Termohigrômetro Digital identificação EL-225 rastreado por Laboratório RBC - CAL 0439 em 28/02/2013 sob certificado R1678/13 válido até fevereiro/2014.			
PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO :	- A calibração foi realizada pelo método comparativo contra padrões de referência, seguindo os procedimentos internos: PCT-003 rev. 01 / PCT-012 rev. 02.			
OBSERVAÇÕES :	<ul style="list-style-type: none"><li>- Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo CGCRE, o qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.</li><li>- A calibração foi realizada em 3 medições por ponto. O Valor Verdadeiro foi herdado pela média de 3 medições obtidas pelo padrão em cada ponto.</li><li>- Os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura de 1990.</li><li>- <math>k</math> = fator de abrangência (fator multiplicativo adimensional) / <math>V_{eff}</math> = graus de liberdade efetivo. / I.M. = Incerteza de Medição.</li></ul>			
TÉCNICO EXECUTANTE: CAIO CESAR SILVA	<div style="text-align: right;"><div>Julio Cesar Pereira de Souza Gerente Técnico Substituto</div><div>RODRIGO BOMES CORDEIRO GERENTE TÉCNICO</div></div>			
<small>A reprodução deste certificado só poderá ser total, sem nenhuma alteração. Os Resultados deste certificado referem-se somente ao item calibrado ou ensaiado. Este certificado atende os requisitos estabelecidos pela norma NBR ISO/IEC 17025. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência "k" que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.</small>				
Rua Dendzeiro, 29   Jd. Matarazzo   São Paulo   SP   03813-130   Tel 11 2214-0049   Email: atendimento@elusinstrumentacao.com.br				



# Anexo X: Certificado de calibração do termohigrômetro digital (continuação)



**PRECISÃO  
METROLÓGICA**  
**elus**  
**INSTRUMENTAÇÃO**

## Certificado de Calibração

### Laboratório de Temperatura & Umidade


Número do Certificado R4996/13 Folha 2 / 2

Laboratório de Calibração acreditado pelo CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0439.

**RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO :**


**UMIDADE RELATIVA DO AR SENSOR EXTERNO : TEMPERATURA DA CALIBRAÇÃO - 20°C**  
 Sensor - Fabricante: Não especificado; Modelo: Não especificado; Id.: Não especificado; n°.s.: Não especificado  
 Faixa de medição: 0 ~ 100 %UR, divisão de escala: 0,1 %UR.


Indicação do Instrum. (%UR)	Valor Verdadeiro (%UR)	Erro (%UR)	I.M. (%UR)	k	Veff
31,8	29,9	1,9	1,0	2,00	∞
50,6	49,7	0,9	1,0	2,00	∞
79,2	79,5	-0,3	1,3	2,00	∞



**TEMPERATURA SENSOR EXTERNO :**  
 Sensor - Fabricante: Não especificado; Modelo: Não especificado; Id.: Não especificado; n°.s.: Não especificado  
 Faixa de medição: -20 ~ 60 °C, divisão de escala: 0,1 °C.

Imersão (mm)	Indicação do Instrum. (°C)	Valor Verdadeiro (°C)	Erro (°C)	I.M. (°C)	k	Veff
---	20,6	20,0	0,6	0,3	2,00	∞
---	25,9	25,0	0,9	0,3	2,00	∞
---	31,3	30,0	1,3	0,3	2,00	∞





A reprodução deste certificado só poderá ser total, sem nenhuma alteração. Os Resultados deste certificado referem-se somente ao item calibrado ou ensaiado. Este certificado atende os requisitos estabelecidos pela norma NBR ISO/IEC 17025. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência "k" que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Rua Dendezeiro, 29 | Jd. Matarazzo | São Paulo | SP | 03813-130 | Tel 11 2214-0049 | Email: atendimento@elusinstrumentacao.com.br

## Anexo XI: Certificado de calibração do projetor de perfil

 <i>Mitutoyo Sul Americana Ltda.</i>	<b>LABORATÓRIO DE METROLOGIA</b>  REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO	
<b>CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 12137/12</b>		
<b>Interessado : " FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITÁRIO "</b>		Pág.1/4
Endereço : Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M, Campos Santa Mônica - Uberlândia - MG.		
Local da calibração : Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M, Campos Santa Mônica - Uberlândia - MG.		
Ordem de Serviço : 034.514/001		
<b>1 - OBJETO CALIBRADO</b>		
<b>PROJETOR DE PERFIL</b>		
Fabricante : Mitutoyo		
Código : 302-714A		
Modelo : PJA3000		
No. de Série : D00101012		
Tambor Micrométrico		
Código : 164-164	N°. série : 000636	
Código : 164-164	N°. série : 000619	
Resolução da unidade de leitura : 0,001 mm		
Resolução do goniômetro : 0° 01'		
Identificação do Proprietário : 088180		
<b>2 - PADRÃO UTILIZADO NA CALIBRAÇÃO</b>		
<b>Régua Graduada de Vidro</b>		
N°. de Série : 21164		
Certificado N°. : 01647/11	Validade: 30/02/2013	
N°. de Série : 24364		
Certificado N°. : 08755/11	Validade: 30/06/2013	
<b>Padrão Angular</b>		
N°. de Série : RET 1		
Certificado N°. : 110381/101	Validade: 30/06/2013	
<b>3 - PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO : PML - 0043 Versão 1/2.</b>		
<p>O erro de ampliação e a indicação foi verificado projetando a régua padrão sobre a tela do projetor e a medição através de comparação com a régua.</p> <p>O erro de indicação do goniômetro foi verificado comparativamente com um padrão angular projetado sobre a tela e a leitura feita no goniômetro.</p>		
Data de calibração : 22 de Agosto de 2012		
Data de emissão : 05 de Setembro de 2012		
 Gerente do Dpto. de Garantia da Qualidade		
<small>Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo CGCRE que avalia a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades - SI). A reprodução deste Certificado só poderá ser total e dependa da aprovação por escrito da Mitutoyo. Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.</small>		
<small>•Escritório Central: Av. João Carlos de Silva Borges, 5240 - Santo Amaro - CEP 04728-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722 •Fábrica: Rod. João Tibiripá, 1555 - Bairro Raffle - CEP: 08629-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br Laboratório: Tel.: (11) 4746-5860 - Fax: (11) 4746-5950 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: assistao@mitutoyo.com.br Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mail: ata@mitutoyo.com.br</small>		

# Anexo XI: Certificado de calibração do projetor de perfil (continuação)

**Mitutoyo**  
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 12137/12**

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob número CAL 0031

Pág. 2/4

**4 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :**

**4.1 - Resultado Ampliação**

Lente de Ampliação de 10 X

Número lente: 013012

Item	Posição				Incerteza de Medição ( U )	Fator de abrangência ( k )	Graus de liberdade ( V <sub>eff</sub> )
	1	2	3	4			
Erro ( % )	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01 %	2,00	infinito

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO BRASIL

•Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0090 - Fax: (11) 5641-3722  
•Fábrica: Rod. Índio Tibiká, 1555 - Bairro Pardo - CEP: 06620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5836 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br  
Laboratório: Tel.: (11) 4748-5950 - Fax: (11) 4748-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4748-5957 - Fax: (11) 4748-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0025 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br



# Anexo XI: Certificado de calibração do projetor de perfil (continuação)

**Mitutoyo**  
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 12137/12**

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob número CAL 0031

Pág.3/4

**4 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :**

**4.2 - Resultado da Indicação**


Eixo " X "			Eixo " Y "		
Indicação ( mm )	Resultado ( mm )	Incerteza de medição ( mm )	Indicação ( mm )	Resultado ( mm )	Incerteza de medição ( mm )
0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,002
2,500	2,500		2,500	2,499	
5,100	5,100		5,100	5,100	
7,700	7,700		7,700	7,701	
10,300	10,300		10,300	10,300	
12,900	12,900		12,900	12,900	
15,000	15,000		15,000	15,000	
17,600	17,600		17,600	17,600	
20,200	20,200		20,200	20,200	
22,800	22,800		22,800	22,800	
25,000	25,000		25,000	25,000	
30,000	30,000		30,000	30,000	
35,000	35,001		35,000	35,000	
40,000	40,000		40,000	40,001	
45,000	45,000		45,000	45,001	
50,000	50,001		50,000	50,001	

Fator de abrangência ( k ) = 2,03  
Graus de liberdade ( Veff ) = 99

Fator de abrangência ( k ) = 2,03  
Graus de liberdade ( Veff ) = 99

\*Escritório Central: Av. João Carlos de Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Telefone: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722  
\*Fábrica: Rod. Ind. Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffle - CEP: 09620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br  
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5990 - Fax: (11) 4746-5990 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5990 - E-mail: assisttec@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br

# Anexo XI: Certificado de calibração do projetor de perfil (continuação)



Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 12137/12**  
**REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO**  
 Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob número CAL 0031

**4 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :**

Pág. 4/4

**4.3 - Resultado da indicação do Anteparo Goniométrico**

Indicação	Resultado	Incerteza de Medição ( U )	Fator de abrangência ( k )	Graus de liberdade ( V <sub>ef</sub> )
0	0 ° 00 '	0 ° 01 '	2,29	11
30	29 ° 59 '			
60	60 ° 00 '			
90	90 ° 00 '			
120	119 ° 59 '			
150	149 ° 59 '			
180	180 ° 00 '			
210	210 ° 00 '			
240	240 ° 01 '			
270	270 ° 00 '			
300	300 ° 01 '			
330	330 ° 02 '			
360	360 ° 02 '			

**5 - INCERTEZA DE MEDIÇÃO :**

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com V<sub>ef</sub> graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

6 - Nota: Temperatura ambiente : ( 19,6 ± 0,5 ) °C.

•Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722

•Fábrica: Rod. Indio Tibiriçá, 1655 - Bairro Rafo - CEP: 09620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br

Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: assisttec@mitutoyo.com.br


Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0029 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br



## Anexo XII: Certificado de calibração da máquina de medir por coordenadas

 <i>Mitutoyo Sul Americana Ltda.</i>	<b>LABORATÓRIO DE METROLOGIA</b> <b>REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO</b> <b>CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13</b>	 <b>CAL 0031</b>			
<b>Cliente : FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA</b> <b>Endereço : Avenida Amazonas, 2121 - Campus Umuarama - Uberlândia - MG. - CEP - 38400-902</b> <b>Ordem de Serviço : 035.766/001</b>					
<b>I. Objeto Calibrado :</b> Máquina de Medição por Coordenadas Fabricante : Mitutoyo MMC Modelo : BRM-443 No de Série : 0021902 / Código : 196-667-65 Identif. do Cliente : N.C Futxa Nominal : 400 x 400 x 300 mm Contador Digital / Controlador Modelo : N.C No Série : N.C Resolução : 0,0005 mm Cabeçote Modelo : MH20i No Série : 7F8912 Probe Modelo : TP20 No Série : 6T4567 Rack Modelo : N.C No Série : N.C Programa de Medição Programa : Geopak Win Versão : 3.0R16 Dongle No. : 10-10336238					
					
<b>II. Notas:</b> 1. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k$ , o qual para uma distribuição $t$ com $V_{ef}$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. 2. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02. 3. Erro = Diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência. 4. Os sinais dos resultados tem o mesmo sentido das indicações positivas e negativas do sistema de coordenadas da máquina. 5. A máquina foi calibrada conforme Procedimento PML-0030 revisão 3. 6. Condição ambiental: Temperatura ambiente: $(20,5 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ 7. Endereço e local da calibração são os mesmos.					
<b>III. Padrões utilizados :</b> <table border="0"><tr><td><b>Padrão Escalonado</b> No Série : 500034 Certificado No : 04980/13 Emitido em : 14/05/2013 Validade : 11/2013</td><td><b>Termômetro</b> No Série : T1FA016 Certificado No : LV22179/12 Emitido em : 18/06/2012 Validade : 06/2014</td><td><b>Esfera Padrão</b> No Série : D0106 Certificado No : 00848/12 Emitido em : 09/02/2012 Validade : 02/2014</td></tr></table>			<b>Padrão Escalonado</b> No Série : 500034 Certificado No : 04980/13 Emitido em : 14/05/2013 Validade : 11/2013	<b>Termômetro</b> No Série : T1FA016 Certificado No : LV22179/12 Emitido em : 18/06/2012 Validade : 06/2014	<b>Esfera Padrão</b> No Série : D0106 Certificado No : 00848/12 Emitido em : 09/02/2012 Validade : 02/2014
<b>Padrão Escalonado</b> No Série : 500034 Certificado No : 04980/13 Emitido em : 14/05/2013 Validade : 11/2013	<b>Termômetro</b> No Série : T1FA016 Certificado No : LV22179/12 Emitido em : 18/06/2012 Validade : 06/2014	<b>Esfera Padrão</b> No Série : D0106 Certificado No : 00848/12 Emitido em : 09/02/2012 Validade : 02/2014			
<b>Data da Calibração :</b> 28 de Maio de 2013 <b>Data da Emissão :</b> 08 de Julho de 2013		 Carlos Ruzza Souto Chefe Laboratório de Metrologia			
<b>Pag.: 1 / 4</b>					
<small>Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo COCER que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidade - SI). A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo. Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.</small>					
<small>*Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04725-002 - São Paulo - SP - Telefone: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722 *Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Rufo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5950 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: assistao@mitutoyo.com.br Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0026 - E-mail: ata@mitutoyo.com.br</small>					

## Anexo XII: Certificado de calibração da máquina de medir por coordenadas (continuação)



Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13**

**REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO**

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob Nº. 0031

**IV. Resultado das Medições :**

4.1. Verificações iniciais do equipamento :

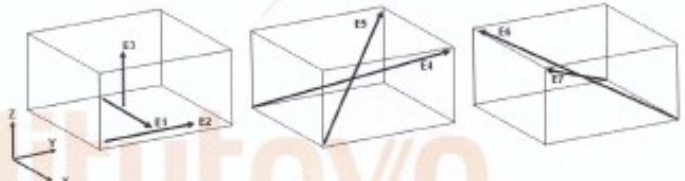
a. Movimento da Máquina : OK

b. Condições da área de Medição : OK

c. Avaliação do Sist. Pneumático : OK

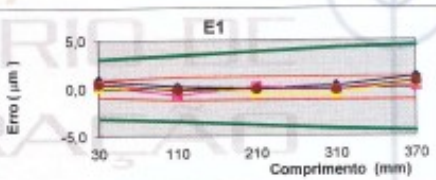
d. Limpeza das superfícies de ref. : OK

4.2. Resultado da Medição:



**4.2.1. Resultado da medição do eixo "X", (E1)**

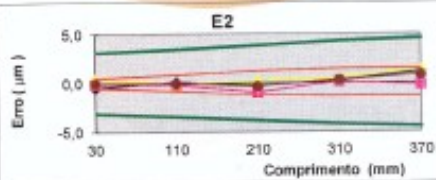
Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,9	0,4	0,2	0,5
110	0,2	-0,7	0,0	-0,2
210	0,0	0,2	-0,4	-0,1
310	0,3	-0,1	-0,6	-0,1
370	1,2	0,3	0,7	0,7



*Incerteza de medição expandida (U) = (0,8 + L/1500) µm, onde: L = comprimento em "mm".*  
 Fator de abrangência (k) = 2,03  
 Graus de liberdade (Veff) = 88

**4.2.2. Resultado da medição do eixo "Y", (E2)**

Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,5	-0,1	0,5	0,0
110	0,1	-0,2	-0,1	-0,1
210	-0,3	-1,0	0,2	-0,4
310	0,2	0,1	0,5	0,3
370	1,1	-0,2	1,4	0,8



*Incerteza de medição expandida (U) = (0,8 + L/3000) µm, onde: L = comprimento em "mm".*  
 Fator de abrangência (k) = 2,08  
 Graus de liberdade (Veff) = 33

Pag.: 2 / 4

\*Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04720-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722


\*Fábrica: Rod. Ind. Tibiriçá, 1555 - Bairro Raio - CEP: 08520-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5850 - Fax: (11) 4746-5836 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br

Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5857 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assisttec@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 0643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ore@mitutoyo.com.br

## Anexo XII: Certificado de calibração da máquina de medir por coordenadas (continuação)



*Mitutoyo Sul Americana Ltda.*

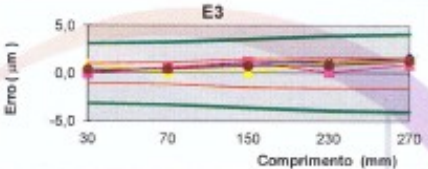
**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13**

**REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO**

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR  
ISO/IEC 17025, sob Nº. 0031

**4.2.3. Resultado da medição do eixo "Z", (E3)**

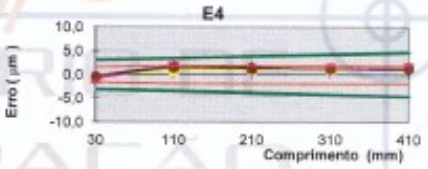
Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,1	0,0	1,0	0,4
70	0,6	0,6	0,1	0,4
150	1,1	1,2	0,1	0,8
230	1,2	0,1	1,2	0,8
270	1,6	0,9	1,3	1,3



*Incerteza de medição expandida (U) = (0,9 + L/3000) µm*, onde: L = comprimento em "mm".  
*Fator de abrangência (k) = 2,11*  
*Graus de liberdade (Veff) = 24*

**4.2.4. Resultado da medição do volume, (E4)**

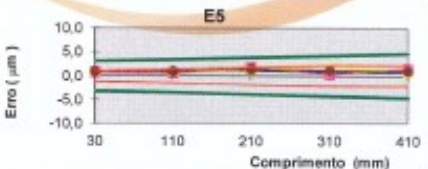
Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,2	-0,8	+0,2	-0,4
110	1,9	1,7	0,9	1,5
210	1,6	1,2	1,1	1,3
310	1,2	1,4	1,1	1,2
410	1,1	1,5	1,4	1,3



*Incerteza expandida de medição (U) = (0,7 + L/2600) µm*, onde: L = comprimento em "mm".  
*Fator de abrangência (k) = 2,02*  
*Graus de liberdade (Veff) = 148*

**4.2.5. Resultado da medição do volume, (E5)**

Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,9	0,8	1,1	0,9
110	1,1	0,7	1,0	0,9
210	1,2	1,8	1,3	1,4
310	0,9	0,4	2,1	1,1
410	0,7	1,5	0,9	1,0



*Incerteza de medição expandida (U) = (0,8 + L/2900) µm*, onde: L = comprimento em "mm".  
*Fator de abrangência (k) = 2,04*  
*Graus de liberdade (Veff) = 59*

Pag.: 3 / 4


\*Estrutura Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Telefone: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722

\*Fábrica: Rod. Ind. Tibiriçá, 1555 - Bairro Italo - CEP: 09620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5558 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br

Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mail: ata@mitutoyo.com.br





## Anexo XII: Certificado de calibração da máquina de medir por coordenadas (continuação)

# Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

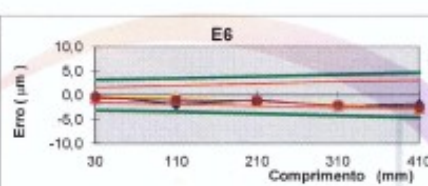
### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13

#### REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob Nº. 0031

#### 4.2.6. Resultado da medição do volume, ( E6 )

Comprimento ( L ) ( mm )	Erro ( $\mu$ m )			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	+0,2	+0,8	+0,2	+0,4
110	-1,9	-0,9	-0,5	-1,1
210	-1,1	-1,3	-1,3	-1,2
310	-2,2	-2,3	-1,9	-2,1
410	-1,9	-2,9	-2,7	-2,5



Incerteza de medição expandida ( U ) =  $( 0,8 + L/2800 ) \mu$ m

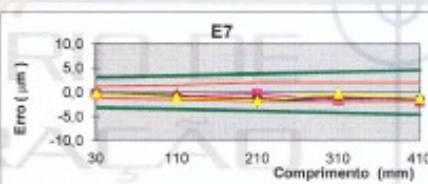
, onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência ( k ) = 2,04

Graus de liberdade ( Veff ) = 65

#### 4.2.7. Resultado da medição do volume, ( E7 )

Comprimento ( L ) ( mm )	Erro ( $\mu$ m )			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,2	-0,3	-0,2	-0,2
110	-0,6	-0,9	-1,1	-0,9
210	+1,9	-0,3	-1,7	+1,3
310	-1,2	-1,6	-0,2	-1,0
410	-1,3	-1,9	-1,2	-1,5



Incerteza de medição expandida ( U ) =  $( 0,8 + L/3000 ) \mu$ m

, onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência ( k ) = 2,07

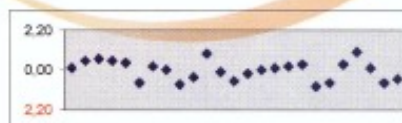
Graus de liberdade ( Veff ) = 38

#### 4.2.8. Erro de Apalpação ( P )

Erro de apalpação =  $( 1,9 \pm 1,2 ) \mu$ m

Fator de abrangência ( k ) = 2,00

Graus de liberdade ( Veff ) = infinito



#### 5. Observações Gerais :

## Anexo XIII: Certificado de calibração da célula de carga de 20 kN

Prüfprotokoll		test certificate / protocole d'essai			
Typ: type / type	U2B	Auftrag: order no / commission	802122388		
Nennmessbereich: range / portée	20 kN	Prüfer: examiner / contrôleur	Ahl		
IdentNr: serial no / N°-ident	N84616	Datum: test date / date d'essai	2015-02-12		
<b>Prüfergebnisse:</b> test results / résultats d'essai					
Eingangsgröße des Messbereichs [%] input quantity / échelle d'essai		Ausgangsgröße [mV/V] output quantity / résultats			
		Zug tension / traction		Druck compression / compression	
0		0.0000		0.0000	
50		-1.0007		1.0024	
100		-2.0003		2.0068	
50		-1.0011		1.0026	
0		-0.0003		0.0000	
<b>Aus den Prüfergebnissen berechnete messtechnische Kenngrößen:</b> Metrological characteristic quantities computed from the test results: Grandeurs caractéristiques de mesure calculées à partir des résultats d'essai :					
Kennwert C [mV/V] sensitivity / sensibilité		-2.0003		2.0068	
Linearitätsabweichung [%vC] linearity deviation / linéarité (Abweichung von der bestpassenden Geraden durch das Nullsignal) (deviation from best fit through zero / écart par rapport à la meilleure droite passant par le zéro)		-0.020		0.033	
Relative Umkehrspanne 0,5 F <sub>nom</sub> [%vI] relative hysteresis / hystérésis relatif		0.039		0.022	
Alle aus den Messergebnissen ermittelten Kenngrößen entsprechen den Spezifikationen gemäß Datenblatt. All characteristic quantities determined from the measurement results correspond to the specifications per datasheet. Toutes les grandeurs caractéristiques déterminées à partir des résultats de mesure correspondent aux spécifications selon les caractéristiques techniques.					
<b>Allgemeine Zusatzinformationen:</b> general information / informations complémentaires					
Alle weiteren messtechnischen Eigenschaften des Aufnehmers sind durch Typprüfungen und laufende Produktaudits des Qualitätswesens abgesichert. All other metrological characteristics of the transducer are verified by type testing and regular product audits of the quality department. Toutes les autres caractéristiques techniques du capteur sont garanties par le Service Qualité, au moyen d'essais et d'audits suivis sur le produit.					
Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Im Tiefen See 45, 64293 Darmstadt, Germany   www.hbm.com Registered as GmbH (German limited liability corporation) in the commercial register at the local court of Darmstadt, HRB 1147 Company domiciled in Darmstadt   CEO: Andreas Hüllhorst   Chairman of the board: James Charles Webster					
Zertifiziert nach ISO 9001 und ISO 14001 / ISO 9001 and ISO 14001 certified / Certification selon ISO 9001 et ISO 14001 Akkreditierungen gemäß ISO 17025 / Accreditations per ISO 17025 / Accréditations selon ISO 17025					
Nr. 232		V4.0/SC-T/0.12		Seite / Page 1 (1)	

### Anexo XIII: Características técnicas das células de carga de 20 kN e 1 kN

#### Technical Data in accordance with VDI/VDE 2638

Force transducer type	U2B										
Rated force	F <sub>nom</sub>	kN	0.5	1	2	5	10	20	50	100	200
	F <sub>nom</sub>	ft-lb × 1000	0.375	0.75	1.5	3.75	7.5	15	37.5	75	150
Accuracy class			0.2		0.1						
Rated sensitivity	C <sub>nom</sub>	mV/V	2								
Rel. sensitivity variance Tension/compression	d <sub>c</sub>	%	<0.2/1.5		<0.2/0.5						
Rel. zero signal variance	d <sub>s,0</sub>	%	<1								
Hysteresis error (0.5 F <sub>nom</sub> )	u	%	<0.2		<0.15						
Linearity variation	d <sub>lin</sub>	%	<0.2		<0.1						
Influence of temperature on sensitivity/10 K relative to sensitivity	TK <sub>c</sub>	%	0.1								
Influence of temperature on the zero signal/10 K relative to sensitivity	TK <sub>0</sub>	%	0.05								
Influence of eccentricity (1 mm)	d <sub>E</sub>	%	0.05								
Influence of lateral force (Lateral force 10 % F <sub>nom</sub> ) <sup>1)</sup>	d <sub>Q</sub>	%	0.1								
Rel. leakage over 30 min	d <sub>GF+E</sub>	%	<± 0.06								
Input resistance	R <sub>i</sub>	Ω	>345								
Output resistance	R <sub>O</sub>	Ω	300...400								
Insulation resistance	R <sub>is</sub>	Ω	>2·10 <sup>9</sup>								
Reference excitation voltage	U <sub>ref</sub>	V	5								
Service range of excitation voltage	B <sub>U,G,T</sub>	V	0.5...12								
Rated temperature range	B <sub>t, nom</sub>	°C[°F]	-10 ... +70 [+14 ... +158]								
Service temperature range	B <sub>t,G</sub>	°C[°F]	-30 ... +85 (120) <sup>2)</sup> [-22 ... +185 (248) <sup>2)</sup> ]								
Storage temperature range	B <sub>t,S</sub>	°C[°F]	-50 ... +85 [-58 ... +185]								
Reference temperature	t <sub>ref</sub>	°C[°F]	+23 [+73.4]								
Max. operating force	(F <sub>G</sub> )	%	130	150							
Breaking force	(F <sub>B</sub> )	%	>300								
Static lateral force limit <sup>1)</sup>	(F <sub>Q</sub> )	%	25								
Nominal displacement	S <sub>nom</sub>	mm	<0.1					<0.07		<0.09	
Fundamental resonance frequency	f <sub>G</sub>	kHz	4	6	8.7	14	17.5	8	8.5	6	5.6
Weight		kg	0.8					2.9	4.3	10.7	15.9
Rel. permissible vibration loading	F <sub>rb</sub>	%	100	160							
Protection system acc. to DIN EN 60529			IP67								
Length of cable, 6-wire connection			3 m					6 m		12 m	

<sup>1)</sup> relative to a force triggering point 20 mm over the membrane

<sup>2)</sup> Class 120 version optional. The technical data in the extended service temperature range may differ from the data mentioned above. The 120 °C (248 °F) version cannot be used for zero-related long-term measurements.

## Anexo XIV: Certificado de calibração da célula de carga de 1 kN



### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Nº 0218-031

**Cliente** FAU - FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITÁRIO  
**Endereço:** Rua Francisco Vicente Ferreira, 126 Sl 06 - Santa Mônica - Uberlândia / MG  
**CEP:** 38408-102

#### DESCRIÇÃO DO ITEM

<b>Nome:</b>	Célula de carga	<b>Fabricante:</b>	HBM
<b>Modelo:</b>	U2B	<b>Nº de série:</b>	O11161
<b>Faixa:</b>	1 kN		

#### PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

Baseado na Norma NBR 8197.

#### PADRÃO(ÕES) UTILIZADO(S)

Descrição	Modelo	Identificação	Origem	Validade
Transdutor de força	HBM/S9M - 2 kN	31198550	IPT/RBC - 159 274-101	08/08/2019
Sistema de aquisição	HBM/PMX - PX455	823871607	HBM - 0517-083	25/06/2018

#### DADOS ADICIONAIS

**Temperatura:** 23 ± 3 °C  
**Umidade:** 60 ± 20 %

**Data da calibração:** 21/02/2018  
**Data da emissão:** 21/02/2018

  
**Hebert Fischer**  
Responsável da Calibração

Os resultados apresentados refere-se ao item especificado neste certificado, não sendo extensivo a quaisquer lotes.



# Anexo XIV: Certificado de calibração da célula de carga de 1 kN (continuação)



Continuação do Certificado de Calibração N° 0218-031

V.R. - Valor de Referência (indicação obtida no padrão)

V.I. - Valor Indicado, média de 3 séries de medições (indicação obtida no item sob calibração)

Erro (%) :  $(V.I. - V.R.) / V.R. \cdot (F.E.) \times 100$  (erro de indicação do item sob calibração)

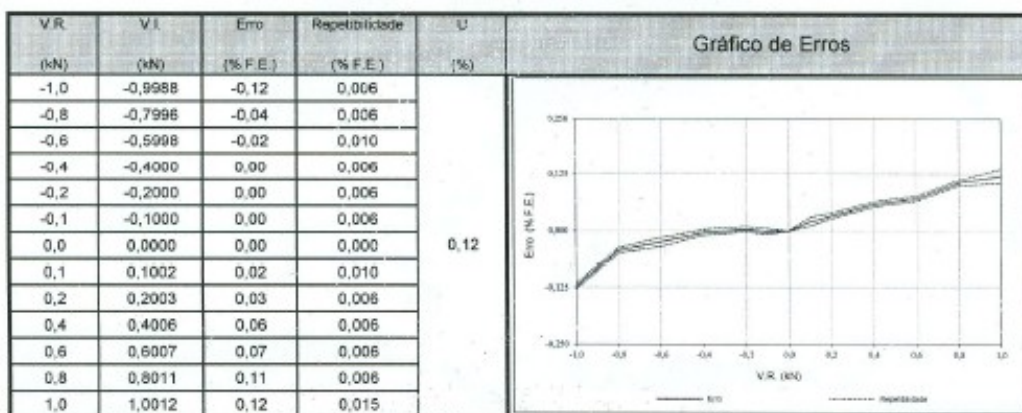
F.E. - Fundo de escala

U - Incerteza Expandida da Medição

## Força

Off set: 0,049 mV/V

Sensibilidade adotada: 2,0160 mV/V -> 1 kN



A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência  $k=2$ , que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95 %. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Os resultados apresentados refere-se ao item especificado neste certificado, não sendo extensivo a quaisquer lotes.



**Anexo XV: Declaração de conformidade do *encoder* incremental rotativo**

**EG-Konformitätserklärung**

**Declaration of Conformity**

**Hersteller/Manufacturer**  
**DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH**  
Dr.-Johannes-Heidenhain-Straße 5  
83301 Traunreut, Germany

erklärt, dass die Kupplungen der Baureihe  
K17  
mit der Kennzeichnung

*declares that the couplings of the series*  
*K17*  
*bearing the marking*

II 2 GD c X

die Vorgaben folgender EG Richtlinien erfüllen:

*comply with the requirements of the following EC directives:*

**94/9/EG Explosionsschutzrichtlinie / *Explosion protection directive***

Die Übereinstimmung mit den Vorgaben der oben genannten  
Richtlinien wird durch die Einhaltung folgender Normen  
nachgewiesen:

*These products comply with these directives by meeting the*  
*following standards:*

**EN 13463-1 : 2009**

**EN 13463-5 : 2011**

**EN 1127 : 2011**

HEIDENHAIN hinterlegt die technische Dokumentation  
zur Einsicht bei benannter Stelle :  
PTB, EU-Kennnummer 0102

*HEIDENHAIN will file the technical documentation*  
*for review at the following location:*  
*FTB, EU code 0102*

Traunreut, 09.10.2014

DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH




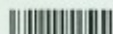

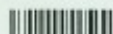



*T. Tondorf*  
Dr. Tondorf  
Geschäftsführer  
Managing Director


*i. A. Heigermoser*  
Heigermoser  
Qualitätsbeauftragter  
Quality Officer


Diese Erklärung bescheinigt die Übereinstimmung mit den  
genannten Richtlinien, beinhaltet jedoch keine Beschaffenheits-  
garantie.  
Die Sicherheitshinweise der mitgelieferten Produktdokumenta-  
tionen sind zu beachten.

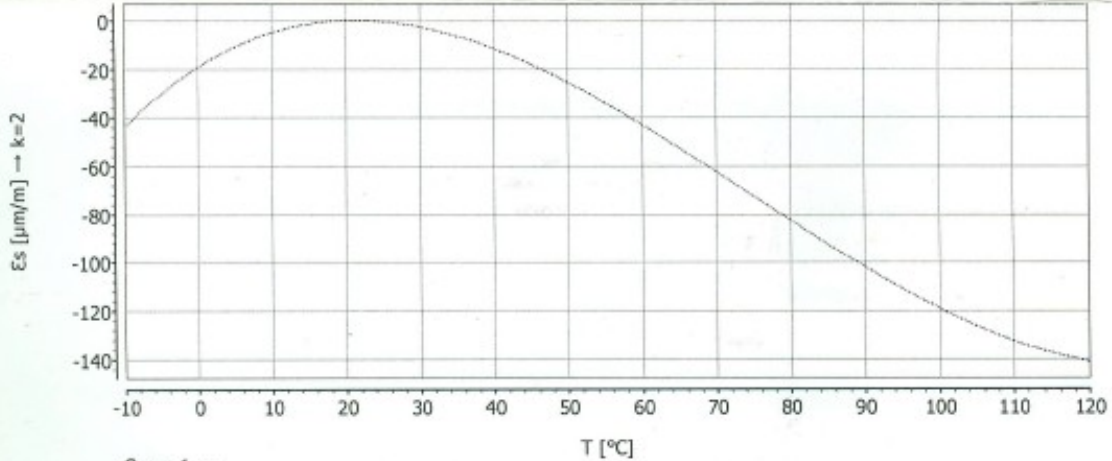
*This declaration certifies that these products comply with the above*  
*directives. It is not, however, a guarantee of quality.*  
*Please comply with the safety instructions in the accompanying*  
*product documentation.*

## Anexo XVI: Certificado de calibração dos extensômetros

 <b>Dehnmessstreifen</b> <b>Strain gages</b> <b>Jauges d'extensométrie</b>		Bestellnummer Order No. No. de référence	<b>1-LY41-1.5/120</b> 
		Typ Type Type	<b>1.5/120 LY41</b> 
Widerstand Resistance Résistance	<b>120 <math>\Omega</math> <math>\pm</math>0.30 %</b> 	Stückzahl Contents Quantité	<b>10</b> 
k-Faktor Gage factor Facteur k	<b>1.91 <math>\pm</math>1.5 %</b> 	Temperaturkoeffizient des k-Faktors Temperature coefficient of gage factor Coefficient de température du facteur k	<b>134 <math>\pm</math>10 [<math>10^{-6}</math> / K]</b> <b>(-10°C ... +45°C)</b>
Querempfindlichkeit Transverse sensitivity Sensibilité transverse	<b>0.3 %</b> 	Folienlos Foil lot Lot de la feuille	<b>A413/05</b> 
		Herstellungslos Production batch Lot de fabrication	<b>812080110</b> 
Temperaturkompensation: Ferritischer Stahl mit Temperature compensation: steel with Compensation de température: acier avec		$\alpha = 10.8 [10^{-6} / K]$	Max. effekt. Brückenspeisung max. rms bridge excitation voltage tension d'alim. de pont max. eff.
			<b>2.5 V</b>



Daten / Data / Données  




Curve 1 ----

$$\epsilon_s(T) = -19.01 + 1.93 \cdot T - 5.30E-02 \cdot T^2 + 2.37E-04 \cdot T^3 \pm (T-20) \cdot 0.30 [\mu m/m]$$

Alle technischen Daten nach VDI/VDE 2635. Geben Sie bei Rückfragen bitte Bestellnummer und Herstellungslos an.

All specifications in accordance with VDI/VDE 2635. In case of further inquiries please indicate order no. and production batch number.

Toutes les caractéristiques techniques selon la norme VDI/VDE 2635. Dans toutes communications, prière d'indiquer le numéro de commande et le numéro du lot de production.

**Temperaturgang** der Dehnmessstreifen bei Applikationen mit oben angegebenen Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\alpha$ . Gemessen bei kontinuierlicher Temperaturänderung.

**Kennlinie 1:** DMS ohne Anschlussbändchen.  
 $T$  = Temperatur in °C  
 (dimensionslos)


**Réponse en température** des jauges d'extensométrie appliquées sur des matériaux dont des coefficients de dilatation thermique  $\alpha$  sont indiqués. Mesurée à variation continue de la température.

**Courbe 1:** Jauges sans pattes de raccordement.  
 $T$  = température en °C  
 (sans dimension)

The **temperature response** refers to strain gages bonded to materials with specified coefficients of thermal expansion  $\alpha$ . Values are measured with continuous temperature variation.

**Curve 1:** Strain gages without leads.  
 $T$  = temperature in °C  
 (dimensionless)

Kopfdaten / Header / Titre



A point (".") is used as decimal separator in data; the separator needs to be configured accordingly for import into Excel.

**Anexo XVII: Características do potenciostato modelo PGSTAT204 da Metrohm**

Complância de potencial	$\pm 20 \text{ V}$
Faixa de potencial aplicado	$\pm 10 \text{ V}$
Resolução do potencial aplicado	$150 \mu\text{V}$
Resolução de potencial medido	$3 \mu\text{V}$
Velocidade de varredura	$1 \mu\text{V/s}$ a $200 \text{ V/s}$
Corrente máxima	$400 \text{ mA}$
Resolução de corrente	$0,0003 \%$ da escala de corrente
8 faixas de corrente	$10 \text{ nA}$ a $100 \text{ mA}$
Compensação de queda ôhmica	Sim
Impedância de entrada	$> 100 \text{ G}\Omega$
Técnicas eletroquímicas	Voltametria cíclica, Voltametria cíclica de corrente estacionária, Voltametria cíclica galvanostática, Voltametria linear, Voltametria de onda quadrada, Voltametria de pulso normal, Voltametria de pulso, diferencial, Voltametria de pulso normal diferencial, Voltametria DC ( <i>Tast</i> ), Amperometria DC, Amperometria de múltiplos pulsos, Amperometria de pulso diferencial, Cronoamperometria, Cronopotenciometria galvanostática e circuito aberto, Cronocoulometria, Polarização linear, Crono carga e descarga, <i>Stripping</i> potenciométrico, <i>Stripping</i> voltamétrico (anódico e catódico)
<i>Software</i>	NOVA e bibliotecas para Labview
Interface com o computador	USB
Saída analógica	1 canal de saída para controle de instrumentos
Conversores DA	$200 \text{ ks/s}$

## Anexo XVIII: Certificado de verificação do MEV

<b>CARL ZEISS DO BRASIL LTDA</b> Av. das Nações Unidas, 21711 - Santo Amaro - São Paulo - SP - CEP 04795-100 Tel: 0800 770 5556 - Email: relacionamento@zeiss.com						<b>RELATÓRIO DE SERVIÇO</b> <b>MIC                      N°    RT458</b>																																																	
<b>INFORMAÇÕES CARL ZEISS</b> TEC: Ricardo Tchobnian CDD. TÉCNICO: 4981202    DEPTO. MIC TPO SERV. Manutenção Preventiva Avulsa    SEÇÃO II <input checked="" type="checkbox"/> execução externa <input type="checkbox"/> execução interna DT. SOLIC:    PROPOSTA PERÍODO: 718320180129			<b>INFORMAÇÕES DO CLIENTE</b> CLIENTE: Universidade Federal de Uberlândia END. Av. João Naves de Ávila    N° 2121 CIDADE: Uberlândia    UF MG    CONTATO Flávio Alves DEPTO. LTAD    TEL. 34 3239 4555    TEL. 34 8856 4311 E-MAIL: flavio.lad@ufu.br			<b>INFORMAÇÕES DO EQUIPAMENTO</b> EQUIP. SUPRA 40    NIS 3185 ACESS. EDX IXRF    NIS ACESS.    NIS ACESS.    NIS SOFT 5.03.06    NIS    DT INST.																																																	
<b>CONTROLE DE HORÁRIO</b>						 <b>MIC - ATENDIMENTO</b> E-mail: relacionamento@zeiss.com SAC: 0800-770-5556																																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>DIAMÊS/ANO</th> <th>VIAJEM INÍCIO</th> <th>CHEGADA CLIENTE</th> <th>PARTIDA CLIENTE</th> <th>VIAJEM TÉRMINO</th> <th>HORAS TRABALHADAS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>19/02/2018</td> <td>06:00</td> <td>10:30</td> <td>17:30</td> <td>18:00</td> <td></td> </tr> <tr> <td>20/02/2018</td> <td>08:30</td> <td>09:00</td> <td>17:30</td> <td>18:00</td> <td></td> </tr> <tr> <td>21/02/2018</td> <td>08:30</td> <td>09:00</td> <td>17:30</td> <td>18:00</td> <td></td> </tr> <tr> <td>22/02/2018</td> <td>08:30</td> <td>09:00</td> <td>17:30</td> <td>18:00</td> <td></td> </tr> <tr> <td>23/02/2018</td> <td>08:30</td> <td></td> <td></td> <td>18:00</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>								DIAMÊS/ANO	VIAJEM INÍCIO	CHEGADA CLIENTE	PARTIDA CLIENTE	VIAJEM TÉRMINO	HORAS TRABALHADAS	19/02/2018	06:00	10:30	17:30	18:00		20/02/2018	08:30	09:00	17:30	18:00		21/02/2018	08:30	09:00	17:30	18:00		22/02/2018	08:30	09:00	17:30	18:00		23/02/2018	08:30			18:00													
DIAMÊS/ANO	VIAJEM INÍCIO	CHEGADA CLIENTE	PARTIDA CLIENTE	VIAJEM TÉRMINO	HORAS TRABALHADAS																																																		
19/02/2018	06:00	10:30	17:30	18:00																																																			
20/02/2018	08:30	09:00	17:30	18:00																																																			
21/02/2018	08:30	09:00	17:30	18:00																																																			
22/02/2018	08:30	09:00	17:30	18:00																																																			
23/02/2018	08:30			18:00																																																			
MOTIVO DO ATENDIMENTO: Manutenção Preventiva DESCRIÇÃO DOS SERVIÇOS EXECUTADOS: 1) Substituição do Filamento; 2) Substituição das aberturas e vedações do câmbio e coluna; 3) Troca do óleo da bomba de pré-vácuo; 4) Troca do filtro de vapor de óleo da entrada do sistema de vácuo; 5) Descontaminação do medidor de alto vácuo; 6) Inicialização do filamento e calibração das aberturas; 7) Troca da vedação da porta da câmara; Testes - OK. STATUS DO EQUIPAMENTO:																																																							
<b>PEÇAS TROCADAS</b>																																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>QTD</th> <th>NF</th> <th>PIN</th> <th>DESCRIÇÃO</th> <th>QTD</th> <th>NF</th> <th>PIN</th> <th>DESCRIÇÃO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td>Filamento DENKA</td> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td>Abertura do Anodo</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td>Vedação do Câmbio</td> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td>Abertura Multi-Furos</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td>Vedação do Tubo Linear</td> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td>Óleo Adixon</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td>Conjunto de Parafusos do Anodo</td> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td>Filtro de Vapor de Óleo</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td>Abertura de Extração</td> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td>Vedação da Porta da Câmara</td> </tr> </tbody> </table>						QTD	NF	PIN	DESCRIÇÃO	QTD	NF	PIN	DESCRIÇÃO	1			Filamento DENKA	1			Abertura do Anodo	1			Vedação do Câmbio	1			Abertura Multi-Furos	1			Vedação do Tubo Linear	1			Óleo Adixon	1			Conjunto de Parafusos do Anodo	1			Filtro de Vapor de Óleo	1			Abertura de Extração	1			Vedação da Porta da Câmara	<b>OBSERVAÇÕES CARL ZEISS E CLIENTE</b> Recomenda-se substituição do refrigerador de água, no qual foi identificado vazamento em uma das bombas de circulação.	
QTD	NF	PIN	DESCRIÇÃO	QTD	NF	PIN	DESCRIÇÃO																																																
1			Filamento DENKA	1			Abertura do Anodo																																																
1			Vedação do Câmbio	1			Abertura Multi-Furos																																																
1			Vedação do Tubo Linear	1			Óleo Adixon																																																
1			Conjunto de Parafusos do Anodo	1			Filtro de Vapor de Óleo																																																
1			Abertura de Extração	1			Vedação da Porta da Câmara																																																
<b>CONTROLE E ASSINATURAS CARL ZEISS</b>						<b>DADOS PARA PESQUISA DE SATISFAÇÃO</b>																																																	
EMITENTE 		GERENTE/SUPERVISOR		COMERCIAL		TÍTULO Sr. NOME Flávio SOBRENOME Alves E-MAIL flavio.lad@ufu.br    TEL. 34 3239 4555																																																	
ASSINATURA DO CLIENTE  Assinatura Nome por extenso Flávio Alves Data de finalização 22/02/2018																																																							