

GUILHERME ANTONELLI MARTINIANO

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA
AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À
FRAGILIZAÇÃO POR HIDROGÊNIO**



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

2016

GUILHERME ANTONELLI MARTINIANO

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA AVALIAÇÃO DA
SUSCEPTIBILIDADE À FRAGILIZAÇÃO POR HIDROGÊNIO**

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.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Sinésio D. Franco

UBERLÂNDIA – MG

2016

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

- M386d
2016 Martiniano, Guilherme Antonelli, 1992-
 Desenvolvimento de um equipamento para avaliação da
 susceptibilidade à fragilização por hidrogênio / Guilherme Antonelli
 Martiniano. - 2016.
 159 f. : il.
- Orientador: Sinésio Domingues Franco.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.
1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Mecânica da fratura - Teses. 3.
Metais - Teor de hidrogênio - Teses. 4. Tensões residuais - Teses. I.
Franco, Sinésio Domingues, 1962- II. Universidade Federal de
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III.
Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao Senhor, pela força e amparo nos momentos mais difíceis.

À minha mãe Lucelena Antonelli Pereira e ao meu pai Carlos Roberto Martiniano, pelo apoio emocional e constante torcida, força e conselhos dados durante esta maravilhosa jornada.

Ao meu padrasto Alvim José Pereira e madrasta Erliane Miguel Martiniano, pelos conselhos, apoio e incentivo dados durante o mestrado.

À minha família, pela confiança e apoio incondicional.

Ao Professor Dr.-Ing. Sinésio Domingues Franco, pela orientação e acompanhamento no decorrer do projeto e pelos ótimos avisos e conselhos dados durante o curso, os quais serviram para meu crescimento profissional e pessoal.

Ao engenheiro mecânico Raphael Rezende Pires, pelo apoio, parceria, acompanhamento e sugestões dadas ao longo da execução deste projeto.

Ao engenheiro mecatrônico Dênis S. de Freitas, pelo excelente trabalho de planejar e construir toda a parte eletrônica do RSL e pela orientação dada em como usar o equipamento.

Ao engenheiro mecânico Henry Fong Hwang, pelos conselhos e apoio dados antes e durante a execução deste mestrado.

Ao professor Rafael Ariza Gonçalves, pela ajuda e acompanhamento no decorrer do mestrado.

À professora Dra. Rosenda Valdés Arencibia, pela ajuda nas medições realizadas, elaboração do modelo de incerteza e na correção desta dissertação.

À técnica administrativa Sandra Rocha, pela agilidade e eficiência em resolver os processos burocráticos envolvidos neste projeto.

Aos alunos de pós-graduação Danilo Eduardo Souza e José Eduardo Silveira Leal, pela ajuda dada ao longo do projeto.

Aos estagiários Caíque de Lima Vecchini e Guilherme Freitas Melo, pelo ótimo trabalho realizado durante o tempo vigente deste projeto.

A toda equipe de alunos e profissionais do LTAD que direta ou indiretamente me ajudaram e sem os quais a realização deste trabalho não seria possível.

À técnica administrativa Ângela Maria da Silva Andrade, do Laboratório de Ensino de Materiais, que permitiu o uso da máquina de dureza e me ajudou a medir as durezas das amostras do RSL.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar o Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica.

À FAPEMIG pela bolsa concedida.

À PETROBRAS, pela oportunidade oferecida de desenvolver o equipamento objeto deste trabalho.

MARTINIANO, G. A. **Desenvolvimento de um Equipamento para Avaliação da Susceptibilidade à Fragilização por Hidrogênio.** 2016. 126 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

A fragilização por hidrogênio tem sido um problema constante em diferentes setores da indústria. Por ser o menor átomo existente, o hidrogênio difunde-se na microestrutura dos materiais metálicos, inserindo tensões mecânicas internas que podem, eventualmente, levar a uma falha catastrófica. Atualmente, os métodos mais comuns existentes para analisar este fenômeno são lentos e caros, configurando-se assim a necessidade de desenvolver um método de ensaio que não possua tais desvantagens. No presente trabalho, apresenta-se o desenvolvimento de um equipamento cuja função é avaliar de forma rápida a susceptibilidade à fragilização por hidrogênio (SFH) dos materiais metálicos através de ensaios de carregamento progressivo em meio assistido (RSL). Este equipamento apresenta uma grande vantagem em relação aos outros métodos avaliação da SFH, que é o menor tempo de ensaio para se ter resultados representativos. Na presente dissertação foram realizadas a concepção, projeto, simulação em elementos finitos, construção e validação do equipamento. Sua validação foi realizada ensaiando-se uma amostra sem entalhe, cuja tensão mecânica medida foi comparada com aquela retornada pelo software do RSL. Além disso, foi calculada a incerteza de medição relacionada ao cálculo da tensão mecânica na amostra. Os ensaios de verificação do desempenho do RSL foram realizados em amostras de aço AISI 4140 beneficiado com dureza de 40HRC, onde foi avaliada a relação entre o nível de potencial catódico aplicado e a SFH do material das amostras. Os resultados obtidos na validação do equipamento mostraram erros inferiores a 1%. Os resultados mostraram um aumento da SFH com o aumento da dureza indicando que há uma elevada sensibilidade da SFH em relação à dureza da amostra. Os ensaios com variação do potencial catódico mostraram uma relação direta entre esse parâmetro e a SFH da amostra, havendo uma saturação na SFH a partir de $-1,1 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$.

Palavras Chave: fragilização por hidrogênio, rising step load, proteção catódica, tensão mecânica, resistência à fratura.

MARTINIANO, G. A. **Development of an Equipment to Evaluate the Susceptibility to Hydrogen Assisted Cracking.** 2016. 126 p. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Hydrogen embrittlement of metallic materials has been a frequent problem in different industry sectors. Because it is the smallest existing atom, hydrogen diffuses into the microstructure of metallic materials, resulting in internal mechanical stresses that may eventually lead to a catastrophic failure. The most common methods available to analyze this phenomenon are time consuming and expensive. For this reason, it is desired to develop a test method that does not have such disadvantages. In this work it is presented the development of an equipment to rapidly evaluate the susceptibility to hydrogen embrittlement (SHE) of the metallic materials using the rising step load (RSL) bend testing in assisted environment. This equipment has a great advantage over the other evaluation methods of SHE, which is the shortest test time to have representative results. The validation of the infrastructure was performed by testing bars without notches to, whose measured mechanical stress was compared with that returned by the RSL software. In addition, the measurement uncertainty related to the calculation of the mechanical stress in the sample was calculated. The tests to verify the performance of the RSL equipment were carried out on samples of steel AISI 4140 heat treated to a hardness of 40HRC. The effect of the cathodic potential applied to notched bars of AISI 4140 on the SHE was evaluated. The results obtained in the validation phase of the equipment showed errors lower than 1%. The results showed also an increase in SHE with increasing material hardness indicating that there is a high sensitivity to the SHE with respect to the hardness of the sample. The tests carried out using cathodic potential variation showed a direct relationship between this parameter and the SHE of the sample, with saturation of the SHE at $-1.1 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$.

Keywords: *hydrogen embrittlement, rising step load, cathodic protection, fracture strength*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Croqui do equipamento que realiza ensaios do tipo RSL	2
Figura 2.1 - Interstícios octaédricos dos sistemas cúbicos de face centrada (a) e cúbico de corpo centrado (b) (LANDOLT, 1993, <i>apud</i> ROSADO, 2011)	5
Figura 2.2 - Formas de interação entre hidrogênio e estrutura metálica: A) Solução Sólida, B) Par hidrogênio – soluto, C) Em torno de uma discordância, D) Acúmulo no contorno de grão, E) Acúmulo na interface matriz – partícula, F) Hidrogênio recombinado em vazios. (THOMPSON, 1980, <i>apud</i> ROSADO, 2011)	6
Figura 2.3 – Mecanismo de difusão de hidrogênio no material (HERRING, 2010), modificado	6
Figura 2.4 - Formação de bolhas e fratura induzida por hidrogênio. (a) Esquema de formação de bolhas e (b) Esquema de formação de trinca induzida por hidrogênio (METALS HANDBOOK, <i>apud</i> OKAMOTO, 2010), modificado	7
Figura 2.5 - Trinca induzida por hidrogênio e orientada por tensão (Adaptado de METALS HANDBOOK, 1987, <i>apud</i> ROSADO, 2011)	8
Figura 2.6 – Efeito do hidrogênio sobre a energia coesiva (U) e sobre a tensão coesiva (σ) do material. (STROE, 2006), modificado	9
Figura 2.7 - Estágios da propagação da trinca na teoria da decoesão: a) hidrogênio difundindo-se para a zona de alta concentração de tensão; b) ponta da trinca saturada de hidrogênio; c) propagação da trinca (OLIVEIRA, 2008)	9
Figura 2.8 - Avanço da ponta da trinca de acordo com a teoria da plasticidade localizada (STROE, 2006), modificado	10
Figura 2.9 - Nucleação e crescimento de hidretos (a e b) em α -Ti. Empilhamento de discordâncias a partir do crescimento do hidreto (c). Campo de hidretos à frente da trinca (d). (SHIH, <i>et al.</i> , <i>apud</i> SOFRONIS <i>et al.</i> , 2001)	11
Figura 2.10 - Exemplo de uma máquina de ensaio BTD (ASTM G129-00, 2013), modificado	13

Figura 2.11 - Curva tensão <i>versus</i> deformação típica (STROE, 2006), modificado.....	13
Figura 2.12 - Equipamento de nanoindentação instrumentada. (BARNOUSH <i>et al.</i> , 2010) , modificado	15
Figura 2.13 - Curva carga <i>versus</i> profundidade de indentação de uma amostra de Ni submetida a potencial catódico de -1000 mV (a) e potencial anódico de 500 mV (b) (BARNOUSH <i>et al.</i> , 2006), modificado	15
Figura 2.14 - Máquina RSL onde apresentam-se seus principais componentes que são: atuador eletromecânico (17); braço de carregamento (23); roletes (32, 81, 54, 58, 56 e 39); cuba eletrolítica (91) e amostra (35), (RAYMOND, 1996)	16
Figura 2.15 - Geometria da amostra utilizada no ensaio RSL (RAYMOND, 1996)	17
Figura 2.16 – Esquema da flexão sofrida pela amostra durante o ensaio RSL (RAYMOND, 1996)	18
Figura 2.17. Adaptadores para ensaio em parafuso no RSL. Nesta figura destacam-se os adaptadores para o parafuso (158, 156), dispositivos de conexão da amostra (143, 133) e parafuso (161), (RAYMOND, 1996)	18
Figura 2.18 - Amostra roscada com adaptador, onde destacam-se a distância entre os roletes (λ), momento aplicado (M), carga de ruptura (P_c), reações de apoio (P_b) e diâmetro do parafuso (d) (ASTM F1624, 2013)	19
Figura 2.19 - Perfil da carregamento (10/5/2,4) (Norma ASTM F1624, 2009), modificado ...	20
Figura 2.20 - Queda da tensão causada pela abertura de uma trinca (Adaptado da Norma ASTM F1624, 2009).....	21
Figura 2.21 - RSL <i>versus</i> Ensaio de Tração BTD (BABOIAN, 2005), modificado.....	22
Figura 2.22 – Configuração típica de um equipamento para ensaios com carga constante (ASM HANDBOOK, 2003)	23
Figura 2.23 – Exemplo de uma curva de força <i>versus</i> deslocamento do clip gage (ASTM E1820, 2015), modificado	24
Figura 2.24 – Montagem do equipamento de teste CTOD (ASTM E1820, 2015), modificado	24

Figura 2.25 - Curva típica de um SPT para um aço estrutural (GARCÍA <i>et al</i> , 2015), modificado	25
Figura 2.26 – Curvas SPT de amostras de CrMoV-2 em diferentes condições de carregamento com hidrogênio (GARCÍA <i>et al</i> , 2015), modificado	26
Figura 2.27 - Vista lateral da amostra utilizada no ensaio DCB (NACE Standard TM0177, 2005), modificado	27
Figura 2.28 - Variação da carga de ruptura em meio agressivo em relação a carga de ruptura ao ar com o potencial catódico aplicando em dois diferentes aços de alto teor de carbono (Aço A: 0,85% de C e Aço B: 0,71% de C) (PARKINS, 1982), modificado	28
Figura 2.29 – Dependência da susceptibilidade à trinca de corrosão sob tensão do aço E690 em função do potencial elétrico aplicado, onde a susceptibilidade à SCC corresponde à perda na redução de área da amostra no ensaio de tração BTD. (HONGCHI <i>et al.</i> , 2015), modificado	28
Figura 2.30 - Tensão no entalhe de amostras ao ar e carregada com hidrogênio mostrando o efeito da dureza na fragilização por hidrogênio de amostras temperadas e revenidas (NANNINGA <i>et al.</i> , 2010), modificado	30
Figura 2.31 – Variação na tensão de ruptura dos aços 10B21, 1038, 1065, 1095, 1541, 4037 e 4140 em diferentes condições de tratamento térmico, testados ao ar e com hidrogênio (NANNINGA, 2005), modificado	30
Figura 3.1 - Croqui do equipamento RSL com ilustração das forças atuantes no corpo de prova devido à aplicação da força F_a	32
Figura 3.2 - Atuador eletromecânico, curso de 200 mm e carga máxima de 20 kN.....	34
Figura 3.3 - Variação da tensão no corpo de prova em função do ângulo θ para a força de 20 kN	35
Figura 3.4 - Condições de contorno adotadas na simulação em elementos finitos do braço de carregamento: (a) avaliação das tensões nos apoios da amostra e (b) avaliação da rigidez do braço	37
Figura 3.5 – Resultados da simulação do braço de carregamento com aço inoxidável 420. 38	

Figura 3.6 – Resultado da simulação do braço de carregamento com alumínio 7075-T6	38
Figura 3.7 – Ilustração do braço de carregamento.....	39
Figura 3.8 - Representação esquemática do sistema de fixação da amostra.....	40
Figura 3.9 - Representação simplificada das condições de contorno entre a amostra e o rolete de fixação para a simulação em elementos finitos.	40
Figura 3.10 – Resultado da simulação de tensão mecânica no rolete.....	41
Figura 3.11 - Bancada estrutural ilustrando a região de aplicação das forças.....	42
Figura 3.12 - Estrutura metálica da bancada do RSL.....	43
Figura 3.13 - Suporte inferior da amostra.....	44
Figura 3.14 - Representação dos esforços e condições de contorno da bancada.....	44
Figura 3.15 - Resultados da simulação da bancada	45
Figura 3.16 - Resultados da simulação do suporte inferior da amostra.....	46
Figura 3.17 - Resultados da simulação da chapa de espera dos mancais	47
Figura 3.18 – Resultados da simulação de tensões mecânicas nos eixos do braço de carregamento e do atuador.....	48
Figura 3.19 - Ilustração indicando as peças que serão isoladas eletricamente	49
Figura 3.20 - Representação dos esforços na montagem aparafusada do suporte inferior..	50
Figura 3.21 - Resultados da simulação das tensões mecânicas no celeron.....	50
Figura 3.22 - Cuba eletrolítica montada com os eletrodos	51
Figura 3.23 - Dimensões dos contra eletrodos.....	52
Figura 3.24 - Representação do sistema de resfriamento e recirculação do fluido eletrolítico	53
Figura 3.25 - Bancada de alojamento da eletrônica associada ao equipamento. (a) estrutura metálica e (b) bancada completa	54

Figura 3.26 - Configuração final do equipamento de RSL.....	55
Figura 3.27 - - Máquina de medir por coordenadas utilizada para realizar as medições de d_1 , d_2 e d_3	57
Figura 3.28 - Representação das dimensões do braço de carregamento que entram na equação da tensão mecânica da amostra.....	57
Figura 3.29 – Amostra após o ensaio, mostrando marcas deixadas pelos roletes	58
Figura 3.30 - Representação das dimensões da seção do transversal da amostra.....	59
Figura 3.31 – (a) Célula de carga utilizada no RSL da fabricante HBM, modelo U2B, com capacidade de 20 kN e (b) célula de carga montada no equipamento.....	61
Figura 3.32 – (a) <i>Encoder</i> rotativo da fabricante HEIDENHAIN, modelo ROD 426, utilizado no RSL e (b) <i>encoder</i> montado no equipamento	62
Figura 3.33 - Tensão média medida no ensaio com as incertezas expandidas no formato de barras de erro	66
Figura 3.34 – <i>Strain gauges</i> montados na amostra para os testes de validação.....	67
Figura 3.35 – Tensão na amostra calculada analiticamente (vermelho) e medida pelo <i>strain gauge</i> (verde) durante o ensaio de validação	67
Figura 3.36 – Erro entre a tensão mecânica calculada pelo software do RSL e a tensão nos <i>strain gauges</i>	68
Figura 4.1 - Amostras utilizadas nas análises de composição química com indicações das posições analisadas	70
Figura 4.2 - Direção do entalhe para amostras de seção retangular (Norma ASTM E1823, 2013), modificado	71
Figura 4.3 - <i>Layout</i> da retirada da amostra para análise metalográfica e faces analisadas..	72
Figura 4.4 - Micrografia ótica da face referente ao comprimento das chapas	72
Figura 4.5 - Micrografia ótica da face referente à largura das chapas.....	73
Figura 4.6 – Micrografia ótica da face referente à superfície das chapas.....	73

Figura 4.7 - Micrografia ótica da face referente ao comprimento das chapas	73
Figura 4.8 - Micrografia ótica da face referente à largura das chapas utilizadas	74
Figura 4.9 - Micrografia ótica da face referente à superfície das chapas.....	74
Figura 4.10 – Dimensões e tolerâncias empregadas na fabricação das amostras dos ensaios de RSL	75
Figura 4.11 - Amostra fabricada para realização dos ensaios de RSL.....	75
Figura 4.12 - Indicação das faces tomadas como referência para medição das tolerâncias de orientação da amostra	76
Figura 4.13 – Entalhes fabricados para análise do raio do entalhe e do acabamento superficial. O entalhe indicado em azul foi usinado com a condição de corte 1 e o entalhe indicado em vermelho foi usinado com a condição de corte 2	78
Figura 4.14 – (a) Interferômetro laser utilizado para medir a rugosidade do entalhe e (b) posicionamento do corpo de prova para medição do acabamento superficial do entalhe	78
Figura 4.15 – Célula eletrolítica utilizada para hidrogenação da amostra durante o ensaio de RSL	79
Figura 4.16 – Sistema de controle potencioscópico.....	80
Figura 4.17 - Montagem do equipamento para realização dos ensaios.	81
Figura 5.1 – Resultados da medição do raio do entalhe usinado com (a) parâmetro de corte 1 e (b) parâmetro de corte 2	85
Figura 5.2 – Condições de contorno utilizadas na simulação dos esforços na amostra	89
Figura 5.3 – Tensões mecânicas no entalhe da amostra (vista lateral).....	89
Figura 5.4 - Tensões mecânicas no entalhe da amostra (vista superior).....	89
Figura 5.5 - Resultados de FFS	90
Figura 5.6 – Perfil de dureza das amostras utilizadas para obtenção do P_{FFS}	91

Figura 5.7 – Ensaio de verificação de tensão mecânica de carregamento da amostra	92
Figura 5.8 - Erro entre a tensão mecânica no extensômetro e a calculada pelo RSL no o ensaio de verificação de tensão.....	93
Figura 5.9 - Resultados dos ensaios de RSL realizados em amostras de aço 4140 temperado e revenido com diferentes perfis de dureza e submetidas a um potencial catódico de $-1,2 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$	94
Figura 5.10 – Perfis de dureza das amostras submetidas ao ensaio de RSL com potencial catódico de $-1,2 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$	95
Figura 5.11 - Variação no P_{th} em função da dureza superficial das amostras no ensaio de RSL ao ar e com $-1,2 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$, onde 100% refere-se ao P_{FFS} médio obtido dos ensaios ao ar livre.....	96
Figura 5.12 – Comparação entre ensaios a ar e com hidrogênio de amostras de aço AISI 4037 temperado e revenido. (NANNINGA, 2010), modificado	96
Figura 5.13 – Resultados de ensaios de tração uniaxial em ambiente hidrogenado dos aços DP 1000, DP 1200 e M 190. (ROSADO, 2011).....	97
Figura 5.14 – Resultado da força limite de ruptura para amostras com perfis de dureza semelhantes, carregadas com potencial de $-1,2 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$, $-1,1 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$, e $-1,0 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$. Dureza na superfície igual a 39HRC	98
Figura 5.15 – Ensaio RSL realizado com potencial de $-0,8 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ numa amostra com dureza de 40 HRC na superfície.....	98
Figura 5.16 - Perfil de dureza das amostras utilizadas nos ensaios de RSL com diferentes níveis de potencial catódico	99
Figura 5.17 – Relação entre o P_{th} e o potencial elétrico aplicado durante no ensaio de RSL	101
Figura 5.18 - Visualização da formação de hidrogênio no entalhe para (a) $-1,2 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ e (b) - $0,8 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resultados obtidos do ensaio de RSL para amostras de UNS N07718 em três diferentes condições de tratamento térmico (KERNION et al., 2014), modificado.....	21
Tabela 3.1 - Valores de média, desvio padrão, fator de abrangência e incerteza expandida associada (95%) para d1, d2 e d3	59
Tabela 3.2 – Resultados das medições das dimensões do corpo de prova usado no ensaio de verificação de tensão e cálculo da incerteza de medição.....	60
Tabela 3.3 – Resultados da média, desvio padrão e incerteza de medição expandida da força medida pela célula de carga	63
Tabela 3.4 - Resultados da média, desvio padrão e incerteza de medição expandida do ângulo medido pelo encoder.....	64
Tabela 3.5 - Resultados da média, desvio padrão e incerteza de medição expandida da tensão mecânica na amostra medida pelo RSL.....	65
Tabela 4.1 - Composição química do material utilizado na confecção das amostras do RSL (% em peso)	70
Tabela 4.2 - Resultados de ensaio de tração do material das amostras do RSL.....	71
Tabela 4.3 – Parâmetros adotados para a condição 1 de corte na eletroerosão a fio	77
Tabela 4.4 - Parâmetros adotados para a condição 2 de corte na eletroerosão a fio.....	77
Tabela 5.1 – Resultados das medições das dimensões das amostras utilizadas no ensaio de RSL e correspondentes incertezas de medição	82
Tabela 5.2 – Resultados das medições de paralelismo e perpendicularismo das amostras e correspondentes incertezas de medição em mm	84
Tabela 5.3 – Parâmetros de rugosidade da superfície do entalhe usinado (Ra), utilizando os parâmetros de corte 1.....	86

Tabela 5.4 - Parâmetros de rugosidade medida (nm) da superfície do entalhe usinado com os parâmetros de corte 2	86
Tabela 5.5 – Resultados dos ensaios para determinação do FFS	91
Tabela 5.6 – Resultados de força e tensão limites das amostras ensaiadas no RSL com potencial catódico de -1,2 VAg/AgCl.....	94
Tabela 5.7 – Resultados de força e tensão limite de amostras com perfis de dureza semelhantes sob diferentes potenciais catódicos	99

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Símbolos Latinos:

a	Altura do entalhe da amostra
\bar{a}	Média aritmética dos valores de altura do entalhe
b	Largura da amostra
D	Diâmetro do furo
\bar{D}	Média aritmética dos valores de diâmetro do furo
d_1	Distância vertical entre o rolete direito e o centro de giro do braço de carregamento
d_2	Distância vertical entre o rolete esquerdo e o centro de giro do braço de carregamento
d_3	Distância horizontal entre o rolete superior e o centro de giro do braço de carregamento
d_6	Distância entre o rolete inferior do braço de carregamento e o rolete superior do suporte inferior da amostra
E	Módulo de elasticidade do material da amostra
F	Força medida pela célula de carga
F_a	Força aplicada pelo atuador
\bar{F}_{CF}	Média aritmética das forças lidas pela célula de carga
F_1	Força de reação no rolete esquerdo do braço de carregamento
F_2	Força de reação no rolete direito do braço de carregamento
F_3	Força de reação no rolete superior do braço de carregamento
F_4	Força de reação no rolete esquerdo do suporte inferior da amostra
F_5	Força de reação no rolete direito do suporte inferior da amostra
F_6	Força de reação no rolete inferior do suporte inferior da amostra
h	Altura da amostra
K_I	Fator de intensificação de tensão no modo I de solicitação
K_t	Fator de concentração de tensão
L	Comprimento da amostra
\bar{L}	Média aritmética do comprimento da amostra
L_i	Média aritmética dos valores da coordenada X, Y ou Z indicadas pela
P_{FFS}	Força de fratura rápida

P_{MAX}	Força máxima do ensaio de RSL
P_{th}	Força limite de ruptura
r	Raio do entalhe da amostra
U	Incerteza padrão expandida
x	Valores da distância vertical entre os centros dos roletes do braço e do suporte inferior que apoiam a face oposta ao entalhe da amostra lidos com a régua
\bar{x}	Média aritmética dos valores da distância vertical entre os centros dos roletes do braço e do suporte inferior que apoiam a face oposta ao entalhe da amostra lidos com a régua

Símbolos Gregos:

ΔAI	Correção associada ao aumento da lente do projetor de perfil
ΔE_A	Correção associada ao erro de apalpamento
$\Delta Hist_F$	Correção associada à histerese apresentada pela célula de carga quando submetida à tração
ΔIC_e	Correção associada à incerteza de calibração do <i>encoder</i>
ΔIC_F	Correção associada à incerteza de calibração da célula de carga
ΔIC_G	Correção associada à incerteza de calibração do goniômetro do projetor de perfil
ΔIC_L	Correção associada à incerteza de calibração do eixo Y do projetor de perfil
ΔIC_{MMC}	Correção associada à incerteza de calibração da máquina de medir por coordenadas
ΔIC_R	Correção associada à incerteza de calibração da régua
ΔIC_T	Correção associada à incerteza de calibração do traçador de alturas
ΔLin_F	Correção associada ao desvio de linearidade apresentado pela célula de carga quando submetida à tração
ΔR_e	Correção associada à resolução do <i>encoder</i>
ΔR_F	Correção associada à resolução da célula de carga
ΔR_G	Correção associada à resolução do goniômetro do projetor de perfil
ΔR_L	Correção associada à resolução do eixo Y do projetor de perfil
ΔR_{MMC}	Correção associada à resolução da máquina de medir por coordenadas

ΔR_R	Correção associada à resolução da régua
ΔR_T	Correção associada à resolução do traçador de alturas
ΔT	Afastamento da temperatura ambiente em relação à temperatura de referência
α	Ângulo de abertura do entalhe da amostra
$\bar{\alpha}$	Média aritmética dos valores de ângulo do entalhe
α_E	Coeficiente de expansão térmica das escalas da MMC
α_{Pe}	Coeficiente de expansão térmica do material da peça
δ	Parâmetro CTOD
δT	Variação da temperatura durante as medições
ε	Deformação sofrida pela amostra
Θ	Ângulo medido pelo <i>encoder</i>
$\bar{\Theta}$	Média aritmética dos ângulos medidos pelo <i>encoder</i>
σ	Tensão mecânica na amostra
$\sigma_{extensômetro}$	Tensão mecânica na amostra lida pelo extensômetro
σ_{LE}	Tensão limite de escoamento
σ_{max}	Tensão mecânica máxima na amostra
σ_{nom}	Tensão mecânica nominal na amostra
$\sigma_{projeto}$	Tensão mecânica definida no projeto do RSL
σ_{RSL}	Tensão mecânica na amostra calculada pelo software do RSL

Siglas e abreviaturas:

ASTM	American Society for Testing and Materials
BTD	Baixa taxa de deformação
CTOD	Crack-Tip Opening Displacement
DCB	Double-Cantilever Beam
FFS	Fast Fracture Strength
GUM	Guide to the expression of uncertainty in measurement
HE	Hydrogen Embrittlement
LTAD	Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste
MMC	Máquina de medir por coordenadas
OCP	Potencial de circuito aberto
RSL	Rising Step-Load
SCC	Trinca de corrosão sob tensão

SFH	Susceptibilidade à fragilização por hidrogênio
SPT	Small Punch Test
TIH	Trinca induzida pelo hidrogênio

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Mecanismos de Fragilização por Hidrogênio.....	7
2.1.1. <i>Teoria da Pressão</i>	7
2.1.2. <i>Teoria da Decoesão</i>	8
2.1.3. <i>Teoria da Plasticidade Localizada</i>	9
2.1.4. <i>Teoria da Formação de Hidretos</i>	10
2.2. Métodos de Avaliação de Influência do Hidrogênio nos Aços.....	11
2.2.1. <i>Ensaio de Tração com Baixa Taxa de Deformação (BTD)</i>	12
2.2.2. <i>Nanoindentação Instrumentada</i>	14
2.2.3. <i>Teste de Carregamento Progressivo em Meio Assistido (RSL)</i>	16
2.2.4. <i>Outros Métodos de Análise da SFH</i>	22
2.3. Efeitos de Parâmetros de Teste na Susceptibilidade à Fragilização por Hidrogênio (SFH).....	27
2.3.1. <i>Efeito do Potencial Catódico Sobre a SFH</i>	27
2.3.2. <i>Efeito da Dureza Sobre a SFH</i>	29
CAPÍTULO III – CONCEPÇÃO, PROJETO, CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE RSL	31
3.1. <i>Concepção</i>	31
3.2. <i>Projeto Mecânico</i>	32

3.2.1. Especificação do Atuador Linear.....	34
3.2.2. Projeto do Braço de Carregamento.....	36
3.2.3. Dimensionamento dos Roletes e do Sistema de Fixação da Amostra....	39
3.2.4. Projeto da Bancada Estrutural e do Suporte Inferior da Amostra.....	41
3.2.5. Chapa de Espera das Unidades de Rolamento.....	46
3.2.6. Projeto Mecânico dos Eixos.....	47
3.2.7. Isolamento Elétrico.....	48
3.2.8. Cuba Eletrolítica.....	50
3.2.9. Sistema de Resfriamento e Recirculação do Fluido Eletrolítico.....	52
3.2.10. Bancada de Alojamento dos Acessórios Eletrônicos.....	53
3.3. Fabricação e Montagem.....	54
3.4. Validação do RSL.....	55
3.4.1. Avaliação da Incerteza de Medição Associada às Variáveis Necessárias para o Cálculo da Tensão Mecânica na Amostra.....	55
3.4.1.1. Incerteza de Medição Associada a d_1 , d_2 , d_3 e d_6	56
3.4.1.2. Incerteza de Medição Associada às Dimensões da Amostra.....	59
3.4.1.3. Incerteza de Medição Associada à Força Medida pela Célula de Carga e ao Ângulo Medido pelo Encoder.....	61
3.4.1.4. Incerteza Associada ao Cálculo da Tensão Mecânica na Amostra.....	64
3.4.2. Testes de Validação.....	66
CAPÍTULO IV– PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	69
4.1. Caracterização do Material das Amostras.....	69
4.2. Confecção das Amostras.....	74
4.3. Medição e Verificação das Dimensões e Tolerâncias das Amostras.....	76

4.4. Verificação do Raio e Acabamento do Entalhe da Amostra.....	77
4.5. Hidrogenação da Amostra.....	79
4.6. Perfil de Carregamento das Amostras.....	80
CAPÍTULO V – RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
5.1. Verificação das Dimensões e Tolerâncias das Amostras.....	82
5.2. Avaliação da Influência do Fator de Concentração de Tensão (K_t) na Tensão Mecânica na Raiz do Entalhe.....	87
5.3. Resultados de P _{FFs}	90
5.4. Resultados de RSL com Hidrogenação das Amostras.....	93
5.4.1. Ensaios RSL com Potencial Catódico de -1,2 V _{Ag/AgCl}	93
5.4.2. Efeito do Potencial Catódico na Resistência à Fratura do aço 4140 em Meio Agressivo.....	97
CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES.....	102
6.1. Projeto, Construção e Validação do Equipamento.....	102
6.2. Ensaios de Avaliação da SFH do Aço AISI 4140 Beneficiado com Dureza de 40 HRC.....	103
CAPÍTULO VII – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
7.1. Desenvolvimento de Adaptadores para Amostras Menores e de Diferentes Geometrias.....	104
7.2. Desenvolvimento de um Procedimento de Polimento do Entalhe da Amostra....	105
7.3. Variação de Parâmetros de Ensaio.....	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
ANEXO I. Certificado de Calibração da Máquina de Medir por Coordenadas.....	112

ANEXO II. Certificado de Calibração da Réguas.....	116
ANEXO III. Certificado de Calibração da do Paquímetro Digital.....	118
ANEXO IV. Certificado de Calibração do Traçador de Alturas.....	120
ANEXO V. Certificado de Calibração do Projetor de Perfil.....	122
ANEXO VI. Certificado de Teste da Célula de Carga.....	126
ANEXO VII. <i>Datasheet</i> da Célula de Carga.....	127
ANEXO VIII. Informações Técnicas dos <i>Strain Gauges</i>.....	129
ANEXO VIV. Certificado de Calibração da Máquina de Tração.....	130
APÊNDICE I. Demonstração dos Cálculos Analíticos dos Esforços Mecânicos na Amostra do RSL.....	134

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A fragilização por hidrogênio, do inglês *hydrogen embrittlement (HE)*, é um fenômeno severo que afeta quase todos os metais e ligas, dependendo do meio em que estão inseridos (BARNOUSH *et al.*, 2010). Devido ao hidrogênio apresentar diâmetro atômico muito pequeno e fácil mobilidade no estado sólido, ele penetra facilmente no material, introduzindo defeitos e desordem microestrutural, levando, consequentemente, à fragilização dos materiais.

Processos de fabricação como soldagem (BALLESTEROS, 2009), laminação a quente (OKAMOTO, 2010) e deposição eletroquímica de revestimentos (STROE, 2006 e CWIEK, 2009) podem apresentar problemas relacionados a este fenômeno. Na soldagem, a zona termicamente afetada é uma região que apresenta tensões residuais oriundas das grandes variações de temperatura presentes no processo, sendo assim uma região favorável a concentrar hidrogênio. Um exemplo disso é a queda na tenacidade à fratura, observada por Chatzidouros *et al.*, 2011, em amostras de aço API 5L X70 soldadas, retiradas de tubulações subterrâneas e permeadas com hidrogênio. Outra aplicação em que este fenômeno é comumente observado é na proteção catódica de aços contra corrosão. A reação catódica na superfície do material induz a reação de redução da água do mar, resultando na formação de hidrogênio atômico na interface metal/solução (SILVA, 2007). Os aços de alta resistência são os materiais mais susceptíveis a sofrer fragilização por hidrogênio (CWIEK, 2009 e SILVA, 2007). Devido à sua baixa capacidade de deformação, o que o impede de absorver as tensões internas geradas pela presença do hidrogênio em sua microestrutura.

Um exemplo de um setor da indústria que experimenta os efeitos deste problema é a indústria naval, devido ao uso de aços de alta resistência mecânica utilizados na fabricação de embarcações e outros veículos aquáticos. O problema é devido à absorção de hidrogênio da água do mar quando se aplica proteção catódica para controlar a corrosão do aço

(CWIEK, 2009). A indústria de óleo e gás também tem experimentado grandes dificuldades com problemas causados pela fragilização por hidrogênio. Segundo Silva *et al.*, 2007, 25% das falhas que ocorrem neste tipo de indústria são fraturas associadas com o hidrogênio.

A literatura técnica mostra que a susceptibilidade à fragilização pelo hidrogênio está fortemente ligada à microestrutura e, especialmente, ao nível de tensões internas do material (PEREIRA *et al.*, 2015). Além disso, aços de alta resistência mecânica, portanto de dureza, em geral, mais elevada, têm mostrado maior susceptibilidade à fragilização por hidrogênio. (NANNINGA, 2005 NANNINGA *et al.*, 2010, CHEN *et al.* 2014).

Resultados apresentados na literatura têm mostrado que a proteção catódica tem sido um dos principais causadores de fragilização por hidrogênio (PARKINS *et al.*, 1982 e HONGCHI *et al.*, 2015). Os resultados mostram ainda uma variação da susceptibilidade à fragilização por hidrogênio (SFH) com o nível de potencial catódico aplicado.

Atualmente, os métodos existentes capazes de avaliar a SFH dos aços são caros e lentos, como o ensaio de tração com baixa taxa de deformação (BTD), ou, dependendo das condições de ensaio, limitados, como a ensaio de nanoindentação instrumentada.

Raymond (1996) desenvolveu um equipamento capaz de avaliar a SFH de aços em até 60 horas, realizando um ensaio de carregamento progressivo em meio assistido, em inglês, *rising step-load (RSL)* com a mesma precisão, ou até melhor, do que os métodos convencionais. Este método consiste em carregar mecanicamente uma amostra de seção quadrada ou circular com um entalhe em “V”, imersa em um fluido eletrolítico responsável por fornecer o hidrogênio que irá fragilizar a amostra. Por meio de incrementos na carga, onde cada passo é incrementado com 5% da força de fratura de uma amostra ensaiada ao ar livre e livre de hidrogênio, a amostra é carregada mecanicamente até a sua fratura ou até chegar a 100% da força. A Fig. 1.1 apresenta um croqui do equipamento mencionado.

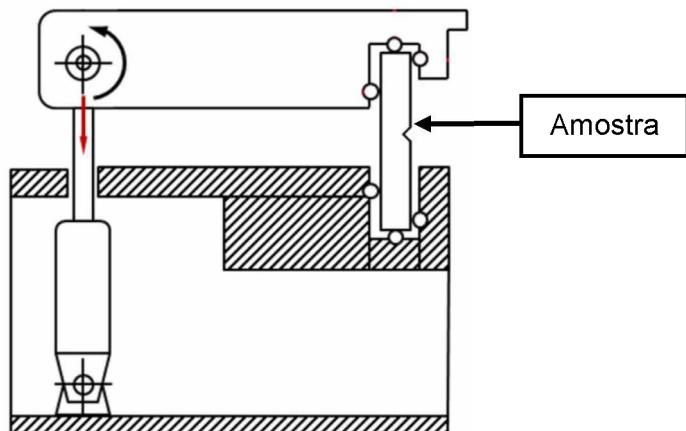


Figura 1.1 – Croqui do equipamento que realiza ensaios do tipo RSL

Em vista do que foi apresentado nesta introdução, este trabalho tem como objetivo principal desenvolver um equipamento capaz de avaliar, de forma rápida, a SFH dos aços estruturais de média e alta resistência. Para se atingir tal objetivo, alguns objetivos específicos foram traçados, a saber:

1. Conceber, projetar e construir um equipamento capaz de realizar o ensaio de RSL de acordo com a norma ASTM F1624;
2. Desenvolver um modelo matemático para o cálculo da tensão mecânica na amostra;
3. Elaborar um modelo de cálculo da incerteza de medição para a tensão mecânica na amostra;
4. Realizar ensaios para verificação a validação do modelo matemático adotado para o cálculo da tensão mecânica na amostra;
5. Verificar o desempenho do equipamento construído através de ensaios de RSL em amostras de aço AISI 4140 beneficiado com dureza de 40 HRC.

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos e um conjunto de anexos.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica acerca da fragilização por hidrogênio, onde são descritas as teorias correntes para explicar este fenômeno. Adicionalmente, são apresentados os principais métodos usados para avaliar a SFH dos aços.

No terceiro capítulo são apresentados os aspectos relativos à construção do equipamento, desde a sua concepção até os ensaios de validação. São apresentadas as simulações dos principais componentes do RSL, onde são mostrados os critérios utilizados e os resultados. A etapa de cálculo de incerteza de medição e validação do equipamento também serão descritos, bem como todas as medições realizadas para se poder calcular incerteza de medição da tensão mecânica na amostra.

O quarto capítulo apresenta os procedimentos experimentais adotados na fabricação das amostras de aço AISI 4140 beneficiado, envolvendo análise de sua microestrutura, composição química e propriedades mecânicas. Também são mostrados os procedimentos de verificação das dimensões e tolerâncias das amostras, bem como a seleção do melhor método para fabricação do entalhe das amostras. Por fim, neste capítulo é descrito o método de hidrogenação das amostras, bem como o perfil de carregamento mecânico da amostra durante o ensaio de FSH.

O quinto capítulo mostra os resultados experimentais obtidos dos ensaios de determinação da força máxima de ruptura das amostras e de RSL. Os resultados são

discutidos confrontando os valores obtidos com as propriedades mecânicas, bem como com resultados presentes na literatura.

O sexto capítulo traz as conclusões finais acerca do desenvolvimento do RSL e dos ensaios realizados.

No capítulo sete é apresentada uma série de sugestões de trabalhos futuros.

Por fim, são mostradas as referências bibliográficas usadas neste trabalho e os anexos.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O hidrogênio se concentra nos aços de diversas formas, sendo as principais: dissolvido na forma de hidrogênio iônico (H^+), precipitado na forma de hidrogênio molecular (H_2) e precipitado na forma de diferentes compostos (CH_4 , H_2O , hidretos, etc.) (ROSADO, 2011). Ele se localiza nos interstícios cristalinos do material ou nos seus defeitos (contornos de grão, poros, vazios, ponta da trinca, discordâncias, etc.) como mostram a Fig. 2.1 e Fig. 2.2. Os defeitos funcionam como sítios aprisionadores de hidrogênio, também denominados de armadilhas de hidrogênio, visto que são regiões de concentração de tensão e de defeitos microestruturais que apresentam pouca resistência à entrada de hidrogênio.

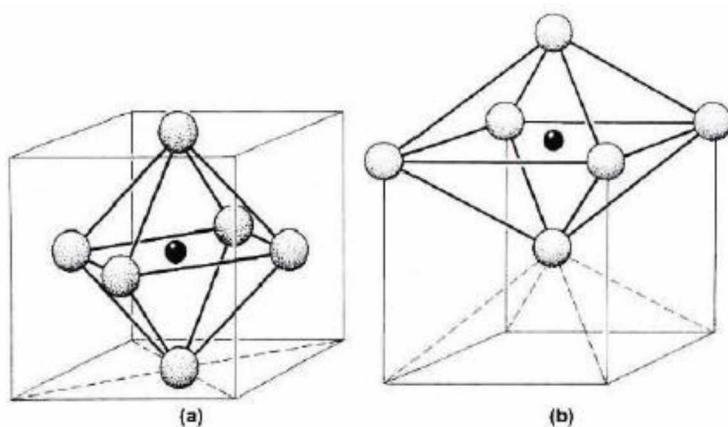


Figura 2.1 - Interstícios octaédricos dos sistemas cúbicos de face centrada (a) e cúbico de corpo centrado (b) (LANDOLT, 1993, apud ROSADO, 2011)

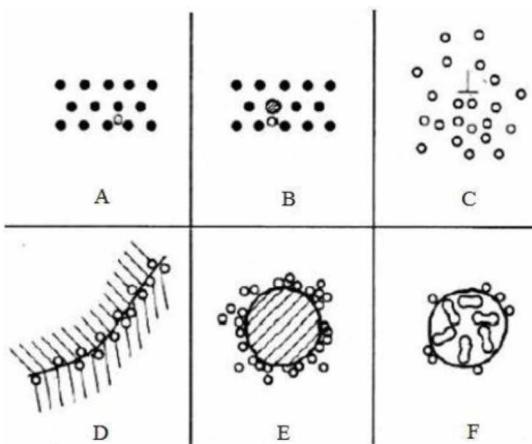


Figura 2.2 - Formas de interação entre hidrogênio e estrutura metálica: A) Solução Sólida, B) Par hidrogênio – soluto, C) Em torno de uma discordância, D) Acúmulo no contorno de grão, E) Acúmulo na interface matriz – partícula, F) Hidrogênio recombínado em vazios. (THOMPSON, 1980, *apud* ROSADO, 2011)

Quando o aço encontra-se em um ambiente rico em hidrogênio, como uma atmosfera hidrogenada ou um ambiente aquoso, a molécula se dissocia formando hidrogênio iônico (H^+). Em seguida, o hidrogênio é adsorvido na superfície do aço e então se difunde no estado sólido, penetrando na microestrutura do material. Como estes átomos são grandes se comparados aos espaços presentes internamente na estrutura cristalina do aço, o hidrogênio é retido na microestrutura e passa a concentrar tensão. À medida que a quantidade de hidrogênio retido no material aumenta, tem-se um acréscimo na concentração de tensão no material até atingir seu limite de escoamento, iniciando-se, assim, uma trinca. A Fig. 2.3 ilustra este processo.

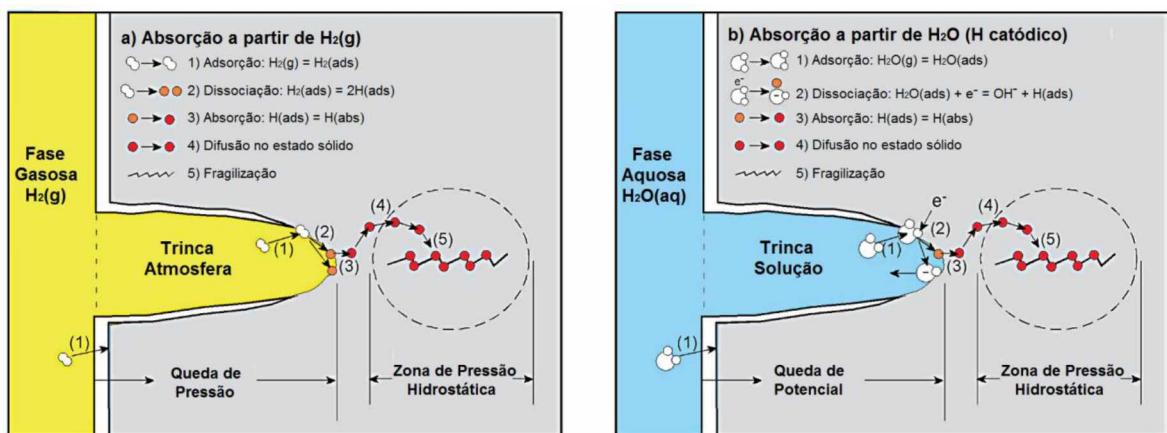


Figura 2.3 – Mecanismo de difusão de hidrogênio no material (HERRING, 2010), modificado

2.1. Mecanismos de Fragilização por Hidrogênio

Sabe-se que o hidrogênio, quando se insere na microestrutura de um aço, causa sua fragilização, mas, ainda hoje não existe uma teoria universalmente aceita para explicar este fenômeno. A seguir são descritas algumas dessas teorias que tentam explicar a fragilização por hidrogênio sob a ótica de aspectos específicos envolvidos na interação entre o hidrogênio e a microestrutura do aço.

2.1.1. Teoria da Pressão

Esta teoria tem como base a recombinação do hidrogênio iônico (H^+) em hidrogênio molecular (H_2) concentrado nos defeitos do material. A presença da molécula de hidrogênio, que se encontra no estado gasoso, faz com que haja uma elevação na pressão interna ($>10^5 \text{ atm}$) devido ao aumento do volume do hidrogênio, o que leva a uma expansão da cavidade do defeito onde o hidrogênio se encontra, resultando no aparecimento e propagação de trincas (GINGEL, 1997). Mesmo se não houver tensão mecânica externa aplicada, essas trincas podem aparecer e se propagar na forma de degraus, levando o componente mecânico à fratura (OKAMOTO, 2010). As trincas causadas por hidrogênio podem ser:

Trinca induzida por hidrogênio (TIH): é característica de materiais de baixa resistência mecânica em contato com ambiente contendo H_2S , H_2O , etc.. O hidrogênio iônico formado pela reação catódica dessas moléculas recombina-se formando hidrogênio gasoso, gerando bolhas no material, como mostra a Fig. 2.4.

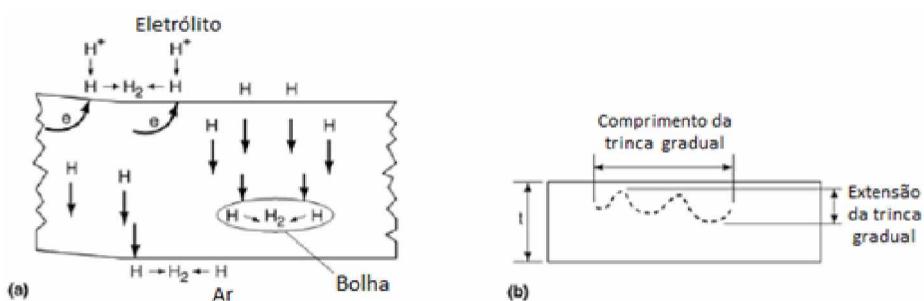


Figura 2.4 - Formação de bolhas e fratura induzida por hidrogênio. (a) Esquema de formação de bolhas e (b) Esquema de formação de trinca induzida por hidrogênio (METALS HANDBOOK, *apud* OKAMOTO, 2010), modificado

Trinca induzida por hidrogênio e orientada por tensão mecânica: resultam da presença de bolhas de H₂ e aplicação de tensão mecânica de projeto ou ainda tensões residuais do material. A presença de hidrogênio atômico e tensão mecânica é responsável pela ocorrência de trincas finas que se interconectam às TIH (ROSADO, 2011). Esse tipo de trinca tende a crescer na direção da tensão aplicada, como mostrado na Fig. 2.5.

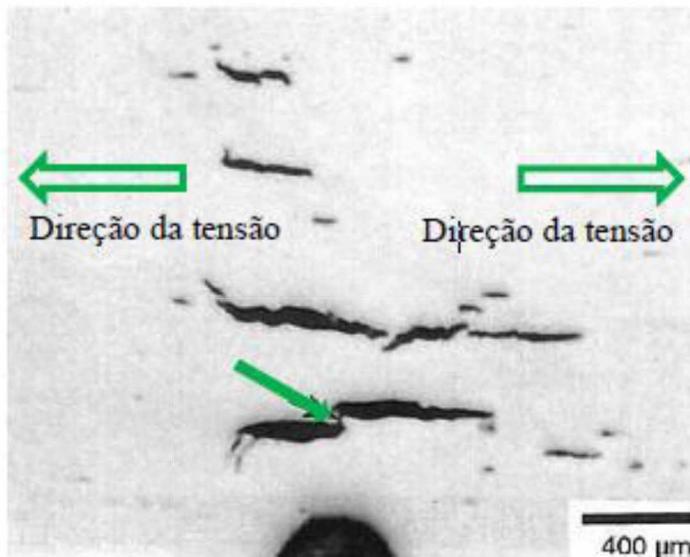


Figura 2.5 - Trinca induzida por hidrogênio e orientada por tensão (Adaptado de METALS HANDBOOK, 1987, *apud* ROSADO, 2011)

2.1.2. Teoria da Decoesão

Esta teoria afirma que o átomo de hidrogênio tem alta solubilidade em regiões de alta concentração de tensão como a ponta de trincas (estado triaxial de tensões) ou de uma discordância (OKAMOTO, 2010). Uma vez que a quantidade de hidrogênio na ponta da trinca começa a aumentar, os átomos da rede cristalina começam a se afastar uns dos outros, o que resulta na redução da energia coesiva entre eles, como pode ser visto na Fig. 2.6. Logo, a concentração de hidrogênio nesta região chega a valores críticos que fazem a trinca propagar, gerando uma nova ponta de trinca. Repetidamente, o hidrogênio irá se concentrar na extremidade da trinca, causando consecutivas propagações até haver a ruptura do material. Este processo, ilustrado na Fig. 2.7, demanda tempo e mostra o caráter intermitente e retardado da fratura assistida por hidrogênio.

Esta teoria é aplicável quando se tem fratura frágil (intergranular ou clivagem), uma vez que a fragilização por hidrogênio pode ocorrer na ausência de deformação local significativa, sendo explicada por argumentos termodinâmicos e cálculos teóricos da distribuição eletrônica de sistemas cristalinos na presença de hidrogênio. No entanto, ela não explica fraturas acompanhadas de deformação plástica (STROE, 2006).

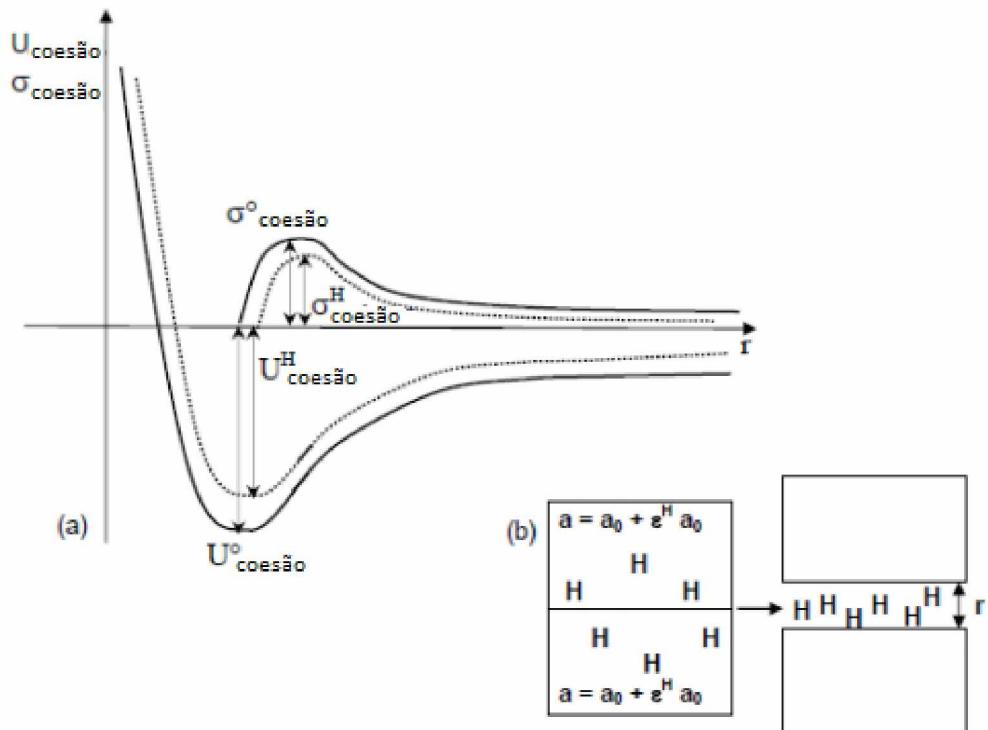


Figura 2.6 – Efeito do hidrogênio sobre a energia coesiva (U) e sobre a tensão coesiva (σ) do material. (STROE, 2006), modificado

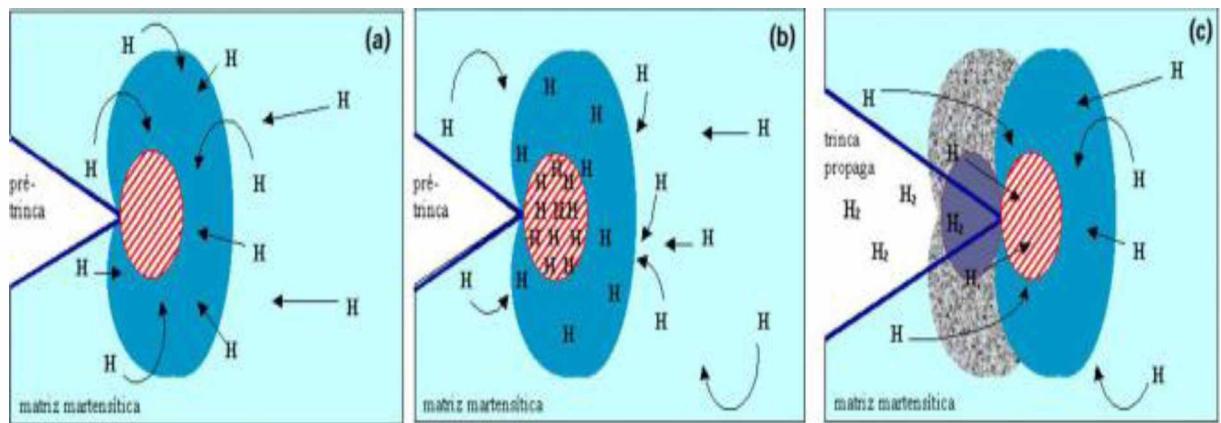


Figura 2.7 - Estágios da propagação da trinca na teoria da decoesão: a) hidrogênio difundindo-se para a zona de alta concentração de tensão; b) ponta da trinca saturada de hidrogênio; c) propagação da trinca (OLIVEIRA, 2008)

2.1.3. Teoria da Plasticidade Localizada

Nesse mecanismo, é proposto que o hidrogênio aumenta a mobilidade das discordâncias, criando regiões de deformação localizada. Segundo Stroe (2006) a plasticidade localizada é causada devido à redução de interação entre as discordâncias e

entre discordâncias e outros obstáculos. Portanto, as discordâncias passam a se mover mais próximas umas das outras e mais próximas de outros obstáculos, criando empilhamentos de discordâncias mais densos. Este fenômeno cria regiões de alta deformação (onde o hidrogênio aumentou a mobilidade das discordâncias), cercadas por uma região menos dúctil, onde há empilhamento, como pode ser visto na Fig. 2.8 abaixo.

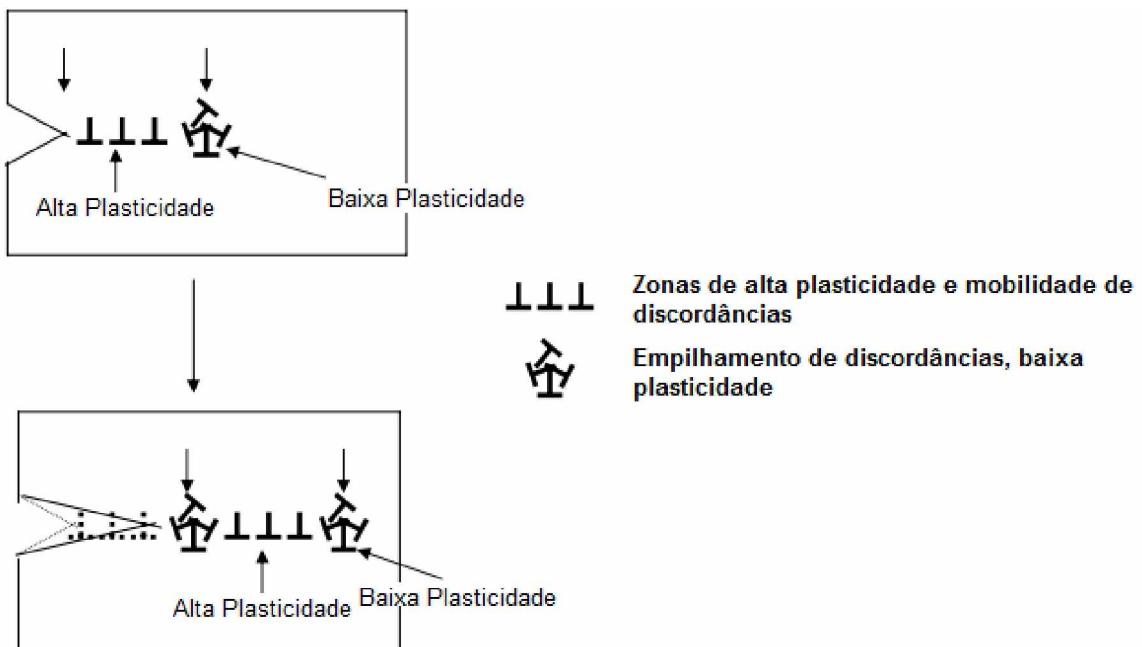


Figura 2.8 - Avanço da ponta da trinca de acordo com a teoria da plasticidade localizada (STROE, 2006), modificado

A falha ocorre quando a tensão mecânica resultante nessas pequenas regiões de empilhamento de discordâncias ultrapassa o limite de ruptura do material. Por serem regiões que representam uma pequena parte do material, sua deformação é pequena se comparada com a deformação total, fazendo com que, macroscopicamente, essas deformações não sejam percebidas e, portanto, o material apresenta comportamento frágil quando se observa sua curva de tensão x deformação.

2.1.4. Teoria da Formação de Hidretos

Esta teoria é restrita a ligas metálicas que possuem elementos que tendem a formar hidretos, tais como: Ti, Zr, V, Nb, Ta, Mg e U. O hidrogênio, quando atinge uma concentração crítica na estrutura cristalina do material, pode formar hidretos frágeis que diminuem a tenacidade do metal, como mostrado na Fig. 2.9. A presença de trincas é um fator que desencadeia a formação destes hidretos, visto que é a região de maior concentração de hidrogênio no metal (STROE, 2006). Inicialmente, os hidretos são

formados no campo de tensões da trinca. No entanto, o aumento do tamanho destes hidretos não se dá pelo crescimento individual, mas sim pela nucleação e crescimento de novos hidretos que se juntam, formando hidretos maiores (SOFRONIS, *et al.*, 2001).

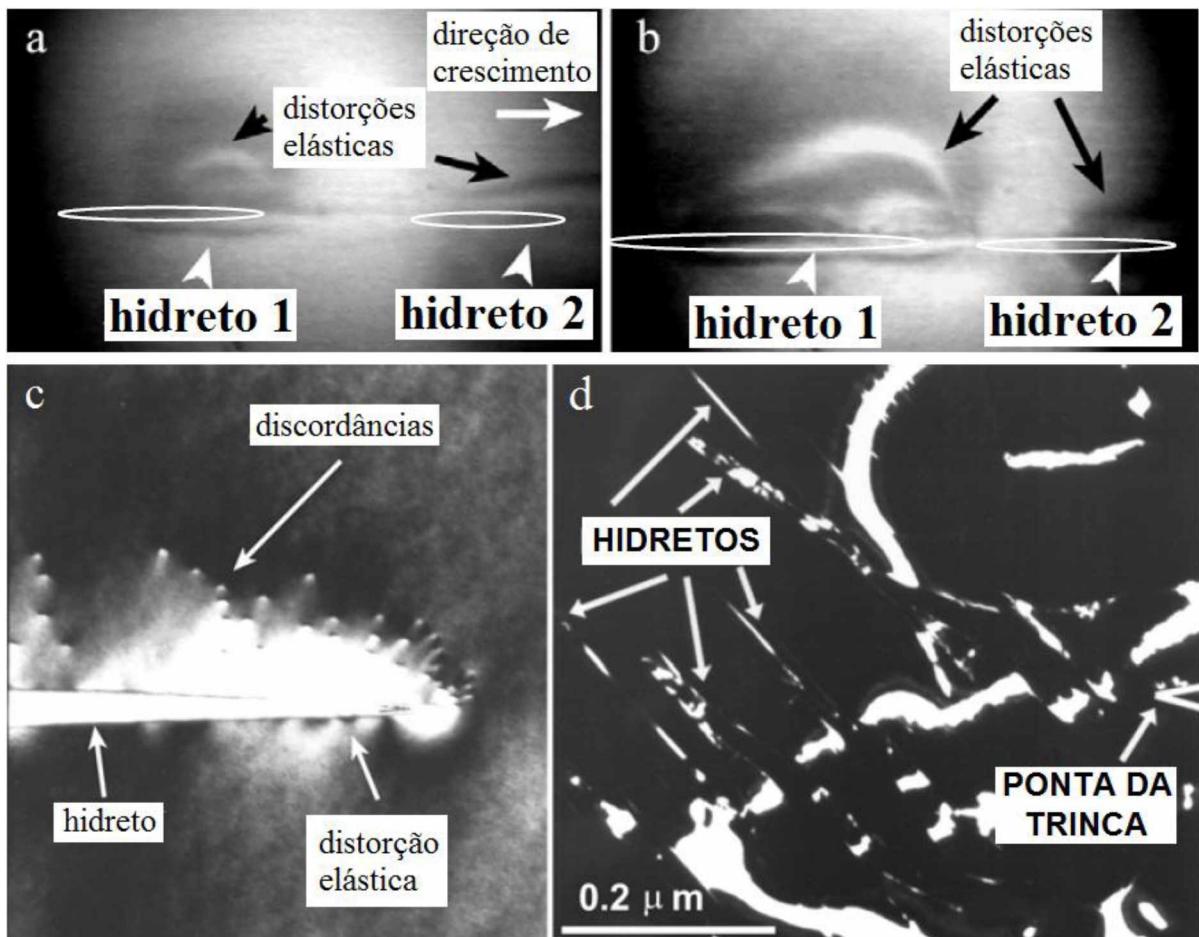


Figura 2.9 - Nucleação e crescimento de hidretos (a e b) em α -Ti. Empilhamento de discordâncias a partir do crescimento do hidreto (c). Campo de hidretos à frente da trinca (d). (SHIH, *et al.*, *apud* SOFRONIS *et al.*, 2001)

2.2. Métodos de Avaliação da Influência do Hidrogênio nos Aços

Como se sabe, o hidrogênio altera as propriedades mecânicas dos aços, principalmente a tenacidade à fratura. Atualmente existem algumas técnicas que permitem avaliar essa alteração nas propriedades mecânicas causadas pelo hidrogênio, sendo as mais utilizadas: ensaio de tração com baixa taxa de deformação, nanoindentação instrumentada, *rising step load*, *crack tip opening displacement* (CTOD), carga constante,

etc. A seguir essas técnicas serão descritas, abordando seus métodos de funcionamento, vantagens e desvantagens.

2.2.1. Ensaio de Tração com Baixa Taxa de Deformação (BTD)

Comumente utilizado para avaliar a susceptibilidade de certos tipos de materiais a experimentar trincamento causados por efeitos combinados de tensão mecânica e o meio em que o material testado está inserido (ASTM G129, 2013). Este tipo de ensaio fornece uma estimativa da susceptibilidade de um material a sofrer fragilização por hidrogênio (STROE, 2006). O ensaio de tração com baixa taxa de deformação é usado, por exemplo, para avaliar materiais, efeitos de tratamentos térmicos, constituintes químicos do ambiente, inibidores químicos e temperatura (ASTM G129, 2013).

O equipamento necessário para realizar esse ensaio, segundo a norma ASTM G129 para ensaios de tração com baixa taxa de deformação, é mostrado na Fig. 2.10. Neste ensaio, a amostra é solicitada à tração com uma baixíssima taxa de deformação (10^{-4} a 10^{-8} s^{-1}), de tal forma que é obtida uma curva de tensão *versus* deformação típica, como pode ser visto a Fig. 2.11. Quando o ensaio é finalizado, tem-se a curva de tensão *versus* deformação do material, a redução de área, a deformação sofrida pela amostra até à falha e o tipo de ruptura. Estes dados dão indicações da susceptibilidade do material a sofrer fragilização por hidrogênio (STROE, 2006). Para avaliar tal susceptibilidade compara-se a ductilidade do material ensaiado ao ar e do ensaiado em meio contendo hidrogênio. Quando a razão entre a ductilidade da amostra ensaiada em meio contendo hidrogênio e ao ar for 1,0, o material não é suscetível à fragilização por hidrogênio. Todavia, se essa razão for menor que 0,8, o material é suscetível. O fato da taxa de deformação ser mais baixa é fundamental, uma vez que se a taxa de deformação for elevada, o efeito do ambiente desaparece e as trincas surgem exclusivamente devido a efeitos mecânicos (BALLESTEROS, 2009).

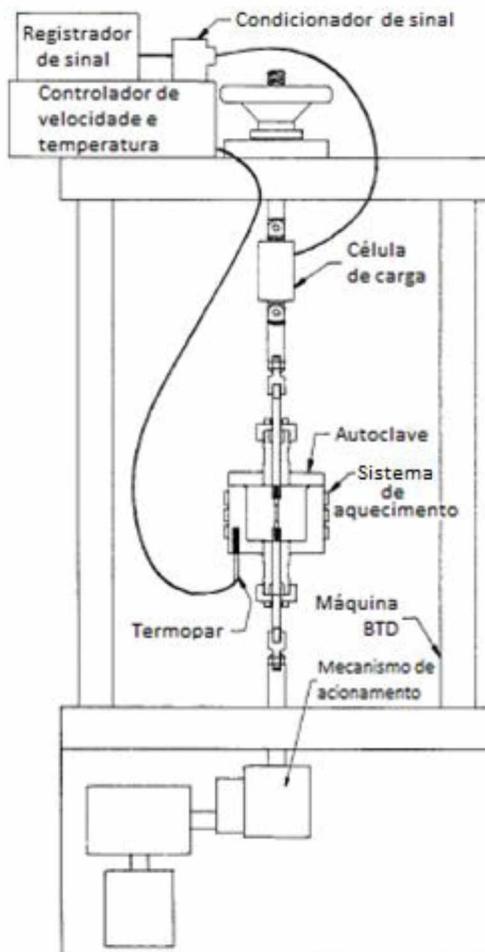


Figura 2.10 - Exemplo de uma máquina de ensaio BTD (ASTM G129-00, 2013), modificado

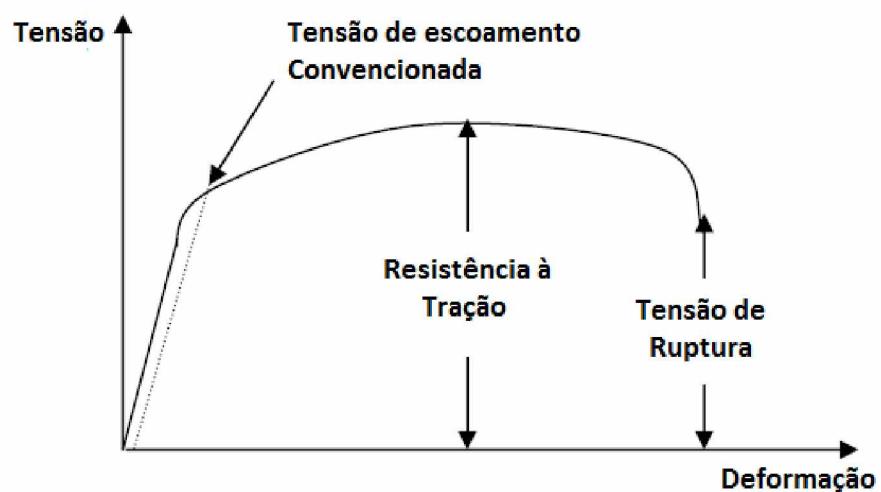


Figura 2.11 - Curva tensão versus deformação típica (STROE, 2006), modificado

O aparato de realização do teste, quando usado para avaliação do surgimento de trincas em meio assistido, deve possuir também uma célula eletrolítica, responsável por

carregar a amostra com o elemento que vai influenciar no surgimento trinca, como por exemplo, o hidrogênio. Segundo a norma ASTM G129, esta célula eletrolítica deve ser desenvolvida de tal forma que facilite o manuseio e monitoramento do ambiente de teste durante a realização do mesmo. Isto irá requerer um sistema de furo de passagem de baixo atrito no recipiente para aplicação da carga no corpo de prova. Além disso, a célula deve ser capaz de conter com segurança o ambiente de teste com acondicionamento adequado da temperatura e pressão em que o teste será conduzido.

A grande vantagem do ensaio BTD é permitir que o efeito sinérgico entre o meio agressivo e as tensões mecânicas se manifeste sobre o material ensaiado através de uma taxa de deformação adequada. Por outro lado, a taxa de deformação lenta faz com que este teste demande muito tempo (aproximadamente 720 horas) para ser concluído. Portanto, tem-se uma necessidade de se procurar por outras opções que ofereçam o mesmo nível de acurácia deste teste, ou até maior, em um tempo menor de ensaio.

2.2.2. Nanoindentação Instrumentada

Nanoindentação permite caracterizar propriedades mecânicas locais de pequenos volumes ou filmes finos. Em escala nanométrica, heterogeneidades em escala atômica podem ter um efeito substancial em testes de dureza (BARNOUSH, 2007).

O equipamento utilizado neste tipo de teste utiliza uma configuração de três eletrodos, sendo um eletrodo de referência, normalmente de Ag/AgCl ou calomelano saturado, um contra eletrodo, normalmente de platina e o eletrodo de trabalho, que é a amostra que está sendo ensaiada. A Fig. 2.12 ilustra este equipamento. Para realizar o ensaio, a amostra é mergulhada num eletrólito responsável por carregar a amostra com hidrogênio. Quando a amostra é submetida a um potencial anódico, não há produção de H^+ e se ela apresentar hidrogênio na sua microestrutura, ele tenderá a sair, possibilitando a realização do ensaio na amostra livre de hidrogênio. Por outro lado, quando a amostra é submetida a potencial catódico, há a produção de H^+ que penetra em sua microestrutura, permitindo que sejam avaliadas as propriedades mecânicas com a influência do hidrogênio. Estes ensaios fornecem uma curva de tensão *versus* profundidade de indentação, como mostra a Fig. 2.13, que permite comparar as propriedades mecânicas da amostra livre e carregada com hidrogênio.

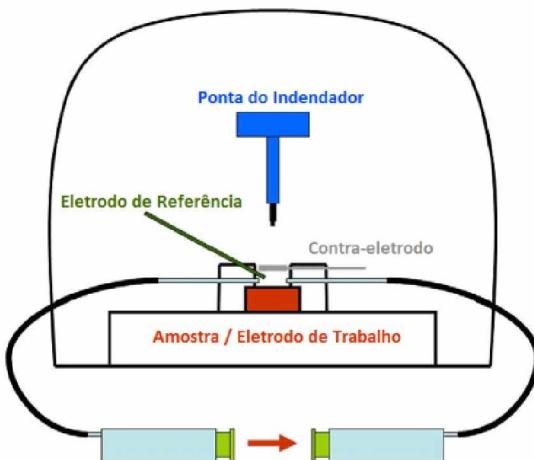


Figura 2.12 - Equipamento de nanoindentação instrumentada. (BARNOUSH *et al.*, 2010) , modificado

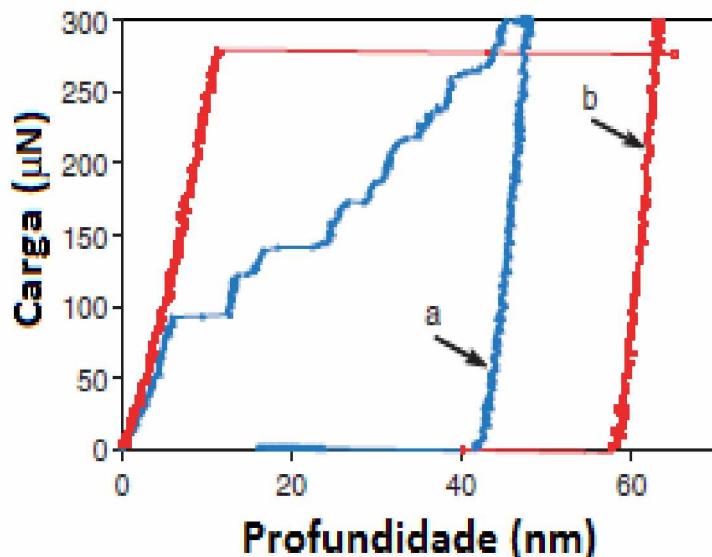


Figura 2.13 - Curva carga versus profundidade de indencação de uma amostra de Ni submetida a potencial catódico de -1000 mV (a) e potencial anódico de 500 mV (b) (BARNOUSH *et al.*, 2006), modificado

A técnica da nanoindentação instrumentada combinada com microscopia de força atômica oferece grandes vantagens com relação ao método convencional de deformação para investigar os efeitos do hidrogênio nas propriedades mecânicas dos aços. Como a nanoindentação envolve pequenos volumes de material, múltiplos testes podem ser realizados em um único grão e, como o volume testado é pequeno, permite-se uma melhor caracterização da área deformada, além de permitir a realização de testes em áreas livres de defeitos (BARNOUSH *et al.*, 2006). No entanto, esta técnica também apresenta algumas desvantagens, como por exemplo, o fato de ela ser limitada a algumas centenas de nanômetros, não permitindo a investigação da estrutura interna do material. Outras

desvantagens deste método são o alto custo, dificuldade de aplicação *in-situ* ou em amostras grandes. (LI *et al.*, 2007).

2.2.3. Teste de Carregamento Progressivo em Meio Assistido (RSL)

Desenvolvido por RAYMOND (1996), o ensaio consiste em aplicar carga progressivamente numa amostra permeada previamente com hidrogênio ou carregada com hidrogênio durante o ensaio. A carga e tempo de patamar são estabelecidos segundo a norma ASTM F1624 para medição da fragilização por hidrogênio em aços através de carregamento progressivo. A geometria da amostra, bem como as condições de teste, que são estabelecidas por norma, são descritas a seguir.

O equipamento necessário para o teste, mostrado na Fig. 2.14, é basicamente constituído por um atuador, responsável por fornecer a força de flexão que será aplicada na amostra, um braço de carregamento, responsável por transferir a carga do atuador para a amostra, uma célula eletrolítica, responsável pelo carregamento da amostra com hidrogênio e um sistema de recirculação do fluido eletrolítico.

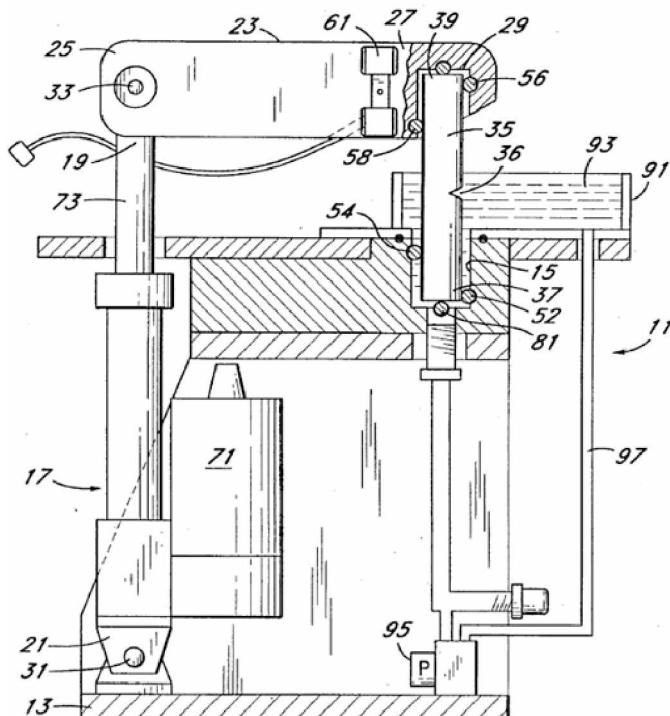


Figura 2.14 - Máquina RSL onde apresentam-se seus principais componentes que são: atuador eletromecânico (17); braço de carregamento (23); roletes (32, 81, 54, 58, 56 e 39); cuba eletrolítica (91) e amostra (35), (RAYMOND, 1996)

Ao ligar o atuador 17, a carga é transferida pelo braço de carga 23 aos pontos 56 e 58 e destes para amostra. Tal carregamento gera reações nos pontos 52 e 54 e a amostra é carregada em flexão a quatro pontos. A amostra utilizada deve possuir um entalhe previamente fabricado, como pode ser visto nas Fig. 2.15, de tal forma que a tensão aplicada seja concentrada naquele local. Esse é também o local de maior concentração de hidrogênio, permitindo que sua influência sobre o comportamento mecânico da amostra seja avaliada.

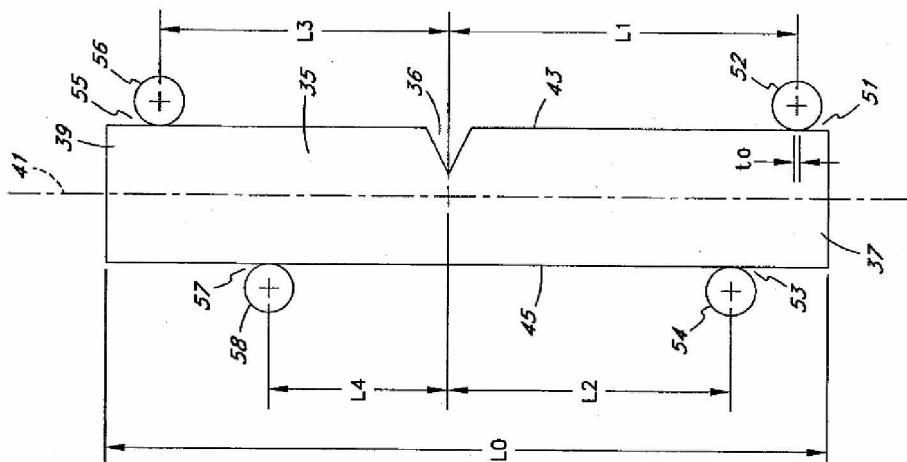


Figura 2.15 - Geometria da amostra utilizada no ensaio RSL (RAYMOND, 1996)

O equipamento utiliza uma configuração de quatro pontos de apoio da amostra, mostrado na Fig. 2.16. Para submeter a amostra a um eficiente momento fletor de modo que a área entalhada 36 esteja sob tensão mecânica, a distância L_1 da Fig. 2.15 deve ser maior que L_2 e L_3 deve ser maior que L_4 . Assim tem-se um braço de momento entre a superfície de apoio 57 e a extremidade 39 da amostra e entre a superfície de apoio 53 e a extremidade 37 da amostra. Para eficiência estrutural e estabilidade pode-se adotar $L_1 = L_3$ e $L_2 = L_4$. Deseja-se também $t_0 < 0,1L_0$ ou, preferivelmente, $t_0 < 0,01L_0$, onde t_0 é a espessura das superfícies de contato e L_0 é o comprimento da amostra.

Também é possível utilizar este equipamento para testes em amostras roscadas. Esse ensaio é necessário quando se deseja avaliar os efeitos do hidrogênio em parafusos e rosca utilizadas em equipamentos que trabalham em meios agressivos como também quando a amostra disponível somente permite a usinagem de corpos-de-prova cilíndricos de pequeno diâmetro. Para tal adaptação, apenas substitui-se a amostra entalhada por adaptadores aonde será encaixada a amostra roscada. A Fig. 2.17 e a Fig. 2.18 ilustram os adaptadores e a amostra, respectivamente.

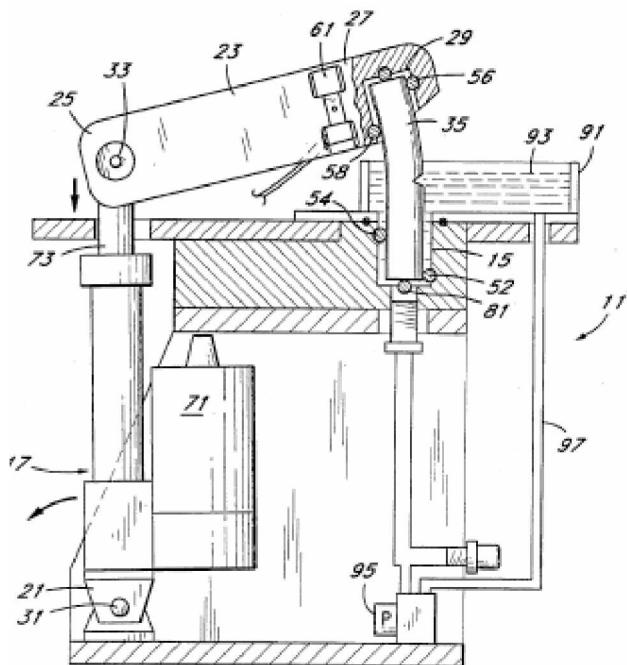


Figura 2.16 – Esquema da flexão sofrida pela amostra durante o ensaio RSL (RAYMOND, 1996)

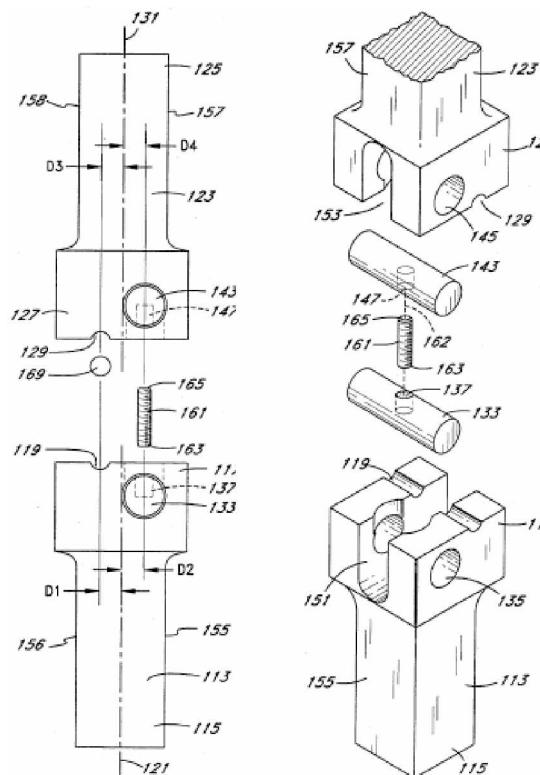


Figura 2.17. Adaptadores para ensaio em parafuso no RSL. Nesta figura destacam-se os adaptadores para o parafuso (158, 156), dispositivos de conexão da amostra (143, 133) e parafuso (161), (RAYMOND, 1996)

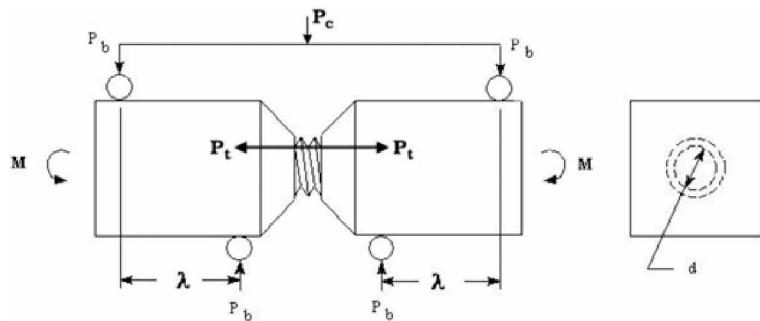


Figura 2.18 - Amostra roscada com adaptador, onde destacam-se a distância entre os roletes (λ), momento aplicado (M), carga de ruptura (P_c), reações de apoio (P_b) e diâmetro do parafuso (d) (ASTM F1624, 2013)

Para realizar este ensaio são necessárias no mínimo quatro amostras e a aplicação de carga é realizada segundo a norma ASTM F1624. Inicialmente, uma amostra com entalhe livre de hidrogênio é carregada até a ruptura com uma taxa de carregamento constante, conforme indica a norma ASTM E8/E8M, a fim de se determinar a carga limite de ruptura (P_{FFS}) que representa a carga máxima (P_{MAX}) do primeiro ensaio de RSL. Feito isso, iniciam-se os ensaios de RSL com as outras amostras carregadas com hidrogênio. A carga aplicada ($\%P_{MAX}$), o tempo de permanência em cada patamar de carga e o número de passos (#) são dados em função da dureza da amostra. O perfil de carregamento é dado segundo a notação (# / $\%P_{MAX}$ / hrs). Para durezas ≥ 33 HRC até 45 HRC, o perfil de carregamento é de (10/5/2,4). Em outras palavras, tem-se um perfil inicial de 10 incrementos, com uma carga que é incrementada com 5% P_{MAX} em cada passo com um tempo de permanência de duas horas por passo. Em seguida, são realizados mais 10 passos, com incremento de 5% P_{MAX} em cada passo, com um tempo de permanência de quatro horas. Para durezas > 45 HRC até 54 HRC, o perfil de carregamento é (10/5/1,2) e para durezas > 54 HRC tem-se um perfil de carregamento de (20/5/1).

O ensaio se encerra quando se observa uma queda na força aplicada na amostra, monitorada por uma célula de carga acoplada ao atuador eletromecânico, causada pelo início da propagação de uma trinca. A queda da força é detectada por meio de um controle digital de deslocamento presente no equipamento. Em cada patamar de força tem-se que o atuador encontra-se numa posição específica, que é mantida constante pelo controle digital do equipamento. Logo, no decorrer do ensaio, há uma diminuição da força necessária para manter constante a posição do atuador ao longo do patamar, causada pelo escoamento ou propagação de trinca na amostra. Essa queda é identificada pelo software do equipamento e, através de um valor de referência, identifica-se o início de propagação da trinca e encerra-se o ensaio. Uma queda de 5% de P_{MAX} na força, de acordo com a norma ASTM

F1624, é um bom indicador de que se iniciou uma trinca, porém, se a amostra possuir uma taxa de crescimento de trinca mais lenta, deve-se considerar um menor valor para a queda de força. Ao realizar o procedimento descrito acima, se obtém o perfil de carregamento mostrado na Fig. 2.19. Para se determinar a carga limite de ruptura (P_{th}), observa-se em qual patamar de carga houve a abertura da trinca, como mostra a Fig. 2.20. P_{th} é dado como sendo a carga do patamar imediatamente anterior. Para melhorar a resolução do teste, faz-se outro ensaio onde a carga máxima é igual a $1,1P_{th}$, ou seja, 110% da carga limite de ruptura identificada no teste anterior. A norma ASTM F1624 exige no mínimo três testes, porém, vários testes podem ser feitos até se atingir a precisão desejada.

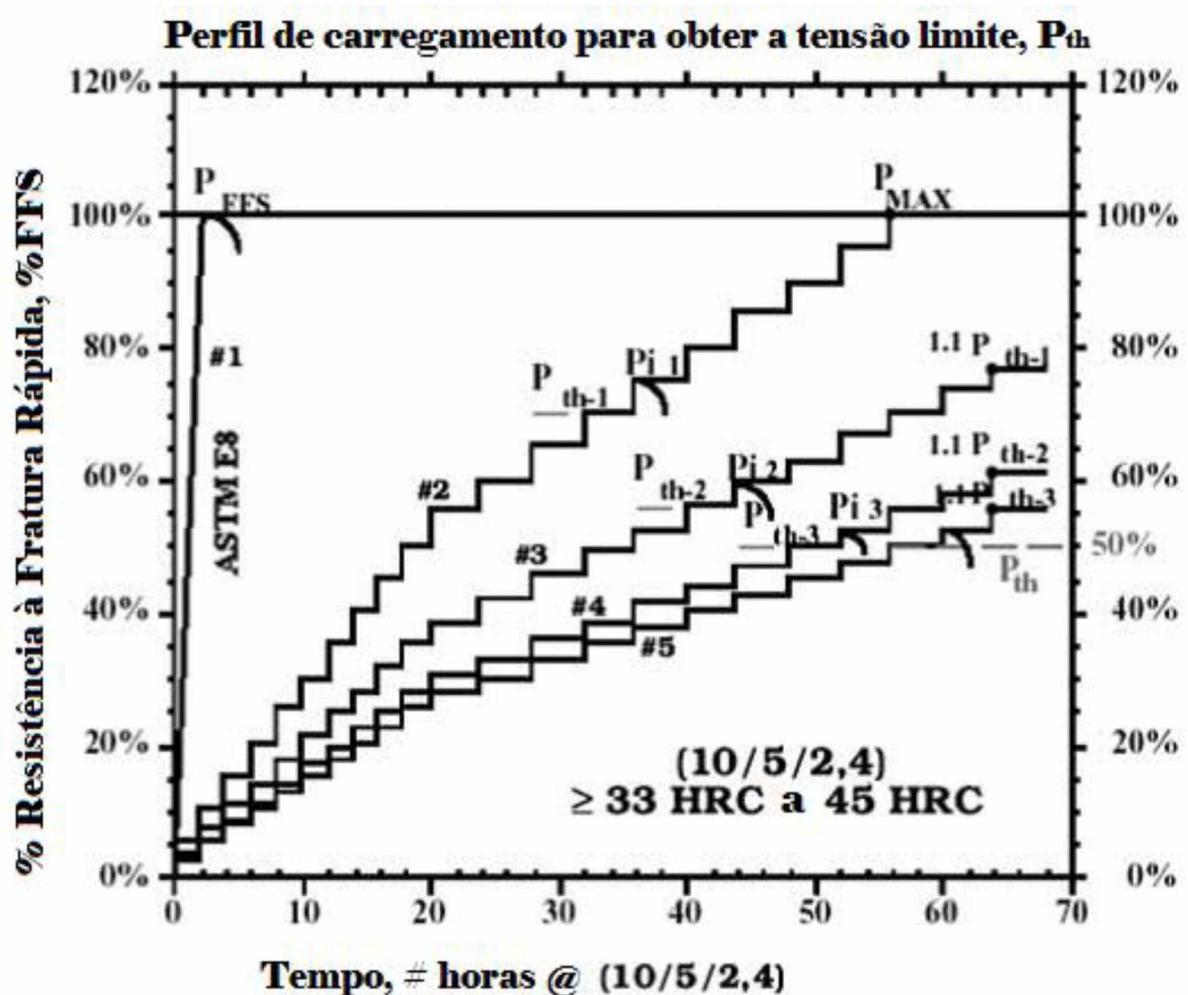


Figura 2.19 - Perfil da carregamento (10/5/2,4) (Norma ASTM F1624, 2009), modificado

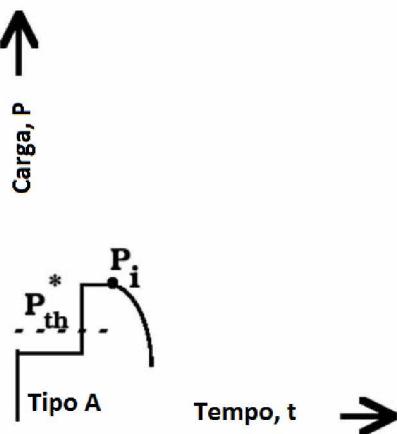


Figura 2.20 - Queda da tensão causada pela abertura de uma trinca (Adaptado da Norma ASTM F1624, 2009)

Kernion *et al.* (2014) utilizaram a técnica de RSL em amostras de superligas de níquel utilizadas na indústria de óleo e gás para avaliar a susceptibilidade deste material à sofrer fragilização por hidrogênio. Ele avaliou as amostras em duas condições distintas: amostras previamente carregadas com hidrogênio (fragilização por hidrogênio já presente na amostra) e amostras carregadas com hidrogênio sob potencial catódico durante o ensaio (fragilização por hidrogênio resultante do meio externo). Eles realizaram também ensaios em amostras não carregadas com hidrogênio para obter um valor de referência para a tensão de ruptura. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tab. 2.1 abaixo.

Tabela 2.1 - Resultados obtidos do ensaio de RSL para amostras de UNS N07718 em três diferentes condições de tratamento térmico (KERNION *et al.*, 2014), modificado

Condition	K _{NE} (ksi/in)		K _{NE-I} (ksi/in)				K _{NE-I} (ksi/in)		
	1h	3.5h	-1.4V _{SCF} /1h		-1.1V _{SCF} /3.5h		1h	1h	10h
	%1 LD	%1 LD	%1 LD	Devia.	%1 LD	Devia.	%1 LD	Devia.	Devia.
UNS N07718 120ksi YS	65.0	63.8	44.3	40.4	60.3	61.9	39.1	35.0	36.3
UNS N07718 140ksi YS	63.4	65.9	39.2	31.6	62.9	47.4	30.5	27.1	27.6
UNS N07718 150ksi YS	98.8	74.8	T.B.D.	T.B.D.	37.7	33.9	22.8	22.8	22.5

- **1% LD:** a tensão de inicio da trinca corresponde ao passo imediatamente anterior ao passo onde se tem uma queda de 1% na força de carregamento da amostra
 - **Devia:** a tensão de inicio da trinca corresponde ao passo imediatamente anterior ao passo onde se tem uma queda mais expressiva na força de carregamento da amostra
 - **K_{NE}:** fator de intensificação de tensão limite de inicio da trinca da amostra não carregada com hidrogênio
 - **K_{NE-I}:** fator de intensificação de tensão limite de inicio da trinca da amostra carregada com hidrogênio durante o ensaio
 - **K_{NE-I}:** fator de intensificação de tensão limite de inicio da trinca da amostra previamente carregada com hidrogênio

Além de permitir analisar a influência de diferentes parâmetros de ensaio na susceptibilidade à fragilização por hidrogênio dos aços, o ensaio de RSL possui inúmeras vantagens com relação aos outros métodos descritos. Suas principais vantagens são: simplicidade de montagem e operação, realização de ensaios de flexão e de tração, bem como realização de ensaios em amostras de geometrias diferentes, como seção quadrada, redonda e até mesmo parafusos.

Além disso, o que torna o RSL atrativo é o tempo de realização do ensaio, que é bem menor do que o dos outros, tendo-se resultados tão representativos quanto os dos outros métodos. Comparando o ensaio RSL com o ensaio BTD, por exemplo, que leva no mínimo 720 horas para fornecer resultados expressivos, o RSL consegue os mesmos resultados em até 60 horas. Baboian (2005) mostra uma comparação dos ensaios RSL e BTD, realizados pela *LRA Laboratories*, numa amostra revestida com Zinco. Esta comparação pode ser vista na Fig. 2.21.

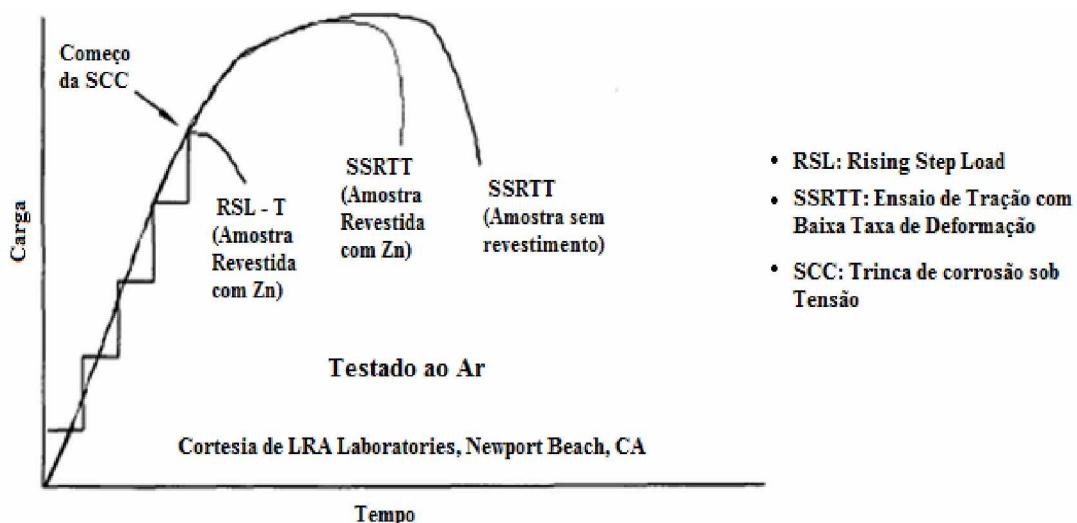


Figura 2.21 - RSL versus Ensaio de Tração BTD (BABOIAN, 2005), modificado

2.2.4. Outros Métodos de Análise da SFH

Além dos métodos citados, existe uma variedade de outros testes que também possibilitam a avaliação da SFH de materiais metálicos. A seguir são citados brevemente alguns destes métodos.

Carga Constante: Este teste é conduzido aplicando um esforço mecânico numa amostra com uma taxa de carregamento constante até que ocorra a fratura, podendo durar de 200 a 5000 horas (LINDVAL, 2009). Nesse ensaio, deve-se utilizar um sensor capaz de medir a abertura da trinca para detectar o crescimento da mesma durante o ensaio. Com

isso, calcula-se o fator de intensificação de tensão (K_I) a partir de uma expressão baseada numa análise de tensão linear-elástica (ASTM E1681, 2003). A Fig. 2.22 ilustra um equipamento utilizado para realizar testes de carga constante numa amostra entalhada e exposta a um meio agressivo.

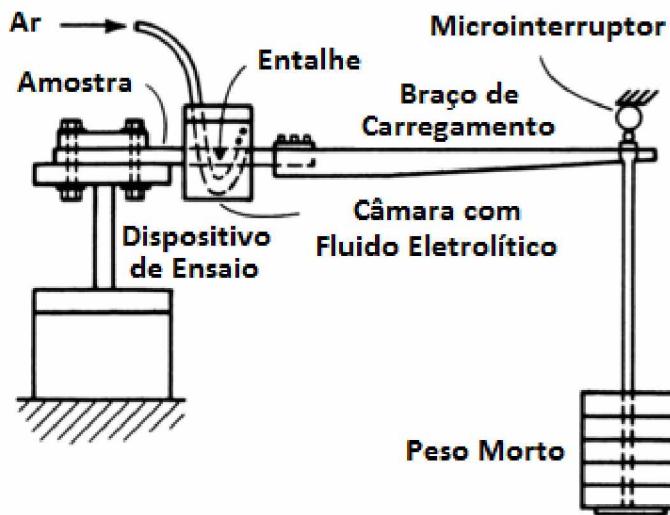
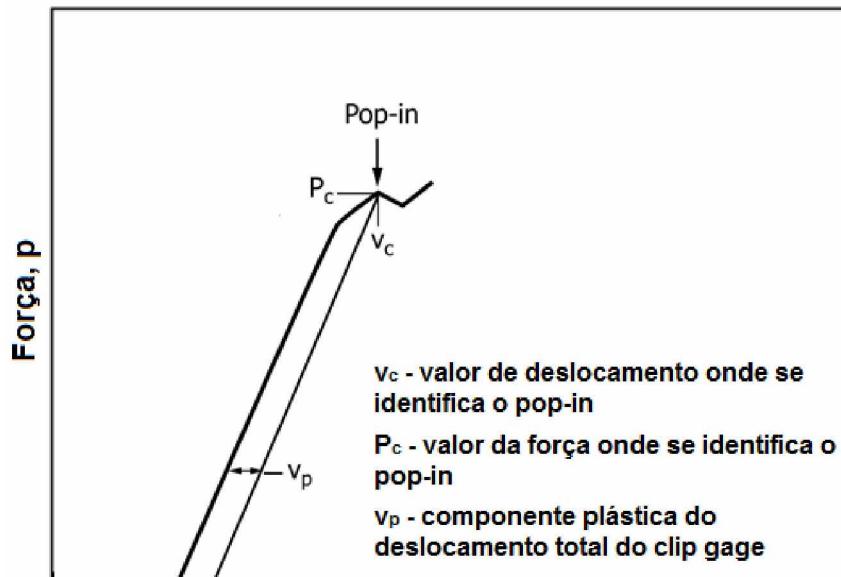


Figura 2.22 – Configuração típica de um equipamento para ensaios com carga constante (ASM HANDBOOK, 2003)

Crack-Tip Opening Displacement (CTOD): Este método baseia-se na medição do deslocamento da abertura da trinca como parâmetro crítico do processo de fratura (FORTES, 2003). Ele consiste em carregar mecanicamente uma amostra entalhada com uma pré-trinca de fadiga, induzindo dois tipos de respostas: (1) crescimento instável de trinca, referido como *pop-in*; (2) crescimento estável da trinca (ASTM E1820, 2015). Este método de teste necessita de uma medição contínua da força pelo deslocamento da linha de carga ou deslocamento da abertura da trinca que é medido por meio de um *clip gage*. O *pop-in* é identificado como sendo uma descontinuidade na curva de força versus deslocamento do *clip gage*, caracterizada por um aumento repentino do deslocamento e uma queda na força, como pode ser visto na Fig. 2.23 (ASTM E1820, 2015).



Deslocamento do *clip gage*, v_g

Figura 2.23 – Exemplo de uma curva de força versus deslocamento do clip gage (ASTM E1820, 2015), modificado

O ensaio realizado para determinação do CTOD é o ensaio de flexão a três pontos, numa amostra do tipo SE(B), com um *clip gage* acoplado, como mostra a Fig. 2.24.

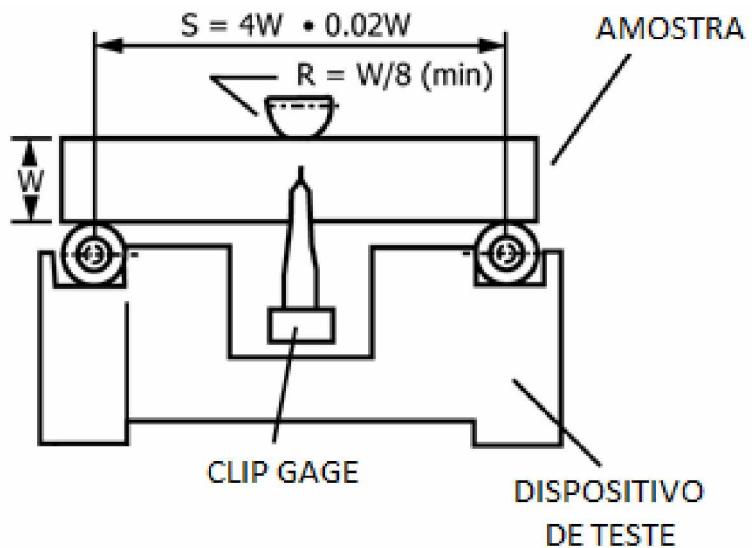


Figura 2.24 – Montagem do equipamento de teste CTOD (ASTM E1820, 2015), modificado

O parâmetro CTOD é calculado através da seguinte equação (SILVA, 2009).

$$\delta = \frac{4K_I^2}{E \times \pi \times \sigma_{LE}}$$

Onde δ é o valor de CTOD; K_I é o fator de intensificação de tensão no modo I de solicitação; E é o módulo de elasticidade do material; σ_{LE} é a tensão limite de escoamento.

A partir do ponto onde se observa o pop-in na curva de força *versus* deslocamento do *clip gage*, calcula-se o parâmetro de CTOD crítico. O valor crítico de CTOD, dependendo do critério de falha que se utilize, pode ser interpretado como CTOD de início de propagação de trinca (CTOD de iniciação), ou o CTOD de início de propagação instável da trinca, ou o CTOD de carga máxima (FORTES, 2003).

Small Punch Test: Esta técnica consiste basicamente em deformar, por meio de um punção, uma amostra cujas bordas estão presas num dispositivo (CUESTA; ALEGRE, 2011). Propriedades mecânicas como dureza, limite de escoamento e limite de resistência à tração podem ser obtidas por meio desse ensaio (GUDURU *et al*, 2004).

Uma pequena amostra, geralmente discos de 10 mm de diâmetro e 0,5 mm de espessura, é deformada por meio de um punção de alta resistência, obtendo-se uma curva de força *versus* deslocamento do punção, como mostra a Fig. 2.25.

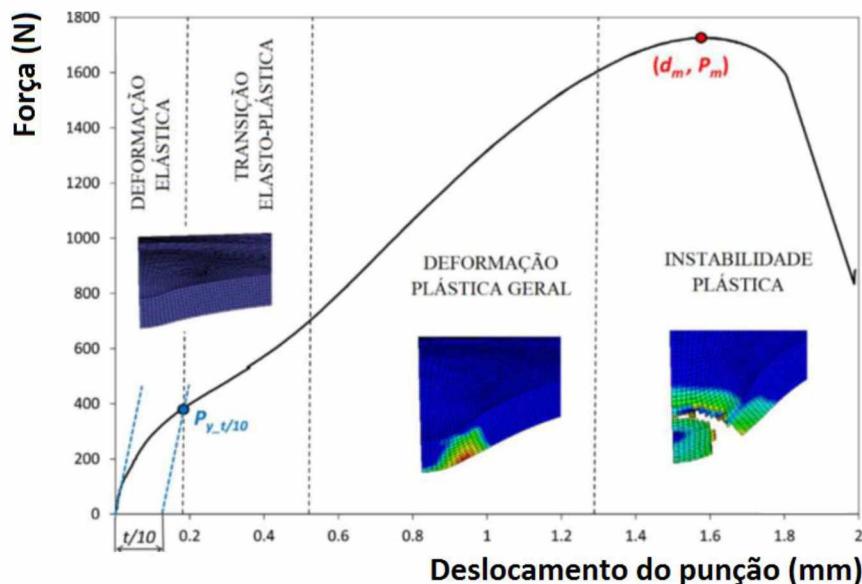


Figura 2.25 - Curva típica de um SPT para um aço estrutural (GARCÍA *et al*, 2015), modificado

Para se avaliar a fragilização por hidrogênio é realizado o ensaio SPT em amostras que podem ser previamente carregadas com hidrogênio ou carregadas durante o ensaio. Uma vez realizado o ensaio SPT nas amostras hidrogenadas, compara-se a curva de força *versus* deslocamento do punção e as propriedade mecânicas obtidas com aquelas obtidas

de uma amostra de mesmo material, porém livre de hidrogênio. A Fig. 2.26 mostra um exemplo de um ensaio SPT realizado para avaliar a fragilização pelo hidrogênio.

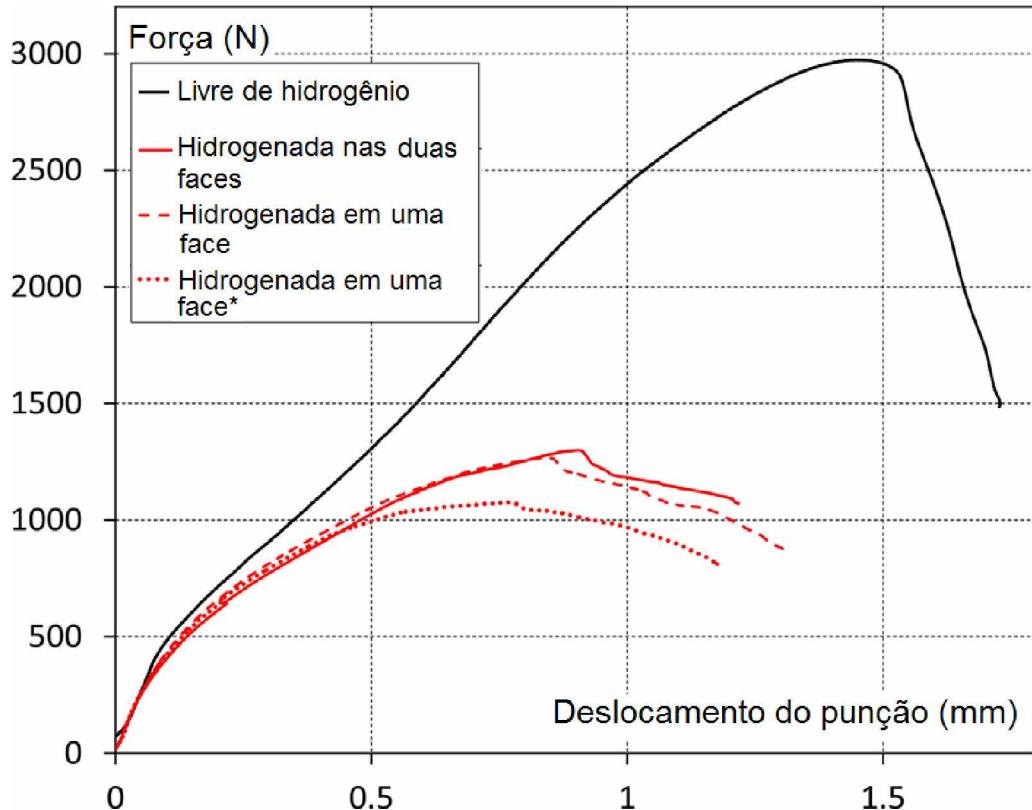


Figura 2.26 – Curvas SPT de amostras de CrMoV-2 em diferentes condições de carregamento com hidrogênio (GARCÍA *et al*, 2015), modificado

Double-Cantilever-Beam (DCB): Este método de teste possibilita a medição da resistência de materiais metálicos à propagação de trincas expressa em termos do fator de intensificação crítico ($K_{I\text{SSC}}$ para trinca de corrosão sob tensão e $K_{I\text{EC}}$ para casos mais gerais) usando um teste de mecânica da fratura de monitoramento da trinca (NACE Standard TM0177, 2005).

O ensaio DCB utiliza uma amostra com entalhe, podendo apresentar ou não uma pré-trinca de fadiga, como mostrada na Fig. 2.27. A amostra é então submetida a um esforço que tende a abrir a trinca na raiz do entalhe. Uma vez realizado o ensaio, pode-se obter a curva de força *versus* deslocamento e calcular o $K_{I\text{SSC}}$ ou $K_{I\text{EC}}$ a partir das dimensões da amostra e dos parâmetros do ensaio.

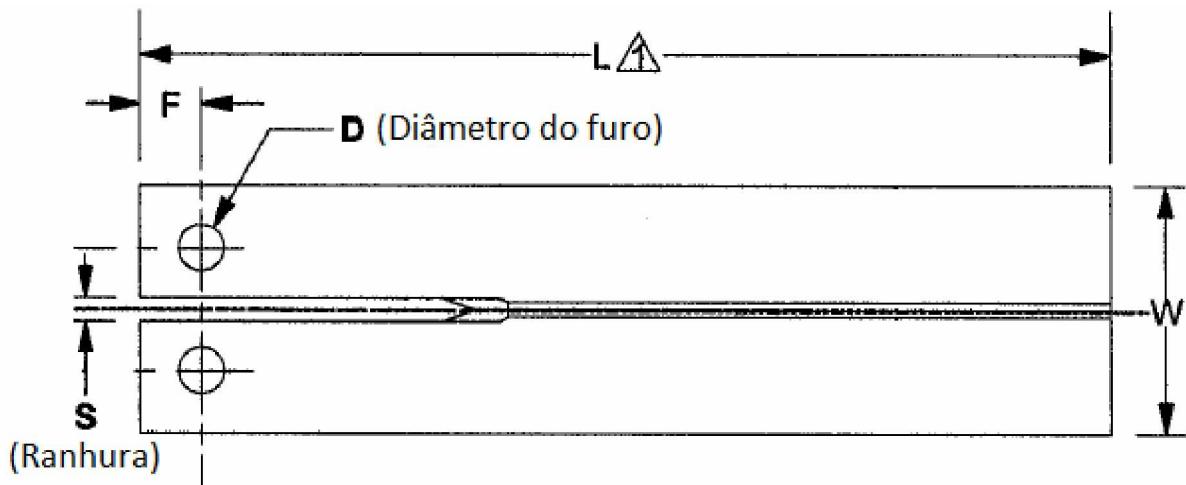


Figura 2.27 - Vista lateral da amostra utilizada no ensaio DCB (NACE Standard TM0177, 2005), modificado

2.3. Efeitos de Parâmetros de Teste na Susceptibilidade à Fragilização por Hidrogênio (SFH)

Diversos parâmetros contribuem para a fragilização pelo hidrogênio de aços, destacando-se condições relativas ao meio e à microestrutura. Dentre os parâmetros do meio destacam-se: temperatura de permeação, polarização catódica no caso de células eletroquímicas, íons presentes (solução) e respectiva concentração, taxa de renovação dos íons, dentre outros (NOZARI, 2002 e PARKINS, 1982). Dentre os efeitos da microestrutura destacam-se: dureza do material, tamanho do grão austenítico, microconstituintes, dentre outros (NANINGA, 2010). No presente trabalho é avaliado apenas o efeito da dureza do material e do potencial de difusão do hidrogênio nas amostras.

2.3.1. Efeito do Potencial Catódico Sobre a SFH

Fragilização por hidrogênio observada em aplicações como proteção catódica e eletrodeposição mostra que há uma relação entre o nível de polarização catódica a que o aço está submetido e a sua SFH. A polarização catódica, quando se está em meio aquoso, por exemplo, ambiente marítimo, favorece a reação de redução da água, gerando hidrogênio atômico na superfície do aço. A reação é favorecida à medida que o potencial torna-se mais catódico (NOZARI, 2002). Resultados da literatura (PARKINS *et al.*, 1982 e HONGCHI *et al.*, 2015) têm mostrado um aumento da SFH com o aumento do potencial catódico aplicado na amostra. Resultados obtidos por Parkins *et al.*, (1982) para amostras de diferentes tipos de aço de alta resistência mostraram que a polarização catódica

influencia no SFH até um certo nível. As Figs. 2.28 e 2.29 mostram a variação da SFH de dois tipos de aço de alta resistência em função do potencial catódico aplicado.

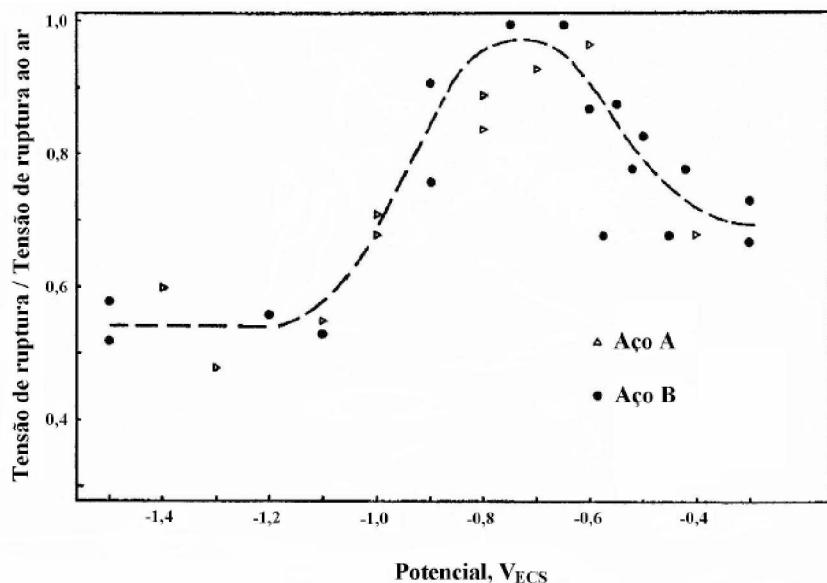


Figura 2.28 - Variação da carga de ruptura em meio agressivo em relação a carga de ruptura ao ar com o potencial catódico aplicado em dois diferentes aços de alto teor de carbono (Aço A: 0,85% de C e Aço B: 0,71% de C) (PARKINS, 1982), modificado

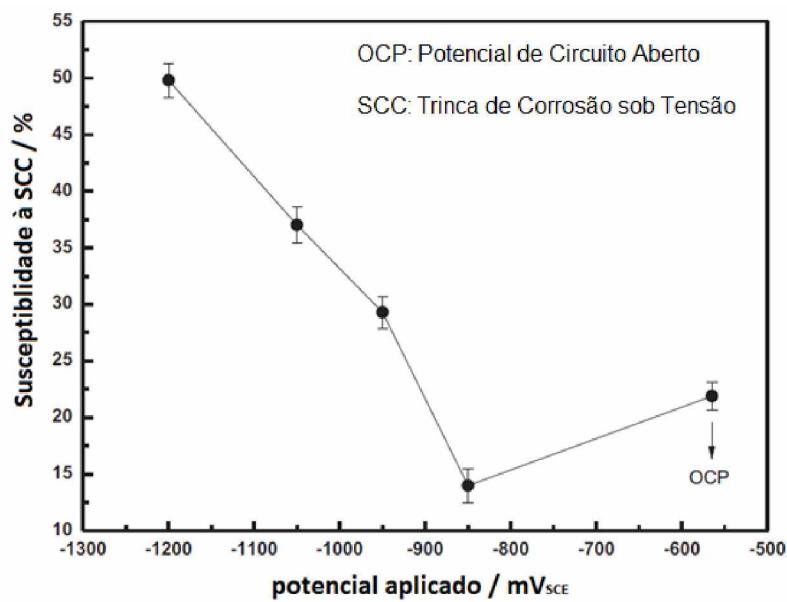


Figura 2.29 – Dependência da susceptibilidade à trinca de corrosão sob tensão do aço E690 em função do potencial elétrico aplicado, onde a susceptibilidade à SCC corresponde à perda na redução de área da amostra no ensaio de tração BTD. (HONGCHI *et al.*, 2015), modificado

O efeito do potencial catódico na SFH fica claro quando se observa as Figs. 2.22 e 2.23. Observa-se que após um certo valor, não há mais aumento na SFH dos aços testados pois, a partir deste valor, as armadilhas de hidrogênio já estão saturadas, não podendo aumentar mais a concentração de hidrogênio nos pontos onde há maior probabilidade de se nuclear uma trinca (NOZARI, 2002). Troiano (1960) afirma que o início da trinca é resultado de uma combinação de tensão mecânica e concentração de hidrogênio. Com uma queda na concentração de hidrogênio, mais força é necessária para poder iniciar a trinca, logo a SFH é menor.

2.3.2. Efeito da Dureza Sobre a SFH

A fragilização por hidrogênio é especialmente preocupante em aços de alta resistência, portanto de elevada dureza, pois, na presença do hidrogênio, sua resistência mecânica pode diminuir para valores menores do que seu limite de escoamento (ROSADO, 2011). Isso acontece porque a capacidade de se deformar plasticamente dos aços de alta resistência mecânica é menor e, por isso, sua capacidade de absorver as tensões geradas pela entrada de hidrogênio na sua microestrutura também diminui. Resultados recentes obtidos por Nanninga (2005) e Nanninga *et al.* (2010), através de testes tipo RSL, mostraram uma forte relação entre a dureza do aço e a sua SFH.

Aços de dureza mais elevada apresentam uma microestrutura mais desorganizada e repleta de discordâncias. Como a capacidade do aço de se deformar plasticamente está diretamente relacionada com o movimento de suas discordâncias, quanto maior a sua quantidade, menos elas se movimentarão, uma vez que uma acaba travando o movimento da outra. Quando o hidrogênio entra na microestrutura do aço, ele introduz tensões mecânicas internas que, quando não aliviadas pela deformação plástica, resultam em pontos de concentração de tensão. Logo, esses pontos servirão como locais preferencias para a nucleação de uma trinca. Nanninga *et al.* (2010) observaram esse efeito em ensaios do tipo RSL com amostras entalhadas. Em seus experimentos, Nanninga *et al.* (2010) observaram que a tensão de propagação de trinca na região do entalhe em amostras ensaiadas no RSL ao ar livre aumentava com aumento da dureza, mas, por outro lado, quando o ensaio era realizado em meio agressivo, essa tensão diminuía para amostras mais duras. A elevada ductilidade do material diminui a concentração de tensão na raiz do entalhe causada pelo hidrogênio, fazendo com que a força necessária para rompê-las fosse maior (NANNINGA *et al.*, 2010). Seus resultados podem ser vistos nas Figs. 2.30 e 2.31.

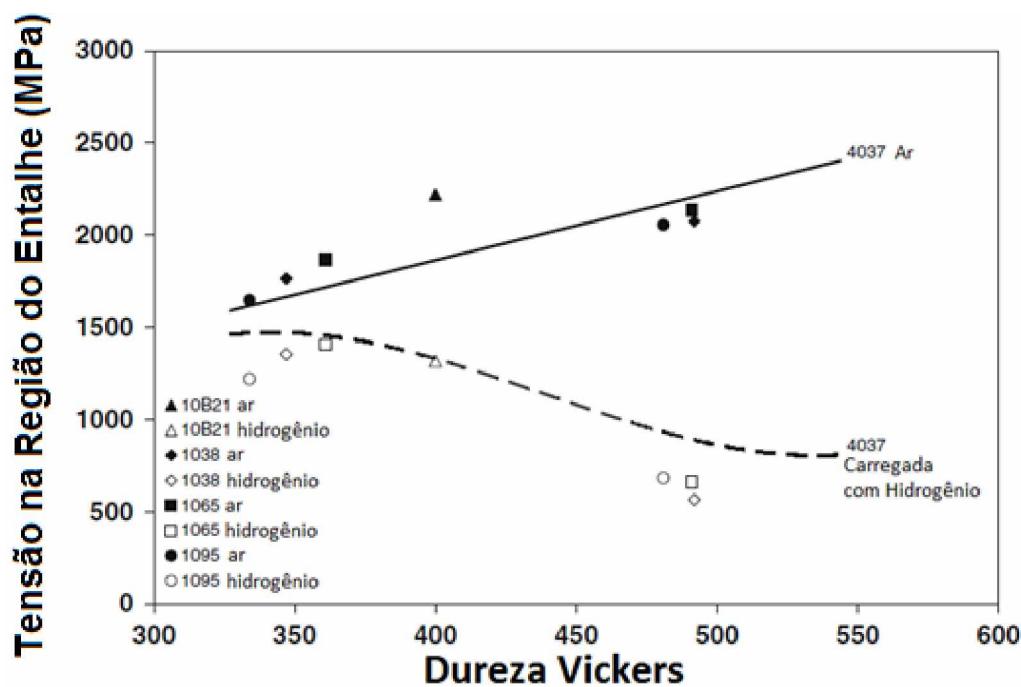


Figura 2.30 - Tensão no entalhe de amostras ao ar e carregada com hidrogênio mostrando o efeito da dureza na fragilização por hidrogênio de amostras temperadas e revenidas (NANNINGA *et al.*, 2010), modificado

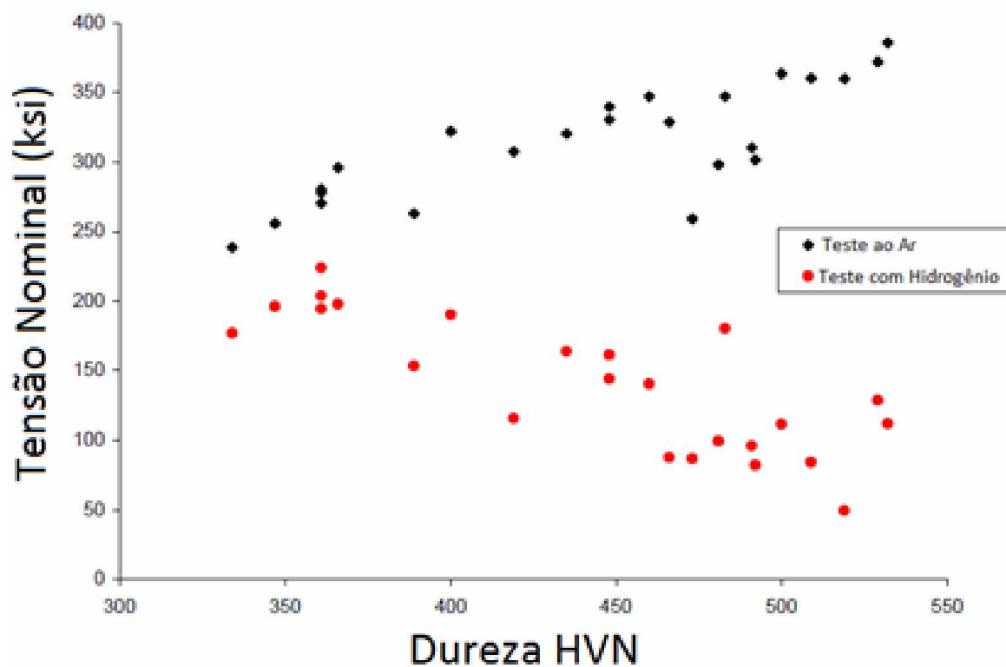


Figura 2.31 – Variação na tensão de ruptura dos aços 10B21, 1038, 1065, 1095, 1541, 4037 e 4140 em diferentes condições de tratamento térmico, testados ao ar e com hidrogênio (NANNINGA, 2005), modificado

CAPÍTULO III

CONCEPÇÃO, PROJETO, CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE RSL

Neste capítulo é descrito todo o desenvolvimento do equipamento, desde a sua concepção até os ensaios de validação. Inicialmente são apresentados os critérios de projeto adotados, os cálculos e simulações realizados para dimensionar os principais componentes do RSL. Também é apresentado o procedimento de medição e cálculo das incertezas de medição associadas às variáveis presentes no cálculo da tensão mecânica na amostra. Por fim é descrito o ensaio realizado para validar o modelo matemático para o cálculo da tensão mecânica na amostra. Destaca-se aqui, que a instrumentação e controle do equipamento não fazem parte da presente dissertação.

3.1. Concepção

Nesta etapa é apresentada a ideia inicial do equipamento e os parâmetros de projeto adotados. Como principais definições foram adotadas as seguintes premissas:

1. O equipamento de RSL deverá ser capaz de realizar o ensaio de flexão a quatro pontos em meio assistido, de acordo com a norma ASTM F1624;
2. Os ensaios deverão ser realizados em amostras de seção quadrada de 30 x 30 mm² com comprimento de 200 mm e um entalhe em “V” com ângulo de abertura de 90°, profundidade de 3,6 mm e raio da ponta de 0,25 mm;
3. Como parâmetro de projeto para dimensionamento do equipamento e determinação dos esforços solicitantes foi estabelecido o limite de resistência máximo das amostras de 217 ksi (1500 MPa);

4. O RSL deverá dispor de uma cuba para contenção do eletrólito que será utilizado na realização de ensaios em meio assistido;
5. O RSL deverá possuir um sistema de recirculação e resfriamento do fluido eletrolítico.

3.2. Projeto Mecânico

Este tópico contempla a etapa de projeto do RSL. Nele é apresentado o dimensionamento dos principais componentes do equipamento, que foi realizado através do uso do software Inventor® e do ANSYS® para a simulação em elementos finitos. Também são descritos os memoriais de cálculo para se determinar os esforços reativos e calcular a tensão mecânica na amostra. Inicialmente, para o dimensionamento do equipamento e para a correta seleção do atuador e do transdutor de força foram calculadas as forças atuantes no corpo de prova.

A Fig. 3.1 ilustra através de um croqui do equipamento RSL as forças atuantes na amostra.

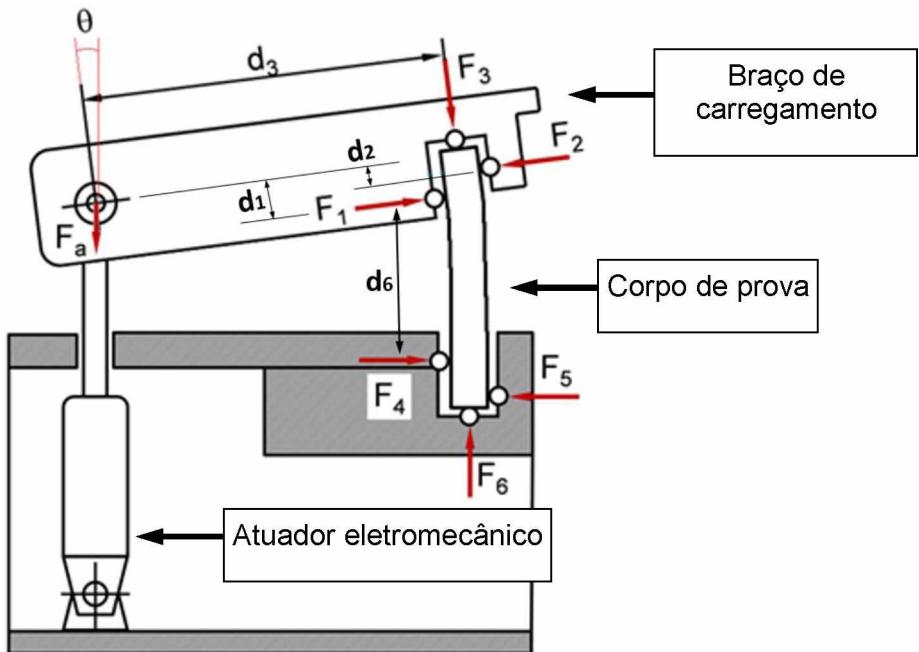


Figura 3.1 - Croqui do equipamento RSL com ilustração das forças atuantes no corpo de prova devido à aplicação da força F_a

As forças F_1 a F_6 podem ser determinadas analiticamente. O sistema isostático permite fácil solução do sistema de equações, mostrado no APÊNDICE I. As Eqs. de (3.1) a (3.3) possibilitam a determinação das forças atuantes no corpo de prova e, a partir destas

forças, a determinação da máxima tensão aplicada ao corpo de prova, como pode ser visto na Eq. (3.4) (PILKEY *et. Al.*, 2008).

$$F_1 = \frac{F_a(-d_2 \sin \theta + d_3 \cos \theta)}{(d_1 + d_2)} \quad (3.1)$$

$$F_2 = \frac{F_a(d_1 \sin \theta + d_3 \cos \theta)}{(d_1 + d_2)} \quad (3.2)$$

$$F_3 = F_a \cos \theta \quad (3.3)$$

$$\sigma_{projeto} = F_a \left[\frac{3}{bh^2} (2d_1 \sin \theta + 2d_3 \cos \theta + d_6 \sin \theta) - \frac{\cos \theta}{bh} \right] \quad (3.4)$$

Onde:

- $\sigma_{projeto}$ - Tensão nominal na direção longitudinal da amostra;
- F_a - Força realizada pelo atuador;
- F_1 a F_6 - Forças atuantes no corpo de prova;
- d_1 e d_2 - Distâncias verticais das forças F_1 e F_2 em relação ao eixo de giro do bração de flexão;
- d_3 - Distância horizontal do eixo de giro do braço de flexão em relação ao eixo central do corpo de prova;
- d_6 - Distância vertical entre os centros do rolete mais abaixo do braço de carregamento e o rolete mais acima do suporte inferior da amostra;
- b e h - Largura e profundidade da seção transversal da amostra;
- θ - Ângulo de giro do braço atuador.

A tensão calculada a partir da Eq. (3.4) não leva em consideração o efeito da concentração de tensão devido ao entalhe no corpo de prova. Esta foi uma condição conservadora adotada para a especificação do atuador, implicando num atuador com capacidade de força F_a superior à força necessária para atingir $\sigma_{projeto}$ numa amostra entalhada. Este dimensionamento proporciona ao equipamento uma maior flexibilidade em relação ao tipo de entalhe utilizado no corpo de prova.

Para o cálculo da capacidade de carga do atuador eletromecânico foi utilizada a Eq. (3.4). Neste cálculo, a tensão de projeto utilizada foi de 1500 MPa (valor máximo de limite de resistência do material a ser ensaiado), conforme estabelecido na concepção do

equipamento. No cálculo da tensão mecânica de projeto, o valor do ângulo θ foi igual a zero, pois para este valor tem-se que a força F_a é máxima para que se possa atingir a tensão mecânica de projeto estabelecida. A distância d_3 do braço de flexão foi de 400 mm, e as distâncias verticais d_1 e d_2 do braço valem, respectivamente, 12 mm e 24 mm. As dimensões B e A , referentes à seção transversal da amostra de seção quadrada são iguais a 30 mm. Assim, através de Eq. (3.4), encontrou-se o valor de F_a igual a 17,09 kN.

3.2.1. Especificação do Atuador Linear

O atuador linear especificado para o equipamento RSL tem capacidade de carga máxima de 20 kN. O equipamento selecionado apresenta as seguintes características:

- Curso de 200 mm, com sensores fim de curso do tipo indutivo;
- Servo motor carcaça 80 com *drive* ASDA-A2;
- Fonte de alimentação de 24 V dc;
- Redutor planetário de precisão com redução de 15:1;
- Articulação traseira e olhal na haste;
- *Kit* de montagem para célula de carga.

A Fig. 3.2 ilustra o atuador especificado e os principais dispositivos mecânicos. A capacidade de carga máxima do atuador especificado é 17% superior ao valor calculado de projeto.

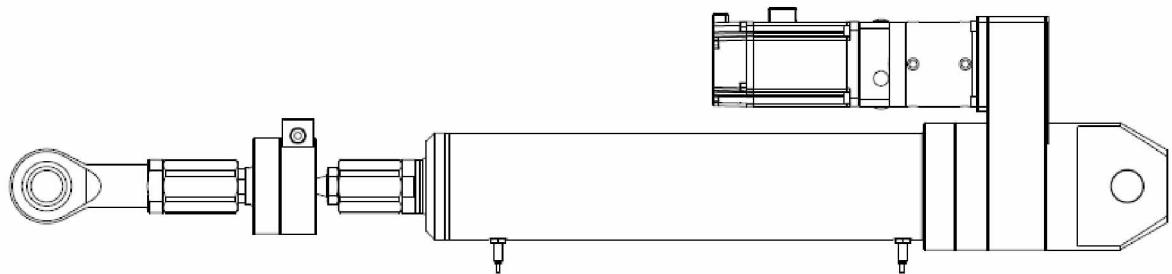


Figura 3.2 - Atuador eletromecânico, curso de 200 mm e carga máxima de 20 kN

Para a definição do curso da haste do atuador foi realizado um trabalho de otimização junto à empresa fornecedora. O objetivo era conseguir um atuador com o maior curso livre possível e um menor tamanho do atuador, para que o mesmo pudesse ser alocado de forma adequada à bancada do equipamento. Neste sentido, foi conseguido um curso livre da haste de 200 mm. O atuador possui um comprimento de 1020 mm do atuador na posição

totalmente recuado, comprimento este que já leva em consideração o comprimento adicionado pela montagem da célula de carga no atuador. Isso possibilita a otimização da altura do equipamento.

A Fig. 3.3 ilustra a variação da máxima tensão no corpo de prova em função do ângulo θ para uma força F_a de 20 kN. Conforme mencionado anteriormente, o valor da tensão é mínimo para a posição θ igual a zero, que corresponde à posição horizontal do braço de carregamento. Nota-se dessa figura uma relação de segundo grau entre o ângulo θ e a tensão (coeficiente de correlação igual a 1). Adicionalmente, destaca-se que a variação máxima da tensão é de 40 MPa, o que corresponde a uma variação percentual de aproximadamente 2,3 %.

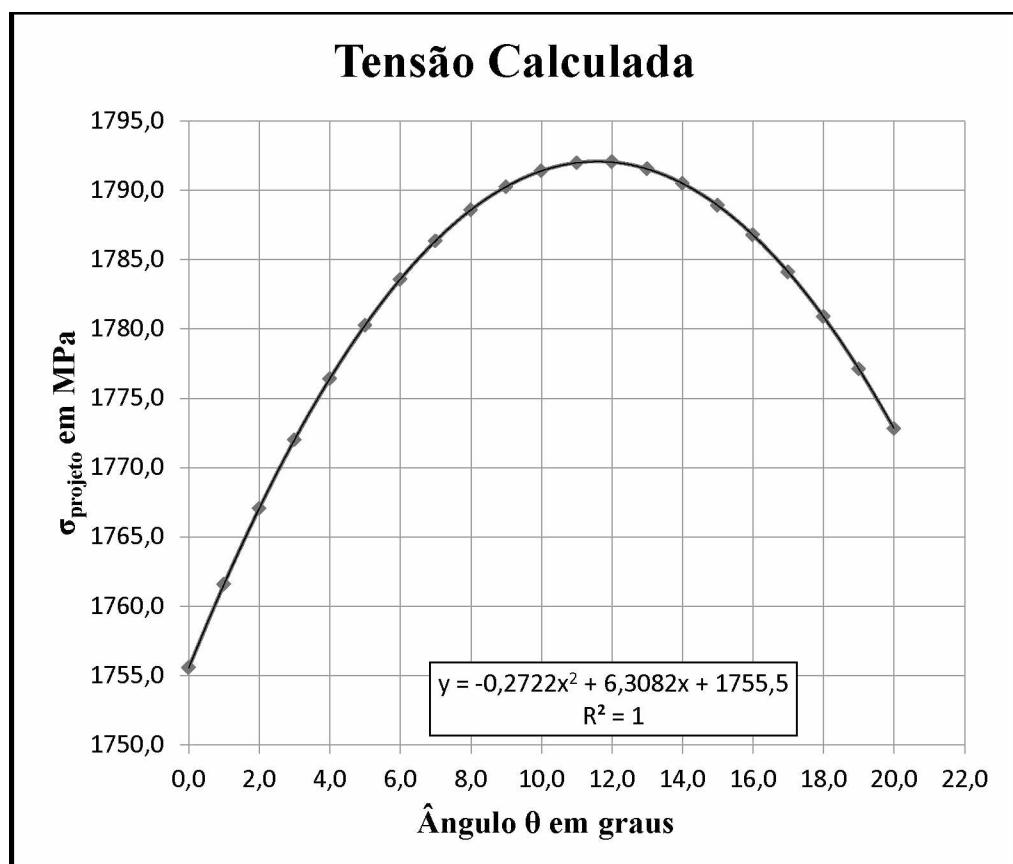


Figura 3.3 - Variação da tensão no corpo de prova em função do ângulo θ para a força de 20 kN

Com base no atuador eletromecânico especificado, com capacidade de força máxima F_a igual 20 kN e, a partir das Eqs. (3.1) a (3.3), as forças máximas atuantes na amostra foram, então, calculadas. Os respectivos valores são apresentados a seguir.

$$F_1 = F_4 = \frac{20 \times 10^3 (-12 \times 10^{-3} \times \sin 0^\circ + 400 \times 10^{-3} \times \cos 0^\circ)}{(24 \times 10^{-3} + 12 \times 10^{-3})} = 222,22 \text{ kN}$$

$$F_2 = F_5 = \frac{20 \times 10^3 (24 \times 10^{-3} \times \sin 0^\circ + 400 \times 10^{-3} \times \cos 0^\circ)}{(24 \times 10^{-3} + 12 \times 10^{-3})} = 222,22 \text{ kN}$$

$$F_3 = F_6 = 20 \times 10^3 \times \cos 0^\circ = 20000 \text{ N} = 20 \text{ kN}$$

3.2.2. Projeto do Braço de Carregamento

O braço de carregamento é o dispositivo mecânico responsável por transferir os esforços solicitantes à amostra. Quando tencionado, o braço executa um movimento plano linear e um giro no mesmo plano do deslocamento, de tal forma a exercer sobre a amostra uma flexão e compressão. Para a concepção do braço de carregamento foram considerados os seguintes fatores: resistência mecânica, deflexão e o peso próprio. Durante o ensaio, o braço deve suportar as reações nos apoios da amostra sem sofrer deformação elástica excessiva na região dos roletes. Além disso, o peso próprio do braço deve influenciar o mínimo possível no cálculo das tensões na amostra e permitir uma fácil movimentação pelo operador da máquina durante a movimentação do braço para posicionamento da amostra.

Para o dimensionamento do braço foram realizadas duas simulações em elementos finitos com diferentes condições de contorno. Uma dessas simulações foi realizada com o objetivo de melhor determinar as tensões provenientes das reações no apoio das amostras (Fig. 3.4(a)). Nesta condição, as forças foram alocadas nos apoios e o braço engastado na região dos rolamentos, ou seja, na posição 1. Na outra configuração, para avaliar a deformação do braço na carga máxima de 20 kN (Fig. 3.4(b)), o engaste foi colocado nas posições 2, 3 e 4 e a força aplicada na região dos rolamentos, posição 1. Ambas as simulações foram realizadas utilizando o critério de von Mises.

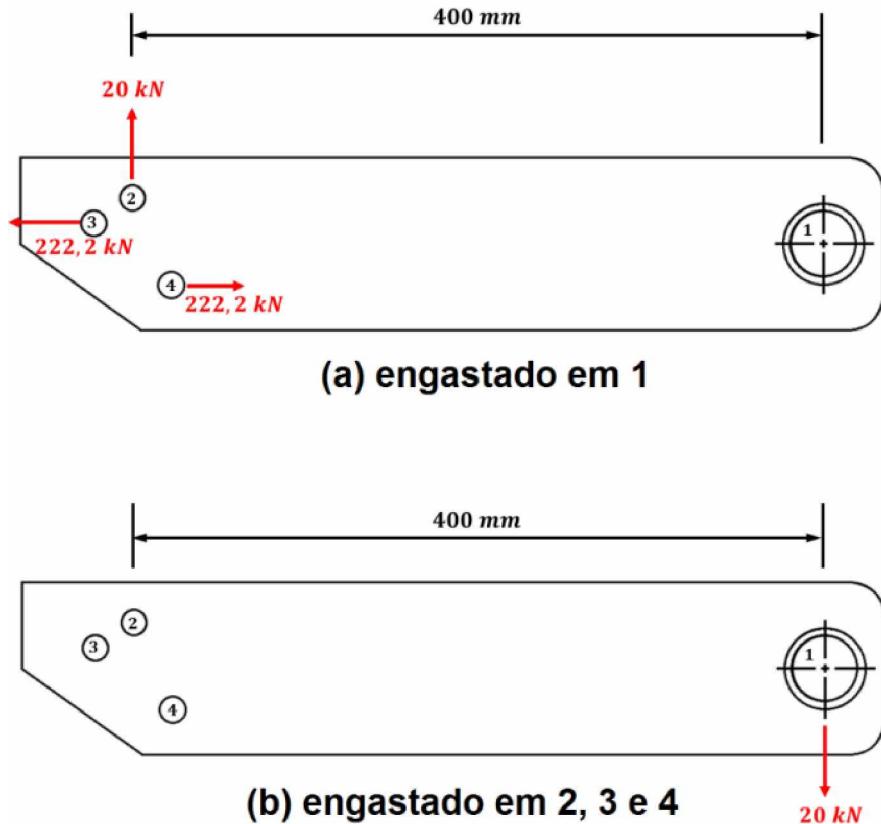


Figura 3.4 - Condições de contorno adotadas na simulação em elementos finitos do braço de carregamento: (a) avaliação das tensões nos apoios da amostra e (b) avaliação da rigidez do braço

Nas simulações, dois tipos de materiais foram avaliados para fabricação do braço, sendo um deles o aço inoxidável martensítico AISI 420, com limite de escoamento de 515 MPa e dureza de 373 HV. O outro material foi o alumínio aeronáutico 7075-T6, com limite de escoamento de 503 MPa e dureza de 175 HV.

Na simulação computacional com o AISI 420, as tensões observadas na região dos roletes apresentaram valores médios de 320 MPa e deflexão máxima na região dos rolamentos de 0,33 mm, como mostrado na Fig. 3.5.

Na simulação com o alumínio 7075-T6, a tensão média na região dos roletes foi de 350 MPa e a deflexão máxima de 0,92 mm (ver Fig. 3.6). A massa do braço atuador confeccionado no AISI 420 foi de 31 kg e no alumínio 7075-T6 a massa foi de 11 kg.

Os dois materiais avaliados atendem as condições de tensões do projeto. Contudo, como era esperado, a deflexão do braço de carregamento confeccionado em alumínio é cerca de três vezes superior à observada para o AISI 420. Isso se deve ao fato de que a rigidez do alumínio é apenas cerca de 1/3 da rigidez do aço. Porém, a massa mais baixa do braço em alumínio torna a utilização deste material um forte atrativo.

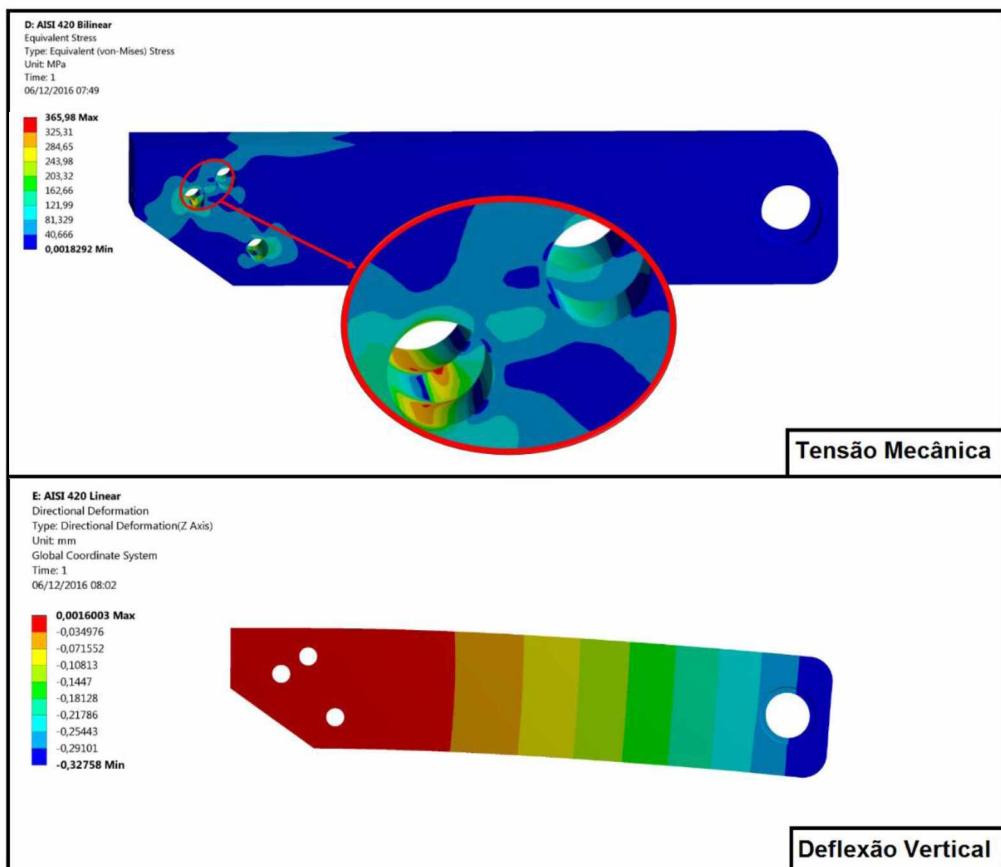


Figura 3.5 – Resultados da simulação do braço de carregamento com aço inoxidável 420

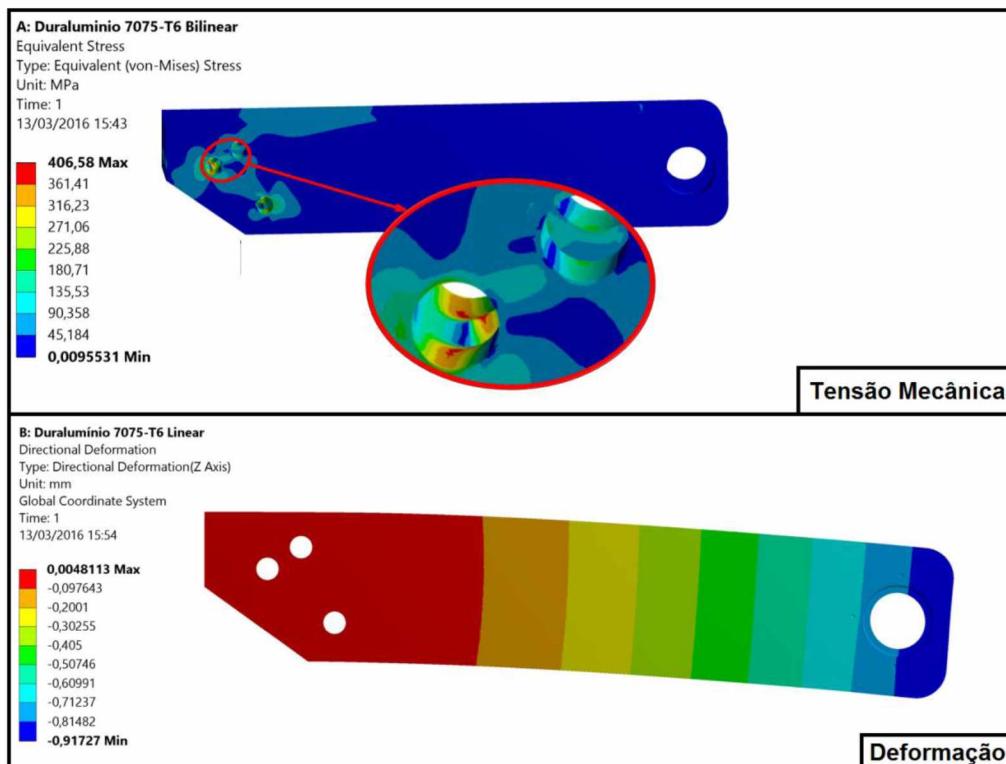


Figura 3.6 – Resultado da simulação do braço de carregamento com alumínio 7075-T6

Para avaliar o efeito da menor rigidez do braço de carregamento em alumínio no cálculo da tensão na amostra (Eq. (3.4)), o ângulo de rotação (apoio 1) da Fig. 3.4 (b) foi calculado. Através do método analítico foi encontrado um ângulo de rotação de $0,15^\circ$ do apoio. Deste modo, na determinação da tensão na amostra, o ângulo de rotação introduzirá um erro de 0,05% no cálculo da tensão, assumindo um carregamento com a carga máxima do equipamento. Devido a este baixo valor de erro e à baixa massa do braço de carregamento, o alumínio aeronáutico 7075-T6 foi selecionado como o material a ser utilizado na fabricação do equipamento. O braço de carregamento ilustrado na Fig. 3.7 possui dimensões totais de $500 \times 105 \times 100 \text{ mm}^3$ (comprimento x largura x altura).

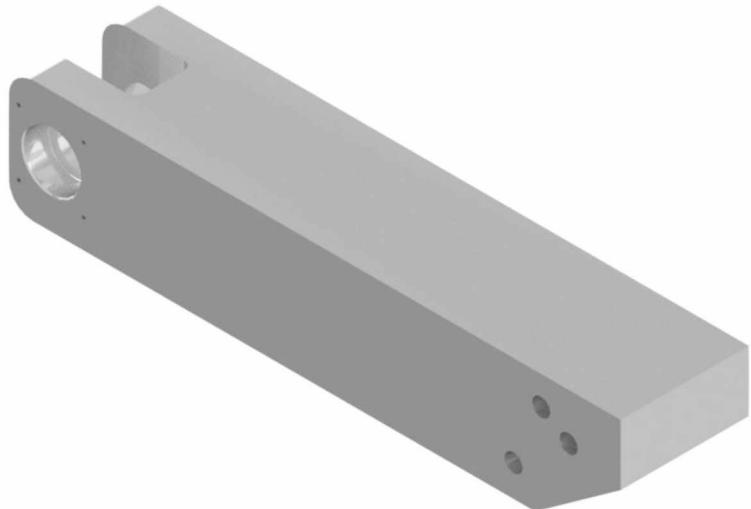


Figura 3.7 – Ilustração do braço de carregamento

3.2.3. Dimensionamento dos Rolletes e do Sistema de Fixação da Amostra

Os roletes de fixação do corpo de prova têm a função de apoiar e transferir os esforços à amostra durante o ensaio. A Fig. 3.8 mostra de forma esquemática o sistema de fixação da amostra. Nota-se nesta figura que o corpo de prova é apoiado entre seis roletes, de tal forma que os contatos entre o corpo de prova e o sistema de fixação ocorrem através de superfícies planas contra cilindros.

Durante o ensaio, o braço de carregamento submete a amostra à flexão fazendo com que os roletes experimentem um esforço de compressão. Para o dimensionamento dos roletes uma simulação em elementos finitos foi realizada utilizando um modelo simplificado para o contato entre o rolete mais solicitado e o corpo de prova. As Fig. 3.9 e 3.10 mostram, respectivamente, a montagem da amostra no equipamento e as condições de contorno utilizadas na simulação dos esforços mecânicos nos roletes. Inicialmente, utilizou-se o aço inoxidável AISI 304 como material do rolete, visto que os roletes inferiores necessitam de

resistência à corrosão por estarem imersos em um banho eletrolítico. O diâmetro avaliado do rolete foi de 15 mm. A análise das tensões no rolete foi realizada utilizando o critério de von Mises.

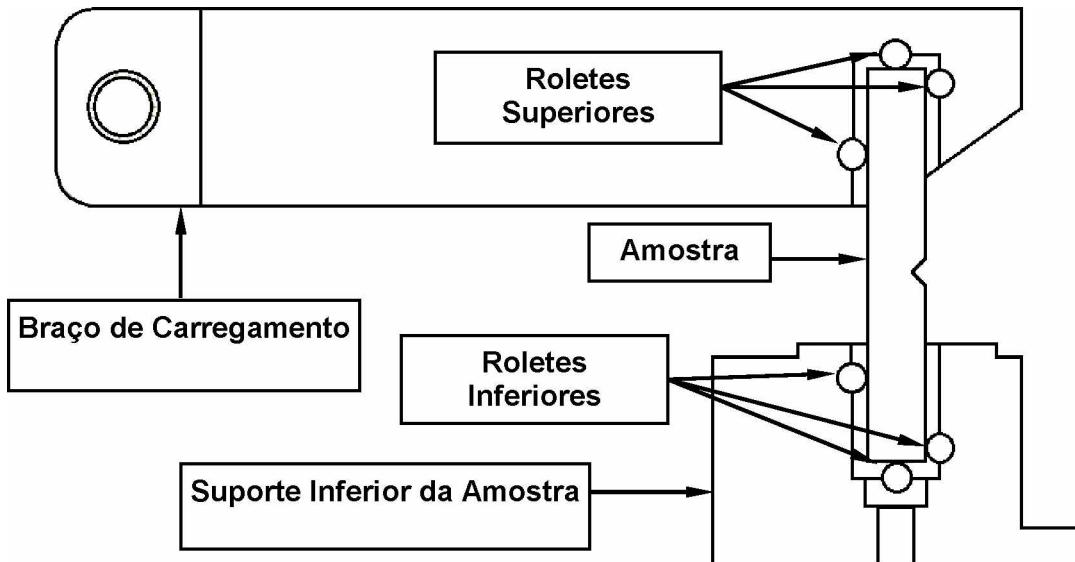


Figura 3.8 - Representação esquemática do sistema de fixação da amostra

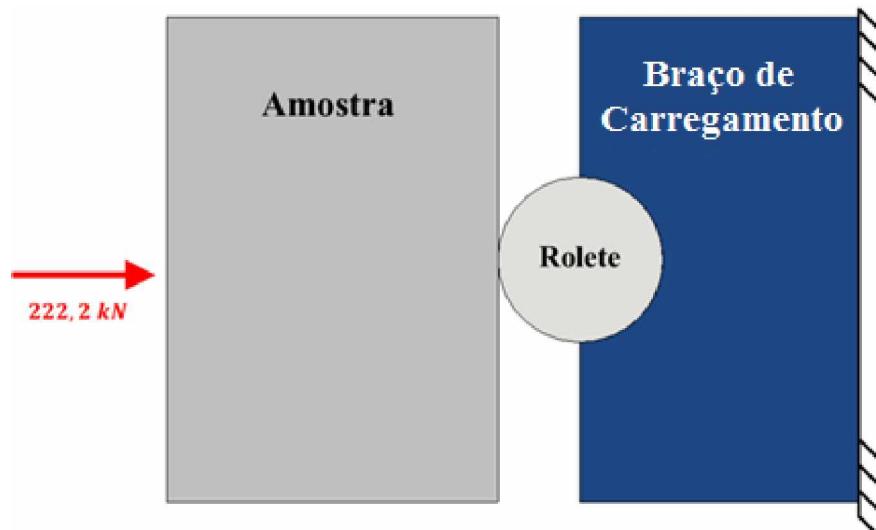


Figura 3.9 - Representação simplificada das condições de contorno entre a amostra e o rolete de fixação para a simulação em elementos finitos.

De acordo com a simulação, as tensões máximas ocorridas no rolete foram da ordem de 625 MPa, valor este superior ao limite de escoamento do aço inoxidável AISI 304 que é de aproximadamente 240 MPa (ver Fig 3.10). Devido à incapacidade do aço inoxidável AISI

304 de suportar as tensões de projeto, foi selecionado como alternativa o aço inoxidável AISI 420 na condição temperado e revenido, com tensão de escoamento de 1300 MPa.

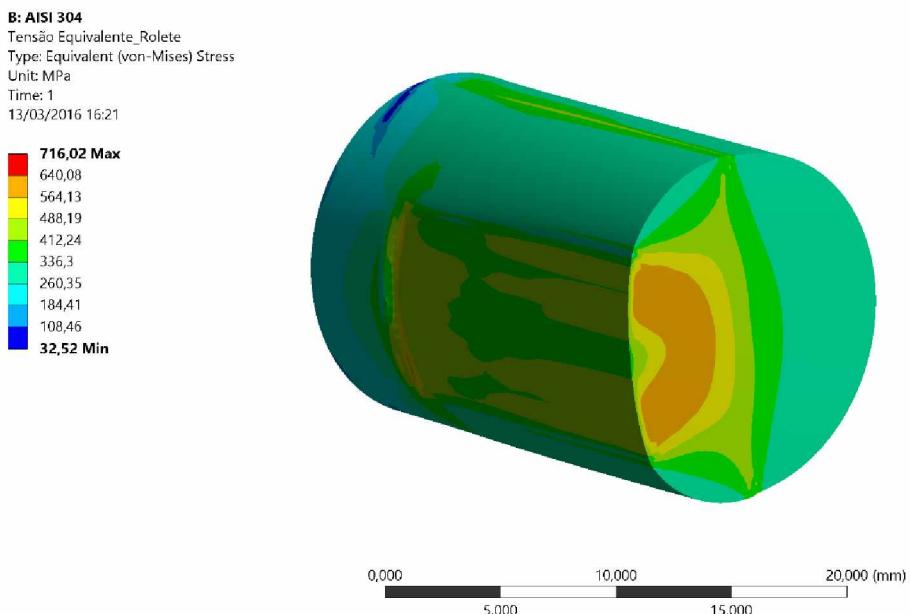


Figura 3.10 – Resultado da simulação de tensão mecânica no rolete

3.2.4. Projeto da Bancada Estrutural e do Suporte Inferior da Amostra

A estrutura metálica da bancada do RSL foi concebida com o objetivo de resistir aos esforços aplicados durante o ensaio e possuir rigidez adequada de forma a reduzir possíveis fontes de erro no cálculo da tensão aplicada à amostra. Contudo, faz-se necessário o desenvolvimento de uma estrutura cujo peso não seja excessivo e que possibilite uma fácil montagem do equipamento.

As forças atuantes na estrutura ocorrem em duas regiões, como mostrado na Fig. 3.11, sendo elas:

- **Região A:** região de fixação do suporte inferior da amostra;
- **Região B:** região de fixação do atuador eletromecânico à estrutura metálica.

Com base nos esforços que deverão ser suportados pela bancada estrutural e considerando também fatores como o peso próprio da estrutura, a ergonomia, a fabricação e a montagem, a bancada foi projetada usando perfis estruturais, conforme ilustrado na Fig. 3.12. As dimensões finais da bancada foram de $810 \times 490 \times 1112 \text{ mm}^3$ (comprimento x largura x altura) e peso próprio de 175 kg. A seguir são listados os principais perfis utilizados e suas dimensões:

- 4 colunas de sustentação: perfil de seção quadrada (40 x 40 x 4,75) mm³;
- 2 vigas de apoio do superior: perfil de seção retangular (160 x 80 x 6,35) mm³;
- 4 vigas de apoio na base inferior: perfil de seção quadrada (40 x 40 x 4,75) mm³;
- 2 vigas de apoio do tampo superior: perfil de seção quadrada (20 x 20 x 2) mm³;
- 1 estrutura rígida de aço-carbono para apoio do suporte inferior da amostra;
- 1 estrutura rígida de aço-carbono para apoio do atuador.

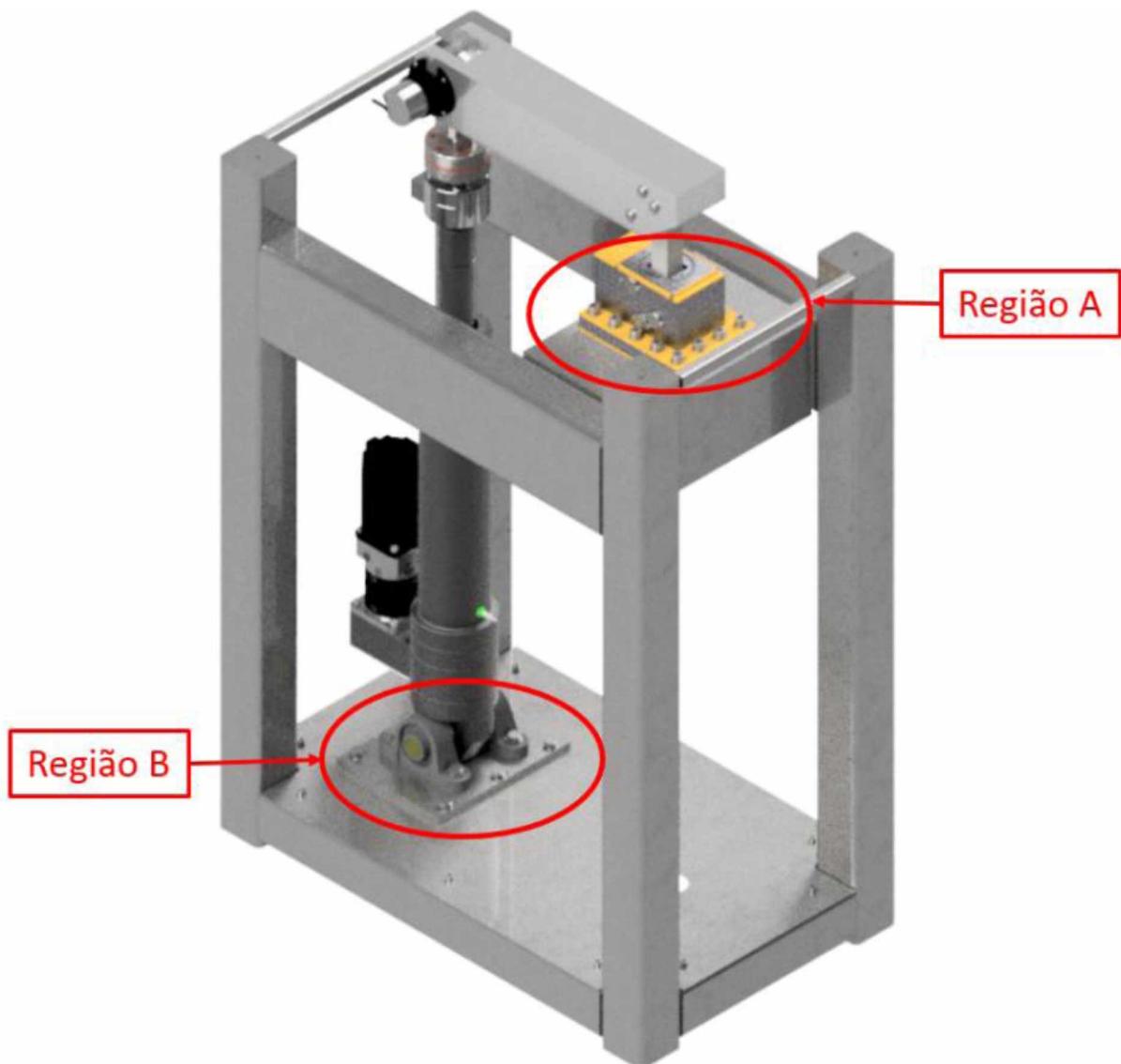


Figura 3.11 - Bancada estrutural ilustrando a região de aplicação das forças



Figura 3.12 - Estrutura metálica da bancada do RSL

O suporte inferior da amostra, ilustrado na Fig. 3.13, é responsável por fazer a fixação da parte inferior da amostra, bem como transmitir os esforços resultantes à bancada. Ele foi projetado de forma a suportar os esforços decorrentes das reações de contato dos roletes com a amostra, bem como apresentar rigidez na fixação da amostra durante os ensaios. Além do mais, o suporte inferior deve possuir resistência à corrosão, por estar em contato direto com o fluido eletrolítico.

A simulação em elementos finitos da bancada e do suporte inferior foi realizada de forma conjunta, visto que os esforços aplicados na bancada são oriundos, em parte, do suporte inferior. As condições de contorno utilizadas são apresentadas na Fig. 3.14. Para esta simulação foi considerada a condição de carga máxima do atuador eletromecânico de 20 kN e utilizado o critério de von Mises nas avaliações dimensionais.

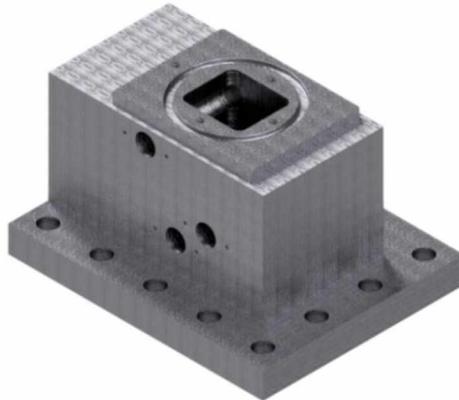


Figura 3.13 - Suporte inferior da amostra

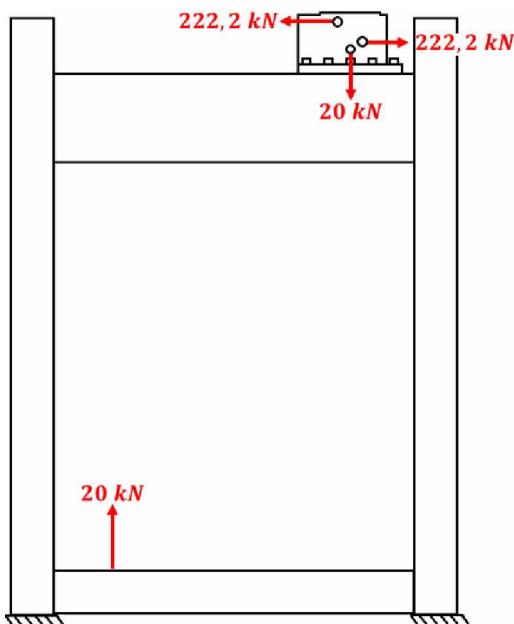


Figura 3.14 - Representação dos esforços e condições de contorno da bancada

Os resultados obtidos da simulação mostraram que a estrutura projetada consegue resistir aos esforços sem sofrer grandes deformações, como mostrado na Fig. 3.15. Uma deformação de cerca de 0,15 mm foi observada nas regiões mais solicitadas. A meta de deformação máxima, tanto para a bancada estrutural, quanto para o suporte inferior foi de 0,1 mm. O valor de 0,15 mm para a bancada foi considerado aceitável, a fim de não enrijecer excessivamente a estrutura, o que levaria invariavelmente a um aumento exagerado do seu peso. As tensões máximas foram da ordem de 73 MPa, sendo este valor inferior ao limite de escoamento de 250 MPa do aço estrutural, mostrando que os perfis adotados, bem como sua disposição na bancada, conseguem oferecer a rigidez necessária e distribuir de forma eficiente as tensões geradas durante o ensaio.

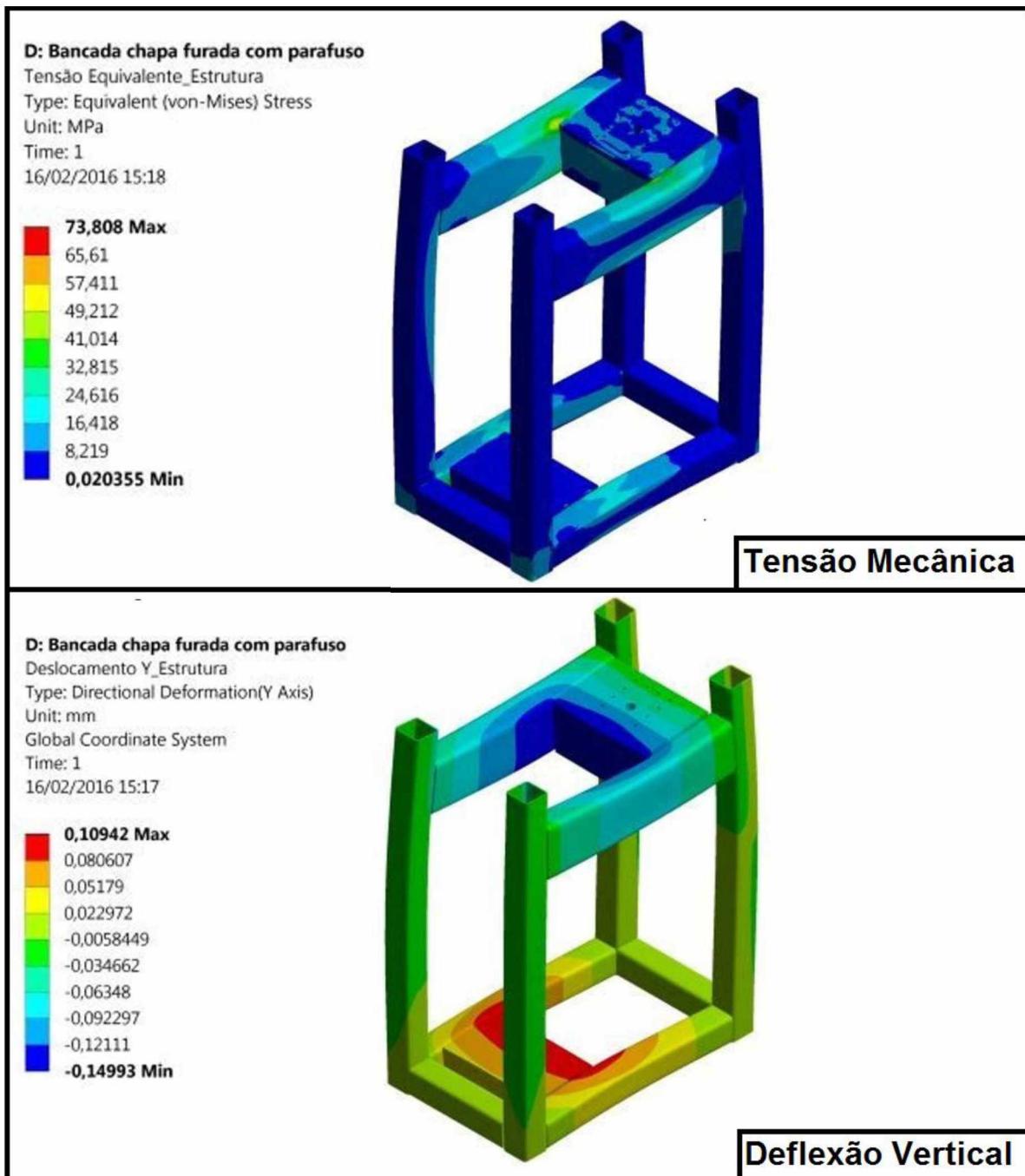


Figura 3.15 - Resultados da simulação da bancada

Por sua vez, o suporte inferior da amostra apresentou também uma baixa deformação na região de maior solicitação, sendo observado um alongamento máximo em torno de 0,07 mm, como mostrado na Fig. 3.16, atingindo-se, assim, a meta estabelecida de 0,1 mm. Com relação às tensões mecânicas, obteve-se uma tensão média de 345 MPa na região dos roletes. Esta tensão foi evidenciada ao longo de todo o contato do rolete com o suporte inferior (Fig. 3.16). O suporte inferior foi fabricado no aço inoxidável martensítico 17-4 PH,

endurecido por precipitação à temperatura de 550°C, com limite de escoamento aproximado de 1170 MPa. A escolha desta liga para a fabricação do suporte inferior levou em consideração, não somente a resistência mecânica conseguida mediante tratamento térmico, como também a sua superior resistência à corrosão em relação à do aço inoxidável AISI 420.

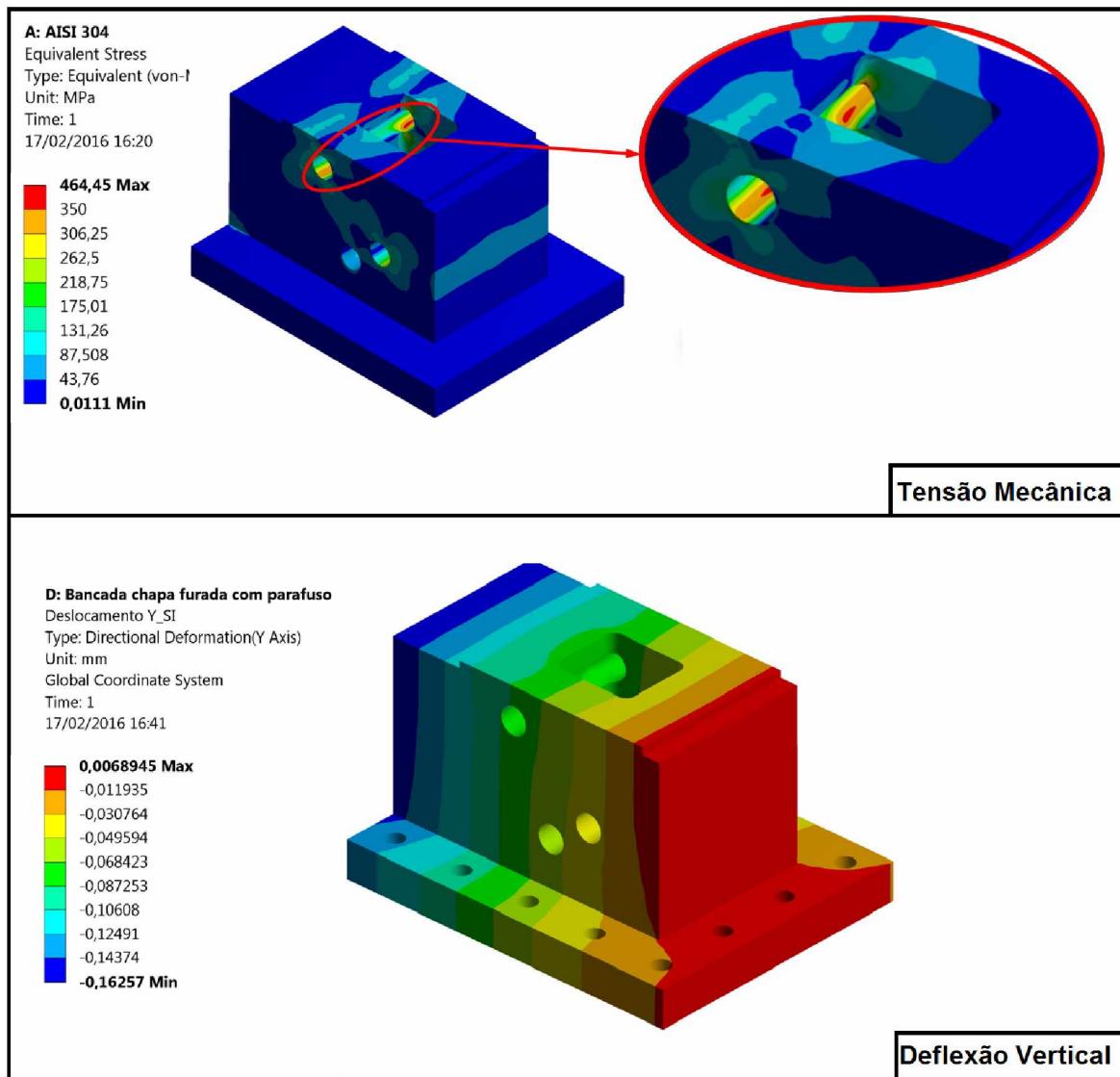


Figura 3.16 - Resultados da simulação do suporte inferior da amostra

3.2.5. Chapa de Espera das Unidades de Rolamento

Para realizar o alinhamento do atuador eletromecânico e, consequentemente, do braço atuador em relação ao corpo de prova, as unidades de rolamento foram montadas sobre uma chapa de espera que permitia suficiente flexibilidade de movimento na fase de alinhamento. Essa chapa foi fixada à bancada por meio de parafusos M10 x 1,5.

O atuador eletromecânico, responsável pela aplicação da carga durante o ensaio, é fixado aos mancais por meio de um eixo. Os mancais, por sua vez, são fixados à chapa de espera das unidades de rolamento por meio de parafusos M12 x 1,75. Logo, a chapa de espera, que é fixada à bancada do RSL, deve suportar os esforços mecânicos gerados pelo atuador no momento de aplicação da força.

Através de simulação em elementos finitos foi possível verificar que uma chapa de 12,7 mm de espessura, confeccionada em aço-carbono, é capaz de suportar os esforços solicitantes. Foram observadas tensões da ordem de 70 MPa e alongamento máximo de 0,023 da chapa, como mostrado na Fig. 3.17.

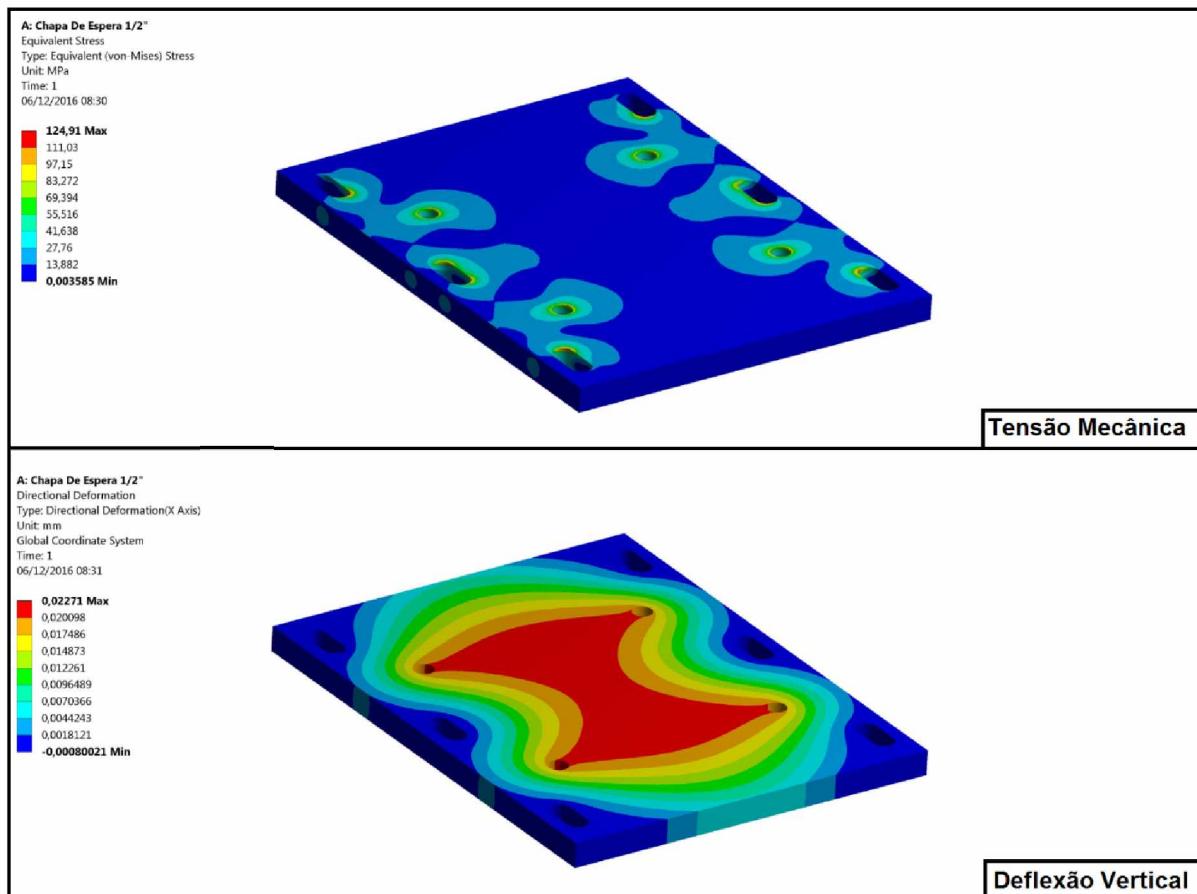


Figura 3.17 - Resultados da simulação da chapa de espera dos mancais

3.2.6. Projeto Mecânico dos Eixos

Para montagem do equipamento foram necessários dois eixos, sendo um para fazer a conexão do atuador eletromecânico com os mancais fixos à bancada e outro para conectar o atuador ao braço. Em ambos os casos, o esforço máximo gerado pelo carregamento é de 20 kN.

Estes eixos foram fabricados em aço-carbono AISI 1045. As análises de tensões mecânicas em ambos os eixos resultaram em valores médios da ordem de 100 MPa (Fig. 3.18), valores estes bem inferiores ao limite de escoamento deste aço, que é de 310 MPa. Valores maiores observados nas figuras são decorrentes de concentração de tensão e refinamento de malha no programa e não devem ser considerados.

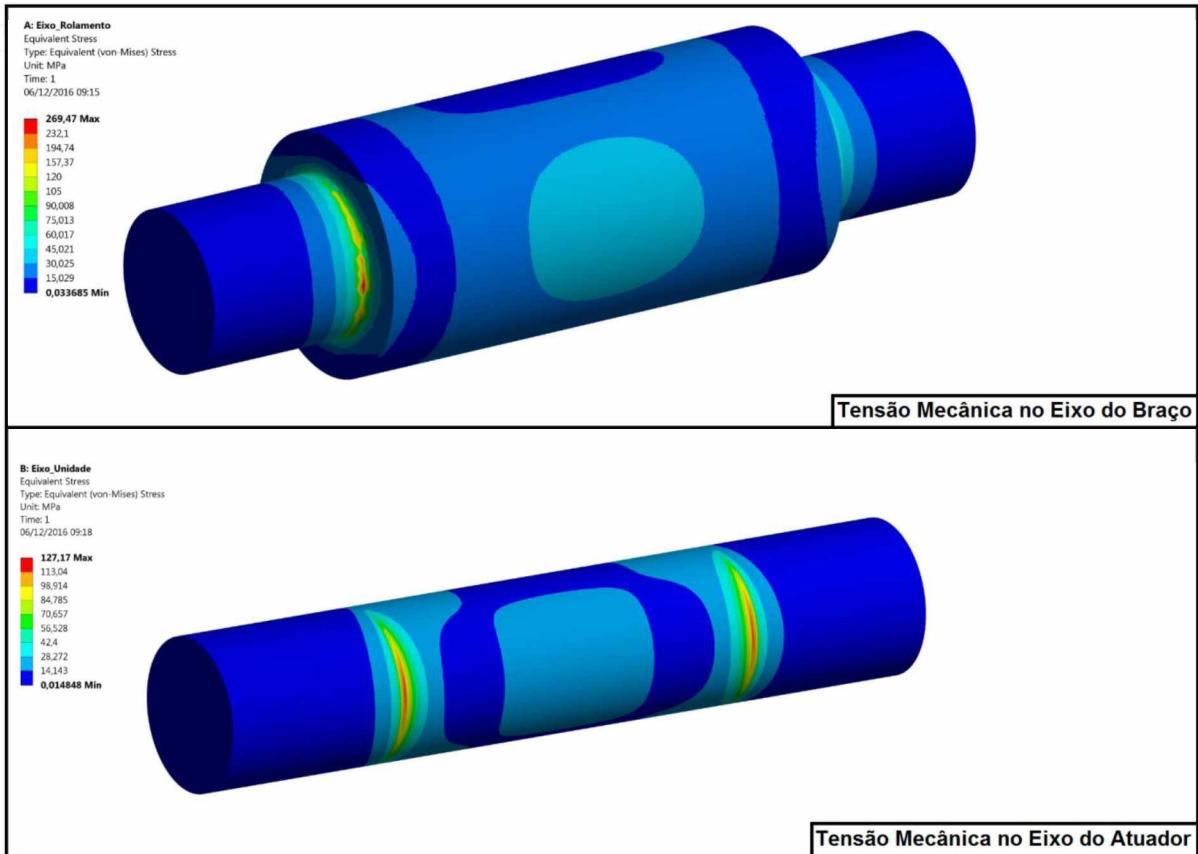


Figura 3.18 – Resultados da simulação de tensões mecânicas nos eixos do braço de carregamento e do atuador

3.2.7. Isolamento Elétrico

Durante o ensaio no RSL, um potencial elétrico é aplicado na amostra a fim de se fazer a hidrogenação da mesma. Como a amostra está em contato com o suporte inferior e com o braço de carregamento, estas peças devem ser isoladas eletricamente, de tal forma que não haja condução de corrente elétrica para a bancada e para os equipamentos acessórios presentes no RSL. O suporte inferior foi conectado à bancada por meio de parafusos, completamente isolados eletricamente, assim como as faces do suporte que estão em contato com a bancada. O braço de carregamento foi isolado eletricamente na

montagem com o atuador eletromecânico e no flange onde é montado o *encoder*. A Fig. 3.19 ilustra as regiões isoladas eletricamente.

Dentre as regiões que precisam receber o isolamento elétrico, as ligações aparafusadas do suporte inferior estão sujeitas às maiores tensões. Neste sentido, o material isolante utilizado foi dimensionado para estas condições. Como material isolante foi selecionado o Celeron de malha extrafina, com limite de resistência à compressão de 255 MPa.

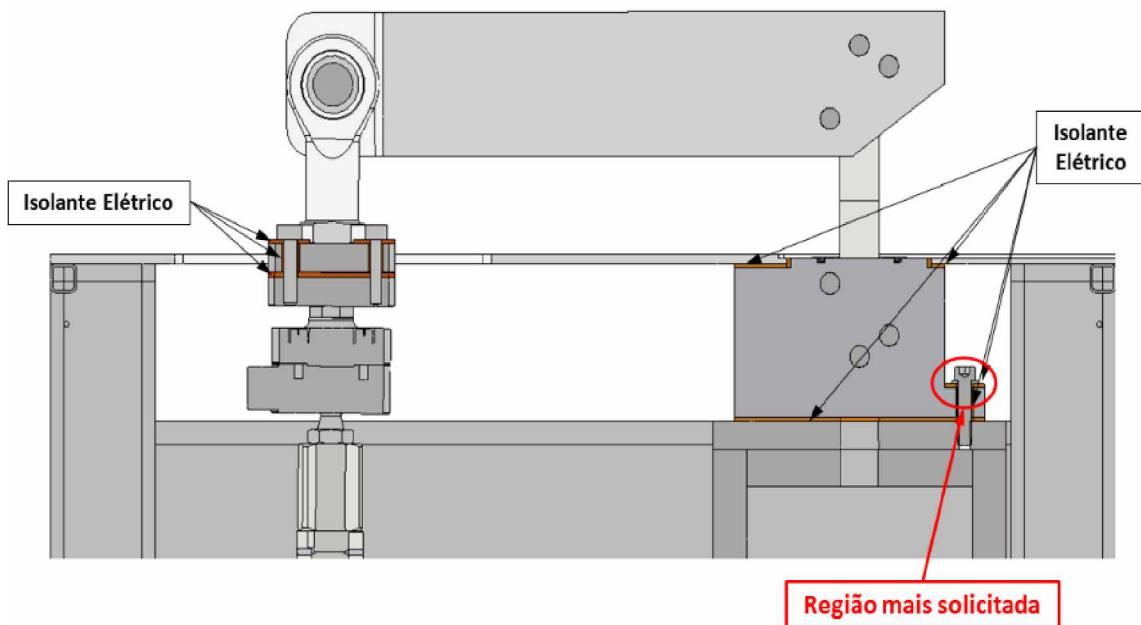


Figura 3.19 - Ilustração indicando as peças que serão isoladas eletricamente

Para o dimensionamento do Celeron foi adotada a espessura de 3 mm. Um modelo simplificado das conexões aparafusadas do suporte inferior foi utilizado, conforme ilustrado na Fig. 3.20. A força de reação no parafuso foi obtida com base em simulação computacional em elementos finitos dos parafusos que conectam o suporte inferior da amostra à bancada. Nesta simulação a reação no parafuso mais solicitado foi de: $F_x = 1366,9 \text{ N}$, $F_y = -537,83 \text{ N}$ e $F_z = 10306 \text{ N}$. Com estas componentes de força foi possível, então, dimensionar o isolante elétrico. Segundo os resultados obtidos, as tensões médias de compressão no Celeron foram da ordem de 200 MPa, como mostra a Fig. 3.21, que é 20% inferior ao limite de resistência à compressão do Celeron com malha extrafina. Portanto, o Celeron mostrou-se como sendo uma boa opção de material para isolamento elétrico, pois suporta as cargas aplicas durante o ensaio sem qualquer prejuízo na sua integridade ou na integridade do RSL.

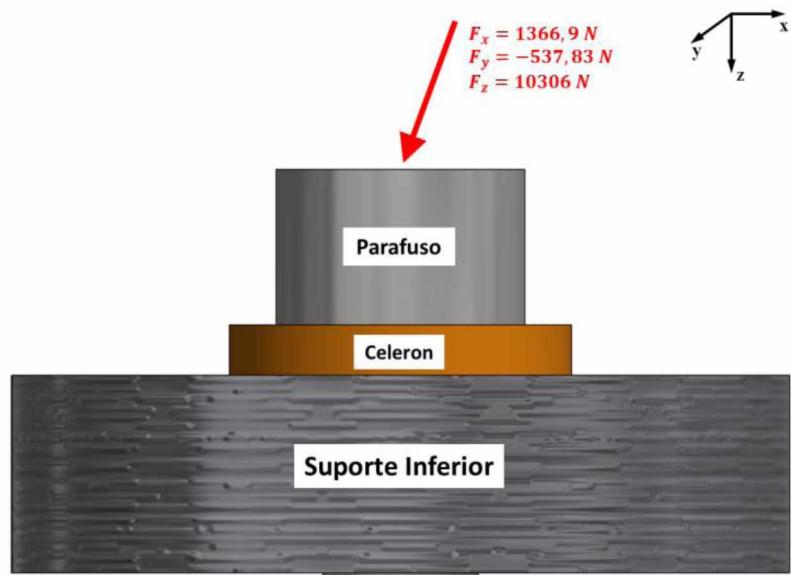


Figura 3.20 - Representação dos esforços na montagem aparafusada do suporte inferior

A: Parafuso
 Equivalent Stress Celeron
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 06/12/2016 08:35

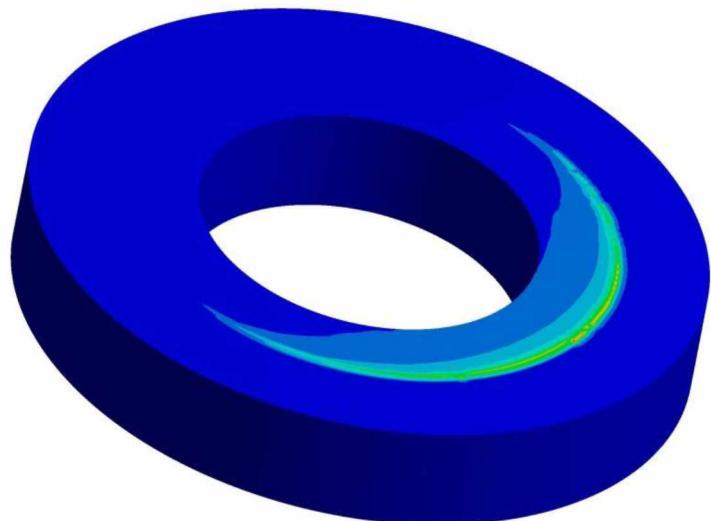
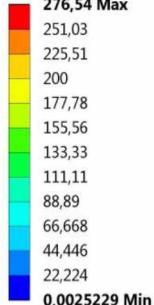


Figura 3.21 - Resultados da simulação das tensões mecânicas no celeron

3.2.8. Cuba Eletrolítica

Para geração de hidrogênio na amostra utilizou-se uma configuração típica de três eletrodos, sendo um eletrodo de referência, um contra eletrodo e um eletrodo de trabalho (amostra). Para fabricar a cuba eletrolítica do RSL, foi considerado excencialmente o tamanho dos contra eletrodos. Em qualquer experimento eletroquímico, a área superficial do contra eletrodo deve ser maior do que a área do eletrodo de trabalho (amostra), para limitar as reações eletroquímicas na superfície da amostra (JONES, 1995). Por isso, fez-se

necessário projetar o contra eletrodo de modo que a sua área fosse maior do que a área submersa da amostra. Considerando ainda o espaço disponível entre o tampo superior da bancada e o braço de carregamento, projetou-se uma cuba com as seguintes características:

- Um eletrodo de referência de Ag/AgCl;
- Quatro contra eletrodos de grafite, somando uma área superficial de 58143 mm²;
- Um eletrodo de trabalho (amostra) com área de submersa de 15703 mm².

A cuba foi projetada em chapa de acrílico de oito mm de espessura, com altura de 58 mm, comprimento de 210 mm e largura de 166 mm, sendo capaz de armazenar um volume de 1,35 litros de fluido eletrolítico. A cuba projetada pode ser vista na Fig. 3.22. As dimensões dos contra eletrodos estão representadas na Fig. 3.23.

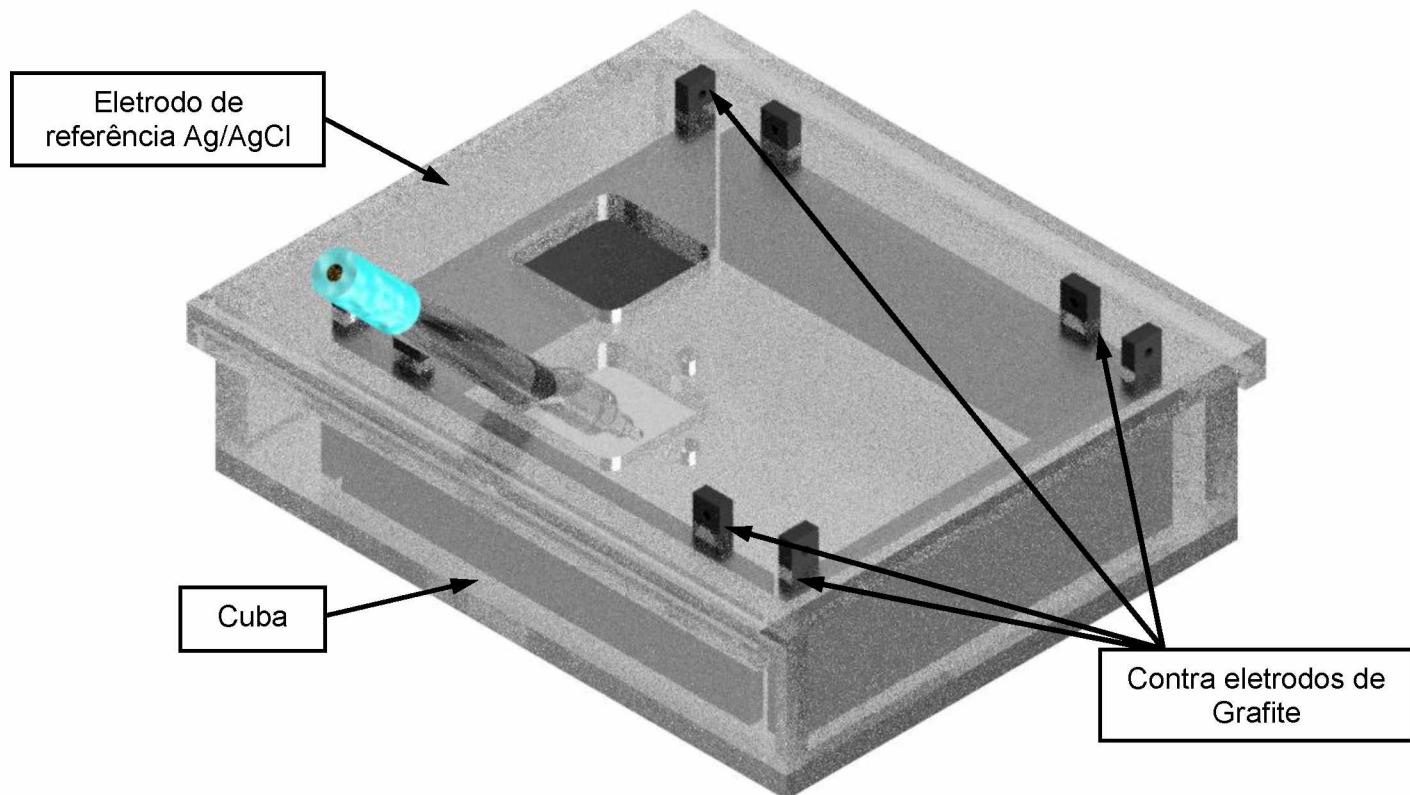


Figura 3.22 - Cuba eletrolítica montada com os eletrodos

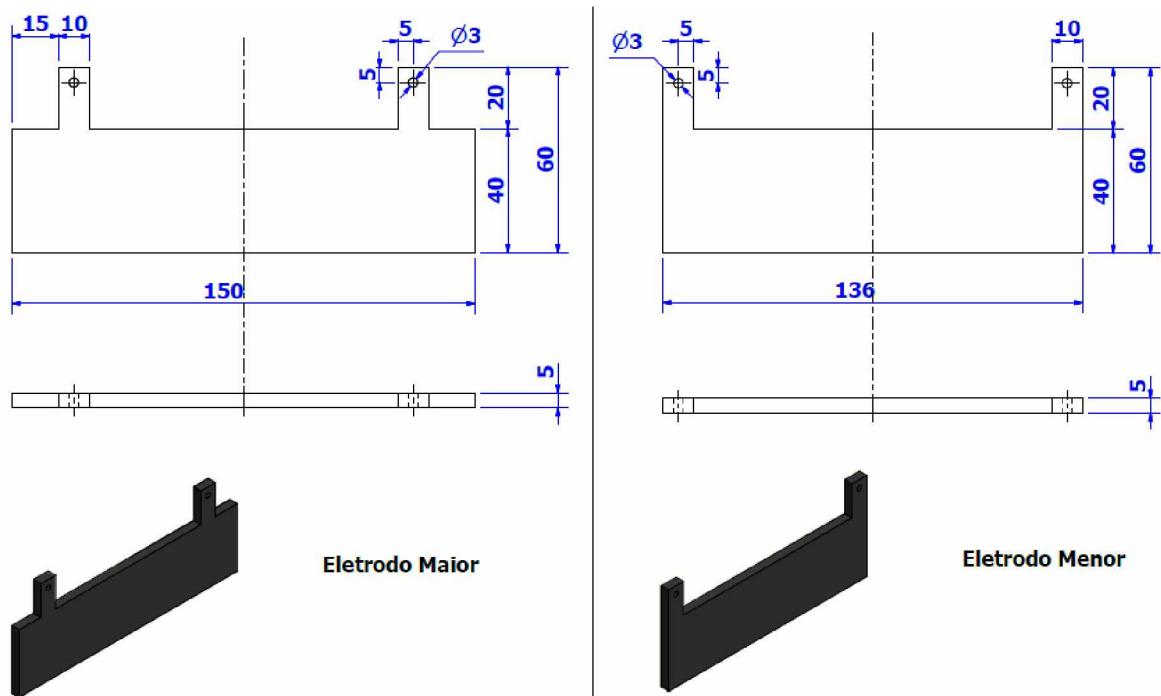


Figura 3.23 - Dimensões dos contra eletrodos

3.2.9. Sistema de Resfriamento e Recirculação do Fluido Eletrolítico

Para fazer o controle de temperatura durante o ensaio, foi projetado um sistema de controle de temperatura por onde passaria o fluido eletrolítico. Este sistema conta com os seguintes itens:

- Banho termostatizado da marca Tecnal para aquecer ou resfriar o fluido;
- Bomba peristáltica da marca Exatta para fazer a recirculação do fluido eletrolítico;
- Serpentina de Cobre responsável pela troca de calor do fluido com o banho;
- Mangueira de poliuretano com 1/4" de diâmetro externo e espessura de 1 mm;
- Conexões hidráulicas fabricadas em polímero.

A serpentina foi projetada com 12 espiras de 89 mm de diâmetro interno com um passo de 10 mm entre elas. Essa serpentina foi confeccionada usando tubos de cobre de 1/4" de diâmetro externo e espessura de parede de 0,9 mm. A serpentina foi alojada dentro do reservatório de água com temperatura controlada do banho termostático, de forma que quando o fluido eletrolítico passa por ela, ele troca calor com a água do banho. O restante do circuito hidráulico é composto por mangueiras de poliuretano responsáveis por guiar o fluido e conexões hidráulicas fabricadas em polímero, a fim de se ter uma maior resistência à corrosão causada pelo fluido eletrolítico. A Fig. 3.24 ilustra o sistema projetado.

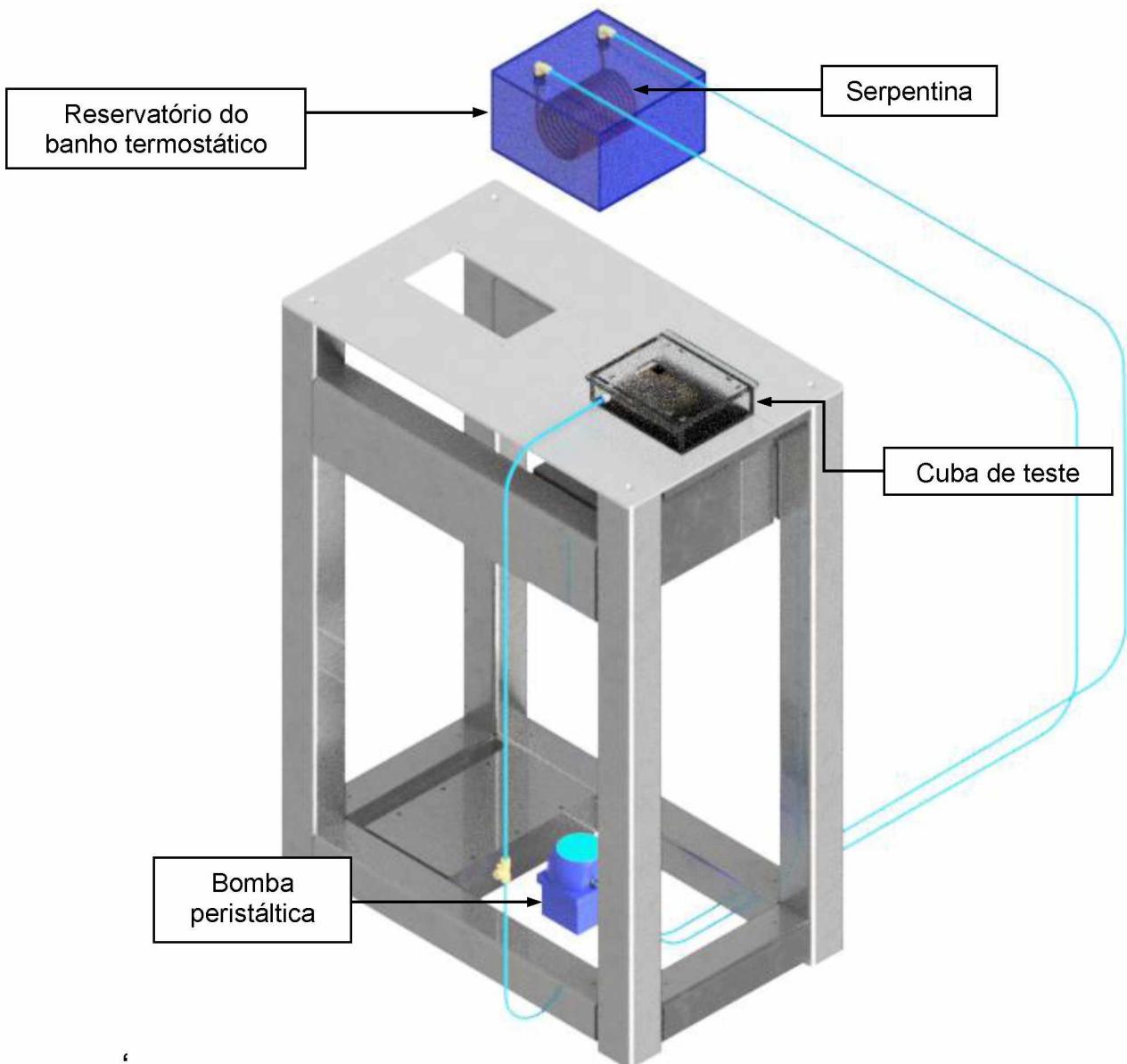


Figura 3.24 - Representação do sistema de resfriamento e recirculação do fluido eletrolítico

3.2.10. Bancada de Alojamento dos Acessórios Eletrônicos

O RSL é controlado eletronicamente por meio de um computador e um sistema eletrônico composto por cabos, acessórios eletrônicos, transformadores, etc.. Por serem itens bastante sensíveis, principalmente ao contato com a água e poeira, fez-se necessário projetar uma bancada, cuja função seria alojar todo este aparato eletroeletrônico e isolá-lo do meio externo. Assim, foi projetada uma bancada tendo como objetivos a proteção dos acessórios eletrônicos, ergonomia do operador e que não tivesse uma massa excessiva, possibilitando sua movimentação quando fosse necessário. A bancada projetada pode ser vista na Fig. 3.25.

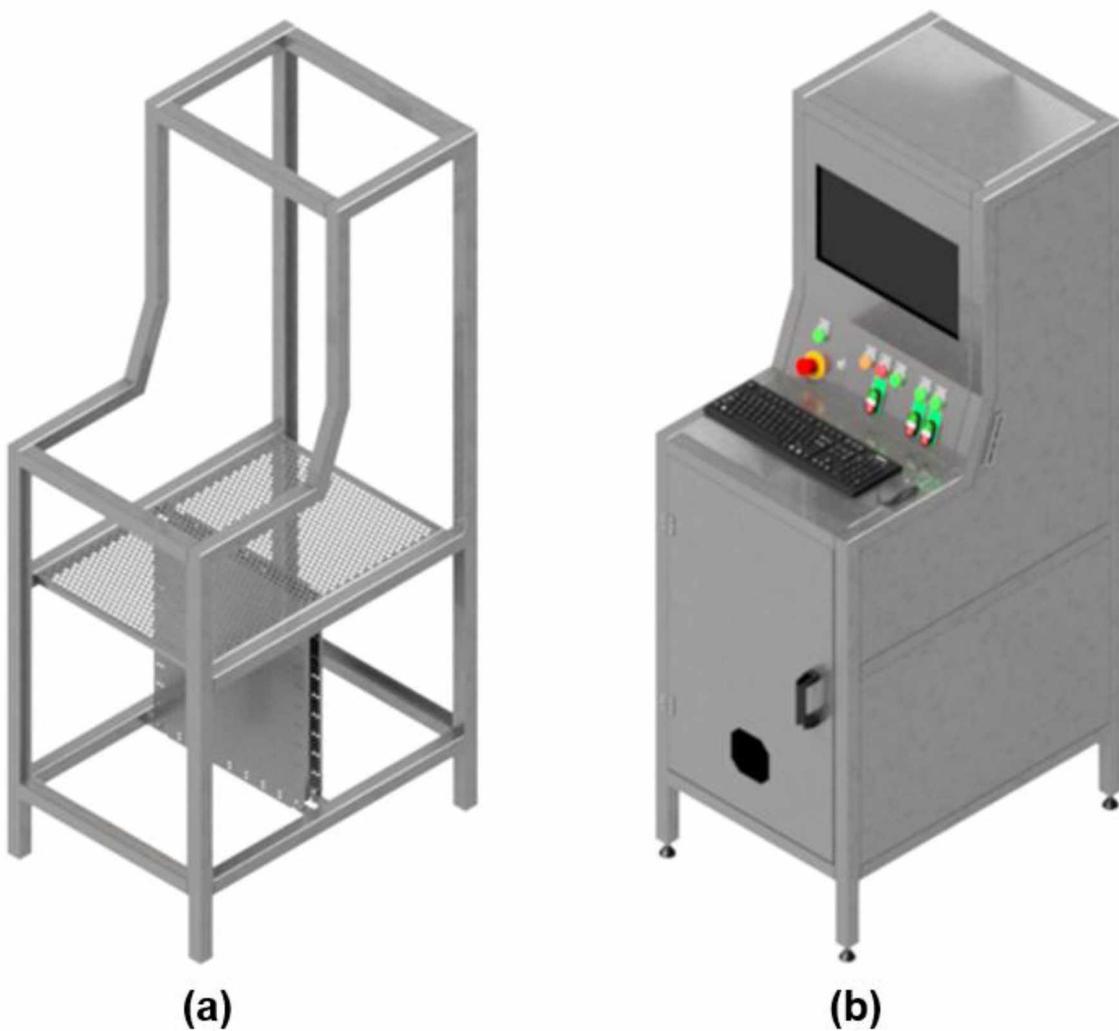


Figura 3.25 - Bancada de alojamento da eletrônica associada ao equipamento. (a) estrutura metálica e (b) bancada completa

A parte estrutural da bancada é composta por perfis quadrado de metalon soldados, com seção de $40 \times 40 \times 1,5 \text{ mm}^3$. O fechamento foi realizado com chapas de aço-carbono de 1,2 mm de espessura, rebitadas na estrutura aonde era necessário mais rigidez e parafusados aonde era necessário acesso para montagem. Seu peso final foi de 72 kg, com uma altura de 1741 mm, largura de 580 mm e comprimento de 830 mm.

3.3. Fabricação e Montagem

A montagem do equipamento foi realizada no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia. Todos os ajustes necessários para a montagem foram feitos mantendo-se a integridade e conformidade do equipamento

para que realizasse ensaios de RSL de acordo com a norma ASTM F1624. Uma imagem da configuração final do equipamento está registrada na Fig. 3.26.

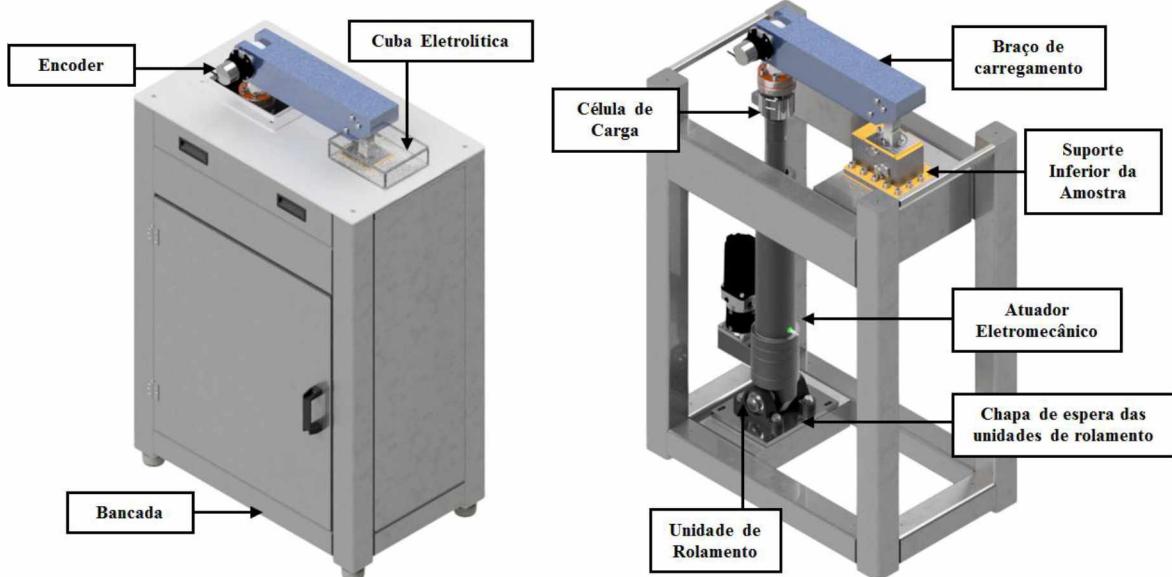


Figura 3.26 - Configuração final do equipamento de RSL

3.4. Validação do RSL

A validação do RSL foi efetuada através da determinação do erro existente entre a tensão mecânica na amostra, calculada analiticamente pelo software do equipamento através da Eq. (3.4), e a tensão mecânica efetivamente aplicada à amostra. Adicionalmente, foram identificadas todas as fontes de incerteza presentes no ensaio e calculadas as incertezas de medição. Para tanto, foram seguidas as recomendações do *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) (JCGM, 2008a). Todos os cálculos necessários foram realizados utilizando as planilhas desenvolvidas por MORAES (2011). Os procedimentos de cálculo da incerteza de medição, bem como a medição experimental da tensão mecânica na amostra são descritos a seguir.

3.4.1. Avaliação da Incerteza de Medição Associada às Variáveis Necessárias para o Cálculo da Tensão Mecânica na Amostra

Para obter o valor da tensão mecânica na amostra foi utilizada a Eq. (3.4), conforme mostrado anteriormente. Nesta equação, faz-se necessário dispor das seguintes variáveis:

- F_a = Força realizada pelo atuador;
- d_1 e d_2 = Distâncias verticais das forças F_1 e F_2 em relação ao eixo de giro do braço de flexão;
- d_3 = Distância horizontal do eixo de giro do braço de flexão em relação ao eixo central do corpo de prova;
- d_6 = Distância vertical entre os centros dos roletes do braço de carregamento e do suporte inferior que apoiam a face oposta ao entalhe da amostra;
- B e A = Largura e profundidade da seção transversal do corpo de prova;
- θ = Ângulo de giro do braço atuador.

Essas variáveis foram medidas com os seguintes sistemas de medição:

- Célula de carga: para medir a força F_a ;
- Encoder rotativo: para medir o ângulo θ ;
- Máquina de medir por coordenadas (MMC): para medir as distâncias d_1 , d_2 e d_3 ;
- Paquímetro digital: para medir as cotas B e A ;
- Traçador de alturas digital: para medir a cota L ;
- Réguas: para medir a cota d_6 .

Uma vez que estes instrumentos possuem uma incerteza associada relativa ao seu desempenho, estas devem ser quantificadas, de tal forma que se possa determinar o erro associado ao cálculo da tensão mecânica na amostra.

3.4.1.1. Incerteza de Medição Associada a d_1 , d_2 , d_3 e d_6

A MMC utilizada para medir d_1 , d_2 e d_3 , representados na Fig. 3.27, é do fabricante Mitutoyo, modelo BR-M443, tipo ponte móvel, manual, com resolução de 0,001 mm e volume de trabalho de 400 x 400 x 300 mm³, definido pela faixa nominal das escalas dos eixos X, Y e Z, respectivamente. Esta máquina, que pode ser vista na Fig. 3.28, possui um conjunto de pontas de medição com esfera de rubi em sua extremidade, com diâmetros de 1, 2, 3 ou 4 mm. O software dedicado à máquina é o MCosmos® 3.0. A máquina possui certificado de calibração de número 07081/13, emitido pelo Laboratório de Metrologia da Mitutoyo Sul Americana (ANEXO I). De acordo com este certificado de calibração, o erro de apalpação é de $(1,9 \pm 1,2) \mu\text{m}$; a incerteza linear associada ao eixo X é $(0,8 + L/1500) \mu\text{m}$, para o eixo Y essa incerteza é de $(0,8 + L/3000) \mu\text{m}$, enquanto que para o eixo Z ela é de $(0,9 + L/2900) \mu\text{m}$, onde L representa o valor da coordenada correspondente.



Figura 3.27 - - Máquina de medir por coordenadas utilizada para realizar as medições de d_1 , d_2 e d_3

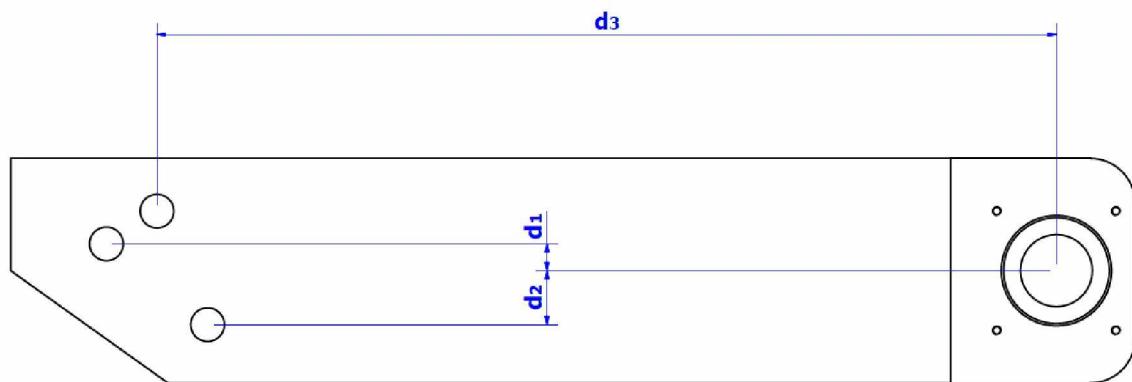


Figura 3.28 - Representação das dimensões do braço de carregamento que entram na equação da tensão mecânica da amostra

Para as essas medições foi utilizada uma ponta única com esfera de rubi de 2 mm de diâmetro. Foram efetuadas cinco medições para cada variável, onde, para cada medição, sete pontos diferentes foram apalpados em torno dos furos dos roletes e do furo do rolamento, para que seus centros fossem identificados e a distância entre eles fosse medida.

As medições foram efetuadas à temperatura ambiente de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, sendo essa monitorada por um termo-higrômetro digital, com resolução de $0,1^\circ\text{C}$ e faixa nominal de -20

a 60 °C. Este possui certificado de calibração de número R4996/13, emitido pelo Laboratório de Temperatura e Umidade da Elus Instrumentação. A incerteza associada à calibração é de 0,3 °C para k igual a 2,00 e probabilidade de abrangência de 95,45%.

Para avaliação da incerteza associada às medições das distâncias na MMC BR-M443, foi aplicada a metodologia proposta no GUM (JCGM, 2008a). O modelo matemático utilizado para esta finalidade é apresentado na Eq. (3.1).

$$D = \bar{D} + \Delta R_{MMC} + \Delta C_{MMC} + \Delta E_A + \bar{D}\Delta T(\alpha_{Pe} + \alpha_E) + \bar{D}\delta T(\alpha_{Pe} + \alpha_E) \quad (3.1)$$

Onde: D – distância medida na MMC, podendo ser d_1 , d_2 ou d_3 ; \bar{D} - média aritmética dos valores de distância calculados para os n ciclos de medição; ΔR_{MMC} - correção associada à resolução da MMC; ΔC_{MMC} - correção associada à incerteza da calibração da MMC; ΔE_A - correção associada ao erro de apalpamento; ΔT - afastamento da temperatura ambiente em relação à temperatura de referência; δT - variação da temperatura durante as medições; α_{Pe} e α_E - coeficientes de expansão térmica linear do material da peça (aço) e das escaras da MMC BR-M443 (vidro), respectivamente.

Como não foi possível estabelecer um sistema de medição confiável para medir a distância entre os roletes esquerdos do braço de carregamento e do suporte inferior da amostra (d_6) no equipamento, esta cota foi obtida medindo-se a distância entre as impressões deixadas pelos roletes na amostra, como mostrado na Fig. 3.29 (ver regiões indicadas).



Figura 3.29 – Amostra após o ensaio, mostrando marcas deixadas pelos roletes

Para medir o comprimento d_6 utilizou-se uma régua de aço do fabricante Mitutoyo, com resolução de 0,5 mm e faixa nominal de 300 mm. De acordo com o certificado de calibração dessa régua (ANEXO II), a incerteza expandida é de 0,02 mm para k igual a 2,02 com 95% de probabilidade de abrangência. Durante a medição a régua e o corpo de prova foram posicionados no desempeno de granito. A Eq. (3.2) apresenta o modelo matemático utilizado para calcular a incerteza de medição associada à distância entre os roletes esquerdos do braço de carregamento e do suporte inferior da amostra.

$$x = \bar{x} + \Delta R_R + \Delta I C_R \quad (3.2)$$

Onde x é o comprimento correspondente a d_6 ; \bar{x} é a média dos valores de comprimento medidos com a régua; ΔR_R é a correção associada à resolução da régua; $\Delta I C_R$ é a correção associada à incerteza de calibração da régua.

A Tab. 3.1 lista os valores medidos para d_1 , d_2 , d_3 e d_6 , bem como a média, o desvio padrão, o fator de abrangência e a incerteza expandida calculada.

Tabela 3.1 - Valores de média, desvio padrão, fator de abrangência e incerteza expandida associada (95%) para d_1 , d_2 e d_3

Cota	Leitura 1 [mm]	Leitura 2 [mm]	Leitura 3 [mm]	Leitura 4 [mm]	Leitura 5 [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	U [mm]
d_1	12,092	12,101	12,095	12,111	12,110	12,102	0,009	0,009
d_2	24,557	24,549	24,559	24,538	24,538	24,548	0,010	0,010
d_3	400,028	400,024	400,031	400,026	400,026	400,027	0,003	0,004
d_6	114,0	113,5	114,0	113,5	113,5	113,7	0,3	0,5

3.4.1.2. Incerteza de Medição Associada às Dimensões da Amostra

As dimensões da seção transversal da amostra (b e h) utilizada na validação do equipamento, indicadas na Fig. 3.30, foram medidas utilizando um paquímetro digital do fabricante Mitutoyo, com resolução de 0,01 mm e faixa nominal de 150 mm. De acordo com o certificado de calibração deste paquímetro (ANEXO III), a incerteza expandida para medições externas é de 0,02 mm. O desvio de paralelismo entre as superfícies para medições externas é igual a zero, com incerteza expandida associada de 0,01 mm. Em ambos os casos, o fator de abrangência k é igual a 2,00 com 95% de probabilidade de abrangência.

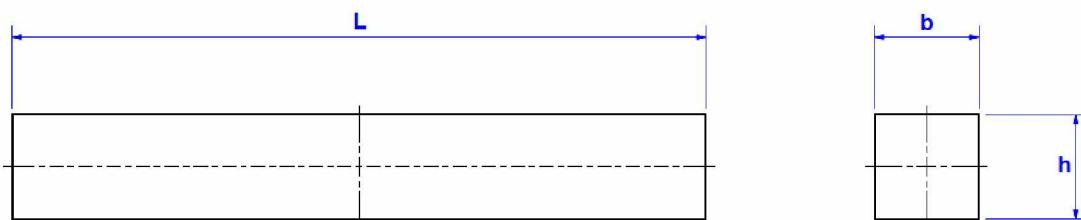


Figura 3.30 - Representação das dimensões da seção do transversal da amostra

Para medição do comprimento (L) foi utilizado um traçador de alturas digital, do fabricante Mitutoyo, com resolução de 0,01 mm e faixa nominal de 300 mm. De acordo com

o certificado de calibração do traçador de alturas (ANEXO IV), a incerteza expandida é de 0,02 mm para k igual a 2,40, com 95% de probabilidade de abrangência. Durante a medição o traçador de alturas e o corpo de prova foram posicionados em um desempeno de granito.

Foram efetuadas cinco medições de cada um dos mensurandos à temperatura ambiente de $20,0 \pm 1,0^{\circ}\text{C}$, sendo esta monitorada por um termo-higrômetro digital, com resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$ e faixa nominal de -20°C a 60°C . Este equipamento possui incerteza associada à calibração de $0,3^{\circ}\text{C}$ para k igual a 2,00 e probabilidade de abrangência de 95%. Os sistemas de medição e a amostra permaneceram 12 h à temperatura especificada para atingirem o equilíbrio térmico. Somente após esse período foram realizadas as medições.

O modelo matemático utilizado para avaliar a incerteza associada à medição do comprimento da amostra efetuada por meio do traçador de alturas e da largura e da altura efetuadas por meio do paquímetro digital é apresentado nas Eqs. (3.3), (3.4) e (3.5).

$$L = \bar{L} + \Delta R_T + \Delta C_T \quad (3.3)$$

$$b = \bar{b} + \Delta R_P + \Delta C_P \quad (3.4)$$

$$h = \bar{h} + \Delta R_P + \Delta C_P \quad (3.5)$$

Onde: L - comprimento da amostra; b – largura da amostra; h – altura da amostra; \bar{L} - média aritmética dos valores de comprimento considerando as cinco medições; \bar{b} - média aritmética dos valores de largura considerando as cinco medições; \bar{h} - média aritmética dos valores de altura considerando as cinco medições; ΔR_T - correção associada à resolução do traçador de alturas; ΔR_P - correção associada à resolução do paquímetro; ΔC_T - correção associada à incerteza da calibração do traçador de alturas; e ΔC_P - correção associada à incerteza da calibração do paquímetro digital. Os resultados das medições e das incertezas de medição associados às dimensões da amostra são mostrados na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 – Resultados das medições das dimensões do corpo de prova usado no ensaio de verificação de tensão e cálculo da incerteza de medição

Cota	Leitura 1 [mm]	Leitura 2 [mm]	Leitura 3 [mm]	Leitura 4 [mm]	Leitura 5 [mm]	Média [mm]	Desvio Padrão [mm]	U [mm]
L	200,15	200,19	200,12	200,13	200,13	200,14	0,03	0,04
B	29,93	29,92	29,91	29,91	29,91	29,92	0,01	0,03
A	29,92	29,91	29,90	29,91	29,90	29,91	0,01	0,03

3.4.1.3. Incerteza de Medição Associada à Força Medida pela Célula de Carga e ao Ângulo Medido pelo Encoder

Para medir a força no ensaio de RSL foi utilizada uma célula de carga da marca HBM, modelo U2B, com capacidade de 20 kN, acoplada à haste do atuador, como mostrado na Fig. 3.31. Sua resolução, uma vez acoplada ao sistema de aquisição de dados é de 0,001 N. O certificado de teste da célula de carga, que pode ser visto no ANEXO VI, declara que a mesma apresenta uma histerese relativa de 0,040% e um desvio de linearidade de -0,015%, quando submetida à tração. Como não foi solicitada a calibração da célula de carga, a incerteza relativa ao processo de calibração foi tomada como sendo a classe de exatidão da célula, que segundo o seu *datasheet*, apresentado no ANEXO VII, é de 0,1%.

O RSL foi projetado com a capacidade de se controlar e acompanhar a força aplicada durante o ensaio por meio de um controle PID. Como os valores medidos pela célula de carga possuem influência deste controle, este foi considerado ao se determinar o modelo matemático para o cálculo da incerteza associada à medição da força.



Figura 3.31 – (a) Célula de carga utilizada no RSL da fabricante HBM, modelo U2B, com capacidade de 20 kN e (b) célula de carga montada no equipamento

Para medir o ângulo entre o braço e carregamento e o atuador do equipamento foi utilizado um *encoder* acoplado ao eixo de giro do braço, conforme mostrado na Fig. 3.32. O *encoder* utilizado é um *encoder* do tipo rotativo, da fabricante HEIDENHAIN, modelo ROD 426, com 2000 pulsos por revolução (ppr), ou seja, a cada giro de 360°, o instrumento coleta 2000 dados de ângulo em intervalos iguais. Logo, a resolução do *encoder* pode ser obtida dividindo-se 360° por 2000 ppr e, com isso, tem-se que a resolução do *encoder* é de 11'.

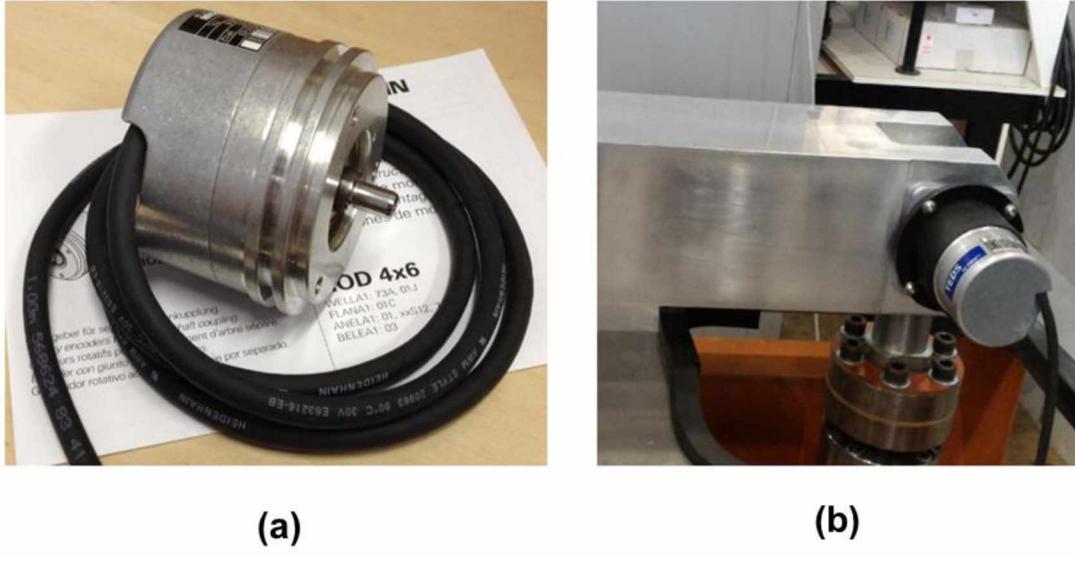


Figura 3.32 – (a) Encoder rotativo da fabricante HEIDENHAIN, modelo ROD 426, utilizado no RSL e (b) encoder montado no equipamento

O teste destinado a validar o equipamento foi realizado utilizando uma amostra sem entalhe, confeccionada no aço AISI 4140, beneficiado, com dureza de 37 HRC. Nesse teste, a tensão aplicada foi mantida abaixo do limite elástico para que, assim, não houvesse queda na força da amostra causada pela sua deformação plástica. O ensaio foi conduzido carregando-se a amostra no intervalo de 0,5 a 10,0 kN, com 20 passos de carga constante, durante 30 segundos, onde, em cada passo, havia um incremento de 5% na força, até que se chegasse à força de 10,0 kN no vigésimo passo. Logo após, executou-se o descarregamento da amostra, seguindo o mesmo procedimento até se chegar a 0,5 kN. Ao longo dos passos foram coletados valores de ângulo e força.

Para avaliação das incertezas associadas aos valores de força indicados pela célula de carga e ao ângulo medido pelo encoder foram utilizados os modelos matemáticos apresentados nas Eqs. (3.6) e (3.7).

$$F = \bar{F}_{CF} + \Delta R_F + \Delta IC_F + \Delta Hist_F + \Delta Lin_F \quad (3.6)$$

$$\Theta = \bar{\Theta} + \Delta R_e + \Delta IC_e \quad (3.7)$$

Nestas equações, F e Θ representam a força e ângulo medidos, respectivamente; \bar{F}_{CF} e $\bar{\Theta}$ representam as médias aritméticas da força medida pela célula de carga e do ângulo medido pelo encoder, respectivamente; ΔIC_F e ΔIC_e são as correções relativas à calibração da célula de carga e do encoder, respectivamente; $\Delta Hist_F$ é a correção associada à

histerese apresentada pela célula de carga, quando submetida à tração e ΔLin_F é a correção associada ao desvio de linearidade apresentado pela célula de carga, quando submetida à tração. As Tabelas 3.3 e 3.4 apresentam os resultados desvio padrão e incerteza de medição expandida da força medida pela célula de carga e do ângulo medido pelo encoder.

Tabela 3.3 – Resultados da média, desvio padrão e incerteza de medição expandida da força medida pela célula de carga

CARREGAMENTO			DESCARREGAMENTO		
Força Média [kN]	Desvio padrão [kN]	U [kN]	Força Média [kN]	Desvio padrão [kN]	U [kN]
0,499795	0,000417	0,000560	9,499639	0,000378	0,010593
0,999565	0,000443	0,001116	8,998663	0,001091	0,010035
1,502903	0,000435	0,001677	8,497561	0,000379	0,009476
2,002634	0,000413	0,002234	8,000030	0,000393	0,008921
2,499620	0,000437	0,002788	7,498458	0,000736	0,008362
3,002386	0,000412	0,003349	6,997589	0,000405	0,007803
3,502273	0,000456	0,003906	6,500121	0,000386	0,007249
3,999433	0,000436	0,004460	5,998669	0,000615	0,006690
4,502046	0,000463	0,005021	5,497776	0,000395	0,006131
5,002071	0,000397	0,005578	5,000169	0,000422	0,005576
5,499278	0,000449	0,006133	4,498657	0,000676	0,005017
6,001966	0,000477	0,006693	3,997650	0,000375	0,004458
6,501719	0,000475	0,007250	3,500298	0,000384	0,003904
6,999031	0,000492	0,007805	2,998595	0,000684	0,003345
7,501795	0,000477	0,008366	2,497518	0,000416	0,002786
8,000091	0,000503	0,009000	2,000383	0,000415	0,002232
8,502474	0,000665	0,009481	1,498124	0,000775	0,001673
9,001459	0,000519	0,010038	0,997336	0,000435	0,001114
9,498629	0,000573	0,010592			
10,001404	0,000609	0,011153			

Tabela 3.4 - Resultados da média, desvio padrão e incerteza de medição expandida do ângulo medido pelo *encoder*

CARREGAMENTO			DESCARREGAMENTO		
Ângulo Médio [° : ' : "]	Desvio padrão [']	U [']	Ângulo Médio [° : ' : "]	Desvio padrão [']	U [']
90:11:00	5,5	13	93:07:00	5,5	13
90:22:00	5,5	13	92:56:00	5,5	13
90:33:00	5,5	13	92:45:00	5,5	13
90:44:00	5,5	13	92:45:00	5,5	13
90:55:00	5,5	13	92:34:00	5,5	13
91:06:00	5,5	13	92:23:00	5,5	13
91:17:00	5,5	13	92:12:00	5,5	13
91:28:00	5,5	13	92:01:00	5,5	13
91:39:00	5,5	13	92:01:00	5,5	13
91:50:00	5,5	13	91:50:00	5,5	13
92:01:00	5,5	13	91:39:00	5,5	13
92:01:00	5,5	13	91:28:00	5,5	13
92:12:00	5,5	13	91:17:00	5,5	13
92:23:00	5,5	13	91:06:00	5,5	13
92:34:00	5,5	13	90:55:00	5,5	13
92:45:00	5,5	13	90:44:00	5,5	13
92:56:00	5,5	13	90:33:00	5,5	13
93:07:00	5,5	13	90:22:00	5,5	13
93:18:00	5,5	13			

3.4.1.4. Incerteza Associada ao Cálculo da Tensão Mecânica na Amostra

Uma vez determinadas todas as incertezas associadas às variáveis de influência no cálculo da tensão mecânica na amostra e utilizando a equação (Eq. (3.4)), foi possível determinar numericamente a incerteza expandida relacionada à tensão mecânica na amostra utilizando o método de Monte Carlo. Foram calculados os valores de incerteza de medição expandida da tensão mecânica na amostra para cada incremento de carga. Os resultados de incerteza expandida para cada passo de carga estão registrados na Tab. 3.5.

Tabela 3.5 - Resultados da média, desvio padrão e incerteza de medição expandida da tensão mecânica na amostra medida pelo RSL

CARREGAMENTO			DESCARREGAMENTO		
Tensão Média [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	U [MPa]	Tensão Média [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	U [MPa]
44,286	0,037	0,211	849,284	0,034	3,947
88,627	0,039	0,421	804,115	0,097	3,739
133,338	0,039	0,634	758,958	0,034	3,543
177,785	0,037	0,841	714,521	0,035	3,333
222,037	0,039	1,050	669,392	0,066	3,128
266,853	0,037	1,260	624,354	0,036	2,915
311,468	0,041	1,469	579,670	0,034	2,711
355,882	0,039	1,676	534,671	0,055	2,506
400,836	0,041	1,884	490,026	0,035	2,295
445,597	0,035	2,092	445,428	0,038	2,091
490,160	0,040	2,298	400,534	0,060	1,881
534,965	0,043	2,509	355,724	0,033	1,675
579,813	0,042	2,716	311,292	0,034	1,468
624,483	0,044	2,921	266,516	0,061	1,258
669,690	0,043	3,130	221,851	0,037	1,049
714,526	0,045	3,332	177,585	0,037	0,840
759,776	0,059	3,540	132,914	0,069	0,631
804,746	0,046	3,741	88,430	0,039	0,420
849,588	0,051	3,949			

A Fig. 3.33 apresenta os resultados da Tab. 3.5 em um gráfico, onde a linha representa a média das tensões medidas em cada nível de carga. As incertezas expandidas de cada valor de tensão mecânica estão representadas por meio de barras de erro. Percebe-se que a incerteza expandida é muito pequena em relação à tensão mecânica medida, variando de aproximadamente $\pm 0,5\%$ do valor medido pelo equipamento.

Desses resultados depreende-se que a incerteza expandida relacionada à medição da tensão mecânica na amostra pelo RSL é relativamente pequena, garantindo, dessa forma, uma boa precisão das medições efetuadas.

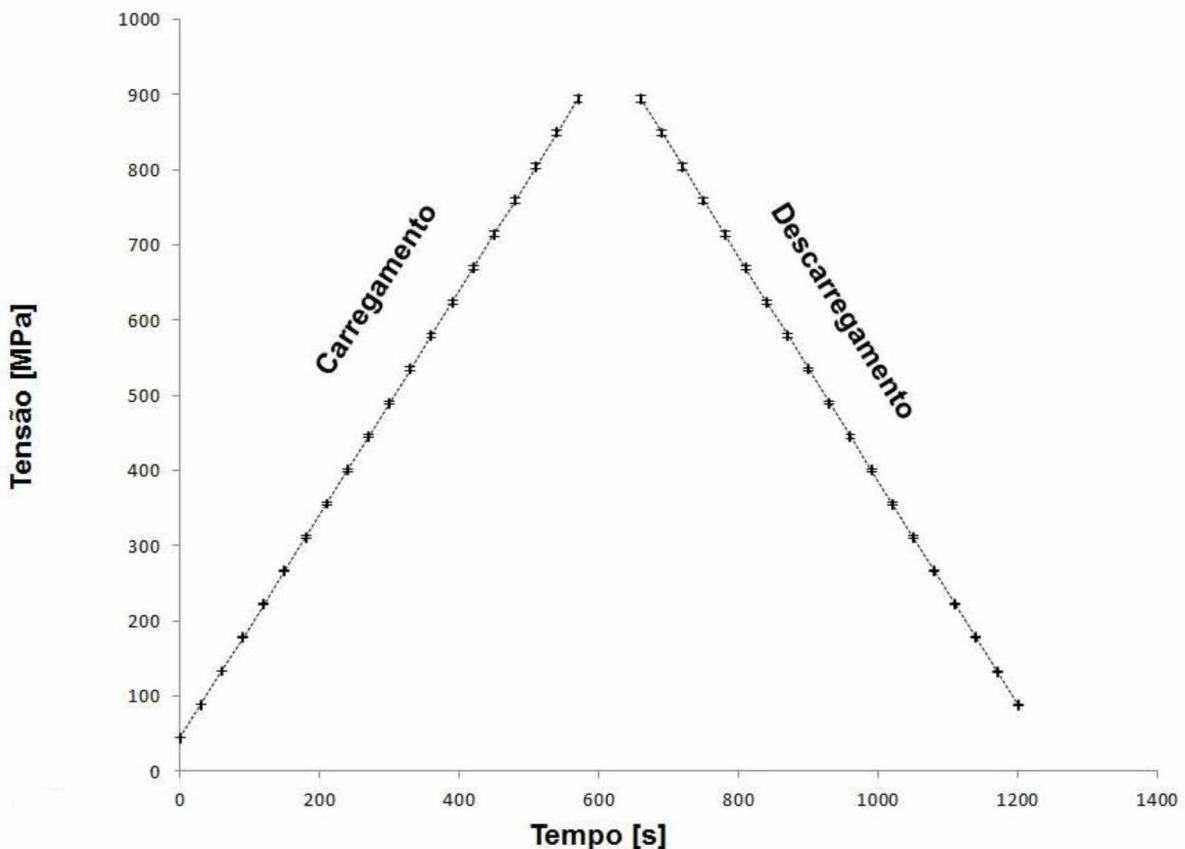


Figura 3.33 - Tensão média medida no ensaio com as incertezas expandidas no formato de barras de erro

3.4.2. Testes de Validação

Os testes de validação consistiram na verificação do erro que se tem entre a tensão mecânica na amostra, calculada analiticamente pelo software do RSL, juntamente com a incerteza associada àquele valor, e a efetivamente aplicada na amostra. Os ensaios foram realizados em uma amostra de aço 4140 com dureza de 37 HRC sem entalhe para diminuir a fonte de erro presente durante o processo de medição da tensão mecânica na mesma.

Para medir experimentalmente a tensão mecânica na amostra foram utilizados *strain gauges*, que são sensores que detectam a deformação sofrida pela amostra durante o ensaio. Uma vez que se tem a deformação da amostra, é possível obter a tensão mecânica, à qual ela está submetida a partir da Eq. 3.8.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (3.8)$$

Onde σ é a tensão mecânica na amostra, E é o módulo de elasticidade do material da amostra e ε é a deformação sofrida pela amostra.

Foram utilizados quatro *strain gauges* uniaxiais da marca HBM modelo 1-LY41-3/120 (ANEXO VIII), com resistência elétrica de $120\ \Omega$ e grade de medição de 3 mm, montados em série, numa configuração de ponte completa. A Fig. 3.34 mostra a disposição dos *strain gauges* colados no corpo de prova.

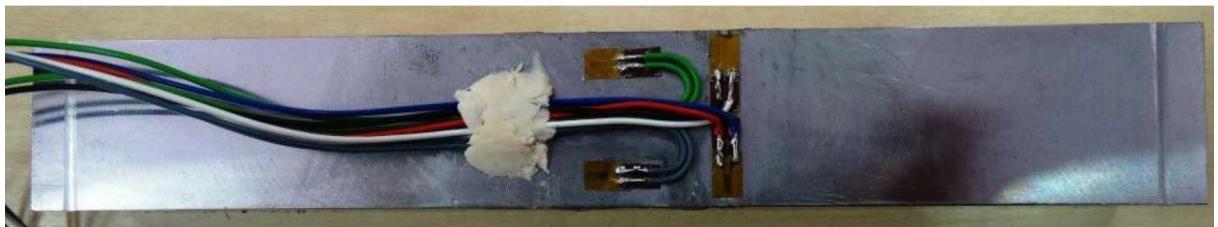


Figura 3.34 – *Strain gauges* montados na amostra para os testes de validação

O teste de validação foi conduzido aplicando-se carga na amostra de forma incremental, da mesma forma que no ensaio de RSL. A força aplicada na amostra variou de 0,5 a 10,0 kN, com 20 passos de carga constante, sendo cada passo incrementado com 5% da força máxima e mantido por 30 segundos. O teste foi conduzido mediante carregamento e descarregamento da amostra. A Figura 3.35 mostra o resultado obtido durante o teste de validação.

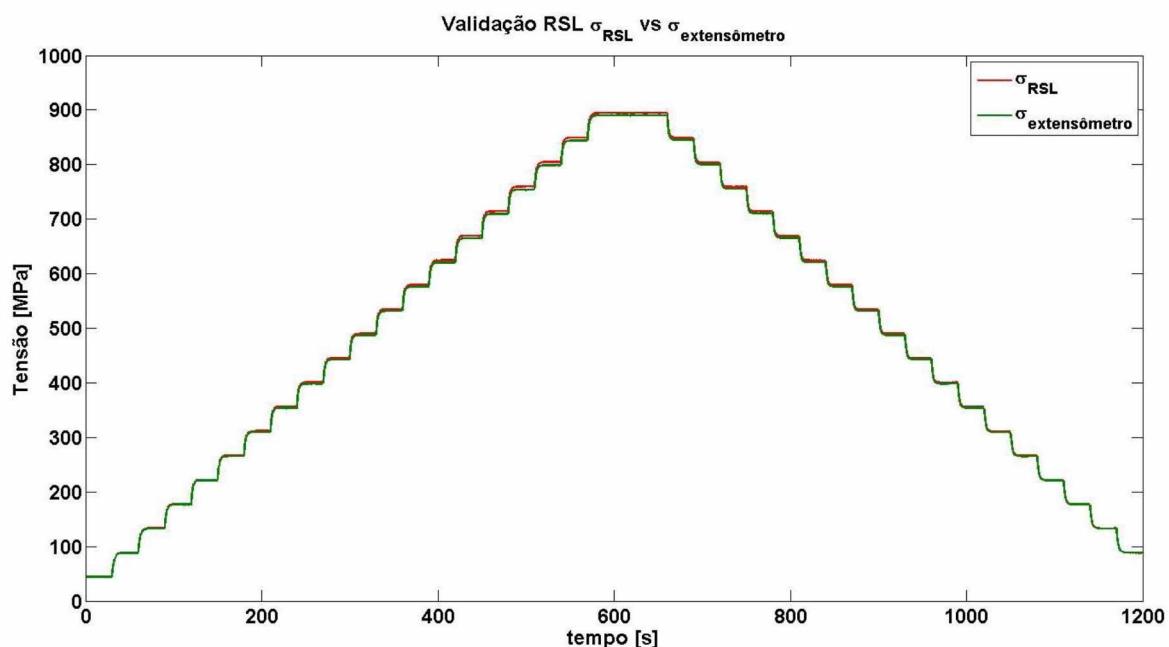


Figura 3.35 – Tensão na amostra calculada analiticamente (vermelho) e medida pelo *strain gauge* (verde) durante o ensaio de validação

Da Fig. 3.35 percebe-se que a tensão calculada pelo software acompanha a tensão no *strain gauge*, apresentando uma variação muito pequena. O erro entre as duas tensões pode ser observado na Fig. 3.36 a seguir.

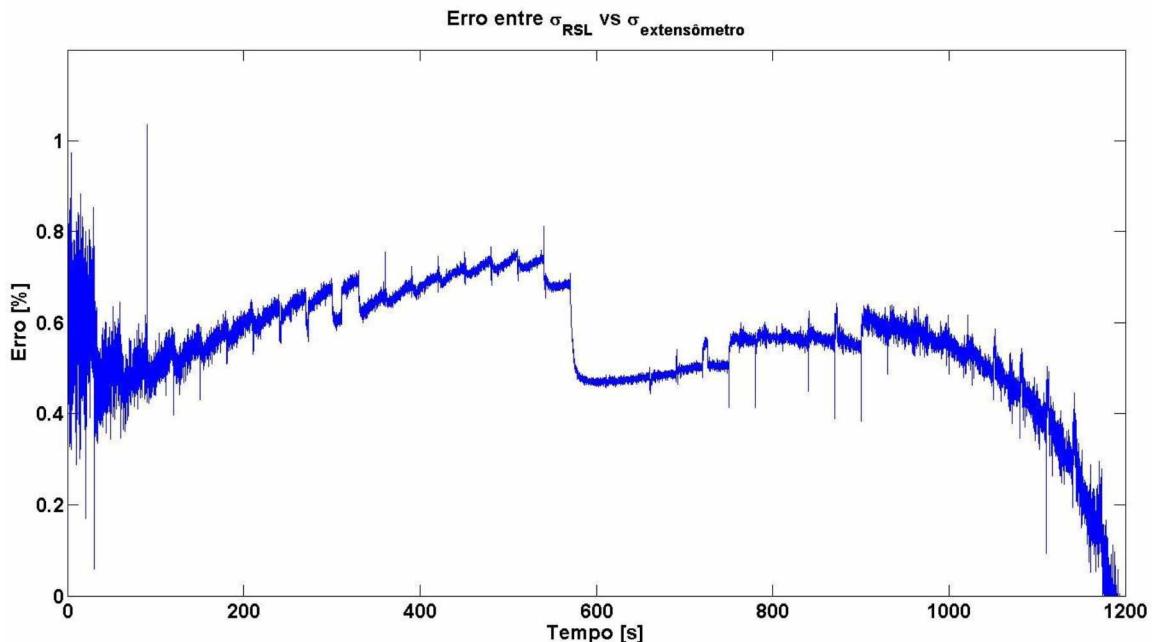


Figura 3.36 – Erro entre a tensão mecânica calculada pelo software do RSL e a tensão nos *strain gauges*

Observa-se através da Fig. 3.36 que o erro máximo foi de 1% entre as tensões calculada e experimental. Contudo, este erro mostra-se como sendo um único pico no gráfico, não se repetindo ao longo da medição, podendo, assim, ser atribuído a algum ruído ou outra fonte externa que possa ter influenciado a medição. O erro médio obtido dos dados foi de 0,6 % entre as tensões, mostrando que o equipamento construído aplica a tensão na amostra de uma forma tão eficiente que o cálculo analítico da tensão na amostra é suficientemente aceitável para fornecer os dados de tensão mecânica durante o ensaio.

CAPÍTULO IV

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta os procedimentos experimentais referentes a ensaios destinados a avaliar o desempenho do sistema construído. Para tal, foram realizados ensaios de RSL com o objetivo de se identificar a SFH do aço AISI 4140 beneficiado com dureza de 40 HRC.

Inicialmente é mostrada a caracterização do material das amostras, bem como os seus procedimentos de fabricação. A seguir são descritos os procedimentos utilizados na hidrogenação das amostras, bem como o perfil de carregamento mecânico utilizado.

4.1. Caracterização do Material das Amostras

Para a realização dos ensaios de avaliação de desempenho do RSL construído, selecionou-se o aço AISI 4140 com dureza de 40 HRC. Duas chapas desse material foram selecionadas para fabricar as amostras. A composição química dessas chapas foi avaliada utilizando um espectrômetro de emissão ótica com plasma induzido, da marca LECO, modelo GDS 500. A medição foi realizada ao longo da espessura das chapas, com o objetivo de verificar a existência de possíveis variações na composição química. A Fig. 4.1 mostra as amostras utilizadas nas análises de composição química com indicação das posições analisadas e a Tab. 4.1 mostra os valores obtidos. Os valores não mostram variações significativas na composição química ao longo da espessura.

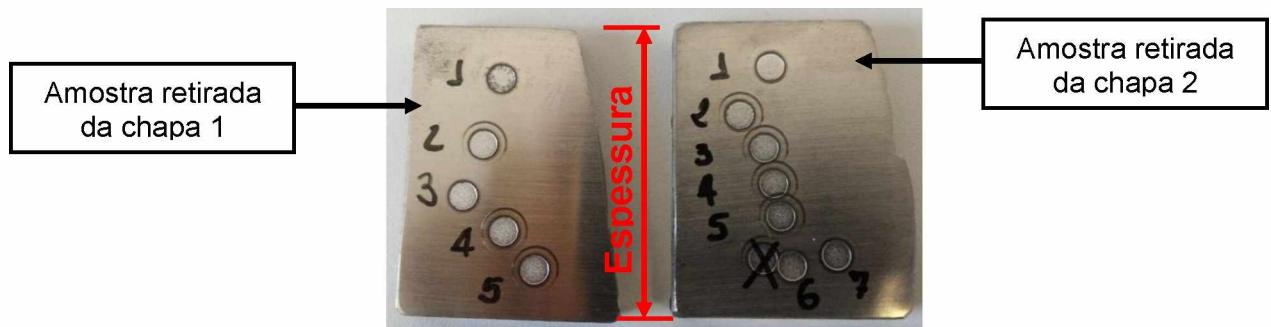


Figura 4.1 - Amostras utilizadas nas análises de composição química com indicações das posições analisadas

Tabela 4.1 - Composição química do material utilizado na confecção das amostras do RSL (% em peso)

Amostra	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Chapa 1	1 0,409	0,833	0,284	0,0174	0,0411	1,04	0,0957	0,179	0,169
	2 0,416	0,824	0,287	0,0182	0,0385	1,02	0,1050	0,172	0,166
	3 0,412	0,818	0,286	0,0169	0,0329	1,03	0,1010	0,175	0,167
	4 0,408	0,787	0,279	0,0159	0,0283	0,997	0,1060	0,168	0,165
	5 0,406	0,775	0,274	0,0150	0,0213	0,973	0,0919	0,158	0,161
Chapa 2	1 0,407	0,807	0,286	0,0168	0,0261	1,01	0,1070	0,170	0,167
	2 0,420	0,825	0,289	0,0172	0,0359	1,02	0,1070	0,182	0,169
	3 0,412	0,813	0,285	0,0177	0,0332	1,01	0,1040	0,176	0,167
	4 0,412	0,815	0,288	0,0184	0,0339	1,02	0,1030	0,182	0,169
	5 0,418	0,827	0,287	0,0171	0,0310	1,02	0,1020	0,181	0,169
	6 0,433	0,844	0,289	0,0181	0,0465	1,02	0,1010	0,181	0,169
	7 0,432	0,813	0,279	0,0166	0,0299	1,02	0,0943	0,175	0,169

Para avaliar as propriedades mecânicas do material das amostras do RSL, foi realizado um ensaio de tração em corpos de prova retirados das chapas e tratados termicamente na mesma condição das amostras utilizadas no RSL. Utilizou-se para tal uma máquina de tração servohidráulica da marca INSTRON, modelo 8801, cujo certificado de calibração está registrado no ANEXO VIV. Os ensaios de tração foram realizados conforme a norma ASTM E8/E8M. Os valores de limite de escoamento, limite de resistência à tração e módulo de elasticidade são mostrados a Tab. 4.2.

Tabela 4.2 - Resultados de ensaio de tração do material das amostras do RSL

Chapa	Limite de Escoamento (σ_y) [MPa]	Limite de Resistência à Tração (σ_{UTS}) [MPa]	Módulo de Elasticidade (E) [GPa]
1	1035,5	1154,7	205,4
2	1005,3	1146,8	206,7

Nos ensaios de SFH, o posicionamento do entalhe da amostra deve ser verificado, conforme ditames da norma ASTM F519. Caso haja uma clara direção de laminação na chapa do material, o entalhe deve ser na direção L-S. Tais direções, segundo a norma ASTM E1823, são a principal de deformação plástica na laminação e a terceira direção ortogonal, respectivamente. A orientação correta, conforme a norma ASTM E1823, é indicada na Fig. 4.2.

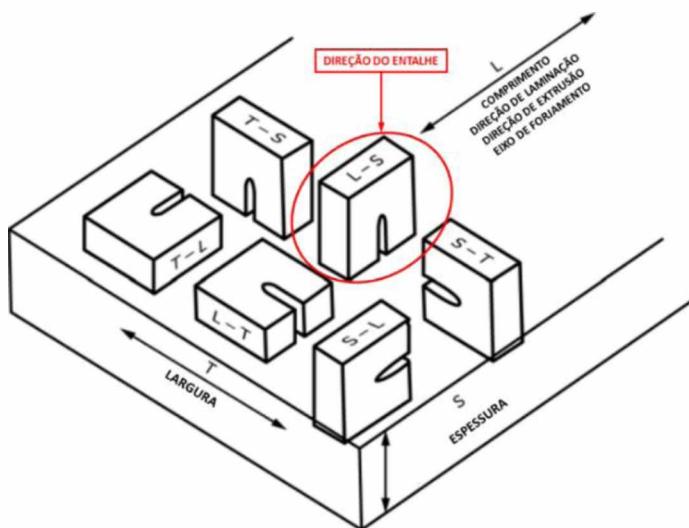


Figura 4.2 - Direção do entalhe para amostras de seção retangular (Norma ASTM E1823, 2013), modificado

Para se obter a direção de laminação das chapas utilizadas na fabricação das amostras do RSL, retiraram-se pequenas amostras das chapas para se identificar a direção de deformação dos grãos e/ou das inclusões usando análise metalográfica. Foram analisadas três faces, quais sejam: face referente à superfície, face correspondente ao comprimento e a face correspondente à largura das duas chapas utilizadas na fabricação das amostras do presente trabalho. Um *layout* da retirada das amostras para análise metalográfica, bem como as faces analisadas são representadas na Fig. 4.3.

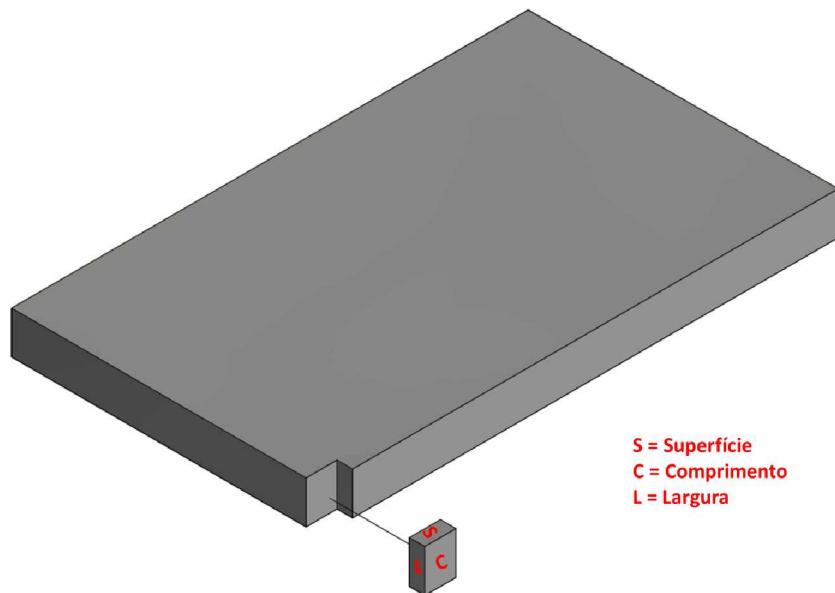


Figura 4.3 - *Layout* da retirada da amostra para análise metalográfica e faces analisadas

Foi realizada uma análise de textura dos grãos em pequenos aumentos e uma análise de microconstituintes por meio de um maior aumento. As imagens foram realizadas em um microscópio ótico da marca Olympus, modelo BX51M. As imagens foram registradas através de uma câmera Zeiss, modelo AxioCam ICc5. As Figs 4.4 a 4.9 mostram as microestruturas das diferentes faces analisadas.

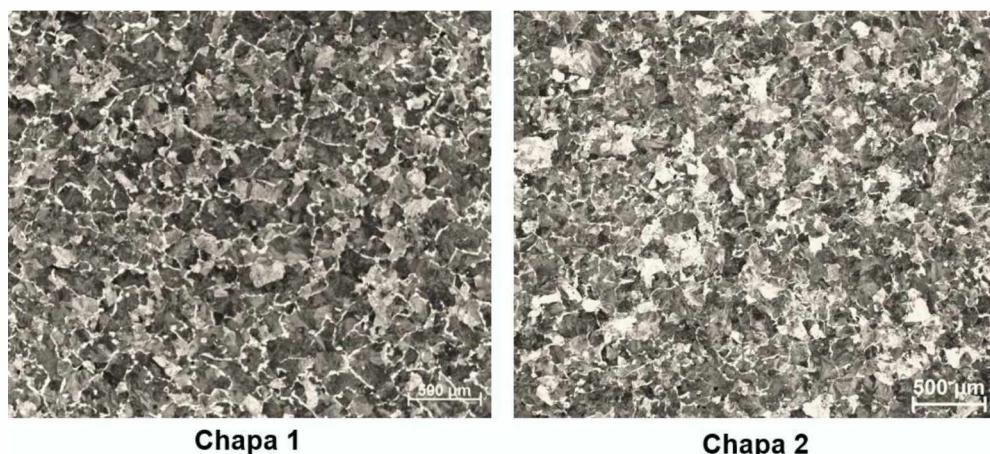


Figura 4.4 - Micrografia ótica da face referente ao comprimento das chapas

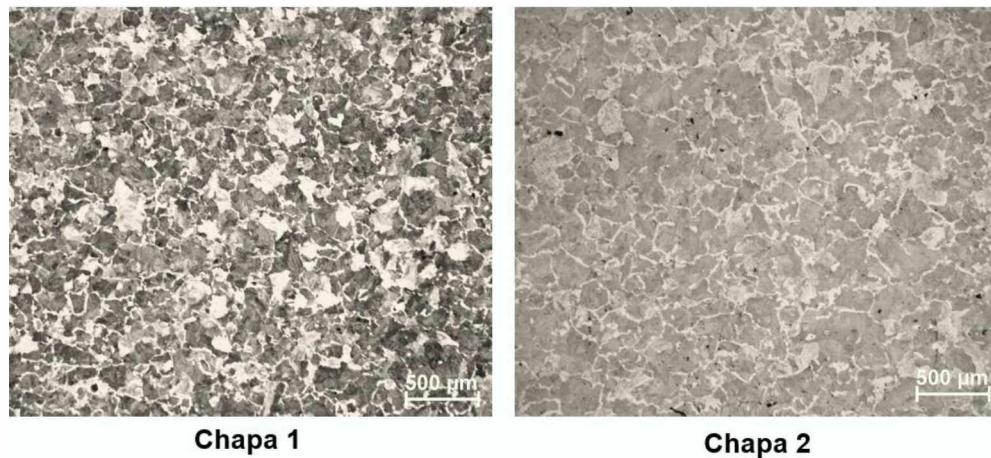


Figura 4.5 - Micrografia ótica da face referente à largura das chapas

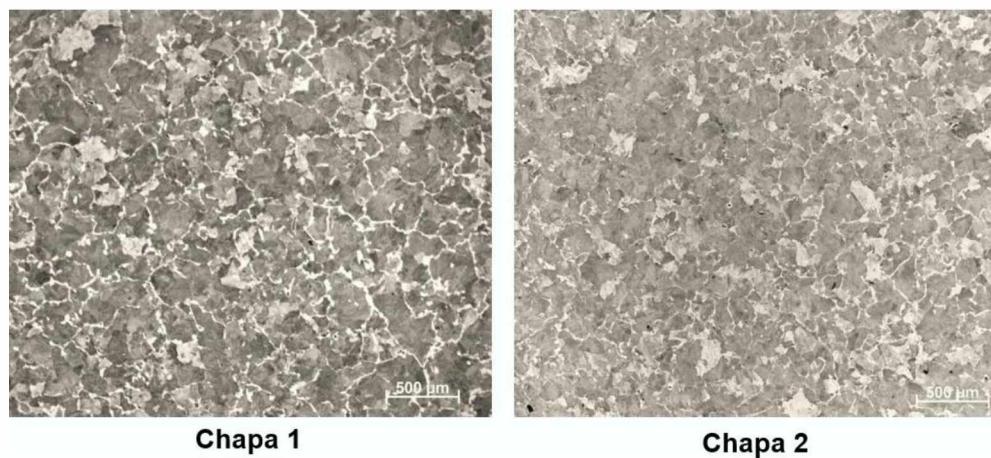


Figura 4.6 – Micrografia ótica da face referente à superfície das chapas



Figura 4.7 - Micrografia ótica da face referente ao comprimento das chapas

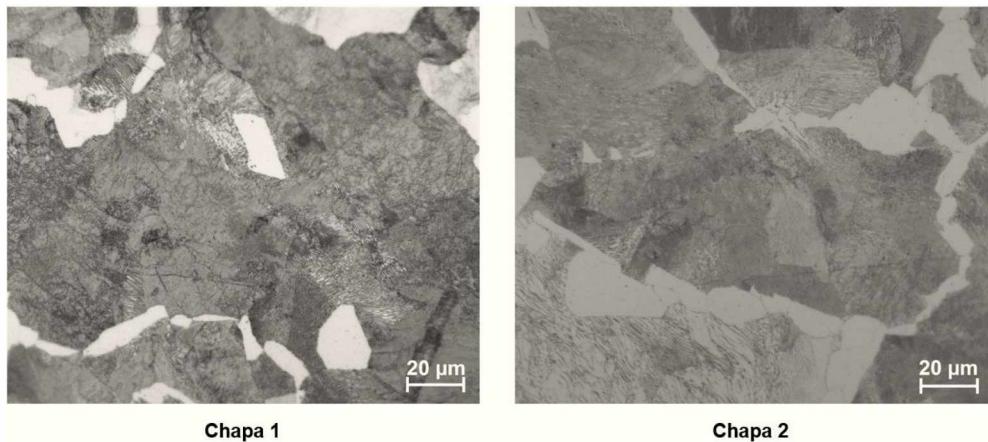


Figura 4.8 - Micrografia ótica da face referente à largura das chapas utilizadas



Figura 4.9 - Micrografia ótica da face referente à superfície das chapas

Como não foi possível identificar uma direção definida de deformação dos grãos nem dos microconstituintes, inclusive de inclusões, adotou-se para o entalhe a orientação correspondente à direção L-S da fig. 4.2 para todas as amostras.

4.2. Confecção das Amostras

As amostras para realização dos ensaios de RSL foram confeccionadas tendo por base a norma ASTM F519 e os parâmetros e restrições definidos no projeto do equipamento (Capítulo 3, Subcapítulo 3.1), possuindo, então, uma seção quadrada de $30 \times 30 \text{ mm}^2$, com comprimento de 200 mm e um entalhe de profundidade 3,6 mm e abertura de 90° . As dimensões da amostra, bem como as tolerâncias empregadas estão registradas na Fig. 4.10.

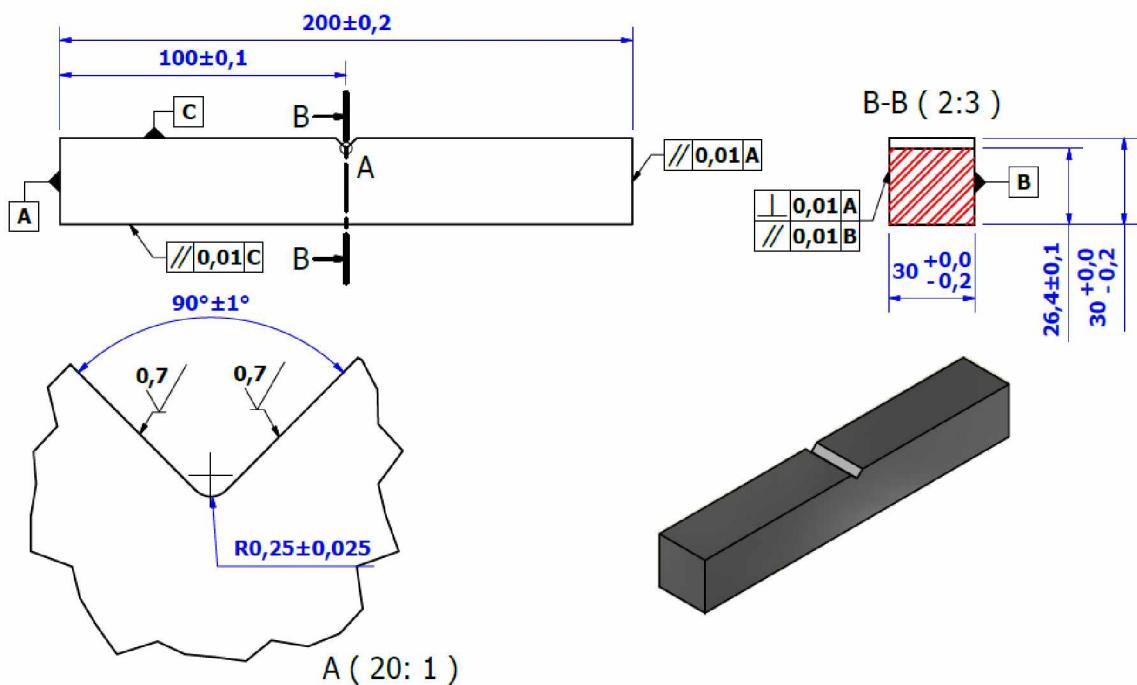


Figura 4.10 – Dimensões e tolerâncias empregadas na fabricação das amostras dos ensaios de RSL

Inicialmente, as chapas foram cortadas em tiras e usinadas por meio de uma fresa CNC. A seguir, as amostras foram tratadas termicamente para se atingir a dureza de 40 HRC. O tratamento térmico realizado foi de têmpera com austenitização a 870°C, seguida de revenimento a uma temperatura entre 490 – 500 °C. Após o tratamento térmico, as amostras foram novamente fresadas, de tal sorte a se obter as tolerâncias especificadas.

Para a usinagem do entalhe, utilizou-se eletroerosão a fio. Uma imagem da amostra fabricada é mostrada na Fig. 4.11.

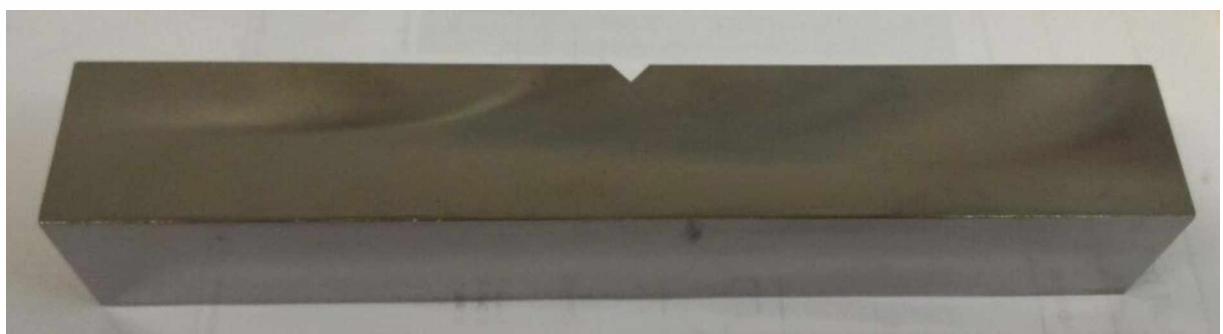


Figura 4.11 - Amostra fabricada para realização dos ensaios de RSL

4.3. Medição e Verificação das Dimensões e Tolerâncias das Amostras

Para verificar se as amostras utilizadas estavam dentro do que foi especificado pela norma ASTM F519, fez-se uma conferência de suas dimensões e tolerâncias. O comprimento das amostras foi medido usando um traçador de alturas da marca Mitutoyo, com resolução de 0,01 mm e faixa de medição de 300 mm (ANEXO IV). Sua altura e largura foram medidas com um paquímetro digital marca Mitutoyo com resolução de 0,01 mm e faixa de medição de 150 mm. A altura e ângulo de abertura do entalhe das amostras foram medidos por meio de um projetor de perfil modelo PJ-A3000, fabricado pela Mitutoyo, com resolução de 0,001 mm para as medições lineares e faixa nominal definida pela capacidade dos eixos X e Y, sendo de 50 mm, respectivamente (ANEXO V). A resolução para medição de ângulos é de 1' e a faixa nominal de 360°. Durante a medição de ambos os mensurandos foi utilizada uma lente de ampliação 10x. Também foram calculadas todas as incertezas relacionadas às medições das variáveis citadas, através das planilhas de MORAES (2011).

Também foram verificadas as tolerâncias de orientação das faces das amostras. Essa medição foi realizada numa máquina de medir por coordenadas da marca Mitutoyo, modelo BR-M443, tipo ponte móvel, manual, com resolução de 0,001 mm e volume de trabalho de 400 x 400 x 300 mm³, definido pela faixa nominal das escalas dos eixos X, Y e Z, respectivamente (ANEXO I). Uma esfera de rubi de 2 mm de diâmetro foi utilizada para fazer as medições. As faces tomadas como referência nessas medições são indicadas na Fig. 4.12.

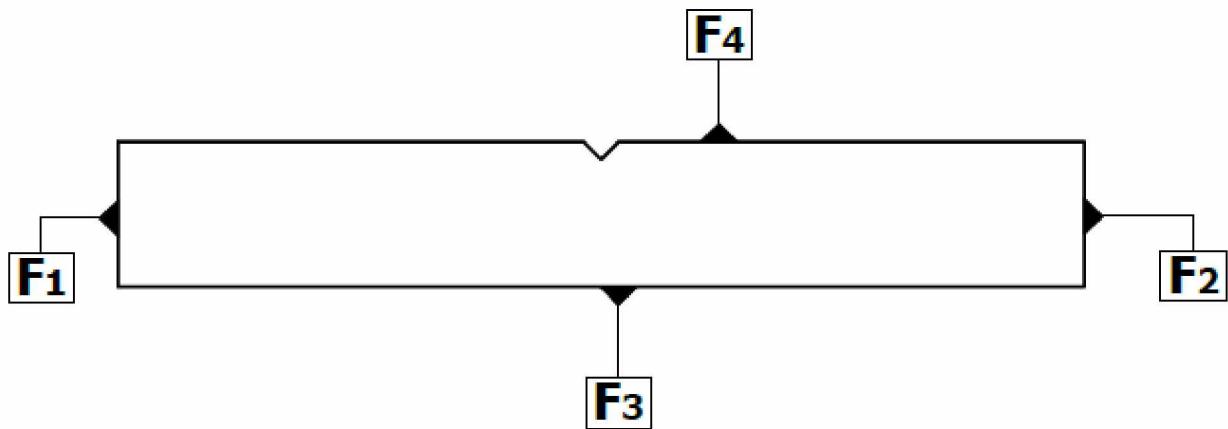


Figura 4.12 - Indicação das faces tomadas como referência para medição das tolerâncias de orientação da amostra

4.4. Verificação do Raio e Acabamento do Entalhe da Amostra

Para medir o raio do entalhe da amostra e acabamento superficial do entalhe, fabricou-se um entalhe num corpo de prova tratado nas mesmas condições das amostras do RSL. Isso se fez necessário, uma vez que não foi possível medir o acabamento do entalhe numa amostra do RSL, já que as superfícies do entalhe possuem uma inclinação e só poderiam ser avaliadas se estivessem paralelas com a superfície de medição da máquina de medir topografia superficial. Assim, para poder medir a rugosidade do entalhe, cortou-se uma amostra na região do entalhe e posicionou-se a superfície paralelamente ao plano da máquina. Para não se perder uma amostra do RSL, optou-se por fabricar um entalhe num corpo de prova em separado para medir esses valores. O entalhe foi usinado por meio de eletroerosão a fio utilizando uma máquina da marca AgieCharmiles modelo FW2U. Duas condições de corte distintas foram testadas a fim de se identificar a melhor condição a ser adotada para a fabricação do entalhe das amostras. Os parâmetros adotados para cada condição de corte estão apresentados nas Tabs. 4.3 e 4.4. O offset representa a espessura da camada de material que é retirada em cada passe e a tecnologia é dada em função da marca e modelo da máquina de eletroerosão a fio. O corpo de prova fabricado para análise do acabamento superficial do entalhe pode ser visto na Fig. 4.13.

Tabela 4.3 – Parâmetros adotados para a condição 1 de corte na eletroerosão a fio

Condição 1 ($\Phi_{fio} = 0,18 \text{ mm}$)		
Passes	Offset [mm]	Tecnologia
1	0,160	C821
2	0,095	C822
3	0,090	C823
4	0,085	C823

Tabela 4.4 - Parâmetros adotados para a condição 2 de corte na eletroerosão a fio

Condição 2 ($\Phi_{fio} = 0,12 \text{ mm}$)		
Passes	Offset [mm]	Tecnologia
1	0,130	C403
2	0,065	C822
3	0,062	C823
4	0,058	C823
5	0,055	C823



Figura 4.13 – Entalhes fabricados para análise do raio do entalhe e do acabamento superficial. O entalhe indicado em azul foi usinado com a condição de corte 1 e o entalhe indicado em vermelho foi usinado com a condição de corte 2

A medição do raio do entalhe foi realizada num microscópio ótico da fabricante Zeiss, modelo AxioCam ICc5. Utilizando um aumento de 10x, registrou-se uma imagem do arredondamento da raiz do entalhe e, traçando-se um círculo tangente às superfícies do entalhe, através do software do equipamento, foi possível obter o valor do raio do entalhe.

O seu acabamento superficial foi medido por meio de um interferômetro laser da fabricante Taylor Robson, modelo Talysurf CLI 2000, onde foram medidos nove perfis de rugosidade ao longo da superfície do entalhe. A medição da rugosidade é ilustrada na Fig. 4.14.

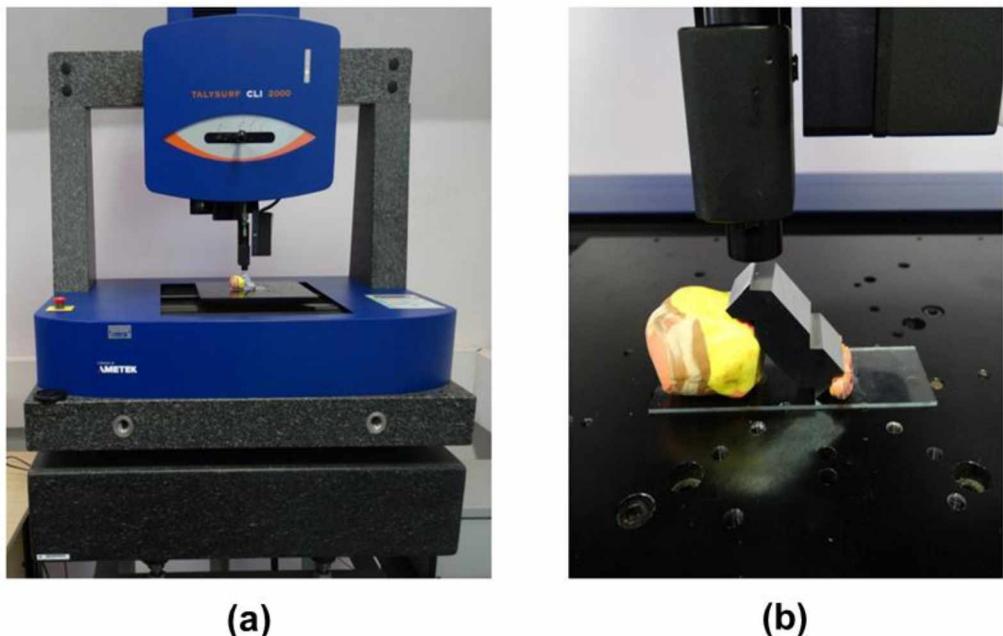


Figura 4.14 – (a) Interferômetro laser utilizado para medir a rugosidade do entalhe e (b) posicionamento do corpo de prova para medição do acabamento superficial do entalhe

4.5. Hidrogenação da Amostra

Para hidrogenar a amostra, aplicou-se um potencial catódico enquanto a mesma estava submersa no fluido eletrolítico. O fluido utilizado para hidrogenar a amostra foi água deionizada com 3,5% de NaCl grau técnico.

A configuração utilizada para aplicação do potencial na amostra foi uma configuração a três eletrodos, utilizando-se um eletrodo de Ag/AgCl como referência, três placas de grafite ligadas em série como contra eletrodo e a amostra como eletrodo de trabalho, como mostrado na Fig. 4.15. O potencial foi aplicado utilizando-se um potenciómetro fabricado pela Metrohm Autolab, modelo PGSTAT 204, com uma capacidade de tensão de 10 V e corrente de 400 mA. Através do software NOVA 2.0, foi realizada uma cronoamperometria, que permitiu aplicar o potencial elétrico na amostra enquanto se monitorava a corrente elétrica, como poder ser visto na Fig. 4.16.

Os ensaios foram realizados variando-se a tensão na amostra em quatro valores distintos, quais sejam: -0,8 V, -1,0 V, -1,1 V e -1,2 V com relação ao eletrodo de Ag/AgCl.

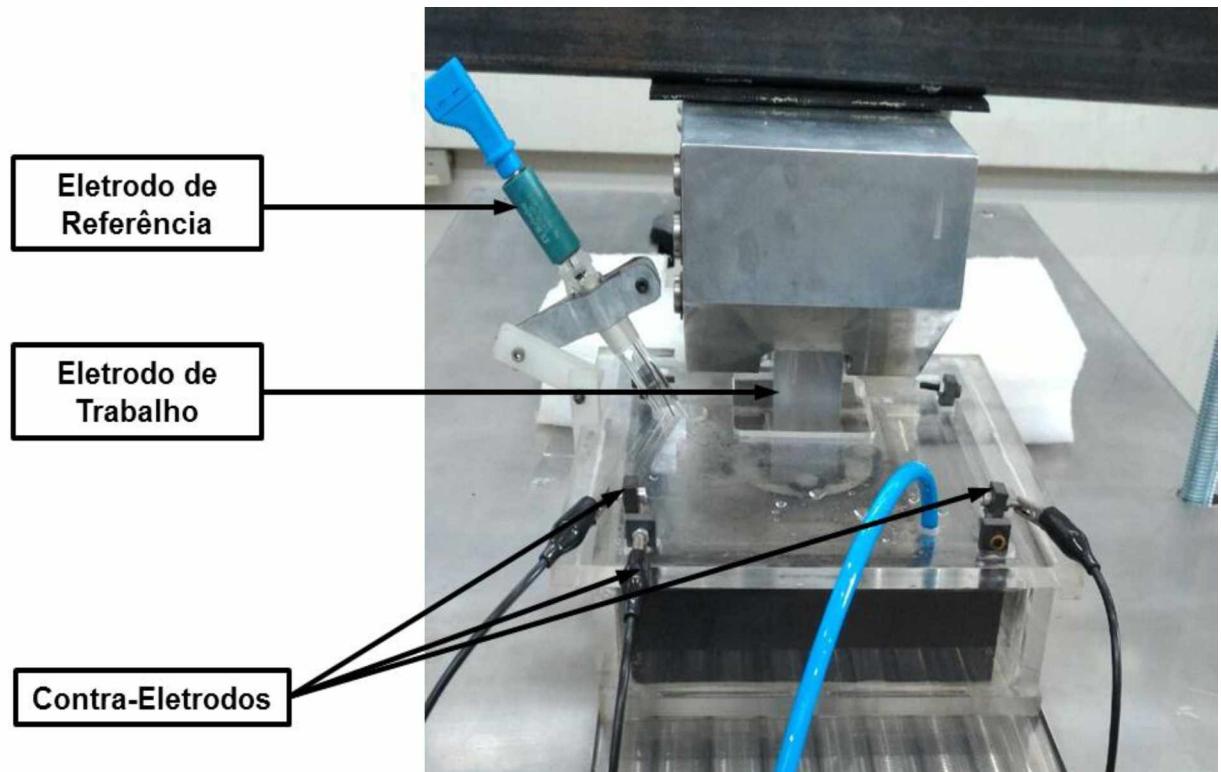


Figura 4.15 – Célula eletrolítica utilizada para hidrogenação da amostra durante o ensaio de RSL

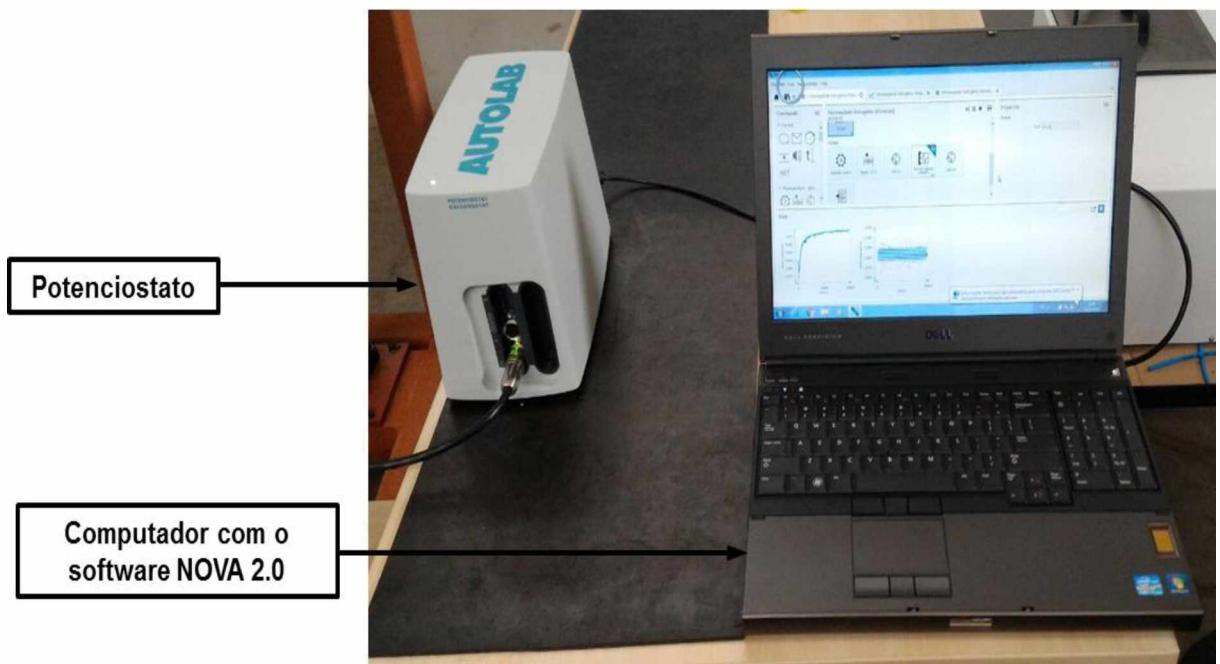


Figura 4.16 – Sistema de controle potencioscópico

4.6. Perfil de Carregamento das Amostras

Para determinação da força de referência, ou P_{FFS} , realizaram-se ensaios ao ar em quatro amostras livres de hidrogênio, utilizando uma taxa de carregamento constante e de acordo com a norma ASTM E8. Em seguida, foi realizado um novo ensaio de verificação da tensão mecânica com o objetivo de se avaliar eventuais alterações de performance do equipamento RSL.

Nos ensaios com incremento de carga, o perfil de carregamento utilizado, segundo a norma ASTM F1624, foi de (10/5/2,4). Ou seja, o ensaio foi dividido em 10 passos de duas horas cada e 10 passos de quatro horas. Cada passo foi incrementado com 5% da força de ruptura da amostra. No primeiro ensaio com incremento de carga, a carga de referência, ou P_{MAX} , foi considerado como sendo o P_{FFS} . Nos ensaios subsequentes, $P_{MAX} = 1,1 P_{th}$, onde P_{th} é a carga do incremento imediatamente anterior ao incremento em que ocorre a fratura da amostra no ensaio anterior.

Os ensaios foram realizados até se atingir o critério de parada estabelecido pela norma ASTM F1624, que é a queda de 5% do P_{FFS} ou maior na força aplicada na amostra durante o ensaio. Se essa queda não for identificada até o final do ensaio, ou seja, se a amostra não fraturar até se chegar no último passo de carga, o ensaio é encerrado. A montagem do equipamento para a realização dos ensaios é mostrada na Fig. 4.17.

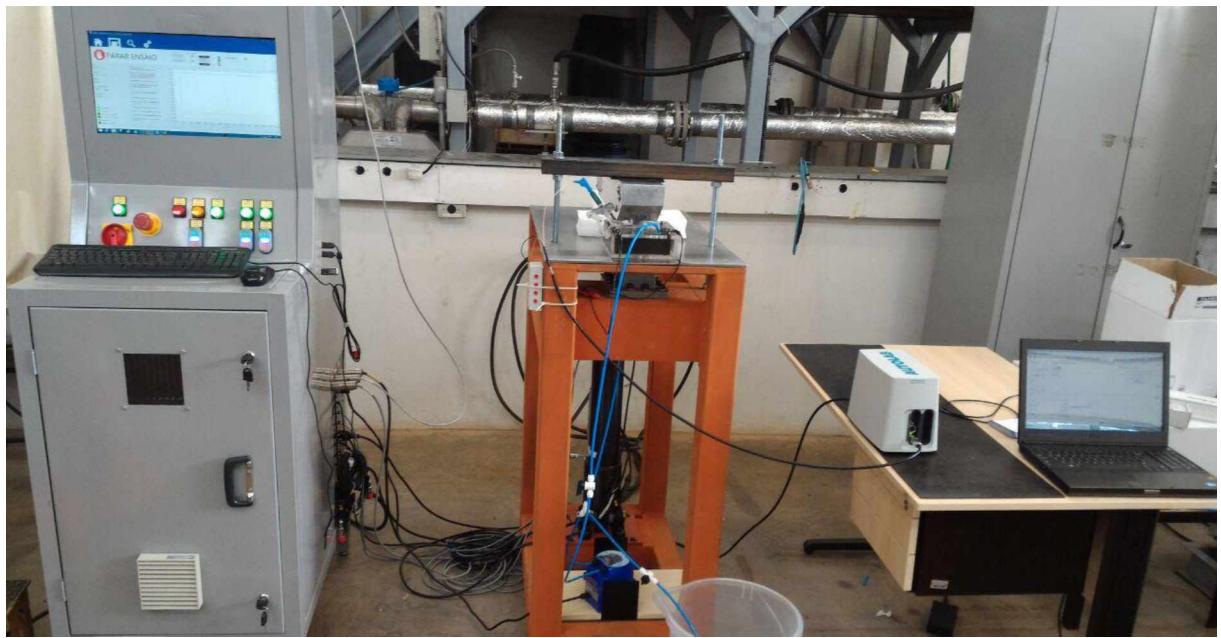


Figura 4.17 - Montagem do equipamento para realização dos ensaios.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente são apresentados os resultados das medições das amostras utilizadas nos ensaios de RSL, bem como a verificação do raio e rugosidade do entalhe. Em seguida é feita uma análise da influência do fator de concentração de tensão nas tensões que aparecem na raiz do entalhe. Por fim, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios para determinação do P_{FFS} e dos ensaios de RSL. Vale ressaltar que para cada ensaio corrigiu-se a equação da tensão mecânica na amostra com base nas dimensões medidas, garantindo que o valor de tensão mecânica medido fosse o mais preciso possível.

5.1. Verificação das Dimensões e Tolerâncias das Amostras

Os resultados obtidos na medição das dimensões e tolerâncias das amostras podem ser visualizados nas Tabs. 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 – Resultados das medições das dimensões das amostras utilizadas no ensaio de RSL e correspondentes incertezas de medição

Amostra	Dimensão	Média	Desvio Padrão	U
1.1	Altura [mm]	29,88	0,01	0,03
	Largura [mm]	29,87	0,01	0,03
	Comprimento [mm]	200,09	0,01	0,03
	Altura do entalhe [mm]	3,630	0,005	0,006
	Ângulo de abertura do entalhe [° : ' : "]	90:10:00	0:03:00	0:02:00
1.2	Altura [mm]	29,87	0,01	0,03
	Largura [mm]	29,88	0,01	0,03
	Comprimento [mm]	200,03	0,02	0,03
	Altura do entalhe [mm]	3,536	0,009	0,012
	Ângulo de abertura do entalhe [° : ' : "]	90:22:00	0:06:00	0:06:00

Tabela 5.1 – Continuação

Amostra	Dimensão	Média	Desvio Padrão	U
1.3	Altura [mm]	29,88	0,01	0,03
	Largura [mm]	29,88	0,00	0,03
	Comprimento [mm]	200,12	0,02	0,03
	Altura do entalhe [mm]	3,560	0,001	0,002
	Ângulo de abertura do entalhe [° : ' : "]	90:09:00	0:02:00	0:02:00
1.4	Altura [mm]	200,12	0,02	0,03
	Largura [mm]	29,87	0,01	0,03
	Comprimento [mm]	29,86	0,01	0,03
	Altura do entalhe [mm]	3,604	0,005	0,006
	Ângulo de abertura do entalhe [° : ' : "]	90:10:00	0:03:00	0:02:00
1.6	Altura [mm]	29,86	0,01	0,03
	Largura [mm]	29,86	0,01	0,03
	Comprimento [mm]	200,12	0,02	0,03
	Altura do entalhe [mm]	3,564	0,003	0,004
	Ângulo de abertura do entalhe [° : ' : "]	90:05:00	0:04:00	0:04:00
1.7	Altura [mm]	29,87	0,01	0,03
	Largura [mm]	29,87	0,01	0,03
	Comprimento [mm]	200,12	0,01	0,03
	Altura do entalhe [mm]	3,612	0,001	0,002
	Ângulo de abertura do entalhe [° : ' : "]	90:01:00	0:03:00	0:02:00
1.8	Altura [mm]	29,87	0,01	0,03
	Largura [mm]	29,87	0,01	0,03
	Comprimento [mm]	200,13	0,01	0,03
	Altura do entalhe [mm]	3,633	0,004	0,005
	Ângulo de abertura do entalhe [° : ' : "]	90:10:00	0:04:00	0:04:00
2.2	Altura [mm]	29,88	0,01	0,03
	Largura [mm]	29,89	0,01	0,03
	Comprimento [mm]	200,15	0,01	0,03
	Altura do entalhe [mm]	3,557	0,003	0,004
	Ângulo de abertura do entalhe [° : ' : "]	90:07:00	0:03:00	0:02:00
2.4	Altura [mm]	29,88	0,01	0,03
	Largura [mm]	29,88	0,01	0,03
	Comprimento [mm]	200,10	0,02	0,03
	Altura do entalhe [mm]	3,554	0,002	0,003
	Ângulo de abertura do entalhe [° : ' : "]	90:03:00	0:03:00	0:02:00
2.7	Altura [mm]	29,88	0,01	0,03
	Largura [mm]	29,89	0,01	0,03
	Comprimento [mm]	200,20	0,02	0,03
	Altura do entalhe [mm]	3,59	0,00	0,00
	Ângulo de abertura do entalhe [° : ' : "]	90:15:00	0:05:00	0:06:00
2.8	Altura [mm]	29,87	0,01	0,03
	Largura [mm]	29,87	0,01	0,03
	Comprimento [mm]	200,13	0,01	0,02
	Altura do entalhe [mm]	3,536	0,002	0,003
	Ângulo de abertura do entalhe [° : ' : "]	90:12:00	0:08:00	0:10:00

Tabela 5.2 – Resultados das medições de paralelismo e perpendicularidade das amostras e correspondentes incertezas de medição em mm

Amostra	Tolerância	Média	Desvio Padrão	U
1.1	Paralelismo entre F3 e F4	0,080	0,005	0,006
	Paralelismo entre F1 e F2	0,115	0,037	0,046
	Perpendicularidade entre F1 e F4	0,061	0,029	0,037
	Perpendicularidade entre F2 e F4	0,046	0,015	0,020
1.2	Paralelismo entre F3 e F4	0,059	0,004	0,006
	Paralelismo entre F1 e F2	0,133	0,032	0,040
	Perpendicularidade entre F1 e F4	0,063	0,040	0,050
	Perpendicularidade entre F2 e F4	0,059	0,064	0,079
1.3	Paralelismo entre F3 e F4	0,071	0,004	0,006
	Paralelismo entre F1 e F2	0,070	0,045	0,056
	Perpendicularidade entre F1 e F4	0,048	0,018	0,023
	Perpendicularidade entre F2 e F4	0,053	0,026	0,034
1.4	Paralelismo entre F3 e F4	0,266	0,003	0,005
	Paralelismo entre F1 e F2	0,122	0,053	0,066
	Perpendicularidade entre F1 e F4	0,054	0,030	0,038
	Perpendicularidade entre F2 e F4	0,061	0,030	0,038
1.6	Paralelismo entre F3 e F4	0,050	0,005	0,007
	Paralelismo entre F1 e F2	0,127	0,042	0,053
	Perpendicularidade entre F1 e F4	0,058	0,024	0,030
	Perpendicularidade entre F2 e F4	0,042	0,029	0,037
1.7	Paralelismo entre F3 e F4	0,078	0,004	0,005
	Paralelismo entre F1 e F2	0,038	0,024	0,030
	Perpendicularidade entre F1 e F4	0,035	0,020	0,025
	Perpendicularidade entre F2 e F4	0,028	0,012	0,016
1.8	Paralelismo entre F3 e F4	0,009	0,001	0,004
	Paralelismo entre F1 e F2	0,136	0,037	0,046
	Perpendicularidade entre F1 e F4	0,065	0,043	0,054
	Perpendicularidade entre F2 e F4	0,040	0,022	0,028
2.2	Paralelismo entre F3 e F4	0,149	0,004	0,006
	Paralelismo entre F1 e F2	0,132	0,015	0,019
	Perpendicularidade entre F1 e F4	0,049	0,021	0,027
	Perpendicularidade entre F2 e F4	0,047	0,008	0,010
2.4	Paralelismo entre F3 e F4	0,043	0,004	0,005
	Paralelismo entre F1 e F2	0,167	0,009	0,013
	Perpendicularidade entre F1 e F4	0,096	0,017	0,022
	Perpendicularidade entre F2 e F4	0,054	0,007	0,010
2.7	Paralelismo entre F3 e F4	0,019	0,003	0,005
	Paralelismo entre F1 e F2	0,036	0,014	0,018
	Perpendicularidade entre F1 e F4	0,041	0,005	0,006
	Perpendicularidade entre F2 e F4	0,011	0,005	0,007
2.8	Paralelismo entre F3 e F4	0,018	0,002	0,004
	Paralelismo entre F1 e F2	0,056	0,010	0,013
	Perpendicularidade entre F1 e F4	0,066	0,030	0,038
	Perpendicularidade entre F2 e F4	0,041	0,017	0,022

Observa-se que as dimensões da amostra estão dentro das tolerâncias dimensionais estabelecidas na Fig. 4.9, mostrando uma pequena variação de uma amostra para outra. Uma variação maior foi observada nas tolerâncias de orientação das faces, mas, ainda

assim, as dimensões se encontram dentro dos limites estabelecidos pela norma ASTM F519. Logo, as amostras fabricadas estão dentro do especificado para o ensaio do tipo RSL.

Os resultados de medição do raio e do acabamento superficial do entalhe são apresentados a seguir. A Figura 5.1 mostra os resultados da medição do raio do entalhe e as Tabs. 5.3 e 5.4 mostram os resultados de rugosidade do entalhe para os parâmetros de corte 1 e 2, descritos no capítulo anterior.

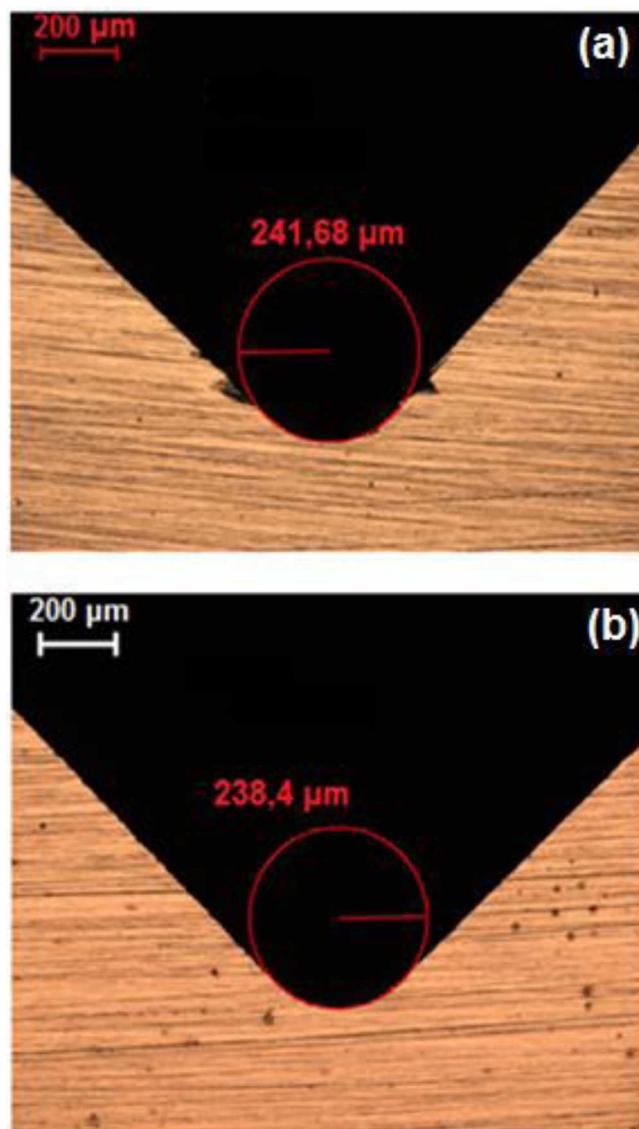


Figura 5.1 – Resultados da medição do raio do entalhe usinado com (a) parâmetro de corte 1 e (b) parâmetro de corte 2

Tabela 5.3 – Parâmetros de rugosidade da superfície do entalhe usinado (μm), utilizando os parâmetros de corte 1

Parâmetro	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
R_p	5,87	0,43	5,20	6,63
R_v	6,75	2,06	4,70	11,34
R_z	12,62	2,20	10,18	17,78
R_c	4,33	0,45	3,97	5,50
R_t	16,80	4,15	10,93	25,41
R_a	1,35	0,12	1,19	1,63
R_q	1,75	0,19	1,51	2,20
R_{sk}	-0,22	0,35	-0,93	0,25
R_{ku}	5,14	1,60	3,47	8,19

Tabela 5.4 - Parâmetros de rugosidade medida (μm) da superfície do entalhe usinado com os parâmetros de corte 2

Parâmetro	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
R_p	6,03	1,57	3,62	8,12
R_v	4,71	1,25	3,42	7,02
R_z	10,74	2,56	7,10	14,79
R_c	4,09	0,85	2,90	5,34
R_t	13,56	3,17	8,97	17,76
R_a	1,28	0,26	0,93	1,63
R_q	1,64	0,34	1,19	2,07
R_{sk}	0,25	0,36	-0,35	0,80
R_{ku}	3,98	0,84	3,00	5,66

Os resultados de medição do entalhe mostram que para se atingir o valor de raio de entalhe necessário ($0,250 \pm 0,025$ mm, como mostrado na Fig. 4.9), os dois procedimentos adotados atendem à norma ASTM F519.

Com relação ao acabamento superficial, tem-se uma rugosidade média da ordem de $1,3 \mu\text{m}$. A norma ASTM F519 prevê uma rugosidade média de $0,7 \mu\text{m}$ para o entalhe. Em função da impossibilidade momentânea de se melhorar esse acabamento na eletroerosão, adotou-se nesse trabalho as condições de corte de número 2 para usinar os entalhes das amostras. Todavia, esse é um parâmetro que deve ser melhorado em trabalhos futuros.

5.2. Avaliação da Influência do Fator de Concentração de Tensão (K_t) na Tensão Mecânica na Raiz do Entalhe

De acordo com a teoria mecânica da fratura, o entalhe presente na amostra faz com que haja uma concentração de tensão na amostra, de tal forma que um fator de concentração de tensão K_t deve ser considerado no cálculo da tensão mecânica máxima na amostra. Segundo Pilkey *et al* (2008), a tensão mecânica na raiz do entalhe é calculada como sendo:

$$\sigma_{nom} = F_a \left[\frac{3}{b(h-a)^2} (2d_1 \sin \theta + 2d_3 \cos \theta + d_6 \sin \theta) - \frac{\cos \theta}{b(h-a)} \right] \quad (5.1)$$

$$\sigma_{max} = K_t \times \sigma_{nom} \quad (5.2)$$

Onde as variáveis presentes na Eq. (5.1) são as mesmas da Eq. (3.4), com exceção de a que é a altura do entalhe. σ_{nom} é a tensão nominal na região do entalhe da amostra e σ_{max} é a tensão máxima na raiz do entalhe levando K_t em consideração. O cálculo do fator de concentração de tensão, para uma amostra com entalhe em "V" com 90° de abertura submetida a um momento fletor, segundo Pilkey *et al.* (2008), é dado como sendo:

$$K_t = C_1 + C_2 \left(\frac{a}{h} \right) + C_3 \left(\frac{a}{h} \right)^2 + C_4 \left(\frac{a}{h} \right)^3 \quad (5.3)$$

$$C_1 = 2,966 + 0,502 \left(\frac{a}{r} \right) - 0,009 \left(\frac{a}{r} \right)^2 \quad (5.4)$$

$$C_2 = -6,475 - 1,126 \left(\frac{a}{r} \right) + 0,019 \left(\frac{a}{r} \right)^2 \quad (5.5)$$

$$C_3 = 8,023 + 1,253 \left(\frac{a}{r} \right) - 0,020 \left(\frac{a}{r} \right)^2 \quad (5.6)$$

$$C_4 = -3,572 - 0,634 \left(\frac{a}{r} \right) + 0,010 \left(\frac{a}{r} \right)^2 \quad (5.7)$$

Onde r é o raio do entalhe, K_t é o fator de concentração de tensão C_1 , C_2 , C_3 e C_4 são fatores de forma calculados em função de a e r . Para uma amostra com seção quadrada de 30 x 30 mm² e um entalhe com profundidade de 3,6 mm, raio de 0,25 mm e ângulo de abertura de 90° e considerando o modelo linear elástico, tem-se:

$$C_1 = 2,966 + 0,502 \left(\frac{3,6}{0,25} \right) - 0,009 \left(\frac{3,6}{0,25} \right)^2 = 8,328$$

$$C_2 = -6,475 - 1,126 \left(\frac{3,6}{0,25} \right) + 0,019 \left(\frac{3,6}{0,25} \right)^2 = -18,749$$

$$C_3 = 8,023 + 1,253 \left(\frac{3,6}{0,25} \right) - 0,020 \left(\frac{3,6}{0,25} \right)^2 = 21,919$$

$$C_4 = -3,572 - 0,634 \left(\frac{3,6}{0,25} \right) + 0,010 \left(\frac{3,6}{0,25} \right)^2 = -10,628$$

Logo:

$$K_t = 8,328 - 18,749 \left(\frac{3,6}{30} \right) + 21,919 \left(\frac{3,6}{30} \right)^2 - 10,628 \left(\frac{3,6}{30} \right)^3 = 6,38$$

A partir das Eqs. (5.1) e (5.2), para uma força $F_a = 14$ kN e considerando o modelo linear elástico, tem-se as seguintes tensões mecânicas nominal e máxima na região do entalhe.

$$\sigma_{\text{nom}} = 14000 \left[\frac{3}{30(30-3,6)^2} (2*24 * \text{sen } 0 + 2*400 \cos 0 + 114 \text{sen } 0) - \frac{\cos 0}{30(30-3,6)} \right] = 1590 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{max}} = 6,38 * 1590 = 10100 \text{ MPa}$$

No entanto, alguns aspectos devem ser considerados para se poder avaliar a influência do K_t na tensão mecânica na raiz do entalhe, visto que a rigidez do material, nível de deformação na região do entalhe e variação do raio do entalhe devido à deformação do mesmo são fatores que atenuam a influência de K_t nas tensões mecânicas na amostra.

Para poder se verificar a influência do fator de concentração de tensão na tensão mecânica da amostra, realizou-se uma simulação em elementos finitos com as propriedades mecânicas do material utilizado, obtidas do ensaio de tração. Para realizar a simulação da amostra utilizou-se uma restrição fixa em uma de suas extremidades e na outra foi aplicada uma força de 14 kN, a uma distância de 400,027 mm da amostra, visto que essa é a distância do ponto de aplicação da força até a amostra do equipamento, como mostra a Fig. 5.2.

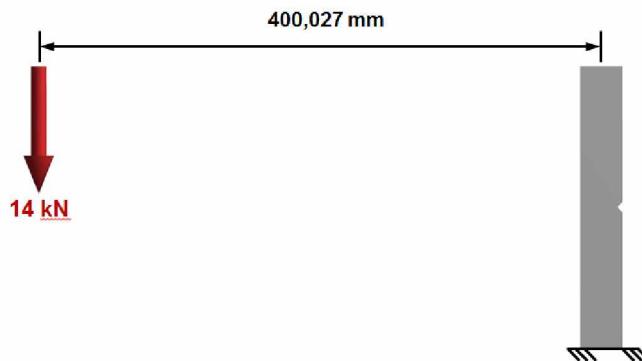


Figura 5.2 – Condições de contorno utilizadas na simulação dos esforços na amostra

As tensões foram calculadas no software de simulação em elementos finitos ANSYS®, utilizando-se o critério de von Mises e considerando a plasticidade do material da amostra. Os resultados obtidos podem ser vistos nas Figs. 5.3 e 5.4.

B: Amostra 4140 c/ plasticidade

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

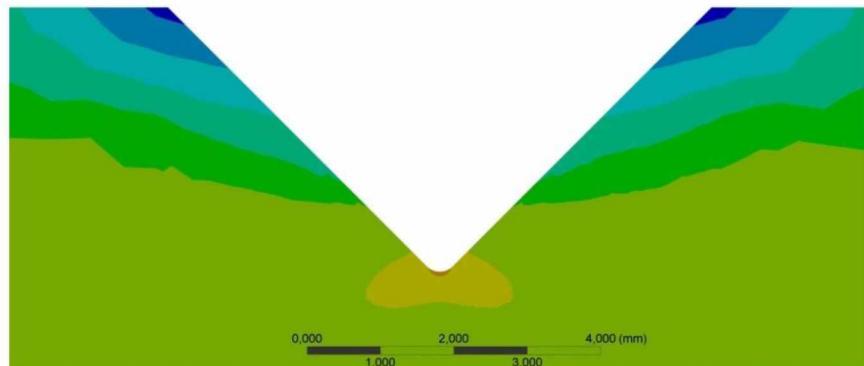
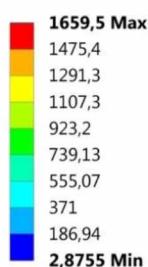


Figura 5.3 – Tensões mecânicas no entalhe da amostra (vista lateral)

B: Amostra 4140 c/ plasticidade

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

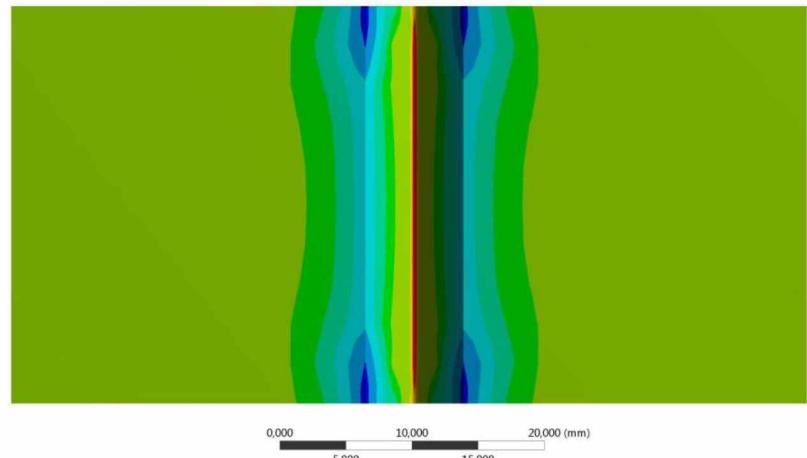
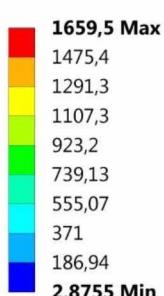


Figura 5.4 - Tensões mecânicas no entalhe da amostra (vista superior)

Os resultados da simulação indicam que as tensões mecânicas médias na região do entalhe estão muito próximas daquelas calculadas desconsiderando o K_t (σ_{nom}). Logo, pode-se concluir que o fator de concentração de tensão não influencia significativamente as tensões na região do entalhe da amostra. Isso se deve ao fato de que deformação plástica na região do entalhe atenua as tensões mecânicas, fazendo com que o raio do entalhe aumente, diminuindo, assim, a concentração de tensão. Com isso, adotou-se o cálculo da tensão máxima na amostra com entalhe como sendo a expressão vista na Eq. (5.1).

5.3. Resultados de P_{FFS}

A norma ASTM F1624 prevê na determinação do P_{FFS} a realização de apenas um ensaio. Todavia, no presente trabalho foram realizados quatro ensaios. Esse procedimento foi adotado com o intuito de se melhorar a precisão dos resultados obtidos no RSL. Os resultados obtidos são mostrados na Fig. 5.5 e na Tab. 5.5.

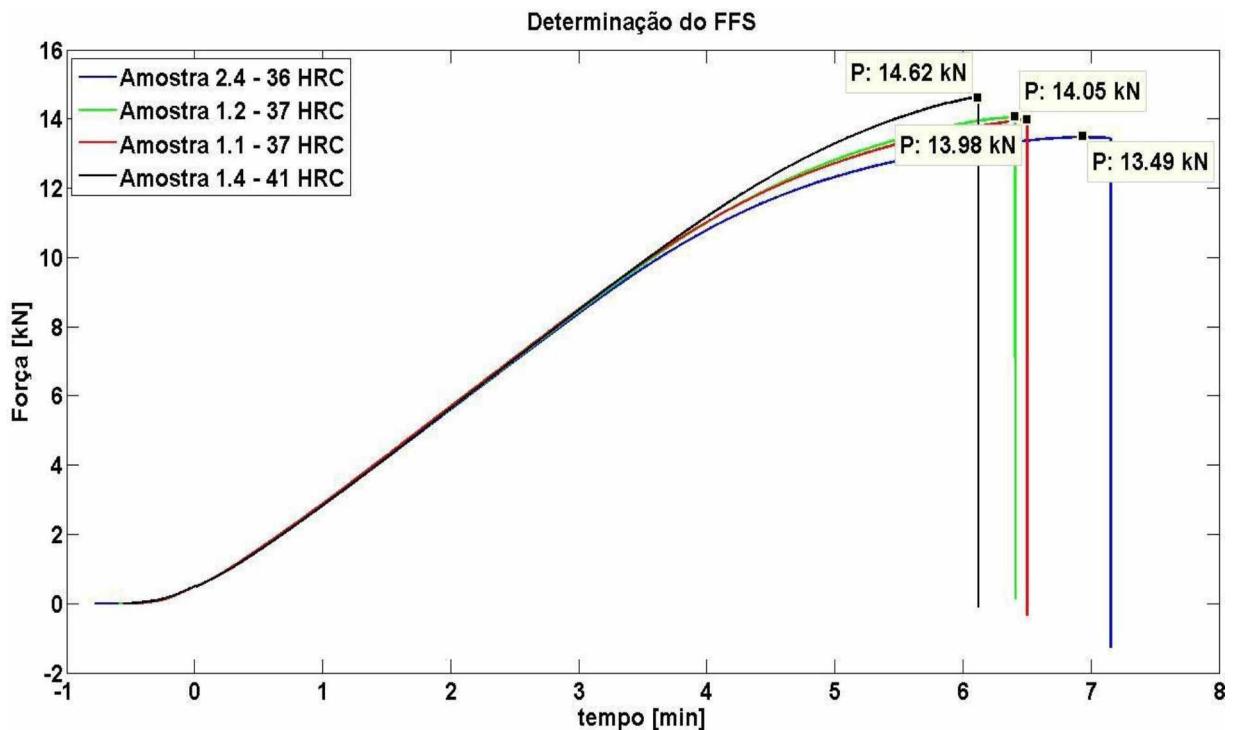


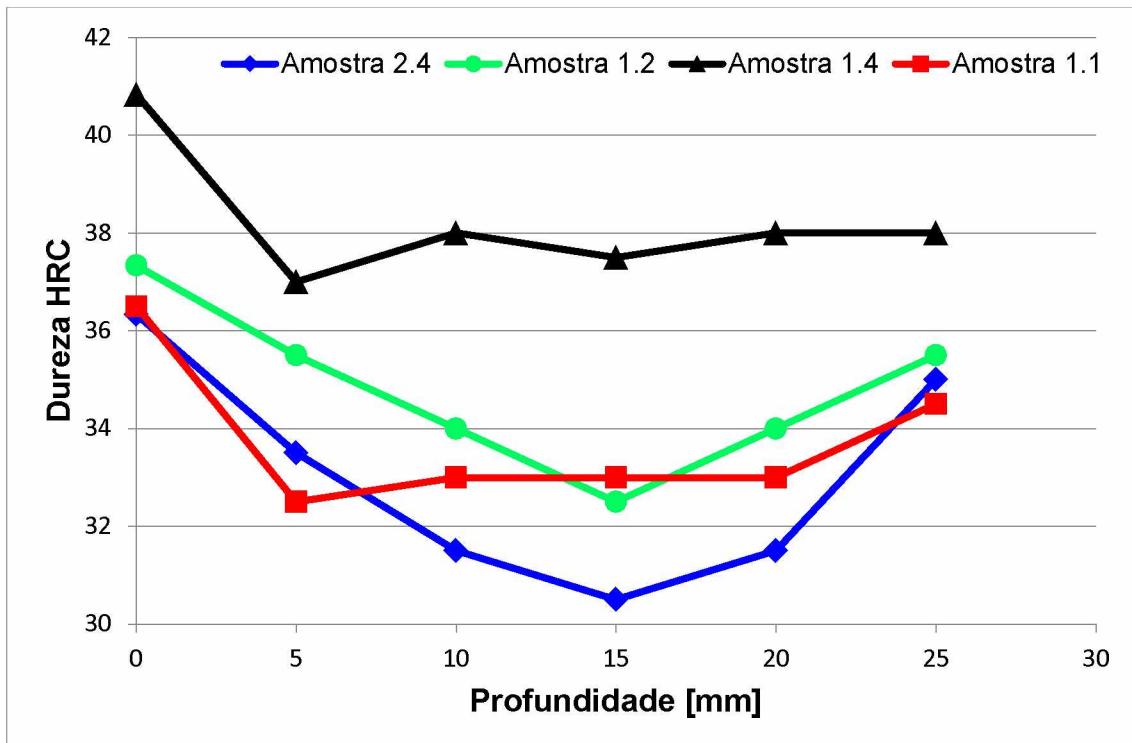
Figura 5.5 - Resultados de FFS

Tabela 5.5 – Resultados dos ensaios para determinação do FFS

Amostra	Dureza Superficial Média, HRC	P_{FFS} [kN]	σ_{FFS} [MPa]
2.4	36	13,49	1575
1.2	37	14,05	1638
1.1	37	13,98	1636
1.4	41	14,62	1710

O perfil de dureza das amostras ensaiadas para obtenção do P_{FFS} é mostrado na Fig. 5.6. Nota-se dessa figura que há diferenças significativas nas durezas das amostras, da ordem de até 10% em relação ao valor nominal, que era de 40HRC. Além disso, nota-se uma redução da dureza na medida em que se adentra a amostra.

Os ensaios de dureza foram realizados após a execução dos ensaios de RSL com o objetivo se avaliar possíveis efeitos da variação da dureza sobre o parâmetro sobre o P_{FFS} .

Figura 5.6 – Perfil de dureza das amostras utilizadas para obtenção do P_{FFS}

Da Tabela 5.5 e da Figura 5.5 nota-se que as amostras 1.1 e 1.2 têm praticamente a mesma P_{FFS} . Essas amostras têm também a mesma dureza (37HRC). As duas outras amostras testadas, 2.4 e 1.4, têm a menor e a maior dureza dentre todas, respectivamente. A maior dureza da amostra 1.4 explica o maior valor de P_{FFS} , enquanto a menor dureza da amostra 2.4 justifica o menor valor P_{FFS} . O maior tempo para a fratura observado nas

amostras de menor dureza pode ser explicado pela maior capacidade dessas amostras de absorver deformação plástica. Contrariamente, amostras de maior dureza resultam num P_{FFS} maior, porém essas fraturam num tempo menor de ensaio, já que a sua capacidade de deformar plasticamente é menor. Outro indicativo de que a variação dos resultados é devida à dureza das amostras é o comportamento das mesmas durante a fase elástica, que, no gráfico, é a região entre aproximadamente zero e três minutos. Nessa região observa-se que a taxa de aumento da força nas amostras é aproximadamente igual, o que é esperado devido ao fato de que o amortecimento das tensões dá-se à medida que a amostra vai deformando plasticamente na região do entalhe.

Ao final dos ensaios de determinação do P_{FFS} realizou-se um ensaio de verificação de tensão, tal como descrito na Seção 3.4.2 usando extensômetros, para avaliar se a precisão no valor de tensão mecânica medida nos ensaios de validação manteve-se após a realização dos ensaios de determinação do P_{FFS} . Este ensaio foi realizado carregando a amostra utilizada na etapa de validação em 20 incrementos de 30 segundos cada um, onde a força máxima atingida foi de 10 kN e o incremento foi de 5% deste valor. As Figs. 5.7 e 5.8 mostram os resultados obtidos.

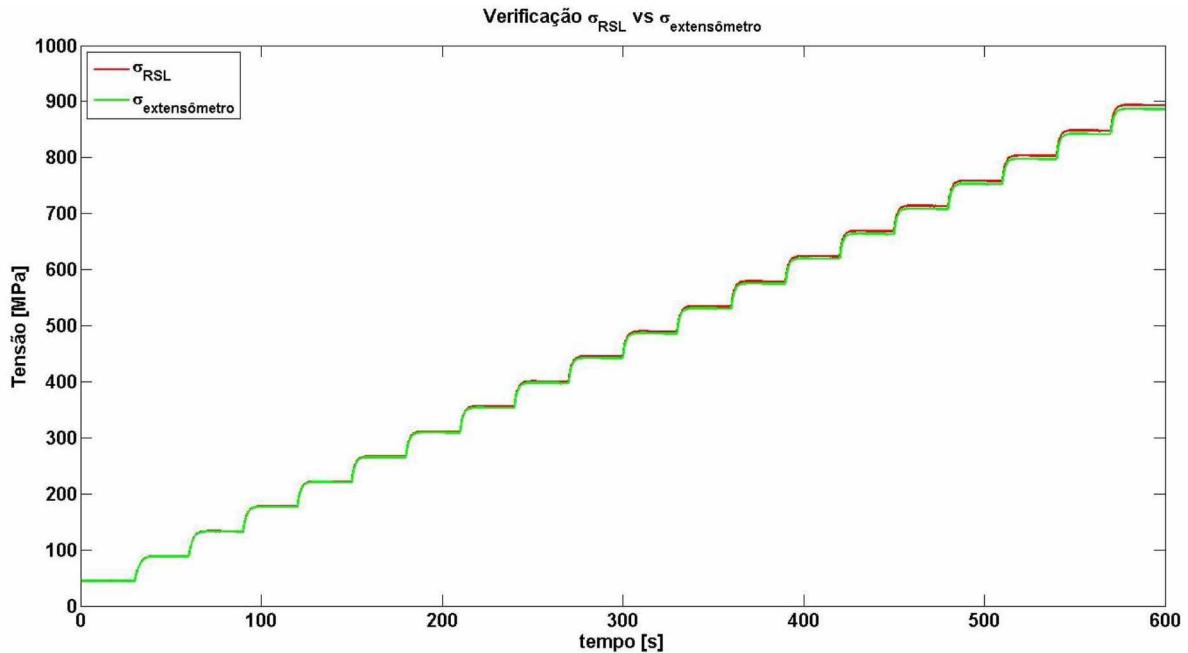


Figura 5.7 – Ensaio de verificação de tensão mecânica de carregamento da amostra

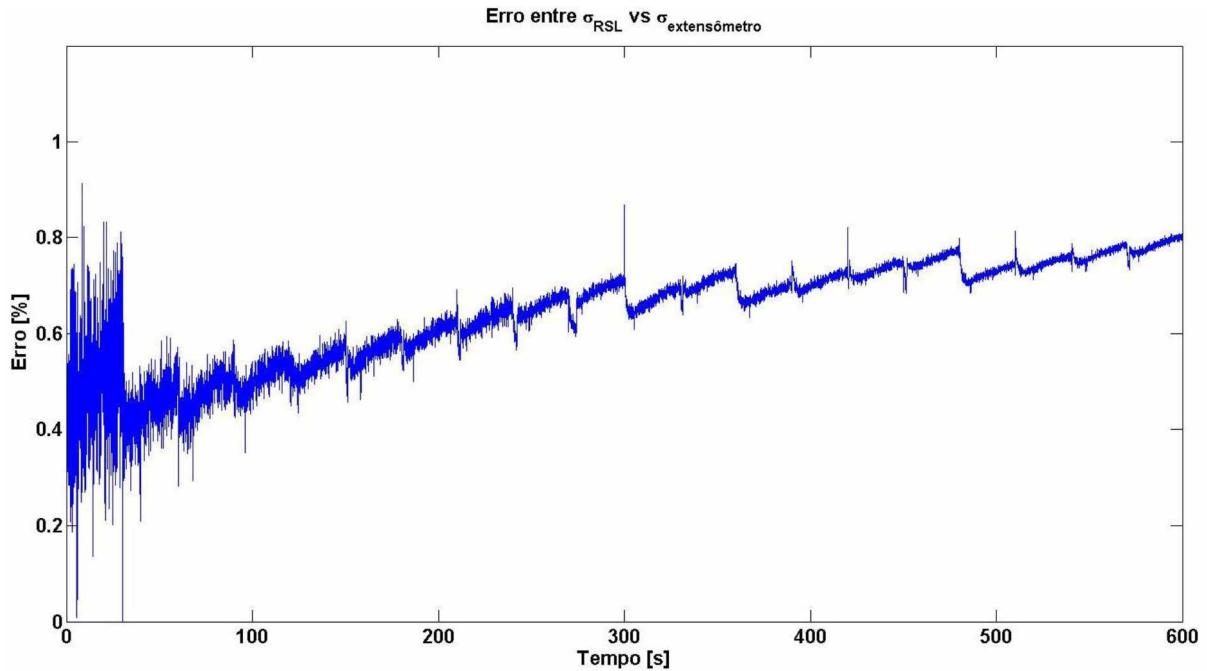


Figura 5.8 - Erro entre a tensão mecânica no extensômetro e a calculada pelo RSL no o ensaio de verificação de tensão.

Desses resultados pode-se afirmar que o equipamento manteve seu nível de precisão durante os ensaios.

O P_{FFS} foi tomado como sendo a média dos valores obtidos dos quatro ensaios, possuindo, assim, um valor de 14,035 kN.

5.4. Resultados de RSL com Hidrogenação das Amostras

A seguir são apresentados os resultados com incrementos de carga na presença de hidrogênio.

5.4.1. Ensaios RSL com Potencial Catódico de $-1,2\text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$

Neste tópico são mostrados os resultados obtidos com amostras submetidas ao mesmo potencial catódico de $-1,2\text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$. Os resultados obtidos dos ensaios de RSL podem ser vistos na Fig. 5.9 e na Tab. 5.6. Os perfis de dureza das amostras são mostrados na Fig. 5.10.

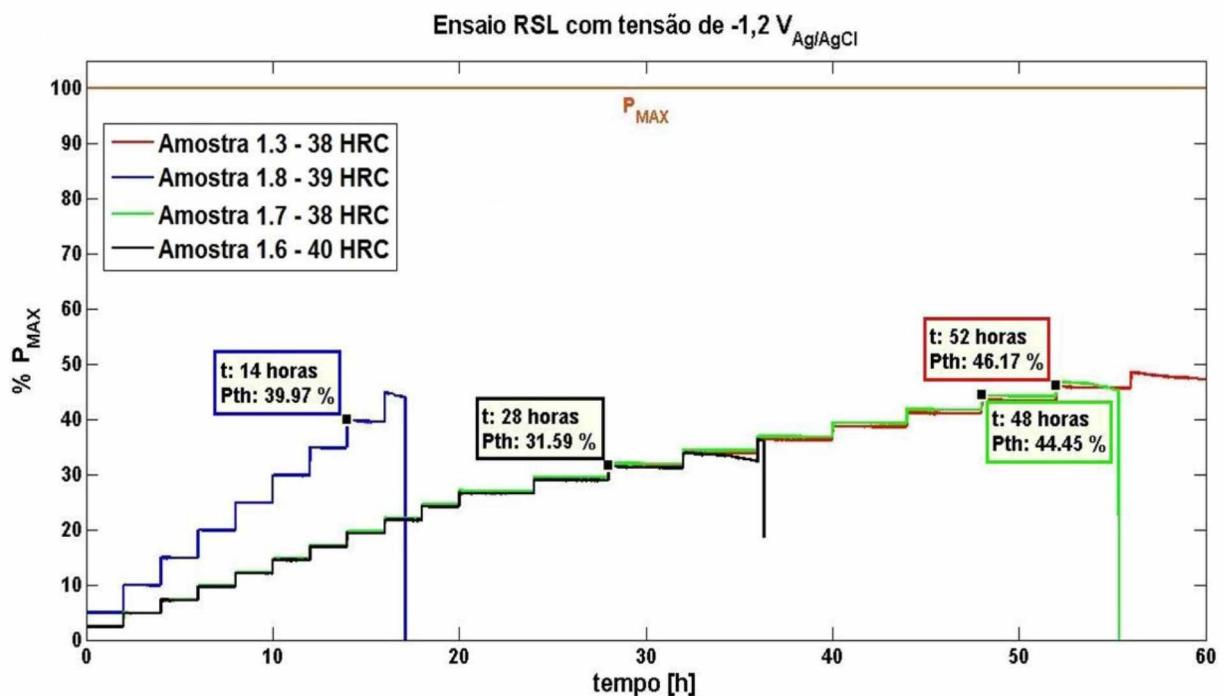


Figura 5.9 - Resultados dos ensaios de RSL realizados em amostras de aço 4140 temperado e revenido com diferentes perfis de dureza e submetidas a um potencial catódico de -1,2 V_{Ag/AgCl}

Tabela 5.6 – Resultados de força e tensão limites das amostras ensaiadas no RSL com potencial catódico de -1,2 V_{Ag/AgCl}

Amostra	Dureza Superfical Média, HRC	P _{th} [kN]	σ _{th} [MPa]
1.3	38	6,48	748,0
1.8	39	5,61	651,6
1.7	38	6,24	723,2
1.6	40	4,43	512,3

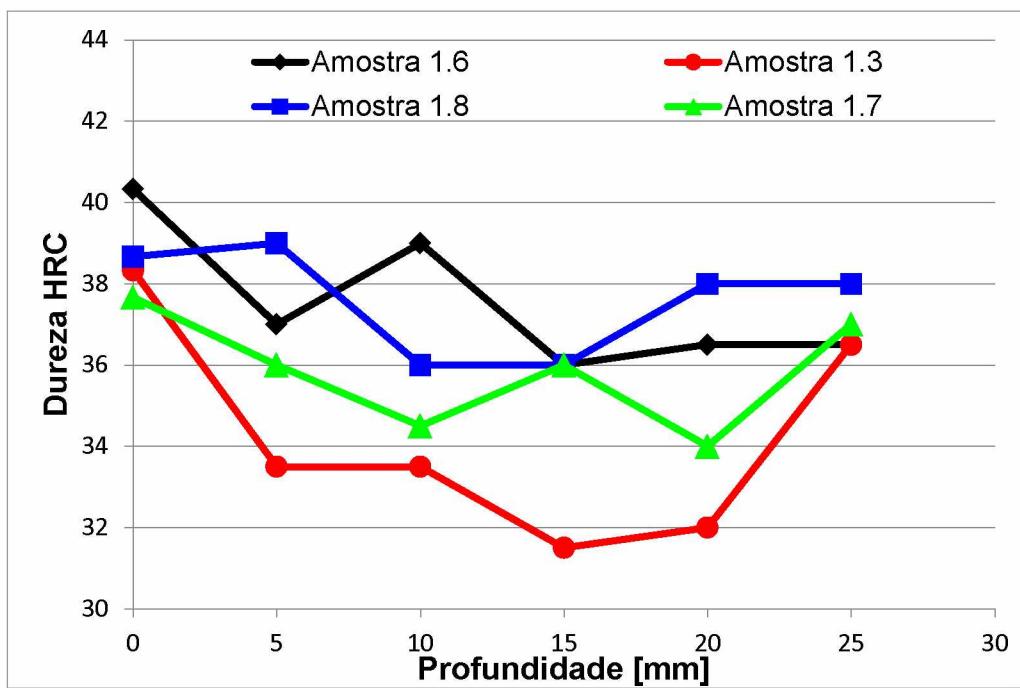


Figura 5.10 – Perfis de dureza das amostras submetidas ao ensaio de RSL com potencial catódico de $-1,2 \text{ V}_{\text{Ag/AgCl}}$

Os resultados apresentados mostram que houve uma redução drástica na força de ruptura das amostras de aço 4140 temperado e revenido em relação ao valor de P_{FFS} quando submetidas a um potencial de $-1,2 \text{ V}$. Essa redução variou de 57 a 68% em relação ao valor P_{FFS} . Nanninga (2010) observou queda semelhante em amostras de aço 4140 beneficiado com dureza de 419 HVN ($\approx 43 \text{ HRC}$). Percebe-se que a amostra de maior dureza foi a que fraturou na menor força, enquanto que a amostra que apresentou um perfil de dureza menor suportou maior carga antes de fraturar, conforme sintetizado na Fig. 5.11. O mesmo comportamento foi identificado por Nanninga (2010) e Rosado (2011), conforme mostram as Figs. 5.12 e 5.13.

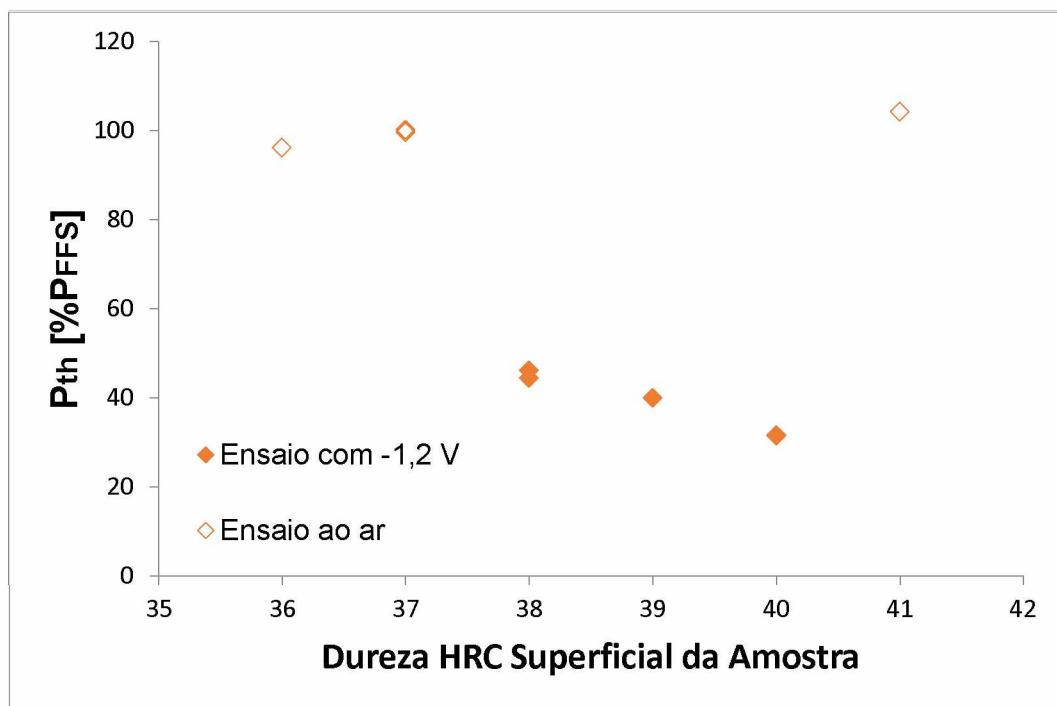


Figura 5.11 - Variação no P_{th} em função da dureza superficial das amostras no ensaio de RSL ao ar e com $-1,2 V_{Ag/AgCl}$, onde 100% refere-se ao P_{FFS} médio obtido dos ensaios ao ar livre

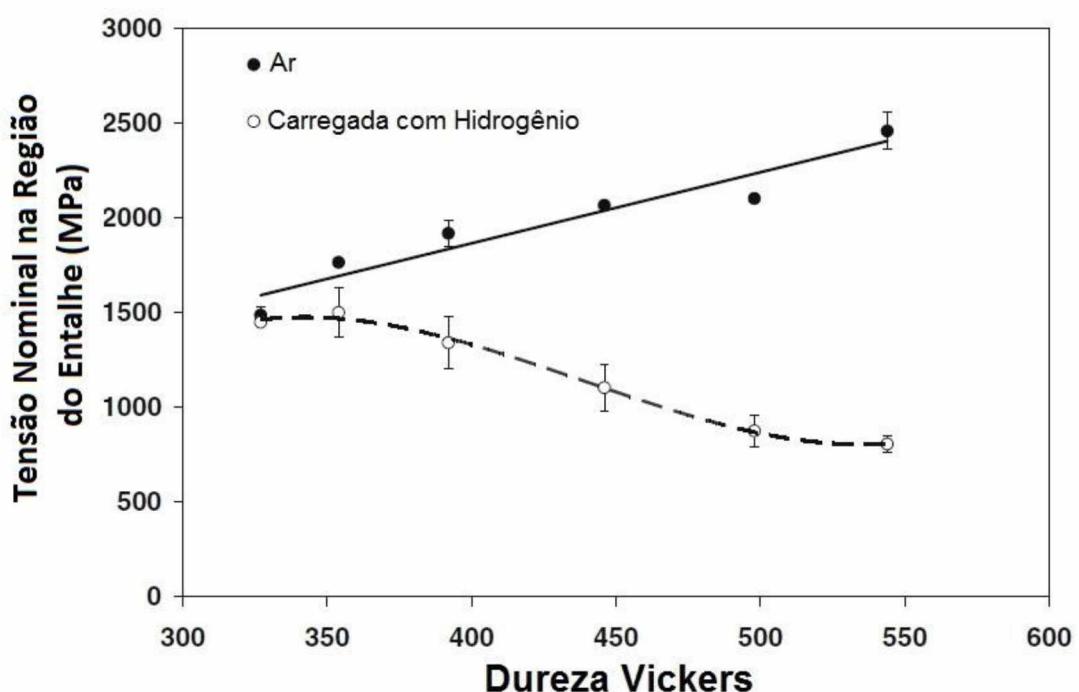


Figura 5.12 – Comparação entre ensaios a ar e com hidrogênio de amostras de aço AISI 4037 temperado e revenido. (NANNINGA, 2010), modificado

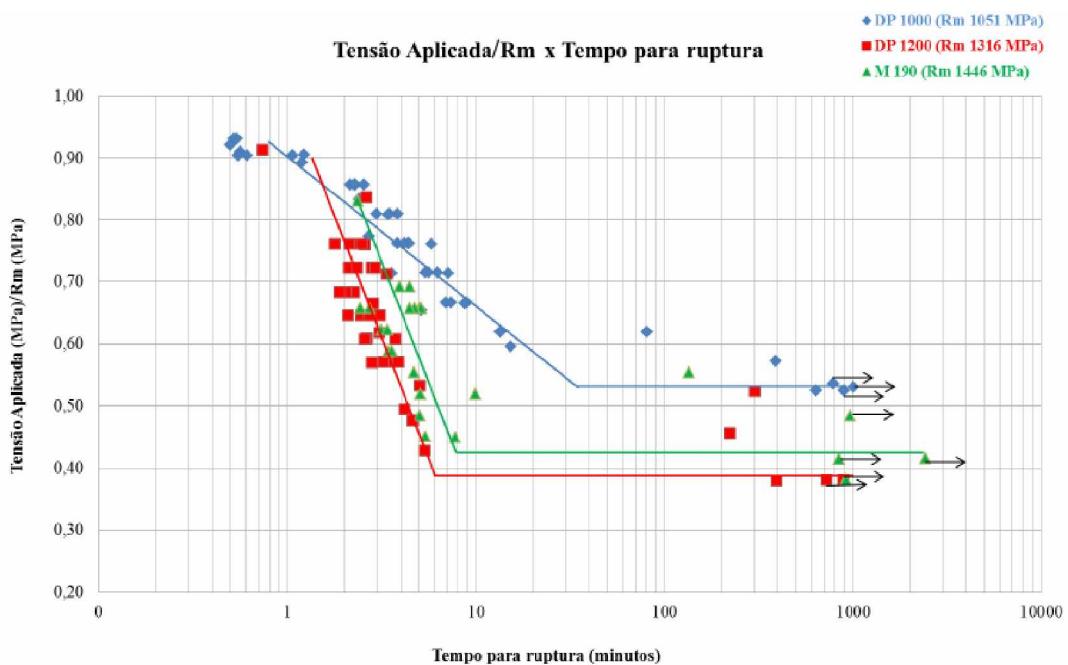


Figura 5.13 – Resultados de ensaios de tração uniaxial em ambiente hidrogenado dos aços DP 1000, DP 1200 e M 190. (ROSADO, 2011)

Troiano (1960) explica que esse comportamento se dá devido a uma combinação existente entre o hidrogênio e a tensão mecânica na amostra. A plasticidade na raiz do entalhe, responsável por diminuir a concentração de tensão, será maior quanto menor for a dureza da amostra, fazendo com que a força necessária para rompê-la seja maior (NANNINGA, 2010). A entrada do hidrogênio na microestrutura da amostra insere tensões internas na raiz do entalhe que são absorvidas pela capacidade da amostra de se deformar plasticamente e, quando essa capacidade é reduzida a força necessária para romper a amostra hidrogenada também será menor.

5.4.2. Efeito do Potencial Catódico na Resistência à Fratura do aço 4140 em Meio Agressivo

Neste tópico são representados os resultados obtidos em amostras de perfis de dureza semelhantes que foram submetidas a diferentes potenciais catódicos, sendo eles: -1,2 $V_{Ag/AgCl}$, -1,1 $V_{Ag/AgCl}$ e -1,0 $V_{Ag/AgCl}$. Também foi realizado um ensaio com potencial catódico de -0,8 $V_{Ag/AgCl}$ numa amostra de dureza maior do que a das outras. Os resultados obtidos dos ensaios de RSL são mostrados nas Figs. 5.14 e 5.15 e na Tab. 5.7.

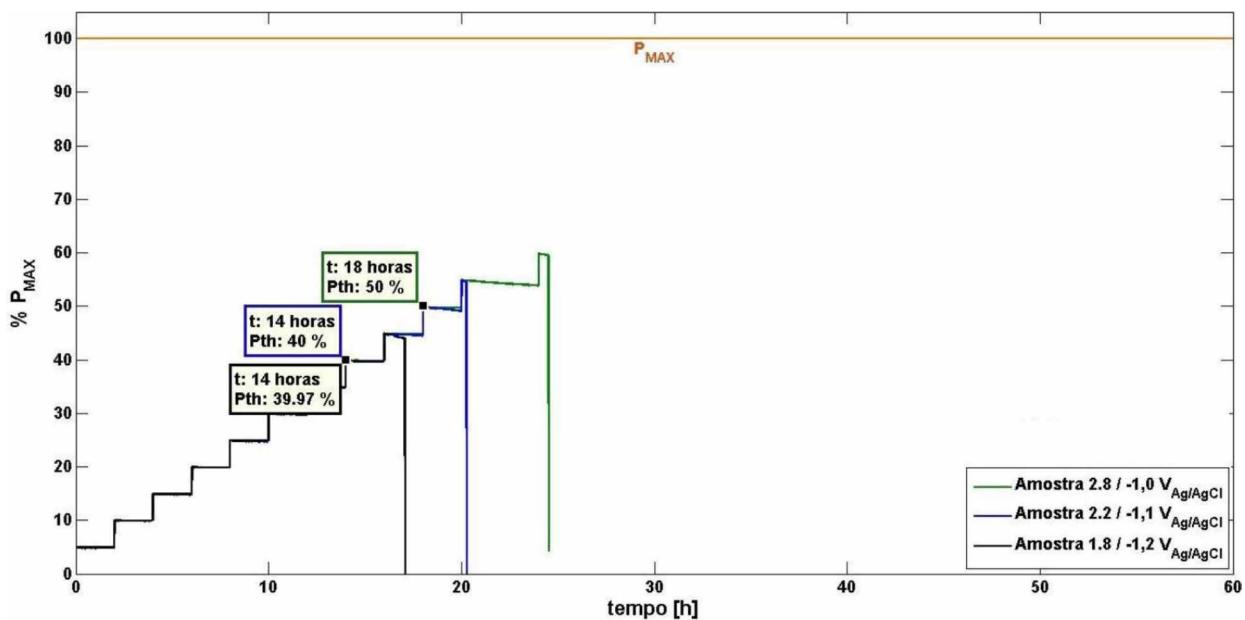


Figura 5.14 – Resultado da força limite de ruptura para amostras com perfis de dureza semelhantes, carregadas com potencial de $-1,2\text{ V}_{\text{Ag/AgCl}}$, $-1,1\text{ V}_{\text{Ag/AgCl}}$, e $-1,0\text{ V}_{\text{Ag/AgCl}}$. Dureza na superfície igual a 39HRC

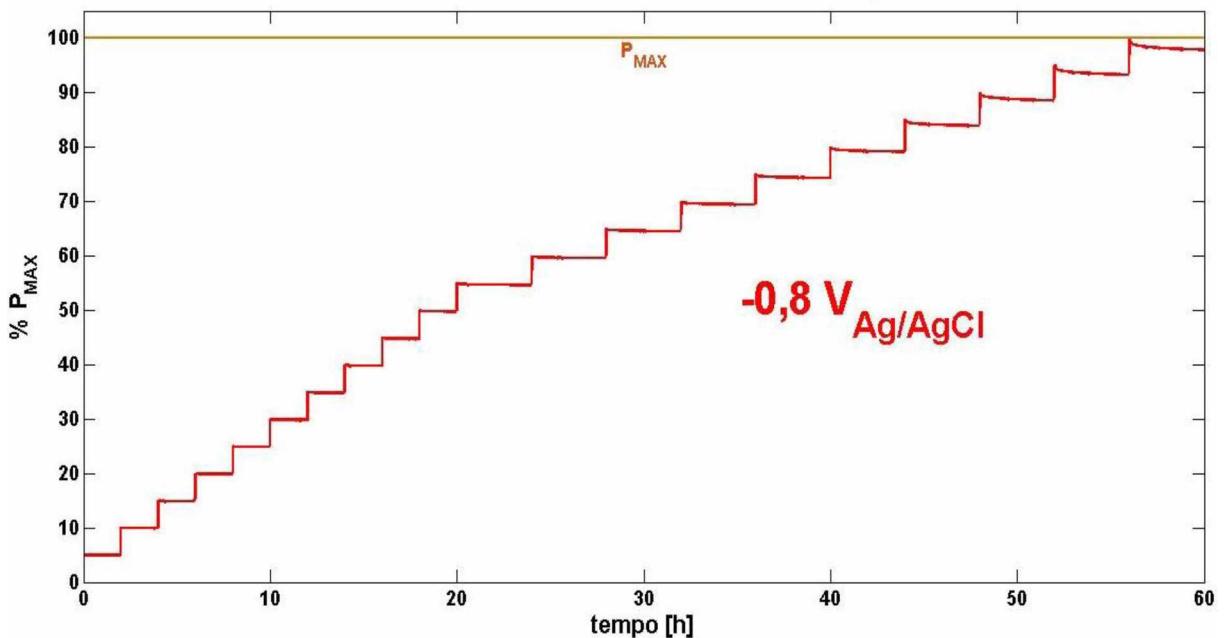


Figura 5.15 – Ensaio RSL realizado com potencial de $-0,8\text{ V}_{\text{Ag/AgCl}}$ numa amostra com dureza de 40 HRC na superfície

Tabela 5.7 – Resultados de força e tensão limite de amostras com perfis de dureza semelhantes sob diferentes potenciais catódicos

Amostra	Potencial Aplicado [V _{Ag/AgCl}]	Dureza Superficial Média, HRC	P _{th} [kN]	σ _{th} [MPa]
2.8	-1,0	39	7,02	810,5
2.2	-1,1	39	5,61	647,2
1.8	-1,2	39	5,61	651,6

Os resultados obtidos dos ensaios de RSL com variação do potencial catódico na amostra indicam que há uma relação entre o valor de potencial elétrico aplicado e a SFH da amostra. Para avaliar se a dureza da amostra influenciou nos resultados, fez-se o perfil de durezas das amostras ensaiadas nesta etapa, que pode ser visto na Fig. 5.16.

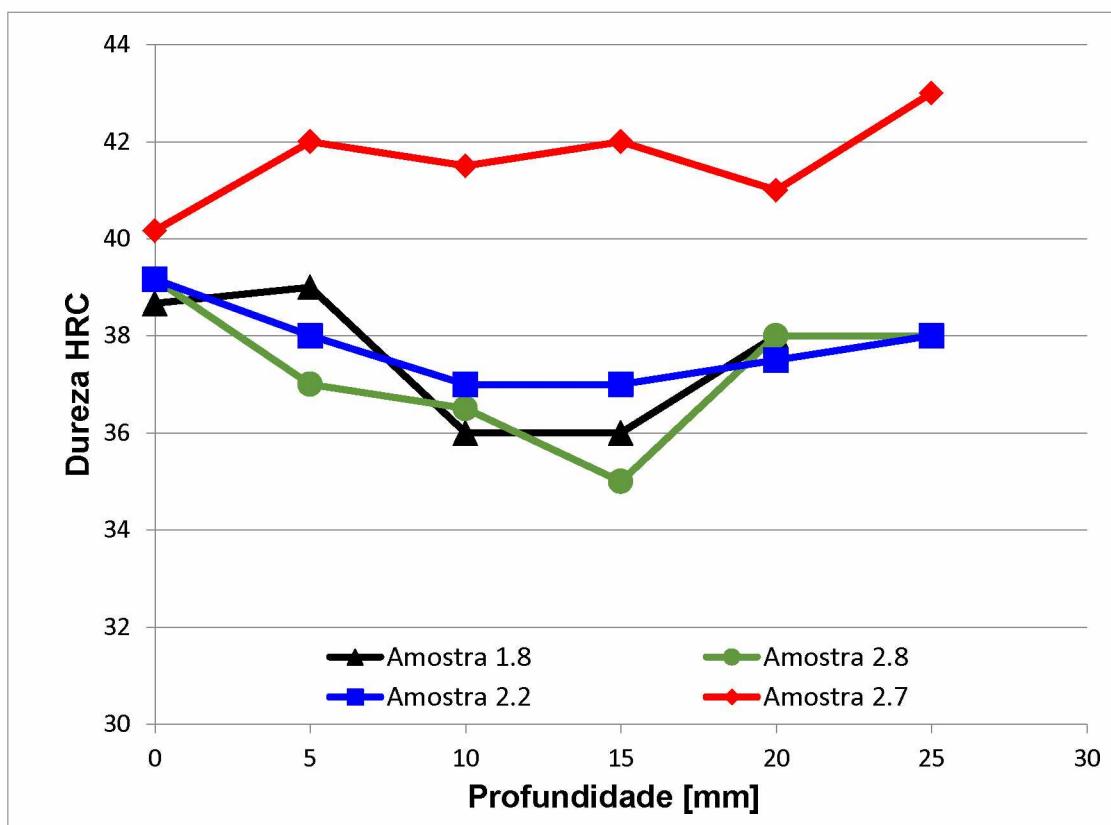


Figura 5.16 - Perfil de dureza das amostras utilizadas nos ensaios de RSL com diferentes níveis de potencial catódico

Avaliando os resultados obtidos dos ensaios de RSL com variação do potencial catódico na amostra e do perfil de dureza das amostras, foi possível fazer duas importantes constatações:

1. Existe uma correlação entre o nível de potencial aplicado e a SFH do aço 4140 beneficiado. Para um valor catódico mais baixo ($-0,8 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$) não se observa fragilização por hidrogênio da amostra. Em contrapartida, para valores catódicos mais altos ($-1,0 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ a $-1,2 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$) houve queda significativa do P_{th} , comportamento este que já havia sido identificado por Parkins (1982) e Hongshi (2015). A dureza superior mostrada pela amostra que foi submetida a um potencial catódico de $-0,8 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ durante o ensaio serve para salientar o fato de não ter havido fragilização por hidrogênio neste potencial catódico, uma vez que, se houvesse, a amostra romperia antes de se finalizar o ensaio, já que, segundo os resultados obtidos na literatura (NANNINGA, 2010 e ROSADO, 2011), amostras de maior dureza apresentam maior SFH;
2. Para potenciais catódicos de $-1,1 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ e $-1,2 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ não houve aumento significativa da SFH da amostra, indicando que para potenciais catódicos acima de $-1,0 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ não há mais diferença na SFH do aço 4140 beneficiado. PARKINS (1982) identificou o mesmo comportamento para aços de alta resistência mecânica. Nozari (2002) explica que esse comportamento ocorre, pois em certo valor crítico de potencial catódico, o material satura-se de hidrogênio, não apresentando aumento significativo da SFH para potenciais catódicos maiores.

Para melhor visualizar o efeito da polarização catódica na SFH da amostra, foi construído um gráfico relacionando o potencial catódico aplicado com a porcentagem de queda no P_{th} em relação ao P_{FFS} durante o ensaio. Esse gráfico é mostrado na Fig. 5.17. Uma foto da quantidade de bolhas de hidrogênio gerada nos ensaios com maior e menor potenciais catódicos aplicados ($-1,2 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ e $-0,8 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$) pode ser vista na Fig. 5.18.

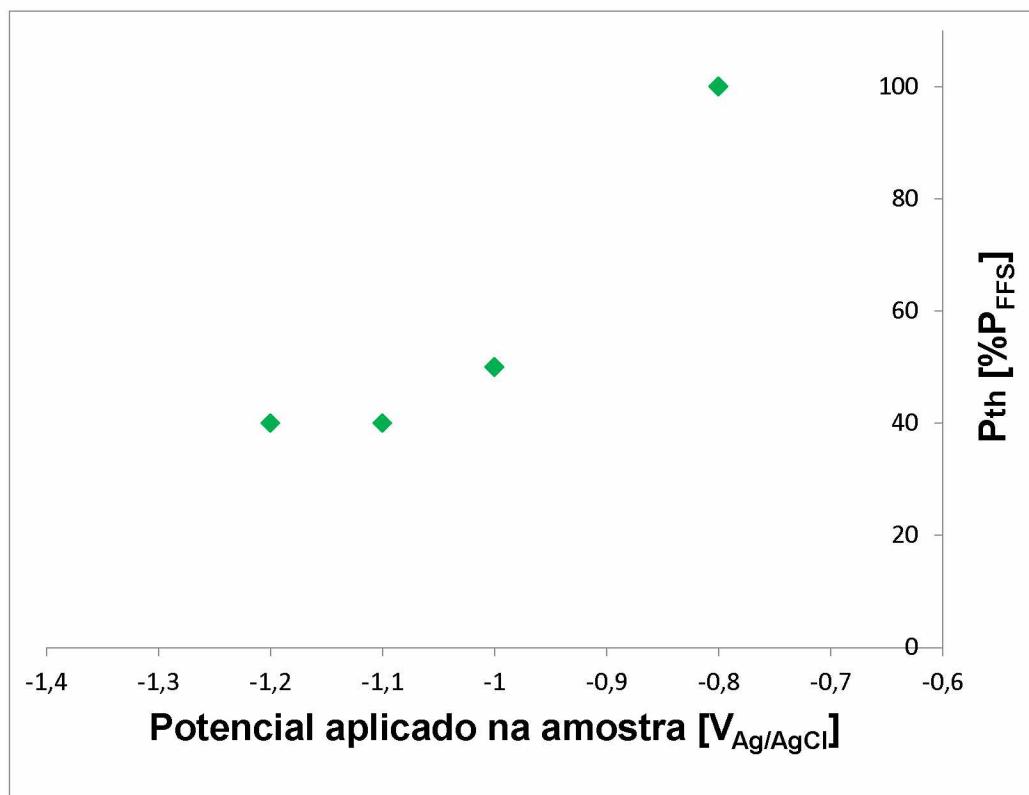


Figura 5.17 – Relação entre o P_{th} e o potencial elétrico aplicado durante no ensaio de RSL

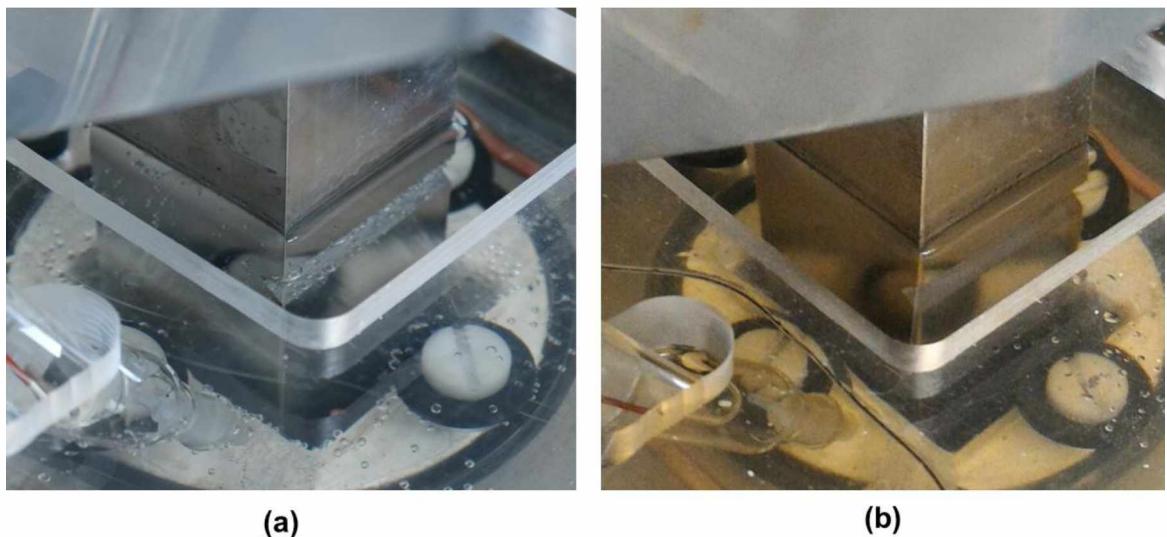


Figura 5.18 - Visualização da formação de hidrogênio no entalhe para (a) $-1,2$ $V_{Ag/AgCl}$ e (b) $-0,8$ $V_{Ag/AgCl}$

Observando a Fig. 5.17 fica claro o aumento da SFH com o aumento da tensão catódica na amostra. A Fig. 2.28, que mostra os resultados obtidos por Parkins (1982) mostra o mesmo comportamento.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Neste trabalho desenvolveu-se um equipamento de rápida avaliação da susceptibilidade à fragilização por hidrogênio em aços que realiza ensaios do tipo RSL, atendendo à norma ASTM F1624. O equipamento tem capacidade de aplicação de carga de até 20 kN. Desenvolveu-se também uma cuba eletrolítica que permite simular, de forma controlada, condições com proteção catódica que levam à permeação de hidrogênio na amostra através aplicação de um potencial ou de uma corrente catódica. A precisão do equipamento desenvolvido foi determinada através da elaboração de um modelo de incerteza de medição da tensão mecânica na amostra. Sua exatidão foi avaliada por meio de ensaios de verificação do erro entre a tensão calculada pelo RSL e a tensão efetivamente aplicada na amostra. Por fim, foi avaliado o desempenho do equipamento desenvolvido por meio da avaliação da SFH do aço AISI 4140 beneficiado com dureza de 40 HRC. A seguir são apresentadas as principais conclusões deste trabalho.

6.1. Projeto, Construção e Validação do Equipamento

- a) O projeto e construção do equipamento mostraram que os critérios adotados na concepção e dimensionamento do RSL foram satisfatórios. Isso evitou complicações na montagem, tornou fácil a operação do equipamento e garantiu a confiabilidade dos resultados;
- b) O equipamento construído apresenta uma variação de $\pm 0,5\%$ entre os valores de tensão mecânica fornecidos e diferença máxima de 0,8% entre os valores de tensão mecânica calculados pelo RSL e medidos pelos extensômetros;
- c) O modelo matemático adotado para o cálculo das tensões mecânicas da amostra é coerente e representa com segurança as tensões em que a amostra está submetida, tendo em vista a precisão e exatidão apresentadas pelo equipamento.

6.2. Ensaios de Avaliação da SFH do Aço AISI 4140 Beneficiado com Dureza de 40 HRC

- d) Apesar de garantir as tolerâncias exigidas por norma no entalhe, não foi possível obter, somente com eletroerosão a fio, a rugosidade exigida pela norma ASTM F519. Configura-se então uma necessidade de se estabelecer uma etapa subsequente de polimento do entalhe.
- e) Os resultados mostraram uma grande sensibilidade com a variação da dureza das amostras, mostrando a importância de se controlar o processo de fabricação das mesmas. Assim, evitam-se variações indesejadas nos resultados;
- f) O aço AISI 4140 beneficiado com dureza de 40 HRC apresenta grande susceptibilidade à fragilização por hidrogênio quando submetidos a potenciais catódicos de $-1,0 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ a $-1,2 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$;
- g) Identificou-se que para valores acima de $-1,1 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ não houve aumento da SFH da amostra;
- h) Para valores baixos de potencial catódico observou-se que não houve fragilização do material da amostra.

CAPÍTULO VII

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O fenômeno de fragilização é um assunto que tem trazido várias oportunidades de pesquisa atualmente. Como o RSL demonstrou ser uma forma rápida e eficiente de observar e avaliar este fenômeno, acredita-se que ainda possam ser feitos alguns melhoramentos no equipamento desenvolvido no presente trabalho. Acredita-se também que a máquina projetada possui uma vasta gama de opções de análises envolvendo a susceptibilidade à fragilização por hidrogênio nos aços. A seguir são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros envolvendo o RSL.

7.1. Desenvolvimento de Adaptadores de Amostras Menores e de Diferentes Geometrias

Apesar dos resultados obtidos com os ensaios realizados, observou-se a necessidade de se utilizar amostras menores. Isso foi observado visto que a maioria dos componentes utilizados em campo que sofrem com fragilização por hidrogênio, principalmente nas indústrias de óleo e gás, não possuem dimensões suficientes para retirar uma quantidade mínima de amostras necessárias para a realização dos ensaios de RSL se forem utilizadas amostras de 30 x 30 x 200 mm³. Por isso, devem-se desenvolver adaptadores que permitam a utilização de amostras menores e de geometrias diferentes, englobando todos os tipos de amostras descritos na norma ASTM F519.

7.2. Desenvolvimento de um Procedimento de Polimento do Entalhe da Amostra

Durante o processo de fabricação das amostras, não foi possível atingir o acabamento superficial desejado para o entalhe apenas com o acabamento conseguido na eletroerosão a fio. Portanto, tem-se aqui a necessidade de pesquisar um processo de polimento do entalhe posterior à sua fabricação ou então desenvolver uma ferramenta de polimento que permita acessar toda a geometria do entalhe. Também deve-se pesquisar o melhor método para medir a rugosidade do entalhe.

7.3. Variação de Parâmetros do Ensaio

São inúmeros os fatores que influenciam a susceptibilidade à fragilização por hidrogênio dos aços. Além do que foi estudado neste trabalho, que foram o potencial catódico aplicado e a dureza da amostra, também pode-se avaliar outros parâmetros como:

- Microestrutura (tamanho do grão, densidade de discordâncias, tipo de microestrutura formada, etc.);
- Influência de microconstituintes;
- Influência dos precipitados formados num dado tratamento térmico;
- Material da amostra;
- Eficiência de um tipo de revestimento superficial que possa diminuir ou até mesmo evitar a fragilização por hidrogênio do aço.

Além da amostra, também pode ser variado o ambiente em que ela está submersa ou o tipo de carregamento a que ela está submetida, como, por exemplo, a utilização do controle tipo *ripple loading* para o carregamento da amostra durante o ensaio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, T. L., **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**. 3. Ed. N.Y: CRC Press, 2005. 610 p.
- ASM International. **Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection**. v. 13A. ASM Handbook. USA, 2003.
- ASTM E8/E8M – 09. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. American Society for Testing and Materials, 2010.
- ASTM E1681 – 03. Standard Test Method for Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials. American Society for Testing Materials, 2003.
- ASTM E1820 – 15a. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. American Society for Testing and Materials, 2015.
- ASTM E1823 – 13. Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing. American Society for Testing and Materials, 2013.
- ASTM F519 – 13. Standard Test Method for Mechanical Hydrogen Embrittlement Evaluation of Plating/Coating and Service Environments. American Society for Testing and Materials, 2013.
- ASTM F1624 – 12. Standard Test Method for Measurement of Hydrogen Embrittlement Threshold in Steel by the Incremental Step Loading Technique. American Society for Testing and Materials, 2010.

ASTM G129 – 00. 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.ed. Baltimore, MD: *ASTM International*, 2005. 882 p.

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. 2009. 282 f. Tese de Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BARNOUSH, A. **Hydrogen Embrittlement, reevaluated by in situ electrochemical nanoindentation**. 2007. 288 f., Tese de Doutorado - Universität des Saarlandes, Saarbrücken.

BARNOUSH, A.; VEHOFF, H. Recent developments in the study of hydrogen embrittlement: Hydrogen effect on dislocation nucleation. **Acta Materialia**. v. 58, p. 5274-5285, jul. 2010. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645410003435>>. Acesso em: 10 jan. 2015.

BARNOUSH, A.; VEHOFF, H. Eletrochemical nanoindentation: A new approach to probe hydrogen/deformation interaction. **Scripta Materialia**. v. 55, n. 2, p. 195-198, jul. 2006. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646206002417>>. Acesso em: 17 jul. 2015.

CHATZIDOUROS, E. V.; PAPAZOGLOU, V. J.; TSIOURVA, T. E.; PANTELIS, D. I. Hydrogen effect on fracture toughness of pipeline steel welds, with in situ hydrogen charging. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 36, n. 19, p. 12626-12643, 2011. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319911016120>>. Acesso em: 10 nov. 2014.

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.

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.

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

FORTES, C. **Mecânica da Fratura**. Contagem: Assistência Técnica de Consumíveis – ESAB BR, outubro de 2003. 74 p. Apostila.

GARCÍA, T. E.; RODRÍGUEZ C.; BELZUNCE, F. J.; PEÑUELAS, I.; ARROYO, B. Development of a methodology to study the hydrogen embrittlement of steels by means of the small punch test. **Materials Science and Engineering A**. v. 626, p. 342-351, 2015.

GINGEL, A., A Bibliographical Study of Hydrogen Trapping and Embrittlement in Line Pipe Steels, IRSID - UNISOR SACILOR, Rapport Interne, 1997.

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.

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.

HOFFMANN, K. **An Introduction to Measurements using Strain Gages**. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989. 291p.

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>. Acesso em: 10 julho. 2016.

JONES, D. A.; **Principles and Prevention of Corrosion**. 2. ed. N.J: Simon & Schuster, 1995. 572 p.

KERNION, S. J.; MAGEE, J. H.; WERLEY, T. N.; MAXWELL, P. Hydrogen Embrittlement Susceptibility of Precipitation Strengthened Ni-base Superalloys, In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 2014, Texas – EUA, p. 1-8.

LI, Z.; GAO, S.; HERRMANN, K. Development of a micro-miniature nanoindentation instrument, In: HARDMEKO, 2007, Tsukuba – Japão. **Recent Advancement of Theory and Practice in Hardness Measurement.** p. 13-16.

LINDVALL, M. **Development of Test Methods for Detection of Hydrogen Embrittlement in High-Strength Steel.** 2009. Thesis (Master of Science) – Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Division of Engineering Materials, Luleå University of Technology, Luleå, 2009.

MORAES, M. A. F. **Desenvolvimento de Planilhas Eletrônicas para Calcular Incerteza de Medição.** Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2011.

NACE Standard TM0177. Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S 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. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X09006350>>. Acesso em: 4 out. 2015.

NOZARI, L. H. S. Influência da Temperatura e da Presença de H₂S no Comportamento Mecânico e Eletroquímico do Aço API 5CT grau P110 em Água do Mar Sintética. 2002. 109 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

OKAMOTO, M. A. **Danos causados pelo hidrogênio em aços API 5L X65 e X80.** 2010. 78 f. Monografia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

OLIVEIRA, S. P.; MIRANDA, P. E. V. Concentração crítica de hidrogênio para a fragilização pelo hidrogênio em aços. **Revista Materia.** Rio de Janeiro. 2008. 21 p. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10111/>>. Acesso em: 13 jul. 2015.

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.

PEREIRA, P. A. S.; FRANCO, C. S. G.; GUERRA FILHO, J. L. M.; SANTOS, D. S. Hydrogen effects on the microstructure of a 2.25Cr-1Mo-0.25 V steel welded joint. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 40, n. 47, p. 17136-17143, dez. 2015.

PILKEY, W. D.; PILKEY, D. F. **Peterson's Stress Concentration Factors**. 3.ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. 554p.

RAYMOND, L. **Rising Step-Load Test Apparatus**. US n. 5.505.095, 7 jun. 1995, 9 abr. 1996.

ROSADO, D. B. **Comparação do efeito da fragilização por hidrogênio e aços com resistência à tração cima de 1000 MPa**. 2011. 92 f., Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, A. G. S. G.; PONTE, H. A.; ARTEM, P. Estudo da influencia o hidrogênio permeado nas propriedades eletroquímicas do Nb/Nb205 para o desenvolvimento de um sensor. In: 4º PDPETRO, 4, 2007, Campinas – SP. **Artigos e Resumos**. 10 p. Disponível em: <<http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/4/>>.

SILVA, M. C. Determinação Experimental da Tenacidade à Fratura da Zona Térmicamente Afetada de Junta Soldada de Aço API 5L X80. 2009. 134 f. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo.

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. Set 2001. 20 p. Disponível em: <<https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/259/978.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 14 jul. 2015.

STROE, M. E. **Hydrogen Embrittlement of Ferrous Materials**. 2006. 252 f., Tese de Doutorado – Université Libre de Bruxelles, Bélgica.

THE HERRING GROUP, Inc. **Hydrogen Embrittlement**. Elmhurst, IL – EUA, 2010. 4p. Relatório. Disponível em: <<http://www.heat-treat-doctor.com/documents/hydrogen%20embrittlement.pdf>>. Acesso em: 10 jan 2015.

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.

TSAY, L.W.; LU, H.L.; CHEN, C. The effect of grain size and aging on hydrogen embrittlement of a maraging steel. **Corrosion Science**. v. 50, n. 9, p. 2506–2511, set. 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X08002527>>.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da Teoria de Erros**. 2. ed. São Paulo, SP, Brasil: Edgard Blucher, 1996.

ZAN, N.; DING, H.; GUO, X.; TANG, Z.; BLECK, W. Effects of grain size on hydrogen embrittlement in a Fe-22Mn-0.6C TWIP steel. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 40, n. 33, p. 10687-10696, set. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915015979>> .

ANEXO I – Certificado de Calibração da Máquina de Medir por Coordenadas (Página 1/4)

Mitutoyo
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**LABORATÓRIO
DE
METROLOGIA**
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13

Cliente : FUNDACAO UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLANDIA
Endereço : Avenida Amazonas, 2121 - Campus Universitário - Uberlândia - MG - CEP : 38400-902

Ordem de Serviço : 035.766.001

I. Objeto Calibrado :

Máquina de Medição por Coordenadas
Fabricante : Mitutoyo
MAC Modelo : RR4-443
No. Série : 0421992 / Código : 190-007-60
Identif. do Cliente : N.C
Fatores Nominal : 400 x 400 x 300 mm
Contador Digital / Controlador
Modelo : N.C
No. Série : N.C
Resolução : 0,0005 mm
Cabeçote
Modelo : MH201
No. Série : 7F3912
Probe
Modelo : TP20
No. Série : 6T4567
Rock
Modelo : N.C
No. Série : N.C
Programa de Medição
Programa : Geopac Win
Versão : 3.0E16
Dongle No. : 16-10336238

II. Notas:

1. A incerteza expandida de medição referida é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2$, o qual para uma distribuição t com $V_{df} = 10$ graus de liberdade efetivas 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 mediido de uma grandeza e um valor de referência.
4. Os símbolos dos resultados tem o mesmo sentido das indicações positivas e negativas do sistema de coordenadas da máquina.
5. A máquina foi calibrada conforme Procedimento PMI-0030 revisão 3.
6. Condição ambiental : Temperatura ambiente: (20,5 ± 0,5) °C
7. Endereço e local da calibração não separamos.

III. Padrões utilizados :

Padrão Escalivado	Termômetro	Esfera Padrão
No. Série : 109034	No. Série : TIF4016	No. Série : DM105
Certificado No. : 04859/13	Certificado No. : LF22179/12	Certificado No. : 00548/12
Emitido em : 14/05/2013	Emitido em : 18/08/2012	Emitido em : 09/02/2012
Validade : 11/2013	Validade : 06/2014	Validade : 02/2014

Data da Calibração : 26 de Maio de 2013
Data da Emissão : 08 de Junho de 2013

Carlos Augusto Góes da Cunha
Chefe Laboratório de Metrologia

Pág. 1 / 4

Este certificado atende aos requisitos de acreditação para laboratórios que realizam a competência de laboratório e competência para certificação e padronização de medição (não é laboratório de ensaio). A interpretação deste Certificado só poderá ser feita e dependerá da aprovação por escrito do cliente.

Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer outras.

**Excellence Control Av. Júlio Castro da Silveira, 1380 - São Paulo - SP - Phone: (11) 5649-0800 - Fax: (11) 5641-3722
e-mail: excell@excell.com.br**
- Belo Horizonte: CEP: 09050-000 - Belo Horizonte - MG - Tel.: (31) 4748-5955 - Fax: (31) 4748-5959 - E-mail: excell@excell.com.br
- Salvador: CEP: 40130-000 - Salvador - BA - Tel.: (71) 3238-6866 - E-mail: excell@excell.com.br
- Assessoria Técnica Exterior: Tel.: (11) 4748-0857 - Fax: (11) 4748-2580 - E-mail: excell@excell.com.br
- Assessoria Técnica Exterior: Tel.: (11) 5480-0071 - Fax: (11) 5652-0205 - E-mail: excell@excell.com.br

ANEXO I – Certificado de Calibração da Máquina de Medir por Coordenadas (Página 2/4)

Mitutoyo
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cogni de acordo com a ABNT NBR
ISO/IEC 17025, sob N.º 0031

IV. Resultado das Medidas:

4.1. Verificações iniciais do equipamento:

a. Movimento da Máquina : **OK**
b. Condições da área de Medição : **OK**
c. Ajustamento do Sist. Pressoríco : **OK**
d. Limpesa das superfícies de ref. : **OK**

4.2. Resultado da Medição:

4.2.1. Resultado da medição do eixo "X", (E1)

4.2.2. Resultado da medição do eixo "Y", (E2)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª Série	2ª Série	3ª Série	Média
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) = $(0,8 + L/1500) \mu\text{m}$, onde: L = comprimento em "mm".

Fator de abrangência (k) = 2,03

Graus de liberdade (Veff) = 88

4.2.3. Resultado da medição do eixo "Z", (E3)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª Série	2ª Série	3ª Série	Média
30	-0,5	-0,1	0,5	0,0
110	0,1	-0,2	-0,1	-0,1
210	-0,3	-0,0	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) = $(0,8 + L/3900) \mu\text{m}$, onde: L = comprimento em "mm".

Fator de abrangência (k) = 2,08

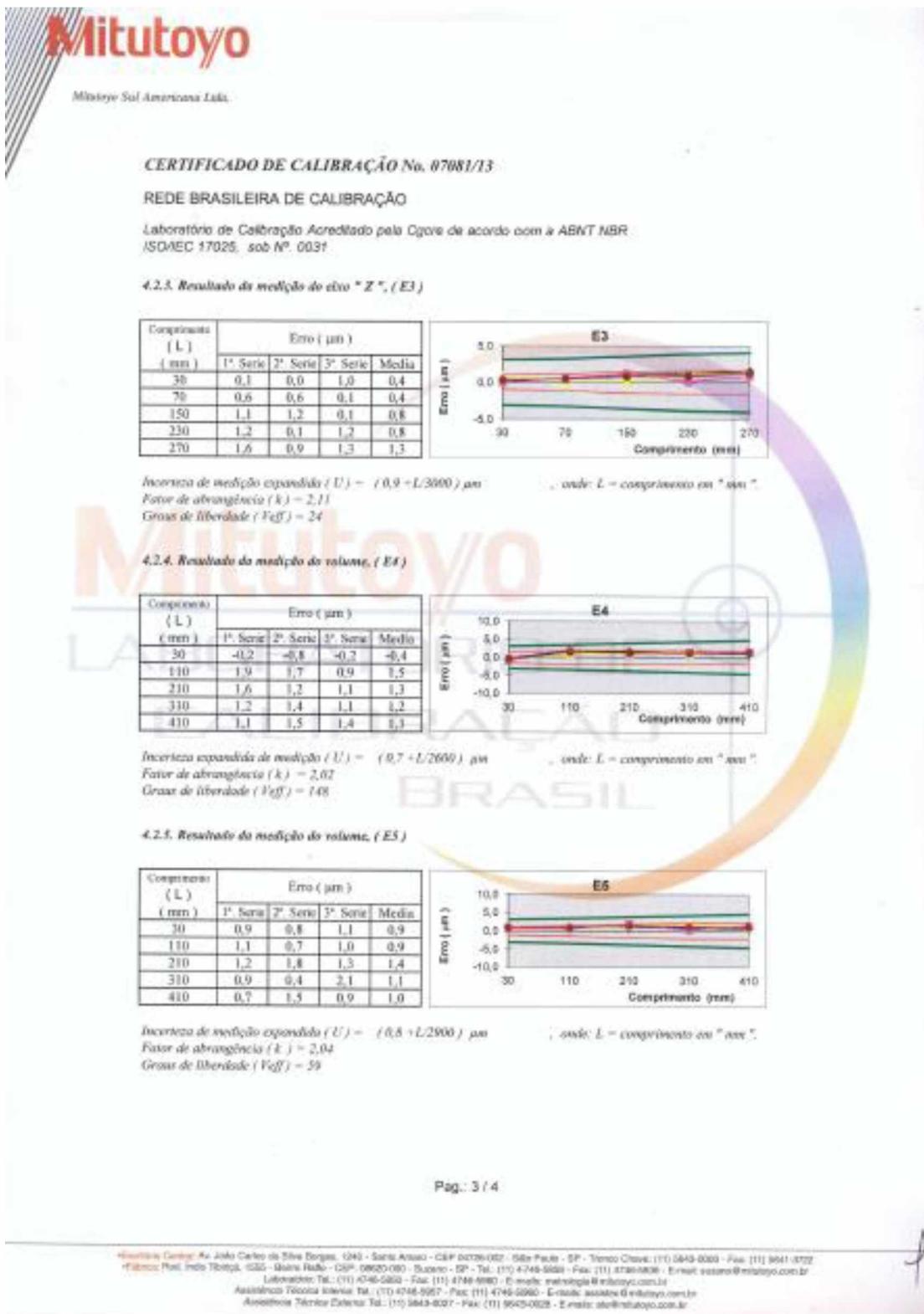
Graus de liberdade (Veff) = 33

Pág. 2/4

Endereço: Centro: Av. Júlio Octavio da Silveira Borges, 1240 - Santo André - CEP 06720-000 - São Paulo - SP - Telefone: (11) 8804-0030 - Fax: (11) 5841-3722
Endereço: Rio: Rua Imboaba, 1888 - Bento Ribeiro - CEP: 20860-000 - Rio de Janeiro - RJ - Telefone: (21) 4744-0030 - E-mail: suporte@mitutoyo.com.br
Laboratório: Tel: (11) 4748-9990 - Fax: (11) 4746-5866 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica: Tel: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-8980 - E-mail: assistencia@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica: Tel: (11) 8804-0030 - Fax: (11) 5843-8020 - E-mail: vte@mitutoyo.com.br

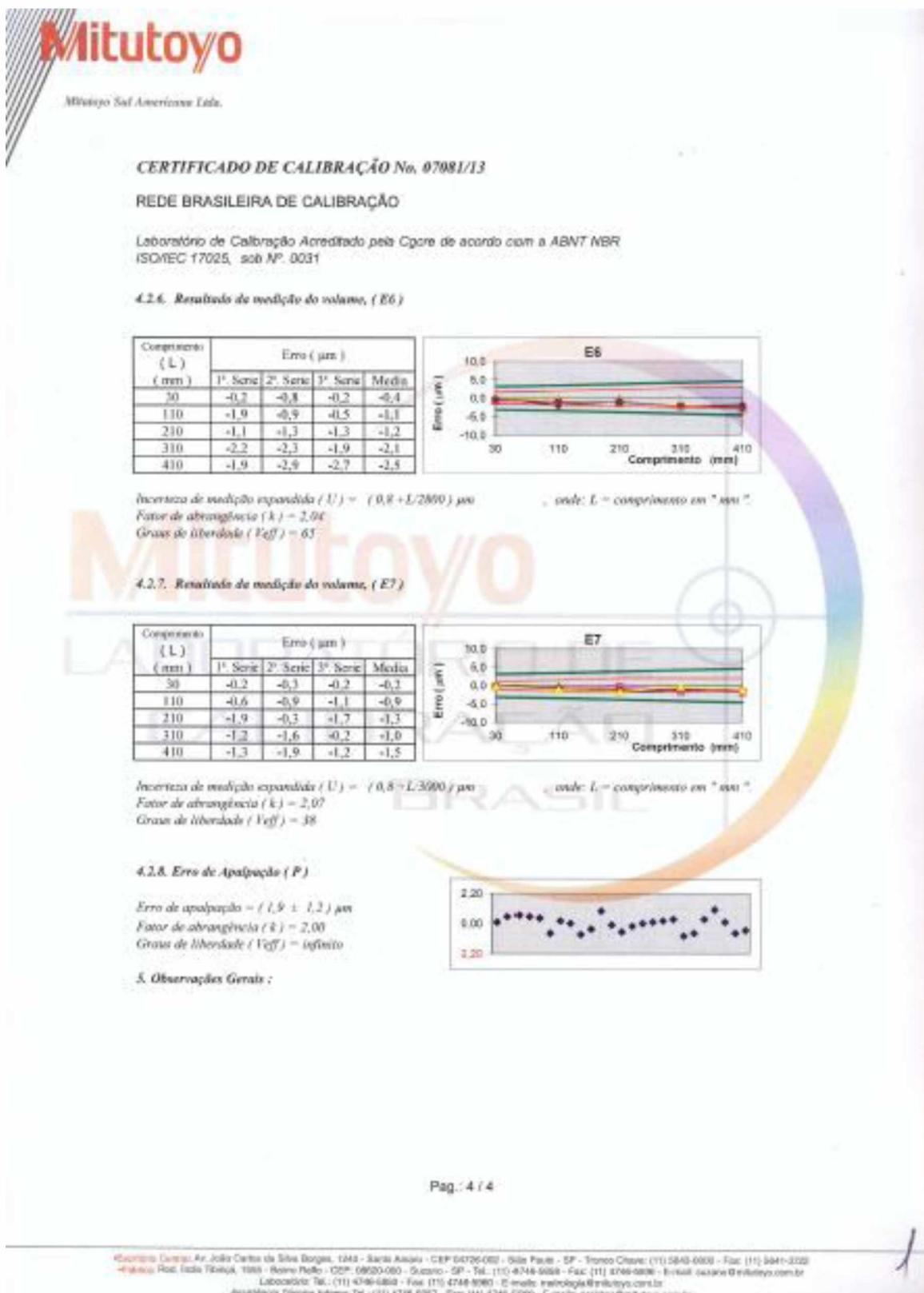
ANEXO I – Certificado de Calibração da Máquina de Medir por Coordenadas

(Página 3/4)



ANEXO I – Certificado de Calibração da Máquina de Medir por Coordenadas

(Página 4/4)



ANEXO II – Certificado de Calibração da Régua (página 1/2)



Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**LABORATÓRIO
DE
METROLOGIA**



REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Pag.: 1 / 2

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 02098/13

Cliente : " MARCIO BACCI DA SILVA /CAPES /PROEX. "
 Endereço : Avenida João Naves Avila, 2.121 - Uberlândia - MG.

Ordem de serviço: 066.550

1 - Objeto Calibrado**Régua Graduada de Aço**

Fabricante: Mitutoyo

Código: 182-125

Nº. de Série: 03

Faixa nominal: 300 mm

Identificação do proprietário: Não consta

2 - Padrão utilizado na Calibração:

Sistema Laser de Medição, marca HP, calibrado pelo Laboratório de Metrologia Dimensional - LAMED do " INMETRO ".

Número : US41113744

Certificado Nº. DIMCI 2058/2010 - INMETRO

Validade: 10/2013

3 - Procedimento de Medição: PML - 0007 – Versão 4

A régua foi alinhado no mesmo eixo de deslocamento da máquina e os valores de indicação foi referenciado no centro dos traços da régua, realizando-se a leitura da indicação no sistema de medição padrão.

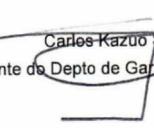
O ponto zero foi considerado no topo da escala.

VC = Valor Convencional

Calibrada na face com graduação de 0,5 mm.

Data da calibração: 12 de Março de 2013

Data da emissão : 12 de Março de 2013



Carlos Kazuo Suelake
Gerente do Depto de Garantia da Qualidade

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades). 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.

*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 Raffo - 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-mails: metrologia@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br

ANEXO II – Certificado de Calibração da Régua (página 2/2)



Mitutoyo Sul Americana Ltda.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 02098/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0031

Pag.: 2 / 2

4 - Resultado da Calibração: O resultado é a média das calibrações.

Indicação (mm)	VC (mm)	Incerteza de medição (mm)	Fator de abrangência (k)	Graus de liberdade (V _{eff})
0,0	0,00			
30,0	30,01			
60,0	60,01			
90,0	90,01			
120,0	120,01			
150,0	150,02	0,02	2,02	131
180,0	180,02			
210,0	210,03			
240,0	240,03			
270,0	270,04			
300,0	300,05			

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_{eff} 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 ± 0,5)°C.

ANEXO III – Certificado de Calibração do Paquímetro Digital (pagina 1/2)



Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo CGCRE que atestam a competência do laboratório e comprovam sua razoabilidade a padrões nacionais de medida (ou no Sistema Internacional de Unidades - SI).

A reprodução deste Certificado só poderá ser total e dependerá 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 outras.

Av. João Carlos da Silveira Borges, 1340 - Bairro Aricanduva - CEP 04720-002 - São Paulo - SP - Telefone: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5941-3722

Rod. Inácio Silveira, 1325 - Bairro Itararé - CEP: 09020-000 - Suzano - SP - Tel: (11) 4746-5859 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br

Laboratório: Tel: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5969 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Interna: Tel: (11) 4746-5951 - Fax: (11) 4746-5950 - E-mail: assistencia@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Externa: Tel: (11) 5943-0027 - Fax: (11) 5943-0028 - E-mail: ato@mitutoyo.com.br

ANEXO III – Certificado de Calibração do Paquímetro Digital (pagina 2/2)

Minutoyo
Minutoyo Sul Americana Ltda.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 07625/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0031

Pag.: 2 / 2

4 - Resultado da calibração: O resultado é a média das calibrações.

Medida Externa	Medida Interna
Padrão (mm)	Padrão (mm)
Indicação no Instrumento (mm)	Indicação no Instrumento (mm)
Incerteza de Medição (mm)	Incerteza de Medição (mm)
1,1	20,0
1,5	50,0
1,9	100,0
4,0	150,0
8,0	
16,0	
20,0	
50,0	
75,0	
100,0	
150,0	
0,02	0,02
Fator de abrangência (k)	2,03
Graus de liberdade (V_{eff})	96
Fator de abrangência (k)	2,00
Graus de liberdade (V_{eff})	infinito

Outros Itens

Item	Resultado (mm)	Incerteza de Medição (mm)	Fator de abrangência (k)	Graus de liberdade (V _{eff})
Ponto zero	0,00	0,01	2,00	infinito
Ressalto	0,00	0,01	2,00	infinito
Profundidade	0,01	0,01	2,00	infinito
Paralelo da Orelha	0,00	0,01	2,00	infinito
Paralelo da Boca	0,00	0,01	2,00	infinito

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_{eff} 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: $(20,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$.

ANEXO IV – Certificado de Calibração do Traçador de Alturas (página 1/2)

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N.º 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

N.º 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 pelo Conselheiro que analisou a competência do laboratório e comprova sua conformidade a padrões nacionais de medição (ou ao Sistema Nacional de Unidade - SU). A reprodução deste Certificado só poderá ser feita a depósito da apropriação por escrito da Mitutoyo.

Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao laboratório informando a calibração sob condições especificadas, não sendo extensivo a qualquer loja.

Endereço: Centro, Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Antônio - CEP: 04739-002 - Bairro Paulista - SP - Fone: (11) 5645-0000 - Fax: (11) 5641-3722

Fábrica: Rod. Int. Itapuã, 1555 - Barro Preto - CEP: 06660-000 - Suzano - SP - Tel: (11) 4746-6994 - Fax: (11) 4746-2201 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br

Corporativo: Tel: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Interna: Tel: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0029 - E-mail: assist@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Externa: Tel: (11) 5643-0029 - Fax: (11) 5643-0029 - E-mail: ext@mitutoyo.com.br

ANEXO IV – Certificado de Calibração do Traçador de Alturas (página 2/2)



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 N°. 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 $v_{eff} = 7$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

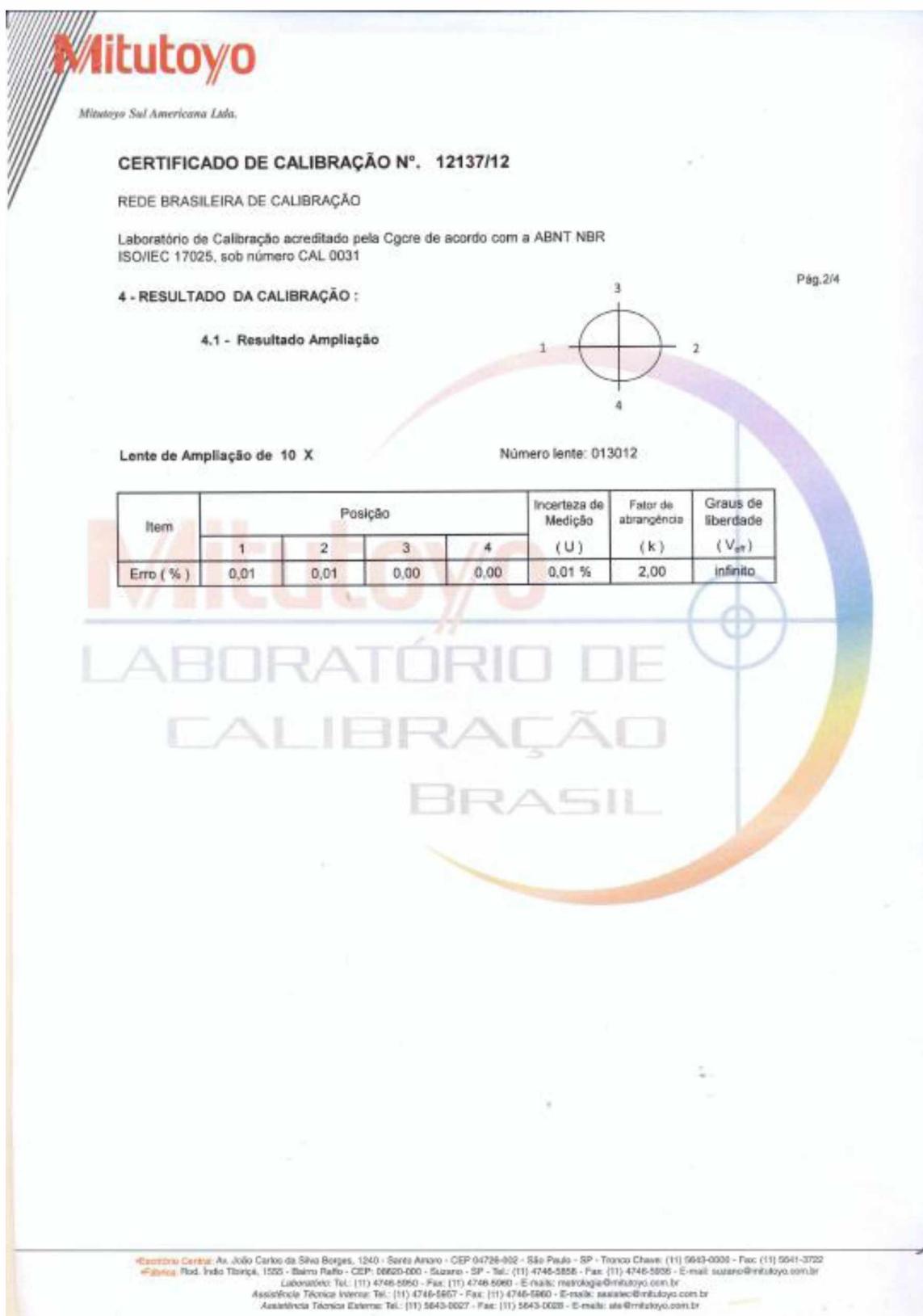
A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

6 - Nota : Temperatura ambiente ($20,0 \pm 0,5$)°C.

ANEXO V – Certificado de Calibração do Projetor de Perfil (página 1/4)



ANEXO V – Certificado de Calibração do Projetor de Perfil (página 2/4)



ANEXO V – Certificado de Calibração do Projetor de Perfil (página 3/4)

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. 3/4

4 -RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :

4.2 - Resultado da Indicação

Eixo " X "	Eixo " Y "
Indicação (mm)	Indicação (mm)
0,000	0,000
2,500	2,499
5,100	5,100
7,700	7,701
10,300	10,300
12,900	12,900
15,000	15,000
17,600	17,600
20,200	20,200
22,800	22,800
25,000	25,000
30,000	30,000
35,000	35,000
40,000	40,001
45,000	45,001
50,000	50,001

0,002

0,002

Fator de abrangência (k) = 2,03

Graus de liberdade (Veff) = 99

Fator de abrangência (k) = 2,03

Graus de liberdade (Veff) = 99

Centro Central: Av. João Carlos de Siqueira Borges, 1240 - Santa Anita - CEP 04726-000 - São Paulo - SP - Teleno Chaves: (11) 5843-0000 - Fax: (11) 5841-3722.
 Fábrica: Rod. Imigrante, 1355 - Bairro Paulista - CEP 09620-000 - Buzânia - SP - Tel.: (11) 4746-6000 - Fax: (11) 4746-0938 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br
 Laboratório: Tel.: (11) 4746-0950 - Fax: (11) 4746-0960 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br
 Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-0937 - Fax: (11) 4746-0980 - E-mail: assist@mitutoyo.com.br
 Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5843-0027 - Fax: (11) 5843-0028 - E-mail: atw@mitutoyo.com.br

ANEXO V – Certificado de Calibração do Projetor de Perfil (página 4/4)

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

4 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :

4.3 - Resultado da indicação do Anteparo Goniométrico

Indicação	Resultado	Incerteza de Medição (U)	Fator de abrangência (k)	Graus de liberdade (V _{eff})
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_{eff} 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.

ANEXO VI – Certificado de Teste da Célula de Carga

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	N84618	Datum: test date / date d'essai	2015-02-12																												
Prüfergebnisse: test results / résultats d'essai																															
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">Eingangsgröße des Messbereichs [%]</th> <th style="width: 40%;">Ausgangsgröße [mV/V]</th> <th style="width: 30%;">Zug</th> <th style="width: 30%;">Druck</th> </tr> <tr> <th>input quantity / échelle d'essai</th> <th>output quantity / résultats</th> <th>tension / traction</th> <th>compression / compression</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0.0000</td> <td>0.0000</td> <td></td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>-1.0006</td> <td>1.0024</td> <td></td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>-2.0004</td> <td>2.0068</td> <td></td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>-1.0010</td> <td>1.0026</td> <td></td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>-0.0001</td> <td>0.0000</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Eingangsgröße des Messbereichs [%]	Ausgangsgröße [mV/V]	Zug	Druck	input quantity / échelle d'essai	output quantity / résultats	tension / traction	compression / compression	0	0.0000	0.0000		50	-1.0006	1.0024		100	-2.0004	2.0068		50	-1.0010	1.0026		0	-0.0001	0.0000	
Eingangsgröße des Messbereichs [%]	Ausgangsgröße [mV/V]	Zug	Druck																												
input quantity / échelle d'essai	output quantity / résultats	tension / traction	compression / compression																												
0	0.0000	0.0000																													
50	-1.0006	1.0024																													
100	-2.0004	2.0068																													
50	-1.0010	1.0026																													
0	-0.0001	0.0000																													

Aus den Prüfergebnissen berechnete messtechnische Kenngrößen:

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	-2.0004	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)	-0.015	0.033
Relative Umkehrspanne 0,5 Fnom [%vI] relative hysteresis / hystéresis relativ	0.040	0.023

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.

Allgemeine Zusatzinformationen:

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 Hüthorst) 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-TD.12

Seite / Page 1 (1)

ANEXO VII – *Datasheet da Célula de Carga*

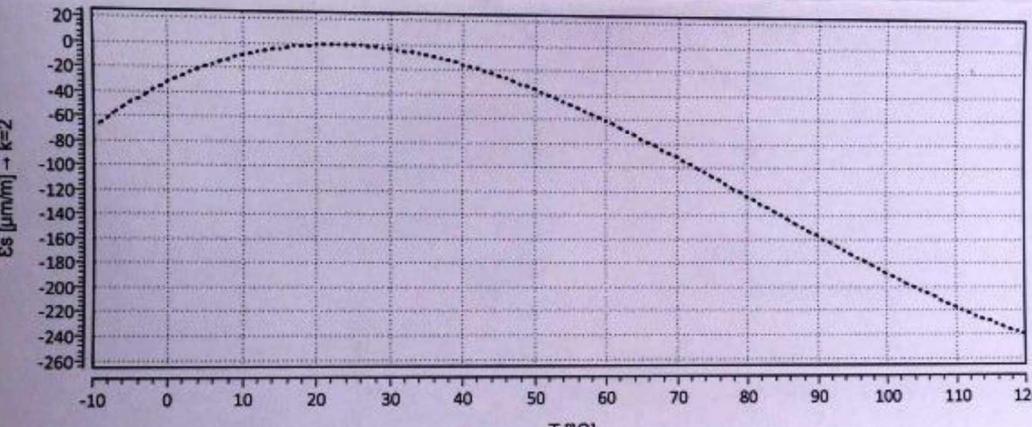
Force transducer type			U2B										
Nominal (rated) force	F_{nom}	N	500										
		kN		1	2	5	10	20	50	100	200		
Accuracy													
Accuracy class			0.2	0.1									
Relative reproducibility and repeatability errors without rotation		d_{R}	%	0.1									
Rel. reversibility error (0.5 * F_{nom})		$V_{0.5}$	%	<0.2	0.15								
Non-linearity		d_{nl}	%	<0.2	0.1								
Creep upon loading (30 min)		$d_{\text{cr}, F+E}$	%	0.06									
Effect of the bending moment (10% F_{nom} * 10 mm)		d_{M}	%	0.05									
Effect of lateral forces (10% F_{nom})		d_{O}	%	0.1									
Temperature effect on sensitivity		TC_S	% / 10 K	0.1									
Temperature effect on zero point		TC_0	% / 10 K	0.05									
Characteristic electrical values													
Nominal (rated) sensitivity		G_{nom}	mV/V	2									
Relative zero signal error		$d_{\text{z},0}$	%	1									
Sensitivity error, tension		d_C	%	0.2									
Sensitivity error, tension/compression		d_{ZD}	%	1.5	0.5								
Input resistance		R_I	Ω	>345									
Output resistance		R_O	Ω	300...400									
Insulation resistance		R_{is}	Ω	2 · 10 ⁹									
Operating range of the excitation voltage		$B_{U,G}$	V	0.5...12									
Reference excitation voltage		U_{ref}	V	5									
Temperature													
Reference temperature		T_{ref}	°C	+23									
Nominal (rated) temperature range		$B_{T,\text{no}}$	°C	-10 ... +85									
Operating temperature range		$B_{\text{U,G}}$	°C	-30 ... +85									
Storage temperature range		$B_{T,S}$	°C	-50 ... +85									
Characteristic mechanical quantities													
Maximum operating force		F_Q		130	150								
Limit force		F_L		>130	>150								
Breaking force		F_B		>300									
Limit torque (when loading with nominal (rated) force)		M_Q	Nm	46.8	63.0	63.0	60.0	108.0	340.0	620.0	2430.0	5125.0	
Limit bending moment (when loading with nominal (rated) force)		$M_{\text{b}, \text{max}}$	Nm	2.9	12.8	19.0	24.0	49.0	223.0	380.0	1463.0	2880.0	
Static lateral limit force (when loading with nominal (rated) force)		F_Q	% of F_{nom}	25.0	52.0	36.0	18.0	25.0	35.0	19.0	25.0	19.0	
Nominal (rated) displacement ±15%		S_{nom}	mm	0.056	0.056	0.048	0.047	0.047	0.065	0.082	0.09	0.12	
Fundamental frequency		f_Q	kHz	4	6	8.7	14	17.5	8	8.5	6	5.6	
Rel. permissible vibrational stress		F_{v}	% of F_{nom}	100	160								
General information													
Degree of protection per DIN EN 60529				IP67									
Spring element material				Stainless steel									
SG protection				Hemispherically-welded measuring body									
Cable				6-wire, polyethylene insulated									
Cable length				As requested by the customer									
Weight		kg		0.8		2.9	4.3	10.7	15.9				

ANEXO VII – *Datasheet* da Célula de Carga (continuação)

Force transducer type		U2B												
Nominal (rated) force	F _{nom}	N	500											
		kN		1	2	5	10	20	50	100	200			
Mechanical shock; test severity level as per IEC 68-2-29-1987														
Number				1000										
Duration		ms		3										
Acceleration		m/s ²		637										
Vibrational stress														
Test severity level as per DIN IEC 68, Part 2-6, IEC-2-6-1982														
Frequency range		Hz		5 ... 65										
Duration		min		30										
Acceleration		m/s ²		150										

1) Water column: 0.5 h

ANEXO VIII – Informações Técnicas dos Strain Gauges

		Dehnungsmessstreifen Strain gages Jauge d'extensométrie																			
Widerstand Resistance Résistance	120 Ω $\pm 0.30\%$	Bestellnummer Order No. No. de référence	1-LY41-3/120																		
k-Faktor Gage factor Facteur k	2.01 $\pm 1.0\%$	Typ Type Type	3/120 LY41																		
Querempfindlichkeit Transverse sensitivity Sensibilité transverse	0.1 %	Stückzahl Contents Quantité	10																		
		Temperaturkoeffizient des k-Faktors Temperature coefficient of gage factor Coefficient de température du facteur k	93 ± 10 [10 ⁻⁶ / K] (-10°C ... +45°C)																		
		Folienlos Foil lot Lot de la feuille	A417/32																		
		Herstellungslots Production batch Lot de fabrication	B12070212																		
		Max. effekt. Brückenspannung max. rms bridge excitation voltage tension d'alim. du pont maxi eff.	3.5 V																		
Temperaturkompensation: Ferritischer Stahl mit Temperatur compensation: steel with Compensation de température: acier avec		$\alpha = 10.8$ [10 ⁻⁶ / K]																			
 <p>Curve 1: \dots</p> <p>ϵ_s [$\mu\text{m}/\text{m}$] \uparrow k=2</p> <p>T [°C] \uparrow</p> <table border="1"> <caption>Data points estimated from the graph</caption> <thead> <tr> <th>T [°C]</th> <th>ϵ_s [$\mu\text{m}/\text{m}$]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-10</td><td>-60</td></tr> <tr><td>0</td><td>-40</td></tr> <tr><td>20</td><td>0</td></tr> <tr><td>40</td><td>-20</td></tr> <tr><td>60</td><td>-60</td></tr> <tr><td>80</td><td>-100</td></tr> <tr><td>100</td><td>-140</td></tr> <tr><td>120</td><td>-180</td></tr> </tbody> </table>				T [°C]	ϵ_s [$\mu\text{m}/\text{m}$]	-10	-60	0	-40	20	0	40	-20	60	-60	80	-100	100	-140	120	-180
T [°C]	ϵ_s [$\mu\text{m}/\text{m}$]																				
-10	-60																				
0	-40																				
20	0																				
40	-20																				
60	-60																				
80	-100																				
100	-140																				
120	-180																				
$\epsilon_s(T) = -32.05 + 2.94 * T - 7.53E-02 * T^2 + 3.03E-04 * T^3 \pm (T-20) * 0.30$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]																					
Alle technischen Daten nach VDI/VDE 2635. Geben Sie bei Rückfragen bitte Bestellnummer und Herstellungslots an.		Temperaturgang der Dehnungsmessstreifen bei Applikationen mit oben angegebenen Wärmeausdehnungskoeffizienten α . Gemessen bei kontinuierlicher Temperaturänderung.																			
All specifications in accordance with VDI/VDE 2635. In case of further inquiries please indicate order no. and production batch number.		Kennlinie 1: DMS ohne Anschlussbändchen. T = Temperatur in °C (dimensionless)																			
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.																					
Réponse en température des jauge d'extensométrie appliquées sur des matériaux dont des coefficients de dilatation thermique α sont indiqués. Mesurée à variation continue de la température.		The temperature response refers to strain gages bonded to materials with specified coefficients of thermal expansion α . Values are measured with continuous temperature variation.																			
Courbe 1: Jauge sans pattes de raccordement. T = température en °C (sans dimension)		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 VIV – Certificado de Calibração da Máquina de Tração (página 1/4)

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

EMITENTE: LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO INSTRON

DATA DE EMISSÃO: 10-May-16

NÚMERO DO CERTIFICADO: 16051001MC



Equipamentos Científicos Instron Ltda
 Praça das Begônias, 14 Centro Comercial
 Alphaville, Barueri, SP 06453-061
 Telefone: +55(11) 4689-5481
 Fax: +55(11) 3035-9421
 E-mail: service_brasil@instron.com

Página 1 de 4 páginas

SIGNATÁRIO APROVADO

Gerente Técnico
 Flávio H. D'Agostino

Tipo de calibração: Força
Padrão relevante: ISO 7500-1: 2004
Data da calibração: 10-May-16

Cliente

Nome: UPU - Lab. de Tecnologia em Atrito e Desgaste
 Local: Av. João Naves de Ávila, 2121 - Campus Santa Mônica Bisco SF
 Uberlândia, MG 38408-100
 País: Brasil
 Temperatura ambiente: 25.8 °C
 O.C./Nº do contrato:
 Contato: Raphael Rezende Pires E-mail: raphaelpires@yahoo.com.br

Máquina

Fabricante:	INSTRON	Fabricante:	INSTRON
ID do sistema:	8801MTU6168	ID do transdutor:	2527-111/300718
Tipo:	Servo-Hidráulica	Capacidade:	100 kN
	Intervalo único	Tipo:	Tensão/Compressão
Ano de fabr.:	2015		

Transdutor**Classificação**

A máquina de testes acima foi verificada com os indicadores e os modos mostrados abaixo somente para o aumento da força, de acordo com a norma ISO 7500-1 usando um equipamento de verificação calibrado de acordo com a norma ISO 376.

Indicador 1. - Leitura digital: Coassial v. 8.9.374 (kN)**Escala completa**

do intervalo	Intervalo da força testada	Modo	Sistema
(%)	(kN)		Classe *
100	22.4745 a 100.1324	Tensão	1
	-22.555 a -100.043	Compressão	0.5

* A classe do sistema para um intervalo definido de registro: erro, repetitividade, retorno para zero, resolução e classificação do dispositivo de teste.

Método de verificação

O cálculo da precisão e do erro de repetitividade e a classificação do desempenho da máquina de testes foram realizados de acordo com o método especificado no Anexo C da norma ISO 7500-1.

A máquina de teste foi verificada na condição "conforme encontrada".

Antes da calibração, a máquina foi inspecionada para se verificar se ela estava em boas condições de funcionamento, tendo

Instruções CalproCR, versão 3.29

Este certificado atesta os resultados do Censo Instron, que verificam a capacidade do laboratório a oferecer sua calibração pelo sistema nacional e internacional. Os resultados indicados neste certificado e o seguinte relatório estão relacionados apenas aos itens verificados. Qualquer tentativa de uso em consequência dessa notificação será indicada ao cliente. Este relatório não deve ser reproduzido, exceto por completo, sem a aprovação do laboratório emissor.

ANEXO VIV – Certificado de Calibração da Máquina de Tração (página 2/4)

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO ACREDITADO No. 0443 (REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO - RBC)

NÚMERO DO CERTIFICADO:
16051001MC

Página 2 de 4 páginas

sido comprovado que satisfaz as diretrizes da seção 5 da norma ISO 7500-1.
Nenhum acessório vinculado mecanicamente foi montado ao se realizar essa calibração.

Resumo de dados - Indicador 1. - Leitura digital: Consola v. 8.9.374 (kN)

TENSÃO

% do intervalo	Erro na	Erro na	Erro na	Erro de	Classe	Incerteza	Incerteza da
	execução 1	execução 2	execução 3	repetitividade			
	(%)	(%)	(%)	(%)		(%)	(± kN)
100 Intervalo % (escala completa: 100.1324 kN)							
Retorno para 0					0.5		
20	0.11	0.08	-0.05	0.16	1	0.40	0.090
40	0.05	0.02	-0.05	0.10	1	0.39	0.16
60	-0.01	-0.02	-0.06	0.05	1	0.39	0.23
80	0.01	-0.03	-0.08	0.09	1	0.39	0.31
100	-0.06	-0.08	-0.13	0.07	0.5	0.39	0.39

Resumo de dados - Indicador 1. - Leitura digital: Consola v. 8.9.374 (kN)

COMPRESSÃO

% do intervalo	Erro na	Erro na	Erro na	Erro de	Classe	Incerteza	Incerteza da
	execução 1	execução 2	execução 3	repetitividade			
	(%)	(%)	(%)	(%)		(%)	(± kN)
100 Intervalo % (escala completa: -100.043 kN)							
Retorno para 0					0.5		
20	-0.31	-0.23	-0.24	0.08	0.5	0.33	0.075
40	-0.20	-0.15	-0.14	0.06	0.5	0.33	0.13
60	-0.12	-0.09	-0.12	0.03	0.5	0.33	0.20
80	-0.07	-0.06	-0.07	0.01	0.5	0.33	0.26
100	-0.04	-0.03	-0.03	0.01	0.5	0.33	0.33

Classe de plot: resultados: 0.5 para 100 Intervalo % (Indicador 1. Tensão), 0.5 para 100 Intervalo % (Indicador 1. Compressão).

* A incerteza expandida relacionada associada-se a uma incerteza padão multiplicada por um fator de cobertura $k = 2$, proporcionando um nível de confiabilidade aproximadamente 95%.

O cálculo da incerteza refere-se a valores obtidos durante a calibração e não leva em consideração fatores como efeitos do dia de longo prazo, temperatura e vibração. A omissão desses fatores deve ser feita uma consideração pelo usuário do dispositivo de medição de força.

Dados - Indicador 1. - Leitura digital: Consola v. 8.9.374 (kN)

TENSÃO

% do intervalo	Execução 1		Execução 2		Execução 3	
	Indicado	Aplicado	Indicado	Aplicado	Indicado	Aplicado
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
100 Intervalo % (escala completa: 100.1324 kN)						
Retorno para 0	0.001		0.006		0.005	
20	22.500	22.4745	22.501	22.4834	22.500	22.5103
40	39.999	39.9808	40.000	39.9928	40.001	40.0226
60	60.000	60.00852	60.003	60.01746	60.002	60.03534
80	80.036	80.02427	80.024	80.04513	80.009	80.07494

ANEXO VIV – Certificado de Calibração da Máquina de Tração (página 3/4)

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO ACREDITADO No. 0443 (REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO - RBC)

NÚMERO DO CERTIFICADO:
16051001MC

Página 3 de 4 páginas

Dados - Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8.9.374 (kN)

TENSÃO

% do intervalo	Execução 1		Execução 2		Execução 3	
	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)
100 Intervalo % (escala completa: 100.1324 kN)						
100	100.002	100.0688	100.019	100.1026	100.007	100.1324

Dados - Indicador 1. - Leitura digital: Console v. 8.9.374 (kN)

COMPRESSÃO

% do intervalo	Execução 1		Execução 2		Execução 3	
	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)	Indicado (kN)	Aplicado (kN)
100 Intervalo % (escala completa: -100.043 kN)						
0	0.005		-0.004		0.001	
20	-22.498	-22.5689	-22.502	-22.555	-22.509	-22.5639
40	-39.999	-40.0792	-40.001	-40.0613	-40.013	-40.0703
60	-60.002	-60.0711	-60.003	-60.05918	-60.004	-60.07706
80	-80.009	-80.06301	-80.011	-80.06003	-80.003	-80.05705
100	-100.000	-100.043	-100.005	-100.0341	-100.009	-100.037

Equipamento de verificação

ID do equipamento	Descrição	Capacidade	Data da cal.	Válida da cal.	Ref. do certificado
114378A	célula de carga	142000 lbf	27-Oct-14	27-Oct-16	102729145A
975608	indicador de temp.	NA	05-Oct-15	05-Oct-17	TP-10-093/15
193157	indicador de força	NA	03-Sep-14	03-Sep-16	09032614C8

A leitura do equipamento de verificação foi igual ou melhor que a leitura no qual este dispositivo de teste foi verificado.

A temperatura média do equipamento durante a verificação foi de 28,5°C.

Utilização do equipamento de verificação

Intervalo:

Escala
completa

(%)	Modo	ID do equipamento	Percentual(s) do intervalo	Precisão (+/-)
100	Tensão	114378A	20/ 40/ 60/ 80	0,32% da leitura
		114378A	100	0,16% da leitura
100	Compressão	114378A	20/ 40/ 60/ 80/ 100	0,16% da leitura
Todos	Tensão-Compressão	975608	Todos	1,8 °F

(Os padrões de fator são referentes ao SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES) por meio de padrões fornecidos pelo Instituto de Metrologia Nacional de Metrologia reconhecido internacionalmente.

A precisão do indicador de força usado com um dispositivo elástico está incorporada na precisão informada pelo dispositivo.

ANEXO VIV – Certificado de Calibração da Máquina de Tração (página 4/4)**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO**

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO ACREDITADO No. 0443 (REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO - RBC)

NÚMERO DO CERTIFICADO:
16051001MC

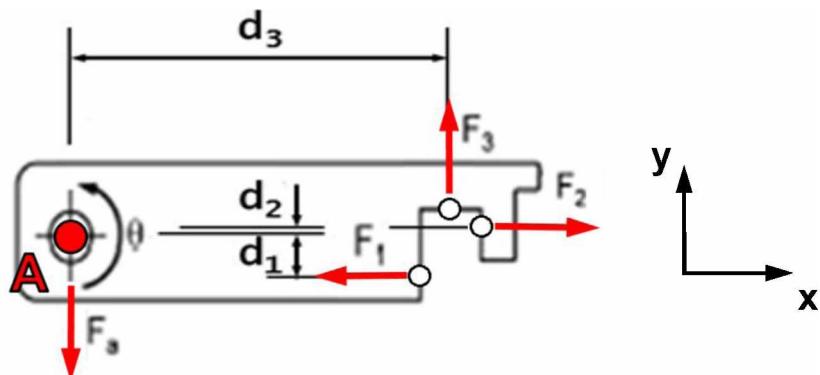
Página 4 de 4 páginas

*O prazo do equipamento de verificação usado foi igual ou menor que o prazo indicado na tabela acima.***Comentários**Verificado por: Marcio Campolina
Service Technician

NOTA: O Artigo 9 da norma ISO T500-1 declara: O tempo entre as calibrações depende do tipo da máquina de testes, do padrão de manutenção e da quantidade de utilizações. A não ser que seja especificado de outra forma, recomenda-se que a calibração seja realizada em intervalos de no máximo 12 meses. Em qualquer caso, a máquina deve ser calibrada se for movida para um novo local com a necessidade de desmontagem ou se sofrer reparos ou ajustes de vulto.

APÊNDICE I – Demonstração dos Cálculos Analíticos dos Esforços Mecânicos na Amostra do RSL

Diagrama de corpo livre do braço de carregamento:



$$\sum F_x = 0 \Rightarrow -F_a \sin \theta - F_1 + F_2 = 0 \quad (A.1)$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow -F_a \cos \theta + F_3 = 0 \quad (A.2)$$

$$\sum M_A = 0 \Rightarrow -F_1 d_1 - F_2 d_2 + F_3 d_3 = 0 \quad (A.3)$$

Reorganizando os termos da Eq. (A.2) tem-se:

$$F_3 = F_a \cos \theta \quad (A.4)$$

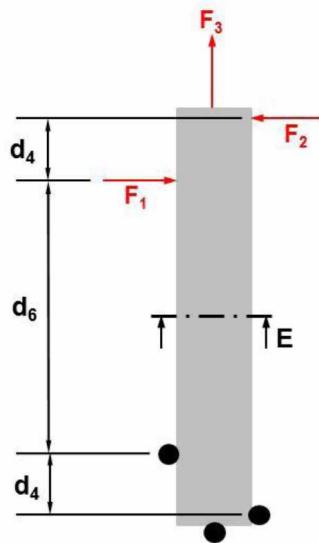
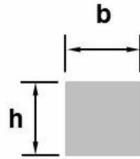
Substituindo a Eq. (A.4) na Eq. (A.3) tem-se:

$$F_1 = \frac{F_a [-d_2 \sin \theta + d_3 \cos \theta]}{d_1 + d_2} \quad (A.5)$$

Substituindo as Eqs. (A.4) e (A.5) na Eq. (A.1) tem-se:

$$F_2 = \frac{F_a [d_1 \sin \theta + d_3 \cos \theta]}{d_1 + d_2} \quad (A.6)$$

Cálculo do momento na seção do entalhe



$$M_E = -F_2 \left[d_4 + \frac{d_6}{2} \right] + F_1 \frac{d_6}{2} \quad (A.7)$$

Substituindo F_1 e F_2 pelas Eqs. (A.5) e (A.6) na Eq. (A.7), tem-se:

$$\begin{aligned}
 M_E &= \frac{F_a [d_1 \operatorname{sen} \theta + d_3 \cos \theta]}{d_1 + d_2} \left(d_4 + \frac{d_6}{2} \right) - \frac{F_a [-d_2 \operatorname{sen} \theta + d_3 \cos \theta]}{d_4} \left(\frac{d_6}{2} \right) \\
 M_E &= \frac{F_a}{2} \left[\frac{d_4(2d_1 \operatorname{sen} \theta + 2d_3 \cos \theta)}{d_4} + \frac{d_1 d_6 \operatorname{sen} \theta}{d_4} + \frac{d_3 d_6 \cos \theta}{d_4} + \frac{d_2 d_6 \operatorname{sen} \theta}{d_4} - \frac{d_3 d_6 \cos \theta}{d_4} \right] \\
 M_E &= \frac{F_a}{2} \left[\frac{d_4(2d_1 \operatorname{sen} \theta + 2d_3 \cos \theta)}{d_4} + \frac{(d_1 + d_2)d_6 \operatorname{sen} \theta}{d_4} \right] \\
 M_E &= \frac{F_a}{2} \left[\frac{d_4(2d_1 \operatorname{sen} \theta + 2d_3 \cos \theta)}{d_4} + \frac{d_4 d_6 \operatorname{sen} \theta}{d_4} \right] \\
 M_E &= \frac{F_a}{2} (2d_1 \operatorname{sen} \theta + 2d_3 \cos \theta + d_6 \operatorname{sen} \theta) \quad (A.8)
 \end{aligned}$$

Cálculo da tensão mecânica nominal na região do entalhe da amostra na direção longitudinal da amostra (σ_{projeto})

$$\sigma = \sigma_M + \sigma_N$$

Onde:

$$\sigma_M = \frac{M_E y}{I} \Rightarrow \sigma_M = \frac{\left[\frac{F_a}{2} (2d_1 \sin\theta + 2d_3 \cos\theta + d_6 \sin\theta) \right] \frac{h}{2}}{\frac{bh^3}{12}}$$

$$\sigma_N = \frac{F_3}{A} \Rightarrow \sigma_N = \frac{F_a \cos\theta}{bh}$$

Logo:

$$\sigma = \frac{\left[\frac{F_a}{2} (2d_1 \sin\theta + 2d_3 \cos\theta + d_6 \sin\theta) \right] \frac{h}{2}}{\frac{bh^3}{12}} + \frac{F_a \cos\theta}{bh}$$

$$\sigma_{\text{projeto}} = F_a \left[\frac{3}{bh^2} (2d_1 \sin\theta + 2d_3 \cos\theta + d_6 \sin\theta) + \frac{\cos\theta}{bh} \right]$$

Onde:

- σ_M e σ_N são as tensões mecânicas devido ao momento e a força normal, respectivamente, na amostra.
- A é a área de seção transversal da amostra
- b e h são a largura e a altura da seção transversal da amostra
- y é a posição do centroide da amostra
- I é o momento de inércia da amostra