

ELSIO JUNIOR BONATI BORGES

**PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NO CÁLCULO DO
FATOR f_{ab} , EM EVENTOS PRODUZIDOS VIA
ESCLEROMETRIA RETILÍNEA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2020

ELSIO JUNIOR BONATI BORGES

**PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NO CÁLCULO DO FATOR f_{ab} , EM
EVENTOS PRODUZIDOS VIA ESCLEROMETRIA RETILÍNEA**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientadora: Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia

Coorientador: Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior

UBERLÂNDIA – MG

2020

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

B732
2020
Borges, Elcio Junior Bonati, 1979-
Parâmetros de influência no cálculo do fator fab, em eventos produzidos via esclerometria retilínea [recurso eletrônico] / Elcio Junior Bonati Borges. - 2020.

Orientadora: Rosenda Valdés Arencibia.

Coorientador: Washington Martins da Silva Junior.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.330>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Arencibia, Rosenda Valdés, 1969-, (Orient.). II. Silva Junior, Washington Martins da , 1977-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica,
Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br -
secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 289, COPEM				
Data:	06/03/2020	Hora de início:	08:05	Hora de encerramento:	11:50
Matrícula do Discente:	11613EMC006				
Nome do Discente:	Elsio Junior Bonati Borges				
Título do Trabalho:	Parâmetros de Influência no Cálculo Fator f_{ab} , em Eventos Produzidos via Esclerometria Retilínea				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Metrologia aplicada a sistemas mecânicos				

Reuniu-se na Sala 1M206 - Bloco 1M, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Washington Martins da Silva Júnior (co-orientador) - FEMEC/UFU; Arthur Alves Fiocchi - FEMEC/UFU; José Daniel Biasoli de Mello - FEMEC/UFU; Antonio Piratelli Filho - UnB; Cherlio Scandian - UFES e Rosenda Valdés Arencibia orientadora do candidato.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Dra. Rosenda Valdés Arencibia, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a

arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Arthur Alves Fiocchi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 06/03/2020, às 11:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rosenda Valdes Arencibia, Professor(a) do Magistério Superior**, em 06/03/2020, às 11:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Washington Martins da Silva Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 06/03/2020, às 11:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Piratelli Filho, Usuário Externo**, em 06/03/2020, às 11:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cherlio Scandian, Usuário Externo**, em 06/03/2020, às 11:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Daniel Biasoli de Mello, Professor(a) do Magistério Superior**, em 06/03/2020, às 11:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1905830** e o código CRC **68A37DB1**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por tudo.

À minha família pelo exemplo.

À minha esposa e meus filhos pela compreensão.

À Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia pela orientação, competência, dedicação, motivação e grande conhecimento repassado, os quais foram fundamentais para a realização desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior pela coorientação, contribuição e providenciais ensinamentos nas áreas de tribologia e desgaste.

Aos professores Dr. Arthur Alves Fiocchi e Dr. Márcio Bacci da Silva, pela disponibilização das amostras de aço ferramenta e do perfilômetro mecânico com contato.

Aos pesquisadores: Guilherme Bernardes Rodrigues, Maksym Ziberov, Milla Caroline Gomes, Túlio Alves Rodrigues e Vinícius Carvalho Teles, pela disposição e contribuição durante os testes experimentais e medições.

À Universidade Federal de Uberlândia, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos.

A todos os laboratórios que me forneceram o apoio necessário para a realização da pesquisa.

A todos os amigos, colegas, técnicos e professores pelo apoio e conhecimento compartilhado.

BORGES, E. J. B. **Parâmetros de influência no cálculo do fator f_{ab} , em eventos produzidos via esclerometria retilínea**. 2020. 176 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

A literatura estudada reporta que a caracterização do desgaste abrasivo por meio do fator de remoção de material (f_{ab}) é uma tarefa difícil, em muitas aplicações práticas. Se observou que os valores de f_{ab} , sob determinadas condições experimentais, apresentam baixa repetibilidade, levando em alguns casos até a invalidação dos resultados. Para superar esse problema, uma metodologia, abrangendo desde a etapa de preparação das amostras até a análise dos dados, foi proposta e validada. Foi realizado um extenso estudo para identificar as fontes de erro que podem afetar a avaliação do f_{ab} por meio da perfilometria mecânica com contato e da medição óptica sem contato. Protocolos para preparação de amostras, realização dos riscos e medição das áreas de interesse foram desenvolvidos e adotados. A incerteza de medição associada a todos os mensurandos foi estimada aplicando o método proposto no GUM-JCGM 100. Os resultados alcançados mostraram que a metodologia proposta é robusta, eficiente e de fácil aplicação. Testando um bloco-padrão de classe 0, os resultados mostraram que, na medição com contato, a repetibilidade associada ao f_{ab} obtido a partir de cinco medições foi boa, uma vez que o desvio padrão representou, no pior caso, 8 % e 12 %, para riscos realizados com indentadores Rockwell-C e Vickers, respectivamente. A maior variabilidade observada nos valores de f_{ab} para o indentador Vickers foi atribuída à combinação de menores eventos, presença de regiões com maciça acumulação de material nas laterais do sulco e a formação de cavacos. Valores de desvio padrão da ordem de 2 % do f_{ab} foram obtidos na medição sem contato adotando um perfil médio resultante da medição de 2000 perfis. Este trabalho mostrou que a superfície de teste das amostras deve ser cuidadosamente preparada, uma vez que valores de Ra da ordem de $0,07 \pm 0,08 \mu\text{m}$ e de $0,04 \pm 0,08 \mu\text{m}$ não garantiram a obtenção de valores de f_{ab} com repetibilidade adequada. A obtenção de valores de f_{ab} rastreáveis e com baixa repetibilidade, pode aumentar a utilização deste parâmetro em pesquisas que buscam uma melhoria da resistência dos materiais quanto ao desgaste, além de otimizar decisões

relacionadas à classificação e seleção destes materiais, a fim de aumentar a vida útil e a eficiência de máquinas, equipamentos e peças.

Palavras-chave: Fator de remoção de material. Mecanismos de desgaste. Repetibilidade. Incerteza de Medição.

BORGES, E. J. B. **Parâmetros de influência no cálculo do fator f_{ab} , em eventos produzidos via esclerometria retilínea.** 2020. 176 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Several authors have been writing that the abrasive wear characterization through the material removal factor (f_{ab}) is a difficult task, in many practical applications. It was observed that the f_{ab} values, under certain experimental conditions, showed a significant low repeatability, leading in some cases to result invalidation. To overcome this problem, in this work, a robust and efficient methodology of easy implementation was proposed and validated. An extensive study to identify the error sources that can affect the f_{ab} assessment was made through mechanical profilometry with contact and optical profilometry without contact. Protocols for sample preparation, for scratch performing and for measuring areas of interest were developed and adopted. The measurement uncertainty associated with all measurands was estimated by applying the method proposed in the GUM-JCGM 100. The results showed that the proposed methodology is robust, efficient and easy to apply. Testing a gauge block of grade 0 manufactured of high carbon and chrome steel alloy, results showed that, in contact measurement the repeatability associated with the f_{ab} obtained from five measurements was good, since the standard deviation represented in the worst case, 8 % and 12 %, for scratches performed using the Rockwell-C and Vickers indenters, respectively. The highest variability observed in the values of f_{ab} for the Vickers indenter can be attributed to the combination of smaller events with massive pile up and chip formation. Standard deviation values of the order of 2 % f_{ab} were obtained through non-contact measurement by adopting an average profile resulting from 2000 profile measurement. This work showed that the sample test surface must be carefully prepared, since Ra values of the order of $0.07 \pm 0.08 \mu\text{m}$ and $0.04 \pm 0.08 \mu\text{m}$ did not guarantee the achievement of f_{ab} values with adequate repeatability. Obtaining traceable and low repeatability f_{ab} values may increase the use of this parameter in researches aimed at improving materials wear resistance, as well as optimize decisions related

to selecting and classifying these materials in order to increase the lifespan and efficiency of machines, equipments and pieces.

Keywords: Material removal factor. Abrasion mechanisms. Repeatability. Measurement uncertainty.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Seção transversal típica de um risco mostrando a formação de ombros nas laterais do sulco (BUTTERY, 1969).....	1
Figura 1.2	Esquema da seção transversal de um risco com resposta dúctil (ZUM GAHR, 1987).....	2
Figura 1.3	Média e desvio padrão dos valores de f_{ab} (PÖHL et al., 2016).....	6
Figura 2.1	Parâmetros tribológicos que interferem no desgaste (MELLO, 1994 apud KÖNIG, 2007).....	10
Figura 2.2	a) Desgaste abrasivo por riscamento (abrasivo fixo); b) Desgaste abrasivo por rolamento (abrasivo livre) (HUTCHINGS, 1992).....	11
Figura 2.3	Representação esquemática dos micromecanismos de desgaste (ZUM GAHR, 1987).....	12
Figura 2.4	Detalhe dos sulcos formados utilizando penetrador Rockwell-C de raio de ponta de 100 μm e força normal de riscamento de 2 N em diferentes velocidades de riscamento para o aço ABNT 8550 beneficiado, a) velocidade de riscamento de 10 $\mu\text{m/s}$, b) velocidade de riscamento de 100 $\mu\text{m/s}$ e c) velocidade de riscamento de 1000 $\mu\text{m/s}$ (FERREIRA, 2010).....	14
Figura 2.5	Presença de cavacos ao lado do risco (MASEN et al., 2005).....	14
Figura 2.6	Perfil de um risco com a formação de cavaco à esquerda (FRANCO; SINATORA, 2017).....	15
Figura 2.7	Indicação da localização da linha de referência em um típico perfil transversal de um risco (KOBICK et al., 2011).....	15
Figura 2.8	Detalhe quanto ao posicionamento, pelo usuário, das barras verticais	

	que definem o ponto de transição para o cálculo das áreas de interesse na seção transversal de um risco (FRANCO, 2015).....	16
Figura 2.9	Imagem tridimensional obtida a partir de risco produzido para amostra de ferro fundido branco (BARRADAS et al., 2001).....	17
Figura 2.10	Valores do fator f_{ab} obtidos ao longo do comprimento do risco, para amostra de alumínio (a) e ferro fundido branco hipoeutético (b) (BARRADAS et al., 2001).....	18
Figura 2.11	Tela oferecida ao usuário para determinação do perfil médio (FRANCO, 2015).....	19
Figura 2.12	Variação da largura do risco e fator f_{ab} com a força aplicada (FRANCO; SINATORA, 2017).....	21
Figura 2.13	Imagem de um risco em ferro puro, que mostra uma região sem material acumulado nas laterais do sulco, seguida de uma região com enorme acumulação (PÖHL et al., 2016).....	21
Figura 2.14	Materiais testados e o fator f_{ab} denominado com o símbolo “ ϕ ” calculado (LINDROOS et al., 2015).....	22
Figura 2.15	Representação esquemática da medição topográfica da superfície utilizando perfilometria com contato (adaptado de HUTCHINGS, 1992).....	24
Figura 2.16	Efeitos provocados pela geometria da ponta do apalpador no perfil medido (LEACH, 2014).....	25
Figura 2.17	Sulcamento em amostra de alumínio torneada provocada pela medição com rugosímetro eletromecânico (DOBES et al., 2017).....	26
Figura 2.18	Perfis obtidos para diferentes direções de apalpamento (LEACH, 2014).....	27
Figura 2.19	Variação do perfil em função da escala escolhida (HUTCHINGS, 1992).....	28
Figura 2.20	Esquema sobre a reflexão em uma indentação (SILVA JUNIOR, 2008).....	29
Figura 2.21	Perfil transversal, sendo o comprimento de medição o eixo X e o perfil de medição o eixo Y (SILVA JUNIOR, 2008).....	29
Figura 3.1	Geometria dos indentadores Vickers e Rockwell-C (adaptado de	

	WILLIAMS, 1996).....	38
Figura 3.2	Esclerômetro retilíneo utilizado.....	39
Figura 3.3	Sistema de medição com contato, usado para obter os perfis dos riscos e a rugosidade superficial das amostras. Computador (1), mesa de coordenadas (2), amostra (3), perfilômetro (4), cabeçotes micrométricos analógicos (5) e mesa inercial (6).....	40
Figura 3.4	Região do padrão medida durante a calibração do perfilômetro.....	41
Figura 3.5	Pontos coordenados X e Y previamente definidos para obtenção da geometria utilizada na calibração do programa.....	43
Figura 3.6	Áreas das geometrias obtidas a partir dos pontos com coordenadas X e Y conhecidas.....	43
Figura 3.7	Dimensões nominais e geometria da amostra de aço ferramenta.....	45
Figura 3.8	Dimensões nominais e geometria da amostra de alumina.....	47
Figura 3.9	Vista superior (a) e lateral (b) do porta-amostra.....	48
Figura 3.10	Porta-amostra (Fig. 3.10a) e amostra de aço ferramenta (Fig. 3.10b) posicionados e fixados no desempenho da MMC.....	49
Figura 3.11	Montagem experimental utilizada para verificação do paralelismo da superfície da mesa do esclerômetro em relação às suas guias (Fig. 3.11a). O desvio de paralelismo foi verificado em duas direções perpendiculares, conforme indicado na Fig. 3.11b.....	56
Figura 3.12	Bloco-padrão (1) afixado na mesa do esclerômetro (3) durante o processo de riscamento com o indentador Rockwell-C (2).....	58
Figura 3.13	Imagens da microestrutura da amostra de aço ferramenta (3.13a) e do bloco- padrão (3.13b), obtidas por meio de um microscópio óptico.....	60
Figura 4.1	Diagrama de causa e efeito, com as principais fontes de erros observadas na determinação do fator f_{ab} utilizando perfilômetro mecânico (medição com contato).....	65
Figura 4.2	Diagrama de causa e efeito, com as principais fontes de erros observadas na determinação do fator f_{ab} utilizando o microscópio óptico.....	65
Figura 4.3	Perfis transversais efetivos durante as cinco medições efetuadas nos riscos realizados na amostra de aço ferramenta, referente aos experimentos 5, 6, 7 e 8 (indentador Vickers) e 13, 14, 15 e 16	

	(indentador Rockwell-C) contendo réplicas e tréplicas. Medição com contato.....	68
Figura 4.4	Perfil transversal efetivo dos riscos do experimento 7, contendo réplica e tréplica: medição 1 (4.4a), medição 2 (4.4b), medição 3 (4.4c) e medição 4 (4.4d). Medição com contato.....	69
Figura 4.5	Perfis do primeiro risco do experimento 7, com destaque para as áreas utilizadas no cálculo do fator f_{ab} . Medição com contato.....	70
Figura 4.6	Valores médios de f_{ab} obtidos nas condições 5-8 na Amostra 1 de aço ferramenta considerando as quatro medições efetuadas no primeiro risco, na réplica e na tréplica, totalizando 12 valores, bem como o desvio padrão associado (68,27 %). Medição com contato.....	74
Figura 4.7	Valores médios de f_{ab} obtidos considerando a força aplicada na Amostra 2 de aço ferramenta utilizando indentador Vickers. Desvio padrão como sendo a barra de erros para um nível de confiança de 68,27 %. Considerando apenas os dados das cinco medições. Medição com contato.....	75
Figura 4.8	Valores médios de f_{ab} obtidos considerando a força aplicada na Amostra 2 de aço ferramenta utilizando indentador Rockwell-C. Desvio padrão como sendo a barra de erros para uma confiabilidade de 68,27 %. Considerando apenas os dados das cinco medições. Medição com contato.....	75
Figura 4.9	Valores médios de f_{ab} obtidos em função da força aplicada na Amostra 2 de aço ferramenta utilizando indentadores Vickers e Rockwell-C. Desvio padrão como sendo a barra de erros para um nível de confiança de 68,27 %. Medição com contato.....	76
Figura 4.10	Gráficos de probabilidade normal dos resíduos para o planejamento simples proposto.....	77
Figura 4.11	Imagens obtidas utilizando MEV, referentes aos riscos realizados na amostra de aço ferramenta, utilizando indentador Rockwell-C (a) e Vickers (b).....	78
Figura 4.12	Imagem obtida utilizando MEV, referente ao risco realizado na amostra de alumina, utilizando indentador Vickers e força de 25 N.....	79
Figura 4.13	Imagens obtidas utilizando MEV de um risco usando indentador	

	Rockwell-C na amostra de aço ferramenta.....	81
Figura 4.14	Geometria do perfil obtida durante a primeira medição realizada no primeiro risco feito com indentador Rockwell-C na amostra de aço ferramenta. Medição com contato.....	81
Figura 4.15	Valores médios de f_{ab} obtidos a partir de riscos realizados na amostra de aço ferramenta usando indentador Rockwell-C e força de 25 N. Os valores de desvio padrão (68,27 %) são mostrados nas barras de erros. Medição com contato.....	82
Figura 4.16	A incerteza expandida (95 %) em porcentagem associada ao fator f_{ab} considerando diferentes tamanhos de amostras para três riscos realizados usando indentador Rockwell-C e força de 25 N na amostra de aço ferramenta (a). Valores médios de f_{ab} obtidos para três riscos considerando todas as medições (b). Os valores de incerteza expandida (95 %) são mostrados por meio das barras de erros. Medição com contato.....	83
Figura 4.17	Contribuição das variáveis de entrada na incerteza das áreas de interesse para o cálculo do fator f_{ab} , (sulco e ombros), referente ao risco 1, usando indentador Rockwell-C na amostra de aço ferramenta. Foram consideradas cinco medições. Medição com contato.....	83
Figura 4.18	Imagens obtidas utilizando MEV de um risco na amostra de aço ferramenta usando indentador Vickers (a) e (b).....	84
Figura 4.19	Geometria do perfil obtida durante a primeira medição realizada no primeiro risco feito com indentador Vickers na amostra de aço ferramenta. Medição com contato.....	84
Figura 4.20	Valores médios de f_{ab} obtidos a partir de riscos realizados na amostra de aço ferramenta usando indentador Vickers e força de 3 N. Os valores de desvio padrão (68,27 %) são mostrados nas barras de erros. Medição com contato.....	85
Figura 4.21	A incerteza expandida em porcentagem (95 %) associada ao fator f_{ab} considerando diferentes tamanhos de amostras para três riscos realizados usando indentador Vickers e força de 3 N na amostra de aço ferramenta (a). Valores médios de f_{ab} obtidos para três riscos considerando todas as medições (b). Os valores de incerteza expandida	

	(95 %) são mostrados por meio das barras de erros. Medição com contato.....	86
Figura 4.22	Contribuição das variáveis de entrada na incerteza das áreas de interesse para o cálculo do fator f_{ab} , (sulco e ombros), referente ao risco 1, usando indentador Vickers na amostra de aço ferramenta. Foram consideradas cinco medições. Medição com contato.....	87
Figura 4.23	Imagens obtidas utilizando MEV de um risco na amostra de bloco-padrão usando indentador Vickers mostrando a formação de ombros nas laterais do sulco (a) e a formação de cavacos (b).....	88
Figura 4.24	Geometria do perfil obtida durante a primeira medição realizada no primeiro risco feito com indentador Rockwell-C no bloco-padrão. Medição com contato.....	88
Figura 4.25	Geometria do perfil obtida durante a primeira medição realizada no primeiro risco feito com indentador Vickers no bloco-padrão. Medição com contato.....	89
Figura 4.26	Valores médios de f_{ab} obtidos a partir de riscos realizados na amostra de bloco-padrão. Força aplicada de 25 N e 3 N nos ensaios realizados com indentadores Rockwell-C e Vickers, respectivamente. Os valores de desvio padrão (68,27 %) são mostrados nas barras de erros. Medição com contato.....	89
Figura 4.27	Valores de f_{ab} obtidos a partir de riscos realizados na amostra de bloco-padrão usando indentadores Rockwell-C com força de 25 N (a) e Vickers com força de 3 N (b). Medição com contato.....	90
Figura 4.28	Valores médios de f_{ab} obtidos a partir de riscos realizados na amostra de bloco-padrão usando indentadores Rockwell-C com força de 25 N (a) e Vickers com força de 3 N (b). Os indentadores foram limpos entre um riscamento e outro. Os valores de desvio padrão (68,27 %) são mostrados nas barras de erros. Medição com contato.....	91
Figura 4.29	Perfis obtidos durante a primeira medição sem contato realizada no terceiro risco produzido com o indentador Rockwell-C no bloco-padrão (a) e com contato (b).....	92
Figura 4.30	Perfis obtidos durante a primeira medição sem contato realizada no primeiro risco produzido com o indentador Vickers no bloco-padrão (a)	

	e com contato (b).....	93
Figura 4.31	Valores médios de f_{ab} obtidos a partir da medição sem contato, de riscos realizados na amostra de bloco-padrão usando indentadores Rockwell-C com força de 25 N (a) e Vickers com força de 3 N (b). Os indentadores foram limpos entre um riscamento e outro. Os valores de desvio padrão (68,27 %) são mostrados nas barras de erros.....	94
Figura 4.32	Valores médios de f_{ab} obtidos a partir da medição sem contato, de riscos realizados na amostra de bloco-padrão usando indentadores Rockwell-C com força de 25 N (a) e Vickers com força de 3 N (b). Os indentadores foram limpos entre um riscamento e outro. Os valores de incerteza expandida (95 %) são mostrados por meio das barras de erros.....	95
Figura 4.33	Valores médios de f_{ab} obtidos a partir da medição com contato e medição sem contato, de riscos realizados no bloco-padrão usando indentadores Rockwell-C com força de 25 N (a) e Vickers com força de 3 N (b). Os valores de desvio padrão (68,27 %) são mostrados nas barras de erros.....	96
Figura 4.34	Perfil médio obtido durante a medição sem contato realizada no terceiro risco feito com indentador Rockwell-C no bloco-padrão.....	96
Figura 4.35	Perfil médio obtido durante a medição sem contato realizada no primeiro risco feito com indentador Vickers no bloco-padrão.....	97
Figura 4.36	Cinco perfis individuais e o perfil médio obtidos na medição sem contato no terceiro risco para indentador Rockwell-C (força aplicada de 25 N).....	98
Figura 4.37	Cinco perfis individuais e o perfil médio obtidos na medição sem contato no primeiro risco para indentador Vickers (força aplicada de 3 N).....	98
Figura 4.38	Valores médios de f_{ab} calculados a partir dos perfis médios obtidos pela análise de 2000 perfis (medição sem contato), de riscos realizados na amostra de bloco-padrão usando indentadores Rockwell-C com força de 25 N (a) e Vickers com força de 3 N (b). Os indentadores foram limpos entre um riscamento e outro. Os valores de incerteza expandida (95 %) são mostrados por meio das barras de erros.....	99

Figura 4.39	<i>Box Plots</i> dos valores de f_{ab} em função do procedimento de medição para riscos Rockwell com força aplicada de 25 N.....	101
Figura 4.40	<i>Box Plots</i> dos valores de f_{ab} em função do procedimento de medição para riscos Vickers com força aplicada de 3 N.....	102
Figura 4.41	Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o planejamento simples proposto em três níveis. Dados obtidos em riscos Rockwell-C..	102
Figura 4.42	Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o planejamento simples proposto em três níveis. Dados obtidos em riscos Vickers.....	103
Figura 4.43	Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o planejamento simples proposto em dois níveis. Dados obtidos em riscos Rockwell-C..	104
Figura 4.44	Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o planejamento simples proposto em dois níveis. Dados obtidos em riscos Vickers.....	104
Figura 4.45	Gráfico de barras indicando o percentual máximo (%max) que o desvio padrão representa em relação ao valor médio do f_{ab} , para os trabalhos citados na Tab. 4.9.....	106
Figura A2.1	Vista superior (a) e lateral (b) do porta-amostra.....	125
Figura A3.1	Média, desvio padrão e porcentagem considerando diferentes tamanhos amostrais para riscos efetuados na amostra 2 de aço ferramenta com indentador Vickers, sendo que a escolha dos perfis foi obtida utilizando o critério da ordem de medição do perfil.....	128
Figura A3.2	Média, desvio padrão e porcentagem considerando diferentes tamanhos amostrais para riscos efetuados na amostra 2 de aço ferramenta com indentador Rockwell-C, sendo que a escolha dos perfis foi obtida utilizando o critério da ordem de medição do perfil.....	129
Figura A3.3	Média, desvio padrão e porcentagem considerando diferentes tamanhos amostrais para riscos efetuados na amostra 2 de aço ferramenta com indentador Vickers, sendo que a escolha dos perfis foi obtida utilizando sorteio.....	131
Figura A3.4	Média, desvio padrão e porcentagem considerando diferentes tamanhos amostrais para riscos efetuados na amostra 2 de aço ferramenta com indentador Rockwell-C, sendo que a escolha dos perfis foi obtida utilizando sorteio.....	132
Figura A3.5	Incerteza expandida (95 %) associada ao f_{ab} em todas as condições	

	investigadas considerando apenas a incerteza padrão do Tipo A para indentador Vickers e amostra de aço ferramenta.....	133
Figura A3.6	Incerteza expandida (95 %) associada ao f_{ab} em todas as condições investigadas considerando apenas a incerteza padrão do Tipo A para indentador Rockwell-C e amostra de aço ferramenta.....	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Comparação entre valores obtidos por média de 10 perfis individuais e valores fornecidos pelo CCI-MP (perfil médio). Adaptado de FRANCO (2015).....	20
Tabela 3.1	Matriz do planejamento fatorial completo 2^4	37
Tabela 3.2	Componentes do equipamento de esclerometria retilínea.....	39
Tabela 3.3	Direção e sentido do lixamento. Gramatura das lixas.....	46
Tabela 3.4	Matriz do planejamento com um único fator (força) para indentador Vickers e amostra de aço ferramenta.....	53
Tabela 3.5	Matriz do planejamento com um único fator (força) para indentador Rockwell-C e amostra de aço ferramenta.....	53
Tabela 3.6	Matriz do planejamento com um único fator (força) para indentador Vickers e amostra de alumina.....	53
Tabela 3.7	Matriz do planejamento com um único fator (força) para indentador Rockwell-C e amostra de alumina.....	53
Tabela 3.8	Composição química da amostra de aço ferramenta e do bloco-padrão (% em peso).....	58
Tabela 3.9	Microdureza média da amostra de aço ferramenta e do bloco-padrão. Incerteza expandida (U) para uma probabilidade de abrangência de 95 %.....	59
Tabela 4.1	Principais fontes de erros observadas na determinação do fator f_{ab} , bem como as alternativas propostas para reduzir o efeito destas fontes.....	66
Tabela 4.2	Resultados obtidos durante a calibração do programa Mountains Map...	66
Tabela 4.3	Áreas de interesse, valores de f_{ab} calculados para os quatro perfis dos demais riscos do experimento 5 a 8 (réplica e tréplica), incluindo a média aritmética e o desvio-padrão obtido (68,27 %).....	71
Tabela 4.4	Resultado da ANOVA para o planejamento simples.....	76

Tabela 4.5	Matriz do planejamento com um único fator (procedimento de medição) variando em três níveis.....	100
Tabela 4.6	Resultado da ANOVA para o planejamento simples, onde o fator procedimento de medição foi avaliado em três níveis.....	101
Tabela 4.7	Matriz do planejamento com um único fator (procedimento de medição) variando em dois níveis.....	103
Tabela 4.8	Resultado da ANOVA para o planejamento simples, onde o fator procedimento de medição foi avaliado em dois níveis.....	104
Tabela 4.9	Comparação dos resultados obtidos neste trabalho e aqueles decorrentes de outras pesquisas realizadas por outros autores, onde são mostradas algumas condições experimentais e o percentual máximo (%max) que o desvio padrão representa em relação ao valor médio do f_{ab}	105
Tabela A2.1	Valores médios do desvio de planeza das amostras de aço ferramenta e de alumina. Fator de abrangência e incerteza expandida (95 %) associada.....	123
Tabela A2.2	Valores médios de desvio de paralelismo das amostras de aço ferramenta e de alumina. Fator de abrangência e incerteza expandida (95 %) associada.....	123
Tabela A2.3	Valores médios do desvio de planeza, do desvio de paralelismo e das dimensões lineares do porta-amostra. Fator de abrangência e incerteza expandida (U) 95 % associada.....	124
Tabela A2.4	Valores médios do parâmetro de rugosidade Ra das amostras de aço ferramenta e de alumina. Fator de abrangência e da incerteza expandida (95 %) associada em cada caso.....	125

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

3D	Três dimensões
$\bar{A}$	Valor médio de área obtido pelo programa Mountains Map
$A1$ e $A2$	Áreas que representam o material deformado para as laterais do sulco
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
A_v	Área que corresponde ao material removido pela ação do indentador
BIPM	Bureau Internacional de Pesos e Medidas
C_{Rug}	Incerteza associada à calibração do perfilômetro
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DP	Desvio de planeza ou de paralelismo
$\overline{DP}$	Média dos valores indicados pela MMC para cada mensurando em questão
E_A	Erro sistemático associado à determinação das áreas por meio do programa computacional Mountains Map Universal
f_{ab}	Fator de remoção de material
FE	Fundo de escala
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
H_0	Hipótese nula
HV	Dureza Vickers
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JCGM	<i>Joint Committee for Guides in Metrology</i>
k	Fator de abrangência correspondente
L	Valor do mensurando
$\bar{L}$	Média dos valores de áreas indicados pelo programa Mountains Map
L_P	Variabilidade dos valores indicados pelo paquímetro
MEV	Microscópio eletrônico de varredura

MMC	Máquina de medir por coordenadas
n	Número dos ciclos de medição realizados
p -valor	Probabilidade de significância
PZT	Translador piezelétrico
Ra	Desvio aritmético médio do perfil avaliado
Rk	Rugosidade do núcleo do perfil
Rp	Altura máxima do pico do perfil
Rpk	Rugosidade dos picos do perfil
Rq	Desvio médio quadrático do perfil avaliado
$Rrug$	Incerteza associada à calibração do rugosímetro
Rt	Altura total do perfil
Rv	Profundidade máxima do vale do perfil
Rvk	Rugosidade dos vales do perfil
Rz	Altura máxima do perfil
$R\Delta q$	Inclinação quadrática média do perfil avaliado
s	Desvio padrão
SI	Sistema Internacional de Unidades
$s(L)$	Média dos valores de áreas indicados pelo programa Mountains Map
$U(C)$	Incerteza expandida associada à calibração do programa Mountains Map
$U(C_M)$	Incerteza expandida associada à calibração do microscópio óptico
$U(C_P)$	Incerteza expandida associada à calibração do perfilômetro
U_{DPrE}	Incerteza para o desvio de paralelismo entre as superfícies de medição para externos do paquímetro
U_{DPrI}	Incerteza para o desvio de paralelismo entre as superfícies de medição para internos do paquímetro
U_{ECp}	Incerteza de calibração para medidas externas do paquímetro
U_{ICp}	Incerteza de calibração para medidas internas do paquímetro
U_{rug}	Incerteza expandida associada à medição de rugosidade pelo microscópio óptico
U_{vert}	Incerteza expandida associada ao eixo Z do microscópio óptico
U_x	Incerteza expandida linear associada ao eixo X da MMC
U_y	Incerteza expandida linear associada ao eixo Y da MMC
U_z	Incerteza expandida linear associada ao eixo Z da MMC

VC_A	Valor de área calculado utilizando-se fórmulas matemáticas
$\bar{x}(L_{Rug})$	Média aritmética dos valores indicados pelo rugosímetro ou perfilômetro
ΔA	Incerteza devido à ampliação da lente de aumento utilizada pelo microscópio óptico
ΔA_R	Correção associada ao raio da ponta do apalpador
ΔC	Correção associada à calibração do programa Mountains Map
ΔC_M	Incerteza associada à calibração do microscópio óptico
$\Delta C_{MMC(Z)}$	Correção associada à calibração da MMC (eixo Z)
ΔC_P	Correção associada à calibração do paquímetro ou do perfilômetro
ΔC_{PR}	Correção associada à calibração do padrão de rugosidade
ΔC_{Rug}	Correção associada à calibração do rugosímetro
ΔD	Correção associada à deformação do material da amostra durante a medição
ΔD_{PR}	Correção associada à deformação do padrão de rugosidade durante a medição
ΔD_{PrE}	Correção devido ao desvio de paralelismo entre as superfícies de medição para externos do paquímetro
ΔD_{PrI}	Correção devido ao desvio de paralelismo entre as superfícies de medição para internos do paquímetro
ΔE_a	Correção devido ao erro de apalpamento da MMC
ΔR	Correção associada à resolução do programa Mountains Map
ΔR_{MMC}	Correção devido à resolução da MMC
ΔR_P	Correção devido à resolução do paquímetro
ΔR_{Rug}	Correção associada à resolução do rugosímetro

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – Introdução	1
1.1. Motivação	5
1.2. Originalidade	5
1.3. Justificativa	5
1.4. Objetivos do trabalho.....	7
1.5. Estado de hipótese.....	7
1.6. Organização do trabalho	8
 CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica	 9
2.1. Tribologia	9
2.2. Desgaste abrasivo	10
2.3. Esclerometria retilínea	12
2.4. Procedimentos para determinação do perfil transversal de um risco	23
2.4.1. <i>Perfilometria mecânica com contato. Definição e principais fontes de erros.....</i>	24
2.4.2. <i>Medição óptica sem contato. Definição e principais fontes de erros.....</i>	28
2.5. Rastreabilidade metrológica e incerteza de medição	30
2.6. Planejamento de experimentos e análise de variância	33
 CAPÍTULO III – Metodologia	 35
3.1. Levantamento das fontes de erros na perfilometria mecânica com contato e na medição óptica sem contato	36
3.2. Testes preliminares (perfilometria mecânica com contato em amostras de aço ferramenta e alumina)	36
3.2.1. <i>Planejamento dos testes preliminares</i>	36
3.2.2. <i>Fabricação das amostras e do porta-amostra</i>	45
3.2.3. <i>Controle dimensional e geométrico das amostras e do porta-amostra</i>	48

3.3. Testes intermediários (perfilometria mecânica com contato em amostras de aço ferramenta e alumina)	52
3.3.1. <i>Determinação da força vertical a ser aplicada durante a realização dos riscos</i>	53
3.3.2. <i>Avaliação do efeito do tamanho amostral (número de medições) nos valores de f_{ab}</i>	54
3.3.3. <i>Obtenção de imagens via Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV..</i>	55
3.4. Testes definitivos (amostras de aço ferramenta e liga de aço com alto teor de carbono e cromo – bloco-padrão)	55
3.4.1. <i>Testes definitivos em amostras de aço ferramenta</i>	55
3.4.2. <i>Validação da metodologia (protocolos) proposta para determinação do f_{ab} testando amostras de liga de aço com alto teor de carbono e cromo – bloco-padrão</i>	57
3.4.3. <i>Caracterização dos materiais</i>	58
3.5. Determinação do f_{ab} utilizando medição óptica sem contato (amostra de liga de aço com alto teor de carbono e cromo – bloco-padrão)	61
CAPÍTULO IV – Resultados e Discussões	64
4.1. Fontes de erros	64
4.2. Resultados da calibração do programa Mountains Map	66
4.3. Resultados dos testes preliminares (perfilometria mecânica com contato em amostras de aço ferramenta e alumina)	67
4.3.1. <i>Resultados referentes às medições dos perfis transversais dos riscos, utilizando perfilômetro mecânico com contato (testes preliminares)</i>	67
4.4. Resultados dos experimentos intermediários (perfilometria mecânica com contato em amostras de aço ferramenta e alumina)	74
4.4.1. <i>Valores de f_{ab} obtidos na amostra de aço ferramenta</i>	74
4.5. Resultados dos testes definitivos (amostras de aço ferramenta e de liga de aço com alto teor de carbono e cromo – bloco-padrão)	80
4.5.1. <i>Resultados dos testes definitivos usando o indentador Rockwell-C na amostra de aço ferramenta</i>	80
4.5.2. <i>Resultados dos testes usando o indentador Vickers em uma amostra de aço ferramenta</i>	83

4.5.3. Resultados dos testes em uma amostra de bloco-padrão	87
4.6. Resultados de f_{ab} a partir da medição óptica sem contato (amostra de liga de aço com alto teor de carbono e cromo – bloco-padrão)	92
4.7. Considerações finais	100
4.7.1. Análise estatística dos resultados	100
4.7.2. Comparação dos resultados com a literatura	105
4.8. Metodologia desenvolvida e adotada no presente trabalho	107
CAPÍTULO V – Conclusões	111
CAPÍTULO VI – Propostas para Trabalhos Futuros	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
APÊNDICES	
Apêndice I – Certificado de calibração do perfilômetro com contato	120
Apêndice II – Resultados do controle dimensional e geométrico das peças	123
Apêndice III – Avaliação do efeito do tamanho amostral (número de medições) nos valores de f_{ab} obtidos na amostra de aço ferramenta	127
ANEXOS	
Anexo I – Certificado de calibração do padrão de rugosidade	135
Anexo II – Certificado de calibração da máquina de medir por coordenadas	137
Anexo III – Certificado de calibração do paquímetro digital	141
Anexo IV – Certificado de calibração do termo-higrômetro digital	143
Anexo V – Certificado de calibração do relógio comparador	145
Anexo VI – Certificado de calibração do microscópio óptico	147

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A quantificação da resposta do deslizamento de uma partícula sobre uma superfície quanto à capacidade de sulcar ou cortar pode ser efetuada de diversas formas. A análise dos perfis transversais nos riscos produzidos e a determinação do fator f_{ab} constituem uma das maneiras utilizadas para esta finalidade.

Os primeiros trabalhos sobre o assunto foram publicados há meio século. Buttery (1969) não utilizou a denominação f_{ab} para quantificar o material removido durante a ação de um riscamento, porém o demonstrou a partir do símbolo “ ζ ” e o relacionou com as áreas observadas na seção transversal do evento formado, conforme mostra a Fig. 1.1 e a Eq. (1.1).

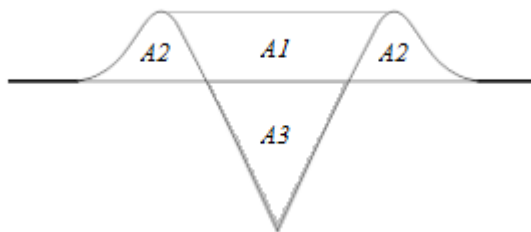


Figura 1.1 – Seção transversal típica de um risco mostrando a formação de ombros nas laterais do sulco (BUTTERY, 1969).

$$\zeta = \frac{A3 - A2}{A3} \quad (1.1)$$

Zum Gahr (1981) introduziu, sob a justificativa de que o microcorte e o microsulcamento podem ocorrer simultaneamente durante a abrasão, um fator de correção

com o objetivo de melhor determinar o volume de material removido em função da distância percorrida pela partícula abrasiva ($\Delta V/L$), conforme mostra a Eq. (1.2).

$$\frac{\Delta V}{L} = f_{ab} \cdot \left(\frac{\Delta V}{L} \right)_{th} \quad (1.2)$$

Este fator, apresentado na época sem muitos detalhes, foi denominado de f_{ab} e definido como a relação entre o volume removido por microcorte e o volume do sulco. Já em 1983, Zum Gahr e Mewes apud Franco; Sinatora (2017) apresentaram uma definição formal do fator f_{ab} em termos de áreas da seção transversal de um risco. Estes autores apontaram que o fator f_{ab} é capaz de indicar a severidade da remoção de material na abrasão e obtiveram resultados experimentais consistentes para uma ampla gama de metais e ligas metálicas. Para o cálculo do fator f_{ab} , estes autores utilizaram a técnica de cortes inclinados (*taper sections*) de 2° a 3°. Citaram, também, sua semelhança com o fator “ ζ ” definido por Buttery em 1969.

Zum Gahr (1987) detalhou o modelo proposto por ele em 1981 e mostrou experimentalmente sua relação e dependência com as propriedades do material e com os parâmetros do sistema, tais como dureza, resistência ao cisalhamento, coeficiente de Poisson, e geometria da ponta do indentador (forma, dimensões e ângulo). Assim, o fator f_{ab} foi calculado com base na análise das áreas de material removido/movimentado da seção transversal do evento formado, durante o processo de deslizamento. A Figura 1.2 mostra o esquema da seção transversal de um risco em um material dúctil.

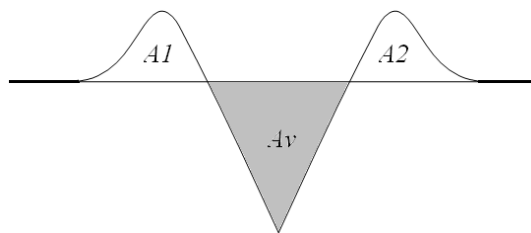


Figura 1.2 – Esquema da seção transversal de um risco com resposta dúctil (ZUM GAHR, 1987).

Na Figura 1.2, a área A_v corresponde ao material removido pela ação do indentador e as áreas $A1$ e $A2$ representam o material deformado para as laterais do sulco. Os valores de área

são apresentados usualmente em μm^2 . O fator f_{ab} é adimensional sendo calculado por meio da Eq. (1.3), conforme proposto por Zum Gahr (1987).

$$f_{ab} = \frac{A_v - (A_1 + A_2)}{A_v} \quad (1.3)$$

Para o riscamento com resposta dúctil, um f_{ab} igual a zero significa que toda a área removida pelo indentador foi deformada para as laterais do sulco. O f_{ab} igual a um (1) representa o microcorte ideal. Qualquer valor intermediário entre zero e um (1) corresponde ao percentual de material removido durante o deslizamento (ZUM GAHR, 1987). Por sua vez, no regime frágil, a remoção de material devido à propagação de trincas pode levar à obtenção de áreas maiores que aquela correspondente a ação do indentador. Pelo exposto, o fator f_{ab} não é usado para análise do deslizamento no regime frágil (BARRADAS; COSTA; MELLO, 2001; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

Zum Gahr (1988) avaliou o fator f_{ab} em materiais que continham descontinuidades, tais como trincas, poros, lamelas de grafite, grãos fragilizados, entalhes internos e grandes carbonetos, utilizando conceitos de mecânica da fratura. Ele apresentou um modelo teórico para determinar o f_{ab} considerando o microcorte e o microsulcamento da superfície como mostra a Eq. (1.4).

$$f_{ab} = 1 - \left(\frac{\varphi_{lim}}{\varphi_s} \right)^{2/\beta} \quad (1.4)$$

Na Equação (1.4), φ_s é a deformação efetiva da superfície de desgaste e φ_{lim} representa a capacidade de deformação do material desgastado antes que a microfratura ocorra localmente durante o processo abrasivo em um dado tribossistema. Por sua vez, β é um fator que descreve o decaimento da deformação em função do aumento da profundidade medida a partir da superfície e depende principalmente da capacidade de encruamento do material. Assim, o valor do f_{ab} não deve ser considerado somente uma propriedade do material, mas também uma função dos parâmetros de trabalho durante a abrasão, que pode afetar os valores de ambos φ_s e φ_{lim} .

Zum Gahr (1988) definiu a equação da intensidade do desgaste linear (esclerometria - $W_{l/s}$), dada pela Eq. (1.5). Esta equação relaciona H_{def} (dureza do material deformado), P (pressão aplicada na superfície), Φ_1 (fator geométrico que depende da forma da partícula abrasiva) e fator f_{ab} .

$$W_{l/s} = \Phi_1 \cdot f_{ab} \cdot \frac{P}{H_{def}} \quad (1.5)$$

Zum Gahr (1998) realizou experimentos em diversos materiais metálicos e obteve resultados experimentais que fortaleceram as relações previstas na formulação que mede a intensidade do desgaste linear. Desta forma, a partir das Eqs. (1.4) e (1.5), é possível observar que a perda por desgaste abrasivo é significativamente influenciada pela capacidade de deformação do material (ϕ_{lim}), pela capacidade de encruamento (β) e pela dureza do material deformado (H_{def}), além dos parâmetros de trabalho (P , Φ_1 e ϕ_s).

Na literatura estudada sobre o assunto destaca-se o trabalho desenvolvido por Franco e Sinatora (2017). Estes autores tiveram o mérito de reunir, em poucas páginas, a experiência e os resultados alcançados por vários pesquisadores, durante longos anos de trabalho, 1961-2017. Estes incluem os conceitos teóricos relacionados com o fator f_{ab} , bem como algumas das técnicas utilizadas para sua avaliação. Ainda, apresentaram importantes conclusões para o trabalho, quais sejam:

- a) o conceito f_{ab} fornece uma ferramenta interessante para a abordagem teórica de processos abrasivos;
- b) na prática, a aplicação do f_{ab} enfrenta múltiplas dificuldades, tais como: a geometria do sulco pode diferir em grande medida da condição idealizada na base do conceito; diferentes mecanismos de desgaste podem ser observados ao longo de um sulco;
- c) os valores de f_{ab} calculados, a partir de medições realizadas com o equipamento atual de interferometria óptica, não podem ser considerados representativos de um mecanismo de desgaste "prevalente", uma vez que não superam os problemas de medição existentes. A falta de correlação entre valores de f_{ab} e a força aplicada é uma clara indicação dessa situação.

São diversas as fontes de erro que podem contribuir para a baixa repetibilidade dos valores do fator f_{ab} , sendo a maioria delas de primeiríssima importância. Pelo exposto, a

seguir são apresentados a motivação, originalidade, justificativa, objetivos, estado de hipótese e organização da tese de doutorado.

1.1 Motivação

Ao final do trabalho se pretende dispor de procedimentos relacionados à fabricação das amostras, à realização dos riscos e à obtenção do fator f_{ab} mais precisos utilizando a perfilometria mecânica com contato e sistema de medição óptico sem contato.

1.2 Originalidade

Na literatura estudada, existe um consenso sobre a baixa repetibilidade dos valores de f_{ab} , entretanto não foram encontradas soluções para esta problemática, seja por meio do desenvolvimento e adoção de métodos normatizados para a obtenção do f_{ab} , ou adotando protocolos para minimizar os efeitos das diversas fontes de erros relacionadas. Desta forma, o presente trabalho representará resultados teóricos e práticos inéditos.

1.3 Justificativa

O desgaste abrasivo é um fenômeno que leva a perdas econômicas consideráveis, mas de difícil modelagem, em função de seu caráter sistêmico (MELLO, 1989). Atualmente, seu estudo e quantificação podem ser efetuados por meio de avaliação óptica ou mecânica da superfície. Seja qual for o tipo de material testado e o parâmetro estimado (f_{ab} ou $W_{l/s}$), os valores das grandezas que servem de base para o cálculo são determinadas por meio de medições. Sabe-se, ainda, que nos processos de medição utilizando perfilômetros com contato, microscópios ópticos, microscópios de força atômica e interferômetros pode estar presente um conjunto de fatores ou fontes de erros que, em muitas situações práticas, conduzem à invalidação dos resultados de medição e, conseqüentemente, à formulação de conclusões errôneas. Neste sentido, Watson et al. (2019) fizeram uma análise da qualidade dos planejamentos experimentais e da confiabilidade dos resultados obtidos em pesquisas na

área de tribologia, concluindo que, de maneira geral, os trabalhos avaliados se mostraram insuficientes em termos de análises estatísticas e de repetibilidade, ou seja, seus resultados podem ser enquadrados como falso positivos, não retratando de fato a realidade.

Particularmente na obtenção do fator f_{ab} , foi observado que os valores obtidos apresentam baixa repetibilidade (BARRADAS et al., 2001; LINDROOS et al., 2015; FRANCO, 2015; PÖHL et al., 2016 e FRANCO; SINATORA, 2017). Pöhl et al. (2016) calcularam o valor médio de f_{ab} e o desvio padrão considerando cinco medições ao longo de um risco realizado sob valores de força crescentes (3 mN a 603 mN), em amostras de ferro puro monofásico, de AISI 1045 e de AISI 304L lixadas e polidas, visando à avaliação dos micromecanismos dominantes, Fig. 1.3. Os riscos foram realizados por meio de um esclerômetro CSM, módulo NST, utilizando um indentador esfero-cônico de diamante, a uma velocidade de riscamento de 400 $\mu\text{m}/\text{min}$. Para determinação da topografia, foi utilizado um AFM (*Atomic Force Microscopy*) *topography image*, operado em modo de contato com velocidade de varredura de 10-40 $\mu\text{m}/\text{min}$. A avaliação de dados e visualização 3D dos riscos foram realizadas com o *software* Image Plus (versão 2.9). Para determinação do valor do fator f_{ab} , cinco seções transversais foram avaliadas ao longo do comprimento do risco, distantes 10 μm uma da outra.

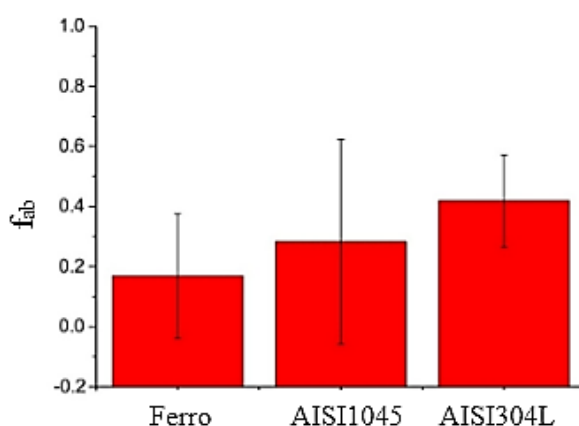


Figura 1.3 – Média e desvio padrão dos valores de f_{ab} (PÖHL et al., 2016).

É possível observar na Fig. 1.3 que, para o ferro puro e para o AISI 1045, o desvio padrão foi significativo quando comparado ao valor médio de f_{ab} o que denota a baixa repetibilidade dos valores de f_{ab} . Consequentemente, a incerteza associada à determinação do f_{ab} será expressiva. Os autores concluíram que para os materiais investigados, o fator f_{ab} se mostrou limitado para descrever os micromecanismos de desgaste. Vale ressaltar que os

autores calcularam a média e o desvio padrão a partir de medições efetuadas ao longo de riscos obtidos com força variável.

A obtenção de valores f_{ab} rastreáveis e com baixa repetibilidade pode contribuir para: aumentar o papel do f_{ab} na melhoria da resistência ao desgaste dos materiais estudados; otimizar as decisões relacionadas à classificação e seleção de materiais, aumentando a vida útil e a eficiência dos equipamentos; e aumentar a qualidade do resultado fornecido pelos modelos de simulação de desgaste baseados no f_{ab} .

1.4 Objetivos do Trabalho

O objetivo geral desta tese de doutorado é avaliar o efeito dos parâmetros de influência (fontes de erros) nos resultados decorrentes dos processos de medição necessários para determinar o f_{ab} na perfilometria mecânica com contato e na medição óptica sem contato, visando aumentar a repetibilidade dos resultados.

Os objetivos específicos são:

-  Levantar as fontes de erros para cada método (perfilometria mecânica com contato e na medição óptica sem contato) de obtenção de perfil transversal de riscos, com o intuito de minimizar os erros de medição.
-  Avaliar a repetibilidade e incerteza dos valores de f_{ab} obtidos por meio de perfilometria mecânica com contato e medição óptica sem contato.
-  Contribuir para a rastreabilidade dos resultados das medições efetuadas.

1.5 Estado de Hipótese

Avaliar a confiabilidade dos valores de fator f_{ab} calculados, em riscos obtidos via esclerometria retilínea, a partir de dois métodos de determinação dos perfis transversais (perfilometria mecânica com contato e medição óptica sem contato), de forma a verificar a compatibilidade entre o valor do fator f_{ab} calculado e o micromecanismo de desgaste atuante no evento.

1.6 Organização do Trabalho

Este trabalho foi dividido em seis capítulos. No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre tribologia, desgaste abrasivo, esclerometria retilínea, perfilometria mecânica com contato, medição óptica sem contato, incerteza de medição, planejamento de experimentos e análise de variância.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia utilizada no trabalho. Esta fase foi dividida em três etapas principais, quais sejam: levantamento das fontes de erros, testes experimentais (preliminares, intermediários e definitivos) e determinação do f_{ab} utilizando medição óptica sem contato.

No quarto capítulo são apresentados os resultados, análises e discussões referentes aos experimentos realizados. O quinto capítulo apresenta as conclusões obtidas e o sexto capítulo as sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são mostrados os documentos classificados como apêndices e anexos.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica sobre tribologia, desgaste abrasivo e esclerometria retilínea. Em seguida são abordadas duas das técnicas utilizadas para medição do perfil transversal dos riscos produzidos (perfilometria mecânica com contato e medição óptica sem contato). Posteriormente versa-se sobre incerteza de medição, planejamento de experimentos e análise de variância.

2.1 Tribologia

O termo grego “tribo” significa esfregar, atritar e “logos” significa estudo, ciência. De acordo com Jost (1990), tribologia é a ciência e tecnologia de superfícies que interagem em movimento relativo e de práticas relacionadas. A matéria abrange desgaste, atrito e lubrificação, sendo caracterizada por sua multidisciplinaridade, de forma a envolver as mais diversas áreas do conhecimento, tais como: física, química, matemática, ciência dos materiais, engenharia, medicina e odontologia. Possui um forte caráter sistêmico, pois se desenvolve através de vários parâmetros ou fatores que definem um sistema ou tribossistema.

É comum, em grande parte das interfaces tecnológicas, a ocorrência de contato entre superfícies, fazendo com que os estudos em tribologia ganhem cada vez mais reconhecimento e valorização. Desta forma, seus fundamentos estão diretamente associados ao setor econômico. Segundo Tylczak (1992), estima-se que o custo envolvido com as perdas devido ao desgaste abrasivo em nações industrializadas, atinja de 1 a 4 % do produto interno bruto destes países. A preservação ambiental também se encontra associada à tribologia e ao desgaste abrasivo, visto que, para a fabricação de peças de reposição, são necessários vários

processos que interferem diretamente no meio ambiente, desde a mineração até a sua distribuição, impactando inclusive no aumento do consumo de combustíveis fósseis e emissões de poluentes.

2.2 Desgaste abrasivo

A norma ASTM G40-2015 (ASTM, 2015) define desgaste abrasivo como a perda ou deslocamento de massa resultante da interação entre partículas ou asperezas duras que são forçadas contra uma superfície, ao longo da qual se movimentam. Por ser um dos principais responsáveis pela degradação de peças, representa um problema comum nas indústrias de mineração, cana de açúcar, laminação, agrícola, etc. No entanto, apresenta-se também como solução para determinados processos de fabricação, como por exemplo, na usinagem de materiais. Para Zum Gahr (1981), a resistência à abrasão não é propriedade intrínseca do material, mas sim do sistema tribológico imposto. O processo de desgaste abrasivo pode ser considerado complexo, devido aos diversos parâmetros tribológicos presentes, Fig. 2.1.

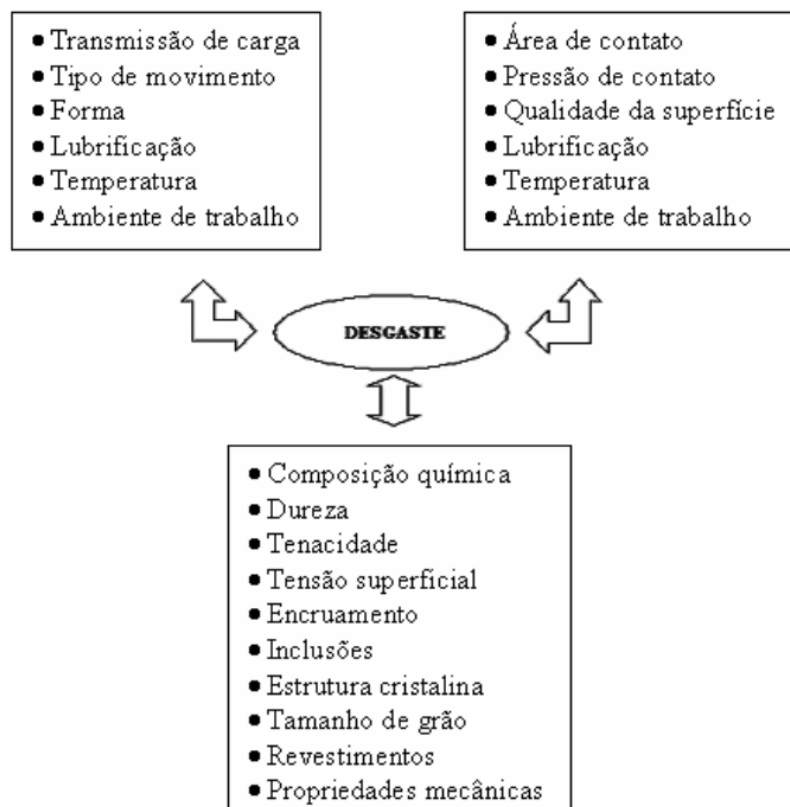


Figura 2.1 – Parâmetros tribológicos que interferem no desgaste (MELLO, 1994 apud KÖNIG, 2007).

De acordo com Burwell (1957), o desgaste abrasivo pode ser classificado de duas formas principais: abrasão a dois corpos (Fig. 2.2a) e abrasão a três corpos (Fig. 2.2b). Neste contexto, a amostra é considerado o primeiro corpo, o contra-corpo o segundo e o abrasivo o terceiro. Ocorre desgaste a dois corpos quando existem asperidades duras, ou partículas abrasivas rigidamente fixadas no contra-corpo que geram sulcos/riscos sobre a superfície da amostra durante o movimento. No desgaste a três corpos as partículas abrasivas se encontram livres, permitindo assim o rolamento e/ou deslizamento com a amostra e o contra-corpo.

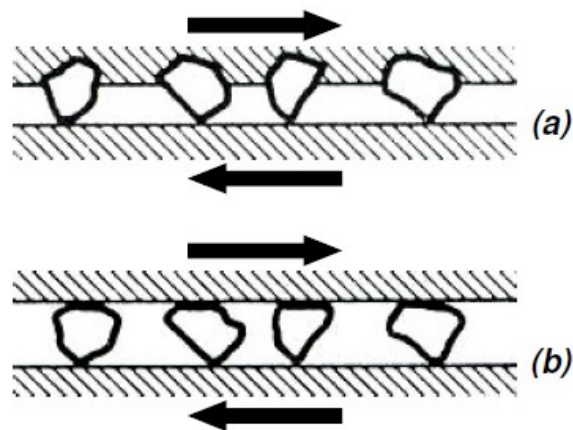


Figura 2.2 – a) Desgaste abrasivo por riscamento (abrasivo fixo); b) Desgaste abrasivo por rolamento (abrasivo livre) (HUTCHINGS, 1992).

Em relação aos mecanismos de desgaste, estes podem ser classificados em microsulcamento, microcorte, microfadiga e microtrincamento, conforme mostra a Fig. 2.3.

De acordo com Mulhearn, Samuels (1962); Sedriks, Mulhearn (1963) e Zum Gahr (1987), no microsulcamento (Fig. 2.3a) o material é deformado plasticamente para as laterais do sulco, formando saliências. Neste caso ocorre atuação de uma partícula. A microfadiga representa o microsulcamento com interação de sulcos (Fig. 2.3c). Por sua vez, no microcorte (Fig. 2.3b) ocorre perda de massa devido à ação do abrasivo. Se as condições favorecem o microcorte puro, o volume de material perdido é igual ao volume do risco produzido (MULHEARN, SAMUELS, 1962; SEDRIKS, MULHEARN, 1963; ZUM GAHR, 1987). O microtrincamento (Fig. 2.3d) acontece quando as tensões aplicadas nas superfícies de materiais, com resposta frágil, causa destacamento de fragmentos maiores que a dimensão do próprio evento, devido à formação e propagação de trincas neste processo. Esse mecanismo é típico de condições frágeis de desgaste (MULHEARN, SAMUELS, 1962; SEDRIKS, MULHEARN, 1963; ZUM GAHR, 1987).

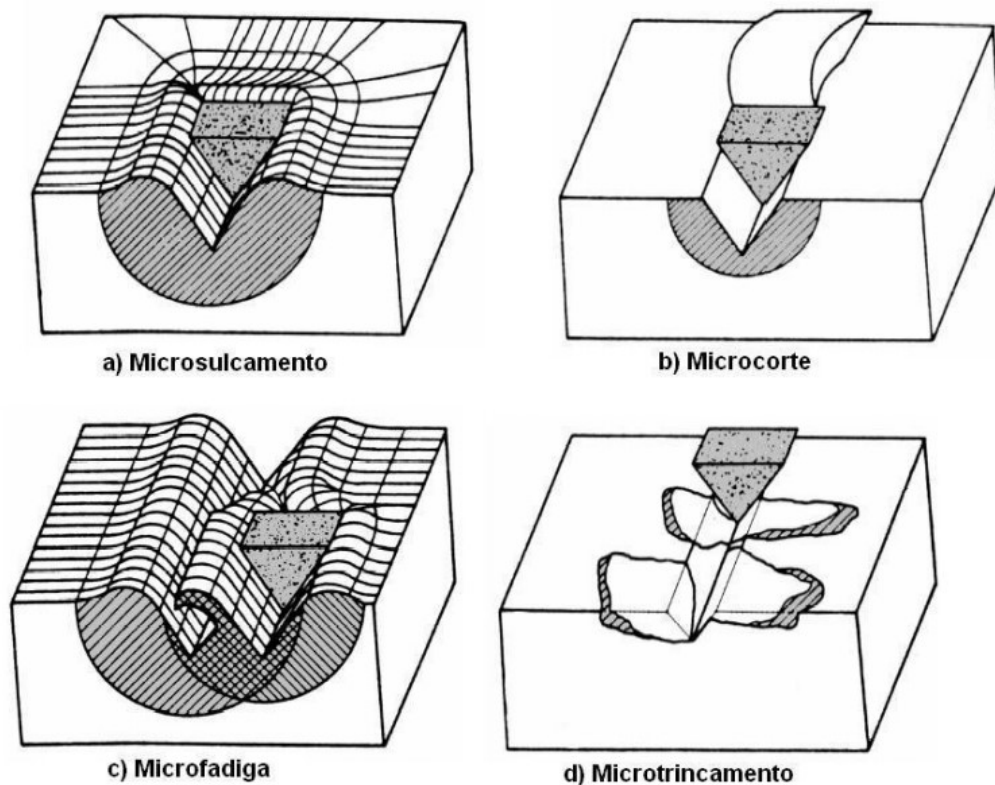


Figura 2.3 – Representação esquemática dos micromecanismos de desgaste (ZUM GAHR, 1987).

2.3 Esclerometria retilínea

A técnica de esclerometria retilínea consiste na aplicação de uma força normal sobre um penetrador, que se movimenta ao longo da superfície a ser riscada. Diversas variáveis podem ser controladas durante o processo de riscamento, tais como: intensidade da força, profundidade de penetração, velocidade de riscamento, tipo, geometria e dimensões do abrasivo, ângulo do penetrador e microestrutura do material avaliado (WILLIAMS, 1996). A definição da geometria do abrasivo é essencial no planejamento do experimento para a simulação de partículas abrasivas. Em diversas situações práticas este abrasivo pode ser um penetrador com geometria e dimensões previamente definidas.

De acordo com Buttery e Archard (1970), além da esclerometria retilínea, existem outros métodos esclerométricos, podendo-se destacar o tipo rotativo ou circular e o pendular. A esclerometria rotativa ou circular consiste na fixação normal do penetrador em um disco, o

qual sob rotação produzirá sucessivos riscos na superfície da amostra em altas velocidades de riscamento. Este método é comumente utilizado em estudos de usinagem por abrasão, como retificação e brunimento. A pendular utiliza-se de um identador fixado à extremidade de um pêndulo rígido, que ao movimentar-se, penetra sobre o material da amostra gerando um risco na forma de meia lua. Este método é empregado para a determinação da energia de deformação em condições de abrasão em situações dinâmicas e onde a remoção de material se dá com elevadas taxas de deformação.

O ensaio de esclerometria retilínea auxilia no entendimento de aspectos relacionados ao processo de desgaste abrasivo, contribuindo na pesquisa de tecnologias para controle e minimização das perdas no campo prático, como por exemplo a reposição precoce de componentes mecânicos, bem como a diminuição na eficiência de máquinas e equipamentos. Para tanto, várias técnicas de análise são utilizadas, sendo que a instrumentação é peça fundamental para todas elas. Dentre estas tecnologias podem ser citadas: microscopia, perfilometria, interferometria e corte na seção transversal. Nestas técnicas, a realização de medições para obtenção dos valores numéricos para determinação de parâmetros tais como: fator f_{ab} e coeficiente de atrito aparente, contribui diretamente para a elucidação dos mecanismos de desgaste. Assim sendo, a confiabilidade dos resultados dessas medições deve ser alcançada, para uma correta interpretação dos resultados e eficaz aplicação das pesquisas desenvolvidas.

Zum Gahr (1981) cita que o ensaio de esclerometria retilínea permite a compreensão de alguns fatores que se relacionam ao desgaste abrasivo quais sejam: identificação morfológica da deformação nas proximidades do penetrador; identificação dos efeitos de geometria do penetrador; determinação da dureza de resistência ao risco do material e do coeficiente de atrito aparente; caracterização dos esforços que atuam nas diferentes fases que constituem o material e percepção da diferenciação entre abrasão frágil e dúctil. A Figura 2.4 mostra riscos obtidos em ensaios de esclerometria retilínea.

Ferreira (2010) destacou que, de modo geral, a variação da velocidade de riscamento, para uma força normal constante, praticamente não interferiu nos valores de coeficiente de atrito aparente do aço ABNT 8550 beneficiado. O objetivo do trabalho desenvolvido por Ferreira era entender o comportamento de desgaste dos rotores usados nos sistemas de bombeamento multifásicos a gás e óleo. Esses rotores são submetidos a desgaste erosivo e abrasivo.

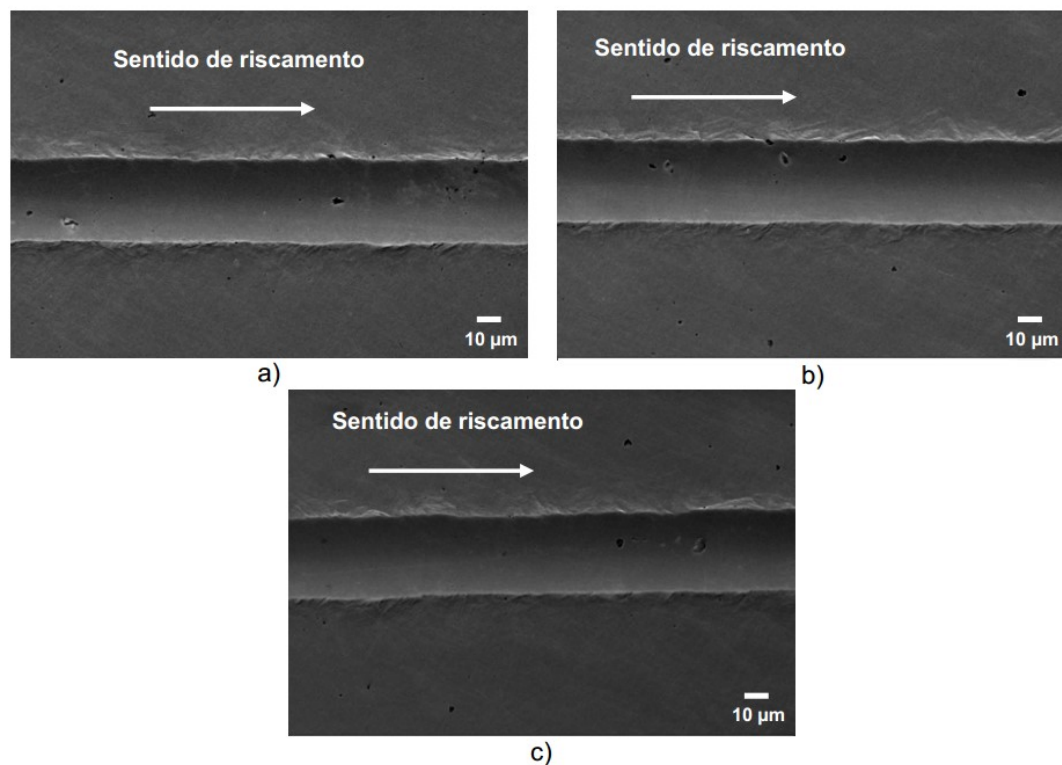


Figura 2.4 – Detalhe dos sulcos formados utilizando penetrador Rockwell-C de raio de ponta de 100 μm e força normal de riscamento de 2 N em diferentes velocidades de riscamento para o aço ABNT 8550 beneficiado, a) velocidade de riscamento de 10 $\mu\text{m/s}$, b) velocidade de riscamento de 100 $\mu\text{m/s}$ e c) velocidade de riscamento de 1000 $\mu\text{m/s}$ (FERREIRA, 2010).

Como toda técnica que se propõe um objetivo, a esclerometria retilínea apresenta limitações, as quais têm sido comentadas na literatura. Masen et al. (2005) observaram a formação de cavacos nas laterais do risco que não se cisalharam completamente e consequentemente não foram removidos (Fig. 2.5), levando a uma subestimação do valor do grau de desgaste calculado. A esse evento foi dado o nome de falso ombro.

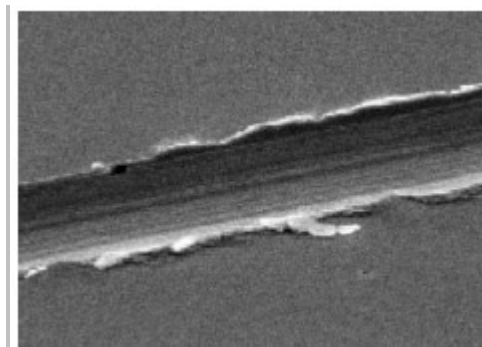


Figura 2.5 – Presença de cavacos ao lado do risco (MASEN et al., 2005).

Franco; Sinatora (2017) detalharam um perfil transversal típico de um risco com a presença de falso ombro (Fig. 2.6), conforme apontado por Masen et al. (2005), citando que a análise utilizando o MEV, pode levar à interpretação de que o ombro seja inteiramente constituído de material, porém em muitos casos pode ser um cavaco que ainda não se destacou.



Figura 2.6 – Perfil de um risco com a formação de cavaco à esquerda (FRANCO; SINATORA, 2017).

Outra fonte de erro que pode estar associada à análise das áreas do perfil transversal de um risco é a citada por Johnson (1970) apud Franco; Sinatora (2017). Parte do material considerado como arrancado pode não ser realmente removido do sólido, existindo a possibilidade de que parte do material próximo ao indentador seja comprimido plasticamente e forçado para baixo em direção ao interior do material, que se expandirá elasticamente para acomodá-lo.

Kobrick et al. (2011) destacaram a importância da correta definição da linha de referência, muito importante na determinação das áreas correspondentes ao material removido pela ação do indentador, bem como nas áreas de material deformado para as laterais do sulco, conforme indicada na Fig. 2.7. Estes autores utilizaram a medição do parâmetro de rugosidade Ra em uma posição distante do risco, definindo a linha média usada neste procedimento como a linha de referência (linha zero para o cálculo das áreas), padronizando desta forma o processo e retirando a possibilidade do operador escolher aleatoriamente este posicionamento.

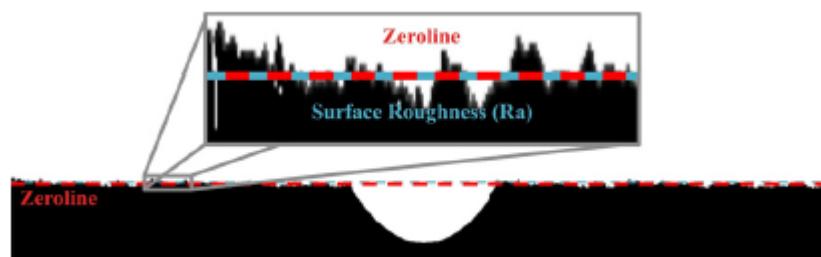


Figura 2.7 – Indicação da localização da linha de referência em um típico perfil transversal de um risco (KOBICK et al., 2011).

Franco (2015) destacou outra limitação no cálculo das áreas de interesse para a determinação do fator f_{ab} , que está relacionada com a definição do ponto de transição entre a área deformada pelo indentador e a superfície original. Neste trabalho em particular o ponto de transição foi definido pelo operador utilizando linhas verticais conforme mostrado na Fig. 2.8.

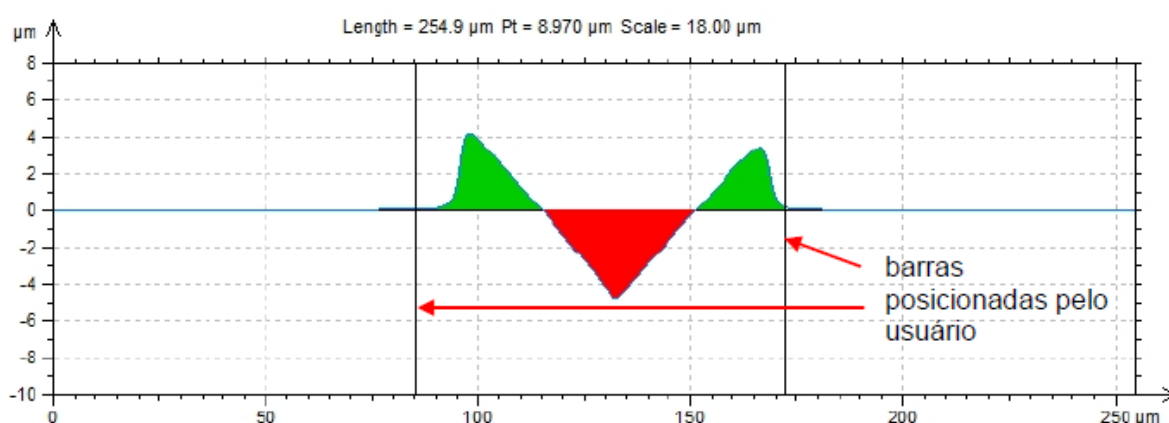


Figura 2.8 – Detalhe quanto ao posicionamento, pelo usuário, das barras verticais que definem o ponto de transição para o cálculo das áreas de interesse na seção transversal de um risco (FRANCO, 2015).

Das constatações de Kobrick et al. (2011) e Franco (2015) se conclui que, apesar dos sistemas de medição utilizados para determinação das áreas necessárias para o cálculo do f_{ab} serem modernos e sofisticados, podem haver fontes de erro relacionada ao operador. Desta forma, dificilmente, operadores diferentes reproduzirão os resultados da medição. A qualificação do operador é uma prática essencial para reduzir os erros a eles relacionados, bem como a definição e adoção de protocolos visando a realização de determinadas tarefas de forma automática sem a interferência deste.

Jacobson et al. (1988) ao descreverem os fundamentos da deformação e desgaste dos materiais em ensaios esclerométricos, mencionaram que a determinação do f_{ab} por meio da medição de uma única seção transversal do risco, não é representativo da abrasão real atuante em todo o evento formado.

Barradas et al. (2001) apresentaram uma metodologia que permitiu a determinação espacial do fator f_{ab} , a partir da caracterização topográfica 3D de riscos produzidos por ensaio esclerométrico. Utilizou-se interferometria a laser para determinar a topografia dos riscos

produzidos, juntamente com o emprego de rotinas computacionais dedicadas, permitindo assim a discretização da superfície e o cálculo do fator f_{ab} nas diferentes seções dos riscos avaliados. Os autores destacaram que a visualização gráfica do fator f_{ab} ao longo dos riscos avaliados, permitiu uma melhor compreensão dos mecanismos atuantes durante o processo de riscamento. Concluíram que a análise topográfica tridimensional mostrou-se uma ferramenta bastante eficiente para auxiliar na avaliação do fator f_{ab} de riscos produzidos por ensaios esclerométricos, além de permitir identificar, em materiais polifásicos contendo fases de comportamento bastante distintos, a presença de diferentes micromecanismos de desgaste ao longo de um mesmo risco.

A Figura 2.9 mostra uma imagem em 3D do risco produzido na amostra de ferro fundido branco. Este tipo de imagem possui elevado poder de diagnóstico, permitindo identificar a geometria do risco e as imperfeições presentes nas paredes do mesmo. Ainda, possibilita perceber a ocorrência ou não de deformação plástica nas laterais do risco e propicia uma prévia análise do mecanismo de desgaste atuante no evento.

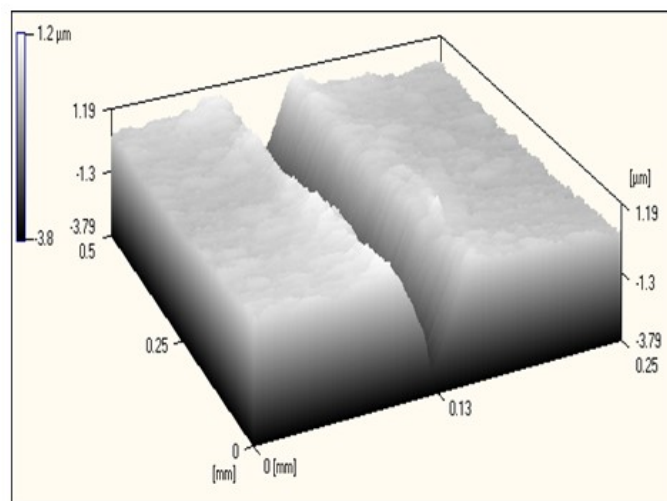


Figura 2.9 – Imagem tridimensional obtida a partir de risco produzido para amostra de ferro fundido branco (BARRADAS et al., 2001).

Os riscos foram realizados a uma velocidade de riscamento de 0,1 mm/s e penetração constante, com profundidade de 2 μm e direção perpendicular às marcas deixadas pelo lixamento das amostras. Para a medição topográfica da superfície foi utilizado um interferômetro a laser UBM MESSTECHNIK GmbH modelo Microfocus Expert, com velocidade de varredura de 0,3 mm/s e distância entre medições na direção da largura dos riscos de 1 μm . Os dados obtidos foram convertidos em código ASCII para que pudessem ser

avaliados utilizando o Matlab®. Na Figura 2.10 são mostrados os gráficos com os valores do fator f_{ab} obtidos por Barradas et al., (2001) ao longo dos riscos realizados, nas amostras de alumínio e de ferro fundido branco hipoeutético.

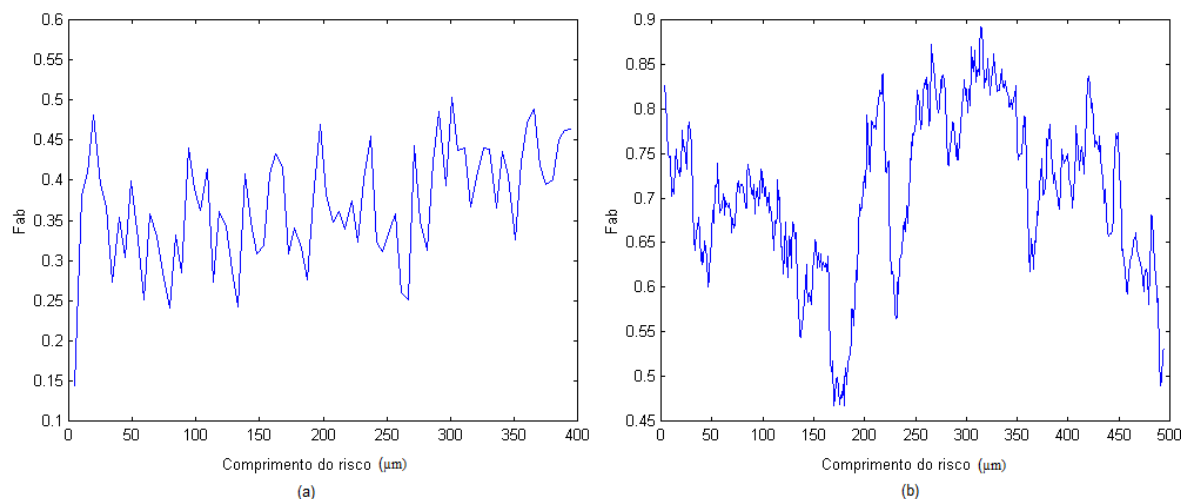


Figura 2.10 – Valores do fator f_{ab} obtidos ao longo do comprimento do risco, para amostra de alumínio (a) e ferro fundido branco hipoeutético (b) (BARRADAS et al., 2001).

Barradas et al., (2001) observaram que os valores do fator f_{ab} variaram consideravelmente ao longo dos riscos efetuados para ambos os materiais analisados. Em relação à amostra de alumínio observaram uma amplitude dos valores de f_{ab} de aproximadamente 0,35 e, para o ferro fundido hipoeutético, esta foi da ordem de 0,42, o que deve estar associado à presença de carbonetos duros no material.

Franco (2015) desenvolveu um estudo visando obter maior entendimento dos mecanismos de desgaste relacionados com o sulcamento observado no par camisa/bloco em motores automotivos e identificar conjuntos de testes laboratoriais capazes de reproduzi-los sob condições controladas. Para tanto foram realizados seis riscos em cada condição avaliada, em tribômetros dotados de indetandor cônico aplicando forças verticais constantes na faixa de 20 mN a 200 mN. As amostras de ferro fundido cinzento e de aço AISI 1070 possuíam acabamentos retificados e polidos. As medições topográficas foram realizadas com perfilômetro óptico 3D CCI-MP, do fabricante Taylor Hobson. A partir das medições realizadas foi obtido o perfil transversal médio do risco, do qual eram retiradas as geometrias e áreas necessárias para o cálculo do fator f_{ab} . Ao analisar a abrasão do ferro fundido cinzento, utilizado nos motores, o autor observou que os valores de f_{ab} obtidos por perfilometria óptica apresentaram dispersão elevada, não sendo possível associá-los aos diferentes mecanismos de

abrasão observados. Na Figura 2.11 é mostrado o modo como era obtido o perfil médio do risco.

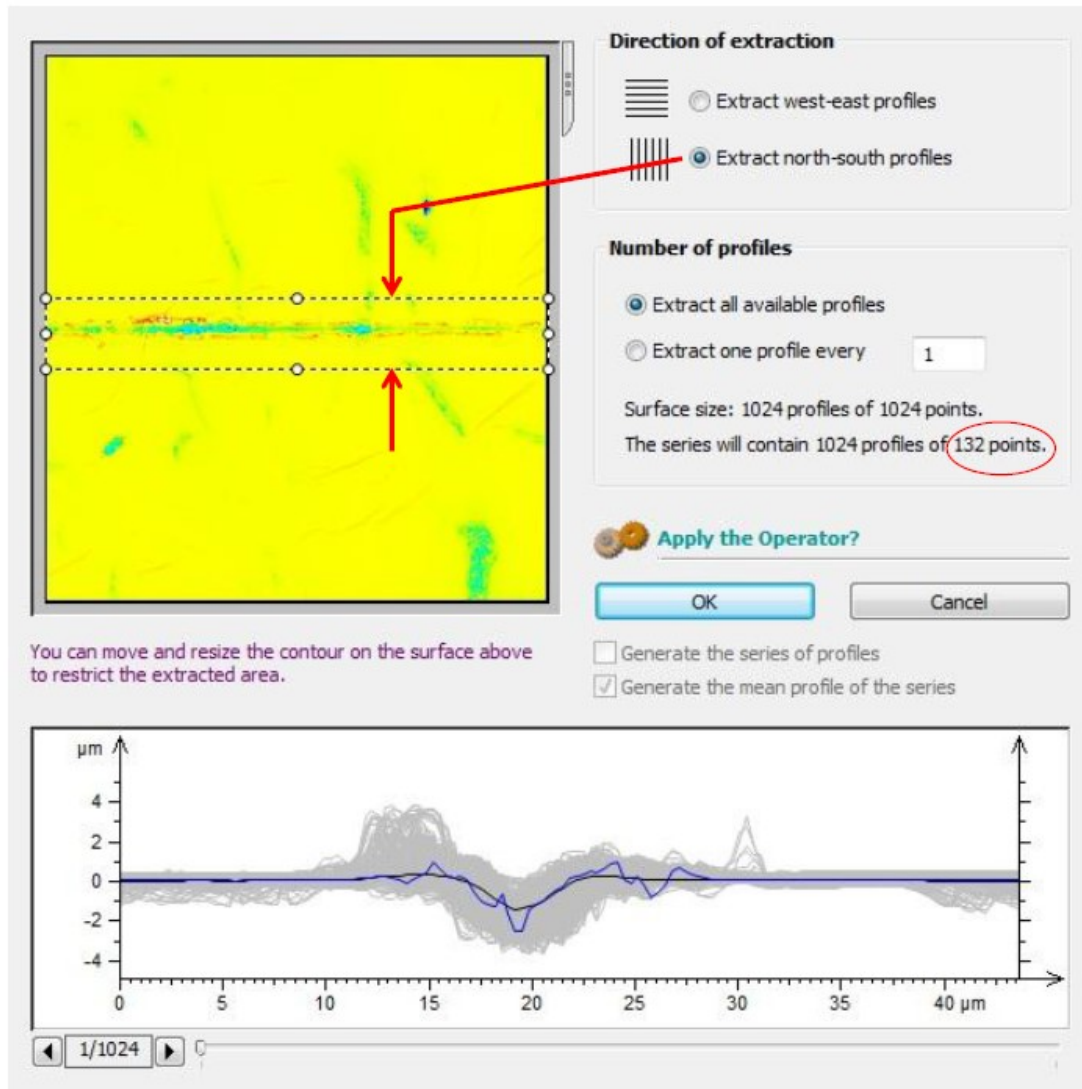


Figura 2.11 – Tela oferecida ao usuário para determinação do perfil médio (FRANCO, 2015).

Foi citado pelo autor, que todos os perfis médios foram sempre obtidos a partir de mais de 1000 perfis individuais. Visando ter uma avaliação básica do que está envolvido estatisticamente no processo de determinação do perfil médio, realizou, em dois casos, uma comparação dos valores geométricos extraídos tendo como base o perfil médio e a média obtida a partir de 10 perfis individuais distribuídos ao longo do risco. Nos dois casos tratava-se de riscos esclerométricos realizados a seco, com força de 8 N, sobre dois materiais (ferro fundido cinzento e aço AISI 1070 - 200 HV₃₀). Os resultados obtidos estão mostrados na Tab. 2.1.

Tabela 2.1 – Comparação entre valores obtidos por média de 10 perfis individuais e valores fornecidos pelo CCI-MP (perfil médio). Adaptado de FRANCO (2015).

Parâmetro	FoFo		Aço AISI 1070 200 HV ₃₀	
	10 perfis	CCI-MP (perfil médio)	10 perfis	CCI-MP (perfil médio)
Área do sulco (μm^2)	720 ± 70	704	375 ± 8	268
Área de material acima da linha de referência (μm^2)	200 ± 30	181	340 ± 30	287
Fator de remoção de material f_{ab}		0,74	$0,1 \pm 0,1$	-0,07

Franco (2015) concluiu que, quanto aos valores de áreas, houve discrepâncias importantes entre as duas apurações, mostrando a baixa repetibilidade dos resultados obtidos e, conseqüentemente, dos valores do f_{ab} .

Franco; Sinatora (2017) concluíram que em relação aos materiais e as condições de testes utilizados, não foi possível obter valores de f_{ab} que pudessem ser inequivocamente associados aos mecanismos de abrasão citados na literatura, sendo que, valores de f_{ab} superiores a 0,5 foram obtidos em testes com força de 20 mN, quando o esperado seria que o microsulcamento prevalecesse. Por outro lado, riscos feitos sob uma força de 200 mN, com evidências de microcorte, resultaram em valores de f_{ab} menores que 0,5, correspondendo desta forma a predominância de microsulcamento. Os materiais e métodos utilizados no trabalho foram semelhantes aos utilizados por Franco (2015). A Figura 2.12 mostra os resultados obtidos pelos autores.

Observa-se na Fig. 2.12, que o desvio padrão associado aos valores médios do fator f_{ab} foi significativo em várias das condições ensaiadas. Franco; Sinatora (2017) concluíram que é possível determinar um valor médio de f_{ab} , a partir da análise das várias seções transversais obtidas de um risco, desde que se utilize uma sólida base estatística. Os autores sugeriram a utilização de seção metalográfica cônica ou microscopia com feixe de íon focalizado como método de aquisição de perfis transversais, porém não propuseram um modelo estatístico a ser seguido.

Importante constatação obtida por Pöhl et al. (2016), foi a ocorrência de movimentação de material no sentido longitudinal ao risco nas amostras de ferro puro, o que alterou o volume de material deformado nas laterais do risco em uma determinada seção transversal (com a importação e/ou exportação de material para outras seções devido à força exercida durante o processo de riscamento), conforme mostrado na Fig. 2.13.

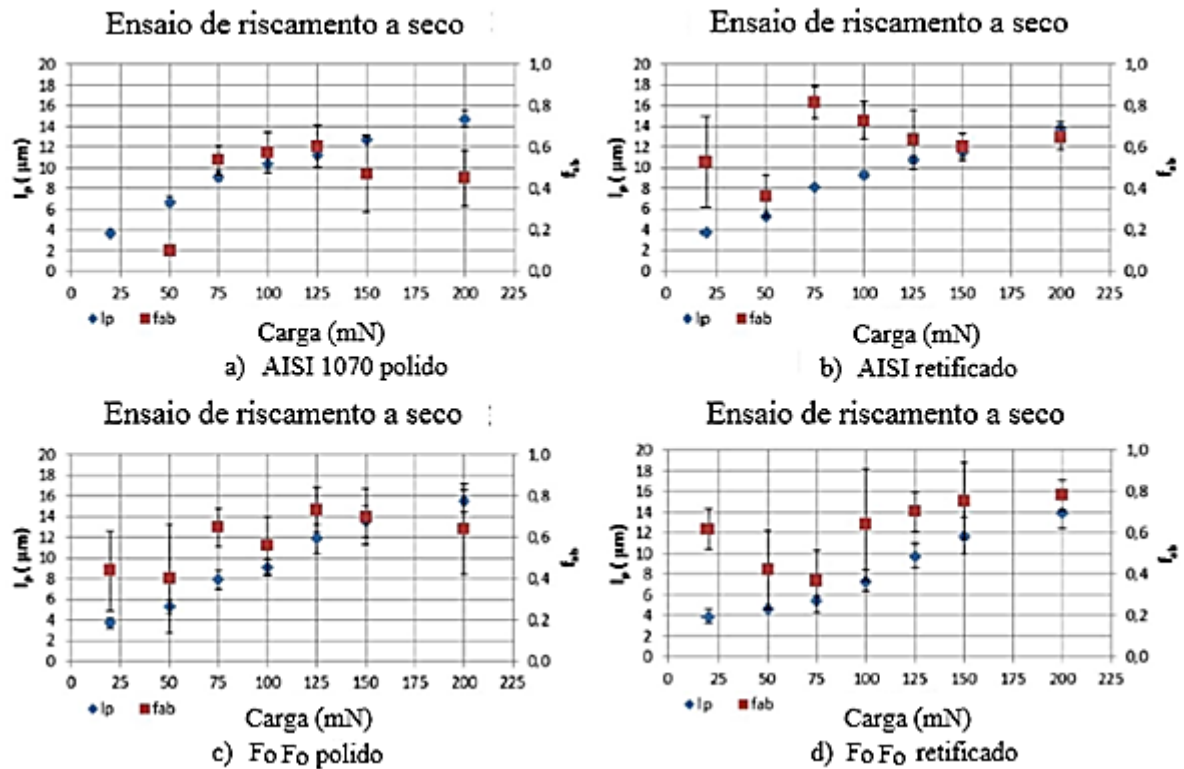


Figura 2.12 – Variação da largura do risco e fator f_{ab} com a força aplicada (FRANCO; SINATORA, 2017).

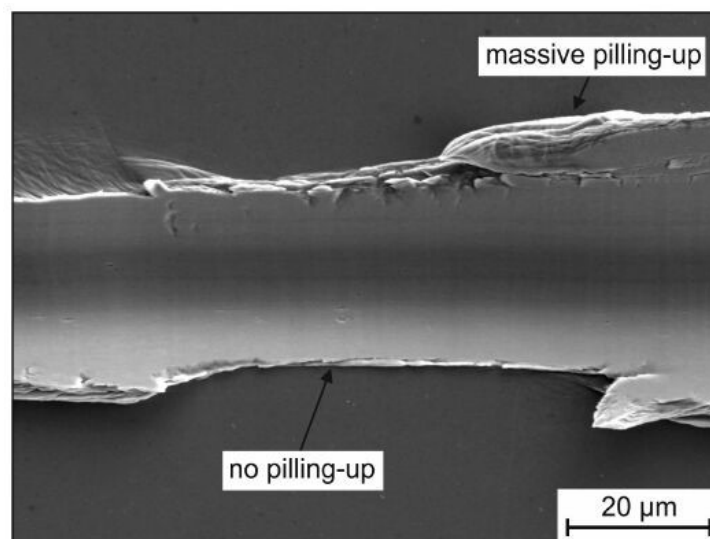


Figura 2.13 – Imagem de um risco em ferro puro, que mostra uma região sem material acumulado nas laterais do sulco, seguida de uma região com enorme acumulação (PÖHL et al., 2016).

Pöhl et al. (2016) verificaram também que a baixa repetibilidade associada aos valores de f_{ab} calculados para os riscos no aço AISI 1045 foi causada pela microestrutura de duas fases do material, sendo que a tendência de acumulação no aço analisado é menor do que a observada no ferro puro. Entretanto, analisando as condições nas quais os testes foram conduzidos por Pöhl et al. (2016) se observou que a força foi variada ao longo do risco, desta forma as condições de repetibilidade foram alteradas e, portanto, os resultados obtidos misturaram dados decorrentes de condições experimentais diferentes.

Lindroos et al. (2015) efetuaram riscos esclerométricos em cobre puro e com microestrutura uniforme, além de aços de alta resistência, utilizando tribômetro, indentador Rockwell-C e quatro forças diferentes (20 N, 40 N, 60 N e 80 N). Determinaram os respectivos valores de fator f_{ab} , o qual foi denotado por “ ϕ ”, utilizando perfilômetro ótico 3D Wyko NT-1100 para obtenção das imagens dos riscos gerados e Matlab® para análises e cálculos das geometrias de interesse. Os resultados obtidos são mostrados na Fig. 2.14. Nota-se para o cobre que, quanto menor a força aplicada durante o ensaio de riscamento, maior foi a dispersão dos valores de f_{ab} calculados, sendo que, para a força de 20 N, esta dispersão (da ordem de 0,2) foi a maior observada entre todos os materiais avaliados. Conforme citado por Franco; Sinatora (2017), pode-se pensar que ensaios esclerométricos em materiais puros e com uniforme microestrutura produziram sulcos próximo ao modelo teórico, e como resultado uma dispersão limitada para o fator f_{ab} , porém não foi o que mostrou esse resultado obtido com o cobre.

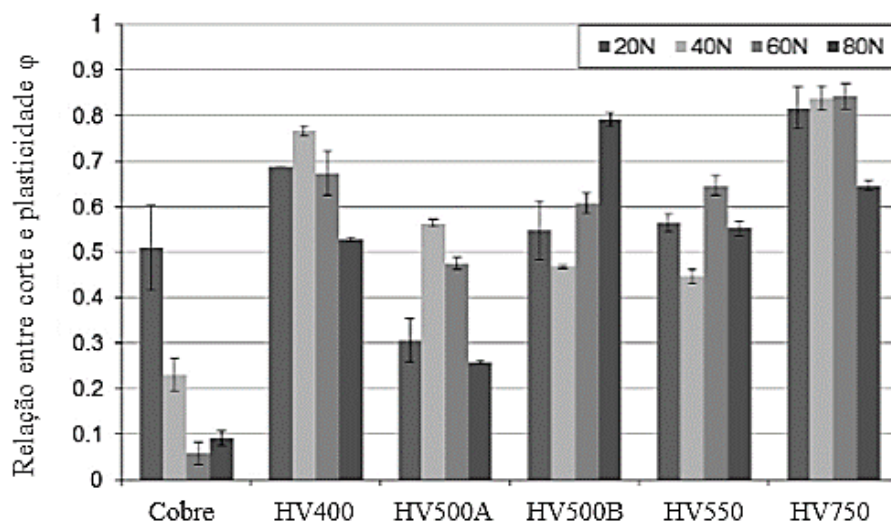


Figura 2.14 – Materiais testados e o fator f_{ab} denominado com o símbolo “ ϕ ” calculado (LINDROOS et al., 2015).

Jardret et al. (1998) efetuaram um estudo visando compreender a deformação elástica e plástica durante o ensaio de riscamento para uma ampla gama de materiais, desde polímeros até metais (elastômero termoplástico de poliéster “hytrel”, termoplástico “debrin”, latão, alumínio e aço). Para a realização dos riscos foi utilizado um indentador Berkovich e profundidade de penetração crescente. O relevo tridimensional da superfície riscada foi obtido utilizando um perfilômetro convencional Surfscan 3D – Somicronic, juntamente com o *software* Toposurf 3D. Os autores reconheceram a ocorrência de diversos tipos de deformações, inclusive a deformação elástica sob o indentador. Indicaram também que este tipo de deformação é maior nos polímeros do que nos metais.

Zanatta (2007) com o objetivo de validar o método de medição do volume desgastado em ensaios pino contra disco, obtidos com perfilômetro mecânico, realizou também a medição em algumas amostras utilizando interferometria óptica a laser 3D e observou que os resultados foram muito semelhantes, concluindo que os dois métodos utilizados para determinar o volume desgastado forneceram resultados equivalentes. O autor não forneceu maiores detalhes sobre a comparação realizada.

Pode-se observar que, independente da técnica utilizada, são diversos os fatores que podem afetar os valores de f_{ab} . Muitos destes fatores são de difícil quantificação e, portanto, o estudo e a avaliação dos mesmos se tornam impraticáveis. Sabe-se que o efeito de alguns fatores pode ser reduzido ou até mesmo eliminado adotando protocolos para preparação das amostras, para realização dos riscos e para os procedimentos de medições. Vale ressaltar que para grandezas cujo desvio padrão experimental é significativo em relação à média aritmética, as condições de repetibilidade devem ser garantidas.

2.4 Procedimentos para determinação do perfil transversal de um risco

Para que seja possível a quantificação dos valores das áreas, ilustradas na Fig. 1.2 (A_v , A_1 e A_2), por meio de cálculos matemáticos, deve-se inicialmente obter o perfil transversal do risco. A perfilometria é uma técnica aplicada para levantamento de superfícies e amplamente utilizada na análise de desgaste de materiais, bem como na determinação do perfil de riscos produzidos em ensaios esclerométricos. Esta técnica foi utilizada em diversos trabalhos (BARRADAS et al., 2001; MANCOSU, 2005; ZANATTA, 2007; SILVA JUNIOR, 2008; FERREIRA, 2010; TELES, 2014; FRANCO, 2015; e FRANCO; SINATORA, 2017) e

divide-se basicamente em dois métodos: perfilometria mecânica com contato e perfilometria óptica sem contato.

2.4.1 Perfilometria mecânica com contato. Definição e principais fontes de erros

Na perfilometria mecânica com contato um apalpador percorre a superfície em uma determinada direção, proporcionando o contato físico com a amostra avaliada. Neste método, as irregularidades são detectadas por meio do deslocamento vertical do apalpador, sendo captadas e convertidas em sinais elétricos pelo transdutor, com posterior amplificação e visualização. Na Figura 2.15 é mostrado o princípio básico de funcionamento da perfilometria com contato.

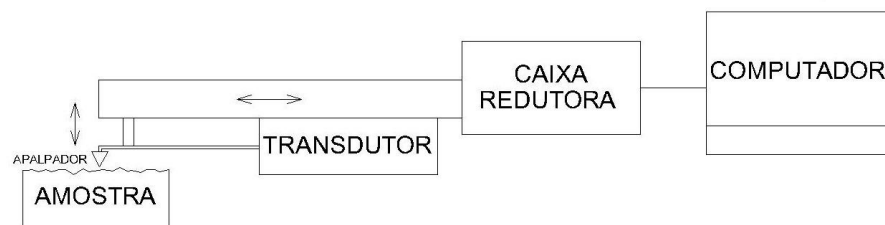


Figura 2.15 – Representação esquemática da medição topográfica da superfície utilizando perfilometria com contato (adaptado de HUTCHINGS, 1992).

A ponta dos apalpadores dos perfilômetros é geralmente fabricada em materiais duros (como o diamante sintético). De acordo com Freitas (2006), os apalpadores podem ser cônicos com pontas esféricas ou tronco-piramidais, sendo que os apalpadores cônicos possuem um ângulo de cone de 60° ou 90°, com raio da ponta menor que 10 μm (geralmente de 2 μm) e os apalpadores tronco-piramidais têm uma largura típica no topo de 2 μm .

Na perfilometria com contato, a determinação das áreas de interesse para o cálculo do fator f_{ab} pode ser afetada pelas dimensões da ponta do apalpador, uma vez que é impossível obter-se o perfil real da seção transversal do risco produzido, pois o raio de curvatura dos picos pode ser aumentado e os vales podem não ser detectados (POON; BHUSHAN, 1995). Por menor que seja o raio da ponta do apalpador, a mesma não pode reconhecer de forma completa as irregularidades da superfície que forem menores do que o seu diâmetro. Sendo assim, sempre ocorre uma distorção entre o perfil real e o efetivo, conforme pode ser visualizado na Fig. 2.16.

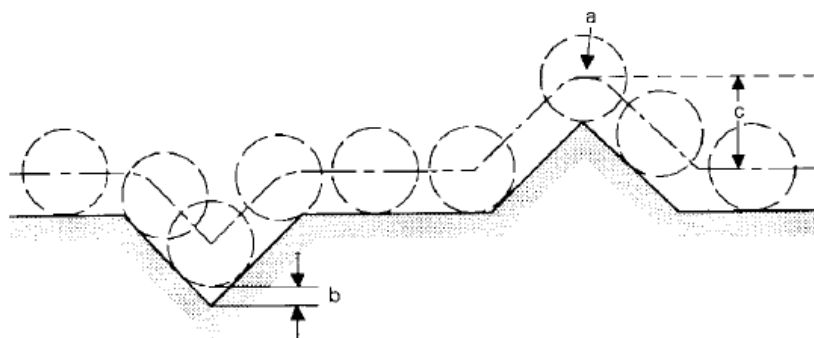


Figura 2.16 – Efeitos provocados pela geometria da ponta do apalpador no perfil medido (LEACH, 2014).

Yoshida e Tsukada (2006) destacaram que as pontas dos apalpadores atuam como filtros mecânicos, o que faz com que os perfis de rugosidade efetivos apresentem distorções em relação aos perfis reais. Uma contribuição importante sobre o efeito da dimensão da ponta do apalpador nos valores dos parâmetros de rugosidade (Ra , Rt e Rv) foi dada por Lee e Cho (2012). Estes autores efetuaram uma análise teórica de perfis de superfícies bidimensionais e observaram que o parâmetro Rt foi o mais afetado pelo aumento do raio da ponta, enquanto que o parâmetro Ra foi o menos afetado. Eles concluíram também que, em superfícies mais rugosas, as pontas com raios entre 10 μm e 25 μm poderiam ser utilizadas para a obtenção de resultados satisfatórios.

Motta Neto et al. (2018) avaliaram o efeito do raio da ponta do apalpador (2 e 5 μm) nos valores dos parâmetros de rugosidade Ra , Rq , Rp , Rv e Rt obtidos com um rugosímetro eletromecânico. A rugosidade foi medida em amostras de alumínio comercial, aço carbono SAE 1020 e ferro fundido cinzento submetidas aos processos de fresamento e torneamento. Para a fabricação das amostras, as condições de corte foram alteradas, sendo que o avanço assumiu valores de 0,1 e 0,2 mm/rotação enquanto que a profundidade de corte foi de 0,5 e 1,0 mm. Os autores concluíram que a utilização de raios de ponta diferentes provocou alterações estatisticamente significativas nos valores dos parâmetros Ra , Rq , Rp , Rv e Rt em 46 % das condições avaliadas. Ainda, as diferenças observadas entre os valores médios dos parâmetros Ra , Rq , Rp , Rv e Rt obtidos utilizando as pontas de 2 e 5 μm foram menores que a incerteza expandida associada em 82 % dos casos, considerando um nível de confiança de 95 %.

Souza et al. (2019) avaliaram o efeito do raio da ponta de 2 e 5 μm nos valores de rugosidade em superfícies submetidas aos processos de fresamento frontal, mandrilamento e brunimento convencional. Os parâmetros Rp , Rv , Rz , Rt , Ra , Rq , $R\Delta q$ foram avaliados para as superfícies fresadas e mandriladas, enquanto os parâmetros da família Rk (Rk , Rpk e Rvk) foram

avaliados para as superfícies brunidas. O aumento do raio da ponta do apalpador de 2 para 5 μm provocou efeitos estatisticamente significativos no parâmetro híbrido $R\Delta q$ para um nível de confiança de 95 %. Para o parâmetro R_v , o p -valor obtido foi ligeiramente maior que 0,05, indicando que se uma confiabilidade menor for utilizada a ANOVA resultará em efeitos estatisticamente significativos para este parâmetro.

A força exercida pelo conjunto mecânico durante a medição, a qual é resultante da combinação de forças estáticas e dinâmicas pode constituir uma fonte significativa de erros na perfilometria com contato. Quando a força aplicada for muito baixa, a ponta do apalpador pode não manter o contato com a superfície da peça durante todo o percurso de medição, fornecendo informações incorretas sobre os valores das ordenadas dos pontos do perfil (LEACH, 2014). Uma ponta de apalpador fina, mesmo sob forças baixas pode resultar em uma área de contato pequena onde a pressão local pode ser alta o suficiente para causar a deformação elástica e plástica da superfície da peça (CHAND et al., 2011; VORBURGER et al., 2007).

Dobes et al. (2017) analisaram a superfície de uma amostra de alumínio após a medição da rugosidade com uma ponta de diamante de raio de 2 μm . Uma imagem obtida por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV), Fig. 2.17, mostra o sulcamento provocado na superfície da amostra. De acordo com Bhushan (2000) e Poon e Bhushan (1995), é possível observar a olho nu riscos nas superfícies de peças constituídas por materiais dúcteis ou de reduzido módulo elástico. Esse é o caso de alguns aços, prata, ouro, chumbo, polímeros e elastômeros.

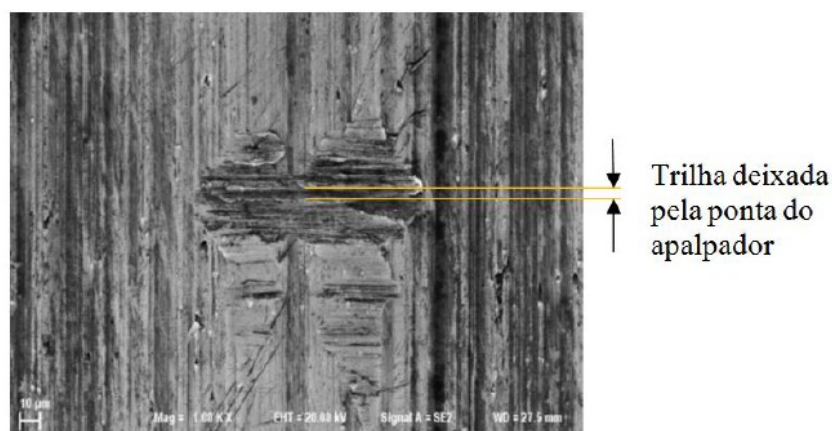


Figura 2.17 – Sulcamento em amostra de alumínio torneada provocada pela medição com rugosímetro eletromecânico (DOBES et al., 2017).

A vibração mecânica transmitida pelo solo pode afetar os resultados da medição com perfilometria mecânica com contato. Dobes et al. (2017) estudaram o efeito da vibração na medição de (Ra , Rq , Rz e Rt) em amostras de alumínio, aço inoxidável e aço carbono. Ao induzir vibrações mecânicas nas frequências de 60, 80 e 100 Hz, os autores concluíram que os fatores frequência e aceleração, bem como a interação entre eles provocaram efeitos estatisticamente significativos nos valores de todos os parâmetros avaliados.

Por fim tem-se que a direção de apalpamento deve ser escolhida de forma adequada. O risco resultante da ação do indentador na superfície da peça deve ser acessado por meio do movimento perpendicular do apalpador com relação a este. A Figura 2.18 mostra a importância da escolha adequada da direção de apalpamento durante as medições dos perfis.

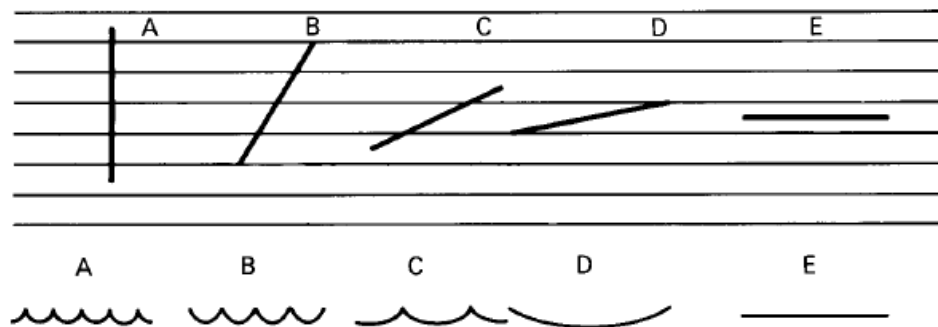


Figura 2.18 – Perfis obtidos para diferentes direções de apalpamento (LEACH, 2014).

Atenção especial deve ser dada ao posicionamento do feixe de luz durante a varredura da superfície em relação ao risco avaliado também na perfilometria mecânica sem contato.

Para a apresentação do perfil da topografia obtida pela técnica de perfilometria, a correta escolha das escalas a serem utilizadas para os eixos vertical e horizontal, é essencial para o claro entendimento do processo. A distância percorrida pelo apalpador do perfilômetro na superfície da amostra pode ser significativamente superior às dimensões dos vales e picos encontrados. Segundo Hutchings (1992), a representação gráfica do perfil da superfície obtida por meio da perfilometria de contato difere muito da forma real da superfície, conforme mostra a Fig. 2.19. A distorção da imagem devido a sua representação em diferentes escalas é chamada de anamorfose.

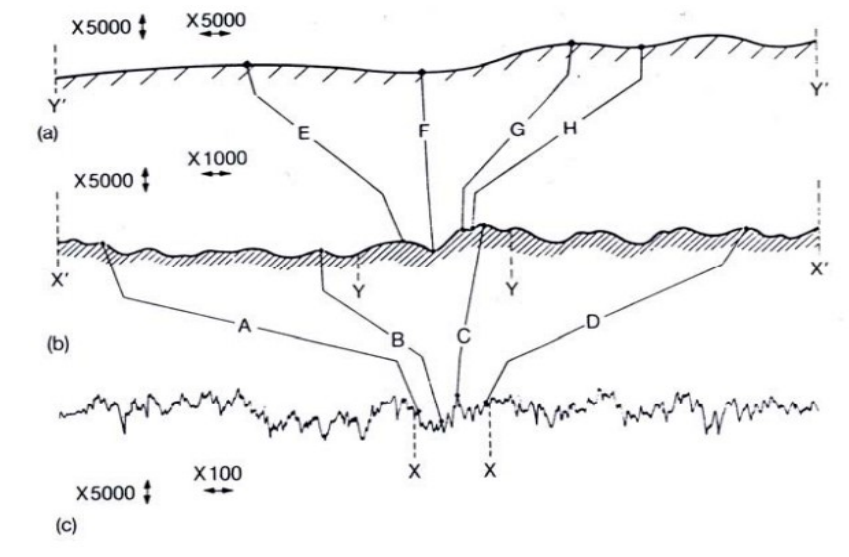


Figura 2.19 – Variação do perfil em função da escala escolhida (HUTCHINGS, 1992).

2.4.2 Medição óptica sem contato. Definição e principais fontes de erros

A medição óptica sem contato funciona a partir do fenômeno da reflexão. A varredura sem contato realizada entre o equipamento de medição e a amostra avaliada ocorre utilizando-se um feixe de luz para que ocorra a determinação das dimensões relativas à altura (eixo Z) dos pontos que definem o determinado mensurando. O interferômetro laser e o microscópio (confocal ou com variação de foco) são exemplos de equipamentos que realizam este tipo de avaliação. Ao utilizarem um feixe de luz para a realização da medição, o controle de parâmetros como temperatura, pressão e umidade do ambiente é essencial. A velocidade da luz é constante no vácuo, porém, no ar, varia em função da temperatura ambiente, da pressão e da umidade.

Silva Junior (2008) utilizou interferometria a laser para medir a profundidade das indentações Vickers realizadas em eventos isolados e observou a ocorrência de anomalias nas marcas de desgaste obtidas utilizando esta técnica de medição. Este autor concluiu que a forma piramidal da marca de indentação Vickers afeta a reflexão do laser em algumas regiões gerando erros significativos nos valores das ordenadas dos pontos do perfil avaliado. A Figura 2.20 ilustra a dificuldade encontrada pelo autor, o qual descreve que, quando o sensor laser se encontra na posição P1 a refletividade é alta, pois a superfície plana e horizontal favorece a reflexão do feixe laser na direção do sensor. À medida que o sensor se posiciona dentro da indentação, posição P2, a refletividade diminui, pois a superfície plana e inclinada modifica a direção do feixe refletido. Nesse caso, mesmo com a refletividade baixa, o autor considerou que a leitura da topografia é possível. A partir de uma determinada profundidade (posição P3)

ocorre a interferência do feixe laser com a própria reflexão, levando à leitura errônea mostrada na Fig. 2.21a-b. O autor obteve a minimização do problema com o refinamento dos parâmetros de aquisição do sensor laser do interferômetro.

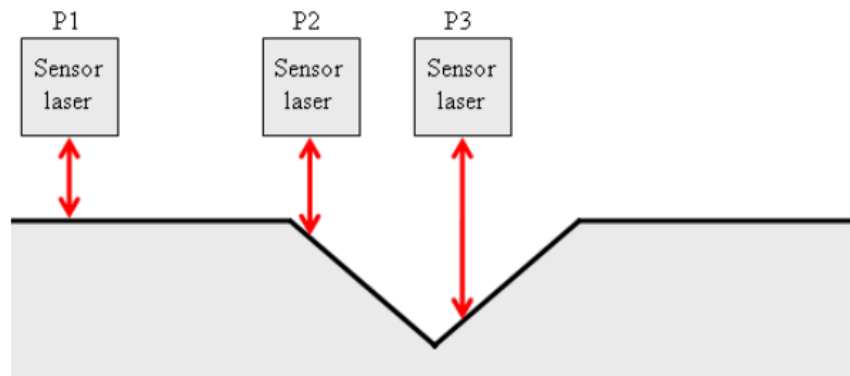


Figura 2.20 – Esquema sobre a reflexão em uma indentação (SILVA JUNIOR, 2008).

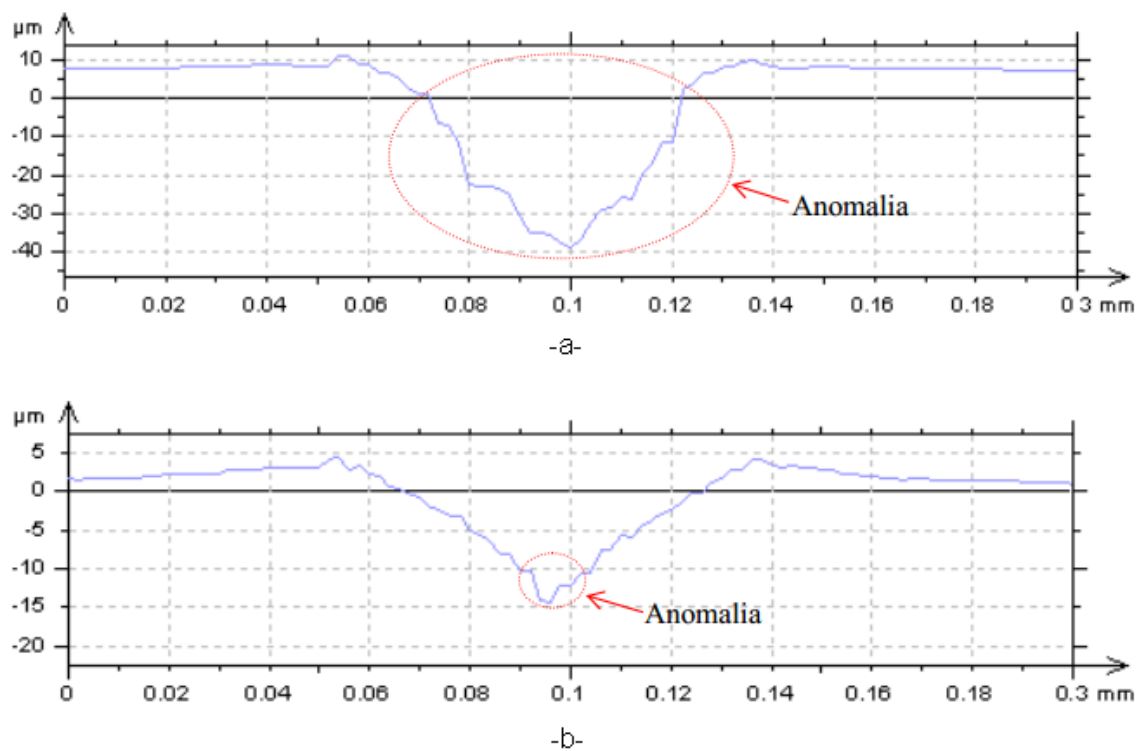


Figura 2.21 – Perfil transversal, sendo o comprimento de medição o eixo X e o perfil de medição o eixo Y (SILVA JUNIOR, 2008).

2.5 Rastreabilidade metrológica e incerteza de medição

Atualmente, a necessidade de fornecer resultados confiáveis está além dos laboratórios de calibração da área industrial, englobando fortemente a área da saúde e a experimental (DESENFANT e PRIEL, 2017). A obtenção de resultados confiáveis requer entre outros aspectos a calibração dos sistemas de medição. Quando um programa computacional é usado para realizar medições, ele deve ser considerado também um sistema de medição e, portanto deve ser calibrado. A calibração deste é essencial para a validação de seu desempenho metrológico, bem como para contribuir com a rastreabilidade dos resultados ao Sistema Internacional de Unidades (SI) imposto pela ABNT NBR ISO IEC 17025 (ABNT, 2017). Para calibração dos programas computacionais podem ser utilizados procedimentos padrão, instruções do fabricante ou procedimentos internos.

O programa Sigma Scan Pro versão 5.0 desenvolvido pela Systat Software foi utilizado em Arencibia et al. (2011) para medir os parâmetros geométricos do cordão de solda. Segundo os autores, o uso de programas computacionais para realizar medições aumentou significativamente, facilitando as medições em muitas áreas do conhecimento. No entanto, essa prática aumentou o nível de qualificação exigido pelo operador e a complexidade da avaliação da incerteza. Rezende Junior et al. (2019) avaliaram o desempenho metrológico de um equipamento utilizado para caracterizar a suscetibilidade de materiais à fragilização por hidrogênio usando a técnica de carregamento incremental. Uma interface Labview® desenvolvida para gerenciamento, controle e armazenamento dos dados durante o teste, foi validada como parte integrante do sistema de medição.

A rastreabilidade do resultado da medição também inclui a avaliação e declaração da incerteza da medição. Segundo o INMETRO (2012), a incerteza de medição é definida como sendo um parâmetro não negativo, que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos ao mensurando, com base nas informações utilizadas. Sua determinação é de extrema importância, e, de acordo com o JCGM 100 (JCGM, 2008), sem a indicação da incerteza, se torna inviável a comparação dos resultados de uma medição, seja entre eles mesmos ou com valores de referência fornecidos em especificações de fabricante, catálogos ou normas técnicas. Desta forma, é extremamente necessário que haja uma estratégia definida para caracterizar a qualidade dos resultados obtidos em uma medição, expressando assim a incerteza associada àquele procedimento. De maneira geral, o método GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) recomendado pelo JCGM 100 (JCGM, 2008) pode ser dividido nas seguintes etapas:

- definição do mensurando ou variável de saída;
- identificação das variáveis que podem afetar o resultado da medição do mensurando (variáveis de entrada ou grandezas de influência);
- expressão do mensurando em função de todas as variáveis de influência, através de um modelo matemático;
- avaliação da incerteza padrão das variáveis de entrada;
- avaliação da incerteza padrão combinada associada à variável de saída;
- avaliação da correlação entre as variáveis de entrada;
- cálculo dos coeficientes de sensibilidade;
- avaliação da incerteza expandida associada à variável de saída (cálculo dos graus de liberdade efetivos e, determinação do fator de abrangência);
- expressão do resultado de medição.

De acordo com (JCGM, 2008), a incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando. Para aplicação do método GUM deve ser proposto um modelo matemático que descreva o processo de medição, de forma a relacionar as variáveis de influência do processo de medição (variáveis de entrada) com o mensurando (variável de saída). Essa função é dada pela Eq. (2.1), sendo que Y é a variável de saída ou mensurando e X_i representa as variáveis de entrada.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2.1)$$

A incerteza padrão relaciona-se a cada grandeza de influência, e é estimada de acordo com a quantidade de informação disponibilizada sobre estas variáveis. A estimativa pode ser realizada de duas maneiras: por meio de uma avaliação do Tipo A ou uma avaliação do Tipo B (JCGM, 2008).

Conforme o JCGM 100 (JCGM, 2008) uma avaliação do tipo A da incerteza padrão é aquela obtida pela análise estatística de uma série de observações de um mensurando, assumindo uma distribuição normal ou uma distribuição *t-Student*. Na avaliação do Tipo A, a obtenção de um componente de incerteza é caracterizado por um desvio padrão que leva em consideração as flutuações aleatórias e as influências consideradas constantes dos resultados de um dado experimento.

Por outro lado, a avaliação tipo B é obtida por outros meios, como por exemplo: certificados de calibração, manuais, especificações de fabricantes ou experiências anteriores, distinto, portanto, da utilização estatística de uma série de observações repetidas. Diferentes distribuições de probabilidade podem ser assumidas, a depender da forma e quantidade de informação disponibilizada. As mais comumente utilizadas são: distribuição retangular e distribuição triangular.

Aplicando a Lei de Propagação de Incertezas no modelo matemático da medição dado na Eq. (2.1), obtêm-se a Eq. (2.2), que permite calcular a incerteza padrão combinada da variável de saída, indicada por $u_c(y)$. As demais variáveis envolvidas na operação são: a grandeza de entrada x_i , a incerteza padrão de cada grandeza de entrada $u(x_i)$ e o coeficiente de correlação entre as estimativas x_i e x_j , denominado de $r(x_i, x_j)$.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (2.2)$$

Os coeficientes de sensibilidade são as derivadas parciais da função em relação a cada variável de entrada, conforme mostrado no primeiro termo da Eq. (2.2). Sua grandeza representa a contribuição de cada fonte de incerteza no valor da incerteza total.

A probabilidade de abrangência de 68,27 % corresponde a uma distribuição de probabilidade normal (intervalo de +1 ou -1 desvio padrão em torno da melhor estimativa do mensurando). Multiplicando a incerteza padrão combinada pelo fator de abrangência k , aumenta-se a probabilidade de abrangência, conforme mostrado pela Eq. (2.3). A esse resultado dá-se o nome de incerteza expandida, $U(y)$.

$$U(y) = k \cdot u_c(y) \quad (2.3)$$

Por meio da equação de *Welch-Satterwaite*, Eq. (2.4), se obtêm o número de graus de liberdade efetivos da incerteza padrão combinada da variável de saída v_{eff} , tendo como variáveis N o número de variáveis de entrada, v_i o número de graus de liberdade de cada variável de entrada, $u_i(y)$ a incerteza padrão de cada variável de entrada na unidade do mensurando ou variável de saída, $u(x_i)$ a incerteza padrão de cada variável de entrada e $c_i(x_i)$ representando o coeficiente de sensibilidade do mensurando em relação a cada variável de entrada x_i .

$$v_{\text{eff}} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u^4(y_i)}{v_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u((x_i \cdot c_i))^4}{v_i}} \quad (2.4)$$

O fator de abrangência k , observado na Eq. (2.3), é definido de acordo com o nível de abrangência especificado para o intervalo, estando, para uma distribuição normal de probabilidade, considerando 95,45 % e 99,73 %, geralmente entre 2 (dois) e 3 (três), respectivamente.

Para casos onde o número de amostras é pequeno ($n < 30$) e uma componente de incerteza é estimada pela avaliação do Tipo A, não é recomendável essa aproximação para o fator de abrangência, devendo ser usado o Teorema do Limite Central juntamente com a tabela *t-Student*, de forma a se obter um valor para k baseado no grau de liberdade efetivo da incerteza padrão combinada da medição, fazendo com que o valor de k não seja sempre igual a dois e consequentemente os graus de liberdade nem sempre serão infinitos.

2.6 Planejamento de experimentos e análise de variância

Segundo Montgomery (2001), o planejamento de experimentos é uma técnica que permite estudar, de forma eficiente e econômica, a influência de um conjunto de fatores, no desempenho de um determinado processo.

Um planejamento experimental adequado possibilita minimizar o número de ensaios, com consequente redução de tempo de execução e custos. A técnica utiliza métodos estatísticos e, conforme Montgomery (2001), caracteriza-se pela promoção de alterações propositalmente nas variáveis de entrada, com o objetivo de se verificar as mudanças correspondentes nas respostas, porém, é preciso observar que nem todas as variáveis de entrada são controláveis.

De acordo com Barros Neto et. al (2007), quando o processo não é realizado da forma adequada, o resultado é uma grande quantidade de números estéreis, dos quais não é possível obter conclusões válidas. Para tanto, é imprescindível entender os princípios básicos de um planejamento experimental, compreendendo como a replicação, aleatoriedade e bloqueio são importantes para o resultado final esperado:

- Réplicas: são repetições do experimento, realizadas sob as mesmas condições experimentais. Conforme Montgomery (2001), com este estudo é possível estimar o erro experimental, possibilitando também verificar se os resultados obtidos possuem ou não diferenças estatisticamente significativas.
- Aleatorização: segundo Montgomery (2001), a aleatorização é usada para balancear os efeitos produzidos pelos fatores não controláveis nas respostas obtidas, além de atender aos requisitos de métodos estatísticos, os quais exigem que os componentes do erro experimental sejam variáveis aleatórias independentes.
- Formação de Blocos: a blocagem busca a criação de experimentos mais homogêneos, objetivando aumentar a precisão das respostas analisadas e avaliar, quando for o caso, a variabilidade produzida por determinados fatores, sejam eles controláveis ou não controláveis.

Para verificar se as variáveis de entrada estudadas possuem influência significativa nas variáveis de resposta analisadas, a análise de variância (ANOVA) é uma técnica bastante utilizada. Segundo Montgomery (2001), a análise de variância possibilita concluir, dentro do grau de confiança estipulado, se existem diferenças ou não entre duas ou mais médias amostrais. Amostras aleatórias e independentes, populações com distribuição normal e variâncias populacionais iguais são pressupostos básicos para a análise de variância. Satisfeitos os requisitos a técnica permite testar a hipótese investigada, por meio da distribuição de probabilidade Fisher-F com nível de significância determinado, o que geralmente é igual a 5 %. É um procedimento bastante difundido e conhecido, sendo que existem a disposição dos usuários inúmeros *softwares* estatísticos e planilhas eletrônicas que favorecem a sua aplicação de forma rápida e segura.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo, as etapas necessárias para a realização do presente trabalho são especificadas e detalhadas. Para melhor organização e entendimento, foram definidas três etapas principais que são: levantamento das fontes de erros na perfilometria mecânica com contato e na medição óptica sem contato; testes experimentais (preliminares, intermediários e definitivos); e determinação do f_{ab} utilizando medição óptica sem contato. Os tópicos abordados em cada etapa são mostrados a seguir.

Etapa 1. Levantamento das fontes de erros na perfilometria mecânica com contato e na medição óptica sem contato

Etapa 2. Testes experimentais

Etapa 2.1. Testes preliminares (perfilometria mecânica com contato em amostras de aço ferramenta e alumina)

- ✓ Planejamento dos testes preliminares
- ✓ Ensaios esclerométricos
- ✓ Obtenção dos perfis transversais dos riscos usando perfilômetro
- ✓ Calibração do programa computacional *Mountains Map*
- ✓ Determinação do fator f_{ab}
- Fabricação das amostras e do porta-amostra
- Controle dimensional e geométrico das amostras e do porta-amostra

Etapa 2.2. Testes intermediários (amostras de aço ferramenta e de alumina)

- Determinação da força vertical a ser aplicada durante a realização dos riscos
- Avaliação do efeito do tamanho amostral (número de medições) nos valores de f_{ab}

Etapa 2.3. Testes definitivos (amostras de aço ferramenta e de liga de aço com alto teor de carbono e cromo – bloco-padrão)

- Testes definitivos utilizando perfilometria mecânica com contato em amostra de aço ferramenta
- Validação da metodologia (protocolos) proposta para determinação do f_{ab} utilizando perfilometria mecânica com contato em amostras de liga de aço com alto teor de carbono e cromo – bloco-padrão
- Caracterização dos materiais

Etapa 3. Determinação do f_{ab} utilizando medição óptica sem contato

3.1 Levantamento das fontes de erros na perfilometria mecânica com contato e na medição óptica sem contato

A partir da revisão bibliográfica realizada, foi possível identificar as fontes de erros presentes nos processos de medição para obtenção dos perfis transversais dos riscos utilizando a perfilometria mecânica com contato e a medição óptica sem contato. Identificadas estas fontes de erros, foram construídos diagramas de causa e efeito, os quais apresentam as fontes de erros observadas. Desta forma, foi possível propor alternativas para investigar o efeito de algumas dessas fontes de erros na repetibilidade do fator f_{ab} , bem como propor alternativas visando reduzir seus efeitos e obter resultados de medições mais confiáveis.

3.2 Testes preliminares (perfilometria mecânica com contato em amostras de aço ferramenta e alumina)

3.2.1 Planejamento dos testes preliminares

Os testes preliminares tiveram como objetivo ampliar o conhecimento sobre o comportamento da máquina de esclerometria retilínea, do método de medição dos perfis dos riscos produzidos e do método de cálculo das áreas de interesse utilizadas na determinação do fator f_{ab} . Além de fornecer informações para a correta definição dos parâmetros de interesse a serem utilizados nos testes experimentais subsequentes.

Visando avaliar o efeito de quatro fatores (velocidade de riscamento, força aplicada, material da amostra e tipo do indentador) nos valores da variável de saída (fator f_{ab}), um planejamento fatorial completo 2^4 foi proposto. A Tabela 3.1 mostra a matriz do planejamento indicado.

Tabela 3.1 – Matriz do planejamento fatorial completo 2^4 .

Experimento	Velocidade de riscamento (mm/s)	Força (N)	Material da amostra	Tipo do penetrador
1	-1 (0,01)	-1 (1,00)	-1(Alumina)	-1 (Vickers)
2	+1 (0,05)	-1 (1,00)	-1(Alumina)	-1 (Vickers)
3	-1 (0,01)	+1 (2,00)	-1(Alumina)	-1 (Vickers)
4	+1 (0,05)	+1 (2,00)	-1(Alumina)	-1 (Vickers)
5	-1 (0,01)	-1 (1,00)	+1 (Aço ferramenta)	-1 (Vickers)
6	+1 (0,05)	-1 (1,00)	+1(Aço ferramenta)	-1 (Vickers)
7	-1 (0,01)	+1 (2,00)	+1(Aço ferramenta)	-1 (Vickers)
8	+1 (0,05)	+1 (2,00)	+1(Aço ferramenta)	-1 (Vickers)
9	-1 (0,01)	-1 (1,00)	-1(Alumina)	+1 (Rockwell-C)
10	+1 (0,05)	-1 (1,00)	-1(Alumina)	+1 (Rockwell-C)
11	-1 (0,01)	+1 (2,00)	-1(Alumina)	+1 (Rockwell-C)
12	+1 (0,05)	+1 (2,00)	-1(Alumina)	+1 (Rockwell-C)
13	-1 (0,01)	-1 (1,00)	+1(Aço ferramenta)	+1 (Rockwell-C)
14	+1 (0,05)	-1 (1,00)	+1(Aço ferramenta)	+1 (Rockwell-C)
15	-1 (0,01)	+1 (2,00)	+1(Aço ferramenta)	+1 (Rockwell-C)
16	+1 (0,05)	+1 (2,00)	+1(Aço ferramenta)	+1 (Rockwell-C)

Os indentadores propostos foram o Vickers, o qual possui a forma de uma pirâmide e o Rockwell-C, que apresenta a forma de um cone com ponta esférica. A Figura 3.1 mostra a geometria destes indentadores.

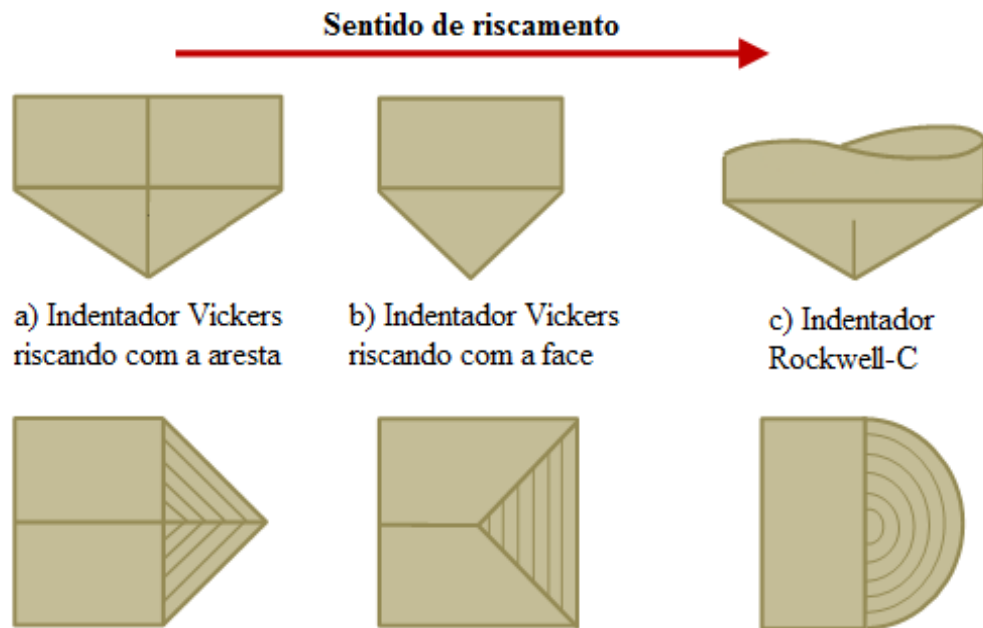


Figura 3.1 – Geometria dos indentadores Vickers e Rockwell-C (adaptado de WILLIAMS, 1996).

Durante os experimentos, o indentador Vickers foi posicionado para efetuar o riscamento com a face.

De acordo com a matriz de planejamento, proposta na Tabela 3.1, todos os fatores foram investigados em 2 níveis, resultando em 16 experimentos. Para cada condição, foram executadas uma réplica e uma tréplica, totalizando 48 experimentos. O tratamento dos dados foi efetuado utilizando-se a técnica estatística de Análise de Variância (ANOVA), por meio do programa computacional Statistica 7.0. O objetivo da aplicação desta técnica foi o de identificar se os fatores investigados e as possíveis interações entre eles produzem efeitos com confiabilidade estatística na variável resposta.

Os ensaios de esclerometria retilínea foram realizados utilizando um equipamento especialmente desenvolvido pelo Laboratório de Tribologia e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, para reproduzir a interação de partículas abrasivas, Fig. 3.2. Este equipamento proporciona movimentação controlada do indentador nos planos horizontal e vertical, possuindo também um translador piezelétrico (PZT), responsável pela aplicação da força na superfície da amostra. Na Tabela 3.2 são apresentados os principais componentes do equipamento de esclerometria, bem como algumas

informações consideradas importantes. Para gerenciamento das tarefas, foi utilizado um programa computacional especialmente desenvolvido em plataforma LabView®.

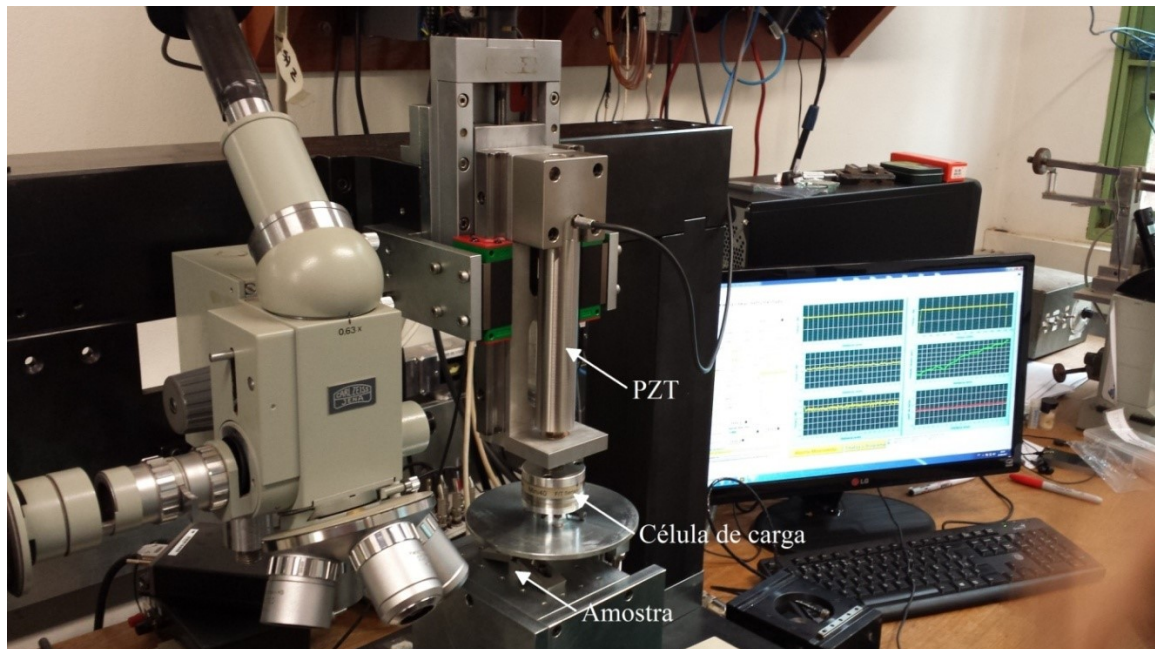


Figura 3.2 – Esclerômetro retilíneo utilizado.

Tabela 3.2 – Componentes do equipamento de esclerometria retilínea.

Componente	Resolução	Fabricante	Modelo	Interface
Mesa que se desloca ao longo do eixo X	0,0001 mm	Physik Intrumente	M-535.22	
Mesa que se desloca ao longo do eixo Y	0,0001 mm	Physik Intrumente	M-150.11	
Mesa que se desloca ao longo do eixo Z	0,0001 mm	Physik Intrumente	M-150.11	
Controlador das mesas		Physik Intrumente	C804	Digital GPIB
Translador Piezelétrico (PZT)	5nm 120 μ m (FE)	Physik Intrumente	P-216.80	
Controlador do PZT		Physik Intrumente	E-508.00 – amplificador de 0-10 V para 0- 1000 V	Analógica AD/DA
Célula de carga	Fz 0,02 N 120 N (FE)	ATI Industrial Automation	MINI40	Analógica AD/DA

FE-fundo de escala

Em cada amostra, foram realizados 24 riscos com 4 mm de comprimento, três para cada condição conforme especificado no planejamento do experimento (Tab. 3.1). O espaçamento entre os riscos foi de 1 mm.

Para a determinação dos perfis transversais dos riscos foi utilizada a técnica de perfilometria mecânica com contato, com um perfilômetro Form Talysurf Intra, da Taylor Hobson, mostrado na Fig. 3.3. Este equipamento possui resolução de $0,016\text{ }\mu\text{m}$ e apalpador cônico-esférico com ponta de diamante com raio de $2\text{ }\mu\text{m}$. O perfilômetro e as amostras objeto de medição foram posicionados sob uma mesa inercial a fim de minimizar o efeito da vibração mecânica transmitida pelo solo. Dobes et al. (2017) observaram que a frequência e a aceleração da vibração mecânica produziram efeitos estatisticamente significantes, com um nível de confiança de 95 % nos valores dos parâmetros Ra , Rq , Rz e Rt .

Foram realizadas cinco medições espaçadas 0,5 mm uma da outra com auxílio de uma mesa de coordenadas a qual possui dois cabeçotes micrométricos analógicos dispostos a 90° . A resolução de ambos os cabeçotes é de $5\text{ }\mu\text{m}$ e a faixa nominal de 25 mm. Desta forma foi possível obter amostras aleatórias. A velocidade de medição foi de $0,25\text{ mm/s}$.

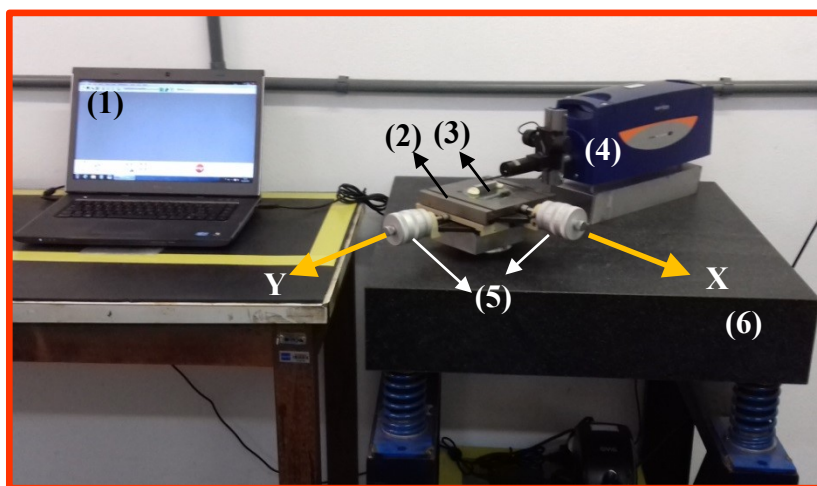


Figura 3.3 – Sistema de medição com contato, usado para obter os perfis dos riscos e a rugosidade superficial das amostras. Computador (1), mesa de coordenadas (2), amostra (3), perfilômetro (4), cabeçotes micrométricos analógicos (5) e mesa inercial (6).

O perfilômetro foi calibrado utilizando um padrão de rugosidade com certificado de calibração N° 15218/11, emitido pela Mitutoyo Sul Americana Ltda. De acordo com o certificado de calibração do padrão, a incerteza expandida é de 6 % para k igual a 2,65 e probabilidade de abrangência de 95 %. Foram realizadas dez medições da rugosidade na

região central do padrão, conforme o desenho mostrado na Fig. 3.4, utilizando o valor de Ra igual a $0,38 \mu\text{m}$ como referência. Para cada medição, foram coletados os valores de Ra e as coordenadas X e Y dos pontos que definem o perfil de rugosidade. Foram avaliados o erro sistemático ou tendência, a exatidão e a repetibilidade dos valores de rugosidade. Por fim, a incerteza expandida associada à calibração do perfilômetro foi estimada.



Figura 3.4 – Região do padrão medida durante a calibração do perfilômetro.

O modelo matemático utilizado para o cálculo da incerteza associada à calibração do perfilômetro é apresentado na Eq. (3.1).

$$C_{Rug} = \bar{x}(L_{Rug}) + \Delta R_{Rug} + \Delta C_{PR} + \Delta A_R + \Delta D_{PR} \quad (3.1)$$

Na Equação (3.1), C_{Rug} é a incerteza associada à calibração do perfilômetro; $\bar{x}(L_{Rug})$ é a média aritmética dos valores indicados pelo perfilômetro; ΔR_{Rug} é a correção associada à resolução do rugosímetro; ΔC_{PR} é a correção associada à calibração do padrão de rugosidade; ΔA_R é a correção associada ao raio da ponta do apalpador; e ΔD_{PR} é a correção associada à deformação do padrão de rugosidade durante a medição.

Aplicando a Lei de Propagação de Incertezas na Eq. (3.1), obtém-se a Eq. (3.2), que permite calcular a incerteza-padrão combinada associada à calibração do perfilômetro.

$$u_C^2(C_{Rug}) = u^2(\bar{x}(L_{Rug})) + u^2(\Delta R_{Rug}) + u^2(\Delta C_{PR}) + u^2(\Delta A_R) + u^2(\Delta D_{PR}) \quad (3.2)$$

Ao término do procedimento de calibração, foi elaborado o certificado de calibração do perfilômetro (Apêndice I). Este certificado declara uma incerteza expandida associada à calibração do perfilômetro de 6 % para k igual a 2,39 e probabilidade de abrangência de 95 %.

Para determinação das áreas de interesse (A_v , $A1$ e $A2$), foi utilizado o programa computacional Mountains Map Universal 3.0.11. Os perfis brutos disponibilizados pelo perfilômetro mecânico foram tratados objetivando-se retirar a inclinação destes, aplicando o operador *Leveling*. Após a determinação das áreas de interesse, o cálculo do fator f_{ab} foi realizado como indicado na Eq. (3.3).

$$f_{ab} = \frac{A_v - (A1 + A2)}{A_v} \quad (3.3)$$

Na Equação (3.3), A_v é a área correspondente ao material removido pela ação do indentador e $A1$ e $A2$ são as áreas que representam o material deformado para as laterais do sulco.

Antes de iniciar a determinação, o programa computacional Mountains Map Universal 3.0.11 foi validado. Vale ressaltar que a maioria dos usuários aceita os resultados numéricos, gráficos e resumos estatísticos fornecidos pelos programas computacionais, sem ter um certificado de calibração ou validação destes. Neste trabalho, o erro sistemático associado à determinação das áreas por meio do programa computacional Mountains Map Universal 3.0.11 foi determinado como a diferença entre o valor médio de área $\bar{A}$ obtido pelo programa e o valor calculado utilizando-se fórmulas matemáticas (VC_A), como mostra a Eq. (3.4).

$$E_A = \bar{A} - VC_A \quad (3.4)$$

Os pontos cujas coordenadas X e Y eram conhecidas são mostrados na Fig. 3.5. Por sua vez, as áreas das geometrias resultantes são apresentadas na Fig. 3.6.

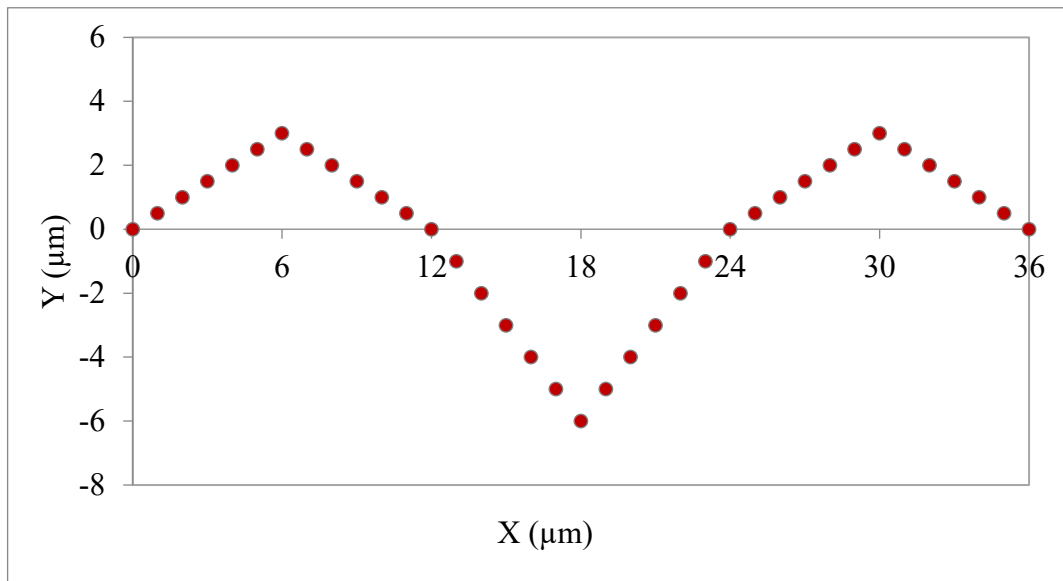


Figura 3.5 – Pontos coordenados X e Y previamente definidos para obtenção da geometria utilizada na calibração do programa.

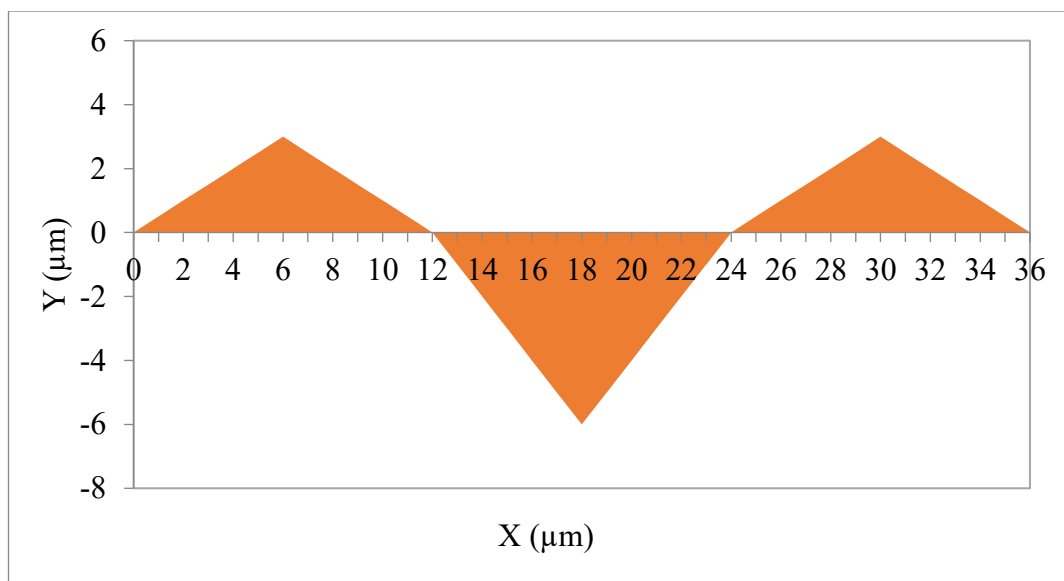


Figura 3.6 – Áreas das geometrias obtidas a partir dos pontos com coordenadas X e Y conhecidas.

Para a entrada de dados no programa foi realizada a digitação dos pontos coordenados dos eixos X e Y , referente à geometria previamente definida. O cálculo das áreas foi realizado utilizando o comando: *surface of a hole/peak*. A resolução da medição é $0,01 \mu\text{m}^2$. A incerteza associada à determinação das áreas foi calculada utilizando o método GUM proposto no JCGM 100 (JCGM, 2008). Para tanto foi utilizado o modelo matemático dado na

Eq. (3.4). Aplicando a lei de propagação de incertezas na Eq. (3.4), obtém-se a Eq. (3.5) que permite estimar a incerteza padrão combinada associada ao erro sistemático resultante da calibração.

$$u_c^2(E_A) = u^2(\bar{A}) + u^2(VC_A) \quad (3.5)$$

A incerteza associada à determinação das áreas A_v , A_1 e A_2 foi estimada tomando como base o modelo matemático indicado na Eq. (3.6). Na Eq. (3.6), $\bar{L}$ é a média dos valores de áreas indicados pelo programa Mountains Map, considerando os cinco ciclos de medição realizados; ΔR é a correção associada à resolução do programa; ΔC é a correção associada à calibração do programa; e ΔC_p é a incerteza associada à calibração do perfilômetro.

$$A = \bar{L} + \Delta R + \Delta C + \Delta C_p \quad (3.6)$$

Aplicando a lei de propagação da incerteza na Eq. (3.6) e calculando as derivadas parciais, a Eq. (3.7) foi obtida. Esta equação permite estimar a incerteza padrão combinada associada às áreas de interesse.

$$u_c^2(A) = u^2(\bar{L}) + u^2(\Delta R) + u^2(\Delta C) + u^2(\Delta C_p) \quad (3.7)$$

Para determinar a incerteza padrão associada à variabilidade dos valores indicados pelo Mountains Map e aquelas associadas à calibração deste e do perfilômetro, foram adotadas distribuições *t-Student*, conforme indicado nas Eqs. (3.8) a (3.10).

$$u(\bar{L}) = s(\bar{L}) / \sqrt{n} \quad (3.8)$$

$$u(\Delta C) = U(C) / k \quad (3.9)$$

$$u(\Delta C_p) = U(C_p) / k_p \quad (3.10)$$

Nas Equações (3.8) a (3.10), $s(\bar{L})$ é o desvio padrão experimental; n é o número dos ciclos de medição realizados; $U(C)$ é a incerteza expandida associada à calibração do programa Mountains Map; k é o fator de cobertura correspondente; $U(C_P)$ é a incerteza expandida associada à calibração do perfilômetro e k_P é o fator de cobertura correspondente.

Para avaliar a incerteza padrão associada à resolução do programa (R), foi adotada uma distribuição retangular com infinitos graus de liberdade, conforme mostrado na Eq. (3.11).

$$u(\Delta R) = R / 2 \cdot \sqrt{3} \quad (3.11)$$

A incerteza associada ao fator f_{ab} foi estimada tomando como base o modelo matemático mostrado na Eq. (3.3). Aplicando a lei de propagação da incerteza nesta equação e calculando as derivadas parciais, a Eq. (3.12) foi obtida.

$$u_c^2(f_{ab}) = \left(\frac{I}{Av}\right)^2 \cdot u^2(Av) + \left(-\frac{I}{Al}\right)^2 \cdot u^2(Al) + \left(-\frac{I}{A2}\right)^2 \cdot u^2(A2) \quad (3.12)$$

3.2.2 Fabricação das amostras e do porta-amostra

Dois materiais, o aço ferramenta e a alumina, foram utilizados para fabricação das amostras. O aço ferramenta é um aço rápido M2 temperado e revenido com dureza de 65 ± 2 HRC, utilizado para fabricar ferramentas de corte, cuja especificação é: Tool Master 12 HSS, referência TM-020, fabricado conforme a norma DIN 4964 (DIN, 1962).

É mostrado na Figura 3.7 as dimensões nominais das amostras de aço ferramenta. Nesta figura se observa a indicação de tolerâncias de planeza e de paralelismo na superfície de teste. Esta última tomando como referência a superfície oposta. Uma tolerância para o desvio aritmético médio do perfil avaliado ($Ra = 0,08 \mu m$) também foi indicada na superfície de teste da amostra.

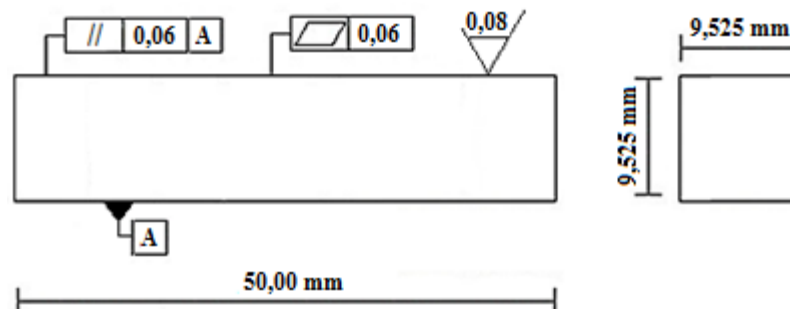


Figura 3.7 – Dimensões nominais e geometria da amostra de aço ferramenta.

A fabricação das amostras de aço ferramenta consistiu, basicamente, em realizar o corte nas extremidades, preservando a seção transversal original da peça. Para tanto, foi efetuada uma operação de desbaste leve em uma máquina de usinagem por descargas elétricas, ou eletroerosão, fabricada por Engemac Eletroerosão S/A, modelo 440NC. Cuidados adicionais foram tomados durante o corte visando à manutenção das características originais da microestrutura do material. Após o corte, as amostras de aço ferramenta foram lixadas manualmente. Inicialmente, a amostra foi colocada no porta-amostra com vistas a garantir a tolerância estipulada no projeto para o desvio de planeza da superfície de teste e a homogeneidade do acabamento superficial da mesma. A direção e o sentido do processo de lixamento e a gramatura das lixas utilizadas são mostrados na Tab. 3.3. Posteriormente, foi realizado o polimento das amostras utilizando óxido de cromo de granulometria 1 μm .

Tabela 3.3 – Direção e sentido do lixamento. Gramatura das lixas.

Direção e sentido do movimento	Gramatura das lixas
	#220
	#320
	#400
	#600
	#1000
	#1200

Por sua vez, as amostras de alumina foram adquiridas de uma empresa especializada em cerâmica técnica, possuindo as seguintes características:

- 20 mm de largura, 35 mm de comprimento e 6 mm de espessura;
- composição principal de alumina (Al_2O_3) – 99,8 %;
- dureza de $1,80 \pm 0,05$ GPa (78 - 80 HRC);
- porosidade aberta < 0,6 %;
- tamanho de grão primário (D50) de 0,5 μm ;
- módulo de elasticidade de 270 ± 20 GPa.

É mostrado na Figura 3.8 as dimensões nominais da amostra de alumina. Nesta peça também foi especificada uma tolerância para o desvio de planeza da superfície de teste, bem como de paralelismo e desvio aritmético médio do perfil avaliado, conforme indicado.

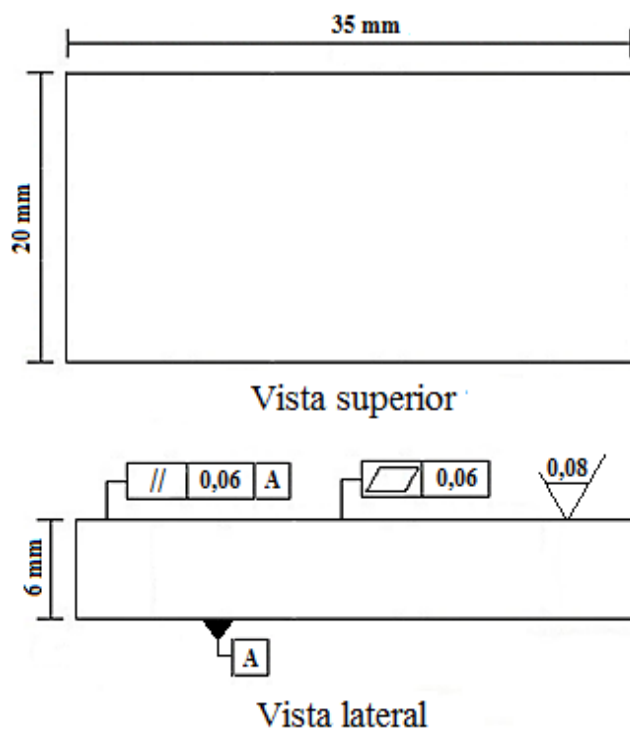


Figura 3.8 – Dimensões nominais e geometria da amostra de alumina.

A superfície de teste da amostra de alumina foi lapidada e polida. A lapidação foi efetuada utilizando lama de carbetto de silício # 2000 *Mesh* e teve duração de 20 minutos. Para o polimento foram utilizadas duas suspensões de diamante a base de água, com diâmetro de partículas de 1 e 3 μm . O procedimento foi realizado com uma politriz metalográfica, sendo que o tempo de polimento foi de 20 minutos para cada suspensão.

Para facilitar o manuseio das amostras durante o lixamento, foi projetado e fabricado um porta-amostra em aço AISI 1045. O processo de usinagem foi realizado por uma empresa terceirizada, conforme projeto mostrado na Fig. 3.9.

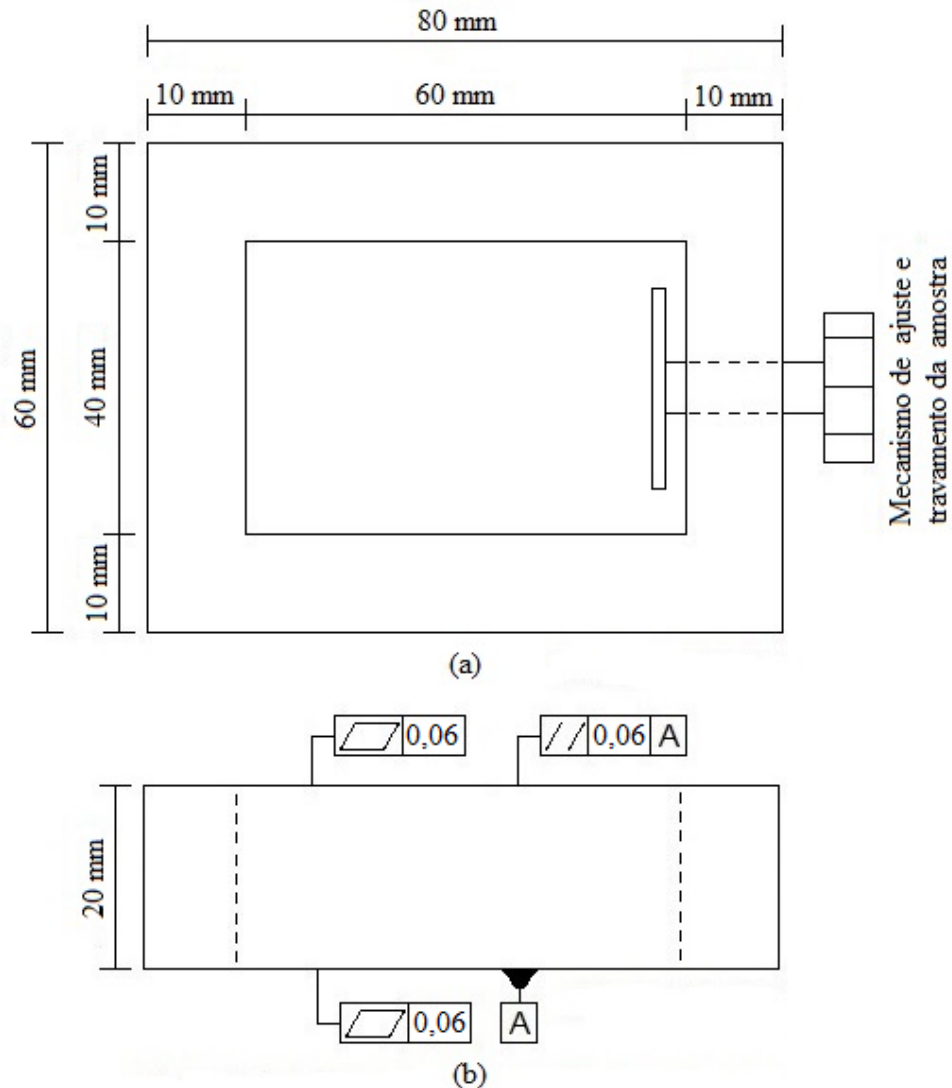


Figura 3.9 – Vista superior (a) e lateral (b) do porta-amostra.

As tolerâncias dimensionais do porta-amostra foram determinadas de acordo com as características do translador piezelétrico (PZT) da máquina de esclerometria retilínea que foi utilizado. Este translador movimenta unidirecionalmente por um percurso de 120 μm . Assim sendo, foram estipuladas tolerâncias de planeza e de paralelismo correspondentes à metade do deslocamento do translador (60 μm).

3.2.3 Controle dimensional e geométrico das amostras e do porta-amostra

O controle dos desvios de planeza e de paralelismo das amostras e do porta-amostra foi realizado utilizando uma máquina de medir por coordenadas (MMC). Esta máquina é do tipo ponte móvel, modelo BR-M443, manual, com resolução de 0,001 mm e faixa nominal de

400 mm, 400 mm e 300 mm para os eixos X , Y e Z , respectivamente. Nas medições foi utilizada uma ponta única com esfera de rubi de 2 mm de diâmetro e 20 mm de comprimento da haste. Para gerenciamento das tarefas de medição foi utilizado o programa computacional dedicado à máquina, o MCosmos[®] 3.0. O certificado de calibração da MMC declara uma incerteza expandida linear associada ao eixo X de $(U_x = 0,8 + L/1500) \mu\text{m}$ ($k_x = 2,03$), para o eixo Y é de $(U_y = 0,8 + L/3000) \mu\text{m}$ ($k_y = 2,08$), para o eixo Z é de $(U_z = 0,9 + L/3000) \mu\text{m}$ ($k_z = 2,11$), sendo L o valor da coordenada correspondente. O erro de apalpação é de $(1,9 \pm 1,2) \mu\text{m}$ ($k = 2,00$). A probabilidade de abrangência é de 95 % em todos os casos.

A Figura 3.10 ilustra o porta-amostra (Fig. 3.10a) e uma amostra de aço ferramenta (Fig. 3.10b) posicionados e fixados no desempenho da MMC durante a medição. A origem do sistema de coordenadas foi posicionada no ponto 0 indicado em cada caso. Durante a verificação dos desvios de planeza e de paralelismo, foram apalpados 21 pontos em cada superfície considerada. Cinco ciclos de medição foram efetuados em cada caso.

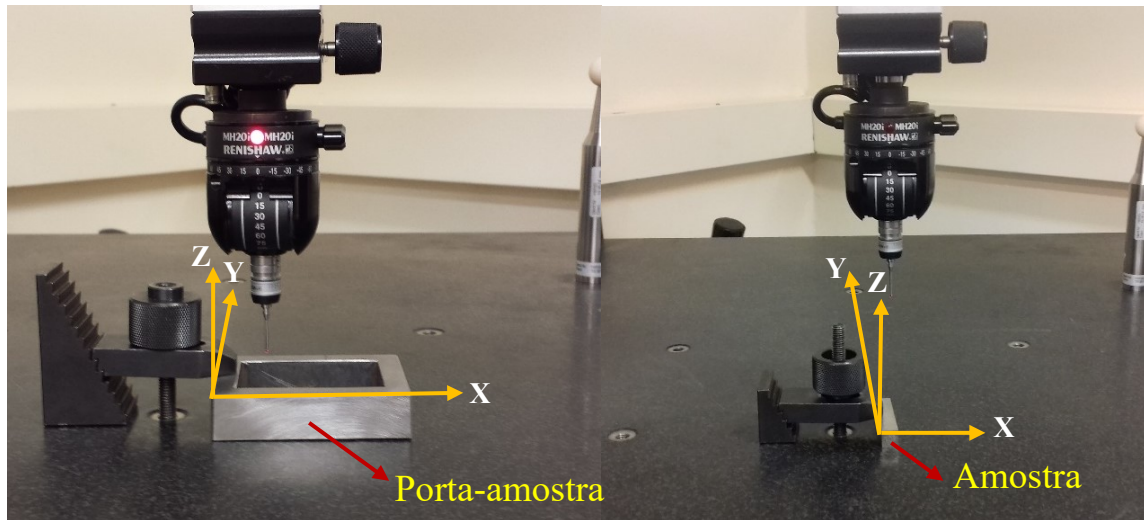


Figura 3.10 – Porta-amostra (Fig. 3.10a) e amostra de aço ferramenta (Fig. 3.10b) posicionados e fixados no desempenho da MMC.

A incerteza associada à medição dos desvios de planeza e de paralelismo foi estimada por meio da aplicação do método GUM proposto no JCGM 100 (JCGM, 2008). Para tanto foi proposto o modelo matemático dado na Eq. (3.13).

$$DP = \overline{DP} + \Delta R_{MMC} + \Delta C_{MMC(Z)} + \Delta E_a \quad (3.13)$$

Na Equação (3.13), DP é o desvio de planeza ou de paralelismo; $\overline{DP}$ é a média dos valores indicados pela MMC para cada mensurando em questão; ΔR_{MMC} é a correção devido à resolução da MMC; $\Delta C_{MMC(Z)}$ é a correção associada à calibração da MMC (eixo Z); e ΔE_a é a correção devido ao erro de apalpamento da MMC.

Aplicando a lei de propagação de incertezas na Eq. (3.13), obtém-se a Eq. (3.14) que permite estimar a incerteza padrão combinada associada à determinação dos mensurandos em questão.

$$u_c^2(DP) = u^2(\overline{DP}) + u^2(\Delta R_{MMC}) + u^2(\Delta C_{MMC(Z)}) + u^2(\Delta E_a) \quad (3.14)$$

O controle das dimensões lineares cotadas na Fig. 3.9 foi efetuado utilizando um paquímetro digital, com faixa nominal de 150 mm e resolução de 0,01 mm. O certificado de calibração declara uma incerteza de calibração para medidas externas U_{ECp} de 0,02 mm ($k_{ECp} = 2,00$), incerteza de calibração para medida interna U_{ICp} de 0,02 mm ($k_{ICp} = 2,03$), incerteza para o desvio de paralelismo entre as superfícies de medição para externos do paquímetro U_{DPRE} de 0,01 mm ($k_{DPRE} = 2,00$) e incerteza para o desvio de paralelismo entre as superfícies de medição para internos do paquímetro U_{DPRI} de 0,01 mm ($k_{DPRI} = 2,00$). A probabilidade de abrangência é de 95 % em todos os casos.

As Equações (3.15) e (3.16) mostram os modelos matemáticos propostos para a estimativa da incerteza associada às medições de dimensões externas e internas realizadas com paquímetro, respectivamente.

$$L = L_p + \Delta R_p + \Delta C_p + \Delta D_{PRE} \quad (3.15)$$

$$L = L_p + \Delta R_p + \Delta C_p + \Delta D_{PRI} \quad (3.16)$$

Nas Equações (3.15) e (3.16), L é o valor do mensurando; L_p é a variabilidade dos valores indicados pelo paquímetro; ΔR_p é a correção devido à resolução do paquímetro; ΔC_p é a correção associada à incerteza padrão da calibração do paquímetro; ΔD_{PRE} é a correção devido ao desvio de paralelismo entre as superfícies de medição para externos do paquímetro; e ΔD_{PRI} é a correção devido ao desvio de paralelismo entre as superfícies de medição para internos do paquímetro.

Aplicando a lei de propagação de incertezas nas Eqs. (3.15) e (3.16) obtêm-se as Eqs. (3.17) e (3.18) para a determinação da incerteza padrão combinada associada às medições externas e internas, respectivamente.

$$u_C^2(L) = u^2(L_p) + u^2(\Delta R_p) + u^2(\Delta C_p) + u^2(\Delta D_{PrE}) \quad (3.17)$$

$$u_C^2(L) = u^2(L_p) + u^2(\Delta R_p) + u^2(\Delta C_p) + u^2(\Delta D_{PrI}) \quad (3.18)$$

Para a medição da rugosidade Ra das superfícies de trabalho das amostras, foi utilizado o perfilômetro Form Talysurf Intra especificado anteriormente. A rugosidade Ra foi avaliada considerando um comprimento de amostragem (*cut-off*) de 0,25 mm para as amostras de aço ferramenta, por sua vez, para a amostra de alumina o *cut-off* foi 0,8 mm. O comprimento de amostragem foi definido de acordo com a ABNT NBR ISO 4288 (ABNT, 2008). A medição foi efetuada avaliando a superfície em duas direções de apalpação perpendiculares entre si, conforme definido no plano de lixamento, de forma a se identificar a condição mais crítica em cada caso. Em cada direção foram efetuadas cinco medições.

O modelo matemático utilizado para o cálculo da incerteza associada à medição para o parâmetro de rugosidade Ra é mostrado na Eq. (3.19).

$$R_{Rug} = \bar{x}(L_{Rug}) + \Delta R_{Rug} + \Delta C_{Rug} + \Delta A_R + \Delta D \quad (3.19)$$

Na Equação (3.19), R_{Rug} é a incerteza associada à calibração do rugosímetro; $\bar{x}(L_{Rug})$ é a média aritmética dos valores indicados pelo rugosímetro; ΔR_{Rug} é a correção associada à resolução do rugosímetro; ΔC_{Rug} é a correção associada à calibração do rugosímetro; ΔA_R é a correção associada ao raio da ponta do apalpador; e ΔD é a correção associada à deformação do material da amostra durante a medição.

Aplicando a Lei de Propagação de Incertezas na Eq. (3.19) obtém-se a Eq. (3.20), que permite calcular a incerteza-padrão combinada associada ao Ra .

$$u_C^2(R_{Rug}) = u^2(\bar{x}(L_{Rug})) + u^2(\Delta R_{Rug}) + u^2(\Delta C_{Rug}) + u^2(\Delta A_R) + u^2(\Delta D) \quad (3.20)$$

Todas as medições foram realizadas a temperatura ambiente de $20,0 \pm 1,0$ °C, conforme determina a ABNT NM-ISO 1 (ABNT, 1997). As amostras, o suporte e os dispositivos dos sistemas de medição, foram deixados doze horas à temperatura especificada, para atingirem o equilíbrio térmico. Durante os experimentos a temperatura foi monitorada por meio de um termo-higrômetro digital com resolução de 0,1 °C e faixa nominal de (-20,0 a 60,0) °C. O certificado de calibração declara uma incerteza expandida de 0,3 °C para k igual a 2,00 e infinitos graus de liberdade.

O controle dimensional e geométrico revelou que o desvio de planeza obtido foi menor que 0,06 mm para todas as amostras avaliadas. Este valor está dentro da faixa de trabalho do translador piezelétrico (PZT) da máquina de esclerometria retilínea que será utilizada (a qual se movimenta unidirecionalmente por um percurso de 0,12 mm). Em relação ao desvio de paralelismo, nas amostras de aço ferramenta, existe a possibilidade de que os valores ultrapassem minimamente o limite estabelecido em projeto considerando a incerteza expandida associada. No entanto, decidiu-se por realizar os testes nestas condições, uma vez que os valores obtidos não ultrapassam 0,12 mm. Para a amostra de alumina, o desvio de paralelismo obtido atendeu a especificação de projeto.

Com relação aos valores médios de Ra , estes foram menores que 0,08 μm para as amostras de aço ferramenta, atendendo as especificações de projeto. Já para a amostra de alumina, o valor médio de Ra foi de 0,70 μm após a lapidação e o polimento. Neste caso as especificações de projeto não foram atendidas. Findo as possibilidades de tratamento superficial disponíveis, optou-se por efetuar os testes nestas condições, visando à avaliação do efeito da rugosidade nos valores de f_{ab} . Maiores informações a respeito do controle dimensional e geométrico das amostras e do porta-amostra estão no Apêndice II.

3.3 Testes intermediários (perfilometria mecânica com contato em amostras de aço ferramenta e alumina)

Considerando os resultados obtidos nos testes preliminares, novos testes foram planejados e conduzidos (testes intermediários). Estes visavam determinar a força adequada a ser aplicada para realizar riscos em amostras de aço ferramenta e alumina e estudar o efeito do número de medições na repetibilidade dos valores de f_{ab} .

3.3.1 Determinação da força vertical a ser aplicada durante a realização dos riscos

Objetivando identificar a força a ser aplicada em cada caso, foi proposto um planejamento simples onde o fator força foi avaliado em três níveis como mostram as Tabs. 3.4 a 3.7.

Tabela 3.4 – Matriz do planejamento com um único fator (força) para indentador Vickers e amostra de aço ferramenta.

Experimento	Força (N)	Tipo do indentador
1	-1 (2)	Vickers
2	0 (3)	
3	+1 (4)	

Tabela 3.5 – Matriz do planejamento com um único fator (força) para indentador Rockwell-C e amostra de aço ferramenta.

Experimento	Força (N)	Tipo do indentador
1	-1 (20)	Rockwell-C
2	0 (25)	
3	+1 (30)	

Tabela 3.6 – Matriz do planejamento com um único fator (força) para indentador Vickers e amostra de alumina.

Experimento	Força (N)	Tipo do indentador
1	-1 (20)	Vickers
2	0 (25)	
3	+1 (30)	

Tabela 3.7 – Matriz do planejamento com um único fator (força) para indentador Rockwell-C e amostra de alumina.

Experimento	Força (N)	Tipo do indentador
1	-1 (20)	Rockwell-C
2	0 (25)	
3	+1 (30)	

De acordo com as matrizes de planejamento propostas nas Tabs. 3.4 a 3.7, o fator força foi investigado em três níveis. Três repetições foram efetuadas em cada caso, resultando em

nove experimentos para cada material com indentador Vickers e nove com indentador Rockwell-C.

Os ensaios de esclerometria retilínea foram realizados utilizando o equipamento apresentado na Fig. 3.2. O comprimento dos riscos em todos os casos foi de 5 mm e a velocidade de riscamento de 0,05 mm/s. As análises realizadas com os dados obtidos nos testes intermediários seguiram o protocolo adotado nos testes preliminares.

3.3.2 Avaliação do efeito do tamanho amostral (número de medições) nos valores de f_{ab}

Foi conduzido um estudo visando identificar quantas medições devem ser efetuadas para obtenção do fator f_{ab} com repetibilidade adequada. Para tanto foram efetuadas 30 medições, distanciadas a 100 μm uma da outra, em cada um dos riscos produzidos aplicando força de 3 N para indentador Vickers e 25 N para indentador Rockwell-C, totalizando 90 medições para cada condição. Em seguida, a média e o desvio padrão para um nível de confiança de 68,27 % foram estimados considerando diferentes tamanhos amostrais, a saber: 5, 10, 15, 20, 25 e 30. Ainda, foi determinado o coeficiente de variação do desvio padrão em relação ao valor médio de f_{ab} , em porcentagem.

Para verificar a influência da escolha aleatória dos perfis sobre os resultados, foram realizados 2 testes, a saber:

- 1) No primeiro caso, a escolha dos perfis não foi obtida aleatoriamente, e sim utilizando o critério da ordem de medição do perfil, sendo:
 - para 5 medições: 5 primeiros perfis;
 - para 10 medições: 10 primeiros perfis;
 - para 15 medições: 15 primeiros perfis;
 - para 20 medições: 20 primeiros perfis;
 - para 25 medições: 25 primeiros perfis;
 - para 30 medições: todos os 30 perfis analisados.

- 2) No segundo caso, a escolha dos perfis foi obtida aleatoriamente por sorteio sem reposição, sendo:
 - para 5 medições: sorteio de 5 perfis entre os 30 analisados, sem repetição;
 - para 10 medições: sorteio de 10 perfis entre os 30 analisados, sem repetição;
 - para 15 medições: sorteio de 15 perfis entre os 30 analisados, sem repetição;
 - para 20 medições: sorteio de 20 perfis entre os 30 analisados, sem repetição;

- para 25 medições: sorteio de 25 perfis entre os 30 analisados, sem repetição;
- para 30 medições: todos os 30 perfis analisados.

Os resultados decorrentes destas duas análises são apresentados no Apêndice III.

3.3.3 Obtenção de imagens via Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV

Os riscos obtidos nas diferentes condições avaliadas nos testes intermediários foram analisados qualitativamente, via microscópio eletrônico de varredura do fabricante Zeiss, modelo EVO MA 10, disponível no Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia. O equipamento também foi utilizado para localizar e registrar possíveis eventos adversos observados ao longo dos riscos obtidos, tais como a ocorrência de: falsos ombros, movimentação de material ao longo do risco, múltiplos mecanismos de desgaste, e microlascamentos. Para melhorar a visualização e a qualidade das imagens obtidas, a amostra de alumina passou por um processo de metalização com ouro, utilizando o equipamento modelo EM SCD050, do fabricante Leica.

3.4 Testes definitivos (amostras de aço ferramenta e liga de aço com alto teor de carbono e cromo – bloco-padrão)

3.4.1 Testes definitivos em amostras de aço ferramenta

A partir dos resultados obtidos nos testes preliminares e intermediários, foram acrescentadas novas etapas às metodologias utilizadas para efetuar os riscos bem como para determinar as áreas de interesse, visando obter uma maior repetibilidade dos valores de f_{ab} . Inicialmente, foram realizados em amostras de aço ferramenta. Cinco riscos com 5 mm de comprimento cada foram realizados usando o indentador Rockwell-C e cinco com o indentador Vickers. Todos os riscos foram espaçados de 1 mm. A força aplicada foi de 25 N e 3 N para os indentadores Rockwell-C e Vickers, respectivamente. Em todos os testes, a velocidade de deslocamento do indentador foi de 0,05 mm/s. Os equipamentos de esclerometria e de perfilometria utilizados também foram os mesmos, bem como o programa computacional para medições de áreas.

Nesta etapa, adicionalmente, antes da realização dos riscos, foi verificado o nivelamento da mesa do esclerômetro em duas direções perpendiculares. Para esse fim, foi utilizado um nível de bolha. O ajuste da mesa do esclerômetro foi controlado a partir dos parafusos instalados na base do equipamento. Para verificar o desvio do paralelismo da superfície da mesa (onde a amostra é afixada), em relação às guias do esclerômetro, um relógio comparador analógico foi usado, como mostra a Fig. 3.11a. Este equipamento tem resolução de 0,001 mm e faixa nominal de 1 mm.

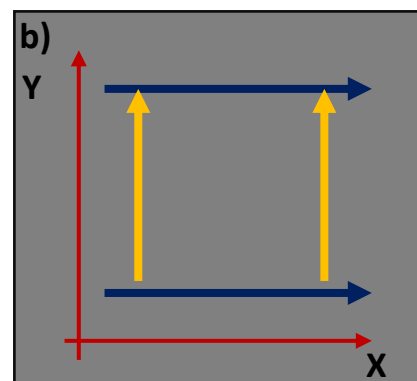
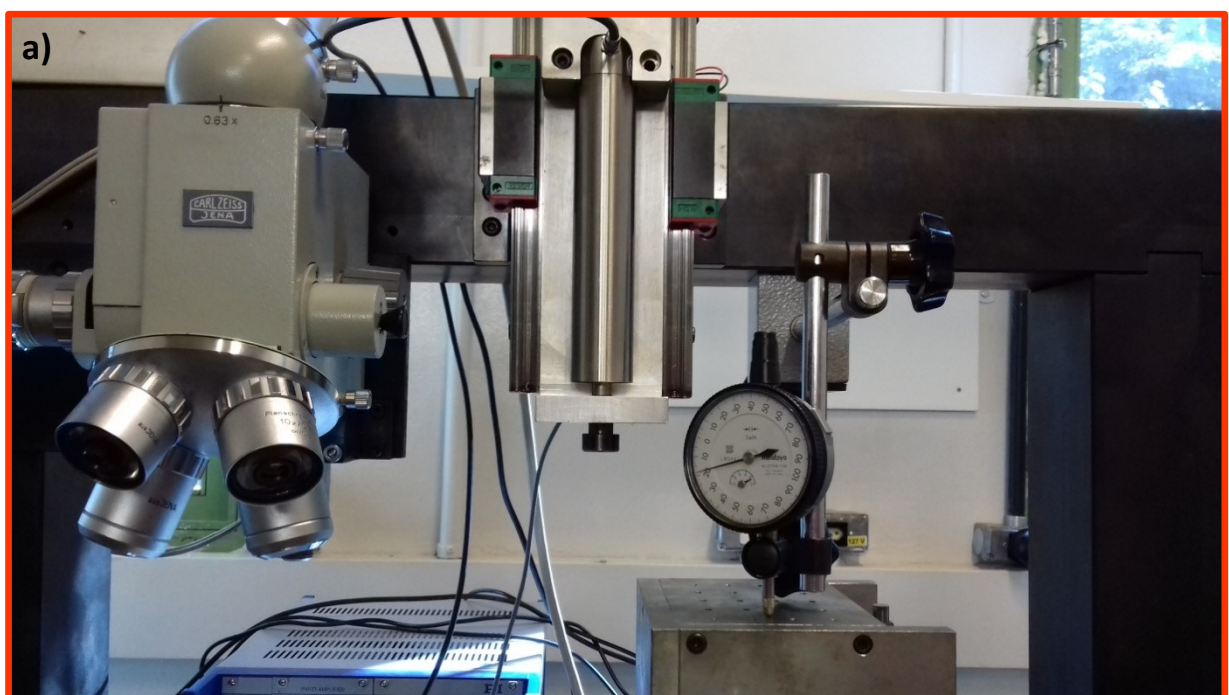


Figura 3.11 – Montagem experimental utilizada para verificação do paralelismo da superfície da mesa do esclerômetro em relação às suas guias (Fig. 3.11a). O desvio de paralelismo foi verificado em duas direções perpendiculares, conforme indicado na Fig. 3.11b.

O certificado de calibração declara uma incerteza expandida associada à calibração do relógio de $0,6 \mu\text{m}$, para um fator de abrangência de 2,30 e uma probabilidade de abrangência de 95 %. A mesa do esclerômetro foi movimentada 40 mm ao longo do eixo X , linhas azuis na Fig. 3.11b, enquanto o relógio comparador mediu o desvio do paralelismo. Este procedimento foi realizado várias vezes até que o desvio do paralelismo estivesse próximo de zero. Essa rotina foi realizada também em ralação ao eixo Y movimentando a mesa 30 mm (linhas amarelas). É importante mencionar que o ajuste da mesa do esclerômetro é uma tarefa demorada e trabalhosa, porém extremamente importante.

Em cada risco foram obtidos 25 perfis transversais usando o perfilômetro especificado anteriormente. A mesa de coordenadas XY e o perfilômetro especificados anteriormente foram colocados sob uma mesa inercial para evitar o efeito de vibração mecânica que é transmitida através do solo, Fig. 3.3. Foi utilizado um apalpador com ponta de diamante e raio de $2 \mu\text{m}$. O mesmo foi posicionado perpendicularmente ao sulco. As posições de medição do perfil foram espaçadas em $100 \mu\text{m}$.

A medição das áreas de interesse foi realizada usando o programa computacional Mountains Map Universal 3.0.11. Entretanto um protocolo para medição das áreas foi desenvolvido e adotado, conforme detalhado a seguir:

- ✚ todos os riscos foram submetidos à mesma ampliação;
- ✚ para cada risco, as áreas foram medidas individualmente;
- ✚ o operador de nivelamento foi aplicado individualmente;
- ✚ o ponto de transição foi posicionado considerando um comprimento previamente definido em ambos os lados do ponto central do risco. A adoção dessa prática é essencial para evitar tendências;
- ✚ a linha de referência foi posicionada automaticamente pelo programa computacional para evitar tendências.

Vale ressaltar que a definição do ponto de transição e a ampliação dependem das características dos riscos avaliados.

3.4.2 Validação da metodologia (protocolos) proposta para determinação do f_{ab} testando amostras de liga de aço com alto teor de carbono e cromo – bloco-padrão

A metodologia proposta para determinação do f_{ab} foi validada determinando o fator f_{ab} de riscos produzidos em blocos-padrão de classe de exatidão 0 (zero), fabricados pela Digimess e calibrados pela Mitutoyo. Os blocos-padrão são fabricados em uma liga de aço

especial com alto teor de carbono e cromo. Um tratamento térmico foi aplicado para garantir a excelente resistência ao desgaste e a estabilidade dimensional exigidas nestas peças.

Com o esclerômetro adequadamente nivelado foram realizados cinco riscos no bloco-padrão utilizando os indentadores Rockwell-C e Vickers. O comprimento dos riscos é de 5 mm com espaçamento de 1 mm. A força aplicada foi de 25 N e 3 N, respectivamente. Durante o processo de riscamento, o bloco-padrão foi afixado na mesa do esclerômetro, como mostra em detalhes a Fig. 3.12.

3.4.3 Caracterização dos materiais

A Tabela 3.8 mostra os valores médios da composição química da amostra de aço ferramenta e da liga de aço (bloco-padrão) (% em peso). Carbono e enxofre foram detectados pela técnica de absorção atômica (Leco® - CS444). Os outros elementos foram determinados usando um espectrômetro Bruker® S1 TITAN 600 FRX.

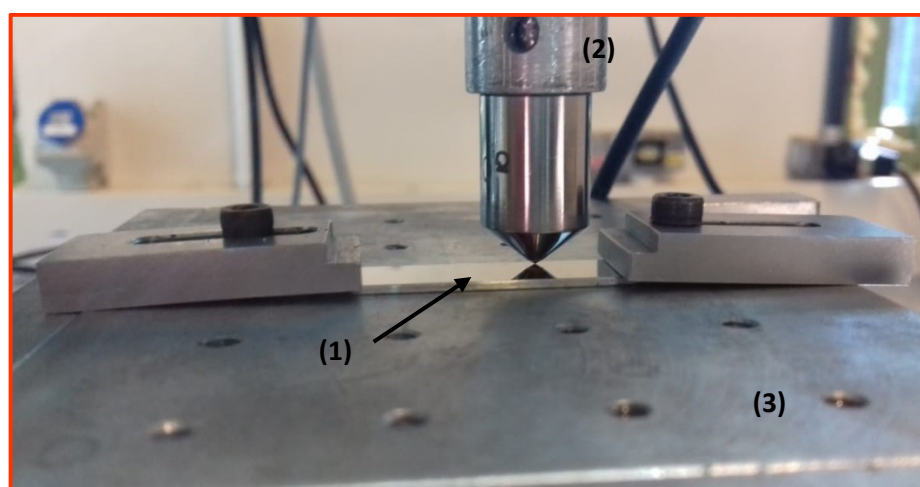


Figura 3.12 – Bloco-padrão (1) afixado na mesa do esclerômetro (3) durante o processo de riscamento com o indentador Rockwell-C (2).

Tabela 3.8 – Composição química da amostra de aço ferramenta e do bloco-padrão (% em peso).

	C	Cr	S	Mo	Pb	Ti	V	Ni	Cu	Mn	W	Fe
Aço ferramenta	0,83	4,955	0,01	1,204	-	-	0,550	-	-	0,126	1,241	91,837
Bloco-padrão	1,01	1,512	0,0095	0,033	0,072	0,132	0,144	0,186	0,224	0,375	-	97,284

A Tabela 3.9 mostra os valores médios de microdureza Vickers da amostra de aço ferramenta e do bloco-padrão utilizados nos experimentos. A incerteza expandida associada (95 %) também é mostrada nesta tabela. A microdureza foi medida utilizando um microdurômetro Shimadzu HVM. Este equipamento possui resolução de 1 HV. A incerteza expandida associada à calibração do microdurômetro é de 2 HV para um fator de abrangência k de 2,00 e uma probabilidade de abrangência de 95 %. Durante as medições foi aplicada uma força de 500 g, com um tempo de permanência de 15 segundos. Dez análises foram realizadas para cada amostra.

Tabela 3.9 – Microdureza média da amostra de aço ferramenta e do bloco-padrão. Incerteza expandida (U) para uma probabilidade de abrangência de 95 %.

	Microdureza (HV)	U (95.45 %) (HV)
Aço ferramenta	714	7
Bloco-padrão	934	7

As microestruturas obtidas no aço ferramenta e no bloco-padrão são mostradas na Fig. 3.13. Na amostra de aço ferramenta (Fig. 3.13a) observa-se a presença de agulhas de martensita e austenita retida, enquanto que no bloco-padrão (Fig. 3.13b) é possível visualizar uma microestrutura martensítica/bainítica com a presença de austenita retida.

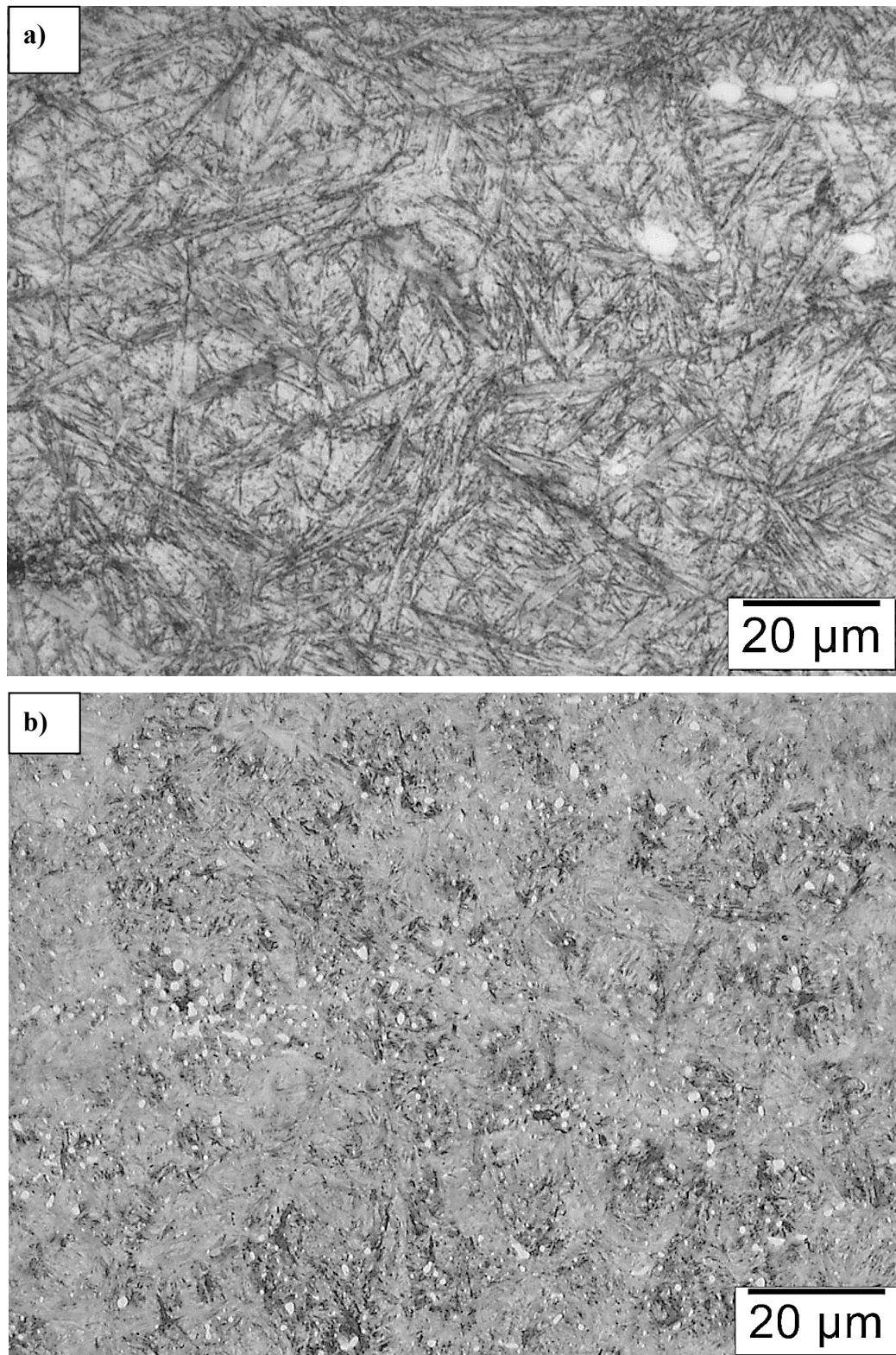


Figura 3.13 – Imagens da microestrutura da amostra de aço ferramenta (3.13a) e do bloco-padrão (3.13b), obtidas por meio de um microscópio óptico.

3.5 Determinação do f_{ab} utilizando medição óptica sem contato (amostra de liga de aço com alto teor de carbono e cromo – bloco-padrão)

Visando a comparação dos valores de f_{ab} obtidos utilizando perfilometria com contato e medição óptica sem contato, nesta etapa, os perfis dos riscos realizados na amostra de liga de aço com alto teor de carbono e cromo (bloco-padrão) foram obtidos por meio do microscópio Alicona Infinite Focus SL. Este equipamento se encontra no Laboratório de Processos de Fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos. Os riscos avaliados foram aqueles obtidos nos testes definitivos. Desta forma, foram considerados 10 riscos, dos quais 5 foram realizados com indentador Rockwell-C e 5 realizados com indentador Vickers. Para cada um dos 10 riscos foram efetuadas cinco medições em duas dimensões visando obter os perfis transversais dos mesmos. Durante a medição foi utilizada uma lente com aumento de 50x. A varredura com o feixe de luz foi realizada o mais perpendicular possível ao risco. As medições foram espaçadas 100 μm uma da outra. Para o posicionamento do risco o equipamento utiliza dois eixos de referência, perpendiculares entre si, de forma a garantir um melhor alinhamento e posicionamento do risco avaliado. As coordenadas dos pontos que definem cada perfil foram obtidas e armazenadas para posterior processamento pelo Mountains Map.

O microscópio Alicona Infinite Focus SL possui resolução vertical (eixo Z) de 20 nm, para uma lente de aumento igual a 50x e faixa nominal de 50 mm, 50 mm e 155 mm para os eixos X , Y e Z , respectivamente. O certificado de calibração do equipamento declara uma incerteza expandida associada ao eixo Z U_{vert} igual a 1,0 μm ($k_{vert} = 2,00$) e para a medição da rugosidade a incerteza U_{rug} é igual a 0,035 μm ($k_{rug} = 2,00$). A probabilidade de abrangência é de 95 % em todos os casos.

Tendo em conta o elevado poder de diagnóstico do microscópio Alicona Infinite Focus SL e a rapidez na obtenção dos resultados, também foram obtidos 2000 perfis para cada um dos riscos avaliados (10 riscos). Em cada caso um perfil médio de cada risco foi gerado e as coordenadas dos pontos que definem este perfil foram identificadas e armazenadas para posterior determinação do f_{ab} .

O valor de f_{ab} foi determinado para todos os perfis gerados usando o programa computacional Mountains Map Universal 3.0.11. O protocolo desenvolvido para medição das áreas foi adotado. Assim sendo, todos os riscos foram submetidos à mesma ampliação; para cada risco, as áreas foram medidas individualmente; o nivelamento foi efetuado

individualmente; o ponto de transição foi posicionado considerando o comprimento definido anteriormente; e a linha de referência foi posicionada automaticamente pelo programa computacional.

A incerteza associada ao f_{ab} foi estimada conforme apresentado anteriormente, utilizando a Eq. (3.12). O modelo matemático mostrado na Eq. (3.21) foi utilizado para avaliar a incerteza associada às áreas A_v , A_1 e A_2 por meio da medição óptica sem contato. Este modelo é similar ao apresentado para a medição com contato, Eq. (3.6), porém a incerteza associada à calibração do perfilômetro é substituída pela incerteza associada à calibração do microscópio (ΔC_M). Ainda foi acrescentada uma variável de entrada referente à ampliação da lente de aumento utilizada, que neste caso foi de 50x.

$$A = \bar{L} + \Delta R + \Delta C + \Delta C_M + \Delta A \quad (3.21)$$

Na Equação (3.21), $\bar{L}$ é a média dos valores de áreas indicados pelo programa Mountains Map, considerando os ciclos de medição realizados; ΔR representa a correção associada à resolução do programa; ΔC é a correção associada à calibração do programa; ΔC_M é a incerteza associada à calibração do microscópio e ΔA é a incerteza devido à ampliação da lente de aumento utilizada.

Aplicando a lei de propagação da incerteza na Eq. (3.21) e calculando as derivadas parciais, a Eq. (3.22) foi obtida. Esta equação permite estimar a incerteza padrão combinada associada às áreas de interesse obtidas por meio do microscópio.

$$u_c^2(A) = u^2(\bar{L}) + u^2(\Delta R) + u^2(\Delta C) + u^2(\Delta C_M) + u^2(\Delta A) \quad (3.22)$$

A incerteza padrão associada à variabilidade dos valores indicados pelo Mountains Map e aquela associada à resolução do programa (R) foram estimadas como mostram as Eqs. (3.8) a (3.9) e Eq. (3.11), respectivamente. Para a determinação da incerteza associada à calibração do microscópio, foi adotada distribuição *t-Student*, conforme indicado na Eq. (3.23). Nesta equação, $U(C_M)$ é a incerteza expandida associada à calibração do microscópio e k_M é o fator de abrangência correspondente.

$$u(\Delta C_M) = U(C_M) / k_M \quad (3.23)$$

A avaliação da incerteza padrão associada à ampliação da lente foi efetuada considerando uma distribuição retangular com infinitos graus de liberdade, conforme mostra a Eq. (3.24). Foi adotado que a ampliação da lente provoca uma incerteza da ordem de 0,01 %.

$$u(\Delta A) = 0,01\% \bar{L} / \sqrt{3} \quad (3.24)$$

Por fim, a incerteza associada ao fator f_{ab} foi estimada conforme o modelo matemático exposto na Eq. (3.12).

A comparação dos resultados obtidos por meio da perfilometria mecânica com contato e da medição óptica sem contato foi conduzida. Na discussão decorrente se destacam as vantagens e limitações de cada método de medição. Por fim, a metodologia proposta visando à melhoria da repetibilidade do fator de remoção de material (f_{ab}) é detalhada.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos, divididos nas seguintes etapas: fontes de erros, calibração do programa Mountains Map, testes preliminares, testes intermediários e testes definitivos (realizados com perfilômetro mecânico com contato e microscópio óptico).

4.1 Fontes de erros

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram os diagramas de causa e efeito, com as fontes de erros observadas para o cálculo do fator f_{ab} , nas medições utilizando o perfilômetro mecânico e o microscópio óptico, respectivamente. As fontes de erros foram agrupadas a partir das suas origens causadoras, sendo aqui consideradas: as relacionadas às condições da amostra, as relativas ao ambiente de medição, de acordo com o tipo do sistema de medição utilizado (mecânico ou óptico), as inerentes às condições estabelecidas no ensaio de riscamento (esclerometria) e aquelas relacionadas à determinação e cálculo das áreas de interesse.

A partir do exposto, na Tabela 4.1 são apresentadas as principais fontes de erros observadas na determinação do fator f_{ab} , bem como as alternativas propostas para reduzir seus efeitos. Na Tabela 4.1 se observa que são diversas as fontes de erro que podem contribuir para a baixa repetibilidade dos valores do fator f_{ab} e que a maioria delas é de primeiríssima importância. Algumas dessas fontes foram avaliadas de forma individual, enquanto que para outras foram tomadas providências para minimizar seus efeitos, quando possível. Conclui-se, portanto, que existe a necessidade de desenvolver um protocolo para a realização dos ensaios

esclerométricos, bem como desenvolver um procedimento de medição para determinar os valores numéricos das variáveis utilizadas no cálculo do fator f_{ab} .



Figura 4.1 – Diagrama de causa e efeito, com as principais fontes de erros observadas na determinação do fator f_{ab} utilizando perfilômetro mecânico (medição com contato).



Figura 4.2 – Diagrama de causa e efeito, com as principais fontes de erros observadas na determinação do fator f_{ab} utilizando o microscópio óptico.

Tabela 4.1 – Principais fontes de erros observadas na determinação do fator f_{ab} , bem como as alternativas propostas para reduzir o efeito destas fontes.

Fonte de erro	Alternativa
Direção de apalpamento durante a medição	Projetar e fabricar um dispositivo para diminuir o desvio de perpendicularidade entre o risco e a direção de apalpamento
Preparação da amostra	Indicar tolerâncias macrogeométricas de planeza e de paralelismo Indicar tolerância para o parâmetro Ra Capacitação do operador
Filtros utilizados durante a análise	Usar apenas o Operador <i>LEVELING</i> para nivelamento do perfil do risco durante a obtenção das áreas de interesse
Definição da linha de referência	Determinar o posicionamento da linha de referência por meio do programa computacional para reduzir possíveis tendências do operador
Definição do ponto de transição entre as áreas deformadas pelo indentador e a superfície original	Definir a priori uma distância a ambos os lados do centro do sulco e adotar essa distância durante todas as medições
Força aplicada	Fazer um estudo prévio para determinar a força a ser aplicada para realização dos riscos em cada material
Número de medições	Fazer um estudo para determinar qual o tamanho amostral adequado de forma a reduzir os efeitos da variabilidade das leituras (usar como critério a estabilidade do desvio padrão amostral)
Variação das condições de repetibilidade	Definir e documentar um protocolo para realização dos riscos e das medições.
Calibração	Calibrar todos os sistemas de medição, incluindo o programa computacional, de forma a contribuir com a rastreabilidade metrológica do f_{ab}

4.2 Resultados da calibração do programa Mountains Map

A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos durante a calibração do programa Mountains Map. De acordo com a Tab. 4.2, o programa Mountains Map apresentou elevada exatidão e boa repetibilidade. A incerteza expandida associada é 0,03 % em relação ao valor médio da área avaliada. O erro máximo associado à calibração do programa foi de $0,02 \mu\text{m}^2$.

Tabela 4.2 – Resultados obtidos durante a calibração do programa Mountains Map.

Parâmetro	Média (μm^2)	Desvio padrão 68,27 % (μm^2)
Valores obtidos via Mountains Map	72,00	0
Valores obtidos analiticamente	72,00	0
Estimativa do erro sistemático	0	
Repetibilidade (95 %)	0	
Incerteza expandida (95 %)	0,02 μm^2 para fator de abrangência $k = 2,78$	
Erro máximo	0,02 μm^2	

4.3. Resultados dos testes preliminares (perfilometria mecânica com contato em amostras de aço ferramenta e alumina)

4.3.1 Resultados referentes às medições dos perfis transversais dos riscos, utilizando perfilômetro mecânico com contato (testes preliminares)

Na Figura 4.3 são apresentados cinco perfis transversais efetivos obtidos nos riscos realizados na amostra de aço ferramenta (Amostra 1) referentes aos experimentos 5, 6, 7, 8, 13, 14, 15 e 16, incluindo réplicas e trélicas. A partir da Fig. 4.3 se conclui que os riscos obtidos com o indentador Vickers (experimentos 5 e 6) se confundem com as microirregularidades da superfície, sendo indicativo de que a força aplicada durante o teste de 1 N não foi adequada. Os experimentos 7 e 8 (com força de 2 N) permitiram a obtenção de riscos nítidos, que melhor possibilitaram a quantificação do fator f_{ab} .

Na Figura 4.3 se observa ainda que as forças aplicadas de 1 N e 2 N não foram adequadas para produzir riscos nítidos quando o indentador Rockwell-C foi utilizado nas amostras de aço ferramenta. Os riscos obtidos nestas condições de teste exibiram valores de ordenada similares aos das microirregularidades, que caracterizam a rugosidade da superfície de teste da amostra. As diferenças observadas entre os riscos produzidos pelo indentador Vickers e o Rockwell-C para força de 2 N pode ser atribuído a maior área de contato entre o indentador Rockwell-C e a superfície da amostra.

O perfil obtido durante a medição 5 diferiu de forma significativa dos outros perfis, o que sugere que possa ter havido falha durante a medição. Fazendo uma análise desse perfil interpreta-se que houve um erro no posicionamento do apalpador, uma vez que são observados apenas alguns riscos com características dos experimentos 5 e 6. Desta forma, este perfil foi excluído das análises.

Na Figura 4.4 são apresentados os perfis transversais efetivos dos três riscos realizados na amostra de aço ferramenta nas condições do experimento 7, utilizando velocidade de riscamento de 0,01 mm/s, força de 2 N e indentador Vickers. Os perfis apresentados na Fig. 4.4 mostram que em todos os casos houve movimentação de material para as laterais do sulco formado, com picos com altura da ordem de 0,5 μm e ombros discretamente desiguais, descartando a ocorrência de microcorte ideal. As profundidades dos sulcos produzidos também foram da ordem de 0,5 μm .

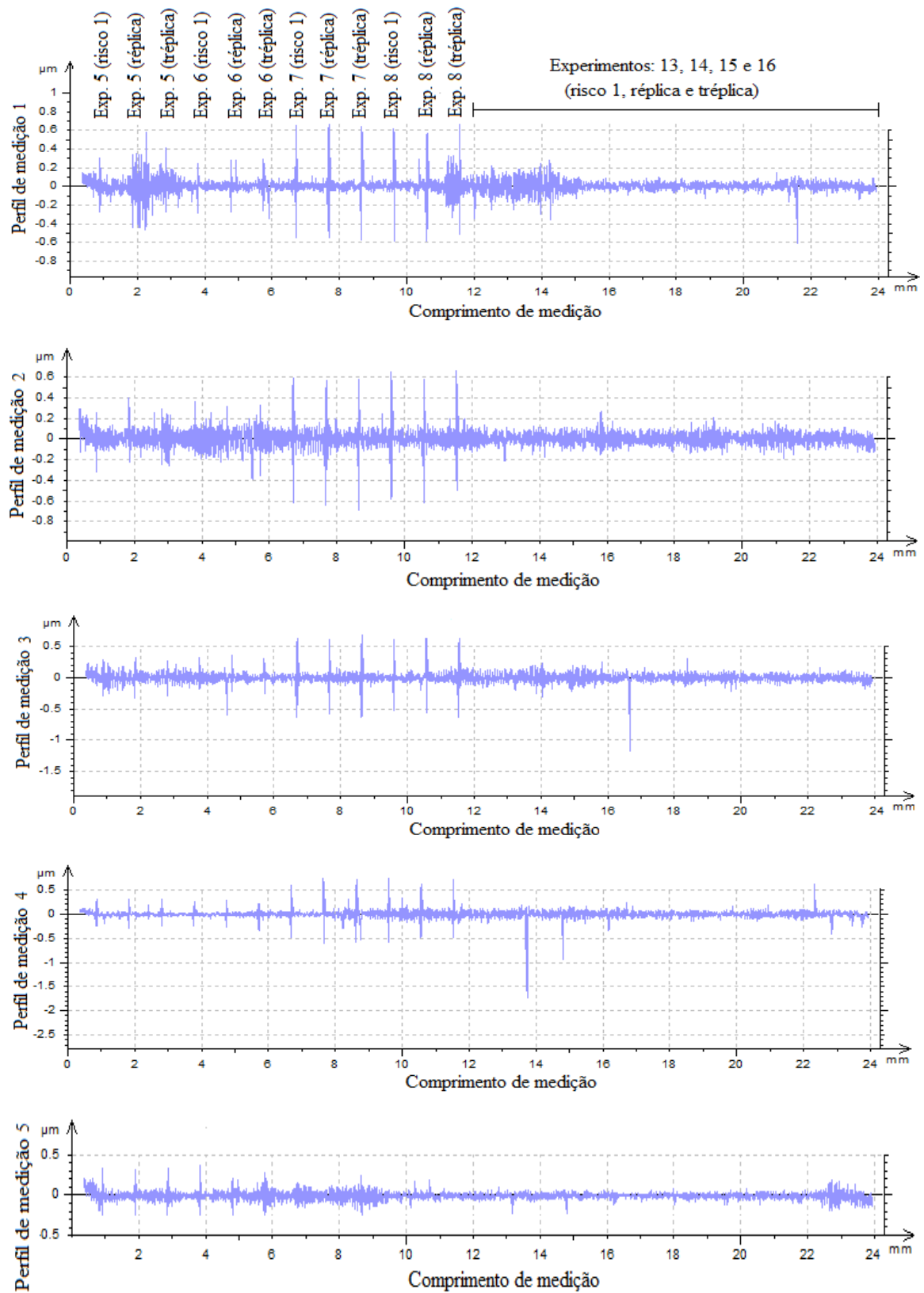
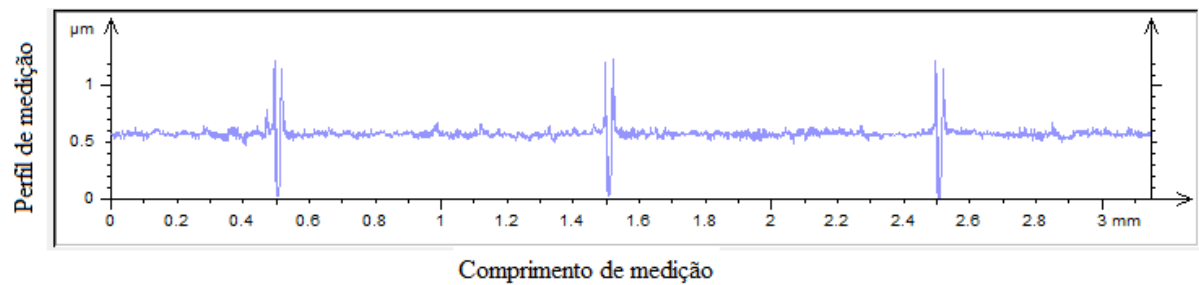
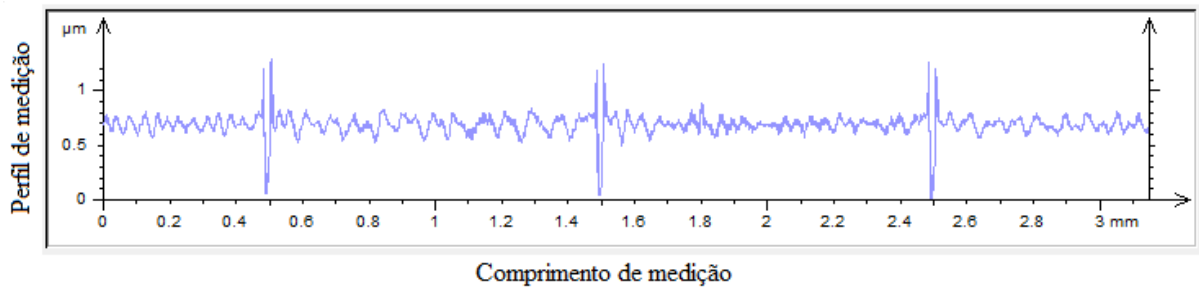


Figura 4.3 – Perfis transversais efetivos durante as cinco medições efetuadas nos riscos realizados na amostra de aço ferramenta, referente aos experimentos 5, 6, 7 e 8 (indentador

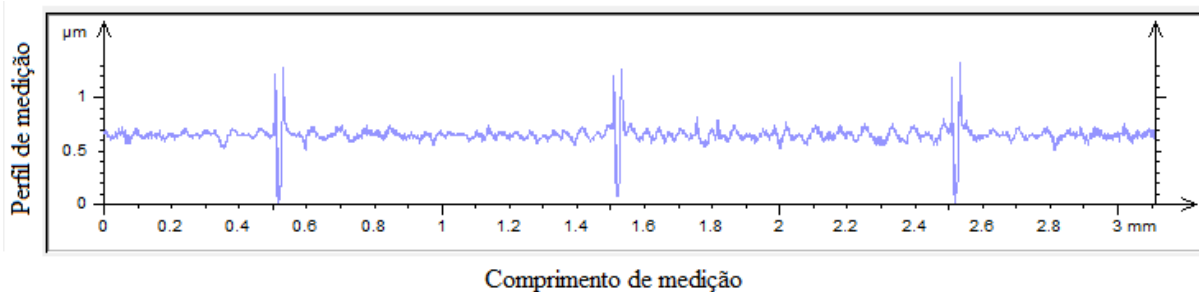
Vickers) e 13, 14, 15 e 16 (indentador Rockwell-C) contendo réplicas e tréplicas. Medição com contato.



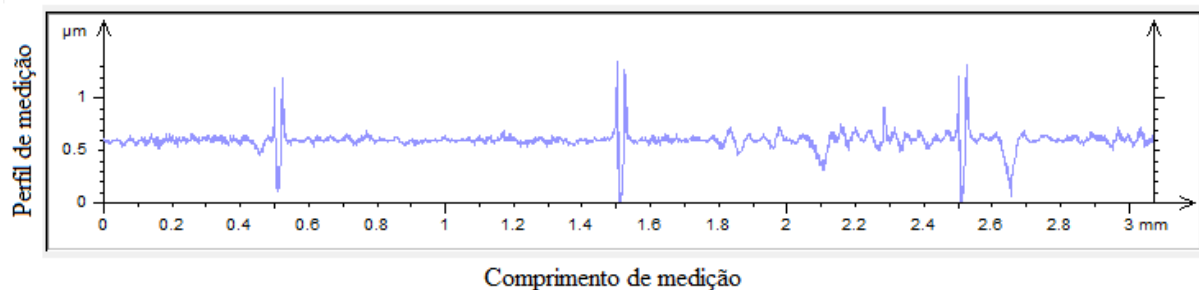
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.4 – Perfil transversal efetivo dos riscos do experimento 7, contendo réplica e tréplica: medição 1 (4.4a), medição 2 (4.4b), medição 3 (4.4c) e medição 4 (4.4d). Medição com contato.

Na Figura 4.5, são mostrados todos os perfis obtidos durante a medição do primeiro risco realizado nas condições do experimento 7, contendo o valor das áreas de interesse para o cálculo do fator f_{ab} . Observa-se, na Fig. 4.5, que as áreas de formação de sulco foram superiores às áreas de movimentação lateral em todos os casos, o que descarta a ocorrência de microsulcamento ideal.

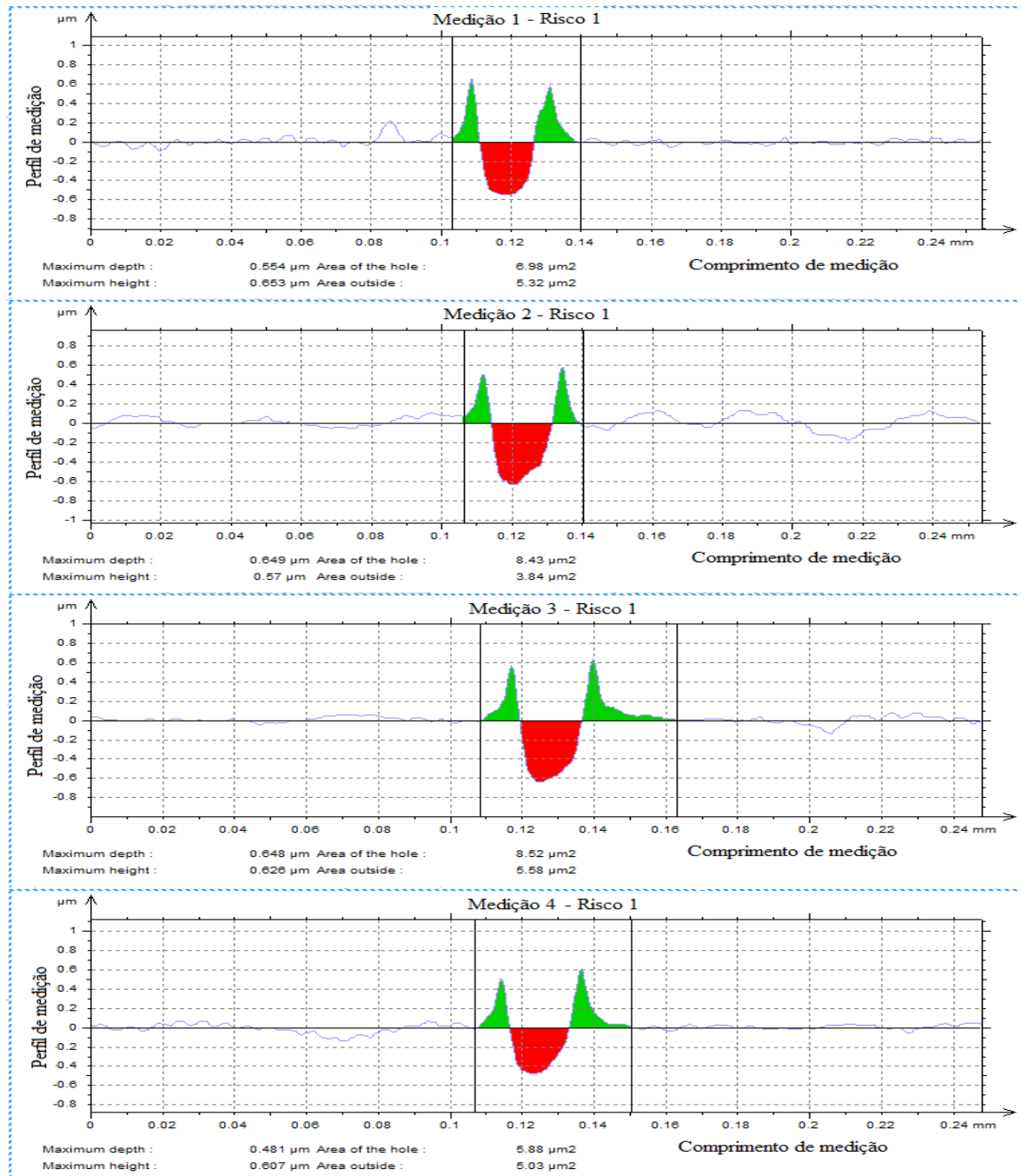


Figura 4.5 – Perfis do primeiro risco do experimento 7, com destaque para as áreas utilizadas no cálculo do fator f_{ab} . Medição com contato.

A Tabela 4.3 mostra os resultados obtidos para todas as condições investigadas. Estes incluem os valores das áreas de interesse e de f_{ab} calculados a partir dos perfis dos riscos dos experimentos 5, 6, 7 e 8. A média e o desvio-padrão (68,27 %) associados ao f_{ab} também são apresentados

Tabela 4.3 – Áreas de interesse, valores de f_{ab} calculados para os quatro perfis dos demais riscos do experimento 5 a 8 (réplica e tréplica), incluindo a média aritmética e o desvio-padrão obtido (68,27 %).

Experimento 5						
Risco	Perfil de Medição	Área de material removido (µm²)	Área de material deformado para as laterais do sulco (µm²)	Fator f _{ab}	Média Fator f _{ab}	Desvio padrão (68,27 %)
1	1	2,87	1,24	0,568	0,434	0,156
	2	3,50	1,67	0,523		
	3	2,18	1,25	0,427		
	4	2,58	2,02	0,217		
Réplica	1	4,77	3,26	0,317	0,240	0,230
	2	2,28	2,49	-0,092		
	3	2,89	2,04	0,294		
	4	3,23	1,81	0,440		
Tréplica	1	1,94	2,49	-0,284	0,223	0,424
	2	2,96	1,73	0,416		
	3	3,44	1,06	0,692		
	4	2,53	2,36	0,067		
Experimento 6						
1	1	2,74	1,68	0,387	0,137	0,264
	2	1,68	1,87	-0,113		
	3	1,59	1,70	-0,069		
	4	2,48	1,63	0,343		
Réplica	1	3,16	1,63	0,484	0,354	0,148
	2	2,33	1,50	0,356		
	3	2,45	2,09	0,147		
	4	2,74	1,56	0,431		
Tréplica	1	2,77	1,74	0,372	0,478	0,111
	2	4,13	1,88	0,545		
	3	2,67	1,61	0,397		
	4	3,71	1,49	0,598		

Tabela 4.3 – Áreas de interesse, valores de f_{ab} calculados para os quatro perfis dos demais riscos do experimento 5 a 8 (réplica e tréplica), incluindo a média aritmética e o desvio-padrão obtido (68,27 %). Continuação.

Experimento 7						
Risco	Perfil de Medição	Área de material removido (µm²)	Área de material deformado para as laterais do sulco (µm²)	Fator f _{ab}	Média Fator f _{ab}	Desvio padrão (68,27 %)
1	1	6,98	5,32	0,238	0,318	0,172
	2	8,43	3,84	0,544		
	3	8,52	5,58	0,345		
	4	5,88	5,03	0,144		
Réplica	1	7,24	5,46	0,246	0,346	0,169
	2	9,26	3,71	0,599		
	3	7,37	5,25	0,288		
	4	7,71	5,76	0,253		
Tréplica	1	7,56	5,09	0,327	0,352	0,201
	2	9,61	4,28	0,555		
	3	8,02	4,47	0,443		
	4	7,41	6,80	0,082		
Experimento 8						
1	1	7,71	4,10	0,468	0,346	0,168
	2	8,01	4,24	0,471		
	3	6,75	4,52	0,330		
	4	7,32	6,49	0,113		
Réplica	1	7,70	5,35	0,305	0,352	0,075
	2	7,39	4,01	0,457		
	3	7,66	5,43	0,291		
	4	6,48	4,19	0,353		
Tréplica	1	7,00	5,38	0,231	0,247	0,013
	2	6,73	5,07	0,247		
	3	7,84	5,91	0,246		
	4	6,47	4,77	0,263		

Na Tabela 4.3 se observa que para os riscos efetuados com indentador Vickers, em 17 % dos casos os valores de f_{ab} foram negativos, uma vez que a área do material deformado para as laterais do sulco foi maior que aquela removida. Este resultado sugere uma incompatibilidade, pois é fisicamente impossível de ocorrer. Resultados similares foram obtidos por Franco (2015) testando aço AISI 1070. Em contraste, para os riscos efetuados com o indentador Rockwell-C, todos os valores de f_{ab} foram positivos.

O desvio padrão associado, em alguns casos ultrapassou o valor da média, indicando que estes resultados são metrologicamente inadequados e não permitem avaliar os mecanismos de desgaste de forma confiável. Resultados de f_{ab} calculados com significativa dispersão foram encontrados nos trabalhos de Barradas et al., 2001; Lindroos et al., 2015; Franco, 2015; Pöhl et al., 2016 e Franco; Sinatora, 2017. Diversas foram as causas apresentadas por estes e outros autores, conforme mostram os diagramas de causa e efeitos apresentados nas Figs. 4.1 e 4.2.

Nas condições experimentais avaliadas nos testes preliminares, observou-se que a adoção de tolerâncias macro e microgeométricas para fabricação das amostras não foi suficiente para garantir a repetibilidade dos valores de f_{ab} requerida. Desta forma, alternativas foram propostas para os testes subsequentes, de forma a avaliar e reduzir o efeito de outras fontes de erros.

Os experimentos 5 e 6 (realizados com indentador Vickers e força de 1 N) apresentaram formação de riscos menores e interferência entre os perfis formados e a topografia da superfície da amostra, Fig. 4.3. Este fato dificultou a identificação das áreas de movimentação de material (remoção e deformação). Os valores de f_{ab} calculados apresentaram valores médios discrepantes entre 0,137 e 0,478 e maior dispersão (com desvio padrão representando, no pior dos casos, 192 % para o risco 1 do experimento 6) quando comparados com os experimentos 7 e 8. Os experimentos 7 e 8, realizados com indentador Vickers e força de 2 N, se mostraram mais semelhantes (com valores médios entre 0,247 e 0,352). Nestas condições, os valores de f_{ab} também apresentaram baixa repetibilidade, com desvio padrão representando 57 % na pior condição (tréplica do experimento 7).

A Figura 4.6 mostra de forma resumida os valores médios de f_{ab} obtidos nas condições dos experimentos 5-8 na Amostra 1 de aço ferramenta. O desvio padrão associado (68,27 %) também é apresentado. Observa-se na Fig. 4.6 que um aumento da força (de 1 N para 2 N) provocou uma diminuição significativa dos valores de desvio-padrão. Da mesma forma, que o aumento da velocidade de riscamento de 0,01 mm/s para 0,05 mm/s acarretou um efeito similar. Por sua vez, os valores médios de f_{ab} não exibiram variações significativas, embora para a força de 2 N foram, em média, maiores. A diminuição dos valores de desvio padrão com o aumento da força pode ser justificada devido à menor interferência da topografia da superfície da amostra com o evento formado durante o riscamento.

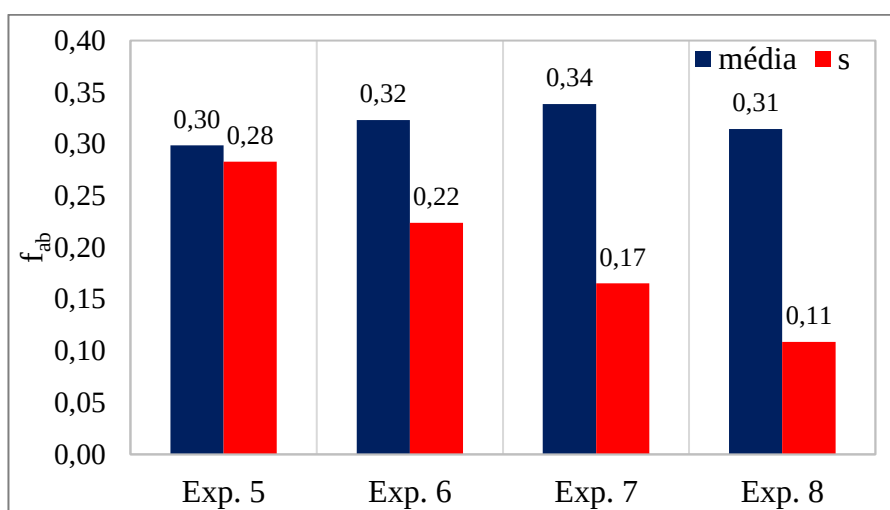


Figura 4.6 – Valores médios de f_{ab} obtidos nas condições 5-8 na Amostra 1 de aço ferramenta considerando as quatro medições efetuadas no primeiro risco, na réplica e na tréplica, totalizando 12 valores, bem como o desvio padrão associado (68,27 %). Medição com contato.

Com relação à amostra de alumina, os valores de força de 1 N e 2 N propostos no planejamento fatorial não foram suficientes para obter riscos nítidos tanto com o indentador Vickers quanto com o Rockwell-C. Desta forma, os eventos formados não se sobrepuseram às microirregularidades da superfície, e não foi possível identificar trincas nem os contornos dos perfis transversais obtidos e, conseqüentemente, efetuar sua quantificação. Sugere-se que houve predomínio da deformação elástica, sendo que as possíveis deformações plásticas existentes foram da mesma ordem da rugosidade da peça. Os resultados obtidos nos testes preliminares com amostras de aço ferramenta e alumina não permitiram a aplicação da análise de variância ANOVA.

4.4 Resultados dos experimentos intermediários (perfilometria mecânica com contato em amostras de aço ferramenta e alumina)

4.4.1 Valores de f_{ab} obtidos na amostra de aço ferramenta

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram os valores de f_{ab} obtidos nas três condições avaliadas considerando os indentadores Vickers e Rockwell-C, respectivamente. Os números de 1 a 9 representam cada um dos riscos efetuados (três para cada condição). A partir das Figs. 4.7 e 4.8, conclui-se que, quando usado o indentador Vickers, o valor médio de f_{ab} exibiu uma

tendência de crescimento na medida em que a força aumentou de 2 N para 4 N. Por sua vez, para os riscos efetuados com o indentador Rockwell-C se observou um efeito contrário, de diminuição do valor de f_{ab} com o aumento da força. Para facilitar o entendimento, a Fig. 4.9 mostra os valores médios de f_{ab} e o desvio padrão (68,27 %) obtidos em função dos valores de força aplicada.

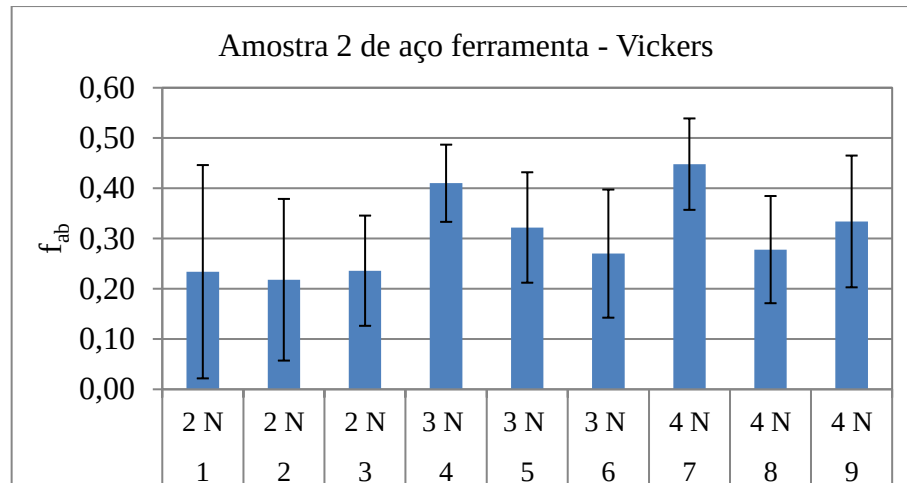


Figura 4.7 – Valores médios de f_{ab} obtidos considerando a força aplicada na Amostra 2 de aço ferramenta utilizando indentador Vickers. Desvio padrão como sendo a barra de erros para um nível de confiança de 68,27 %. Considerando apenas os dados das cinco medições. Medição com contato.

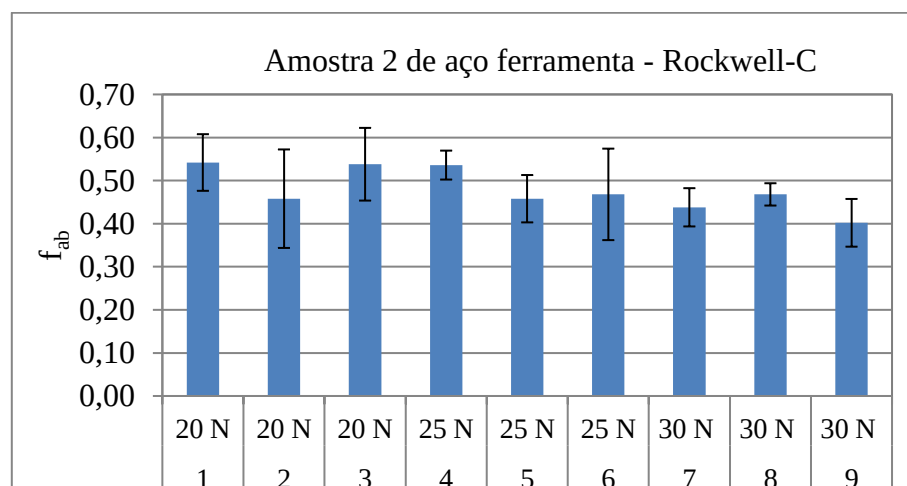


Figura 4.8 – Valores médios de f_{ab} obtidos considerando a força aplicada na Amostra 2 de aço ferramenta utilizando indentador Rockwell-C. Desvio padrão como sendo a barra de erros para uma confiabilidade de 68,27 %. Considerando apenas os dados das cinco medições. Medição com contato.

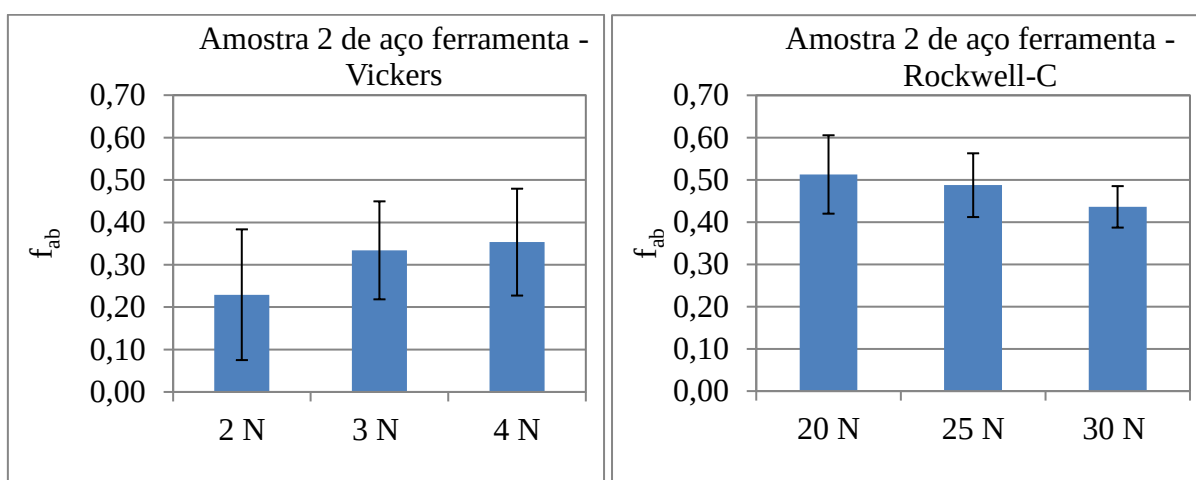


Figura 4.9 – Valores médios de f_{ab} obtidos em função da força aplicada na Amostra 2 de aço ferramenta utilizando indentadores Vickers e Rockwell-C. Desvio padrão como sendo a barra de erros para um nível de confiança de 68,27 %. Medição com contato.

Na Figura 4.9 se observa que as barras de erros que representam o desvio padrão se encontram sobrepostas para quase todas as condições avaliadas. Entretanto, o quadro da análise de variância ANOVA, indicou que o fator força provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores de f_{ab} , como mostra a Tab. 4.4. O p -valor foi menor que 0,05 para ambos os planejamentos experimentais propostos. A normalidade dos resíduos foi verificada por meio do gráfico de probabilidade normal mostrado na Fig. 4.10.

Tabela 4.4 – Resultado da ANOVA para o planejamento simples.

Indentador	Fator	Soma quadrática	Graus liberdade	de Média quadrática	F -valor	p -valor
Vickers	Intercepto	4,201389	1	4,201389	237,8187	0,000000
	Força	0,133524	2	0,066762	3,7791	0,030962
	Erro	0,741987	42	0,017666		
Rockwell-C	Intercepto	10,31048	1	10,31048	1851,021	0,000000
	Força	0,04577	2	0,02289	4,109	0,023456
	Erro	0,23395	42	0,00557		

O desvio padrão se mostrou mais dependente da força quando o indentador Rockwell-C foi utilizado (Fig. 4.9b). Neste caso, a redução do valor do desvio padrão com a variação da força de 20 para 30 N foi de 47 %. Este fato é indicativo da importância da escolha adequada da força a ser aplicada durante o processo de riscamento.

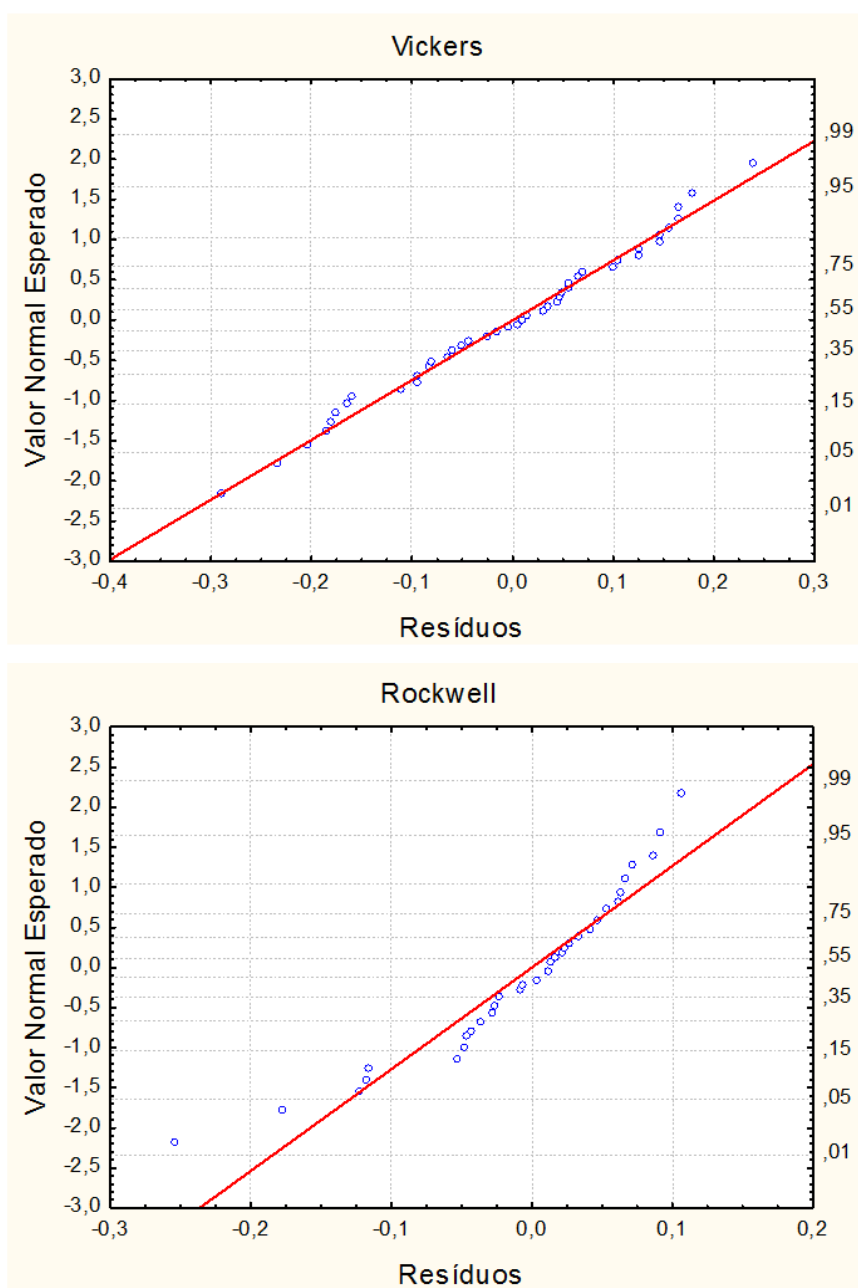


Figura 4.10 – Gráficos de probabilidade normal dos resíduos para o planejamento simples proposto.

A partir das figuras obtidas via MEV foi possível identificar que os riscos realizados na amostra de aço ferramenta utilizando o indentador Rockwell-C se mostraram homogêneos, Fig. 4.11a. Em relação aos riscos realizados com indentador Vickers, observou-se uma maior deformação plástica nas bordas do sulco, com o aparecimento de ombros mais expressivos e certa heterogeneidade quanto aos eventos formados, Fig. 4.11b.

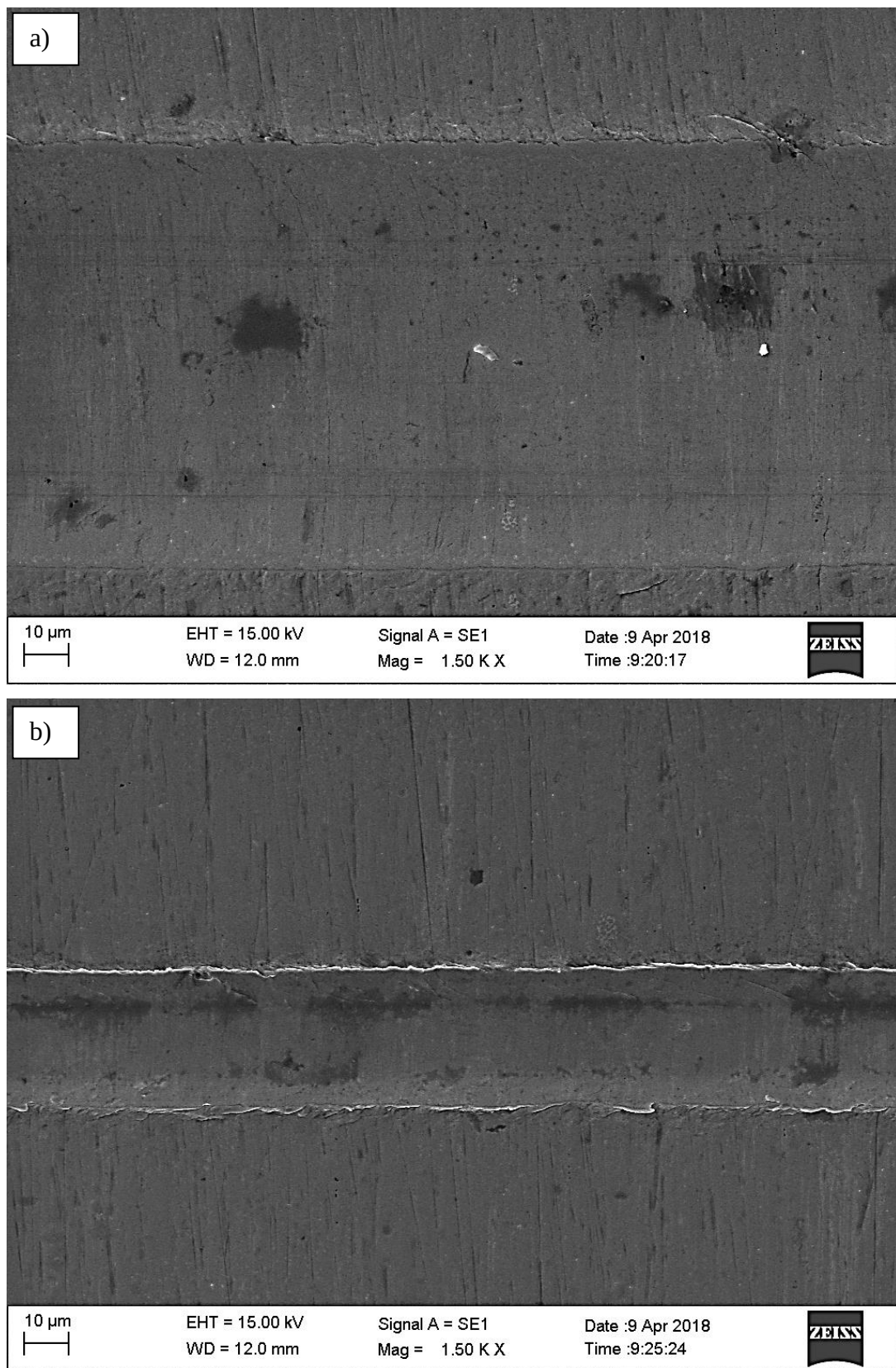


Figura 4.11 – Imagens obtidas utilizando MEV, referentes aos riscos realizados na amostra de aço ferramenta, utilizando indentador Rockwell-C (a) e Vickers (b).

Para a amostra de alumina, novamente as forças aplicadas durante o ensaio de esclerometria retilínea e indentador Rockwell-C não foram capazes de produzir riscos nítidos, pois os mesmos não se sobrepuseram às microirregularidades presentes na superfície da amostra. Ressalta-se que a força aplicada correspondeu ao limite da máquina de esclerometria retilínea utilizada (30 N). Para o indentador Vickers e amostra de alumina, os sulcos formados ficaram visíveis nas seções transversais obtidas, porém a área de material removido foi maior que a correspondente pela ação do indentador. Este fato é indicativo da ocorrência de microtrincamento nas laterais do sulco, o que prejudicou o cálculo do fator f_{ab} (Fig. 4.12). Desta forma, os resultados obtidos novamente não permitiram a aplicação das análises estatísticas para esse material.

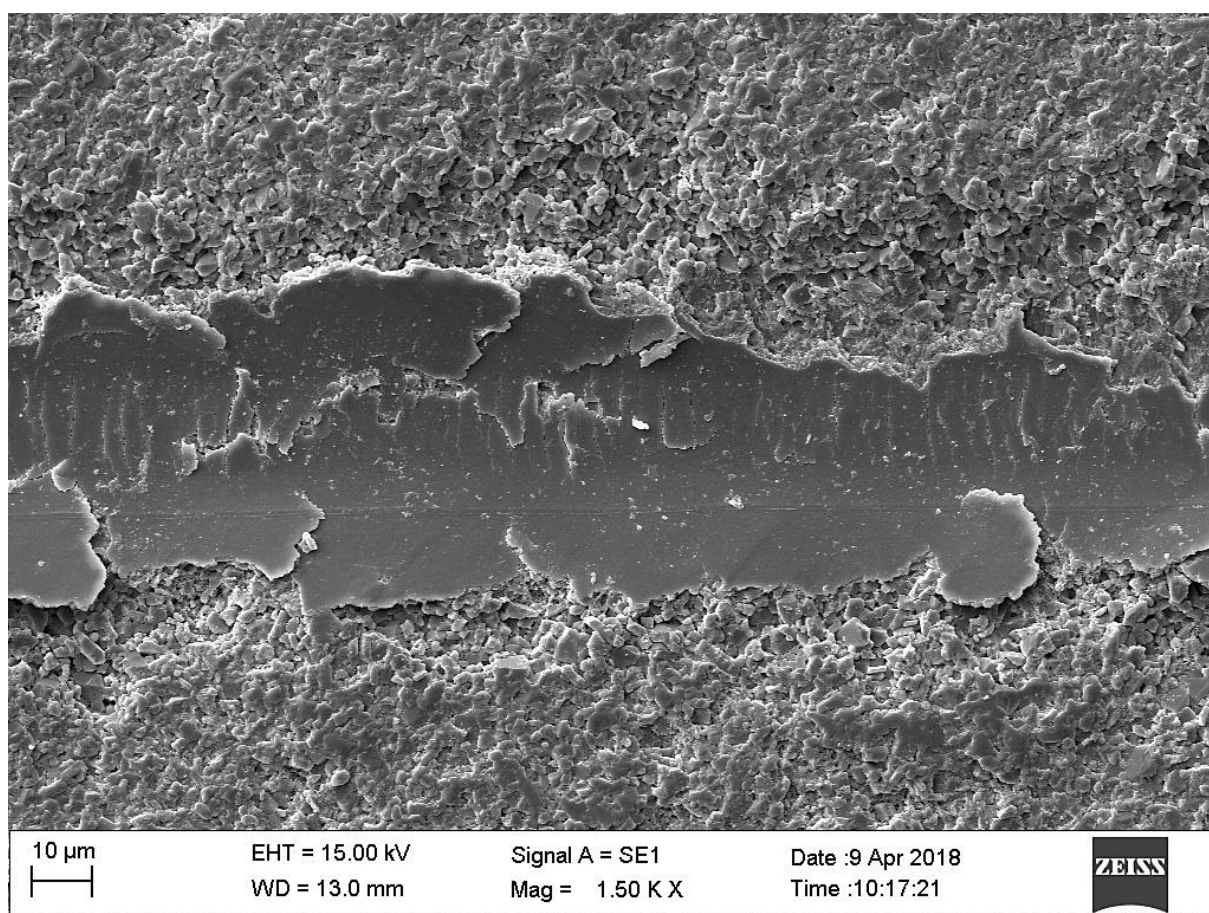


Figura 4.12 – Imagem obtida utilizando MEV, referente ao risco realizado na amostra de alumina, utilizando indentador Vickers e força de 25 N.

Os resultados não satisfatórios observados para a amostra de alumina podem ser atribuídos principalmente à interferência da topografia da superfície. Vale ressaltar que a

rugosidade Ra desta amostra foi $0,70 \pm 0,23 \mu\text{m}$ para uma probabilidade de abrangência de 95 %. Ainda, os valores de f_{ab} decorrentes da amostra de aço ferramenta não foram satisfatórios, com repetibilidade inferior ao que as boas práticas metrológicas recomendam. Neste caso, a interferência da topografia foi considerada uma das principais fontes de variabilidade. Desta forma, nos experimentos subsequentes uma atenção especial foi dada à rugosidade da amostra.

4.5 Resultados dos testes definitivos (amostras de aço ferramenta e de liga de aço com alto teor de carbono e cromo – bloco-padrão)

4.5.1 Resultados dos testes definitivos usando o indentador Rockwell-C na amostra de aço ferramenta

A Figura 4.13 mostra imagens obtidas utilizando MEV, de um risco realizado usando indentador Rockwell-C na amostra de aço ferramenta. Observa-se que a formação de ombros (material deformado para as laterais do sulco) é semelhante ao longo de todo o risco e não há formação maciça em pontos localizados. A seção transversal do risco mostrando os ombros laterais com formato e dimensões semelhantes é apresentada na Fig. 4.14.

A Figura 4.15 mostra os valores médios de f_{ab} resultantes das medições realizadas nos três riscos em função do tamanho amostral (5, 10, 15, 20 e 25). Os valores de desvios padrão para um nível de confiança de 68,27 % também são apresentados. Na Figura 4.15 se observa que os valores médios de f_{ab} variaram de 0,60 a 0,63, essa variação representa 5 % do valor máximo encontrado para o f_{ab} . O desvio padrão representou, na pior condição, 10,3 % do valor médio do f_{ab} . Esse fato é indicativo da boa repetibilidade dos resultados. Também foi observado que os valores médios de f_{ab} e o desvio padrão da amostra não foram influenciados pelo tamanho amostral. Desta forma, cinco medições são suficientes para avaliação do f_{ab} nas condições experimentais testadas.

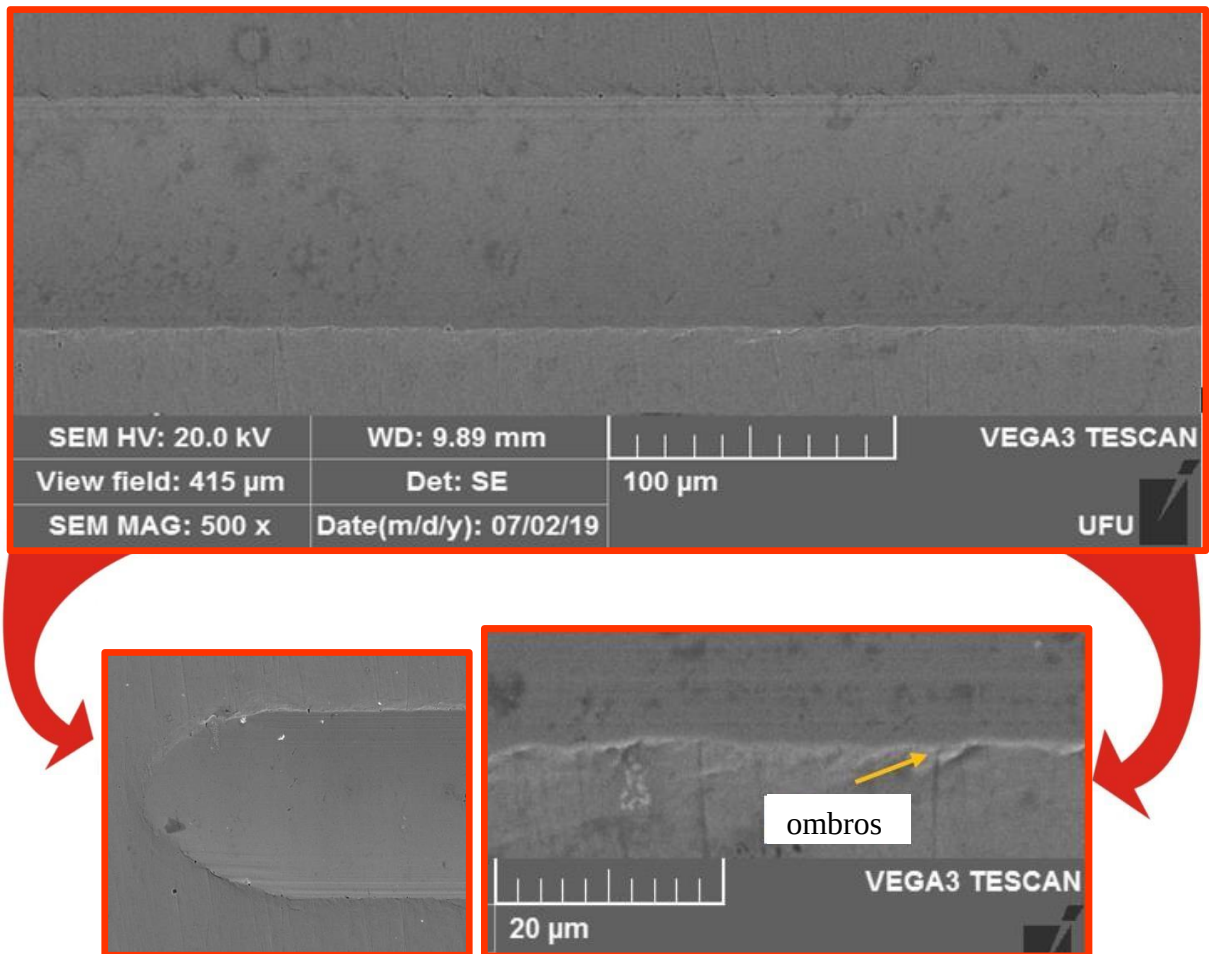


Figura 4.13 – Imagens obtidas utilizando MEV de um risco usando indentador Rockwell-C na amostra de aço ferramenta.

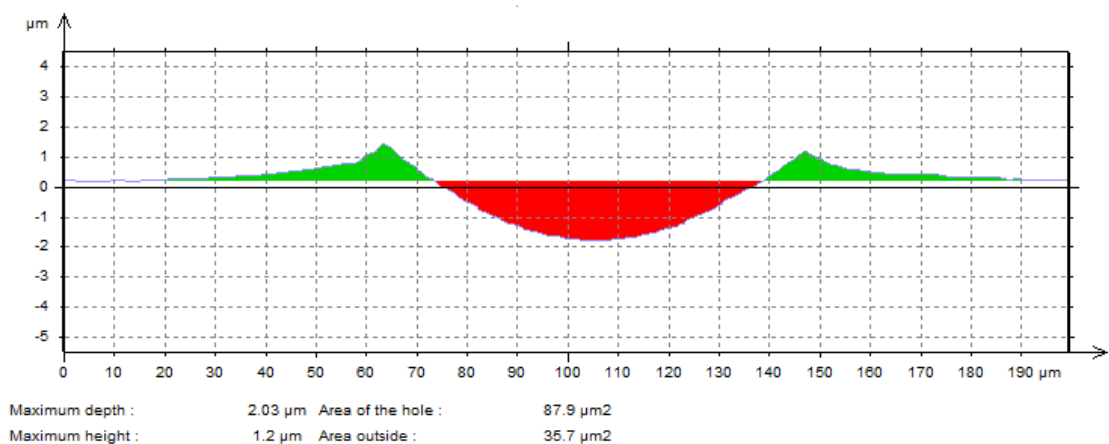


Figura 4.14 – Geometria do perfil obtida durante a primeira medição realizada no primeiro risco feito com indentador Rockwell-C na amostra de aço ferramenta. Medição com contato.

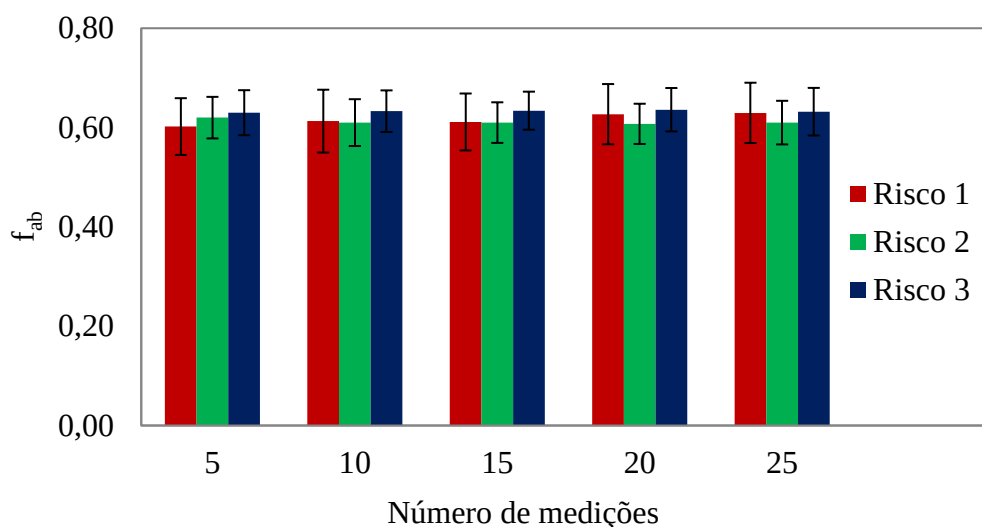


Figura 4.15 – Valores médios de f_{ab} obtidos a partir de riscos realizados na amostra de aço ferramenta usando indentador Rockwell-C e força de 25 N. Os valores de desvio padrão (68,27 %) são mostrados nas barras de erros. Medição com contato.

O percentual de incerteza expandida associada ao fator f_{ab} para diferentes tamanhos amostrais é mostrado na Fig. 4.16a. Os valores médios de f_{ab} obtidos para os três riscos considerando cinco medições são apresentados na Fig. 4.16b. Os valores de incerteza expandida (95 %) também são mostrados por meio das barras de erros. Na Figura 4.16a, observou-se que o valor máximo da incerteza expandida foi 8,5 % (0,051) para o risco 1 (cinco medições). A incerteza expandida diminuiu com o aumento do tamanho amostral. Para amostra com 15 elementos ou mais, a incerteza expandida foi inferior a 5 % do valor de f_{ab} para todos os riscos avaliados. Esse fato destaca a excelente qualidade dos valores do fator f_{ab} obtidos. Por outro lado, os valores médios de f_{ab} (Fig. 4.16b) apresentaram pouca variação (de 0,62 a 0,63); enquanto a incerteza expandida assumiu, na pior condição, 0,08. As áreas de interesse para o cálculo do fator f_{ab} ($s(L)$) indicados pelo programa Mountains Map e a calibração do perfilômetro (ΔCP) foram as variáveis de entrada que mais contribuíram para a incerteza final. A Figura 4.17 mostra essas contribuições para o risco 1, considerando cinco medições.

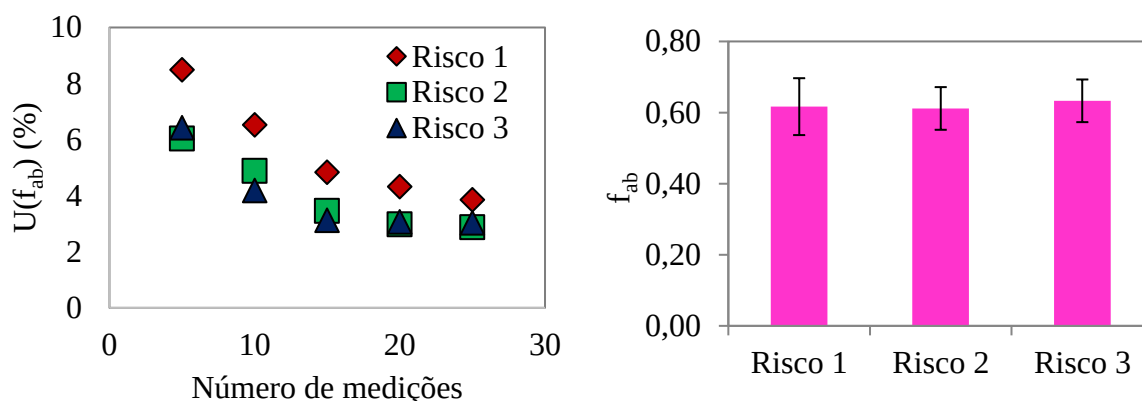


Figura 4.16 – A incerteza expandida (95 %) em porcentagem associada ao fator f_{ab} considerando diferentes tamanhos de amostras para três riscos realizados usando indentador Rockwell-C e força de 25 N na amostra de aço ferramenta (a). Valores médios de f_{ab} obtidos para três riscos considerando todas as medições (b). Os valores de incerteza expandida (95 %) são mostrados por meio das barras de erros. Medição com contato.

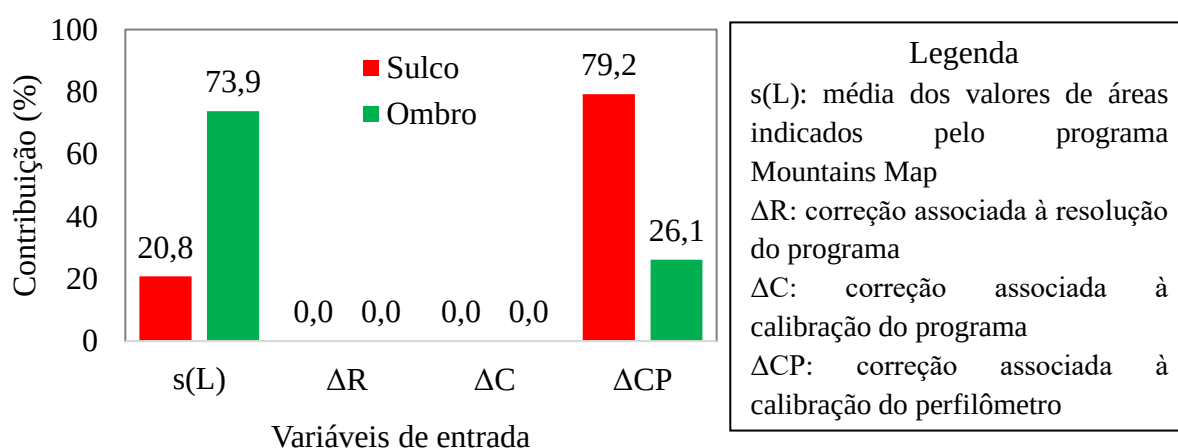


Figura 4.17 – Contribuição das variáveis de entrada na incerteza das áreas de interesse para o cálculo do fator f_{ab} , (sulco e ombros), referente ao risco 1, usando indentador Rockwell-C na amostra de aço ferramenta. Foram consideradas cinco medições. Medição com contato.

4.5.2 Resultados dos testes usando o indentador Vickers em uma amostra de aço ferramenta

Imagens de um risco obtidas pelo MEV, utilizando o indentador Vickers, são mostradas na Fig. 4.18. Na Figura 4.18a, observa-se que ao longo do risco, a quantidade de material deformado para as laterais do sulco não é regular, ocorrendo em alguns pontos a acumulação de intensos volumes de material, formando grandes ombros. Por outro lado, a Fig. 4.18b mostra que um grande volume de material removido é empurrado na frente do indentador e

depois levado para os lados ou lascado. De acordo com Pöhl et al. (2016), os micromecanismos ativos de abrasão nessas condições são microsulcamento e microcorte.

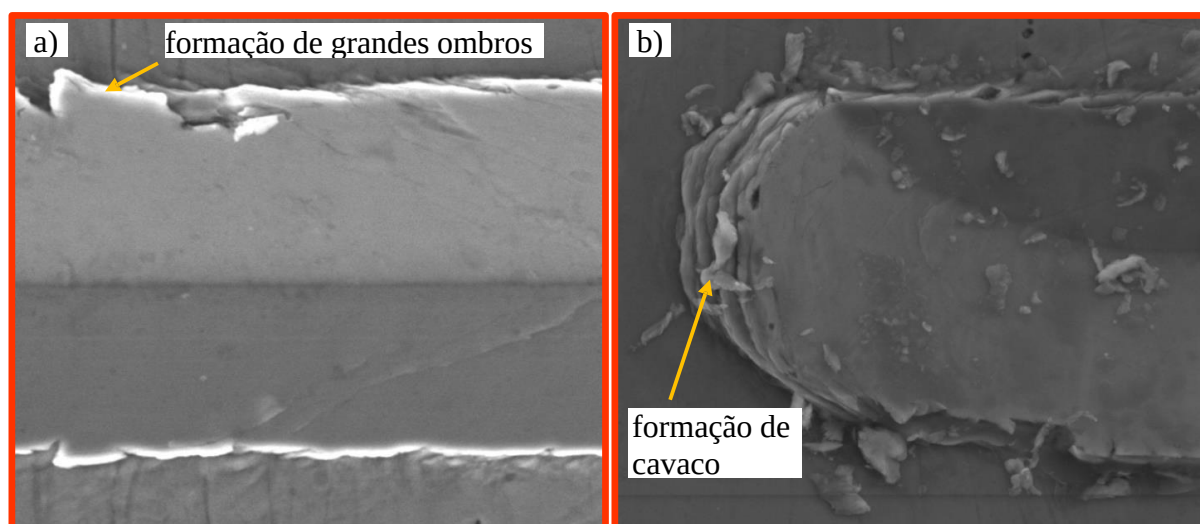


Figura 4.18 – Imagens obtidas utilizando MEV de um risco na amostra de aço ferramenta usando indentador Vickers (a) e (b).

A seção transversal de um risco é mostrada na Fig. 4.19. Pode-se notar que o risco realizado com indentador Vickers exibe ombros diferentes. Esse fato pode ser explicado pela aleatoriedade intrínseca da topografia e pelas variações da deformação plástica nos lados do sulco.

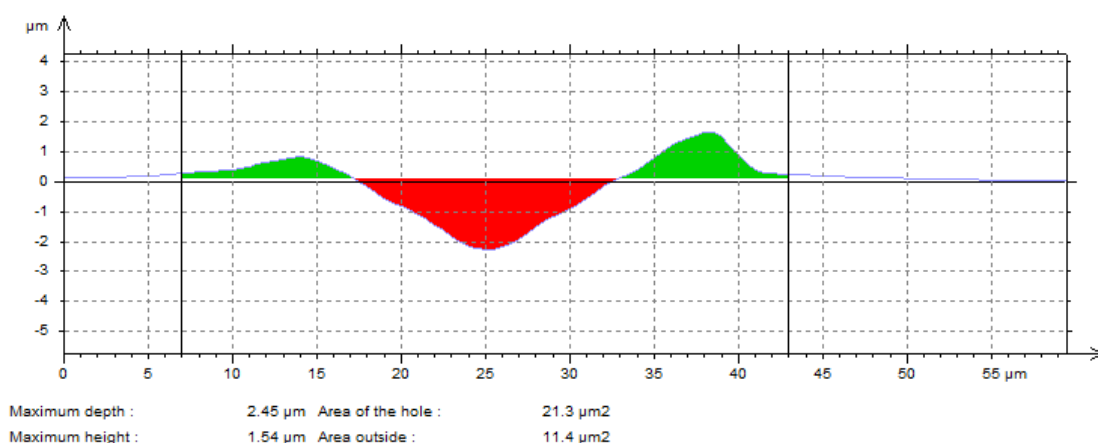


Figura 4.19 – Geometria do perfil obtida durante a primeira medição realizada no primeiro risco feito com indentador Vickers na amostra de aço ferramenta. Medição com contato.

A Figura 4.20 resume em um diagrama de barras os valores médios de f_{ab} obtidos nos riscos realizados usando indentador Vickers. Os valores do desvio padrão, para um nível de confiança de 68,27 %, também são mostrados. Observou-se que os valores médios do fator f_{ab} variaram de 0,36 a 0,43. A amplitude da variação representa 17 % do valor médio e é significativamente maior do que a observada nos riscos produzidos com o indentador Rockwell-C. É importante mencionar que os valores de f_{ab} resultantes dos riscos realizados com o indentador Vickers, para as condições experimentais testadas neste trabalho, são expressivamente menores, da ordem de 40 %. Esse fato justifica um maior efeito da rugosidade da superfície de teste. Em relação ao desvio padrão, observou-se que seus valores variaram de 0,032 a 0,130, representando 9 % e 30 %, respectivamente, do valor médio de f_{ab} .

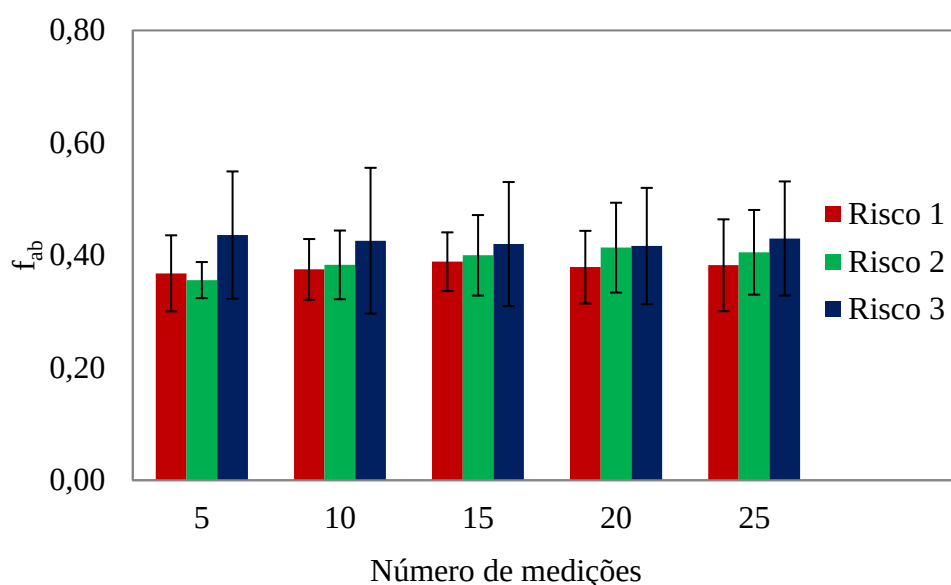


Figura 4.20 – Valores médios de f_{ab} obtidos a partir de riscos realizados na amostra de aço ferramenta usando indentador Vickers e força de 3 N. Os valores de desvio padrão (68,27 %) são mostrados nas barras de erros. Medição com contato.

Um resultado inesperado, na Fig. 4.20, foi observado em relação ao desvio padrão associado ao risco 2, considerando 5 medições, cujo valor foi o menor, de 0,032. Por outro lado, o maior desvio padrão (de 0,130) foi obtido considerando 10 medições no risco 3. Esse fato evidenciou que a repetibilidade do fator f_{ab} não é dependente do tamanho amostral. A variação significativa nos valores do desvio padrão foi atribuída à não homogeneidade da rugosidade.

Os valores percentuais de incerteza expandida associados ao fator f_{ab} para diferentes tamanhos amostrais são mostrados na Fig. 4.21a. Os valores médios de f_{ab} obtidos para os três riscos realizados com indentador Vickers são mostrados na Fig. 4.21b. Os valores de incerteza expandida (95 %) são apresentados por meio das barras de erros nestas figuras.

Na Figura 4.21a, a incerteza expandida adotou os valores máximos de 23,3 % para o risco 3 (cinco medições), enquanto que para o risco 2 nas mesmas condições assumiu 8,1 %. A variável de entrada que mais contribuiu para a incerteza final foi a variabilidade dos valores das áreas de interesse ($s(L)$) e a calibração do perfilômetro (ΔCP), como mostrado na Fig. 4.22. Os valores médios de f_{ab} (Fig. 4.23b) variaram de 0,38 a 0,43 e a incerteza expandida assumiu, na pior condição, 0,15. Esse fato indica que estudos devem ser realizados para melhorar a qualidade da fabricação das amostras testadas, principalmente no que se refere à homogeneidade da topografia superficial.

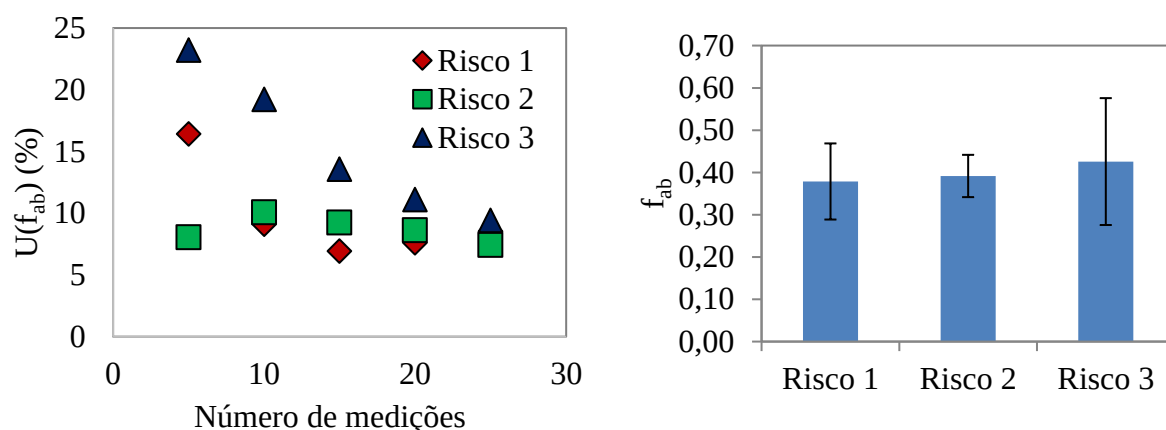


Figura 4.21 – A incerteza expandida em porcentagem (95 %) associada ao fator f_{ab} considerando diferentes tamanhos de amostras para três riscos realizados usando indentador Vickers e força de 3 N na amostra de aço ferramenta (a). Valores médios de f_{ab} obtidos para três riscos considerando todas as medições (b). Os valores de incerteza expandida (95 %) são mostrados por meio das barras de erros. Medição com contato.

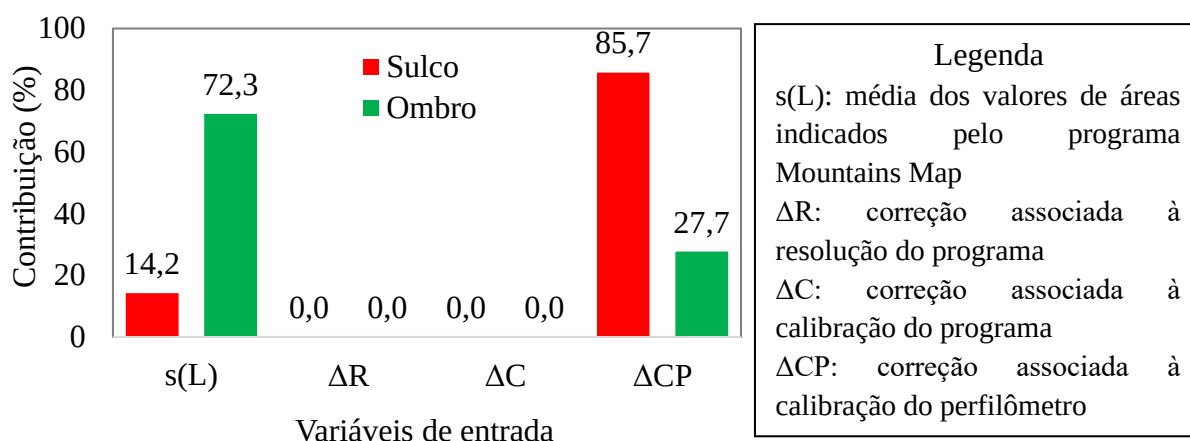


Figura 4.22 – Contribuição das variáveis de entrada na incerteza das áreas de interesse para o cálculo do fator f_{ab} , (sulco e ombros), referente ao risco 1, usando indentador Vickers na amostra de aço ferramenta. Foram consideradas cinco medições. Medição com contato.

4.5.3 Resultados dos testes em uma amostra de bloco-padrão

A Figura 4.23 mostra imagens obtidas usando MEV de um risco realizado usando indentador Vickers no bloco-padrão. As imagens dos riscos realizados com indentador Rockwell-C não são apresentadas, pois são semelhantes às mostradas na Fig. 4.13. Observa-se a formação de grandes ombros em vários locais ao longo do risco (ver Fig. 4.23a). Um grande volume de material é empurrado na frente do indentador (Fig. 4.23b) e depois é levado para as laterais ou lascado. Conforme Pöhl et al. (2016), esses fatos indicam que os micromecanismos ativos de abrasão são, portanto, microsulcamento e microcorte.

A Figura 4.24 mostra o primeiro perfil transversal obtido a partir do primeiro risco realizado usando o indentador Rockwell-C no bloco-padrão, enquanto a Fig. 4.25 mostra o obtido usando o indentador Vickers. Pode ser visto na Fig. 4.24 que os ombros laterais do risco são semelhantes, porém na Fig. 4.25 eles já são diferentes. Logo é observada uma diferença atribuída à formação dos ombros. É importante mencionar que os blocos-padrão atendem a requisitos dimensionais e geométricos rigorosos, principalmente no que diz respeito à medição da rugosidade da superfície e do desvio da planeza. Também foi observado que as áreas dos sulcos são significativamente maiores do que a de ombros para ambas as condições experimentais avaliadas.

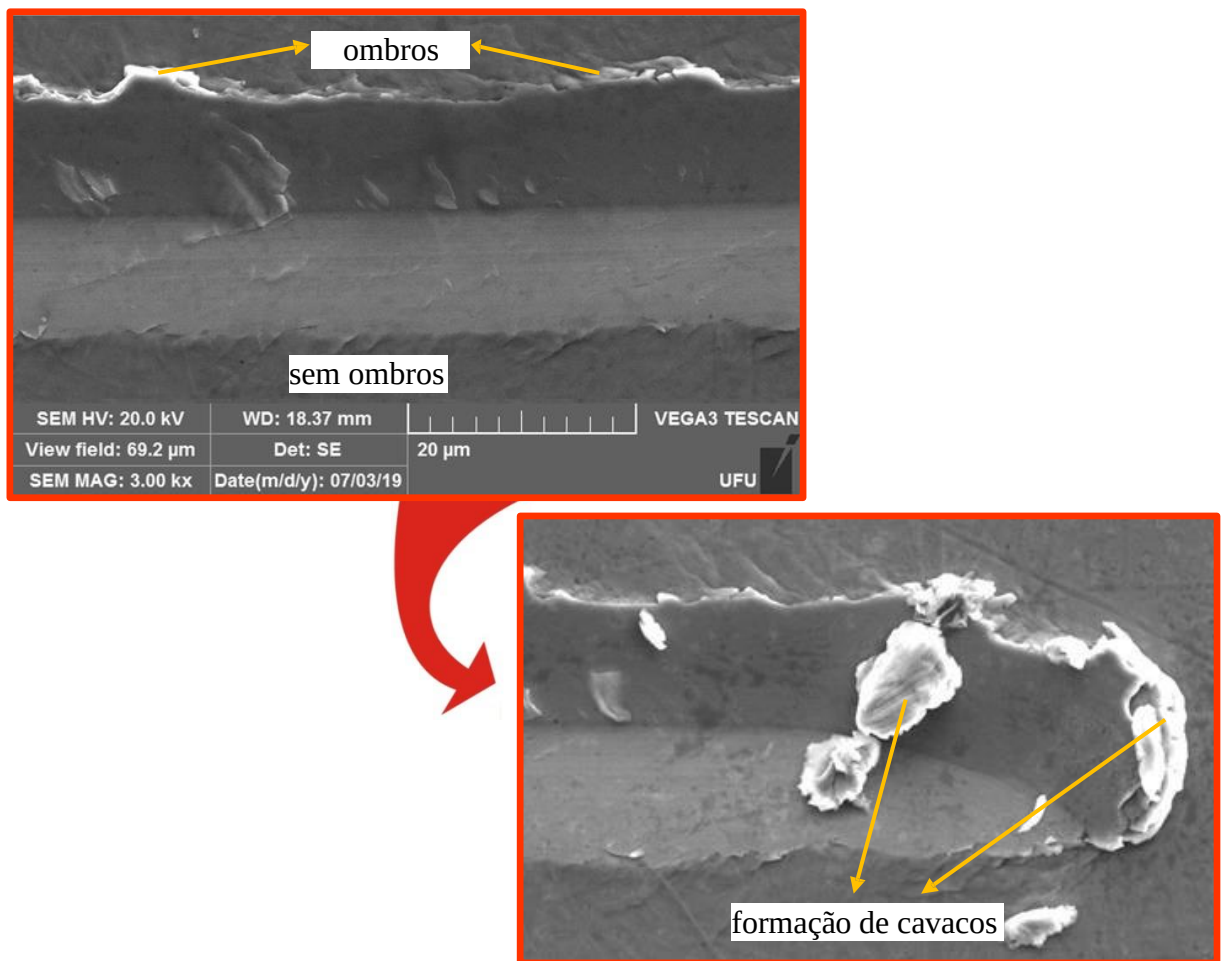


Figura 4.23 – Imagens obtidas utilizando MEV de um risco na amostra de bloco-padrão usando indentador Vickers mostrando a formação de ombros nas laterais do sulco (a) e a formação de cavacos (b).

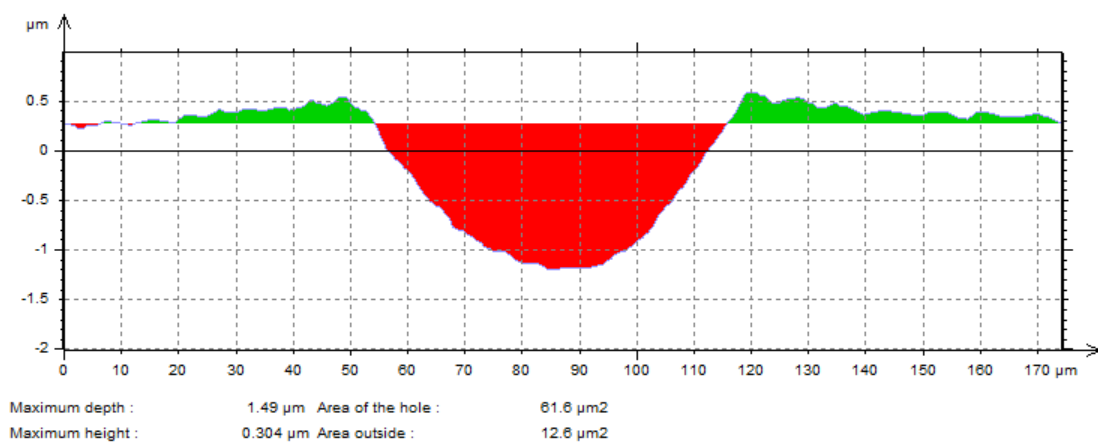


Figura 4.24 – Geometria do perfil obtida durante a primeira medição realizada no primeiro risco feito com indentador Rockwell-C no bloco-padrão. Medição com contato.

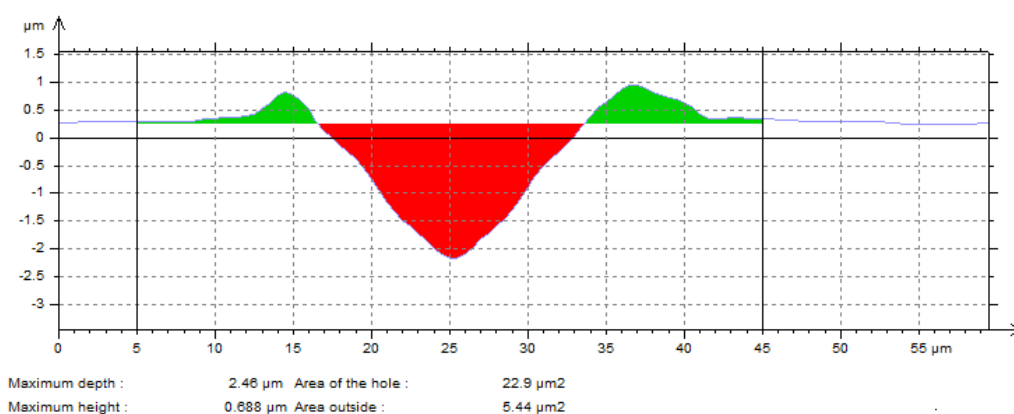


Figura 4.25 – Geometria do perfil obtida durante a primeira medição realizada no primeiro risco feito com indentador Vickers no bloco-padrão. Medição com contato.

Os valores médios do fator f_{ab} obtidos nos riscos realizados com os dois indentadores avaliados são mostrados na Fig. 4.26. O desvio padrão (68,27 %) também é mostrado por meio das barras de erros. Foi observada uma clara tendência de decréscimo nos valores médios de f_{ab} referente aos riscos 1 a 3, em ambas as condições avaliadas. O fator f_{ab} variou de 0,71 a 0,80 para o indentador Rockwell-C e de 0,63 a 0,74 para o Vickers. Para melhor entendimento, a Fig. 4.27 apresenta os valores de f_{ab} obtidos em todos os perfis.

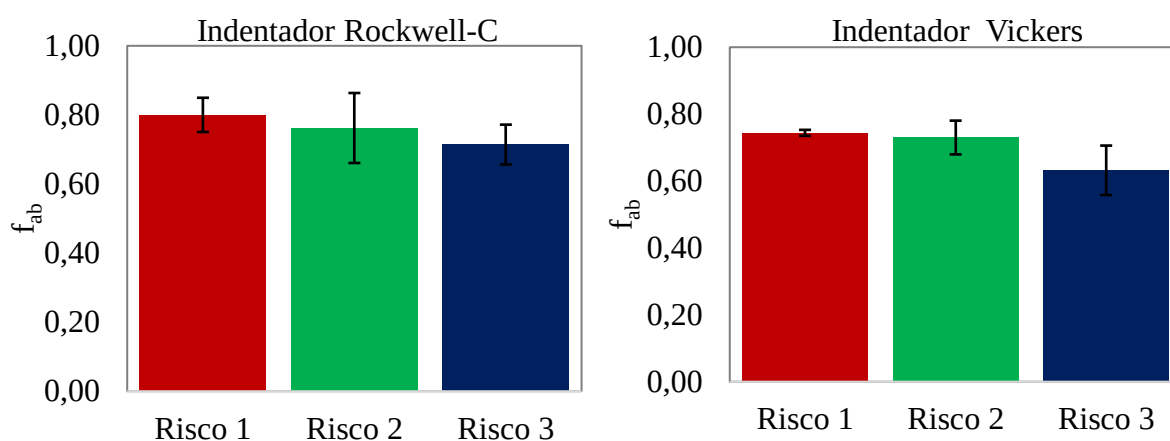


Figura 4.26 – Valores médios de f_{ab} obtidos a partir de riscos realizados na amostra de bloco-padrão. Força aplicada de 25 N e 3 N nos ensaios realizados com indentadores Rockwell-C e Vickers, respectivamente. Os valores de desvio padrão (68,27 %) são mostrados nas barras de erros. Medição com contato.

Na Figura 4.26, também é observado que o desvio padrão variou de 0,049 a 0,101 para o indentador Rockwell-C, representando 6 % e 13 %, respectivamente, enquanto que para o Vickers variou de 0,009 a 0,074, representando 1 % e 12 %, respectivamente. A repetibilidade associada aos valores de f_{ab} nas duas condições investigadas foi semelhante e o primeiro risco mostrou o menor desvio padrão. Este resultado corrobora que o efeito predominante da rugosidade nos valores f_{ab} para os riscos Vickers foi quase eliminado.

Na Figura 4.27, observa-se que o terceiro risco para ambas as condições apresentou valores mais baixos de f_{ab} . Uma fonte de erro sistemática ocupou um lugar de destaque, afetando os resultados do fator f_{ab} . Foi sugerido que o material aderido na face do indentador durante o processo de riscamento pudesse ser a causa desse fato. Assim, riscos adicionais foram realizados em condições semelhantes às realizadas para estes experimentos, porém foi acrescentada a rotina de limpeza dos indentadores entre as operações de riscamento. Esta, portanto, foi a única diferença entre esses dois experimentos.

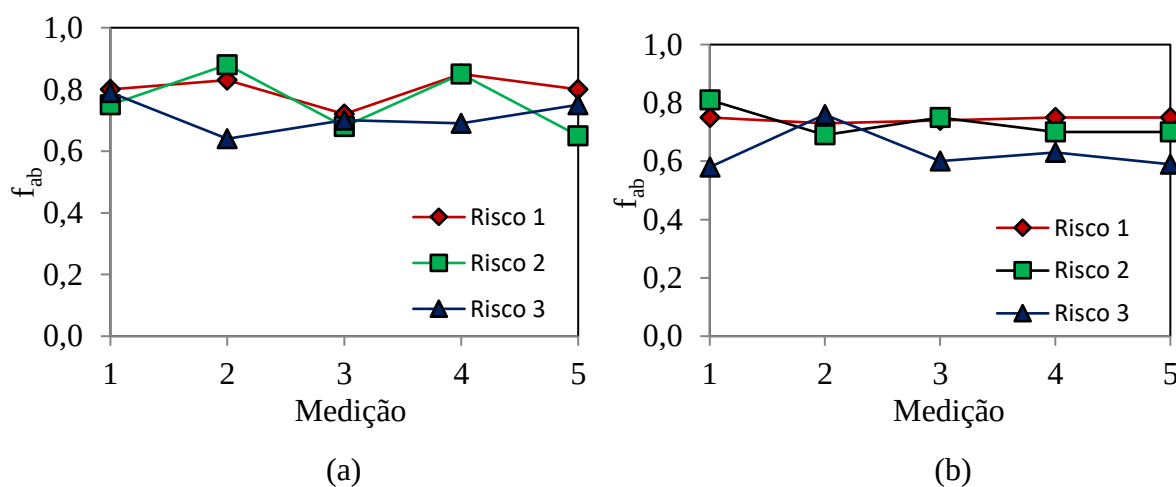


Figura 4.27 – Valores de f_{ab} obtidos a partir de riscos realizados na amostra de bloco-padrão usando indentadores Rockwell-C com força de 25 N (a) e Vickers com força de 3 N (b). Medição com contato.

A Figura 4.28 mostra os valores médios de f_{ab} obtidos nos riscos realizados na amostra de bloco-padrão usando os indentadores Rockwell-C (a) e Vickers (b). Vale ressaltar que os indentadores foram limpos entre a execução de um risco e outro. O desvio padrão (68,27 %) também é mostrado nas barras de erros.

Na Figura 4.28a, observou-se que os valores médios de f_{ab} variaram de 0,67 a 0,73. Esta amplitude é significativamente menor do que a observada na Fig. 4.26a. O valor do máximo

desvio padrão (0,051) foi observado para o risco 2. Este valor representa 8 % da média do fator f_{ab} e é significativamente menor do que os mostrados na Fig. 4.26a (0,101, representando 13 %). A tendência estritamente decrescente para os valores médios do fator f_{ab} referente aos riscos 1 a 5 não foi observada. Com relação á incerteza expandida foi verificada uma pequena variação nos seus valores, seguindo a tendência do desvio padrão experimental. As variáveis que mais contribuíram para a incerteza final foram a variabilidade dos valores das áreas de interesse e a calibração do perfilômetro.

Para os riscos realizados com indentador Vickers, os valores médios de f_{ab} variaram de 0,54 a 0,67. A amplitude associada é um pouco maior que a mostrada na Fig. 4.26b. O valor máximo do desvio padrão observado é da mesma ordem que o mostrado na Fig. 4.26b (12 %). A tendência estritamente decrescente dos valores médios do fator f_{ab} referente aos riscos 1 a 5 não foi observada. Os valores de incerteza expandida seguiram a tendência do desvio padrão experimental e variaram de 0,04 a 0,07. As variáveis que mais contribuíram para a incerteza final foram a variabilidade dos valores das áreas de interesse e a calibração do perfilômetro.

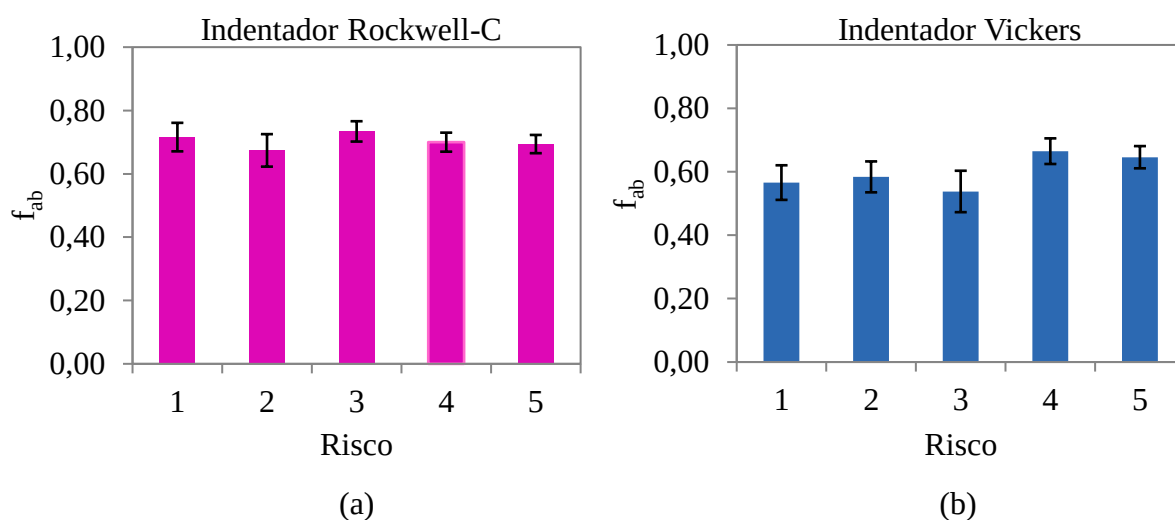


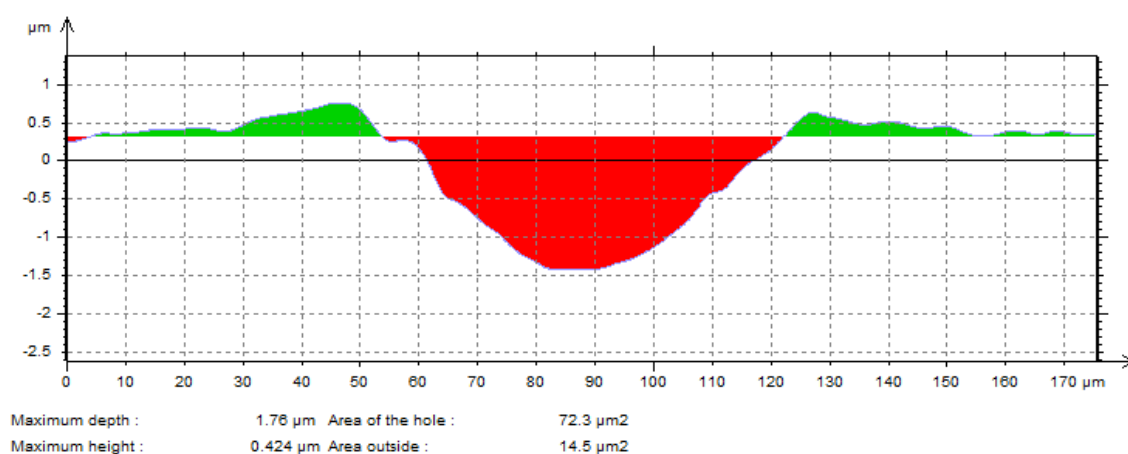
Figura 4.28 – Valores médios de f_{ab} obtidos a partir de riscos realizados na amostra de bloco-padrão usando indentadores Rockwell-C com força de 25 N (a) e Vickers com força de 3 N (b). Os indentadores foram limpos entre um riscamento e outro. Os valores de desvio padrão (68,27 %) são mostrados nas barras de erros. Medição com contato.

Os valores de f_{ab} mostrados na Fig. 4.28 indicam que apenas cerca de 30 a 40 % do material foi movido plasticamente para as laterais dos riscos, ou seja, a maior parte do

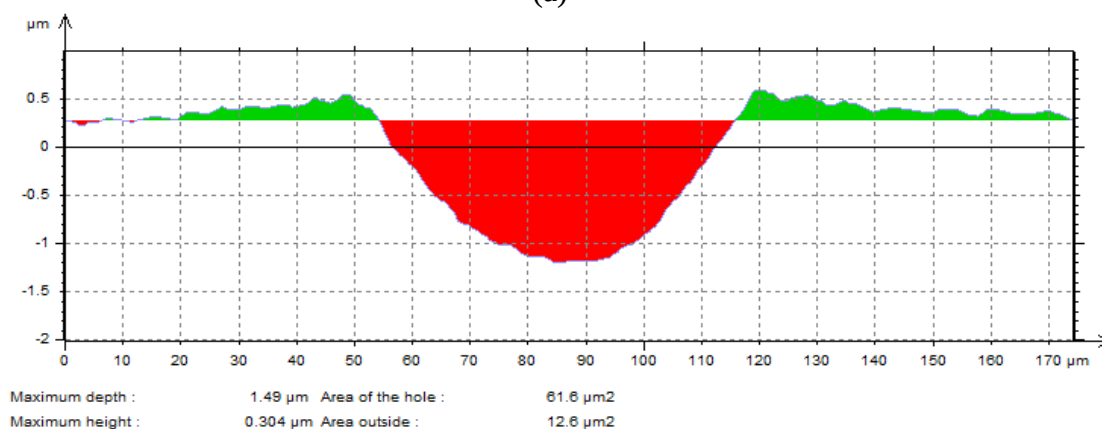
material foi perdida durante o processo, o que denota a prevalência do mecanismo de microcorte.

4.6 Resultados de f_{ab} a partir da medição óptica sem contato (amostra de liga de aço com alto teor de carbono e cromo – bloco-padrão)

A Figura 4.29 mostra o primeiro perfil individual obtido durante a medição sem contato do terceiro risco realizado com indentador Rockwell-C. Pode-se notar que o risco obtido durante a medição sem contato é semelhante com aquele obtido com contato. As diferenças observadas podem ser atribuídas ao fato da medição ter sido realizada em posições diferentes no risco.



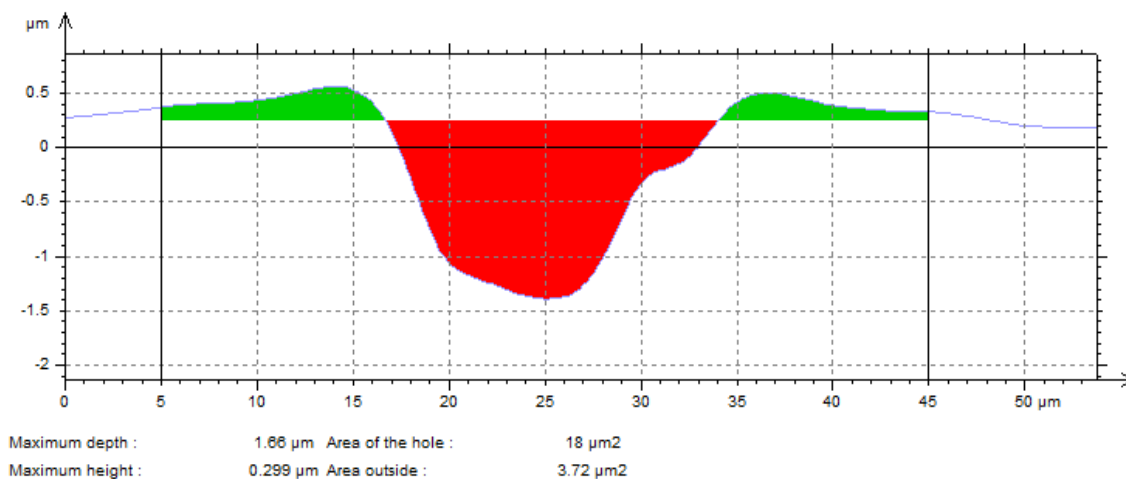
(a)



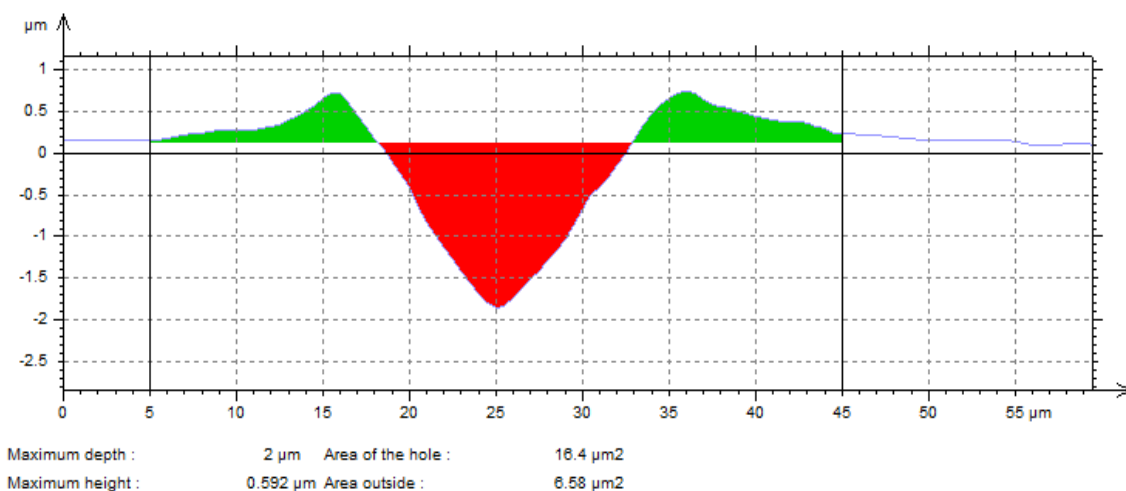
(b)

Figura 4.29 – Perfis obtidos durante a primeira medição sem contato realizada no terceiro risco produzido com o indentador Rockwell-C no bloco-padrão (a) e com contato (b).

Entretanto, quando foram comparados os perfis obtidos a partir de riscos produzidos com o indentador Vickers as diferenças observadas foram maiores. Observa-se na Fig. 4.30a, que na medição sem contato, a geometria do perfil se mostra mais arredondada que a geometria do indentador Vickers e sensivelmente diferente daquela obtida na medição com contato, Fig. 4.30b.



(a)



(b)

Figura 4.30 – Perfis obtidos durante a primeira medição sem contato realizada no primeiro risco produzido com o indentador Vickers no bloco-padrão (a) e com contato (b).

A Figura 4.31 exibe os valores médios do fator f_{ab} obtidos a partir de cinco medições efetuadas em cada um dos riscos realizados com os dois indentadores utilizados. O desvio padrão (68,27 %) também é mostrado por meio das barras de erros.

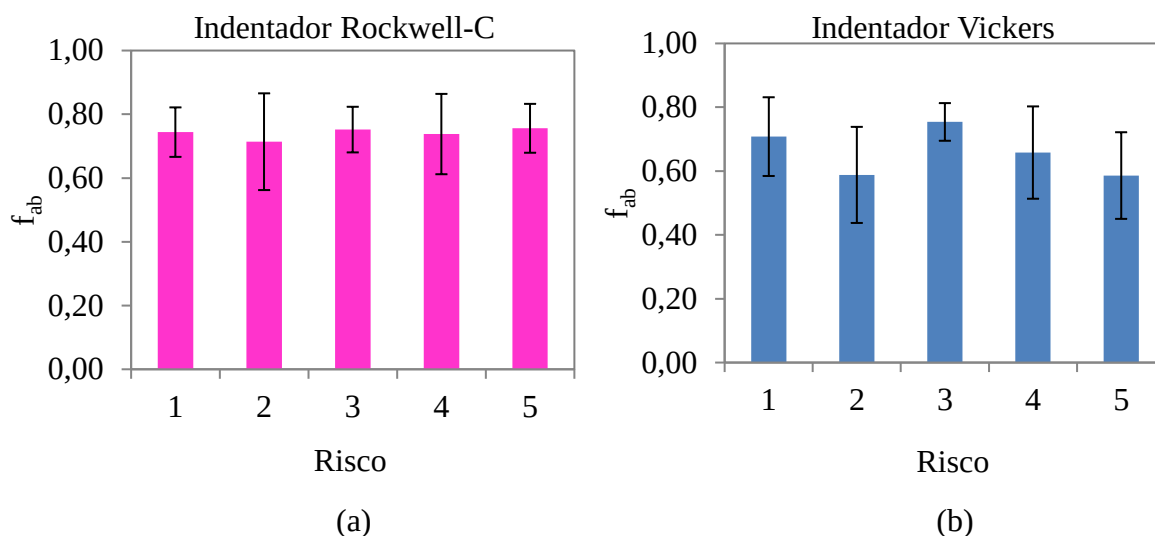


Figura 4.31 – Valores médios de f_{ab} obtidos a partir da medição sem contato, de riscos realizados na amostra de bloco-padrão usando indentadores Rockwell-C com força de 25 N (a) e Vickers com força de 3 N (b). Os indentadores foram limpos entre um riscamento e outro. Os valores de desvio padrão (68,27 %) são mostrados nas barras de erros.

Os valores do fator f_{ab} variaram de 0,71 a 0,76 para o indentador Rockwell-C (Fig. 4.31a) e de 0,59 a 0,75 para o Vickers (Fig. 4.31b). A amplitude dos valores médios obtidos para o Rockwell-C (6,3 % em relação à média) foi significativamente menor que a obtida para o Vickers (21,3 %). Com relação aos valores máximos do desvio padrão, estes são da ordem de 21 % e 26 % em relação à média do fator f_{ab} , respectivamente. Os resultados alcançados foram condizentes com as imagens obtidas via MEV, onde os riscos realizados com o indentador Rockwell-C se apresentaram mais homogêneos do que os realizados com o Vickers.

Na Figura 4.32 são mostrados novamente os valores médios do fator f_{ab} obtidos a partir de cinco medições efetuadas em cada um dos riscos realizados com os dois indentadores, porém as barras de erros agora representam a incerteza expandida (95 %). Os valores de incerteza expandida seguiram a tendência do desvio padrão experimental, apresentando valores máximos da ordem de 26 % e 32 % em relação à média do fator f_{ab} , para os indentadores Rockwell-C e Vickers, respectivamente. A incerteza expandida associada ao f_{ab} considerando os riscos individualmente na medição sem contato é significativamente maior que a observada na medição com contato. Este fato pode ser justificado devido à maior capacidade do feixe de luz em acessar os vales mais estreitos, bem como quaisquer outros defeitos microgeométricos presentes na superfície. Adicionalmente a ponta do apalpador atua

como um filtro mecânico, tendendo a aumentar o raio de curvatura dos picos e impossibilitando detectar os vales mais estreitos que seu raio. Resultado similar é observado quando comparados os valores médios totais, Fig. 4.33.

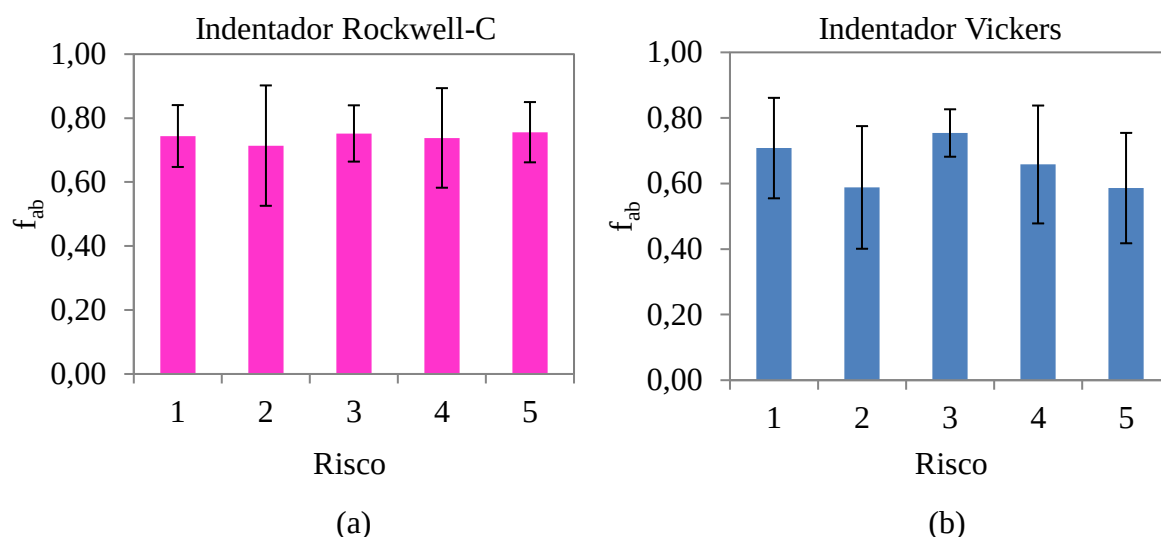


Figura 4.32 – Valores médios de f_{ab} obtidos a partir da medição sem contato, de riscos realizados na amostra de bloco-padrão usando indentadores Rockwell-C com força de 25 N (a) e Vickers com força de 3 N (b). Os indentadores foram limpos entre um riscamento e outro. Os valores de incerteza expandida (95 %) são mostrados por meio das barras de erros.

A Figura 4.33 mostra um resumo dos valores médios de f_{ab} obtidos para cada tipo de medição (com contato e sem contato) e para cada indetador (Rockwell-C e Vickers). Nesta figura se observa que os valores médios de f_{ab} obtidos por meio da medição sem contato, foram predominantemente maiores dos que os obtidos com contato. As análises estatísticas destes resultados serão abordadas no item 4.7.

Os valores de f_{ab} obtidos na medição sem contato foram 5,3 % superiores à aqueles resultantes da medição com contato, para o indentador Rockwell e 9,8 % para o Vickers. A maior diferença observada nos riscos realizados com indentador Vickers pode estar associada às características dos eventos formados por este indentador: mais afunilados e estreitos, apresentando desta forma maior dificuldade de reconhecimento do apalpador. Os valores de desvio padrão obtidos para as medições sem contato também foram maiores em ambos os casos, em relação àqueles observadas na medição com contato. O fato do feixe de luz do sistema óptico de medição ter acesso a vales mais profundos, bem como imperfeições

superficiais na peça avaliada, deve estar associado ao maior desvio padrão encontrado neste sistema de medição (sem contato).

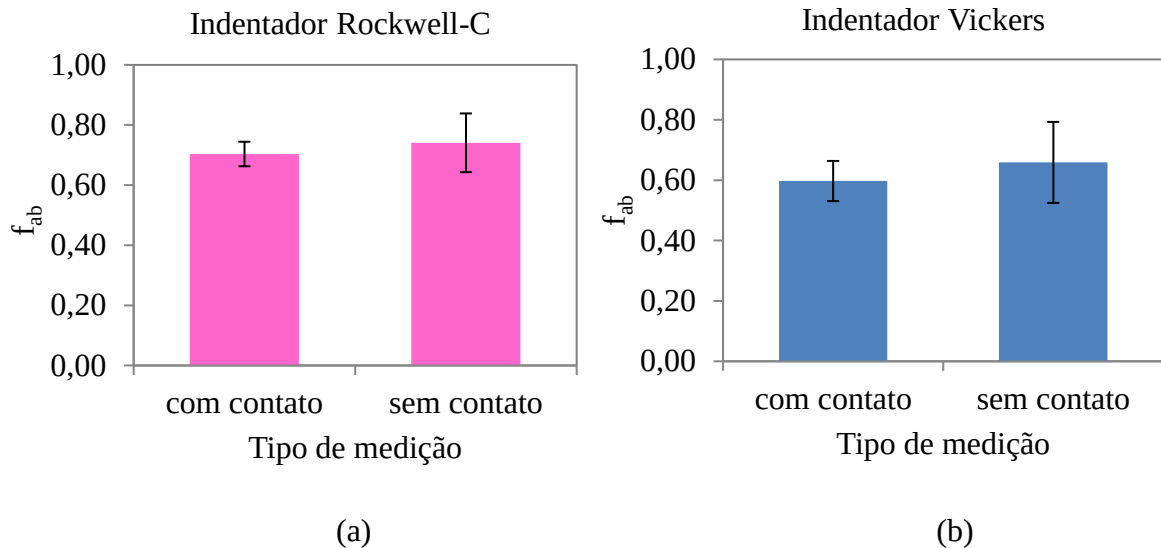


Figura 4.33 – Valores médios de f_{ab} obtidos a partir da medição com contato e medição sem contato, de riscos realizados no bloco-padrão usando indentadores Rockwell-C com força de 25 N (a) e Vickers com força de 3 N (b). Os valores de desvio padrão (68,27 %) são mostrados nas barras de erros.

As Figuras 4.34 e 4.35 mostram os perfis médios resultantes da medição de 2000 perfis sem contato em riscos realizados com indentadores Rockwell-C e Vickers, respectivamente.

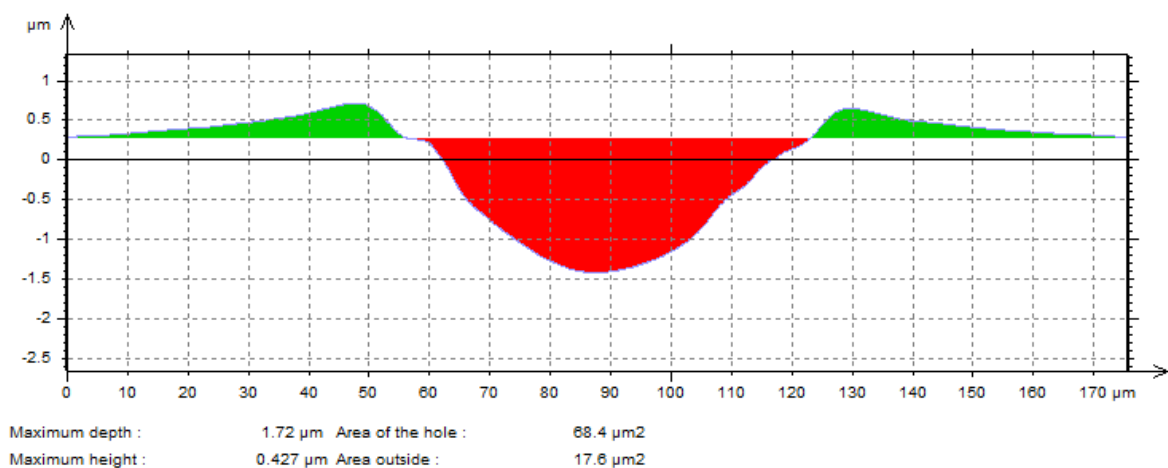


Figura 4.34 – Perfil médio obtido durante a medição sem contato realizada no terceiro risco feito com indentador Rockwell-C no bloco-padrão.

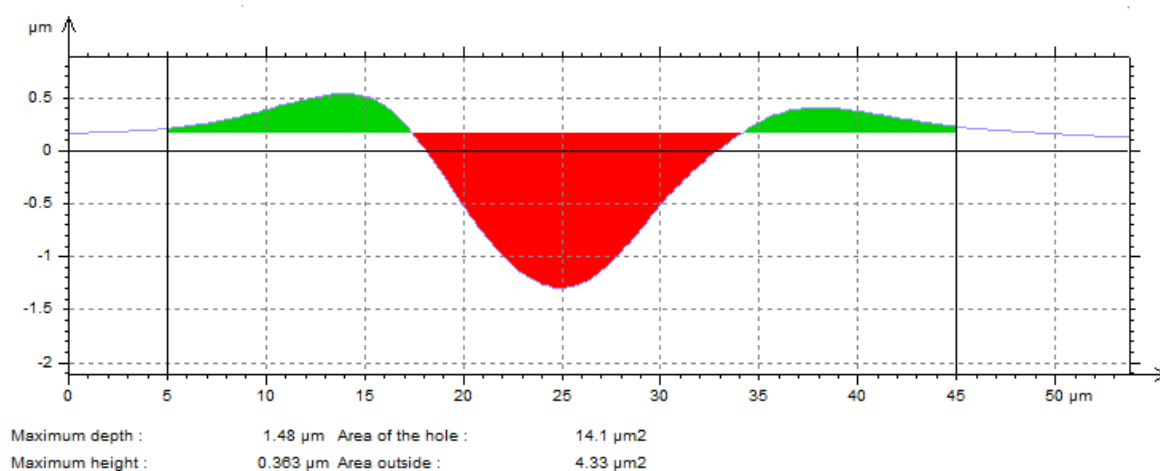


Figura 4.35 – Perfil médio obtido durante a medição sem contato realizada no primeiro risco feito com indentador Vickers no bloco-padrão.

Nas Figuras 4.34 e 4.35 se observa que os perfis médios resultantes são mais lisos que os individuais. Isto pode ser justificado porque o procedimento de medição adotado para a obtenção do valor de f_{ab} a partir do perfil médio de 2000 perfis extingue naturalmente as micro irregularidades que não possuem representatividade dentro dos dados amostrais, o que não ocorre durante a medição individual dos riscos. As Figuras 4.36 e 4.37 mostram claramente o alisamento do perfil.

Para a sobreposição dos perfis, nas Fig. 4.36 e 4.37, foi necessário ajustar os valores da coordenada Z dos pontos que definem o perfil, devido ao desvio de paralelismo remanescente entre a superfície avaliada e a oposta a ela. Já os valores da coordenada X não foram ajustados. Este fato indica a excelente capacidade de posicionamento que o microscópio Alicona Infinite Focus SL oferece neste tipo de medição, pois dispõe de dois eixos de referência perpendiculares entre si, conforme melhor detalhado no item 3.5.

Nas Figuras 4.36 e 4.37 se observa que, para ambos os indentadores, os perfis médios extinguem os efeitos da topografia não homogênea da superfície avaliada, bem como outros eventos de ordem de grandeza menor. Por outro lado, no risco realizado com indentador Rockwell-C o perfil médio é mais representativo do que aquele observado para o Vickers, exibindo menores desvios em relação aos perfis individuais. Uma justificativa para este fato pode estar relacionada à dificuldade observada durante a medição sem contato dos riscos Vickers, para os quais a focalização foi mais difícil. Neste caso, os problemas da reflexão da luz foram mais difíceis de serem contornados. Vale ainda lembrar que os riscos Vickers são

mais afunilados e que se apresentaram menos homogêneos do que os realizados com o indentador Rockwell-C.

Diante do exposto, se infere que o procedimento de medição sem contato considerando o perfil médio decorrente de 2000 perfis apresenta vantagens, pois, além de diminuir a variabilidade das leituras devido ao significativo número de medições, destaca o evento prevaemente no risco, atuando como um filtro aos eventos adversos. Assim, estes últimos terão pouca representatividade na formação do perfil médio resultante. Adicionalmente, a medição é realizada de forma rápida.

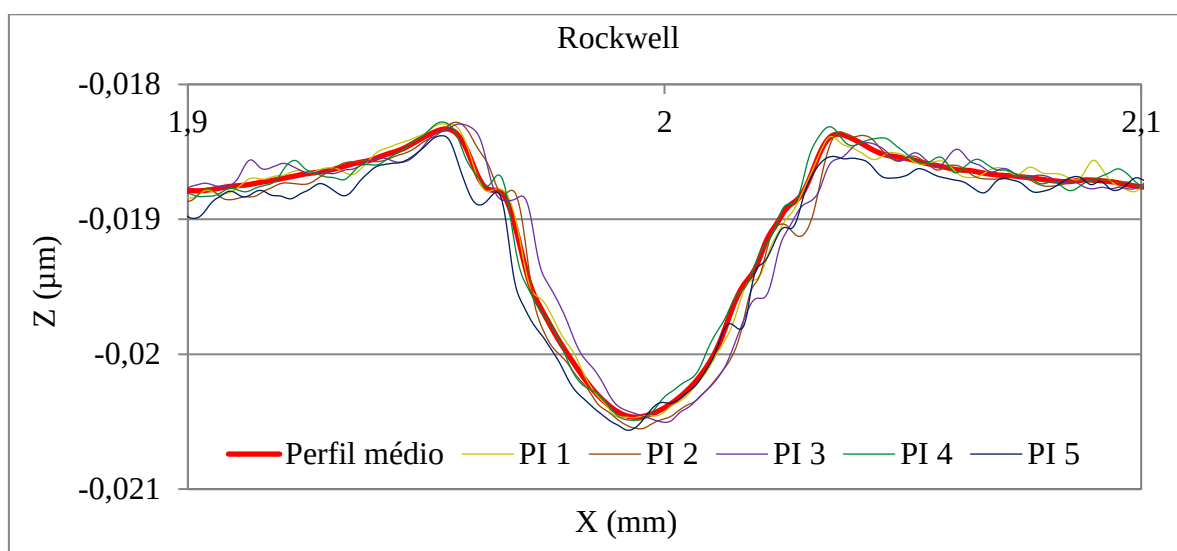


Figura 4.36 – Cinco perfis individuais e o perfil médio obtidos na medição sem contato no terceiro risco para indentador Rockwell-C (força aplicada de 25 N).

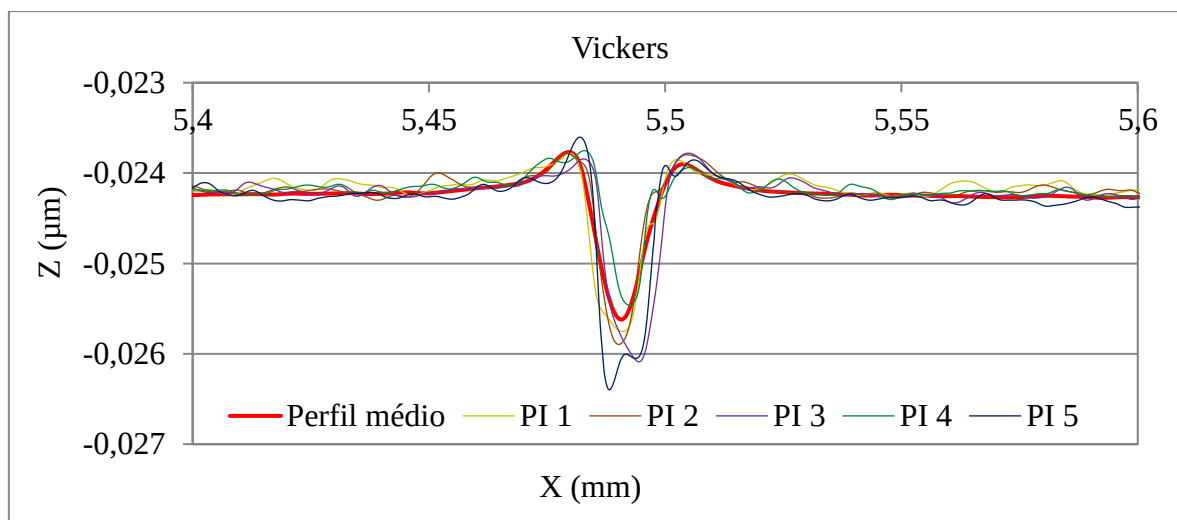


Figura 4.37 – Cinco perfis individuais e o perfil médio obtidos na medição sem contato no primeiro risco para indentador Vickers (força aplicada de 3 N).

A Figura 4.38 mostra os resultados de f_{ab} calculados a partir dos perfis médios obtidos pela análise de 2000 perfis, para cada um dos riscos avaliados. Os valores de incerteza expandida (95 %) são mostrados por meio das barras de erros.

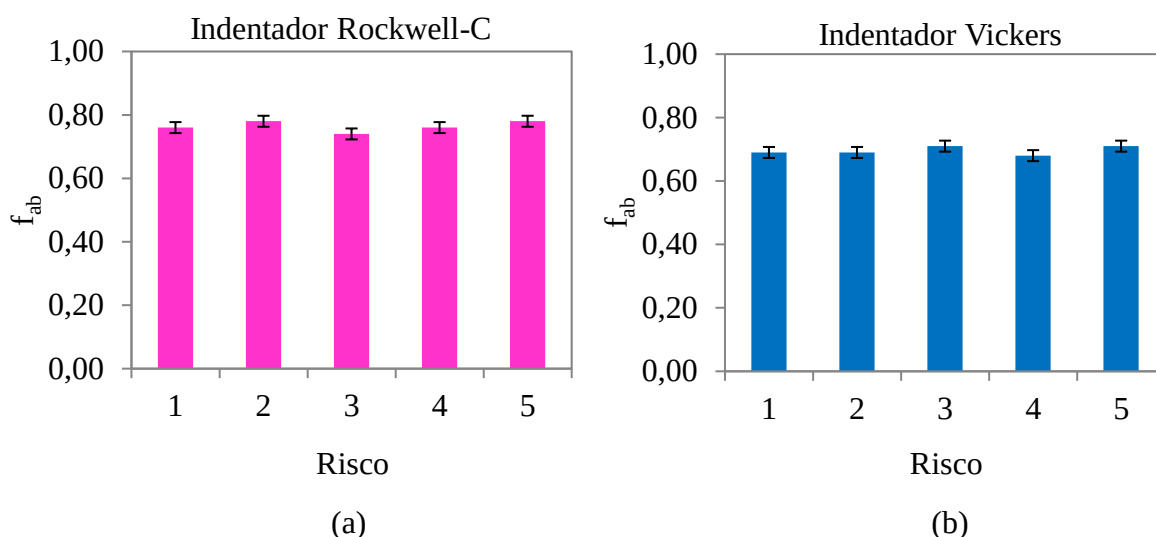


Figura 4.38 – Valores médios de f_{ab} calculados a partir dos perfis médios obtidos pela análise de 2000 perfis (medição sem contato), de riscos realizados na amostra de bloco-padrão usando indentadores Rockwell-C com força de 25 N (a) e Vickers com força de 3 N (b). Os indentadores foram limpos entre um riscamento e outro. Os valores de incerteza expandida (95 %) são mostrados por meio das barras de erros.

Na Figura 4.38 se observa que os valores médios de f_{ab} obtidos considerando o perfil médio, exibem menores amplitudes do que aquela observada em qualquer condição avaliada anteriormente. A variação observada foi de 0,74 a 0,78 para o indentador Rockwell-C e de 0,68 a 0,71 para o Vickers. Neste caso, a maior amplitude foi obtida para os riscos realizados com o indentador Rockwell-C (5,1 % em relação à média), diferentemente das análises anteriores, onde para os riscos realizados com este último foram sempre melhores. Para os riscos realizados com o indentador Vickers a amplitude representa 4,2 % do valor médio de f_{ab} .

Em relação aos valores de incerteza expandida, se observa na Fig. 4.38, que estes foram significativamente inferiores aos obtidos em todas as condições anteriores. A incerteza expandida em relação à média do f_{ab} representa na pior condição 2,3 % e 2,6 % para os riscos produzidos com os indentadores Rockwell-C e Vickers, respectivamente. Este fato indica a excelente qualidade dos valores de f_{ab} obtidos. A significativa redução dos valores de

incerteza pode ser atribuída à redução da contribuição da variabilidade das leituras na incerteza final.

4.7 Considerações finais

4.7.1. Análise estatística dos resultados

Para verificar se o fator procedimento de medição (PM) provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores de f_{ab} , foi realizada a análise de variância ANOVA para planejamentos fatoriais simples. Na primeira análise, o fator procedimento de medição foi avaliado em três níveis como mostra a Tab. 4.5. O objetivo desta análise era verificar se os procedimentos de medição utilizados, com contato considerando 5 perfis (-1) e sem contato considerando 5 (0) e 2000 (+1) perfis produzem os mesmos valores de f_{ab} ($H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$). As análises foram conduzidas para cada indentador em separado utilizando o *software* STATISTICA® 7.0.

Tabela 4.5 – Matriz do planejamento com um único fator (procedimento de medição) variando em três níveis.

Experimento	Procedimento de medição - PM (Fator 1)
1	-1 (com contato – 5 perfis)
2	0 (sem contato – 5 perfis)
3	+1 (sem contato – 2000 perfis)

É mostrado na Tabela 4.6 o quadro de ANOVA resultante. Se observa que o fator procedimento de medição provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores de f_{ab} para riscos realizados com o indentador Rockwell-C, visto que o p -valor foi menor que 0,05. Já para os riscos realizados com o indentador Vickers, o tipo de medição não provocou efeitos significativos.

Tabela 4.6 – Resultado da ANOVA para o planejamento simples, onde o fator procedimento de medição foi avaliado em três níveis.

Indentador	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
Rockwell-C	Intercepto	8,110727	1	8,110727	20276,82	0,000000
	TM	0,009773	2	0,004887	12,22	0,001277
	Erro	0,004800	12	0,000400		
Vickers	Intercepto	6,520807	1	6,520807	1890,089	0,000000
	TM	0,025293	2	0,012647	3,666	0,057215
	Erro	0,041400	12	0,003450		

Visando facilitar a análise foram construídos *Box Plots*, Figs. 4.39 e 4.40. Na Figura 4.39 se observa uma clara tendência de aumento do valor médio de f_{ab} para riscos Rockwell-C na medida em que se passa da medição com contato para a medição sem contato com 5 perfis individuais e 2000 perfis. Para riscos Vickers, Fig. 4.40, observa-se uma tendência de aumento do valor médio de f_{ab} da medição com contato para a medição sem contato considerando 5 perfis individuais. Adicionalmente, os valores de f_{ab} resultantes de 5 e 2000 perfis apresentaram valores médios similares, entretanto, como esperado, a dispersão foi significativamente menor quando 2000 perfis são considerados.

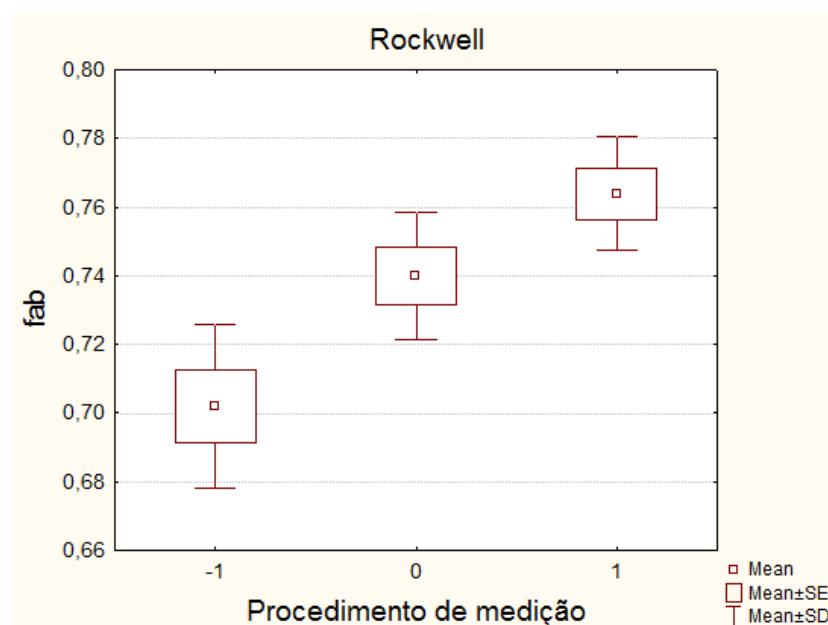


Figura 4.39 – *Box Plots* dos valores de f_{ab} em função do procedimento de medição para riscos Rockwell com força aplicada de 25 N.

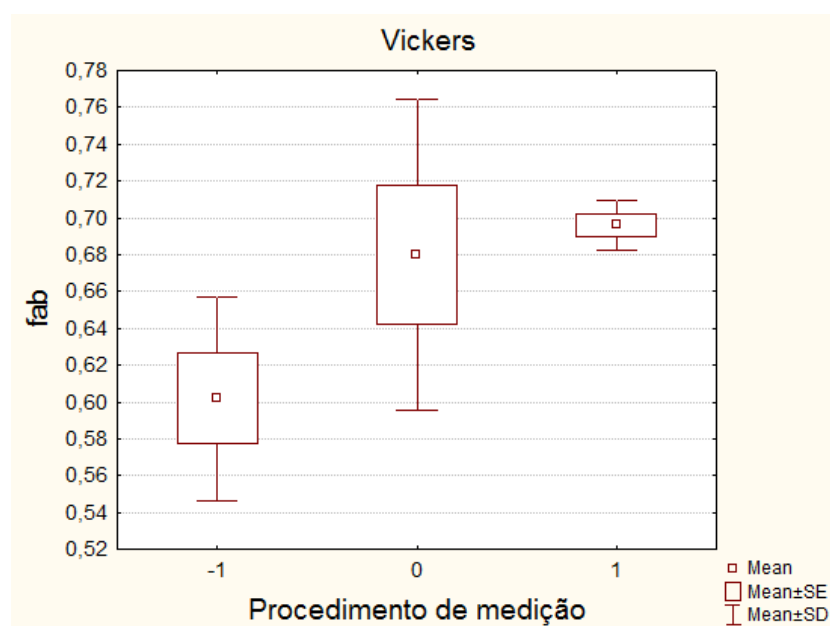


Figura 4.40 – Box Plots dos valores de f_{ab} em função do procedimento de medição para riscos Vickers com força aplicada de 3 N.

A normalidade dos resíduos foi verificada e aceita por meio de gráficos de probabilidade normal, mostrados nas Figs. 4.41 e 4.42. Nestas figuras se observa que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente em torno de uma linha reta.

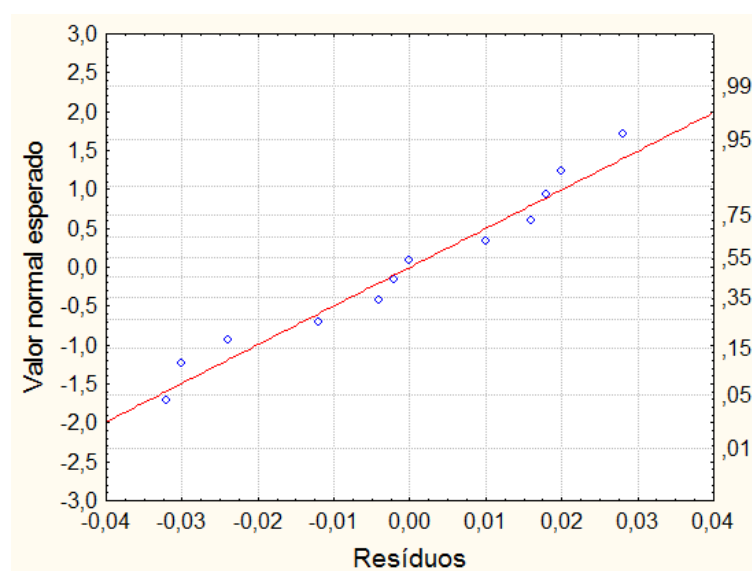


Figura 4.41 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o planejamento simples proposto em três níveis. Dados obtidos em riscos Rockwell-C.

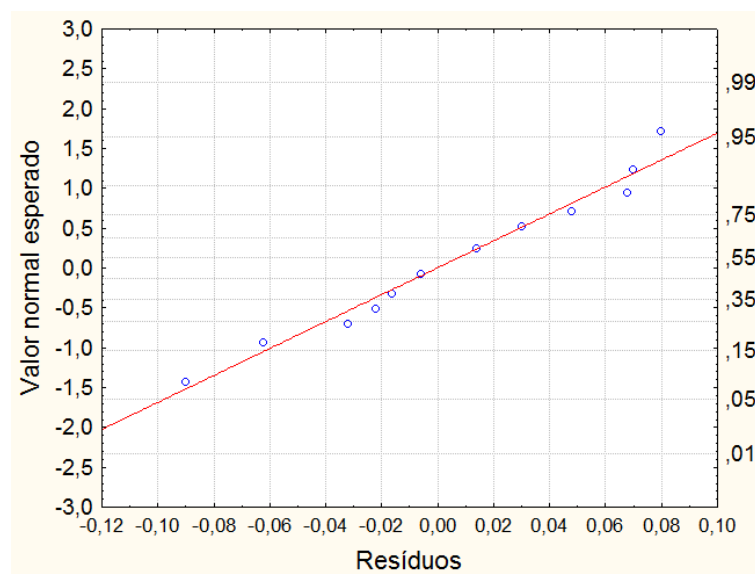


Figura 4.42 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o planejamento simples proposto em três níveis. Dados obtidos em riscos Vickers.

Adicionalmente, foi efetuada uma ANOVA para um planejamento simples, onde o fator procedimento de medição variou em apenas dois níveis, conforme mostra a Tab. 4.7. O objetivo desta análise era verificar se os procedimentos de medição sem contato utilizados, considerando 5 (-1) e 2000 (+1) perfis, produzem os mesmos valores de f_{ab} ($H_0: \mu_1 = \mu_2$).

Tabela 4.7 – Matriz do planejamento com um único fator (procedimento de medição) variando em dois níveis.

Experimento	Procedimento de medição - PM (Fator 1)
1	-1 (sem contato – 5 perfis)
2	+1 (sem contato – 2000 perfis)

De acordo com a Tab. 4.8, o tipo de medição não provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores de f_{ab} , visto que o p -valor foi maior que 0,05. A normalidade dos resíduos foi verificada e confirmada por meio de gráficos de probabilidade normal, mostrados nas Figs. 4.43 e 4.44.

Tabela 4.8 – Resultado da ANOVA para o planejamento simples, onde o fator procedimento de medição foi avaliado em dois níveis.

Indentador	Fator	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F-valor	p-valor
Rockwell-C	Intercepto	5,655040	1	5,655040	17952,51	0,000000
	PM	0,001440	1	0,001440	4,57	0,064969
	Erro	0,002520	8	0,000315		
Vickers	Intercepto	4,733440	1	4,733440	1300,396	0,000000
	PM	0,000640	1	0,000640	0,176	0,686020
	Erro	0,029120	8	0,003640		

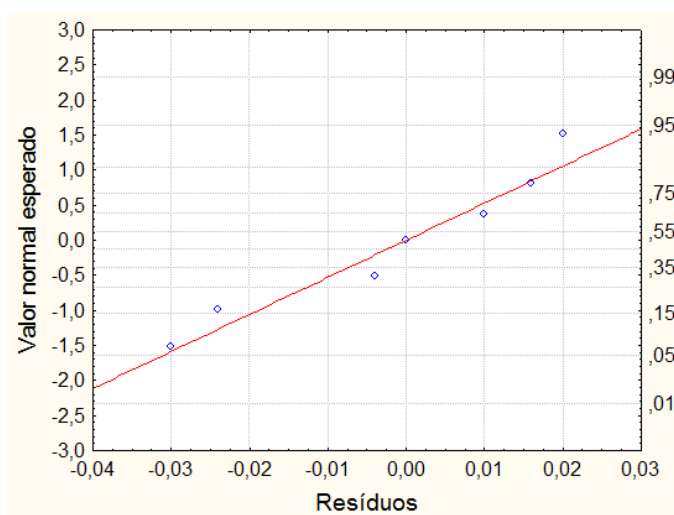


Figura 4.43 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o planejamento simples proposto em dois níveis. Dados obtidos em riscos Rockwell-C.

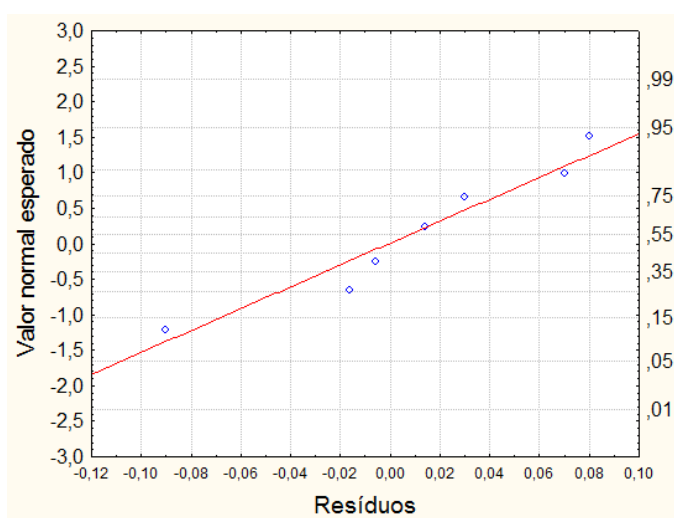


Figura 4.44 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para o planejamento simples proposto em dois níveis. Dados obtidos em riscos Vickers.

4.7.2. Comparação dos resultados com a literatura

A Tabela 4.9 mostra uma comparação dos resultados obtidos neste trabalho e aqueles decorrentes de outras pesquisas realizadas por outros autores. Em particular são mostradas algumas condições experimentais e o percentual máximo (%max) que o desvio padrão representa em relação ao valor médio do f_{ab} . Vale destacar que em alguns casos os valores foram estimados a partir de gráficos e, portanto, estes são aproximados. Nesta Tabela TM indica o tipo de medição, com contato (Com) ou sem contato (Sem).

Tabela 4.9 – Comparação dos resultados obtidos neste trabalho e aqueles decorrentes de outras pesquisas realizadas por outros autores, onde são mostradas algumas condições experimentais e o percentual máximo (%max) que o desvio padrão representa em relação ao valor médio do f_{ab} .

Autor	Material	Indentador	TM	%max
Borges (atual) 5 perfis	Bloco-padrão (Liga de aço com alto teor de carbono e cromo)	Rockwell-C	Com	8
	Bloco-padrão	Vickers	Com	12
Borges (atual) 5 perfis	Bloco-padrão	Rockwell-C	Sem	21
	Bloco-padrão	Vickers	Sem	26
Borges (atual) 2000 perfis	Bloco-padrão	Rockwell-C	Sem	2
	Bloco-padrão	Vickers	Sem	2
Franco e Sinatora (2017) 1024 perfis	AISI 1070 polido	Cônico	Sem	38
	AISI 1070 retificado	Cônico	Sem	40
	FoFo polido	Cônico	Sem	75
	FoFo retificado	Cônico	Sem	50
Pöhl et al. (2016) 5 perfis	Ferro puro	Esfero-cônico	Com	114
	AISI1045	Esfero-cônico	Com	115
	AISI304L	Esfero-cônico	Com	38

Para facilitar a análise a Fig. 4.45 mostra por meio de um gráfico de barras as informações contidas na Tab. 4.9. Esta figura exibe o percentual máximo (%max) que o desvio padrão representa em relação ao valor médio do f_{ab} , para os trabalhos citados.

Franco; Sinatora (2017) destacaram que os valores de f_{ab} calculados a partir de medições realizadas com o equipamento de interferometria óptica não superaram os problemas relacionados à medição das áreas de interesse.

As últimas três condições avaliadas correspondem ao trabalho de Pohl et al. (2016). Estes autores calcularam a média e o desvio padrão a partir de medições efetuadas ao longo de riscos produzidos com força variável, fato este que pode ser a causa principal dos valores significativos de desvio padrão observados. Em alguns casos o desvio padrão ultrapassou os valores médios de f_{ab} .

Análises adicionais não podem ser conduzidas uma vez que ambos os trabalhos, Pohl et al. (2016) e Franco; Sinatora (2017), não descreveram detalhadamente a metodologia adotada desde a fabricação das amostras até a análise dos dados.

4.8 Metodologia desenvolvida e adotada no presente trabalho

A seguir é descrita a metodologia proposta e adotada no presente trabalho, visando à melhoria da repetibilidade do fator de remoção de material (f_{ab}).

a) Preparação da amostra

- Indique uma tolerância de planeza de 0,06 mm na superfície a ser avaliada da amostra.
- Indique uma tolerância de paralelismo de 0,06 mm entre a superfície de teste e a superfície oposta.
- Indique uma tolerância para o parâmetro de rugosidade Ra da ordem de 0,05 μm ou menor. De acordo com Davim (2008), o processo de lapidação garante a obtenção de valores de Ra nesta faixa.
- Após a fabricação, efetue o controle geométrico das amostras. Em particular, a rugosidade deve ser avaliada em vários locais na superfície da amostra visando verificar a homogeneidade desta.
- Proteja a amostra para evitar oxidação.

b) Esclerometria retilínea

- Verifique o nivelamento da mesa do esclerômetro em duas direções perpendiculares.
- Faça um estudo prévio para determinar a força a ser aplicada para realização dos riscos em cada material, de modo que os riscos fiquem nítidos e se sobressaiam às microirregularidades superficiais da peça avaliada.
- Verifique o posicionamento do indentador em relação à amostra (ângulo e superfície de ataque), de modo que atenda aos requisitos propostos.
- Limpe a peça e o indentador antes de iniciar o processo de riscamento.
- Verifique o nivelamento do conjunto: mesa de teste e amostra, utilizando primeiramente nível bolha e posteriormente relógio comparador. Faça esta última verificação em duas direções perpendiculares entre si.
- Efetue a limpeza do indentador entre um risco e outro.
- Faça vários riscos em cada condição de teste (pelo menos três).
- Após o riscamento, proteja a superfície riscada com vaselina para evitar a deterioração desta.

c) Determinação dos perfis

- Verifique a calibração do equipamento. Se este não estiver calibrado, adote algum procedimento para avaliar seu desempenho metrológico.
- Se a medição for sem contato escolha uma ampliação da lente que facilite a medição. Para medição com contato se atenha ao raio da ponta do apalpador.
- Limpe a peça.
- Faça as medições a temperatura ambiente de 20 ± 1 °C. Monitore a temperatura do ambiente durante as medições.
- Evite os efeitos da vibração mecânica transmitida pelo solo, posicionando o equipamento de medição e a amostra sob uma mesa inercial.
- Controle a direção de apalpamento e/ou de medição, de forma a diminuir o desvio de perpendicularidade desta em relação ao risco avaliado. Faça um estudo para determinar qual o tamanho amostral adequado de forma a reduzir os efeitos da variabilidade das leituras (usar como critério a estabilidade do desvio padrão amostral).

- Após a medição, proteja a superfície riscada para evitar a deterioração desta. Pode ser que medições adicionais sejam necessárias.

d) Determinação das áreas de interesse para o cálculo do f_{ab}

- Verifique a calibração do sistema de medição de áreas, incluindo os programas computacionais. Se este não estiver calibrado, adote algum procedimento para avaliar seu desempenho metrológico.
- Submeta todos os riscos à mesma ampliação.
- Use apenas o Operador *LEVELING* para nivelamento do perfil do risco durante a obtenção das áreas de interesse.
- Efetue o nivelamento de cada risco individualmente.
- Meça as áreas de cada risco individualmente.
- Determine o posicionamento da linha de referência por meio do programa computacional para reduzir possíveis tendências do operador.
- Defina a priori uma mesma distância a ambos os lados do centro do sulco, a fim de determinar o ponto de transição entre as áreas deformadas pelo indentador e a superfície original. Adote o mesmo valor de distância durante todas as medições.

e) Análise dos dados

- Calcule a média e o desvio padrão em cada caso.
- Avalie a incerteza de medição associada a todos os mensurandos.
- Compare os valores de f_{ab} considerando os valores médios e o desvio padrão amostral ou os valores médios e a incerteza de medição. Quando comparados os valores médios sozinhos podem induzir a elaboração de conclusões erradas.
- Obtenha imagens via MEV e analise-as juntamente com os perfis medidos, de forma a comparar a equivalência de ambos e verificar a ocorrência de eventos adversos, tais como a formação de falsos ombros e movimentação atípica de material ao longo do risco.
- Faça análises estatísticas, sempre que possível para confirmar as conclusões decorrentes.

f) Operadores

- Promova a capacitação dos operadores em todas as fases do processo.

g) Rastreabilidade metrológica

- Documente o protocolo utilizado para a realização de todas as etapas do processo. Desta forma será possível reproduzir os resultados.
- Calibre todos os sistemas de medição, incluindo os programas computacionais, de forma a contribuir com a rastreabilidade metrológica e a confiabilidade do f_{ab} .
- Avalie a incerteza de medição associada a todos os mensurandos, visando contribuir com a rastreabilidade metrológica do f_{ab} , bem como atender a ABNT NBR ISO IEC 17025 (ABNT, 2017).

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Este trabalho investigou o efeito dos parâmetros de influência (fontes de erros) nas diferentes etapas experimentais necessárias para determinar o f_{ab} na perfilometria mecânica com contato e na medição óptica sem contato, visando aumentar a repetibilidade dos valores de f_{ab} . As principais conclusões decorrentes foram divididas em testes preliminares e intermediários e testes definitivos.

Testes preliminares e intermediários - medição com contato

a) A ANOVA indicou que o fator força produziu efeitos estatisticamente significativos nos valores de f_{ab} , para uma confiabilidade de 95 %. Os valores médios de f_{ab} exibiram uma tendência de crescimento na medida em que a força aumentou de 2 N para 4 N para indentador Vickers. Por sua vez, para o indentador Rockwell se observou o efeito contrário, de diminuição com o aumento da força.

b) Em amostras de aço ferramenta, um aumento da força de riscamento com indentador Rockwell-C de 20 para 30 N provocou a redução dos valores de desvio padrão na ordem de 47 %. Por sua vez, quando a força aumentou de 2 para 4 N durante o riscamento com indentador Vickers o desvio padrão foi reduzido em torno de 18 %.

c) A rugosidade da superfície de teste contribuiu de forma significativa para a baixa repetibilidade dos valores do fator f_{ab} , impossibilitando qualquer tipo de análise em riscos produzidos na amostra de alumina ($Ra = 0,70 \pm 0,23 \mu m$). Os riscos produzidos não se sobrepuseram às microirregularidades presentes na superfície da amostra. Ademais, o material mostrou comportamento frágil nos testes realizados, inclusive apresentando lascamentos nas laterais do sulco, o que prejudicou o cálculo do fator f_{ab} .

d) Para amostras de aço ferramenta com rugosidade $Ra = 0,04 \pm 0,08 \mu m$, a estabilidade do desvio padrão amostral associado aos valores de f_{ab} foi alcançada realizando 25 medições para riscos realizados com os indentadores Rockwell-C e Vickers. Nesta etapa do trabalho o protocolo ainda não tinha sido totalmente implantado e observou-se que a adoção de tolerâncias macro e microgeométricas para fabricação das amostras não foi suficiente para garantir a repetibilidade dos valores de f_{ab} requerida, e o acabamento superficial deveria ser ainda melhorado.

Testes definitivos - medição com contato e sem contato

A metodologia proposta para determinação do fator f_{ab} na perfilometria mecânica com contato e na medição óptica sem contato provou ser robusta, eficiente e rastreável.

Medições com contato

a) Para amostras de liga de aço com alto teor de carbono e cromo e elevada exatidão dimensional e geométrica (bloco-padrão), foi possível associar os valores de f_{ab} a um mecanismo de desgaste específico, considerando as duas condições testadas. No entanto, para o aço ferramenta, essa associação não foi possível, indicando que as amostras utilizadas para avaliar os mecanismos de desgaste abrasivo requerem alta precisão dimensional e geométrica, principalmente em relação à rugosidade.

b) No bloco-padrão, o desvio padrão representou no pior dos casos, 8 % e 12 % em relação a média, para os riscos realizados com os indentadores Rockwell-C e Vickers, respectivamente.

c) Os valores de desvio padrão associado ao f_{ab} no bloco-padrão corroboram ao fato de que para os riscos realizados com o indentador Vickers a rugosidade da superfície e a não homogeneidade da rugosidade são uma causa importante da variabilidade.

d) Após a adoção de um rigoroso protocolo para o nivelamento da mesa do esclerômetro e para a medição das áreas de interesse para o cálculo do f_{ab} , o tamanho amostral não influenciou os valores médios de f_{ab} nem o desvio padrão associado. No entanto, um aumento no tamanho amostral reduziu a incerteza expandida associada.

e) O protocolo de medição adotado para obter valores de áreas durante a determinação do f_{ab} contribuiu para a redução da variabilidade deste, resolvendo os principais problemas relacionados à medição das áreas de interesse.

Medições sem contato

a) A determinação do f_{ab} a partir de cinco perfis individuais não se mostrou adequada em nenhuma das condições testadas. O desvio padrão representou na pior condição, 21 % e 26 % em relação a média, para os riscos realizados com os indentadores Rockwell-C e Vickers, respectivamente. Estes percentuais foram superiores aos valores encontrados na medição com contato.

b) A adoção de um perfil médio para determinação do f_{ab} possibilitou a obtenção de valores de desvio padrão da ordem de 2 %.

c) Os perfis médios obtidos a partir de 2000 medições sem contato extinguem as micro irregularidades que não possuem representatividade dentro dos dados amostrais, destacando desta forma o evento prevalecente no risco e atuando como um filtro aos eventos adversos.

d) O perfil médio é mais representativo nos riscos obtidos a partir do indentador Rockwell-C, do que aqueles observados para o Vickers, pois exibe menores desvios em relação aos perfis individuais.

e) A ANOVA indicou que os três procedimentos de medição adotados (5 perfis com contato, 5 perfis sem contato e 2000 perfis sem contato) resultaram em valores de f_{ab} distintos para os riscos realizados com o indentador Rockwell-C. Já para os riscos realizados com o indentador Vickers, o tipo de medição não provocou efeitos significativos.

f) O fator procedimento de medição não provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores de f_{ab} para ambos os indentadores utilizados, quando comparados os dados obtidos a partir de 5 perfis sem contato e 2000 perfis sem contato.

g) Os valores de f_{ab} obtidos no presente trabalho exibem uma repetibilidade maior que aqueles encontrados na literatura estudada. Isto foi possível adotando rigorosos protocolos em todas as etapas experimentais, desde a fabricação das amostras até a análise dos resultados.

CAPÍTULO VI

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos estudos e conclusões obtidas nesta pesquisa, são apresentadas as seguintes propostas para trabalhos futuros.

- Estudos adicionais devem ser realizados visando a fabricação de amostras com rugosidade Ra igual ou menor que $0,05\ \mu\text{m}$ e acabamento superficial homogêneo.
- Devem ser efetuadas pesquisas para uma compreensão mais aprofundada de como os fatores: formação de cavacos, formação de falsos ombros e rugosidade afetam a variabilidade do f_{ab} .
- Aplicar a metodologia proposta para determinação do f_{ab} em outros materiais.
- Aplicar a metodologia proposta para obtenção do f_{ab} considerando outros sistemas de medição para determinação das áreas de interesse, como os interferômetros.
- Utilizar o fator f_{ab} em modelos que representam o desgaste abrasivo em aplicações práticas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G40-2015**: Standard terminology relating to wear and erosion. [S.l.]: ASTM, 2015.

ARENCIBIA, R. V.; CEDRÉ, E. M. D.; CRESPO, A. C.; PIRATELLI FILHO, A. Incerteza na medição dos parâmetros geométricos do cordão de solda. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 62–70, 2011.

<https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000100008>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4288**: especificações geométricas do produto (GPS) – rugosidade: método do perfil – regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC 17025**: requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 32p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 1**: temperatura padrão de referência para medições industriais de comprimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 2p.

BARRADAS, H. A.; COSTA, H. L.; MELLO, J. D. B. O uso da topografia de superfícies 3D para determinar o fator f_{ab} em ensaios esclerométricos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA – COBEM, 16., 2001, Uberlândia. **Anais [...]**. Uberlândia: COBEM, 2001.

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

BHUSHAN, B. Surface roughness analysis and measurement techniques. *In*: BHUSHAN, B. (ed.). **Modern Tribology Handbook**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2000. p. 49–120.

BURWELL, J. T. Survey of possible wear mechanisms. **Wear**, Lausanne, Suíça, v. 1, issue 2, p. 119–141, 1957.

[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(57\)90005-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(57)90005-4)

BUTTERY, T. C. **Grinding and abrasive wear**. 1969. Tese (Doutorado) – University of Leicester, England, 1969.

BUTTERY, T. C.; ARCHARD, J. F. Grinding and abrasive wear. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, [s.l.], v. 185, issue 1, p. 537–551, 1970.

https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1970_185_058_02

CHAND, M.; MEHTA, A.; SHARMA, R.; OJHA, V. N.; CHAUDHARY, K. P. Roughness measurement using optical profiler with self-reference laser and stylus instrument: A

comparative study. **Indian Journal of Pure & Applied Physics**, [s.l.], v. 49, p. 335–339, 2011.

DAVIM, J. P. **Princípios da maquinagem**. 2. ed. Porto: Publindústria Edições Técnicas, 2008.

DÉSENFANT, M.; PRIEL, M. Reference and additional methods for measurement uncertainty evaluation. **Measurement**, [s.l.], v. 95, p. 339–344, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.10.022>

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 4964**: High speed steel tool holder bits. [S.l.]: DIN, 1962.

DOBES, J.; LEAL, J. E. S.; PROFETA, J.; SOUSA, M. M.; LÉPORE NETO, F. P.; PIRATELLI FILHO, A.; ARENCIBIA, R. V. Effect of mechanical vibration on Ra , Rq , Rz and Rt roughness parameters. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 92, p. 393–406, 2017.
<https://doi.org/10.1007/s00170-017-0137-0>

FERREIRA, F. M. **Avaliação tribomecânica via esclerometria retilínea e indentação instrumentada do aço ABNT 8550**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

FRANCO, L. A. P. N. **Abrasão de ferro fundido cinzento**: aplicação a motores automotivos. 2015. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

FRANCO, L. A.; SINATORA, A. Material removal factor (f_{ab}): A critical assessment of its role in theoretical and practical approaches to abrasive wear of ductile materials. **Wear**, Lausanne, Suíça, v. 382–383, p. 51–61, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.04.006>

FREITAS, E. S. R. **Parâmetros topográficos para avaliação, caracterização e controle tribológicos de superfícies de engenharia**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology**: Friction and wear of engineering materials. 1. ed. London: Arnold, 1992.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia**: conceitos fundamentais e gerais e termos associados. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012. 95p.

JACOBSON, S.; WALLÉN, P.; HOGMARK, S. Fundamental aspects of abrasive wear studied by a new numerical simulation model. **Wear**, Lausanne, Suíça, v. 123, issue 2, p. 207–223, 1988.
[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(88\)90100-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(88)90100-7)

JARDRET, V.; ZAHOUANI, H.; LOUBET, J. L.; MATHIA, T. G. Understanding and quantification of elastic and plastic deformation during a scratch test. **Wear**, Lausanne, Suíça, v. 218, issue 1, p. 8–14, 1998.

[https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00200-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00200-2)

JCGM (Organization). **Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement**. [S.l.]: JCGM, 2008. Disponível em: https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf. Acesso em: 20 jul. 2016.

JOST, H. P. Tribology: Origin and future. **Wear**, Lausanne, Suíça, v. 136, issue 1, p. 1–17, 1990.

[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(90\)90068-L](https://doi.org/10.1016/0043-1648(90)90068-L)

KOBRICK, R. L.; KLAUS, D. M; STREET, K. W. Standardization of a volumetric displacement measurement for two-body abrasion scratch test data analysis. **Wear**, Lausanne, Suíça, v. 270, issues 9–10, p. 650–657, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.026>

KÖNIG, R. G. **Estudo do desgaste de revestimentos em matrizes de recorte a frio de cabeças de parafusos**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

LEACH, R. **Measurement Good Practice Guide No 37: The measurement of surface texture using stylus instruments**. Teddington, Middlesex, United Kingdom: HMSO, 2014. 110p.

LEE, D. H.; CHO, N. G. Assessment of surface profile data acquired by a stylus profilometer. **Meas Sci Technol**, USA, v. 23, p. 1–12, 2012.

<https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/10/105601>

LINDROOS, M.; VALTONEN, K.; KEMPPAINEN, A.; LAUKKANEN, A.; HOLMBERG K.; KUOKKALA, V. T. Wear behavior and work hardening of high strength steels in high stress abrasion. **Wear**, Lausanne, Suíça, v. 322–323, p. 32–40, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.10.018>

MANCOSU, R. D. **Recobrimento tribológico Cr-N e nitretação a plasma para melhoria da resistência à erosão cavitacional de um aço carbono ABNT 1045: uma abordagem topográfica**. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

MASEN, M. A.; DE ROOIJ, M. B.; SCHIPPER, D. J. Micro-contact based modelling of abrasive wear. **Wear**, Lausanne, Suíça, v. 258, issues 1–4, p. 339–348, 2005.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.009>

MELLO, J. D. B. Abordagem global do estudo do processo abrasivo: parte 1: considerações sobre os métodos abrasométricos. *In*: SEMINÁRIO SOBRE MATERIAIS RESISTENTES AO DESGASTE – ABM-EPUSP, 1., 1989, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: EPUSP, 1989.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.

MOTTA NETO, W. S.; LEAL, J. E. S.; ARANTES, L. J.; ARENCIBIA, R. V. The effect of stylus tip radius on Ra , Rq , Rp , Rv and Rt parameters in turned and milled samples.

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, London, v. 99, p. 1979–1992, 2018.

<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2630-5>

MULHEARN, T. O.; SAMUELS, L. E. The abrasion of metals: A model of the process.

Wear, Lausanne, Suíça, v. 5, issue 6, p. 478–498, 1962.

[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(62\)90064-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(62)90064-9)

PÖHL, F.; HARDES, C.; THEISEN, W. Scratch behavior of soft metallic materials. **AIMS Materials Science**, [s.l.], v. 3, p. 390–403, 2016.

<https://doi.org/10.3934/matisci.2016.2.390>

POON, C. Y.; BHUSHAN, B. Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler. **Wear**, Lausanne, Suíça, v. 190, issue 1, p. 76–88, 1995.

[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06697-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06697-7)

REZENDE JUNIOR, M. V.; LEAL, J. E. S.; PIRES, R. R.; PAES, M. T. P.; RAMOS NETO, F. F.; FRANCO, S. D.; ARENCIBIA, R. V. Traceability for measurements carried out on incremental step loading equipment. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 41, p. 1–14, 2019.

<https://doi.org/10.1007/s40430-019-1817-5>

SEDRIKS, A. J.; MULHEARN, T. O. Mechanics of cutting and rubbing in simulated abrasive processes. **Wear**, Lausanne, Suíça, v. 6, issue 6, p. 457–466, 1963.

[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90281-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(63)90281-3)

SILVA JUNIOR, W. M. **Simulação do desgaste abrasivo via interações múltiplas**. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

SOUZA, C. C.; ARANTES, L. J.; PIRATELLI FILHO, A.; ARENCIBIA, R. V. Assessment of the effect of stylus tip radius on milled, bored, and honed surfaces. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 104, p. 2459–2471, 2019.

<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04083-5>

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. 3. ed. USA: Elsevier Butterworth–Heinemann, 2001.

TELES, V. C. **Desgaste abrasivo de revestimentos CrAlSiN multicamada/gradiente**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

TYLCZAK, J. H. Abrasive wear. In: BLAU, P. J. *et al.* (ed.). **ASM Handbook: Friction, Lubrication and Wear Technology**. USA: ASM International, 1992. v. 18. p. 184–190.

VORBURGER, T. V.; RHEE, H. G.; RENEGAR, T. B.; SONG, J. F.; ZHENG, A. Comparison of optical and stylus methods for measurement of surface texture. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 33, p. 110–118, 2007.

<https://doi.org/10.1007/s00170-007-0953-8>

WATSON, M. *et al.* An analysis of the quality of experimental design and reliability of results in tribology research. **Wear**, Lausanne, Suíça, v. 426–427, p. 1712–1718, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.028>

WILLIAMS, J. A. Analytical models of scratch hardness. **Tribology International**, Surrey, Inglaterra, GB, v. 29, issue 8, p. 675–694, 1996.
[https://doi.org/10.1016/0301-679X\(96\)00014-X](https://doi.org/10.1016/0301-679X(96)00014-X)

YOSHIDA, I.; TSUKADA, T. Uncertainty of wavelength limitation due to stylus tip radius for engineering surface texture based on wavelength and amplitude by FFT. **Wear**, Lausanne, Suíça, v. 261, issues 11–12, p. 1225–1231, 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.006>

ZANATTA, A. M. **Influência do tratamento térmico e do tipo de reforço nas propriedades de compósitos a base de ligas de alumínio obtidos via metalurgia do pó.** 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2007.

ZUM GAHR, K. H. Formation of wear debris by the abrasion of ductile metals. **Wear**, Lausanne, Suíça, v. 74, issue 2, p. 353–373, 1981.
[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90173-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(81)90173-3)

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and Wear of Materials**. Amsterdam: Elsevier, 1987.

ZUM GAHR, K. H. Modelling of two-body abrasive wear. **Wear**, Lausanne, Suíça, v. 124, issue 1, p. 87–103, 1988.
[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(88\)90236-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(88)90236-0)

ZUM GAHR, K. H. Wear by hard particles. **Tribology International**, Surrey, Inglaterra, GB, v. 31, issue 10, p. 587–596, 1998.
[https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(98\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00079-6)

APÊNDICE I – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO PERFILÔMETRO COM CONTATO

	Data: 25/10/2018	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 1 de 3
Certificado de Calibração: CCA-0001/2018		

1. Cliente

Nome ou Razão Social: LEPU
 Endereço: Avenida João Naves de Ávila, 2121
 Telefone: (34) 3239-4584
 E-mail: Não consta

2. Instrumento de medição

Instrumento: perfilômetro
 Tipo: portátil
 Fabricante: Taylor Hobson
 Tipo: Form Talysurf Intra 2
 Resolução: 0,016 μm
 Serial: 453
 Identificação patrimonial: não tem
 Última calibração: 16/11/2017

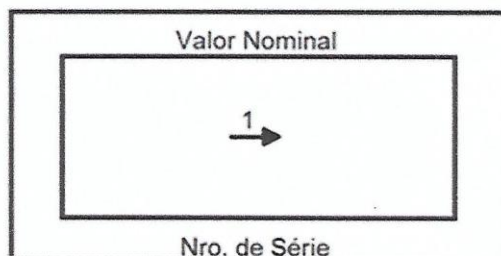
3. Calibração

Ordem do serviço: 01/2018
 Data do pedido: 25/10/2018
 Data da calibração: 25/10/2018

4. Procedimento

Inicialmente foi realizada a análise visual tanto do instrumento quanto do padrão de rugosidade e não foi notada nenhuma anomalia. O perfilômetro funciona de forma adequada e o padrão se encontra em bom estado de conservação, sem a presença de risco e defeitos aparentes. O padrão de rugosidade possui R_a igual a 0,38 μm e foi adotada uma posição central para a realização das medições. Foram efetuadas dez medições.

A posição de medição pode ser observada na figura abaixo.



Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração. Av. João Naves de Ávila, 2121 – UFU, CAMPUS Santa Mônica, Bloco 10 Uberlândia - MG. CEP 38400-902. Fone (34) 3239 4584

APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO PERFILÔMETRO COM CONTATO

	Data: 25/10/2018	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 2 de 3
Certificado de Calibração: CCA-0001/2018		

Condições de Medição: R_a (0,38 μm)
 Cut-off (l_r) = 0,8 mm
 Comprimento de avaliação (l_n) = 5,6 mm

5. Condições ambientais

Temperatura: (20 $\pm$ 1) °C

6. Padrões e equipamentos

Tipo: Padrão de Rugosidade
 Fabricante: Mitutoyo
 Código: 178-604
 Número de série: 001031008
 Valor nominal: R_a (0,38 μm)
 Número do Certificado de Calibração: 15218/11
 Incerteza expandida: 6 % para $k = 2,65$ e 95 % de abrangência

Tipo: Termo-higrômetro Digital
 Fabricante: Instrutherm
 Modelo: HT-260
 Número de série: 06120362
 Número do Certificado de Calibração: R4996/13
 Incerteza expandida: 0,3 °C para $k = 2,00$ e 95 % de abrangência.

7. Resultados da calibração

R_a (0,38 μm)										
Posição	Leituras (μm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,3881	0,3848	0,3866	0,3915	0,3946	0,3886	0,3900	0,4009	0,3903	0,3965

Nota: Foi apresentado dois algarismos adicionais nos valores de R_a .

Média (μm)	Desvio Padrão (μm)
0,39	0,005

Nota: Foi apresentado um algarismo adicional no valor do desvio padrão.

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração. Av. João Naves de Ávila, 2121 – UFU, CAMPUS Santa Mônica, Bloco 10 Uberlândia - MG. CEP 38400-902. Fone (34) 3239 4584

APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO PERFILÔMETRO COM CONTATO

	Data: 25/10/2018	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 3 de 3
Certificado de Calibração: CCA-0001/2018		

8. Incerteza da calibração

Posição 1	Ra (0,38 μm)	
	U (μm)	k
	0,02	2,39

A incerteza expandida (U) relatada é declarada como a incerteza padrão combinada de medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t corresponde a um nível de abrangência de aproximadamente 95 %. A incerteza da calibração foi determinada de acordo com a terceira edição do Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (BIPM et al., 2008). Esta incerteza representa 6 % do valor médio de Ra considerado.

Data da Emissão: Uberlândia, (25) de (outubro) de (2018).



Rosenda Valdés Arencibia
Coordenadora do Laboratório
de Metrologia – LEMETRO



Elsio Júnior Bonati Borges
Operador

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração. Av. João Naves de Ávila, 2121 – UFU, CAMPUS Santa Mônica, Bloco 10 Uberlândia - MG. CEP 38400-902. Fone (34) 3239 4584

APÊNDICE II

Resultados do controle dimensional e geométrico das peças

A Tabela A2.1 mostra o valor médio do desvio de planeza das amostras de aço ferramenta e de alumina e a Tabela A2.2 apresenta o desvio de paralelismo médio obtido em cada caso. Nestas tabelas são apresentados ainda o fator de abrangência k e a incerteza expandida (95 %) associada.

Tabela A2.1 – Valores médios do desvio de planeza das amostras de aço ferramenta e de alumina. Fator de abrangência e incerteza expandida (95 %) associada.

Material	Amostra	Média (mm)	k	U (mm)
Aço ferramenta	1	0,010	2,20	0,004
	2	0,009	2,23	0,004
Alumina	1	0,038	2,20	0,005

Tabela A2.2 – Valores médios de desvio de paralelismo das amostras de aço ferramenta e de alumina. Fator de abrangência e incerteza expandida (95 %) associada.

Material	Amostra	Média (mm)	k	U (mm)
Aço ferramenta	1	0,063	2,21	0,006
	2	0,064	1,96	0,009
Alumina	1	0,017	2,26	0,006

Nas amostras avaliadas, o desvio de planeza obtido foi menor que 0,06 mm, estando, portanto, dentro da faixa de trabalho do translador piezelétrico (PZT) da máquina de esclerometria retilínea que será utilizada (a qual se movimenta unidirecionalmente por um percurso de 0,12 mm). Em relação aos valores de desvio de paralelismo obtidos nas amostras

de aço ferramenta, nota-se que, considerando a incerteza avaliada, há possibilidade de que os valores ultrapassem minimamente o limite estabelecido em projeto. No entanto, decidiu-se por realizar os testes nestas condições, avaliando como será o comportamento do translador piezelétrico (PZT) durante a aplicação da força no ensaio de esclerometria retilínea. Já em relação à amostra de alumina, o desvio de paralelismo obtido atendeu a especificação de projeto.

A Tabela A2.3 mostra os resultados decorrentes do controle dimensional e macrogeométrico do porta-amostra, bem como o fator de abrangência e a incerteza expandida para uma abrangência de 95 %. As dimensões lineares foram identificadas por meio de letras maiúsculas como mostra a Fig. A2.1.

Tabela A2.3 – Valores médios do desvio de planeza, do desvio de paralelismo e das dimensões lineares do porta-amostra. Fator de abrangência e incerteza expandida (U) 95 % associada.

Mensurando	Média (mm)	k	U (mm)
Planeza	0,056	2,23	0,005
Paralelismo	0,048	2,45	0,009
A	10,36	2,20	0,04
B	10,33	2,45	0,06
C	10,21	2,31	0,05
D	10,29	2,31	0,05
E	39,84	2,57	0,08
F	59,88	2,12	0,03
G	80,11	2,36	0,05
H	60,07	2,26	0,04
I	19,10	2,23	0,04

A partir da Tab. A2.3 se conclui que todas as especificações de projeto foram plenamente atendidas.

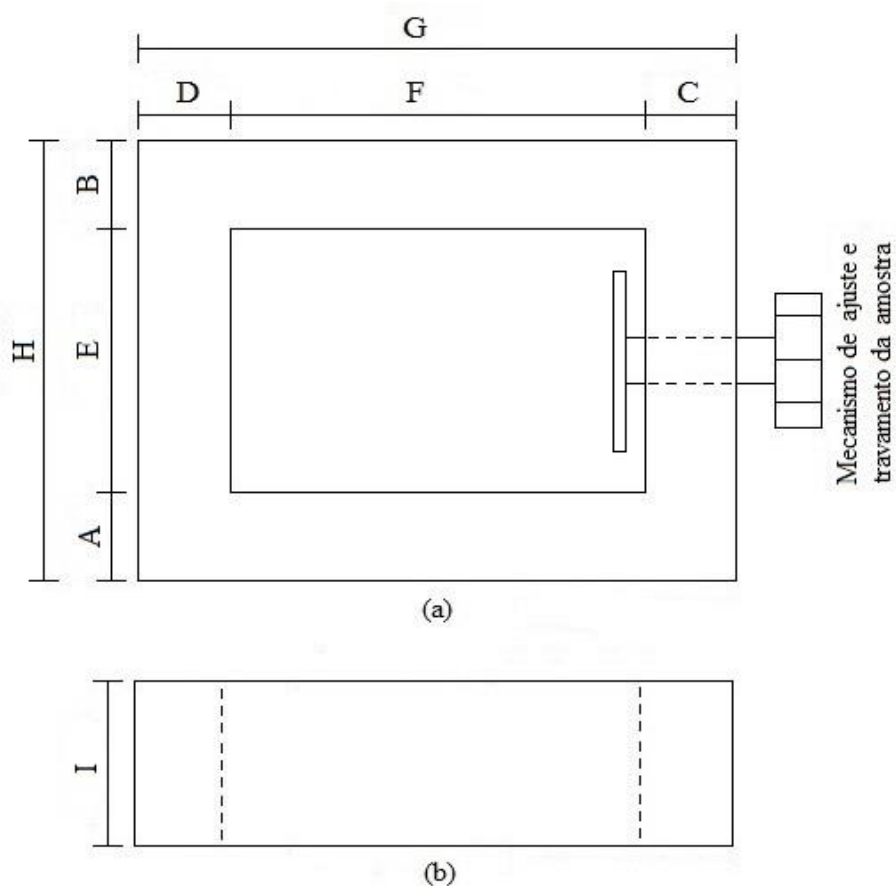


Figura A2.1 – Vista superior (a) e lateral (b) do porta-amostra.

A Tabela A2.4 mostra os valores médios de Ra obtidos, bem como o fator de abrangência e a incerteza expandida (95 %) associada.

Tabela A2.4 – Valores médios do parâmetro de rugosidade Ra das amostras de aço ferramenta e de alumina. Fator de abrangência e da incerteza expandida (95 %) associada em cada caso.

Material	Amostra	Média (μm)	k	U (μm)
Aço ferramenta	1	0,07	2,78	0,08
	2	0,04	2,08	0,08
Alumina	1	0,70	2,51	0,23

A partir da Tab. A2.4 se conclui que para o aço ferramenta os valores médios de Ra foram de 0,07 μm (Amostra 1) e 0,04 μm (Amostra 2). Estes valores apresentaram incerteza expandida (95 %) de 0,08 μm . Para a amostra de alumina o Ra foi aproximadamente 10 vezes maior (0,70 μm) mesmo após a lapidação e o polimento. Houve apenas uma diminuição na

incerteza expandida, devido à menor variabilidade de leituras, o que demonstra uma maior homogeneidade da rugosidade após a aplicação destes processos.

Diferentemente do aço ferramenta, onde é nítida a alteração de brilho na superfície trabalhada, a alumina, devido a sua característica esbranquiçada e opaca, não demonstrou melhora aparente na sua superfície após o polimento, tanto a partir de inspeções a olho nú, quanto com a utilização de microscópio.

Em relação ao desvio de rugosidade determinado em projeto, nota-se que os valores obtidos nas amostras de aço ferramenta atenderam ao estabelecido. Porém, quanto à alumina, este quesito não foi satisfeito. Findo as possibilidades de tratamento superficial disponíveis, optou-se por efetuar os testes nestas condições, avaliando os resultados obtidos e as possíveis interferências que possam causar nos valores de f_{ab} calculados.

Para a amostra de liga de aço com alto teor de carbono e cromo e elevada exatidão geométrica e dimensional (bloco-padrão), utilizada nos testes definitivos, a rugosidade foi verificada por meio do microscópio Alicona Infinite Focus SL, apresentando valores de Ra e Sa da ordem de $0,030\ \mu\text{m}$ e $0,028\ \mu\text{m}$, respectivamente.

APÊNDICE III

Avaliação do efeito do tamanho amostral (número de medições) nos valores de f_{ab} obtidos na amostra de aço ferramenta

As Figuras A3.1 e A3.2 mostram os resultados obtidos a partir de amostras definidas pela ordem de medição dos perfis, para a amostra de aço ferramenta e indentadores Vickers e Rockwell-C, respectivamente. As medições foram realizadas utilizando o perfilômetro mecânico (com contato).

Conclui-se a partir da Fig. A3.1 que o tamanho amostral influenciou os valores de f_{ab} para os riscos produzidos com o indentador Vickers. Os valores médios de f_{ab} e o desvio padrão amostral tenderam à estabilização na medida em que o tamanho amostral aumentou, alcançando a estabilização em 25 medições. Todavia, o desvio padrão amostral nesta condição representa aproximadamente 34 % do valor da média, resultado este que pode ser considerado não satisfatório. Para os riscos produzidos com indentador Rockwell-C, Fig. A3.2, os valores médios de f_{ab} e o desvio padrão se estabilizaram também em 25 medições. A repetibilidade dos resultados foi melhor que aquela observada para indentador Vickers, com um desvio padrão de 0,07 (13 % do valor da média), o qual pode ser considerado satisfatório.

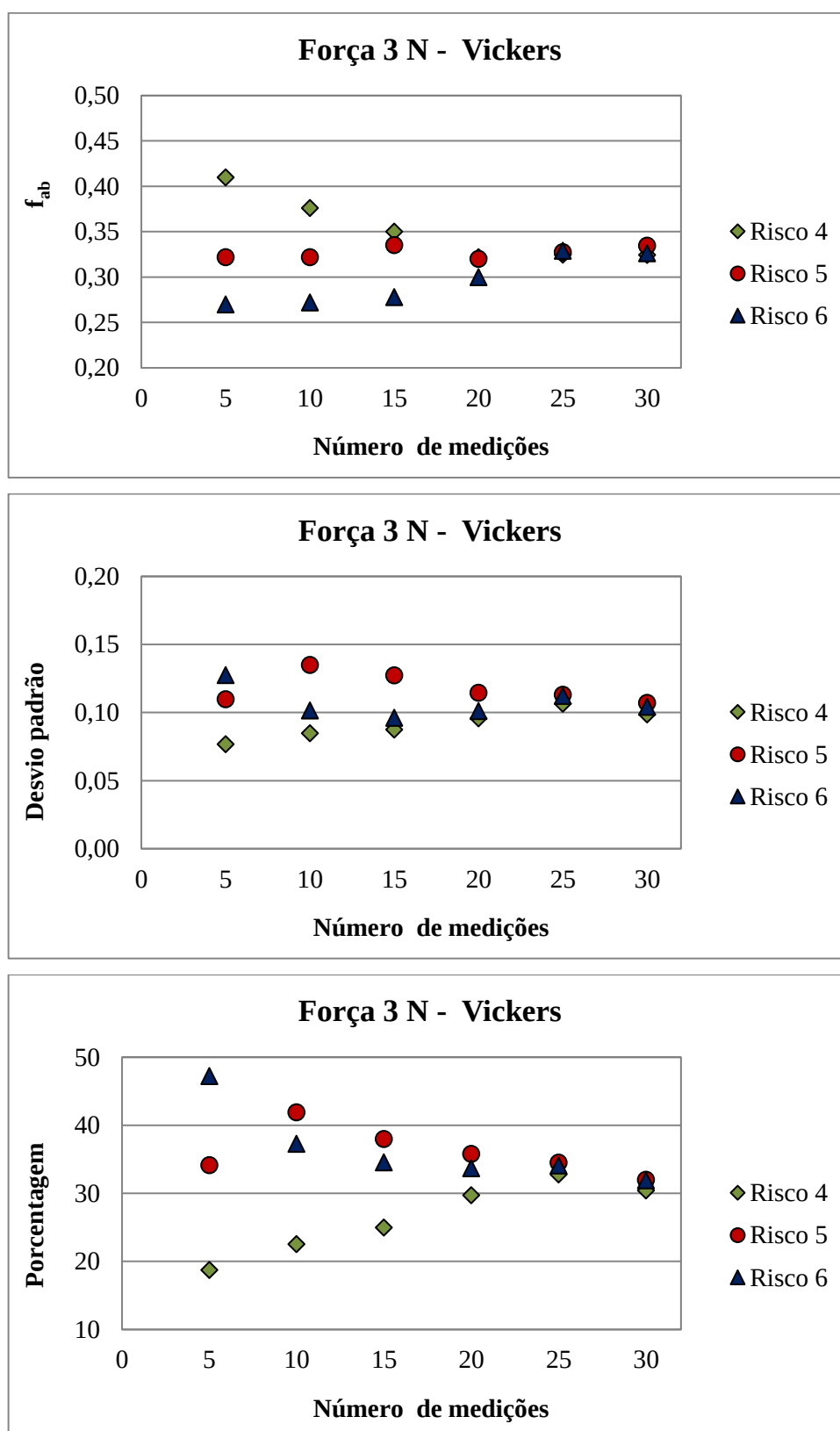


Figura A3.1 – Média, desvio padrão e porcentagem considerando diferentes tamanhos amostrais para riscos efetuados na amostra 2 de aço ferramenta com indentador Vickers, sendo que a escolha dos perfis foi obtida utilizando o critério da ordem de medição do perfil.

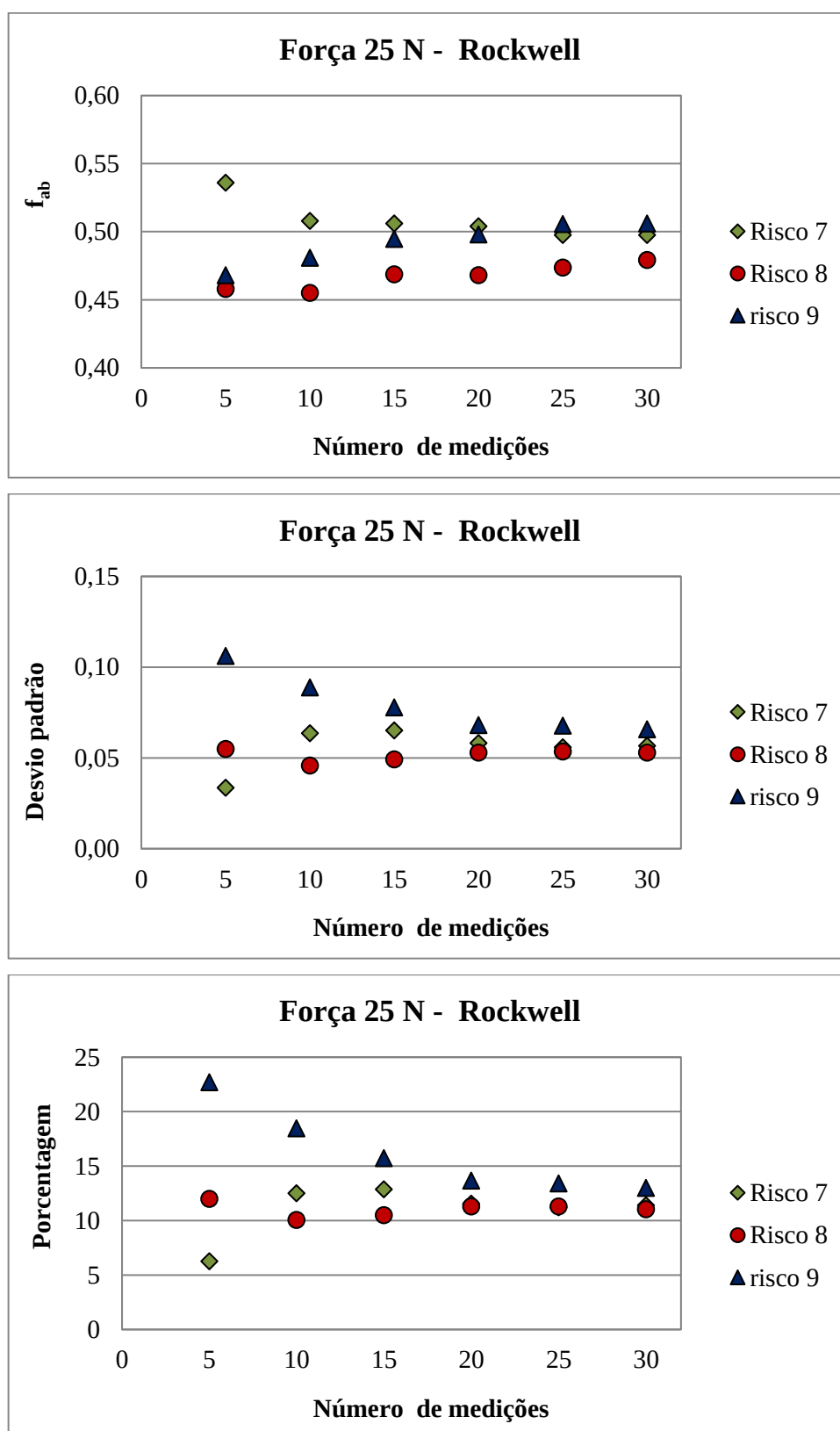


Figura A3.2 – Média, desvio padrão e porcentagem considerando diferentes tamanhos amostrais para riscos efetuados na amostra 2 de aço ferramenta com indentador Rockwell-C, sendo que a escolha dos perfis foi obtida utilizando o critério da ordem de medição do perfil.

Para o segundo estudo, onde a escolha dos perfis foi obtida aleatoriamente por sorteio, os resultados obtidos são mostrados nas Figs. A3.3 e A3.4.

Percebe-se visualmente pela comparação dos gráficos, que a aleatoriedade na condução dos testes trouxe influência significativa nos valores de desvio padrão associados ao f_{ab} , principalmente, quando comparados os resultados obtidos com 5 e 10 medições. Se pressupõe que, quando a análise é feita em riscos próximos, prevalecendo desta forma a análise de uma determinada região, os resultados apresentam menor dispersão, quando comparados com a análise de riscos distantes, caso este recorrente quando a escolha dos perfis é realizada por sorteio. No entanto, em relação ao objetivo do presente teste, quão seja o de avaliar o número de medições em que ocorre a estabilização dos resultados, ambos os métodos demonstraram que 25 medições são adequadas.

Com relação aos mecanismos de desgaste, a análise do f_{ab} pressupõe tendência de microsulcamento nos riscos efetuados com indentador Vickers a uma força de 3 N, pois os valores obtidos são menores que 0,50. Já para os riscos produzidos com indentador Rockwell-C e força de 25 N, observaram-se valores de f_{ab} da ordem de 0,50, o que significa que a porcentagem de material deformado plasticamente para as laterais do sulco é similar à quantidade de material perdido, não havendo neste caso predominância de um ou outro mecanismo de desgaste.

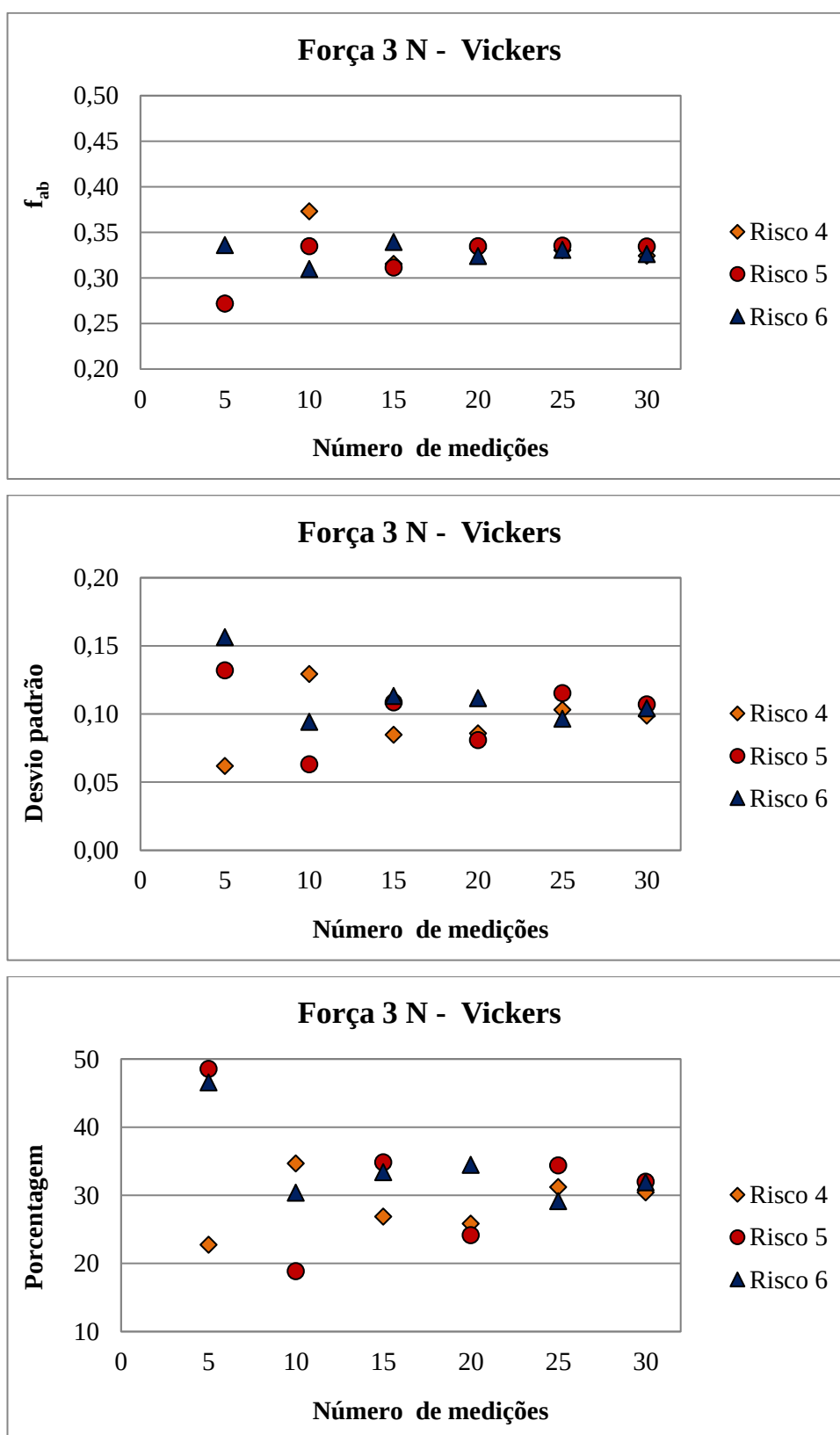


Figura A3.3 – Média, desvio padrão e porcentagem considerando diferentes tamanhos amostrais para riscos efetuados na amostra 2 de aço ferramenta com indentador Vickers, sendo que a escolha dos perfis foi obtida utilizando sorteio.

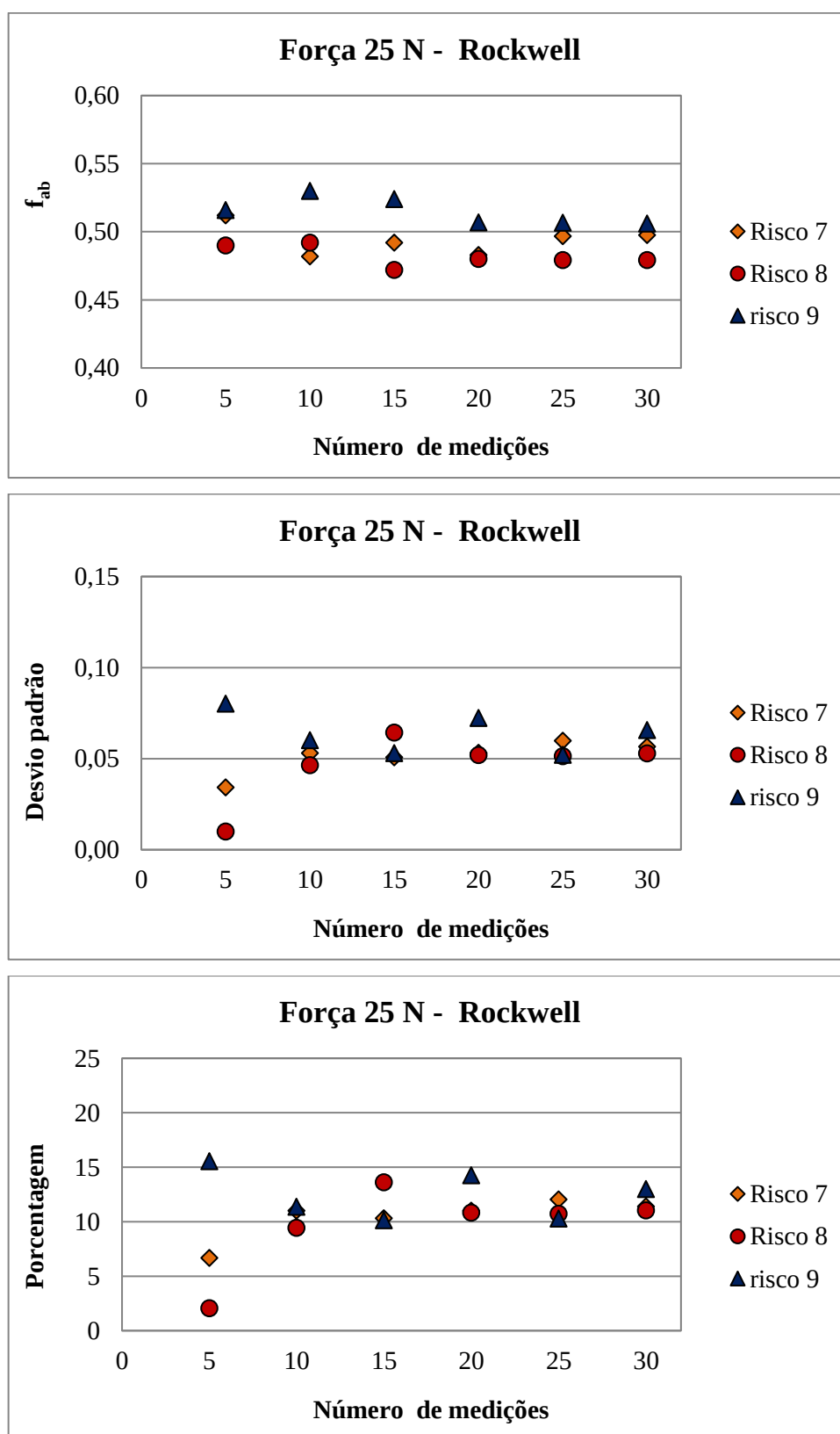


Figura A3.4 – Média, desvio padrão e porcentagem considerando diferentes tamanhos amostrais para riscos efetuados na amostra 2 de aço ferramenta com indentador Rockwell-C, sendo que a escolha dos perfis foi obtida utilizando sorteio.

Foi calculada a incerteza expandida (95 %) associada ao f_{ab} em todas as condições investigadas considerando apenas a incerteza padrão do Tipo A. Os resultados (em porcentagem com relação ao valor médio) são mostrados nas Figs. A3.5 e A3.6 para os indentadores Vickers e Rockwell-C, respectivamente, ambos referentes à amostra de aço ferramenta.

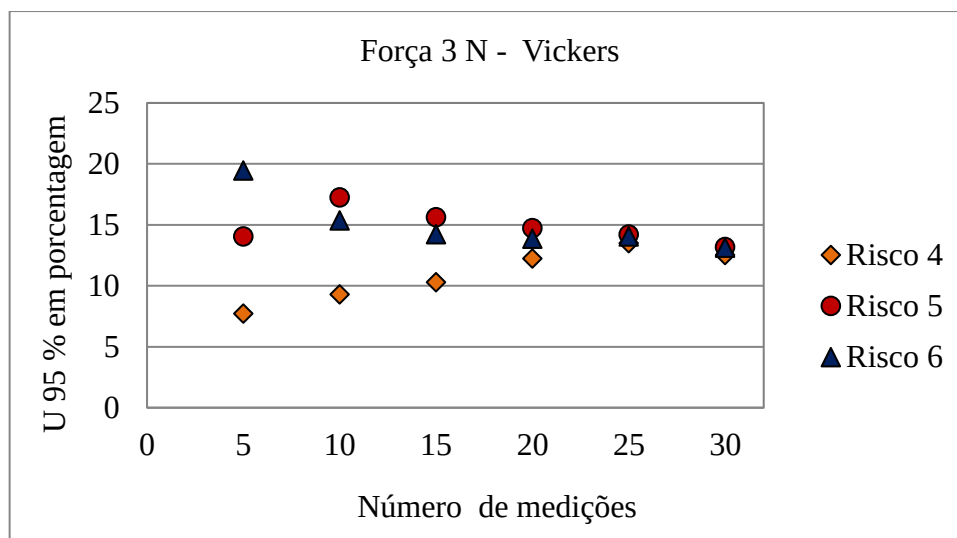


Figura A3.5 – Incerteza expandida (95 %) associada ao f_{ab} em todas as condições investigadas considerando apenas a incerteza padrão do Tipo A para indentador Vickers e amostra de aço ferramenta.

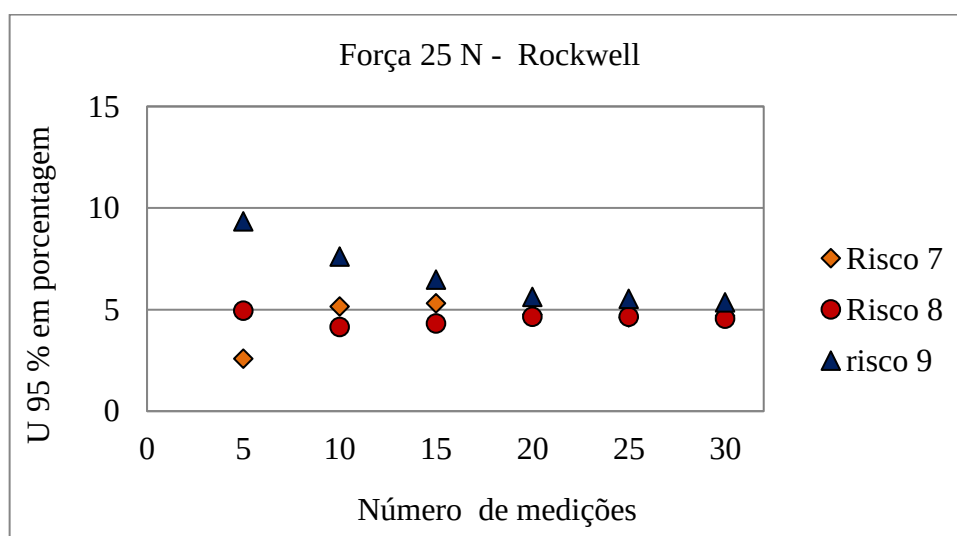


Figura A3.6 – Incerteza expandida (95 %) associada ao f_{ab} em todas as condições investigadas considerando apenas a incerteza padrão do Tipo A para indentador Rockwell-C e amostra de aço ferramenta.

Se conclui a partir das Figs. A3.5 e A3.6, que a incerteza expandida (95 %) exibiu valores de 13 % para indentador Vickers e 5 % para indentador Rockwell-C, considerando amostras com 25 elementos.

Na etapa do trabalho em que foi realizado os testes acima descritos, o protocolo ainda não tinha sido totalmente implantado e observou-se que a adoção de tolerâncias macro e microgeométricas para fabricação das amostras não foi suficiente para garantir a repetibilidade dos valores de f_{ab} requerida.

Novos experimentos foram conduzidos posteriormente, adotando um rigoroso protocolo para o nivelamento da mesa do esclerômetro e para a medição das áreas de interesse para o cálculo do f_{ab} . Nestes testes, utilizando novamente o perfilômetro mecânico com contato para a obtenção dos perfis e a mesma amostra de aço ferramenta, o tamanho amostral não influenciou os valores médios de f_{ab} nem o desvio padrão associado. No entanto, um aumento no tamanho amostral reduziu a incerteza expandida associada, conforme discutido nos itens 4.5.1 e 4.5.2.

Já quando a obtenção dos perfis foi realizada pelo método óptico sem contato, utilizando o microscópio Alicona Infinite Focus SL, conseguiu-se experimentos com ótima repetibilidade (desvio padrão da ordem de 2 %). No entanto, o procedimento foi realizado em amostra de liga de aço com alto teor de carbono e cromo (com elevada exatidão geométrica e dimensional – bloco-padrão), a partir do perfil médio obtido pela análise de um número significativo de perfis (2000), conforme discutido no item 4.6.

ANEXO I – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO PADRÃO DE RUGOSIDADE



LABORATÓRIO DE METROLOGIA

Pág.: 1 / 2

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 15218/11

Cliente : " FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITÁRIO "
Endereço : Avenida Engenheiro Diniz, 1.178 - Uberlândia - MG

Ordem de serviço: 059.531

1 - Objeto Calibrado

PADRÃO DE RUGOSIDADE

Fabricante: Mitutoyo
Código: 178-604
N°. de Série: 001031008
Valor Nominal: 0,38 μ mRA
Valor Nominal: 2,94 μ mRA
Identificação do proprietário : Não consta

2 - Padrões utilizados na Calibração:

Padrão de rugosidade
Número: 131809
Certificado N°. DIMCI 1752/2010 - INMETRO
Validade: 09/2013

3 - Procedimento de Medição: ICM - 0077 Versão 1/0

O erro foi verificado comparativamente com padrão Mitutoyo e a leitura da indicação feita no aparelho

Condições de Medição:
Curso medido (Lt) = 4,5 mm Filtro = Gauss
Cut-off (λ c) = 0,8mm

Data da Calibração: 04 de Novembro de 2011

Data da Emissão: 07 de Novembro de 2011

Carlos Kazuo Suetake
Gerente do Depto. de Garantia da Qualidade

Os resultados apresentados no presente Documento tem significação restrita e se aplicam somente à amostra ensaiada. A reprodução do Documento poderá ser feita integralmente sem nenhuma alteração. A MITUTOYO, declina-se de toda e qualquer responsabilidade por uso inadequado deste Certificado.

•Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722
•Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Ratto - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5938 - 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: assisttec@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br

ANEXO I (CONTINUAÇÃO) – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO PADRÃO DE RUGOSIDADE

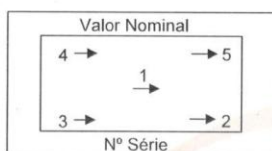


Mitutoyo Sul Americana Ltda.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 15218/11

4 - Resultado da Medição: O resultado é a média das medições.

Pág.: 2 / 2



Posição	Ra (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)
1	0,37	1,41	1,45
2	0,40	1,67	1,81
3	0,39	1,48	1,58
4	0,38	1,54	1,49
5	0,37	1,43	1,48

Posição	Ra (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)
1	2,84	10,38	10,61
2	2,85	10,94	10,78
3	2,86	10,67	10,91
4	2,86	10,60	10,92
5	2,83	10,51	10,70

5 - Incerteza de Medição : $U = 6\%$

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,65$, o qual para uma distribuição t com $V_{\text{eff}} = 5$ 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 II – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS



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 Umuarama - Uberlandia - MG. - CEP - 38400-902
Ordem de Serviço : 035.766/001

I. Objeto Calibrado :
 Máquina de Medição por Coordenadas
 Fabricante : Mitutoyo
 MMC Modelo : BRM-443
 No de Série : 0021902 / Código : 196-667-65
 Identif. do Cliente : N.C
 Faixa Nominal : 400 x 400 x 300 mm
 Contador Digital / Controlador
 Modelo : N.C
 No Série : N.C
 Resolução : 0,0005 mm
 Cabeçote
 Modelo : MH20i
 No Série : 7F8912
 Probe
 Modelo : TP20
 No Série : 6T4567
 Rack
 Modelo : N.C
 No Série : N.C
 Programa de Medição
 Programa : Geopak Win
 Versão : 3.0R16
 Dongle No. : 10-10336238

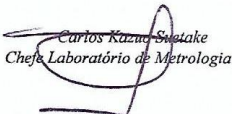
II. Notas:

1. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com V_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
2. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
3. Erro = Diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência.
4. Os sinais dos resultados tem o mesmo sentido das indicações positivas e negativas do sistema de coordenadas da máquina.
5. A máquina foi calibrada conforme Procedimento PML-0030 revisão 3.
6. Condição ambiental: Temperatura ambiente: $(20,5 \pm 0,5)^\circ\text{C}$
7. Endereço e local da calibração são os mesmos.

III. Padrões utilizados :

Padrão Escalonado No Série : 500034 Certificado No : 04980/13 Emitido em : 14/05/2013 Validade : 11/2013	Termômetro No Série : TIFA016 Certificado No : LV22179/12 Emitido em : 18/06/2012 Validade : 06/2014	Esfera Padrão No Série : D0106 Certificado No : 00848/12 Emitido em : 09/02/2012 Validade : 02/2014
---	---	--

Data da Calibração : 28 de Maio de 2013
Data da Emissão : 08 de Julho de 2013


 Carlos Kazuo Saitake
 Chefe Laboratório de Metrologia

Pag.: 1 / 4

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 - SI).
 A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.
 Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

*Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722
 *Fábrica: Rod. Indio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffle - CEP: 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
 Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br

ANEXO II (CONTINUAÇÃO) – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

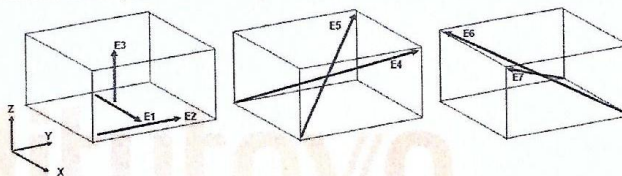
Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob Nº. 0031

IV. Resultado das Medições :

4.1. Verificações iniciais do equipamento :

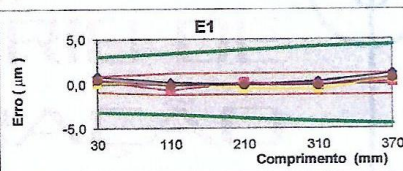
- a . Movimento da Máquina : OK
- b . Condições da área de Medição : OK
- c . Avaliação do Sist. Pneumático : OK
- d . Limpeza das superfícies de ref. : OK

4.2. Resultado da Medição:



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

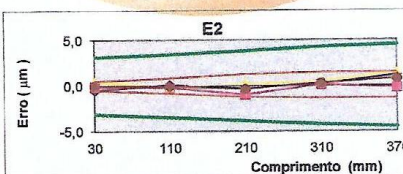
Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,9	0,4	0,2	0,5
110	0,2	-0,7	0,0	-0,2
210	0,0	0,2	-0,4	-0,1
310	0,3	-0,1	-0,6	-0,1
370	1,2	0,3	0,7	0,7



Incerteza de medição expandida (U) = $(0,8 + L/1500) \mu m$, onde: L = comprimento em " mm " .
Fator de abrangência (k) = 2,03
Graus de liberdade (Veff) = 88

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

Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,5	-0,1	0,5	0,0
110	0,1	-0,2	-0,1	-0,1
210	-0,3	-1,0	0,2	-0,4
310	0,2	0,1	0,5	0,3
370	1,1	-0,2	1,4	0,8



Incerteza de medição expandida (U) = $(0,8 + L/3000) \mu m$, onde: L = comprimento em " mm " .
Fator de abrangência (k) = 2,08
Graus de liberdade (Veff) = 33

ANEXO II (CONTINUAÇÃO) – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

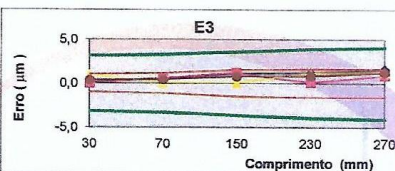
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR
ISO/IEC 17025, sob Nº. 0031

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

Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,1	0,0	1,0	0,4
70	0,6	0,6	0,1	0,4
150	1,1	1,2	0,1	0,8
230	1,2	0,1	1,2	0,8
270	1,6	0,9	1,3	1,3



Incerteza de medição expandida (U) = $(0,9 + L/3000) \mu m$

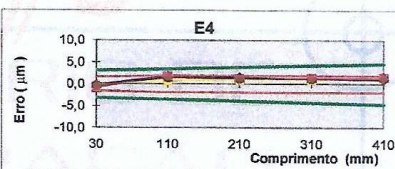
, onde: L = comprimento em "mm".

Fator de abrangência (k) = 2,11

Graus de liberdade (Ve_{ff}) = 24

4.2.4. Resultado da medição do volume, (E4)

Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,2	-0,8	-0,2	-0,4
110	1,9	1,7	0,9	1,5
210	1,6	1,2	1,1	1,3
310	1,2	1,4	1,1	1,2
410	1,1	1,5	1,4	1,3



Incerteza expandida de medição (U) = $(0,7 + L/2600) \mu m$

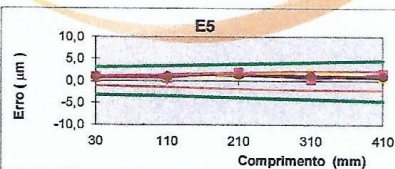
, onde: L = comprimento em "mm".

Fator de abrangência (k) = 2,02

Graus de liberdade (Ve_{ff}) = 148

4.2.5. Resultado da medição do volume, (E5)

Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,9	0,8	1,1	0,9
110	1,1	0,7	1,0	0,9
210	1,2	1,8	1,3	1,4
310	0,9	0,4	2,1	1,1
410	0,7	1,5	0,9	1,0



Incerteza de medição expandida (U) = $(0,8 + L/2900) \mu m$

, onde: L = comprimento em "mm".

Fator de abrangência (k) = 2,04

Graus de liberdade (Ve_{ff}) = 59

Pag.: 3 / 4

ANEXO II (CONTINUAÇÃO) – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

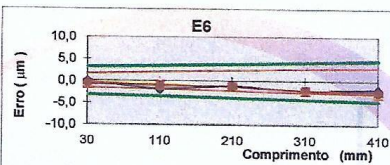
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR
ISO/IEC 17025, sob Nº. 0031

4.2.6. Resultado da medição do volume, (E6)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,2	-0,8	-0,2	-0,4
110	-1,9	-0,9	-0,5	-1,1
210	-1,1	-1,3	-1,3	-1,2
310	-2,2	-2,3	-1,9	-2,1
410	-1,9	-2,9	-2,7	-2,5



Incerteza de medição expandida (U) = $(0,8 + L/2800) \mu\text{m}$

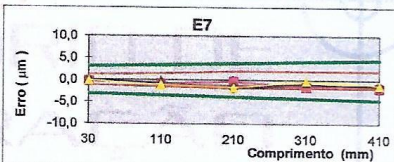
, onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência (k) = 2,04

Graus de liberdade (V_{eff}) = 65

4.2.7. Resultado da medição do volume, (E7)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,2	-0,3	-0,2	-0,2
110	-0,6	-0,9	-1,1	-0,9
210	-1,9	-0,3	-1,7	-1,3
310	-1,2	-1,6	-0,2	-1,0
410	-1,3	-1,9	-1,2	-1,5



Incerteza de medição expandida (U) = $(0,8 + L/3000) \mu\text{m}$

, onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência (k) = 2,07

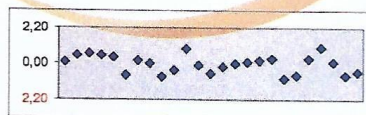
Graus de liberdade (V_{eff}) = 38

4.2.8. Erro de Apalpação (P)

Erro de apalpação = $(1,9 \pm 1,2) \mu\text{m}$

Fator de abrangência (k) = 2,00

Graus de liberdade (V_{eff}) = infinito



5. Observações Gerais :

ANEXO III – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO PAQUÍMETRO DIGITAL


**LABORATÓRIO
DE
METROLOGIA**

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



Pag.: 1 / 2

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 07625/13**Cliente : " UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA."****Endereço : Avenida João Naves de Avila, 2121 - Uberlândia - MG.****Ordem de serviço: 068.189****1 - Objeto Calibrado****PAQUÍMETRO DIGITAL**

Fabricante: Mitutoyo

Código: 500-196-20B

Nº. de Série: 10901281

Faixa nominal : 150 mm

Resolução : 0,01 mm

Identificação do proprietário : Não consta

2 - Padrões utilizados na Calibração:

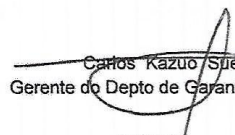
Blocos padrão	Número: 00112
Certificado N.º 00199/13 - RBC - Mitutoyo	Validade: 01/2014
Relógio apalpador	Número: LCF233
Certificado N.º 00997/13 - RBC - Mitutoyo	Validade: 08/2013
Padrão escalonado para paquímetro	Número : 010259
Certificado N.º 05825/13 - RBC - Mitutoyo	Validade: 12/2013

3 - Procedimento de Medição: PML - 0013 Versão 5

Os valores de Indicação do paquímetro foram verificados comparativamente com padrão escalonado e Blocos-padrão e a leitura da indicação tomada no paquímetro.

Data da calibração: 23 de Julho de 2013

Data da emissão: 23 de Julho de 2013


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 Unidade - SI).
A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.

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

*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 Raífo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5960 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: assisttec@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br

ANEXO III (CONTINUAÇÃO) – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO PAQUÍMETRO DIGITAL



Mitutoyo 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

Padrão (mm)	Indicação no Instrumento (mm)	Incerteza de Medição (mm)
1,1	1,10	0,02
1,5	1,50	
1,9	1,90	
4,0	4,00	
8,0	8,00	
16,0	16,00	
20,0	20,00	
50,0	50,00	
75,0	75,00	
100,0	99,99	
150,0	150,00	

Fator de abrangência (k)	2,00
Graus de liberdade (V_{eff})	infinito

Medida Interna

Padrão (mm)	Indicação no Instrumento (mm)	Incerteza de Medição (mm)
20,0	20,00	0,02
50,0	50,00	
100,0	100,01	
150,0	150,02	

Fator de abrangência (k)	2,03
Graus de liberdade (V_{eff})	96

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 TERMO-HIGRÔMETRO DIGITAL



**PRECISÃO
METROLÓGICA**
elus
INSTRUMENTAÇÃO

Certificado de Calibração

Laboratório de Temperatura & Umidade

Número do Certificado R4996/13 *Folha 1 / 2*



CONTRATANTE :	Universidade Federal de Uberlândia - UFU		
ENDEREÇO :	Av. João N. de Ávila, 2121, Bl. 1M - Campus Sta. Mônica - Uberlândia - MG		
INTERESSADO :	O mesmo		
ENDEREÇO :	O mesmo		

INSTRUMENTO :	<u>Termohigrômetro Digital</u>		
FABRICANTE :	Instrutherm		
MODELO :	HT-260		
IDENTIFICAÇÃO :	Não especificado		
NÚMERO DE SÉRIE :	06120362		

DATA DA CALIBRAÇÃO :	19/06/2013	LOCAL DA CALIBRAÇÃO:	Laboratório Elus
PRÓXIMA CALIBRAÇÃO :	Determinado pelo cliente	TEMPERATURA DO AR :	23°C ± 5°C
DATA DA EMISSÃO :	20/06/2013	UMIDADE RELATIVA AR :	45%UR a 70%UR

PADRÕES UTILIZADOS :

Termohigrômetro Digital identificação EL-225 rastreado por Laboratório RBC - CAL 0439 em 28/02/2013 sob certificado R1678/13 válido até fevereiro/2014.

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO :

- A calibração foi realizada pelo método comparativo contra padrões de referência, seguindo os procedimentos internos: PCT-003 rev. 01 / PCT-012 rev. 02.

OBSERVAÇÕES :

- Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo CGCRE, o qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.
- A calibração foi realizada em 3 medições por ponto. O Valor Verdadeiro foi herdado pela média de 3 medições obtidas pelo padrão em cada ponto.
- Os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura de 1990.
- k = fator de abrangência (fator multiplicativo adimensional) / V_{eff} = graus de liberdade efetivo. / I.M. = Incerteza de Medição.

TÉCNICO EXECUTANTE: CAIO CESAR SILVA

Julio Cesar Pereira de Souza
Gerente Técnico Substituto

RODRIGO BOMES CORDEIRO
GERENTE TÉCNICO

A reprodução deste certificado só poderá ser total, sem nenhuma alteração. Os Resultados deste certificado referem-se somente ao item calibrado ou ensaiado. Este certificado atende os requisitos estabelecidos pela norma NBR ISO/IEC 17025. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência "k" que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Rua Dendezeiro, 29 | Jd. Matarazzo | São Paulo | SP | 03813-130 | Tel 11 2214-0049 | Email: atendimento@elusinstrumentacao.com.br

ANEXO IV (CONTINUAÇÃO) – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TERMO- HIGRÔMETRO DIGITAL



Certificado de Calibração

Laboratório de Temperatura & Umidade

Número do Certificado R4996/13 Folha 2 / 2

Laboratório de Calibração acreditado pelo CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0439.

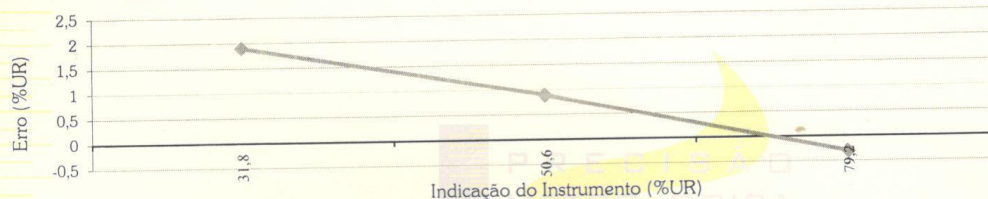
RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO :

UMIDADE RELATIVA DO AR SENSOR EXTERNO : TEMPERATURA DA CALIBRAÇÃO - 20°C

Sensor - Fabricante: Não especificado; Modelo: Não especificado; Id.: Não especificado; n°.s.: Não especificado

Faixa de medição: 0 ~ 100 %UR, divisão de escala: 0,1 %UR.

Indicação do Instrum. (%UR)	Valor Verdadeiro (%UR)	Erro (%UR)	I.M. (%UR)	k	Veff
31,8	29,9	1,9	1,0	2,00	∞
50,6	49,7	0,9	1,0	2,00	∞
79,2	79,5	-0,3	1,3	2,00	∞

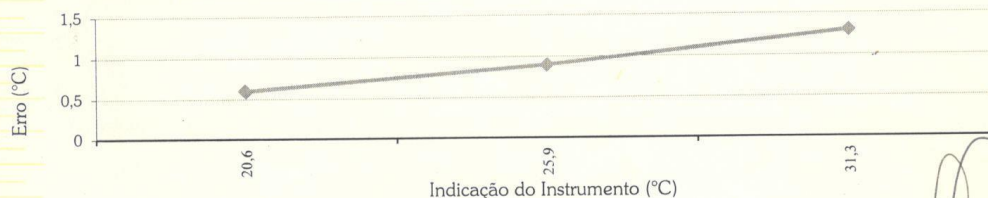


TEMPERATURA SENSOR EXTERNO :

Sensor - Fabricante: Não especificado; Modelo: Não especificado; Id.: Não especificado; n°.s.: Não especificado

Faixa de medição: -20 ~ 60 °C, divisão de escala: 0,1 °C.

Imersão (mm)	Indicação do Instrum. (°C)	Valor Verdadeiro (°C)	Erro (°C)	I.M. (°C)	k	Veff
---	20,6	20,0	0,6	0,3	2,00	∞
---	25,9	25,0	0,9	0,3	2,00	∞
---	31,3	30,0	1,3	0,3	2,00	∞



A reprodução deste certificado só poderá ser total, sem nenhuma alteração. Os Resultados deste certificado referem-se somente ao item calibrado ou ensaiado. Este certificado atende os requisitos estabelecidos pela norma NBR ISO/IEC 17025. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência "k" que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

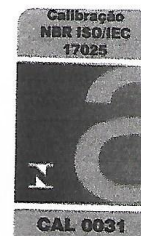
Rua Dendzeiro, 29 | Jd. Matarazzo | São Paulo | SP | 03813-130 | Tel 11 2214-0049 | Email: atendimento@elusinstrumentacao.com.br

ANEXO V – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO RELÓGIO COMPARADOR



**LABORATÓRIO
DE
METROLOGIA**

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



Pag.: 1/2

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 8232/10

Cliente : FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITARIO.

Endereço : Av. Engenheiro Diniz, 1178 - Martins Uberlândia - MG

Ordem de serviço: 051.297

1 - Objeto Calibrado

RELÓGIO COMPARADOR MILESIMAL

Fabricante: Mitutoyo Corporation

Código: 2109S-10

N°. de Série: LWQ441

Valor de uma divisão: 0,001 mm

Faixa nominal : 1 mm

Identificação do proprietário : Não Consta

2 - Padrões utilizados na Calibração:

Calibrador de Relógio Comparador i - Checker

Número : 0060203

Certificado N°. 2525/10 - RBC - Mitutoyo.

Validade: 09/2010

3 - Procedimento de Medição: PML - 0002 - Revisão 7

O Relógio foi montado em oposição ao deslocamento do fuso do calibrador de relógio e os valores de indicação foram referenciados no próprio relógio.

Os " erros " representam os erros a serem considerados no instrumento no respectivo ponto de medição.

Erro = Diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência.

Data da Calibração: 26 de Junho de 2010.

Carlos Kazuo Suetake
Gerente do Depto da Garantia da Qualidade
Data de Emissão: 26.06.10

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre/Inmetro que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades - SI).
A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.
Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer 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. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Reflo - 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
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br

ANEXO V (CONTINUAÇÃO) – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO RELÓGIO COMPARADOR



Mitutoyo Sul Americana Ltda.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 8232/10

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de calibração acreditado pela Cgcre/Inmetro de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob n° 0031

Pag.:2/2

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

Indicação (mm)	Erro (µm)	
	Crescente	Decrescente
0,00	0,0	0,7
0,02	0,1	0,7
0,04	0,1	0,7
0,06	0,5	1,0
0,08	0,6	1,1
0,10	0,2	0,8
0,12	0,1	0,5
0,14	-0,2	0,5
0,16	0,1	0,6
0,18	0,5	1,0
0,20	0,4	0,8
0,22	-0,1	0,3
0,24	-0,3	-0,1
0,26	-0,3	0,3

Indicação (mm)	Erro (µm)	
	Crescente	Decrescente
0,28	-0,3	0,4
0,30	0,0	0,7
0,32	0,2	0,5
0,34	-0,2	0,3
0,36	-0,5	0,3
0,38	-0,2	0,4
0,40	0,1	0,6
0,50	0,1	0,4
0,60	-0,2	0,2
0,70	-0,4	0,0
0,80	-0,8	-0,1
0,90	-0,5	0,0
1,00	-0,6	-0,2

Parâmetros de Análise		Erro (µm)
fe	Erro máximo no sentido crescente	1,4
fges	Erro total (crescente / decrescente)	1,9
fu	Erro de retorno	0,8
U pa	Incerteza expandida para determinação dos parâmetros	0,7

5 - Incerteza de Medição: $U = 0,6 \mu m$

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,3$, o qual para uma distribuição t com $veff = 11$ 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 : $(20,0 \pm 0,5) ^\circ C$

ANEXO VI – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO MICROSCÓPIO ÓPTICO

alicon

CALIBRATION & VERIFICATION SERVICE CERTIFICATE



INFINITE FOCUS SL

SERIAL NUMBER: 059502501518

DATE OF CALIBRATION: 17.10.2019

ENGINEER

**Weberton Souza
Service Technician**

InfiniteFocusSL Serial Number: 059502501518

©Alicona

ANEXO VI (CONTINUAÇÃO) – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO MICROSCÓPIO ÓPTICO

alicon

CALIBRATION OVERVIEW

Calibration	Objective	Reference	Actual	Deviation	Tolerated Deviation	Last Calibration	State
Vertical	10x	1000.46µm	1000.659µm	0.199µm	1.0µm	17.10.2019	OK
Lateral	10x	50.004µm	50.003µm	0.001µm	0.015µm	17.10.2019	OK
	20x	24.0µm	24.002µm	0.002µm	0.015µm	17.10.2019	OK
	50x	24.0µm	24.009µm	0.009µm	0.015µm	17.10.2019	OK

ANEXO VI (CONTINUAÇÃO) – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO MICROSCÓPIO ÓPTICO

alicon

LATERAL CALIBRATION

To prove the quality of the measurement device, the following measurements were performed using the IF-CalibrationTool:

Calibration Results

Objective	Description	Value	Uncertainty/State
10x	Alicona	50.004 μ m	0.2 μ m
	Alicona	50.003 μ m	0.5 μ m
	Deviation	0.001 μ m	OK
	Tolerated Deviation	0.015 μ m	
20x	Alicona	24.0 μ m	0.2 μ m
	Alicona	24.002 μ m	0.5 μ m
	Deviation	0.002 μ m	OK
	Tolerated Deviation	0.015 μ m	
50x	Alicona	24.0 μ m	0.2 μ m
	Alicona	24.009 μ m	0.5 μ m
	Deviation	0.009 μ m	OK
	Tolerated Deviation	0.015 μ m	

TRACEABILITY OF THE CALIBRATION TOOL TO THE NATIONAL STANDARD

The lateral part of this calibration was calibrated with an IFM system with the serial number 075208505515.

The aforementioned IFM system was calibrated with an Alicona Calibration Tool with the serial number 002030004914.

The lateral part of the calibration tool with the serial number 002030004914 and the calibration mark 98ALICONA14 was calibrated by the DAkkS calibration laboratory D-K-18737-01-00 with the calibration label 1855 D-K-18737-01-00 2014-12.

The DAkkS calibration laboratory D-K-18737-01-00 uses a position measurement system LMS IPRO.

The position measurement system LMS IPRO is calibrated with a two-dimensional position standard verified by the PTB Braunschweig (Calibration Certificate No. 50573 PTB 12).

ANEXO VI (CONTINUAÇÃO) – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO MICROSCÓPIO ÓPTICO

alicona

VERTICAL CALIBRATION

To prove the quality of the measurement device, the following measurements were performed using the IF-CalibrationTool:

Calibration Results

Description	Value	Uncertainty/State
Kolb & Baumann	1000.46µm	0.1µm
Alicona	1000.659µm	1.0µm
Deviation	0.199µm	OK
Tolerated Deviation	1.0µm	

TRACEABILITY OF THE CALIBRATION TOOL TO THE NATIONAL STANDARD

The vertical part of this calibration tool was calibrated by the DAkkS calibration laboratory D-K-15077-01-00 with the calibration label 77653-5/16/12580.

The traceability to national standards is guaranteed by measurement against comparison with DAkkS-calibrated gauge blocks of Calibration Certificate N_ 2560 D-K-15077-01-00 2014-06.

MEASUREMENT SETTINGS

Objective	10x
Vertical Resolution	1.0µm
Lateral Resolution	3.9µm
Polarizer	Off

ANEXO VI (CONTINUAÇÃO) – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO MICROSCÓPIO ÓPTICO

alicon

MEASUREMENT UNCERTAINTY

All stated uncertainties are expanded measurement uncertainties obtained by multiplying the standard measurement uncertainties by the coverage factor $k=2$. They have been determined in accordance with the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)". The measurand values lie, with a probability of approximately 95%, within the coverage interval given by the expanded uncertainties.

USED SOFTWARE

The Softwareversion which was used for all adjustments and calibrations is the ServiceSoftware 6.5.1.

USED CALIBRATION TOOLS

The measurement device was calibrated with standardized, tested and certified calibration tools. This guarantees the accurate, efficient and first class use of the device.

IF-CalibrationTool

Calibration Mark:	007ALICONA17
Date of Last Calibration:	30.01.2017 (lateral part)
	17.12.2016 (vertical part)