

LUCIANO DA ROCHA MAGALHÃES

**DESENVOLVIMENTO E FABRICAÇÃO DE
PENETRADORES PARA AVALIAÇÃO DA
RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DE
POLÍMEROS PROTETORES DE *RISERS***



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2013

LUCIANO DA ROCHA MAGALHÃES

**DESENVOLVIMENTO E FABRICAÇÃO DE PENETRADORES PARA
AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DE
POLÍMEROS PROTETORES DE *RISERS***

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientadora: Prof. Dra. Rosenda Valdés Arencibia

Coorientador: Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco

UBERLÂNDIA – MG

2013

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica pela oportunidade do desenvolvimento deste trabalho de mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fornecimento de bolsa de estudos.

À Petrobras pelo apoio financeiro a este projeto de pesquisa.

Ao Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD-UFU) pela disponibilidade de sua estrutura física para a realização deste projeto.

Aos colegas do LTAD pelas horas dispostas em auxiliar o desenvolvimento deste trabalho, em especial ao engenheiro Juliano Oséias de Moraes e aos técnicos Afrânio Vieira dos Santos Filho e Flávio Alves dos Santos.

Ao Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco pela sólida coorientação neste estudo e pela inestimável oportunidade da realização deste projeto no LTAD.

À Prof. Dra. Rosenda Valdés Arencibia pela brilhante orientação neste trabalho e pela confiança constante no sucesso deste mestrado.

MAGALHAES, L. R. **Desenvolvimento e fabricação de penetradores para avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de polímeros protetores de risers**. 2013. 145 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

A extração de petróleo em águas profundas impõe diversos desafios às empresas petrolíferas. Um dos principais são os danos que os dutos flexíveis, as tubulações que levam o petróleo do poço de extração até a plataforma flutuante, sofrem ao serem expostos ao hostil ambiente subaquático. Dentre estes danos, destaca-se o desgaste abrasivo na região onde o duto toca o solo marinho, chamada de *touchdown point* (TDP). Para prolongar a vida útil do duto e evitar vazamentos de óleo no mar, são empregados revestimentos protetores poliméricos, usualmente chamados de calhas. A partir de uma necessidade da indústria petrolífera de testar e controlar o recebimento destes revestimentos foi projetado e construído um equipamento denominado de Simulador de Interações Marítimo-Mecânicas em Calhas (SIMMC) no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste – UFU que visa à realização de testes em campo. Assim sendo, o objetivo deste trabalho foi fabricar, controlar e testar penetradores de metal duro visando à realização de ensaios de desgaste por abrasão que permitam avaliar a resistência ao desgaste abrasivo de materiais poliméricos usados na proteção de *risers*. Para tanto, foram propostas as seguintes etapas: a) preparação do SIMMC Portátil para realização dos ensaios de desgaste; b) determinação dos parâmetros de teste ideais para o SIMMC Portátil (número de ciclos, carga externa e velocidade de rotação) por meio de um planejamento fatorial completo; c) controle dimensional e geométrico dos penetradores antes e após a usinagem; d) realização de testes de desgaste antes e após a retífica; e) usinagem dos penetradores utilizando afiação e lapidação e f) análise da influência das melhorias trazidas por esses processos para os resultados dos testes de desgaste. Os resultados obtidos permitem concluir que: 1) os processos de usinagem propostos são adequados para fabricação dos penetradores dentro das tolerâncias dimensionais e geométricas definidas no projeto. Valores de rugosidade da ordem de 2,0 µm foram reduzidos em pelo menos 60%, enquanto que para valores menores que 2,0 µm esta redução foi pelo menos de 33% e 2) os ensaios de abrasão utilizando os penetradores fabricados fornecem resultados mais precisos e confiáveis.

Palavras-chave: Desgaste abrasivo, penetradores, dutos flexíveis, revestimentos poliméricos.

MAGALHAES, L. R. **Design and manufacturing of indenters to evaluate the abrasive wear resistance of risers' protective polymers.** 2013. 145 p. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Deep water oil production imposes several challenges to the oil companies. One of the greatest difficulties is related to the damages that the flexible riser pipes are subjected. These pipes conduct the produced oil to the platform. They are also used to inject water in the well in order to recover its production capacity. Among the damages mentioned, it is worth to mention the abrasive wear that takes place at the touchdown point (TDP). In order to reduce this tribological degradation, PU coats have been used at the TDP region. Considering the diversity of PU that can be used in this application, it is highly desired that the PU plaques quality are controlled before its installation. Based on this demand, a portable apparatus was designed and constructed in the Laboratory for Friction and Wear at the Federal University of Uberlândia to simulate the tribological interactions between the riser pipe and the sea bed. So this work aims to produce WC-Co indenter for this test apparatus. To accomplish that, the following steps were proposed: a) equipment preparation for wear tests; b) determination of test parameters (cycle number and load) through a full factorial design; c) geometric and dimensional control of the indenters before and after machining processes; d) realization of wear tests before and after machining the indenters; e) machining of indenters using honing and lapping and f) analysis of the improvements achieved on the wear results. The results obtained allowed the following conclusions: 1) the proposed machining processes and parameters for are appropriate to manufacture the indenter In accordance with their selected dimensional and geometric tolerances. Roughness values of about $2.0\text{ }\mu\text{m}$ has been reduced by at least 60%, while for values lower than $2.0\text{ }\mu\text{m}$ this reduction was at least 33%, and 2) abrasion tests using the new indenters provide more precise and reliable results.

Key-words: Abrasive wear, indenters, risers, polymeric materials

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esquema dos elementos do sistema de extração de petróleo (KAYSER, 2003)	1
Figura 1.2 - Representação da linha flexível e do TDP no detalhe (KAYSER, 2003)	2
Figura 1.3 – Duto flexível e revestimento protetor de poliuretano (RAMOS NETO, 2003)	3
Figura 2.1 - Representação do desgaste abrasivo por deslizamento de partículas duras (à esquerda) e por rolamento de partículas duras (à direita) (FRANCO, 2007)	8
Figura 2.2 – Mecanismos de desgaste envolvidos em desgaste abrasivo (ZUM GAHR, 1987)	9
Figura 2.3 - Relação entre as parcelas de microcorte e microsulcamento e a razão entre o ângulo de corte e o ângulo de corte crítico (ZUM GAHR, 1987)	9
Figura 2.4 – Ilustração esquemática de 4 métodos usados para medir a taxa de desgaste abrasivo: a) pino em disco abrasivo; b) pino em chapa abrasiva; c) pino em tambor abrasivo; d) teste abrasivo com roda de borracha (HUTCHINGS, 1992)	10
Figura 2. 5 – Simulador de Interações Marítimo-Mecânicas em Calhas (MORAES, 2005)	12
Figura 2.6 - Penetradores utilizados nos ensaio de esclerometria (PAES, 2002)	12
Figura 2.7 – Classificação das operações de corte (MARINESCU <i>et al</i> , 2007, modificada)	14
Figura 2.8 – Processo de Afiação (SOUZA, 2011)	15
Figura 2.9 – Lapidadora (LAPMASTER, 2012, modificada)	19
Figura 2.10 – Pratos de lapidação e estações de trabalho (MARINESCU <i>et al</i> , 2007)	19
Figura 2.11 – a) Indicação de tolerância de perpendicularidade, b) indicação de tolerância de inclinação (ABNT NBR 6409, 1997)	21
Figura 2.12 – Indicação de tolerância de planeza (ABNT NBR 6409, 1997)	21
Figura 2.13 - À esquerda, padrões de rugosidade, à direita, avaliação da rugosidade através de uma comparação tátil (TAYLOR HOBSON, 2003)	22
Figura 2.14 - Conceito da linha média (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977)	25
Figura 2.15 - Altura máxima do perfil – Ra (ABNT NBR ISO 4287, 2002)	26
Figura 2.16 – Inclinação da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado (SMITH, 2002)	27

Figura 2.17 – Achatamento da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado (SMITH, 2002)	29
Figura 2.18 – Zonas de especificação e conformidade considerando incertezas (WECKENMANN <i>et. al.</i> , 2001)	30
Figura 3.1 – Abrasômetro portátil em vista lateral e traseira	36
Figura 3.2 – Fonte de potência, <i>drive</i> e conta-ciclos	37
Figura 3.3 – Ligação entre o motor e o <i>drive</i> de comando	37
Figura 3.4 – Esquema da instalação do sensor	38
Figura 3.5 – Esquema da montagem do sistema de medição	39
Figura 3.6 – Vista frontal do SIMMC Portátil (detalhe para base extensora e ponta do relógio)	40
Figura 3.7 – Vista lateral do SIMMC Portátil (relógio e alavanca)	40
Figura 3.8 – Penetrador de WC	42
Figura 3.9 – Microscópio óptico (à esquerda) e penetrador em medição (à direita)	43
Figura 3.10 – Arestas do cume do penetrador	43
Figura 3.11 – Interferômetro TALYSURF CLI 2000 (à esquerda) e penetrador sendo medido (à direita)	45
Figura 3.12 – Área de medição da rugosidade do cume	45
Figura 3.13 – Área de medição da rugosidade da face lateral	46
Figura 3.14 – Projetor de perfis modelo PJA3000	47
Figura 3.15 – Ângulo de interesse no controle geométrico do penetrador	47
Figura 3.16 – Peças utilizadas como cargas adicionais no teste de desgaste	48
Figura 3.17 – SIMMC Portátil com destaque para as peças	49
Figura 3.18 – Amostras de poliuretano utilizadas como calhas protetoras de <i>risers</i>	50
Figura 3.19 – SIMMC Portátil com detalhe para a fixação da amostra	51
Figura 3.20 – Distribuição dos riscos na superfície da peça	51
Figura 3.21 – Afiadora PP-MC160	53
Figura 3.22 – Ângulo efetivo na afiação	53
Figura 3.23 – Lapidadora MODEL 15	54
Figura 3.24 – Vista 3D do porta-penetradores em forma de cruzeta	55
Figura 3.25 – Vista lateral do porta-penetradores em forma de cruzeta	55
Figura 3.26 – Detalhe na parte inferior no porta-penetradores em forma de cruzeta	56
Figura 3.27 – Vista tridimensional do porta-penetradores cilíndrico	57
Figura 3.28 – Vista frontal da peça 1 do porta-penetradores cilíndrico	58
Figura 3.29 – Vista frontal da peça 2 do porta-penetradores cilíndrico	59
Figura 3.30 – Montagem do porta-penetradores cilíndrico	59

Figura 3.31 - Vista tridimensional do anel de contenção	60
Figura 4.1. SIMMC Portátil pronto para uso	62
Figura 4.2 – Superfícies do cume dos penetradores 3, 7, 8 e 12, respectivamente antes da afiação	67
Figura 4.3 – Área medida do cume do penetrador 1 antes da afiação	69
Figura 4.4 – Área medida do cume do penetrador 12 antes da afiação	69
Figura 4.5 – Perfil de rugosidade do cume para o penetrador 1 antes da afiação	71
Figura 4.6 – Área medida na face lateral do penetrador 1 antes da afiação	72
Figura 4.7 – Área medida na face lateral do penetrador 1 antes da afiação	73
Figura 4.8 – Perfil de rugosidade da face lateral para o penetrador 1 antes da afiação	74
Figura 4.9 – Trilha de desgaste do material E585 com força adicional de 10 N	75
Figura 4.10 – Trilha de desgaste do material E585 com força adicional de 20 N	78
Figura 4.11 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos	80
Figura 4.12 – Valores de desgaste para a amostra E585 para 10 e 20 N com penetradores antes da afiação	81
Figura 4.13 – Valores de desgaste para as cinco amostras utilizando 20 N (pré-afiação)	83
Figura 4.14 – Etapas dos processos de fabricação: a) como fornecido, b) após a afiação, c) durante a lapidação e d) após a lapidação do cume do penetrador 6	86
Figura 4.15 – Área medida do cume do penetrador 3 após a lapidação	91
Figura 4.16 – Área medida do cume do penetrador 10 após a lapidação	91
Figura 4.17 – Gráfico comparativo entre a rugosidade do cume dos penetradores	92
Figura 4.18 – Perfil de rugosidade para o penetrador 1 pós-lapidação	93
Figura 4.19 – Valores de rugosidade para o perfil pré e pós-lapidação	94
Figura 4.20 – Área medida na face lateral do penetrador 1 pós-lapidação	94
Figura 4.21 – Área medida na face lateral do penetrador 1 pós-lapidação	95
Figura 4.22 – Gráfico comparativo entre a rugosidade S_a das faces dos penetradores	96
Figura 4.23 – Perfil de rugosidade para o penetrador 1 pós-lapidação	96
Figura 4.24 – Valores de rugosidade para o perfil pré e pós-lapidação	97
Figura 4.25 – Valores de desgaste das 5 amostras após 200 ciclos antes e após a lapidação	99
Figura 4.26 – Valores de incerteza expandida para as 5 amostras nos pré-testes e nos testes finais após 200 ciclos	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Dureza de grãos abrasivos em temperatura ambiente (DE BEERS, 1983)	15
Tabela 2.2 – Valores de rugosidade em função do processo de fabricação (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977)	16
Tabela 2.3 – Comprimentos de amostragem (ABNT NBR ISO 4288, 2008)	24
Tabela 2.4 – Relação entre parâmetros de perfil e de área	29
Tabela 3.1 – Parâmetros de controle para os penetradores	42
Tabela 3.2 – Parâmetros de rugosidade definidos em área	44
Tabela 3.3 – Parâmetros de rugosidade definidos em perfil	44
Tabela 3.4 – Matriz de planejamento para o experimento fatorial completo 6x2	45
Tabela 3.5 – Tolerâncias geométricas do porta-penetradores em forma de cruzeta	56
Tabela 3.6 – Tolerâncias na peça 1 do porta-penetradores cilíndrico	57
Tabela 3.7 – Tolerâncias na peça 2 do porta-penetradores cilíndrico	59
Tabela 4.1 – Valores médios de massa das peças	63
Tabela 4.2 – Valores de incerteza da medição de massa da peça 1 (95%)	63
Tabela 4.3 – Valores de incerteza para as peças 1, 2, 3, 4, 5 e 6 (95%)	64
Tabela 4.4 – Valores de massa das peças considerando as incertezas (95%)	65
Tabela 4.5 – Dimensões das arestas do cume pré-afiação	66
Tabela 4.6 – Incerteza da medição do comprimento da aresta 1 do penetrador 1 (95%)	67
Tabela 4.7 - Incerteza expandida da medição do comprimento das arestas pré-afiação (95%)	68
Tabela 4.8 – Parâmetros de rugosidade do cume do penetrador 1 pré-afiação	70
Tabela 4.9 – Valores de rugosidade do cume para todos os penetradores pré-afiação	70
Tabela 4.10 – Valores de rugosidade do cume para o penetrador 1 pré-afiação	71
Tabela 4.11 – Incerteza da medição da rugosidade Sa do cume do penetrador 1 (95%)	72
Tabela 4.12 – Valores de rugosidade da face lateral para os penetradores (pré-afiação)	73
Tabela 4.13 – Valores de rugosidade para a face lateral do penetrador 1 (pré-afiação)	74
Tabela 4.14 – Valores de desgaste para amostra E585 e 10 N (pré-afiação)	75

Tabela 4.15 – Incerteza da medição do desgaste para a amostra E585, força de 10 N (95%) e 30 ciclos (pré-afiação)	76
Tabela 4.16 – Incerteza associada à medição de desgaste para a amostra E585, força de 10 N e diferentes valores de ciclos (95%) (pré-afiação)	77
Tabela 4.17 – Valores de desgaste para a amostra E585 e força de 20 N (pré-afiação)	78
Tabela 4.18 – Incerteza da medição de desgaste para amostra E585 e força de 20 N (95%)	78
Tabela 4.19 – Resultados do teste de desgaste para a amostra E585	79
Tabela 4.20 – Resultados da ANOVA para a amostra E585	79
Tabela 4.21 – Valores de desgaste para a amostra E285 e força de 20 N (pré-afiação)	82
Tabela 4.22 – Valores de desgaste para a amostra E185 e força de 20 N (pré-afiação)	82
Tabela 4.23 – Valores de desgaste para a amostra E585M e força de 20 N (pré-afiação)	82
Tabela 4.24 – Valores de desgaste para a amostra E165 e força de 20 N (pré-afiação)	83
Tabela 4.25 – Incerteza expandida da medição de desgaste para as amostras E285, E185, E585M e E165 e força de 20 N (95%)	84
Tabela 4.26 – Tempo de duração dos testes	84
Tabela 4.27 – Comprimento das arestas do cume dos penetradores pós-afiação em μm	85
Tabela 4.28 – Incerteza da medição do comprimento da aresta 1 do cume do penetrador 1 após a lapidação (95%)	87
Tabela 4.29 – Valores de incerteza expandida da medição do comprimento das arestas do cume pós-lapidação (95%)	88
Tabela 4.30 – Valores de ângulos para os penetradores após a afiação e lapidação	89
Tabela 4.31 – Incerteza da medição ângulo entre a face lateral e a base 1 do penetrador 1 pós lapidação (95%)	89
Tabela 4.32 – Valores de incerteza expandida associada à medição dos ângulos entre a face lateral e a base de todos os penetradores após a lapidação (95%)	90
Tabela 4.33 – Valores de rugosidade para todos os penetradores pós-lapidação	91
Tabela 4.34 – Valores de rugosidade para o cume do penetrador 1 pós-lapidação	93
Tabela 4.35 – Valores de rugosidade da face lateral para os penetradores pós-	

lapidação	95
Tabela 4.36 – Valores de rugosidade para a face do penetrador 1 pós-lapidação	96
Tabela 4.37 – Valores de desgaste para as cinco amostras usando 20 N e 200 ciclos	98
Tabela 4.38 – Diminuição do desvio padrão dos testes de desgaste	99
Tabela 4.38 – Incerteza expandida da medição de desgaste obtido nos testes finais (95%)	100

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

∂ : derivada parcial

$u^2(x_i)$: variância estimada associada

$u_c(y)$: incerteza padrão combinada

$\bar{V}$: média aritmética

$r(x_i, x_j)$: coeficiente de correlação

$\Delta A l_{PP}$: correção associada à ampliação da lente de aumento.

ΔH_{RC} : correção associada à histerese do relógio comparador;

ΔIC_B : correção associada à incerteza padrão da calibração da balança;

ΔIC_M : correção associada à incerteza padrão da calibração do microscópio.

ΔIC_{PP} : correção associada à incerteza padrão da calibração do projetor de perfis.

ΔIC_{RC} : correção associada à incerteza padrão da calibração do relógio comparador;

ΔIC_R : correção associada à incerteza padrão da calibração do interferômetro;

$\Delta s(L_M)$: correção associada à variabilidade dos valores do mensurando indicados pelo microscópio;

$\Delta s(L_R)$: correção associada à variabilidade dos valores do mensurando indicados pelo interferômetro;

$\Delta s(L_{PP})$: correção associada à variabilidade dos valores do mensurando indicados pelo projetor de perfis;

$\Delta \alpha$: correção associada ao ângulo de parada da roda de penetradores.

$\Delta s(L_B)$: correção associada ao desvio padrão dos valores do mensurando indicados pela balança;

$\Delta s(L_{RC})$: correção associada ao desvio padrão dos valores do mensurando indicados pelo relógio comparador;

ΔE_B : correção devida à excentricidade da balança.

ΔL_B : correção devida à não linearidade da balança;

ΔZ_B : correção devida à variação do zero da balança;

ΔR_B : correção devido à resolução da balança (incremento digital);

ΔR_M : correção devido à resolução do microscópio;

ΔR_{PP} : correção devido à resolução do projetor de perfis;

ΔR_{RC} : correção devido à resolução do relógio comparador (incremento digital);

ΔR_R : correção devido à resolução do interferômetro;

ν_{ef} : graus de liberdade efetivos

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

c: coeficiente de sensibilidade do mensurando em relação a cada variável de entrada

C: comprimento das arestas do cume

$c_i(x_i)$: coeficiente de sensibilidade do mensurando em relação a cada variável de entrada x_i

CS: coeficiente de sensibilidade

D: desgaste

DP: desvio padrão

F: razão de variância

GD&T: *Geometric Dimensioning and Tolerancing*

GL: grau de liberdade

GL: número de graus de liberdade

GUM: *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements*

ISO-GPS: *Geometric Product Specification*

k: fator de abrangência

l : comprimento de amostragem

LTAD: Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste

n : número de elementos

N : número de variáveis de entrada

NBR: norma brasileira

OECD: *Organization for Economic Corporation and Development*

p: probabilidade

PU: poliuretanos

R: rugosidade

Ra: desvio aritmético médio do perfil avaliado

Rku: fator de achatamento ou *kurtosis*

Rq: desvio médio quadrático do perfil avaliado

Rsk: fator de assimetria ou *skewness*

Rsm: largura média dos elementos do perfil

s: desvio padrão

Sa: média aritmética da altura

SE: sistema da envolvente

Sku: kurtosis

SIMMC: Simulador de Interações Marítimo-Mecânicas em Calhas

SLM: sistema da linha média

Sp: pico máximo

Sq: média quadrática da altura

SQ: soma de quadrados

Ssk: skewness

Sv: vale máximo

Sz: altura máxima

TDP: *touchdown point*

TI: tipo de incerteza

$u(x_i)$: incerteza padrão

$u(x_i)$: incerteza padrão de cada variável de entrada

U: incerteza expandida

u_c : incerteza padrão combinada

$u_i(y)$: incerteza padrão de cada variável de entrada na unidade do mensurando ou variável de saída

v_i : número de graus de liberdade de cada variável de entrada

Xs: valor médio da largura dos elementos do perfil

Z(x): ordenadas dos pontos do perfil

Zp: altura máxima dos picos do perfil

Zv: maior das profundidades dos vales do perfil

SUMÁRIO

Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de figuras	v
Lista de tabelas	viii
Lista símbolos, nomenclaturas e abreviações	xi
1 Capítulo 1 - Introdução	1
1.1. Assunto e Problema	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. <i>Objetivo Principal</i>	4
1.2.2. <i>Objetivos Secundários</i>	4
1.3. Justificativas	4
1.4. Organização do Trabalho	5
2 Capítulo 2 – Revisão bibliográfica	7
2.1. Desgaste Abrasivo	7
2.2. Testes de Desgaste por Abrasão	10
2.3. Fabricação de Penetradores em Metal Duro	13
2.3.1. <i>Afiação</i>	14
2.3.2. <i>Lapidação</i>	15
2.4. Tolerâncias Dimensionais e Geométricas	19
2.5. Rugosidade Superficial	22
2.5.1. <i>Desvio Aritmético Médio do Perfil Avaliado Ra</i>	25
2.5.2. <i>Desvio Médio Quadrático do Perfil Avaliado Rq</i>	26
2.5.3. <i>Altura Máxima Do Perfil Rz</i>	26
2.5.4. <i>Fator de Assimetria ou Skewness (Rsk)</i>	27
2.5.5. <i>Fator de Achatamento ou Kurtosis (Rku)</i>	27
2.5.6. <i>Largura Média dos Elementos do Perfil (Rsm)</i>	28
2.5.7. <i>Relação com parâmetros de área</i>	29
2.6. Incertezas de Medição	29
2.6.1. <i>Avaliação da Incerteza Padrão do Tipo A</i>	31
2.6.2. <i>Avaliação da Incerteza Padrão do Tipo B</i>	31
2.6.3. <i>Incerteza Padrão Combinada</i>	32

	2.6.4. <i>Grandezas de Entrada Não Correlacionadas</i>	33
	2.6.5. <i>Grandezas de Entrada Correlacionadas</i>	33
	2.6.6. <i>Incerteza Expandida</i>	34
3	Capítulo 3 - Metodologia	35
	3.1. Preparação do SIMMC Portátil para Ensaios de Desgaste	36
	3.1.1. <i>Preparação dos circuitos de potência e comando</i>	36
	3.1.2. <i>Preparação da Instrumentação</i>	38
	3.1.3. <i>Configuração do Drive ST10-PLUS</i>	38
	3.1.4. <i>Preparação do sistema de medição</i>	38
	3.2. Medição de Massa das Peças utilizadas como Carregamento	40
	3.3. Controle Dimensional e Geométrico dos Penetradores	41
	3.3.1. <i>Medição das dimensões do cume</i>	42
	3.3.2. <i>Medição da rugosidade do cume e das faces laterais do penetrador</i>	44
	3.3.3. <i>Medição dos ângulos da pirâmide</i>	45
	3.4. Planejamento dos Pré-testes de Desgaste Abrasivo	48
	3.5. Planejamento e Execução da Afiação	52
	3.6. Planejamento e Execução da Lapidação	54
	3.6.1. <i>Parâmetros de Processo</i>	54
	3.6.2. <i>Porta-penetradores</i>	54
	3.7. Planejamento e Realização dos Testes Finais de Desgaste Abrasivo	61
4	Capítulo 4 - Resultados e Discussões	62
	4.1. Resultados da Preparação do SIMMC Portátil para Ensaios de Desgaste	62
	4.2. Resultados da Medição da Massa das Peças e Avaliação de Incerteza	63
	4.3. Resultados do Controle Dimensional e Geométrico dos Penetradores Pré-lapidação	64
	4.3.1. <i>Dimensões do cume do penetrador pré-afiação</i>	64
	4.3.2. <i>Rugosidade do cume do penetrador pré-afiação</i>	65
	4.3.3. <i>Rugosidade da face lateral do penetrador pré-afiação</i>	72
	4.4. Resultados dos Testes de Desgaste Abrasivo com os Penetradores Pré-afiação	74

4.4.1. Ensaios pré-afiação com força adicional de 10 N para a amostra E585	75
4.4.2. Ensaios pré-afiação com força externa de 20 N para a amostra E585	76
4.4.3. Ensaios pré-afiação com força externa de 30 N e 40 N	79
4.4.4. Planejamento fatorial completo 6x2	79
4.4.5. Resultados dos pré-testes de desgaste para as amostras restantes e 20 N	81
4.4.6. Tempo de duração dos testes de desgaste	84
4.5. Resultados do Controle Dimensional e Geométrico dos Penetradores Pós-lapidação	85
4.5.1. Dimensões do cume dos penetradores pós-afiação	85
4.5.2. Ângulos das faces laterais dos penetradores pós-lapidação	86
4.5.3. Rugosidade do cume do penetrador pós-lapidação	90
4.5.4. Rugosidade da face lateral dos penetradores pós-lapidação	94
4.6. Resultados dos Testes Finais de Desgaste Abrasivo	98
5 Capítulo 5 - Conclusões	101
6 Referências bibliográficas	103
7 Anexos	109
8 Apêndices	113

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. Assunto e Problema

Considerando a grande dependência das atividades cotidianas e industriais da sociedade atual por combustíveis fósseis, a extração de petróleo coloca-se como um dos campos de grande demanda por novas tecnologias ou aperfeiçoamento das técnicas existentes.

Um sistema de extração de petróleo pode ser, a grosso modo, dividido em três subsistemas: a plataforma; os equipamentos de perfuração e prospecção do produto no fundo do mar e os *risers*, que podem ser dutos rígidos ou flexíveis.

A Figura 1.1 mostra uma representação esquemática dos principais elementos envolvidos na extração, onde I representa a plataforma móvel, II representa o *riser*, III representa o duto flexível em contato com o solo submarino (*flowline*) e IV mostra o ponto de extração.

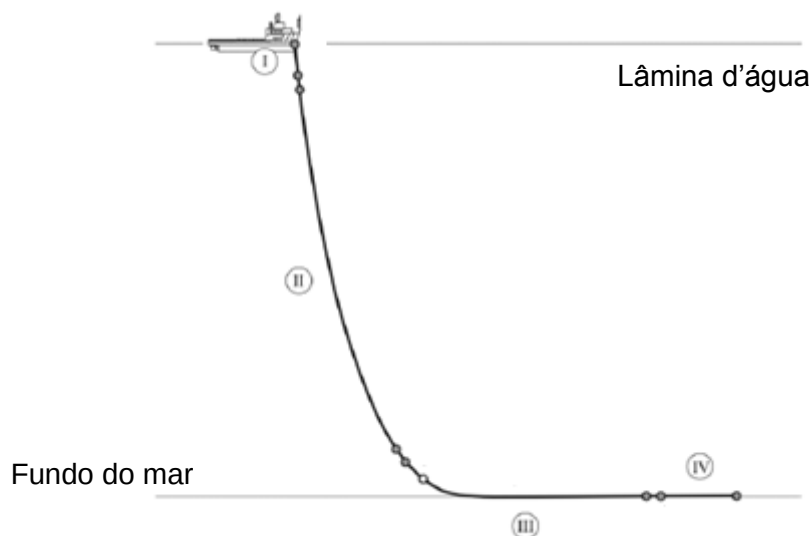


Figura 1.1 - Esquema dos elementos do sistema de extração de petróleo (KAYSER, 2003)

Os dutos flexíveis são elementos que conectam as plataformas aos poços e são responsáveis por levar o óleo até a plataforma. Esses componentes são constituídos por um intrincado sistema de camadas concêntricas que intercalam variados materiais com funções distintas. Existem outros componentes intermediários como *manifold* e árvore de Natal, que também estão conectados através de linhas de fluxo. O *manifold* é instalado no fundo do mar para coletar a produção de petróleo e depois redirecioná-la para uma Unidade de Produção Estacionária. A árvore de Natal é instalada na cabeça de cada poço e controla o fluxo de óleo e/ou gás.

Os dutos flexíveis podem chegar a quilômetros de comprimento, dependendo da profundidade de extração. Tal extensão implica numa considerável área exposta ao ambiente submarino muitas vezes hostil devido à força das correntes marítimas e às particularidades do relevo subaquático. Um ponto de importantes estudos é a região na qual a linha flexível toca o fundo do mar, chamado de *touchdown point* (TDP), mostrado em detalhe na Fig. 1.2.

Devido à interação com o solo submarino, o duto flexível, nesta seção em particular, sofre processos abrasivos importantes que podem levar ao desgaste precoce da capa polimérica externa e, eventualmente, à falha do duto devido à corrosão das fitas de aço.

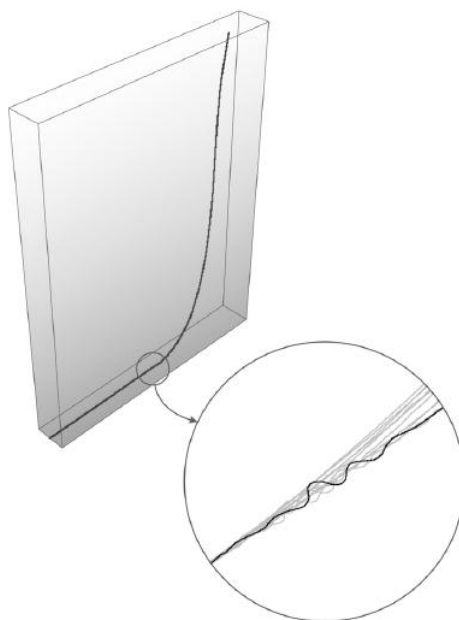


Figura 1.2 - Representação do duto flexível e do TDP no detalhe (KAYSER, 2003)

Para proteger os dutos flexíveis, são empregados revestimentos fabricados de materiais mais resistentes à abrasão do que a capa polimérica do duto propriamente dito. Estes revestimentos são denominados calhas protetoras e são fabricados no formato de uma luva bipartida (Fig.1.3).

Os materiais poliméricos destacam-se à frente dos metais para os fins de proteção, pois são resistentes à corrosão quando expostos à água marinha, além de apresentarem o isolamento elétrico e térmico e estabilidade química, todos estes fatores desejáveis neste tipo de aplicação.

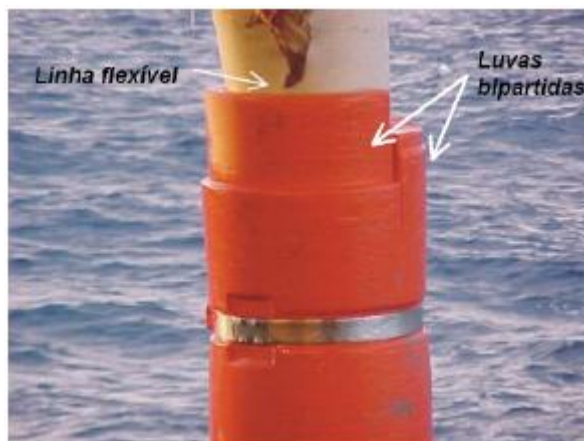


Figura 1.3 – Duto flexível e revestimento protetor (RAMOS NETO, 2003)

Dentre os diversos materiais poliméricos, os mais utilizados são os poliuretanos (PU). Os PUs são produzidos pela reação de poliadição de um isocianato (di ou polifuncional) com um polioli e outros reagentes como: agentes de cura ou extensores de cadeia, contendo dois ou mais grupos reativos, catalisadores, agentes de expansão, surfactantes (estabilizadores e controladores de reação), cargas, agentes antienvelhecimento, corantes e pigmentos, retardantes de chama, desmoldantes, etc. Esta flexibilidade possibilita a obtenção de materiais com diferentes propriedades físicas e químicas, e faz com que os PU's ocupem posição importante no mercado mundial de polímeros sintéticos de alto desempenho.

Com o objetivo de testar o desempenho desses revestimentos antes de empregá-los na operação do poço de extração, o Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia possui um abrasômetro capaz de avaliar o desempenho do material e, assim, determinar se ele atende às condições mínimas para trabalho, bem como, efetuar uma classificação dos materiais testados (FRANCO *et al.*, 2007).

Entretanto, grandes dimensões e massa elevada obrigam a fixação do referido dispositivo numa bancada de laboratório, impedindo a realização de testes com a rapidez necessária para medições em campo. Por isso, foi desenvolvido, projetado, fabricado e validado no LTAD um abrasômetro com dimensões e massa menores, permitindo sua portabilidade e, com isto, a realização de testes em campo após o recebimento das calhas protetoras (FRANCO *et al.*, 2007).

Dentre os componentes do abrasômetro, um dos mais importantes é o penetrador, o objeto de estudo no presente trabalho. Ele é fabricado em metal duro e tem como principal função simular a ação de elementos abrasivos do leito marinho. O trabalho desenvolvido por Moraes (2005) mostrou que, através da correta seleção da geometria desse penetrador, pode-se reproduzir os mecanismos de degradação mais importantes observados em calhas de PU que trabalharam na exploração de petróleo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Principal

- Fabricar, caracterizar e testar penetradores visando à avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de materiais poliméricos usados na proteção de *risers* na região do TDP.

1.2.2. Objetivos Secundários

- Avaliação do desempenho do abrasômetro portátil;
- Determinação de parâmetros de aceite no controle da qualidade na inspeção e recebimento de penetradores para o abrasômetro portátil;
- Estudo e estimativa da incerteza associada à medição do desgaste.

1.3. Justificativas

Considerando as graves implicações que a falha da capa polimérica pode acarretar devido à não-conformidade com as especificações de projeto, existe a necessidade de testar a qualidade das calhas antes de sua utilização. Ou seja, efetuar um controle de qualidade no ato de recebimento do produto a fim de determinar se o material da calha polimérica atende às especificações técnicas. Para tal, desenvolveu-se um abrasômetro que tem como característica principal sua portabilidade, possibilitando a realização dos testes em campo sem a necessidade de recorrer a uma bancada de laboratório (FRANCO; MORAES, 2011).

Para que os resultados dos testes com o abrasômetro sejam confiáveis e repetíveis, os penetradores devem ser fabricados com adequada exatidão dimensional e geométrica. Isto leva à indicação de tolerâncias apertadas e a um controle rigoroso das etapas do processo de fabricação.

Dentre as tolerâncias geométricas, podem-se citar: a) as tolerâncias de perpendicularidade do cume com relação à base, b) de inclinação das faces da pirâmide, com relação à base. Além disso, a rugosidade da superfície do cume e das faces devem ser toleradas. Já as tolerâncias dimensionais abrangem a conformidade com as especificações de projeto para o comprimento e a largura do penetrador e, também, para as dimensões do cume.

No primeiro estágio da construção do abrasômetro portátil, procurou-se adquirir tais penetradores no mercado nacional e foi realizada uma licitação nacional para a contratação da fabricação de dezesseis penetradores. Entretanto, testes de controle dimensional e geométrico revelaram que nenhum dos penetradores recebidos atendia as especificações do projeto (ARENCIBIA *et al.*, 2011).

Segundo Arencibia *et al.* (2011), dentre as não conformidades podem ser citadas: a) os valores de rugosidade se apresentavam até quatro vezes maiores que a especificação para o parâmetro Ra; b) as arestas que definem a superfície do cume apresentavam um aspecto deteriorado, inviabilizando o controle dimensional da referida superfície; c) nas amostras onde foi possível medir as dimensões do cume, foram encontrados desvios positivos e negativos indistintamente maiores que a tolerância dimensional especificada e d) o desvio de perpendicularidade do cume em relação à referência foi de até 36', excedendo a tolerância de inclinação.

1.4. Organização do trabalho

Este trabalho é constituído de mais quatro capítulos organizados da maneira explicada a seguir.

No capítulo segundo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os conceitos importante para realização do trabalho, abordando desgaste abrasivo, testes de desgaste abrasivo, lapidação, afiação, tolerâncias dimensionais e geométricas e incertezas de medição.

O capítulo terceiro apresenta de forma detalhada cada uma das etapas da metodologia da fabricação do penetrador, bem como o controle dimensional e geométrico dos mesmos e os testes realizados para avaliação do desempenho do abrasômetro portátil e medição do desgaste. Ainda, são apresentadas as metodologias para avaliação da incerteza de medição para cada mensurando.

No capítulo quarto são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Enquanto que o capítulo quinto traz as conclusões deste estudo e as sugestões de trabalhos futuros.

Nos anexos estão disponibilizados os desenhos de planificações dos porta-penetradores.

Nos apêndices, são incluídos os certificados de calibração dos sistemas de medição utilizados (relógio comparador, interferômetro, projetor de perfil e microscópio) visando demonstrar a rastreabilidade dos resultados obtidos.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica sobre os conceitos utilizados como fundamentação teórica para o desenvolvimento deste trabalho. Discorre-se sobre desgaste abrasivo, testes de desgaste por abrasão, processos de fabricação necessários para a preparação dos penetradores, rugosidade superficial e seus parâmetros de controle e, por fim, sobre incerteza de medição.

2.1. Desgaste Abrasivo

A tribologia é a ciência e a tecnologia de superfícies que estuda a interação de superfícies em movimento relativo (JOST, 1966). O estudo da tribologia engloba o atrito, a lubrificação e o desgaste.

Zum Gahr (1987) define atrito como a resistência ao movimento relativo que surge de interações dos sólidos na área real de contato e depende do par de materiais em contato e do sistema tribológico.

Já a lubrificação pode ser definida como o processo ou técnica utilizada na aplicação de uma camada chamada lubrificante com a finalidade de reduzir o atrito e o desgaste entre duas superfícies sólidas em movimento relativo, separando-as parcialmente ou completamente. Além de separar as superfícies, a camada também tem a função de retirar do sistema o calor e detritos gerados na interação das superfícies (DUARTE, 2005).

Por fim, define-se desgaste como a perda progressiva de matéria da superfície de um corpo como consequência do movimento relativo de um segundo corpo sobre o primeiro (BLAU, 1995).

O desgaste pode acontecer de diferentes mecanismos, dependendo do meio e dos materiais envolvidos. Blau (1995) classifica os mecanismos de desgaste em: desgaste por

abrasão, desgaste por erosão, desgaste por cavitação, desgaste por adesão, desgaste corrosivo e desgaste por impacto. O primeiro é o mais importante para este trabalho.

Segundo a *Organization for Economic Corporation and Development* (OECD), abrasão é a perda de matéria devido ao movimento relativo de duas superfícies e decorrente de ação de asperidade dura em uma das superfícies. As partículas abrasivas podem estar livres entre as duas superfícies ou então engastadas em uma delas (como protuberâncias). A Fig. 2.1 ilustra ambos os casos.

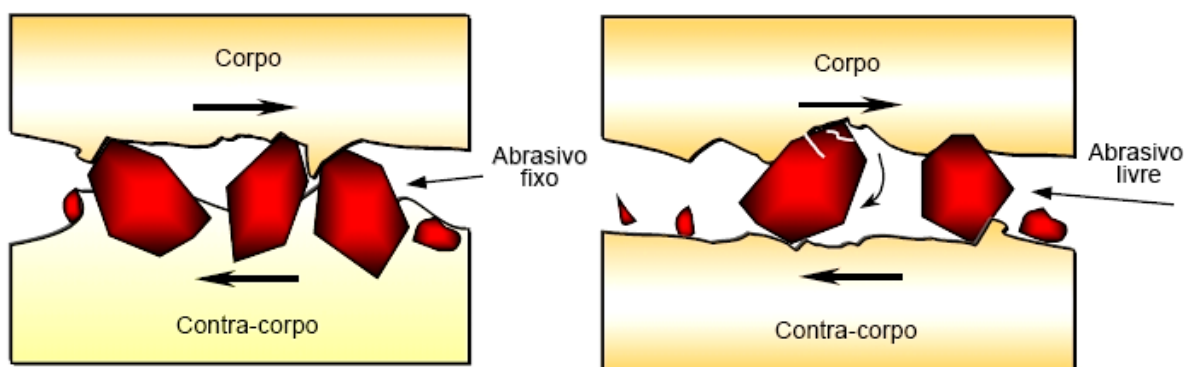


Figura 2.1 - Representação do desgaste abrasivo por deslizamento de partículas duras (à esquerda) e por rolamento de partículas duras (à direita) (FRANCO, 2007)

No primeiro caso, tem-se entre as superfícies envolvidas partículas duras livres. O desgaste se dá basicamente por meio de um processo de indentações múltiplas. No segundo caso, o desgaste se dá pela ação de partículas duras engastadas em uma das superfícies. Isso leva à formação de sulcos e/ou riscos na superfície antagônica.

O mecanismo de desgaste abrasivo pode envolver tanto deformação plástica como fratura frágil (HUTCHINGS, 1992). Os submecanismos da abrasão são os seguintes: microsulcamento, microcorte, microfadiga e microtrincamento (Fig. 2.2).

Denomina-se microsulcamento a ação de partícula abrasiva deformando plasticamente a superfície de um material (ou fase) dúctil, formando um sulco em seu trajeto. Já microcorte caracteriza-se pela formação de pequenos cavacos ou fragmentos de desgaste quando as tensões de cisalhamento, impostas pelo deslocamento da partícula abrasiva sobre a superfície, são suficientemente elevadas para a ruptura do material dúctil. Por fim, o processo mais agressivo, o microtrincamento, é uma ação de fragmentação da superfície frágil pela formação de crescimento de trincas, devido à ação da partícula abrasiva.

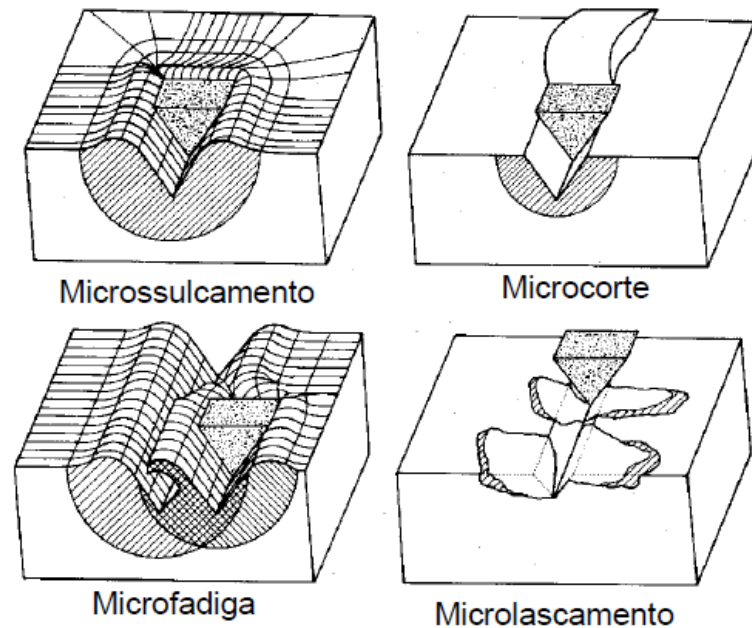


Figura 2.2 – Mecanismos de desgaste envolvidos em desgaste abrasivo (ZUM GAHR, 1987)

O principal fator que define se o processo de desgaste será microsulcamento ou microcorte é o ângulo de ataque (ou ângulo de corte). Para baixos valores angulares, o microsulcamento domina o processo abrasivo, enquanto que, para altos valores de ângulos de ataque, o microcorte predomina. A Fig. 2.3 ilustra essa relação.

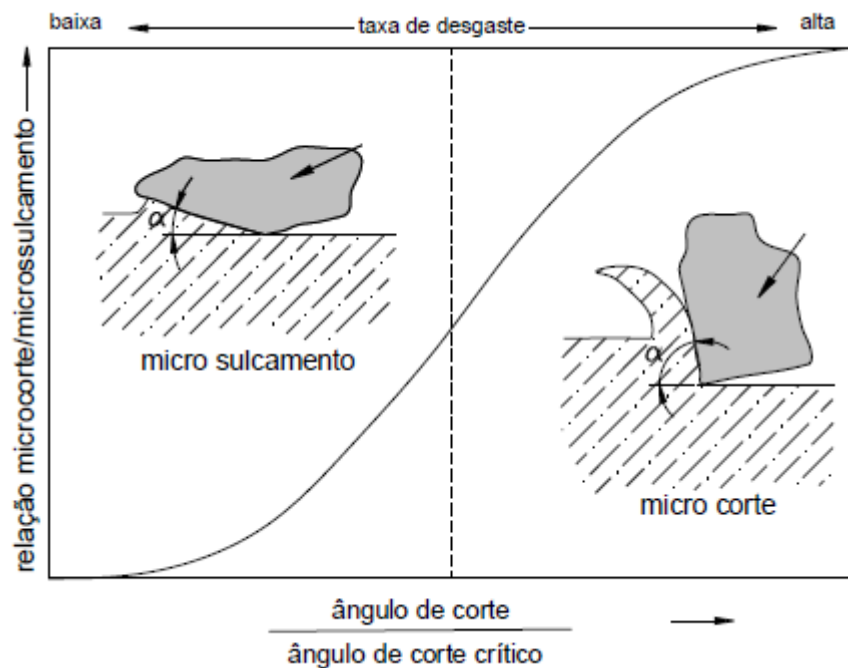


Figura 2.3 - Relação entre as parcelas de microcorte e microsulcamento e a razão entre o ângulo de corte e o ângulo de corte crítico (ZUM GAHR, 1987)

2.2. Testes de Desgaste por Abrasão

A fim de identificar as características de sistemas tribológicos, recorre-se à simulação e à análise do processo abrasivo encontrado em situações reais por meio de ensaios de laboratório. Uma propriedade importante dos sistemas é a resistência à abrasão, e os ensaios realizados a fim de identificá-la são chamados de testes de desgaste abrasivo.

A resistência à abrasão é a capacidade de um material resistir ao desgaste produzido por partículas duras. O método proposto pela ASTM D 1242 (1995) descreve a determinação dessa propriedade como a oposição à perda percentual, em volume, em relação a um padrão.

Podem-se testar materiais quanto sua resistência à abrasão por duas metodologias diferentes: por meio de uma abordagem global, chama de abrasometria, ou utilizando uma abordagem local, chamada de esclerometria. Em ambos os casos, o material é submetido a processo de desgaste onde o principal mecanismo é a abrasão e a resistência é obtida como o inverso da taxa de desgaste observada.

Na abrasometria, procura-se reproduzir em laboratório as condições encontradas em campo. Os testes de laboratório mais comumente utilizados para desgaste abrasivo empregam uma amostra em formato de pino deslizando sobre um abrasivo fixo (disco ou chapa). Esse ensaio é conhecido como pino-sobre-lixo. Nos casos em que o abrasivo é livre para se movimentar entre as duas superfícies, o ensaio mais comum é conhecido como roda-de-borracha. Esse ensaio é caracterizado por uma roda revestida com borracha, que é colocada para girar contra a amostra. Entre a amostra e a roda de borracha é injetada uma areia de características controladas (HUTCHINGS, 1992).

A Figura 2.4 ilustra quatro configurações de aplicação desta metodologia. As Figuras 2.4a a 2.4c mostram variações do método pino-sobre-lixo (desgaste abrasivo com deslizamento de partículas duras), enquanto que a Fig. 2.4.d mostra o ensaio utilizando abrasivo livre (desgaste abrasivo com rolamento de partículas duras).

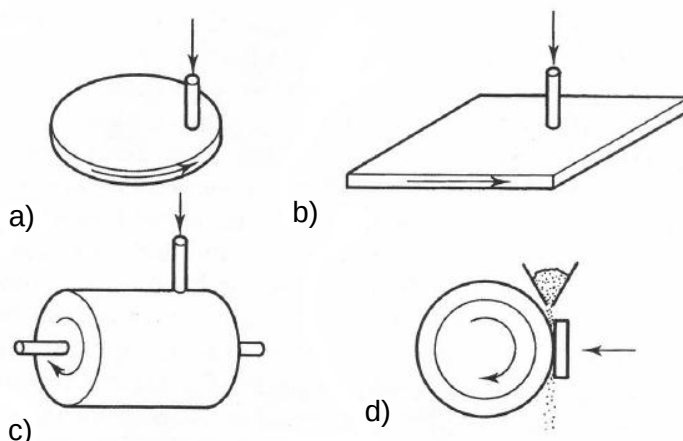


Figura 2.4 – Ilustração esquemática de quatro métodos usados para medir a taxa de desgaste abrasivo: a) pino-sobre-disco; b) pino-sobre-chapa; c) pino-sobre-cilindro; d) teste abrasivo com roda-de-borracha (HUTCHINGS, 1992)

A segunda metodologia para testes de desgaste abrasivo é a esclerometria. Na esclerometria, um penetrador (elemento de geometria conhecida) movimenta-se sobre a superfície da amostra, de modo que o elemento simule a ação de uma única partícula abrasiva. Parâmetros como carga, profundidade, e outros são analisados e fornecem informações para o estudo do desgaste. Assume-se que, no caso do desgaste abrasivo, a degradação é decorrente de um processo de riscamento múltiplo (DE MELLO, 1983; LAMY, 1982). O dispositivo utilizado para ensaios de esclerometria é denominado esclerômetro.

Para a realização de testes de esclerometria, devem ser considerados alguns parâmetros importantes do processo, como: a) velocidade, dureza e geometria do penetrador; b) o carregamento externo aplicado; c) o limite de escoamento do material ensaiado; d) a temperatura alcançada no processo, como também e) os desgastes e possíveis lascamentos dos indentadores durante os ensaios (BUTTERY, 1970).

Além dessas duas abordagens, é possível utilizar um método híbrido que incorpore os princípios da abrasometria e da esclerometria.

Neste sentido, Moraes (2005) projetou e construiu um equipamento capaz de realizar ensaios de desgaste abrasivo e propôs uma metodologia para realização deste ensaio usando penetradores de geometria conhecida que se movimentam em relação à amostra

O dispositivo foi denominado de Simulador de Interações Marítimo-Mecânicas em Calhas (SIMMC) (Fig. 2.5), e a metodologia visou facilitar a seleção e classificação de materiais poliméricos para aplicação como revestimento de dutos flexíveis utilizados na extração de petróleo. Ele conclui que as condições de desgaste existentes no fundo do mar foram simuladas reproduzindo satisfatoriamente os micromecanismos de desgaste observados na prática.

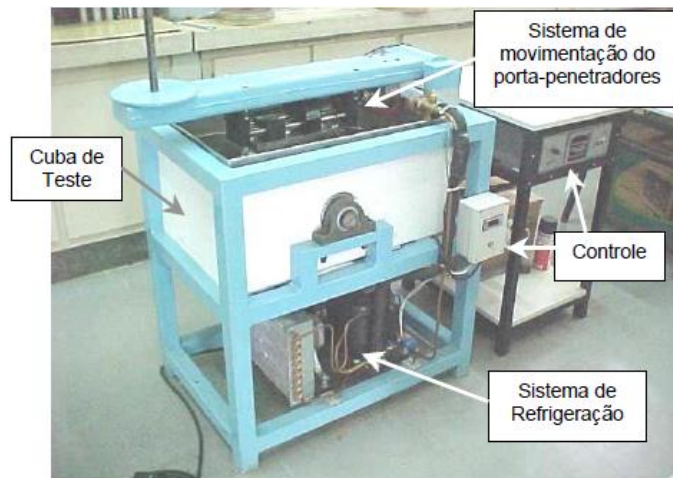


Fig. 2. 5 – Simulador de Interações Marítimo-Mecânicas em Calhas (MORAES, 2005)

Para se realizar ensaios de desgaste abrasivo, seja sob o princípio da esclerometria ou utilizando a abordagem híbrida, devem ser utilizados penetradores fabricados de materiais de elevada dureza, como o carboneto de tungstênio envolto por uma matriz de cobalto (WC-Co). A escolha desse material, conhecida comercialmente como metal duro, justifica-se pela dureza frente à dureza dos polímeros utilizados como corpo de prova. Segundo Hutchings (1992), partículas com durezas menores que a da superfície analisada causam um desgaste muito menor que partículas de maior dureza. Para partículas significativamente mais duras, o valor dessa dureza tem menor influência. A taxa de desgaste pode variar consideravelmente se a razão entre a dureza do abrasivo e a da superfície é próxima da unidade. Na prática, aconselha-se que a relação de durezas entre o penetrador e a amostra seja superior à unidade.

A geometria e acabamento dos penetradores devem ser definidos com elevada exatidão para se aproximar ao máximo das condições reais de desgaste por abrasão.

Na Figura 2.6 são mostrados diferentes penetradores. Observa-se que a base pode ser cilíndrica ou não, e a ponta pode apresentar diferenças significativas quanto à forma e dimensões.

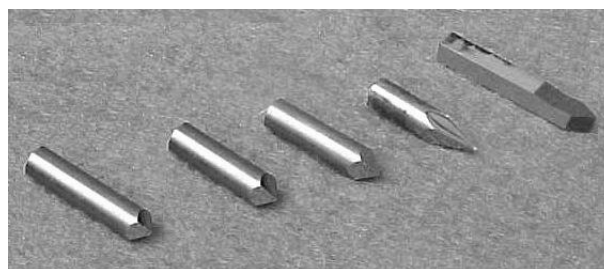


Figura 2.6 - Penetradores utilizados nos ensaio de desgaste abrasivo (PAES *et al.*, 2002)

No que diz respeito às dimensões e à geometria do penetrador, existem três parâmetros principais. O primeiro é o comprimento do corpo do penetrador, que é responsável pela sua fixação no dispositivo e tem influência direta na profundidade da trilha de desgaste na amostra.

O segundo parâmetro é o ângulo da ponta do penetrador, também chamado de ângulo de ataque, que tem importância fundamental para a taxa de desgaste. Segundo Lawn; Fuller (1975), num teste de esclerometria, o material da superfície é removido por microcorte quando o ângulo de ataque da partícula dura é maior que um valor crítico. Quanto menor o ângulo de ataque, maior a tendência de se ter microsulcamento, e, conseqüentemente, menores taxas de desgaste. Do mesmo modo, nota-se, que, quanto maior o ângulo de ataque da partícula abrasiva, maior a probabilidade de se ter o microcorte como micromecanismo de desgaste.

O terceiro parâmetro é a área da ponta responsável pelo início do riscamento. Em geral, esta ponta é truncada, e não pontiaguda, para evitar a quebra da mesma.

Por último, tendo em vista os parâmetros supracitados, tolerâncias dimensionais e geométricas são estipuladas para garantir a alta exatidão dos mesmos. Para o corpo do penetrador, o mais importante é a tolerância dimensional de comprimento. Já para a pirâmide, a tolerância de inclinação para o ângulo de ataque ganha destaque. Para a ponta truncada, a tolerância de perpendicularidade e a área da face são as características principais.

2.3. Fabricação de Penetradores em Metal Duro

A fabricação de peças em metal duro é efetuada por meio da metalurgia do pó. Entretanto, as características dimensionais e geométricas necessárias para os penetradores serem capazes de realizar testes de desgaste nem sempre podem ser garantidas por este processo. Isto cria a necessidade de se recorrer a processos de usinagem a fim de se obter os parâmetros dimensionais, geométricos e de rugosidade especificados.

Segundo Brookes (1996), torneamento, fresamento e retificação podem ser empregados para se trabalhar metal duro. Estes processos devem ser realizados utilizando ferramentas de diamante ou discos e rebolos diamantados, uma vez que o metal-duro possui dureza elevada.

Entretanto, a utilização dos processos citados nem sempre é possível ou viável, uma vez que a geometria e as dimensões dos penetradores devem ser levadas em consideração. Quando se almeja fabricar peças de pequenas dimensões, como é o caso

dos penetradores para teste de desgaste, outros processos podem ser mais adequados. Destes, destacam-se a afiação e a lapidação por permitirem boas precisões e tolerâncias dimensionais e geométricas. A Figura 2.7 mostra como estes dois processos são classificados dentre os processos de corte.

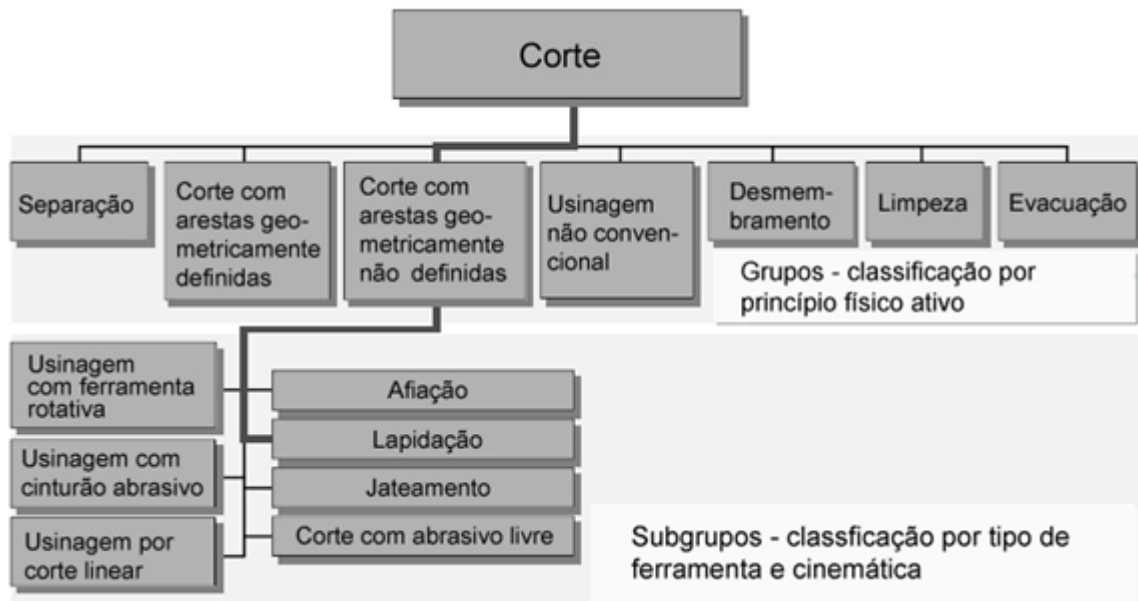


Figura 2.7 – Classificação das operações de corte (MARINESCU *et al*, 2007)

2.3.1. Afiação

Afiação é um processo de usinagem que emprega um rebolo abrasivo girando a alta velocidade para remover material de uma peça mais macia. Afiação é uma operação chave para a fabricação de produtos e superfícies avançadas numa ampla gama de aplicações industriais, sendo utilizada onde um ou mais destes fatores estão presentes e são necessários: alta precisão, alta taxa de remoção de material, usinagem de materiais com alta dureza (MARINESCU *et al*, 2007).

O processo de afiação (Fig. 2.8) é composto por três elementos principais: o rebolo (ferramenta de corte), a peça a ser afiada e o fluído refrigerante e/ou lubrificante.

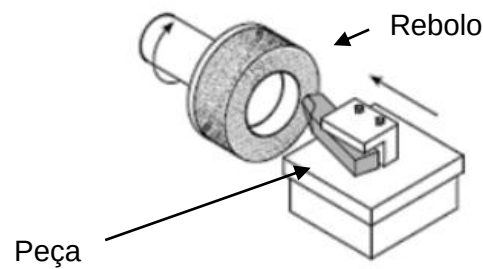


Figura 2.8 – Processo de Afiação (SOUZA, 2011)

O abrasivo utilizado possui grande importância durante o processo de afiação. Ele deve ser mais duro do que o material usinado na temperatura de interação (que tendem a ser altas). A Tabela 2.1 traz a dureza de diferentes tipos de abrasivo.

Tabela 2.1 – Dureza de grãos abrasivos em temperatura ambiente (DE BEERS, 1998)

Material	Dureza [GPa]
Diamante	56-102
Nitreto cúbico de boro	42-46
Carboneto de silício	24
Óxido de Alumínio	21

2.3.2. Lapidação

Segundo König; Messer (1980), a lapidação é um processo de fabricação de precisão, no qual são obtidas peças com excelente acabamento superficial em conjunto com elevada precisão de forma e tolerâncias dimensionais apertadas. De acordo com a norma DIN 8589 (2003), a lapidação é definida como um processo de usinagem com abrasivo em grãos soltos dispersos numa pasta que percorre a ferramenta de lapidação em caminhos não-direcionais.

A Tabela 2.2 traz os valores de rugosidade obtidos por diversos processos de fabricação, expressos em termos de rugosidade média, Ra. Observa-se que, por meio da lapidação, é possível obter valores de Ra entre 0,1 e 0,4 μm .

Do ponto de vista das características da máquina-ferramenta e da operação, a lapidação é um processo de fácil execução. Entretanto, o domínio e a otimização dos parâmetros do processo é uma tarefa difícil, devido ao grande número de variáveis envolvidas.

Tabela 2.2 – Valores de rugosidade em função do processo de fabricação (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977)

Ra (μm)	51	25,4	12,7	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,013
Corte por chama	///	///	///										
Modelagem em areia	///	///	///										
Laminação a quente	///	///	///										
Forjamento		///	///	///	///								
Plainamento		///	///	///	///	///							
Rasquete	///	///	///	///	///								
Corte de serra	///	///	///	///	///								
Furação		///	///	///	///	///							
Usinagem química		///	///	///	///	///							
Corrosão eletrolítica		///	///	///	///	///							
Fresamento		///	///	///	///	///	///						
Torneamento / mandrilamento		///	///	///	///	///	///	///					
Brochamento				///	///	///	///						
Alargamento				///	///	///	///						
Modelagem de precisão extrusão				///	///	///	///						
Laminação a frio				///	///	///	///						
Moldagem sob pressão					///	///	///						
Retífica				///	///	///	///	///	///	///	///	///	///
Espelhamento					///	///	///	///	///	///	///	///	///
Polimento eletrolítico						///	///	///	///	///	///	///	///
Rolagem						///	///	///	///	///	///	///	///
Polimento						///	///	///	///	///	///	///	///
Lapidação						///	///	///	///	///	///	///	///
Super acabamento						///	///	///	///	///	///	///	///
/// Aplicação menos comum ■ Campo usual de aplicação													

Superfícies lapidadas são lustrosas e caracterizadas por propriedades isotrópicas. A estrutura superficial de faces lapidadas oferece uma base especialmente boa para o polimento (MARINESCU *et al*, 2007).

Praticamente todos os materiais podem ser lapidados desde que não sofram deformações plásticas devido à sua própria massa ou ao carregamento mecânico presente no processo de usinagem, tais como: metais (ferrosos ou não), materiais isolantes, vidros, materiais naturais como mármore, granito e basalto, pedras preciosas, plásticos, semicondutores (silício e germânio) e materiais de carbono, como grafite e diamante.

Uma ou mais peças podem ser trabalhadas ao mesmo tempo num processo em lote. O abrasivo é usualmente misturado com um líquido ou pasta, sendo os mais comuns aqueles à base de óleo ou água. As peças objeto de lapidação são colocadas em anéis de contenção. Porta-amostras podem ser usados para manter as peças separadas e impedir dano das arestas e superfícies laterais das mesmas.

A reprodutibilidade dos resultados do processo de lapidação depende da experiência do operador e é influenciada por fatores que levam à variação das condições de trabalho na fenda de lapidação, mesmo mantendo constantes os parâmetros de entrada do processo (WEINGAERTNER; CRICHIGNO FILHO; WIESNER, 1999). Os principais fatores que levam ao desvio dos resultados durante a lapidação estão relacionados às mudanças das condições ambientais (temperatura); à variação das características das peças (sobremetal, rugosidade inicial) (WEINGAERTNER; CRICHIGNO FILHO; WIESNER, 1999), ao tribossistema (definição do tipo de abrasivo, da granulometria e da concentração, definição da carga durante a lapidação, do material do disco e da velocidade deste), às características construtivas da máquina (desvio de planeza do disco) e às condições relativas ao processo (variação da quantidade de meio de lapidação) (TOUGE; MATSUO, 1996; CHANDRASEKAR *et al.*, 1987).

Estes autores ainda destacam que o desperdício de abrasivo em estado útil, expulso do disco de lapidação pela força centrífuga, constitui num aspecto negativo, sobretudo quando se utilizam grãos de diamante devido ao seu alto custo.

Um dos principais parâmetros de controle utilizados para se alcançar a dimensão e a rugosidade desejadas é o tempo de lapidação. Desta forma, durante sua execução, o processo é interrompido várias vezes, para a medição das dimensões e da rugosidade da peça. Consequentemente, a lapidação pode se tornar um processo demorado, devido ao tempo gasto em cada parada para a limpeza e medição da peça.

Uma alternativa a este problema consiste no monitoramento do processo em tempo real (WESTKÄMPER, 1993) e alguns autores têm abordado esta alternativa (KÖNIG; MESSER, 1980; MARINESCU *et al.*, 2007 e WEINGAERTNER; CRICHIGNO FILHO; WIESNER, 1999). Desta forma, o processo é interrompido para efetuar a medição dos parâmetros dimensionais e geométricos somente quando ocorrer um desvio do sinal acústico, dentro de uma faixa de tolerâncias, em relação ao primeiro lote de peças lapidadas. Com isso se pode garantir a precisão do processo, diminuindo-se o número de paradas e, portanto, o tempo total de lapidação (WEINGAERTNER; CRICHIGNO; WIESNER, 1999). Pode ser acrescentado que os custos com a medição também serão menores.

a) Abrasivo para Lapidação

Os abrasivos mais comuns utilizados na lapidação são a alumina (Al_2O_3) e o carboneto de silício (SiC), cujos grãos têm diâmetro entre 1 e 50 μm , pois ambos são muito duros com uma ação de corte satisfatória. Abrasivos de alumina têm forma arredondada e alta dureza, o que os torna difíceis de serem esmagados, enquanto o carboneto de silício é facilmente

esmagado devido à sua aresta de corte bem-definida. Dependendo das características mecânicas da peça trabalhada, um ou outro tipo pode ser escolhido (MARINESCU *et al*, 2007).

Usualmente, o tamanho médio dos grãos do abrasivo é proporcional à eficiência do processo e à dureza superficial da peça trabalhada. Tipicamente, o tamanho do grão do abrasivo é sequencialmente reduzido à metade durante o processo de lapidação.

Além dos grãos de abrasivo, reagentes também são utilizados para lubrificar e dispersar as partículas, permitindo o rolamento do abrasivo e o descarte (e, conseqüentemente, a renovação) da suspensão abrasiva. Apesar de água ser o reagente mais comum, óleo ou uma combinação de água e óleo podem ser usados quando a intensidade da remoção mecânica precisa ser diminuída e/ou o coeficiente de atrito precisa ser controlado.

As características dos diversos tipos de abrasivos, principalmente a granulometria e o custo, variam consideravelmente, então é importante definir qual abrasivo se adequa mais às necessidades do processo de lapidação. O material a ser lapidado determina qual tipo de abrasivo deve ser utilizado. Já a quantidade de material a ser removida, juntamente com o acabamento superficial especificado, governam a escolha do tamanho do grão do abrasivo.

Materiais extremamente duros como safira, carbonetos e algumas cerâmicas exigem abrasivos de diamante ou carboneto de boro (B_4C). Materiais de dureza média, o que inclui metais mais duros e algumas aluminas, podem ser lapidados com carboneto de silício. Óxido de alumínio é largamente utilizado na indústria de vidros e silício devido à sua ação menos agressiva e seu baixo custo.

Considerando que o abrasivo também ataca a superfície do prato de lapidação, é sempre preferível que o prato seja fabricado de um material mais macio que a peça lapidada, enquanto o abrasivo deve ser tão duro quanto, ou ainda mais duro, do que as peças trabalhadas.

b) Ferramentas de Lapidação

De acordo com a norma DIN 8580 (1985), ferramentas são meios de manufatura que causam a geração ou mudança de forma e posição e, algumas vezes, das propriedades do material por meio de movimento relativo e transferência de energia. A Figura 2.9 ilustra uma lapidadora.

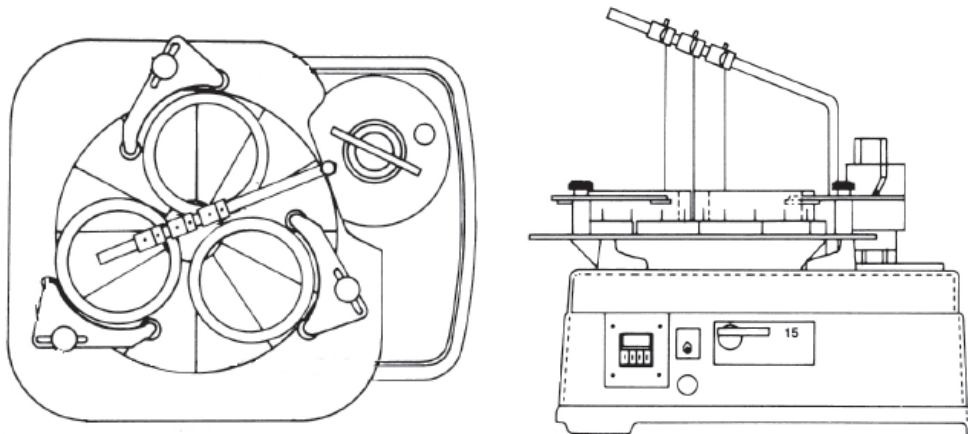


Figura 2.9 – Lapidadora (LAPMASTER, 2013, adaptada)

Uma ferramenta de lapidação é composta pela contraparte modeladora (isto é, responsável pela transferência de forma) e pela suspensão abrasiva.

Na lapidação de superfícies, planos paralelos, cilindros ou esferas, as rodas de lapidação, também chamadas de pratos, são a contraparte modeladora. Elas portam a suspensão, as peças e as estações de trabalho. Estas últimas são, comumente, anéis de ferro fundido ou aço destinados a evitar que a peça trabalhada escorregue para fora da máquina de lapidação.

A Figura 2.10 ilustra pratos de lapidação, à esquerda, e estações de trabalho, à direita.



Figura 2.10 – Pratos de lapidação e estações de trabalho (MARINESCU *et al.*, 2007)

2.4. Tolerâncias Dimensionais e Geométricas

A impossibilidade de fabricar peças dimensional e geometricamente perfeitas criou a necessidade de quantificar e indicar as tolerâncias dimensionais e geométricas e,

consequentemente, desenvolver meios para verificar se as dimensões e os desvios que estas peças apresentam estão dentro dos valores especificados na fase de projeto. Desse modo, o entendimento e correta aplicação das normas sobre GD&T (*Geometric Dimensioning and Tolerancing*) e o conjunto de normas ISO-GPS (*Geometric Product Specification*) em departamentos de engenharia e em salas de metrologia se tornam necessários para garantir que os desvios decorrentes da fabricação não prejudiquem a montagem e o adequado funcionamento das peças.

Segundo Sousa; Wandek (2009), no Brasil percebem-se deficiências no entendimento e correta aplicação do GD&T. O conhecimento superficial das normas de especificação geométrica de produtos e a pouca experiência na extrapolação desses conhecimentos para a definição de boas práticas de medição estão dentre as principais deficiências encontradas, causando diversos problemas. Segundo esses autores, além da dificuldade de se lidar com as especificações de GD&T em si, existe ainda a dificuldade de se avaliar a incerteza de medição e verificar se esta está adequada frente à tolerância controlada. Para reduzir a ocorrência desses problemas é importante investir tempo e recursos em uma série de ações, dentre elas, a qualificação do pessoal.

A ABNT NBR 6158 (1995) fixa um conjunto de princípios, regras e tabelas que se aplicam à tecnologia mecânica, a fim de permitir a escolha racional de tolerâncias e ajustes visando à fabricação de peças intercambiáveis, a redução de custos e o aumento da produtividade. Para os penetradores objeto de estudo neste trabalho, algumas dimensões devem ser toleradas a fim de garantir o acoplamento dos mesmos no dispositivo de testes e o adequado funcionamento do conjunto. Dentre elas tem-se: o comprimento do penetrador e a área do cume.

Entretanto, o estabelecimento de tolerâncias dimensionais nem sempre garante o bom funcionamento das peças, surgindo a necessidade de se indicar, também, tolerâncias geométricas. Para o estabelecimento destas últimas, devem ser seguidas as recomendações da ABNT NBR 6409 (1997).

A ABNT NBR 6409 (1997) classifica as tolerâncias geométricas em dois grupos, a saber: tolerâncias macro e microgeométricas. No primeiro grupo se encontram as tolerâncias de forma, de posição, de orientação e batimento. Enquanto que no segundo grupo se encontra a rugosidade superficial.

Para desenvolvimento deste trabalho serão considerados apenas os desvios macrogeométricos de forma (planeza) e de orientação (inclinação e perpendicularidade). A necessidade do estabelecimento destas tolerâncias nos penetradores se deve ao fato de que a exatidão dos mesmos não é garantida com os meios normais de fabricação.

Tolerância de Perpendicularidade: é uma tolerância geométrica de orientação e é aplicada a dois ou mais elementos, tendo sempre um deles como referência para o posicionamento perpendicular dos demais (Fig. 2.11a).

Tolerância de Inclinação: aplicada a dois ou mais elementos, tendo sempre um deles como referência para o posicionamento dos demais num ângulo qualquer que servirá como referência para aplicação da tolerância (Fig. 2.11b). Cabe ressaltar que o ângulo igual a 90° caracteriza a tolerância de perpendicularidade, enquanto que o ângulo de 180° representa uma tolerância de paralelismo.

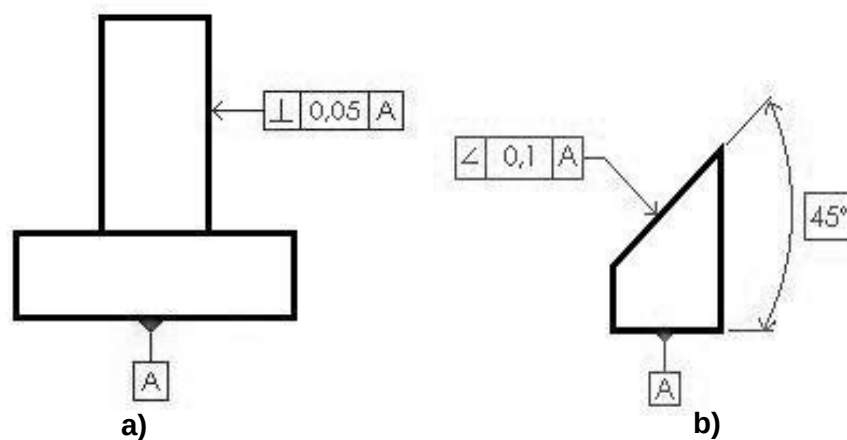


Figura 2.11– a) Indicação de tolerância de perpendicularidade, b) indicação de tolerância de inclinação (ABNT NBR 6409, 1997)

O símbolo A indica a superfície que foi escolhida como referência.

Tolerância de Planicidade: É o desvio aceitável na forma do elemento tolerado em relação à forma plana ideal e corresponde à distância t entre dois planos ideais imaginários, entre os quais deve encontrar-se a superfície real da peça. A Figura 2.12 mostra essa tolerância sendo aplicada a uma superfície. Nota-se que não existe uma superfície de referência aplicada a esta tolerância.



Figura 2.12 – Indicação de tolerância de planicidade (ABNT NBR 6409, 1997)

2.5. Rugosidade Superficial

A importância do estudo do acabamento superficial aumenta na medida em que cresce a precisão de ajuste entre peças a serem acopladas, onde somente as tolerâncias dimensionais, de forma e de posição não são suficientes para garantir a funcionalidade do par acoplado. Assim, a especificação do acabamento das superfícies através da rugosidade superficial é fundamental para peças onde houver atrito, desgaste, corrosão, tensões cíclicas que causam fadiga, transmissão de calor, propriedades óticas, escoamento de fluidos, superfícies de medição, etc. (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).

Agostinho e coautores (1997) definem a rugosidade superficial como a soma das diferenças de forma de 3ª a 5ª ordens, que resultam da ação inerente ao processo de usinagem. Diferenças de forma de 3ª a 5ª ordens são diferenças que se repetem, regular ou irregularmente, cujas distâncias são um múltiplo reduzido de sua profundidade.

Uma definição mais abrangente sobre rugosidade é encontrada em Piratelli-Filho (2011). O autor define rugosidade como o conjunto de desvios microgeométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície.

A medição da rugosidade requer o uso de equipamentos e padrões especificamente desenvolvidas para esse fim, devido ao seu caráter microgeométrico. Dentre eles, pelo baixo custo se destacam os padrões de rugosidade, os quais possibilitam uma avaliação por meio de comparações táteis (Fig. 2.13).

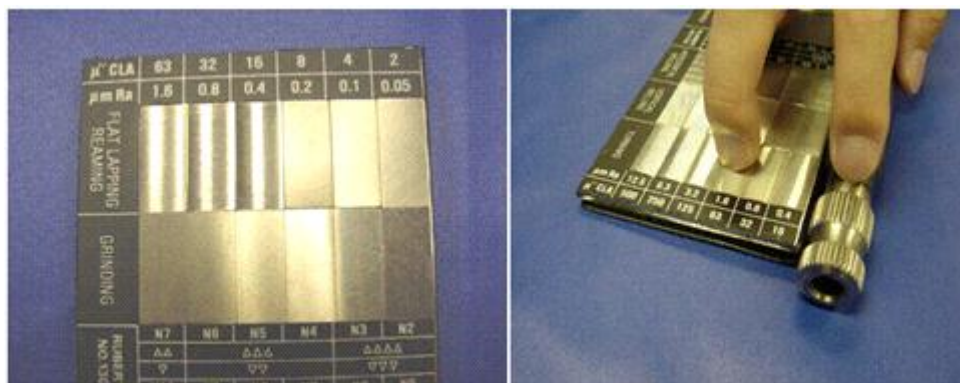


Figura 2.13 - À esquerda, padrões de rugosidade, à direita, avaliação da rugosidade através de uma comparação tátil (TAYLOR HOBSON, 2003)

Quando uma avaliação mais detalhada e precisa da rugosidade é solicitada, devem ser utilizados rugosímetros, que podem ser óticos, a laser ou eletromecânicos.

Para os eletromecânicos, uma agulha faz a varredura da superfície fornecendo o perfil de rugosidade, o que caracteriza esta medição como sendo medição com contato, comumente utilizado na indústria (CHAND *et al.*, 2011).

As agulhas são fabricadas em diamante e a geometria da ponta pode ser cone-esférica ou tipo pirâmide truncada. Uma das limitações da medição da rugosidade com contato está na impossibilidade de obter-se o perfil real devido às dimensões da ponta da agulha. Segundo Chand *et al.* (2011), o raio da ponta contribui para a incerteza de medição e podem ser atribuídas a ele as diferenças encontradas entre os resultados das medições da rugosidade com e sem contato.

Outra limitação da medição com contato está no fato de que uma agulha de medição com ponta fina, mesmo sob baixas cargas resulta em uma área de contato tão pequena que a pressão local pode ser suficientemente elevada para provocar uma deformação elástica significativa da superfície medida. Em alguns casos a pressão local pode exceder a dureza do material provocando uma deformação plástica. Para materiais dúcteis como alguns aços, prata, ouro, chumbo e elastômeros podem ser observados riscos na superfície após a medição (POON; BHUSHAN, 1995; BHUSHAN, 2002).

Desta forma as dimensões e a geometria da ponta da agulha devem ser escolhidas adequadamente. A forma ideal da ponta é um cone com a ponta esférica (forma cone-esférica). O tipo esférico tem geralmente um ângulo de cone de 60° ou 90° com um raio típico de 1, 2, 5 ou 10 μm (LEACH, 2001).

Com relação à força de medição tem-se que quando esta for muito baixa a ponta da agulha pode não manter o contato com a superfície da peça durante todo o percurso de medição, fornecendo informações incorretas sobre a micro-rugosidade da superfície (LEACH, 2001). Este fato depende da geometria da superfície, da constante de mola utilizada e da velocidade de movimentação da agulha. A força de medição estática da ponta, geralmente é definida pelo fabricante, e assume o valor de 0,75 mN, de acordo com a ABNT NBR ISO 3274 (2008).

Uma alternativa para superar as limitações da medição com contato é a utilização de interferômetros a laser que possibilita uma medição sem contato onde o perfil efetivo se aproxima do real com maior exatidão e confiabilidade. Como as dimensões das faces e do cume da ponta dos penetradores são pequenas, neste trabalho será utilizado este equipamento para avaliação da rugosidade superficial.

Na medição da rugosidade com o interferômetro a laser é avaliada uma área (RHEE, *et al.*, 2006) previamente definida da superfície, e como resultado obtém-se um perfil tridimensional de rugosidade.

Segundo Vorburger *et al.* (2007), as diferenças encontradas entre valores de rugosidade, na faixa de 50 nm a 300 nm, aplicando ambos os métodos de medição (com contato e sem contato) podem ser de aproximadamente 75%.

Por sua vez, Chand *et al.* (2011) observaram que na faixa de 0,174 μm a 1,770 μm na medida em que a rugosidade diminui os vales se tornam mais estreitos e o perfil efetivo se afasta do real, com isto as diferenças encontradas entre os valores de rugosidade obtidos por ambos os métodos aumentam. Enquanto que para superfícies muito lisas os valores de rugosidade são similares.

A avaliação da rugosidade superficial exige o uso de filtros para separar a rugosidade das ondulações e dos desvios de forma (ABNT NBR ISO 4288, 2008), pois os mesmos se apresentam de forma superposta na superfície da peça. Como o perfil de rugosidade apresenta a maior das frequências e a menor das amplitudes em relação aos demais é aplicado um filtro do tipo passa-alta. Como resultado obtém-se o valor do comprimento de amostragem adequado para avaliar a rugosidade superficial, como mostra a Tab. 2.3.

Tabela 2.3 – Comprimentos de amostragem (ABNT NBR ISO 4288, 2008)

R_a [μm]	Comprimento de amostragem de rugosidade [mm]	Comprimento de avaliação de rugosidade [mm]
$(0,006) < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

O comprimento de amostragem é definido como o comprimento, usado para identificar as irregularidades características do perfil sob avaliação (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

Para avaliação da rugosidade existem dois sistemas, o sistema da linha média (SLM) e o sistema da envolvente (SE), sendo que no Brasil é utilizado o primeiro. No sistema da linha média todos os parâmetros de rugosidade são definidos a partir do seguinte conceito de linha média: “Linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento de amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual, em módulo, à soma das áreas inferiores, no comprimento de amostragem l ”.

A Figura 2.14 mostra graficamente o significado da linha média.

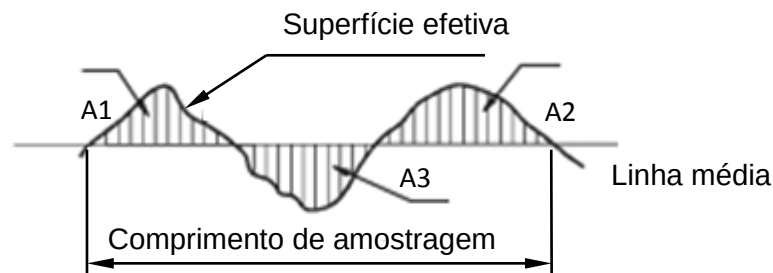


Figura 2.14 - Conceito da linha média (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977)

Portanto, de acordo com a Fig. 2.14, tem-se que $A_1 + A_2 = A_3$.

Tomando como base o conceito de linha média, a ABNT NBR ISO 4287 (2002) divide os parâmetros, que permitem quantificar os diversos formatos assumidos pelo perfil de rugosidade em três grupos, que são: parâmetros de amplitude; parâmetros de espaçamento e parâmetros híbridos.

- Parâmetros de Amplitude: são determinados por alturas dos picos, profundidades dos vales ou os dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície.
- Parâmetros de Espaçamento: são determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície.
- Parâmetros Híbridos: são determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e espaçamento.

A seguir são definidos apenas os parâmetros que serão avaliados neste trabalho, são eles:

2.5.1. Desvio Aritmético Médio do Perfil Avaliado R_a

Este parâmetro consiste na média aritmética dos valores absolutos das ordenadas $Z(x)$, definidas a partir da linha média, no comprimento de amostragem e é dado pela Eq. (2.1).

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (2.1)$$

sendo l o valor do comprimento de amostragem.

O parâmetro R_a é o mais utilizado para avaliar a rugosidade superficial e está presente na maioria dos equipamentos e padrões de rugosidade. Sua principal desvantagem está em que superfícies com perfis diferentes podem apresentar o mesmo valor de R_a , ainda fornece pouca informação sobre a distribuição de picos e vales e sobre a presença de picos isolados. Assim, ele deve ser medido juntamente com outros parâmetros.

2.5.2. Desvio Médio Quadrático do Perfil Avaliado R_q

R_q é definido como sendo a raiz quadrada da média dos valores das ordenadas, $Z(x)$, no comprimento de amostragem, Eq. (2.2).

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l z^2(x) dx} \quad (2.2)$$

O valor de R_q é, aproximadamente, 11% maior que R_a . Esta diferença é importante naqueles casos em que a detecção de picos e vales se torna importante mesmo quando estes aparecem ao acaso. Assim, o parâmetro R_q evidencia os picos e vales, pois eleva ao quadrado o valor das ordenadas, acentuando-os.

2.5.3. Altura Máxima do Perfil R_z

O R_z é definido como a soma da altura máxima dos picos do perfil Z_p e a maior das profundidades dos vales do perfil Z_v , ambos no comprimento de amostragem, Fig. 2.15.

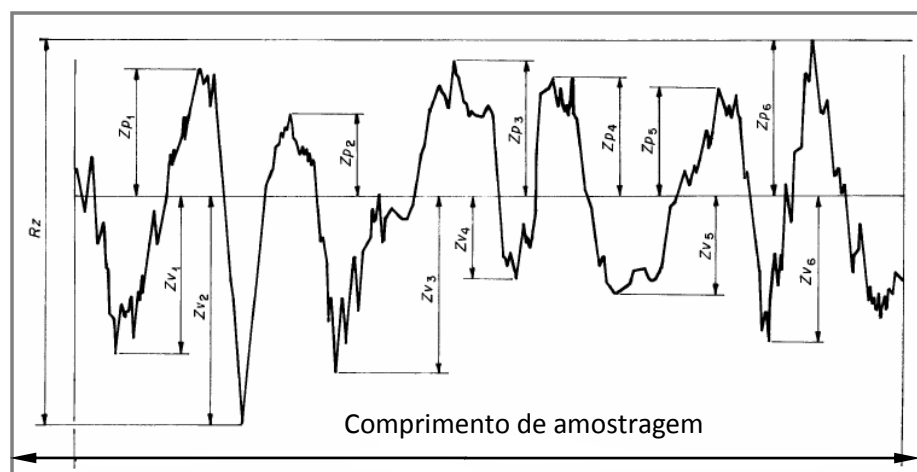


Figura 2.15 - Altura máxima do perfil – R_z (ABNT NBR ISO 4287, 2002)

2.5.4. Fator de Assimetria ou Skewness (Rsk)

Este parâmetro é definido como o quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas $Z(x)$ e Rq ao cubo no comprimento de amostragem l_r , conforme mostrado na Eq. (2.3).

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^3(x) dx \right] \quad (2.3)$$

O parâmetro Rsk é indicador da assimetria da função densidade de probabilidade dos valores das ordenadas dos pontos do perfil em relação à linha média. É um parâmetro que indica se as irregularidades da superfície são, na maioria, picos ou vales (Fig. 2.16).

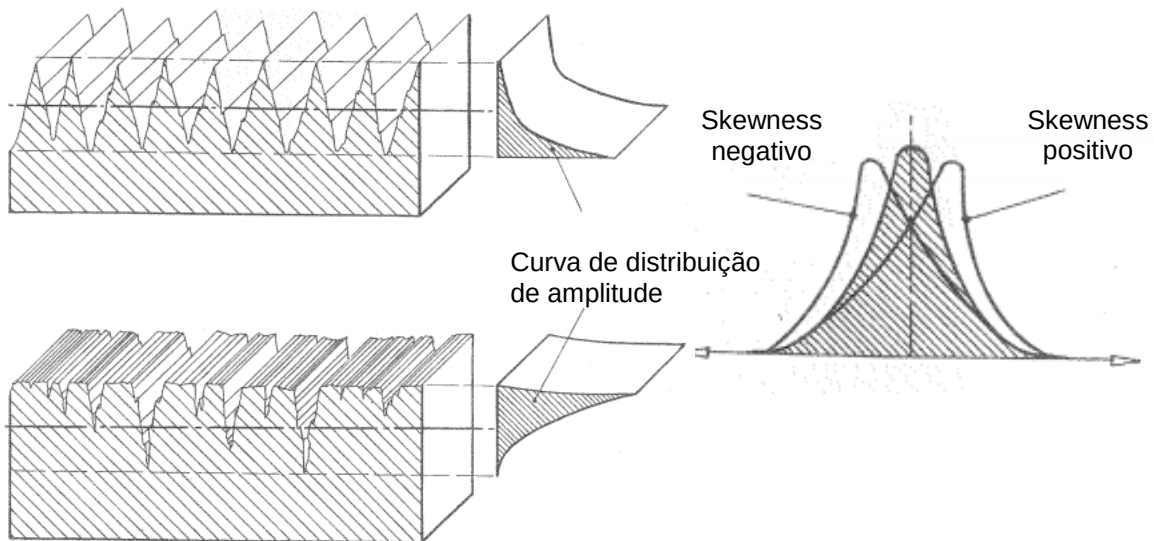


Figura 2.16 – Inclinação da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado (SMITH, 2002)

2.5.5. Fator de Achatamento ou Kurtosis (Rku)

Este fator é definido como o quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas $Z(x)$ e Rq à quarta potência no comprimento de amostragem l_r , sendo expresso pela Eq. (2.4).

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^4(x) dx \right] \quad (2.4)$$

O parâmetro Rku é indicador do achatamento da função densidade de probabilidade dos valores das ordenadas. Este parâmetro mede a forma da curva de distribuição de amplitude, ou seja, seu afinamento ou achatamento, como mostrado na Fig. 2.17.

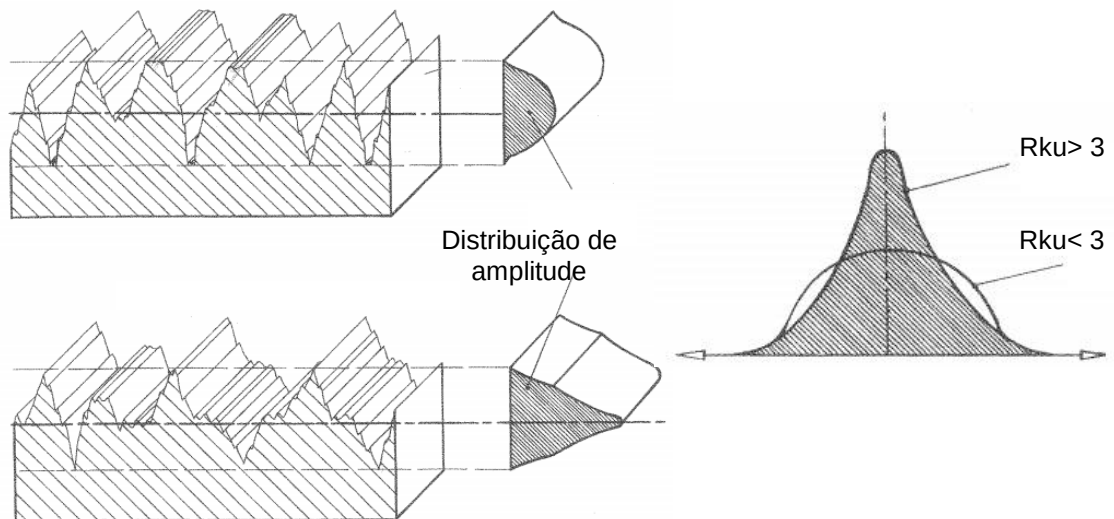


Figura 2.17 – Achatamento da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado (SMITH, 2002)

Segundo Leach (2001), a aplicação do parâmetro Rku é complementar ao de assimetria (Rsk), principalmente para análise de atrito e de retenção de lubrificação nas superfícies usinadas. Sedláček *et al.* (2012) destacam que ambos os parâmetros Rku e Rsk apresentam uma boa correlação com propriedades tribológicas de superfícies de contato. Desta forma, quando a forma das irregularidades é importante na aplicação da superfície usinada, os parâmetros de amplitude não devem ser tomados de forma isolada e, normalmente, devem ser interpretados conjuntamente com outros parâmetros do perfil avaliado (SMITH, 2002).

2.5.6. Largura Média dos Elementos do Perfil (Rsm)

É definido como o valor médio da largura dos elementos do perfil Xs no comprimento de amostragem e pode ser determinado pela Eq. (2.5).

$$RSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i \quad (2.5)$$

2.5.7. Relação com parâmetros de área

A fim de efetuar uma avaliação mais rigorosa da rugosidade superficial, é possível medir considerando-se uma área ao invés de uma linha. Assim sendo, todos os parâmetros descritos anteriormente são expandidos para relações mais amplas, mas a base teórica de cada um deles permanece inalterada. A Tabela 2.4 traz essa relação.

Tabela 2.4 – Relação entre parâmetros de perfil e de área

Parâmetro de Perfil	Parâmetros de Área
Ra	Sa
Rq	Sq
Rsk	Ssk
Rku	Sku
Rp	Sp
Rv	Sv
Rz	Sz
Rsm	Ssm

2.6. Incertezas de Medição

Quando são estabelecidas tolerâncias dimensionais e geométricas torna-se imprescindível avaliar a incerteza para a interpretação correta do resultado da medição (REDE METROLÓGICA RS, 2009). Neste sentido, Weckenmann *et. al.* (2001) discutem como a incerteza de medição afeta os valores limites estabelecidos, reduzindo a zona de conformidade (Fig. 2.18).

Quando se relata o resultado de medição de uma grandeza física, é obrigatório que seja dada alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de forma tal que aqueles que o utilizam possam avaliar sua confiabilidade. Sem essa indicação, resultados de medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência fornecidos numa especificação ou norma. É, portanto, necessário que haja um procedimento prontamente implementado, facilmente compreendido e de aceitação geral para caracterizar a qualidade do resultado de uma medição, isto é, para avaliar e expressar sua incerteza (ISO TAG 4/WG 3, 2008).

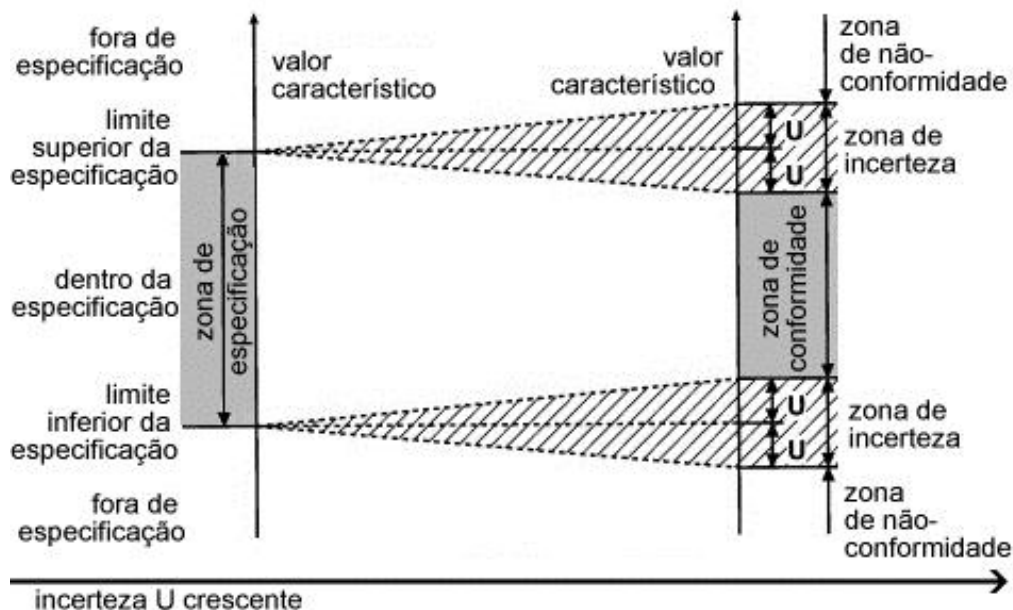


Figura 2.18 – Zonas de especificação e conformidade considerando incertezas (WECKENMANN *et. al.*, 2001)

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2012) a incerteza de medição é definida como um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.

A avaliação e declaração da incerteza contribuem para a rastreabilidade dos valores obtidos e para adequação das medições às normas técnicas em vigor, como exemplo, a ABNT NBR ISO/IEC 17025 (2005). O cálculo da incerteza possibilita efetuar uma análise visando identificar quais fatores contribuem mais para a incerteza final, bem como, propor meios para reduzir seus efeitos.

Para avaliação da incerteza de medição é utilizado um procedimento proposto pelo documento “*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements*” publicado em 1993. Este documento é popularmente conhecido como GUM e a versão mais atual data de 2008.

Basicamente, o ISO TAG 4/WG 3 (2008) estabelece as regras gerais e critérios para expressar e combinar as incertezas individuais que afetam o processo de medição e, assim, determinar a incerteza total, que pode seguir vários níveis de exatidão e complexidade.

Para aplicação da metodologia proposta pelo ISO TAG 4/WG 3 (2008) deve-se, na etapa inicial do cálculo da incerteza, efetuar a identificação de todas as variáveis que influenciam o resultado de medição. A quantidade e o tipo de grandezas de influência variam de acordo com o sistema de medição, com o tipo de mensurando analisado e com o nível de exatidão requerido.

O ISO TAG 4/WG 3 (2008) conceitua três tipos de incerteza: a incerteza padrão, a incerteza padrão combinada e a incerteza expandida. A primeira delas está relacionada a cada grandeza de influência e é obtida através da análise individual de cada variável considerada, através de uma avaliação do Tipo A ou do Tipo B, descritas a seguir.

2.6.1. Avaliação da Incerteza Padrão do Tipo A

Segundo o ISO TAG 4/WG 3 (2008), a incerteza padrão do tipo A é aquela obtida de uma análise estatística de uma série de observações de um mensurando. E pode ser calculada utilizando-se a Eq. (2.6), em que s é o desvio padrão experimental e n é o número de elementos da amostra.

$$u(x) = \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (2.6)$$

2.6.2. Avaliação da Incerteza Padrão do Tipo B

Em uma situação onde a estimativa x_i de uma grandeza de entrada X_i não tenha sido obtida através de observações repetidas, a variância estimada associada $u^2(x_i)$ ou a incerteza padrão $u(x_i)$ é avaliada por julgamento científico, baseado em todas as informações disponíveis sobre a possível variabilidade de X_i . O correto uso dessas informações exige o discernimento baseado na experiência e no conhecimento geral, sendo esta uma habilidade que pode ser adquirida com a prática.

Para muitos casos é possível encontrar declarado que a incerteza citada define um intervalo tendo um nível da confiança de 90, 95 ou 99%. Quando não for especificada uma distribuição diferente, pode ser utilizada a distribuição normal para calcular a incerteza padrão. Para tanto basta dividir a incerteza declarada pelo fator apropriado, que pode assumir valores, respectivamente, de 1,64, 1,96 e 2,58 para os três níveis de confiança citados.

Em outros casos, é possível estimar apenas os limites superior e inferior para X_i e estabelecer que a probabilidade de que o valor X_i pertença ao intervalo $(a-, a+)$ é um e a probabilidade para que o valor X_i esteja fora desse intervalo é zero. Para tais situações deve ser utilizada a distribuição retangular ou uniforme.

Se não houver conhecimento específico de possíveis valores de X_i dentro do intervalo, pode-se assumir que é igualmente provável que X_i esteja em qualquer ponto do intervalo. Ainda X_i pode assumir infinitos valores e conseqüentemente o seu grau de liberdade é infinito (LINK, 1997). Caso a diferença entre os limites, $a_+ - a_-$, é designada por $2a$, então a variância estimada é calculada a partir da Eq. (2.7):

$$u^2(x_i) = \frac{a^2}{3} \quad (2.7)$$

O uso da distribuição retangular é recomendado quando se dispõe de pouca informação sobre uma determinada variável.

Às vezes, é mais realista esperar que valores perto dos limites sejam menos prováveis do que os que estejam perto do ponto médio, assim faz se necessário o uso de uma distribuição trapezoidal simétrica, com uma base de largura $a_+ - a_- = 2a$ e topo igual a $2a\beta$, onde $0 \leq \beta \leq 1$.

Neste caso, a incerteza padrão é dada pela Eq. (2.8). Como X_i pode assumir infinitos valores consequentemente o seu grau de liberdade é infinito

$$u^2(x_i) = \frac{a^2(1+\beta^2)}{6} \quad (2.8)$$

Caso haja mais conhecimentos sobre a distribuição dos valores possíveis da grandeza, a distribuição de probabilidade passa para uma triangular, com infinitos graus de liberdade, que pode evoluir para uma normal.

A incerteza padrão do tipo B associada a uma grandeza com distribuição triangular é expressa a partir da Eq. (2.9).

$$u^2(x_i) = \frac{a^2}{6} \quad (2.9)$$

Conhecendo todos os valores das incertezas padrão, calcula-se a incerteza padrão combinada.

2.6.3. Incerteza Padrão Combinada

Para aplicação da metodologia proposta no ISO TAG 4/WG 3 (2008) é necessário obter uma formulação matemática que englobe todas as variáveis que influenciam no processo de obtenção da grandeza em questão. Assim, é possível construir a seguinte relação funcional:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2.10)$$

A partir da Eq. (2.10), pode-se obter uma estimativa do mensurando Y , designada como y , tendo como base um conjunto de estimativas de entrada $x_1, x_2, \dots, x_N$ para os valores das N grandezas $X_1, X_2, \dots, X_N$. Assim a expressão resultante é dada a seguir:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2.11)$$

Para determinação da incerteza padrão combinada o ISO TAG 4/WG 3 (2008) dividem-se as grandezas de entrada em dois grupos, descritos a seguir.

2.6.4. Grandezas de Entrada Não Correlacionadas

Para o caso em que as grandezas de entrada são independentes tem-se que a incerteza padrão combinada de uma estimativa y é representada por $u_c(y)$, a raiz quadrada positiva da variância combinada $u_c^2(y)$, que é dada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (2.12)$$

onde f é a função que modela matematicamente o processo de medição, Eq. (2.7).

Como pode ser observado a Eq. (2.12) é baseada em uma aproximação de primeira ordem da série de Taylor e expressa a lei de propagação da incerteza.

2.6.5. Grandezas de Entrada Correlacionadas

Quando as grandezas de entrada são correlacionadas, a expressão apropriada para a variância combinada, associada com o resultado de uma medição é:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (2.13)$$

onde x_i e x_j são as estimativas de X_i e X_j e $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$ é a covariância estimada.

O grau de correlação entre x_i e x_j é caracterizado pelo coeficiente de correlação estimado por:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i) \cdot u(x_j)} \quad (2.14)$$

2.6.6. Incerteza Expandida

A incerteza expandida, U , é obtida, multiplicando-se a incerteza padrão combinada $u_c(y)$ por um fator de abrangência k :

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (2.15)$$

O fator de abrangência k presente na Eq. (2.15) é escolhido em função do nível de confiança especificado para o intervalo, estando, em geral entre 2 e 3 para uma distribuição normal de probabilidade e nível de confiança de 95,45 % e 99,73 %, respectivamente.

Quando o número de leituras for reduzido, caracterizando uma amostra pequena, essa aproximação para o fator de abrangência não é conveniente. Neste caso, deve ser utilizado o teorema do valor central junto com a tabela *t-student* para fornecer um valor para k baseado no grau de liberdade efetivo da incerteza padrão da medição.

O cálculo do grau de liberdade efetivo é baseado na equação de Welch-Satterwaite, conforme expresso na Eq. (2.16).

$$\nu_{ef} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u^4(y_i)}{\nu_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{(u(x_i) \cdot c_i)^4}{\nu_i}} \quad (2.16)$$

Onde: N é o número de variáveis de entrada; ν_i é o número de graus de liberdade de cada variável de entrada; $u_i(y)$ é a incerteza padrão de cada variável de entrada na unidade do mensurando ou variável de saída; $u(x_i)$ é a incerteza padrão de cada variável de entrada; $c_i(x_i)$ representa o coeficiente de sensibilidade do mensurando em relação a cada variável de entrada x_i .

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia aplicada na fabricação, caracterização e testes dos penetradores utilizados no Simulador de Interações Marítimo-Mecânicas em Calhas (SIMMC) Portátil para ensaios de desgastes em calhas poliméricas. Para um melhor entendimento, o mesmo foi dividido em seis etapas, descritas a seguir:

a) Preparação do SIMMC Portátil para ensaios: nesta etapa, procedeu-se com a montagem dos circuitos de potência, comando e instrumentação do SIMMC Portátil, além da montagem do sistema de medição de desgaste.

b) Medição de massa das peças utilizadas como carregamento: a massa das peças foi medida a fim de se conhecer a força externa a ser aplicada nos ensaios de resistência ao desgaste. Cálculos de incerteza associados à medição foram efetuados nesta etapa conforme recomendado pelo ISO TAG 4WG-3 (2008).

c) Controle dimensional e geométrico dos penetradores: os penetradores de metal duro foram medidos a fim de se quantificar e controlar suas características dimensionais e geométricas. Também foi avaliada a incerteza associada à medição dos diferentes mensurandos.

d) Planejamento dos pré-testes de desgaste: nesta etapa, foram planejados e executados os pré-testes no SIMMC Portátil a fim de determinar os valores dos parâmetros para o funcionamento adequado do mesmo. Para tanto, foi proposto um planejamento fatorial completo. Dentre as variáveis investigadas estão força externa aplicada e número de ciclos. A incerteza associada à medição do desgaste foi avaliada.

e) Planejamento e execução da afiação: nesta etapa foram definidos os parâmetros de corte para realização da afiação, bem como, a fixação e o posicionamento dos penetradores durante o processo de forma a obter as dimensões das arestas que formam o cume e o ângulo entre as faces da pirâmide e a base do penetrador.

f) Planejamento e execução da lapidação: esta etapa foi destinada à definição dos parâmetros do processo de lapidação (tipo e granulometria da emulsão abrasiva, rotação e tempo de lapidação) visando à obtenção do acabamento superficial especificado no projeto do penetrador.

g) Planejamento e realização dos testes finais: testes foram efetuados utilizando os penetradores fabricados neste trabalho com o objetivo de avaliar o desempenho do SIMMC Portátil, bem como, determinar o desgaste abrasivo de diferentes materiais poliméricos. Adicionalmente, foi efetuada uma comparação entre os resultados obtidos durante a realização destes testes finais e aqueles encontrados durante os pré-testes, quanto a valores médios de desgaste e repetibilidade dos resultados.

3.1. Preparação do SIMMC Portátil para Ensaio de Desgaste

Para realização dos ensaios de desgaste foi utilizado o (SIMMC) Portátil. Inicialmente, foram desenvolvidas algumas ações visando à preparação deste equipamento para os testes. Dentre elas, destacam-se:

3.1.1. Preparação dos circuitos de potência e comando

A primeira etapa constitui-se da ligação entre os módulos que compõem o SIMMC Portátil, a saber: o abrasômetro (Fig. 3.1), a fonte de potência, o *drive* e o conta-ciclos (Fig. 3.2).

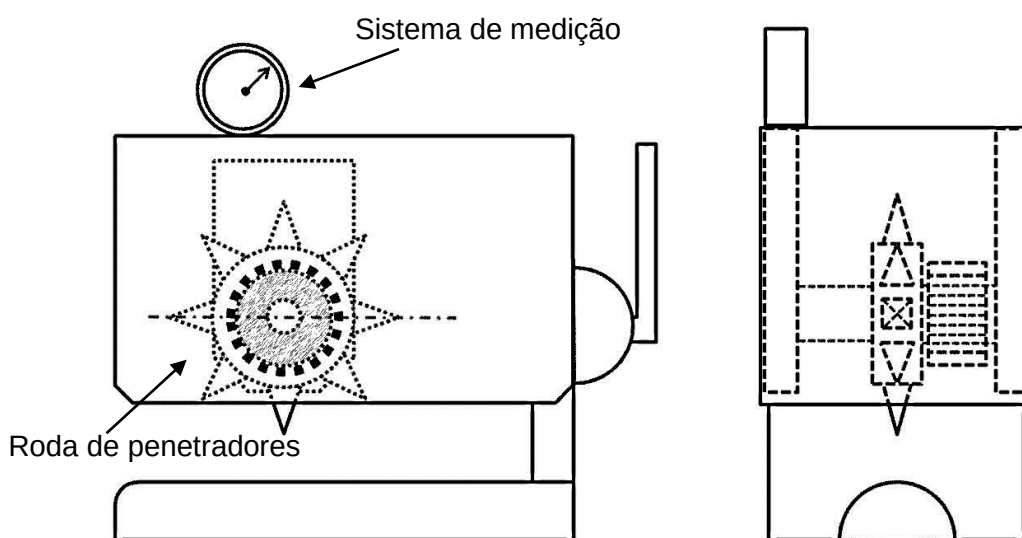


Figura 3.1 – Abrasômetro portátil em vista lateral e traseira

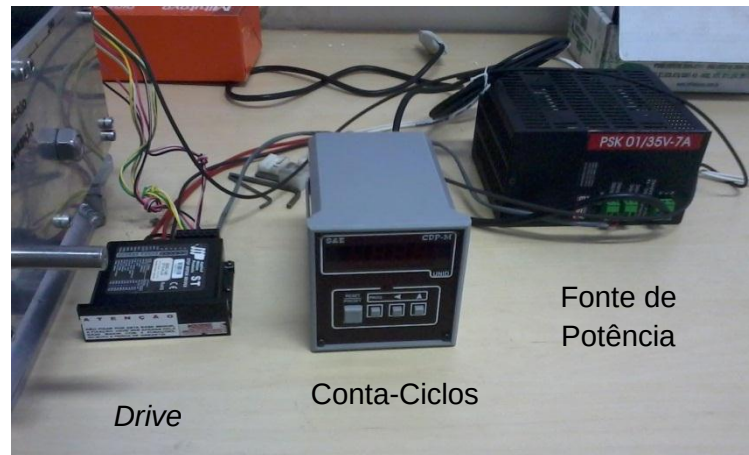


Figura 3.2 – Fonte de potência, *drive* e conta-ciclos

A fonte de potência é responsável por alimentar com 15 volts, o *drive* de comando e o motor do abrasômetro portátil. Por sua vez, o conta-ciclos é responsável por monitorar o número de voltas da roda de penetradores e enviar o sinal de parada para o *drive*, garantindo, assim, que todos os testes sejam executados com o mesmo número de ciclos.

O *drive* ST10-PLUS do fabricante Applied Motion é responsável por controlar o motor, mantendo o valor de velocidade pré-definido para o ensaio de desgaste.

A ligação entre o motor e o *drive* de comando foi realizada de acordo com o esquema da Fig. 3.3. Foi utilizada uma ligação do tipo série.

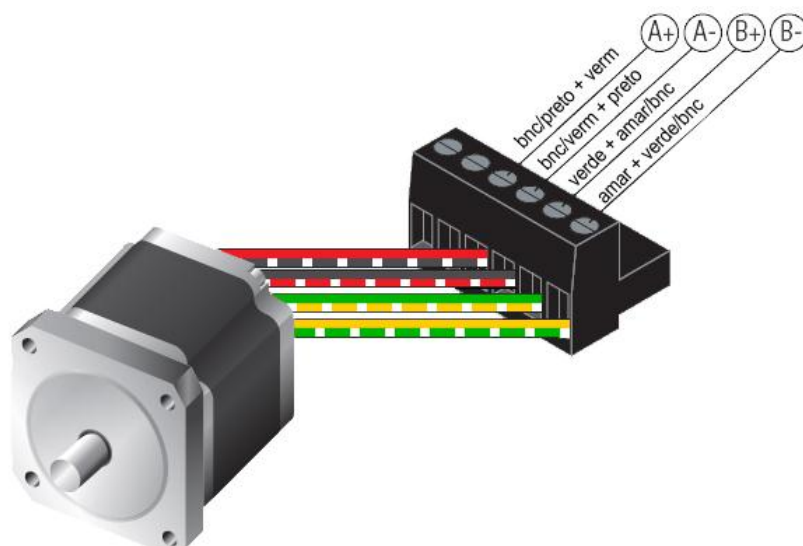


Figura 3.3 – Ligação entre o motor e o *drive* de comando

3.1.2. Preparação da Instrumentação

A fim de fornecer dados ao conta-ciclos, especificamente o número de voltas da roda de penetradores, utilizou-se um sensor indutivo de proximidade posicionado junto ao eixo, conforme esquematizado na Fig. 3.4. Uma braçadeira foi utilizada como ponto de medição das voltas realizadas pelo conjunto eixo e roda de penetradores.

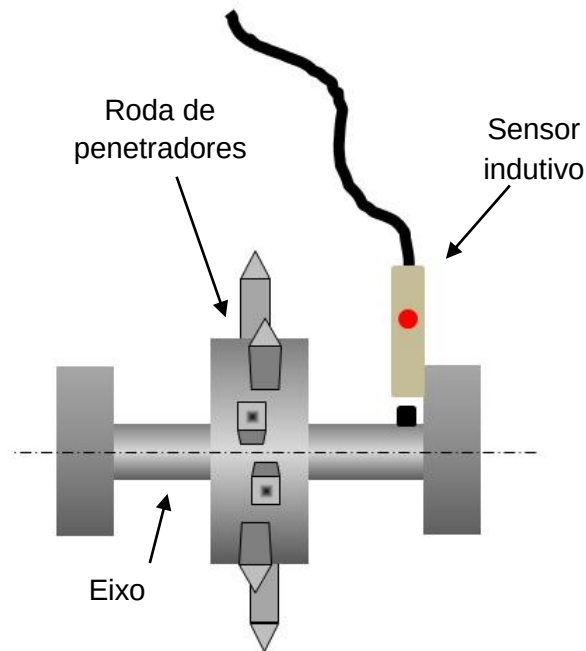


Figura 3.4 – Esquema da instalação do sensor

O sensor utilizado foi o modelo BES 516-3007-E4-C-PU-05 do fabricante BALLUF, com diâmetro de 4 mm e comprimento de 27 mm. A distância de operação foi mantida em 0,8 mm.

3.1.3. Configuração do Drive ST10-PLUS

Além de ser responsável pela partida e parada do motor durante os testes de resistência ao desgaste, o *drive* controla a velocidade angular imposta à roda de penetradores. Esta velocidade foi mantida em 32 rpm.

3.1.4. Preparação do sistema de medição

A fim de medir o desgaste apresentado pela amostra, projetou-se um sistema de medição utilizando um relógio comparador digital, modelo *Digimatic Indicator*, do fabricante Mitutoyo, com resolução de 0,001 mm e faixa nominal de medição de 5 mm.

O relógio comparador possui certificado de calibração de número 06206-13, emitido pelo Laboratório de Metrologia da Mitutoyo (Apêndice 1). Este declara uma incerteza expandida associada à calibração de $0,9 \mu\text{m}$ para k igual a 2,01, probabilidade de abrangência de 95% e um erro de histerese máximo de $0,7 \mu\text{m}$.

O relógio comparador foi montado sobre o eixo da roda de penetradores, conforme esquematizado na Fig. 3.5. À medida que a roda de penetradores aprofunda-se na peça devido à remoção de material, a haste do relógio desloca-se para baixo, medindo o desgaste de forma direta.

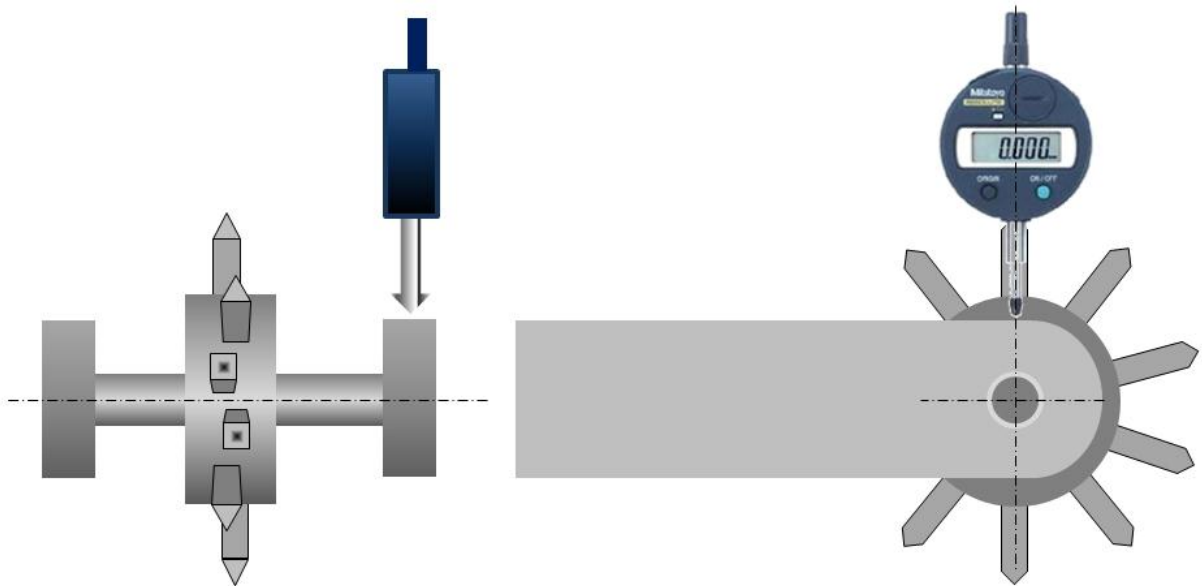


Figura 3.5 – Esquema da montagem do sistema de medição

Entretanto, como o comprimento da haste do relógio comparador é pequeno, empregou-se uma base extensora para permitir o contato, conforme mostrado na Fig. 3.6.

Antes do início do experimento, a haste do relógio deve encostar-se ao eixo e o relógio comparador é zerado. Então, o sistema de medição é afastado do eixo, por meio de uma alavanca (Fig. 3.7), para não receber as vibrações que acontecem durante o teste de desgaste. Findo o teste, o sistema é reaproximado ao eixo e a medição é executada.

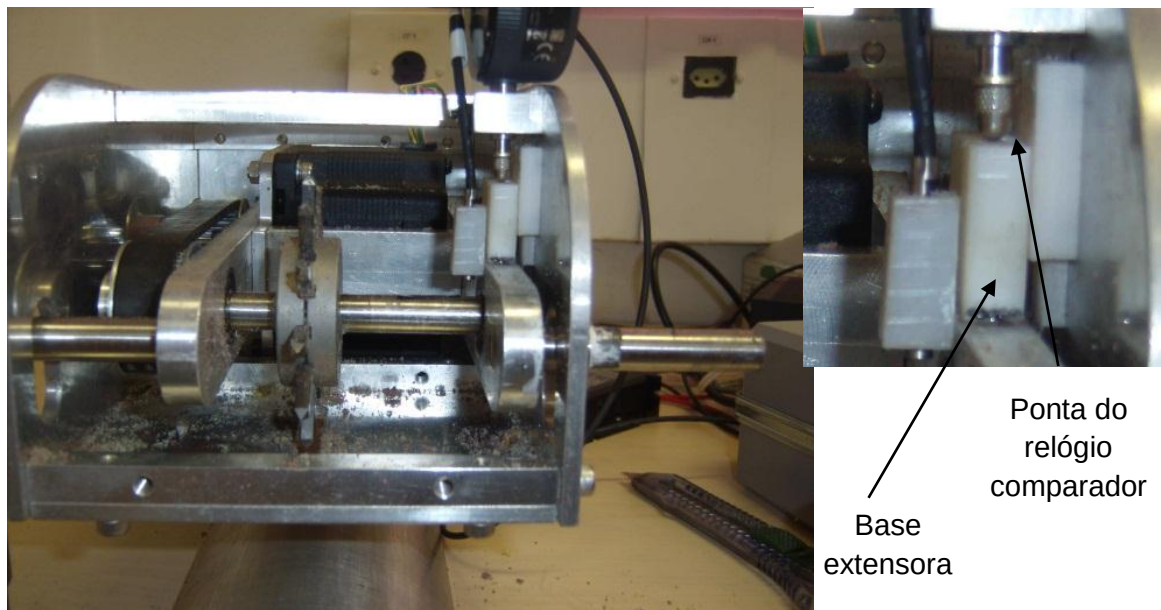


Figura 3.6 – Vista frontal do SIMMC Portátil (detalhe para base extensora e ponta do relógio)

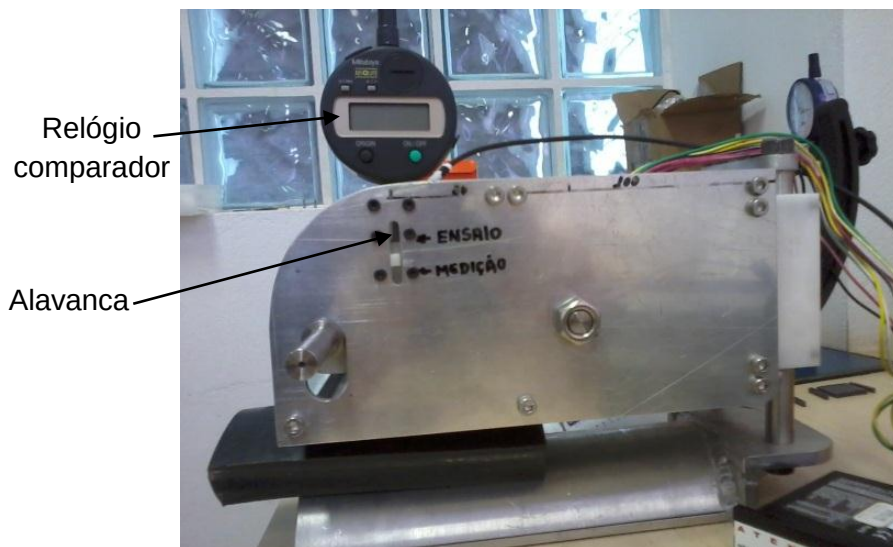


Figura 3.7 – Vista lateral do SIMMC Portátil (relógio e alavanca)

3.2. Medição de Massa dos Pesos-Mortos utilizados como Carregamento

A fim de determinar a massa dos pesos-mortos utilizados como carregamento no SIMMC Portátil, efetuou-se a medição utilizando uma balança do fabricante BEL ENGINEERING. Esta balança possui faixa nominal de medição de 0,2 g a 4100 g e resolução de 0,01 g.

A balança possui certificado de calibração número 1724, emitido pela empresa Balanças Indelt Minas (Apêndice 2). A incerteza expandida associada à calibração é de 0,01 g para k igual a 2,11 e probabilidade de abrangência de 95,45%.

Inicialmente, os pesos-mortos foram limpos com acetona. Para manipulação das mesmas foram utilizadas luvas e pinças. Para cada peça, foram realizadas 10 medições de massa, e o valor final foi tomado considerando-se a média aritmética dos valores obtidos.

Posteriormente a incerteza associada à medição foi estimada conforme recomenda o ISO TAG 4/WG-3 (2008). O modelo matemático proposto é apresentado na Eq. (3.1).

$$M = \Delta s(L_B) + \Delta R_B + \Delta I C_B + \Delta Z_B + \Delta L_B + \Delta E_B \quad (3.1)$$

onde:

$\Delta s(L_B)$: correção associada ao desvio padrão dos valores do mensurando indicados pela balança;

ΔR_B : correção devido à resolução da balança (incremento digital);

$\Delta I C_B$: correção associada à incerteza padrão da calibração da balança;

ΔZ_B : correção devida à variação do zero da balança;

ΔL_B : correção devida à não linearidade da balança;

ΔE_B : correção devida à excentricidade da balança.

Para avaliação de incerteza associada à medição de massa, utilizou-se uma planilha do MICROSOFT EXCEL desenvolvida por Moraes (2011).

3.3. Controle Dimensional e Geométrico dos Penetradores

O controle dimensional e geométrico dos penetradores de WC-Co (Fig. 3.8) foi realizado em duas etapas: antes da afiação e após a lapidação.

De acordo com o projeto dos penetradores (Apêndice 3), previamente realizado, foram identificadas as cotas funcionais para serem utilizadas como parâmetros de controle. A Tabela 3.1 traz estas cotas, seus valores nominais e a tolerância, quando aplicável.

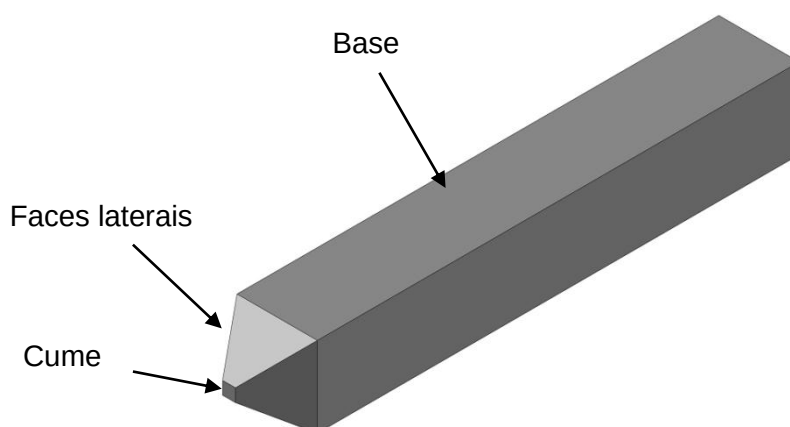


Figura 3.8 – Penetrador de WC-Co

Tabela 3.1 – Parâmetros de controle para os penetradores

Parâmetro de controle	Valor nominal	Tolerância
Dimensões das arestas do cume	500 μm	$\pm 12 \mu\text{m}$
Ângulo das faces laterais	145°	$\pm 30'$
Rugosidade do cume	0,2 μm	
Rugosidade das faces laterais	0,2 μm	

Utilizando um microscópio ótico, foram obtidas imagens das superfícies de todos os penetradores, com o objetivo de efetuar uma análise das mesmas. Entre outros aspectos, foram verificadas a presença de riscos, defeitos e o estado das arestas.

Todas as medições foram efetuadas à temperatura ambiente de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. A temperatura ambiente foi monitorada utilizando-se um termo-higrometro digital, da marca Instrutherm, modelo HT-600, com resolução de $0,1^\circ\text{C}$ e faixa nominal de $(-50 \text{ a } 70)^\circ\text{C}$. Este equipamento possui certificado de calibração número 4766/11 emitido pelo laboratório de metrologia Beta-X, que declara uma incerteza de $0,5^\circ\text{C}$ (Apêndice 4).

3.3.1. Medição das dimensões do cume

Para realizar a medição das dimensões do cume do penetrador, foi utilizado um microscópio ótico de inspeção OLYMPUS BX51M.

A Figura 3.9a ilustra o dispositivo e a interface do *software* em LABVIEW para medições. O detalhe na Fig. 3.9b mostra o penetrador sendo medido.

A medição foi realizada utilizando-se uma lente objetiva de aumento de 10 vezes. Inicialmente cada aresta que forma o cume do penetrador foi identificada como apresentado

na Fig. 3.10. Em seguida foram efetuadas cinco medições para cada uma delas e calculado o valor da média aritmética. A resolução da medição em curso foi determinada tomando como base a largura do *pixel* que, nas condições especificadas, foi de 0,2 μm .

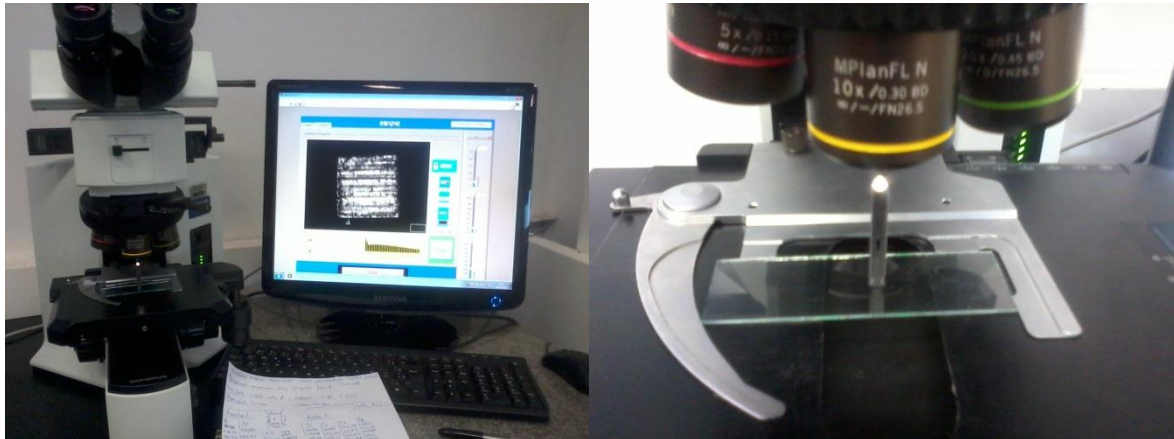


Figura 3.9 – Microscópio óptico (à esquerda) e penetrador em medição (à direita)

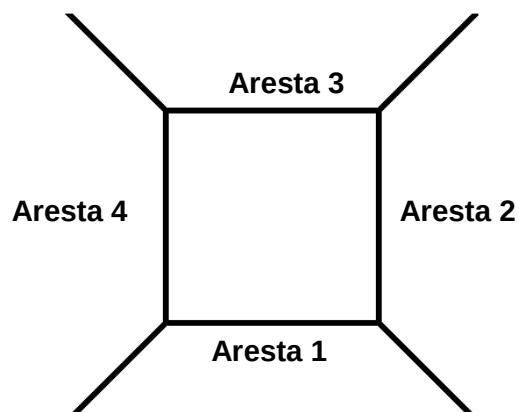


Figura 3.10 – Arestas do cume do penetrador

O modelo matemático proposto para a avaliação de incerteza associada à medição do comprimento das arestas do cume (C) é dado na Eq. (3.2).

$$C = \Delta s(L_M) + \Delta R_M + \Delta IC_M \quad (3.2)$$

onde:

$\Delta s(L_M)$: correção associada à variabilidade dos valores indicados pelo microscópio;

ΔR_M : correção devido à resolução do microscópio;

ΔIC_M : correção associada à incerteza padrão da calibração do microscópio.

Cabe ressaltar, que as variáveis relativas aos efeitos térmicos (afastamento da temperatura de medição em relação a 20°C e variação da temperatura durante a medição) não foram incluídas no modelo matemático proposto porque as medições foram efetuadas a temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Isto é válido para todos os mensurandos avaliados.

3.3.2. Medição da rugosidade do cume e das faces laterais do penetrador

Nesta etapa, coletaram-se 11 parâmetros para avaliação da rugosidade, sendo sete parâmetros de área e quatro parâmetros de perfil, conforme exposto nas Tab. 3.2 e 3.3, respectivamente.

Para realizar a medição da rugosidade superficial do cume e de uma das faces laterais do penetrador, utilizou-se um interferômetro TALYSURF CLI 2000, do fabricante Taylor Hobson. Na operação deste equipamento, utilizou-se o modo de medição por luz branca (modo CLA), que permite uma resolução vertical de $0,01\ \mu\text{m}$.

O interferômetro foi calibrado de acordo com um padrão de rugosidade que possui certificado de calibração de número 47596, emitido pela empresa Taylor Hobson Calibration Laboratory (Apêndice 5). A incerteza expandida associada ao padrão é de $\pm 0,144\ \mu\text{m}$ para k igual a 2,11 e probabilidade de abrangência de 95%.

Tabela 3.2 – Parâmetros de rugosidade definidos em área

Parâmetro em Área	Símbolo
Média aritmética da altura	Sa
Média quadrática da altura	Sq
Pico máximo	Sp
Vale máximo	Sv
Altura máxima	Sz
<i>Skewness</i>	Ssk
<i>Kurtosis</i>	Sku

Tabela 3.3 – Parâmetros de rugosidade definidos em perfil

Parâmetro em perfil	Símbolo
Média quadrática da altura	Rq
Média aritmética da altura	Ra
Altura máxima	Rz
Largura média dos elementos	RSm

A Figura 3.11a mostra o dispositivo, enquanto o detalhe na Fig. 3.11b ilustra o penetrador sendo medido.



Figura 3.11 – Interferômetro (à esquerda) e penetrador sendo medido (à direita)

A medição do acabamento superficial do cume foi realizada considerando-se uma área de $0,0625 \text{ mm}^2$ e, para tanto, foram definidos dois pontos na superfície objeto de medição. O primeiro (ponto A na Fig. 3.12), com coordenadas $[0, 0]$ representa o ponto inicial e o segundo (ponto B na Fig. 3.12), com coordenadas $[0,25 \text{ mm}, 0,25 \text{ mm}]$, o ponto final da medição.

Cabe ressaltar que, apesar do ponto inicial (A) ser posicionado manualmente pelo operador e, portanto, nem sempre ser o mesmo para penetradores diferentes, a área medida é significativa e de igual dimensão para todas as amostras.

Nesta medição, utilizou-se um espaçamento entre pontos de $0,5 \text{ }\mu\text{m}$ e um espaçamento entre linhas de $0,5 \text{ }\mu\text{m}$. A velocidade de medição foi definida em $200 \text{ }\mu\text{m/s}$, resultando num tempo de medição de 19 minutos e 52 segundos por amostra.

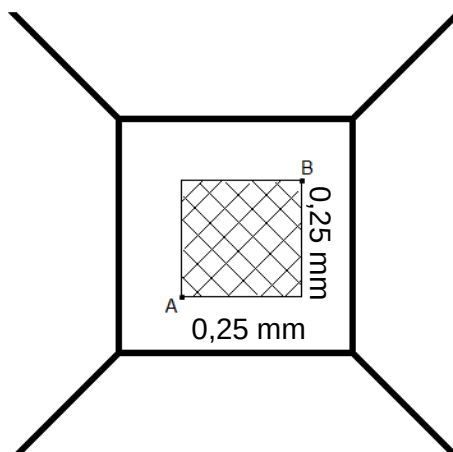


Figura 3.12 – Área de medição da rugosidade do cume

Para a medição da rugosidade das faces laterais do penetrador, foi escolhida uma face como referência, chamada de face 1. Similarmente à medição da rugosidade no cume, foi escolhido um ponto inicial A de coordenadas [0, 0] e um ponto B de coordenadas [0,5 mm, 1 mm] (Fig. 3.13). O mesmo princípio para o posicionamento destes pontos cabe nesta medição, entretanto a área medida foi maior, de 0,5 mm².

Nesta medição, utilizou-se um espaçamento entre pontos de 0,5 µm e um espaçamento entre linhas de 3 µm. A velocidade de medição foi definida em 200 µm/s, resultado num tempo de medição de 22 minutos e 24 segundos por amostra.

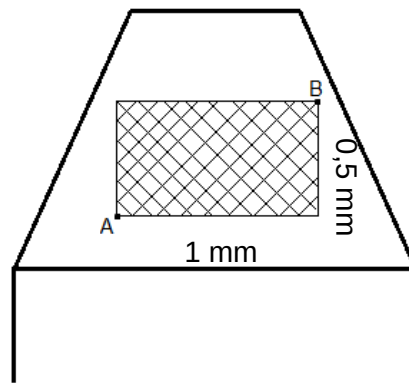


Figura 3.13 – Área de medição da rugosidade da face lateral

O modelo matemático proposto para a avaliação de incerteza associada à medição da rugosidade (R_g) do cume e das faces laterais é dado na Eq. (3.3).

$$R_g = \Delta s(L_R) + \Delta R_R + \Delta IC_R \quad (3.3)$$

onde:

$\Delta s(L_R)$: correção associada à variabilidade dos valores do mensurando indicados pelo interferômetro;

ΔR_R : correção devido à resolução do interferômetro;

ΔIC_R : correção associada à incerteza padrão da calibração do interferômetro.

3.3.3. Medição dos ângulos da pirâmide

Para medir os quatro ângulos existentes entre as faces que formam a pirâmide do penetrador e a base deste, utilizou-se um projetor de perfis (Fig. 3.14) do fabricante Mitutoyo, modelo PJA3000, de resolução igual 0° 01'.

O projetor de perfis possui certificado de calibração número 12137/12, emitido pelo Laboratório de Metrologia da Mitutoyo Sul Americana (Apêndice 6). A incerteza expandida associada à calibração deste é de $0^{\circ} 01'$ para k igual a 2,29 e probabilidade de abrangência de 95%.



Figura 3.14 – Projetor de perfis modelo PJA3000

Para medição do ângulo, tomou-se como referência a base do penetrador, medindo-se o ângulo até a face da pirâmide mais próxima, como mostrado na Fig. 3.15. Cada ângulo foi medido três vezes.

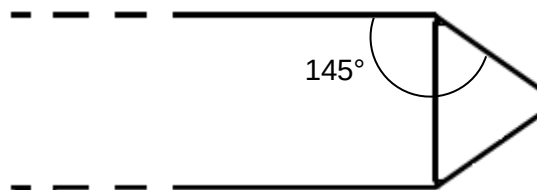


Figura 3.15 – Ângulo de interesse no controle geométrico do penetrador

O modelo matemático proposto para a avaliação de incerteza associada à medição dos ângulos (A) é dado na Eq. (3.4).

$$A = \Delta s(L_{pp}) + \Delta R_{pp} + \Delta IC_{pp} \quad (3.4)$$

onde:

$\Delta s(L_{pp})$: correção associada à variabilidade dos valores do mensurando indicados pelo projetor de perfis;

ΔR_{pp} : correção devido à resolução do projetor de perfis;

ΔIC_{pp} : correção associada à incerteza padrão da calibração do projetor de perfis.

3.4. Planejamento dos Pré-testes de Desgaste Abrasivo

Nos ensaios de desgaste abrasivo, dois parâmetros são de maior importância: a velocidade de rotação do motor de passo e a força externa (ou adicional) aplicada mediante um carregamento. No planejamento do experimento, estes parâmetros são as variáveis de entrada.

Estas variáveis influenciam diretamente no nível de desgaste sofrido pela amostra e na duração do teste, definidas como variáveis de saída. Enquanto o nível de desgaste tem impacto na medição do desgaste e na classificação da amostra (apta ou não para ser utilizada como capa protetora de *risers*), a duração do teste é de grande importância para a produtividade e custos dos ensaios em campo.

A velocidade de rotação foi definida e fixada em 32 rotações por minuto. Este valor foi escolhido de modo a melhor simular as condições de desgaste presentes no fundo do mar (MORAES, 2005).

A força externa aplicada foi a primeira variável de teste investigada. Além da massa própria da estrutura, peças cilíndricas de massa conhecida (Fig. 3.16) foram utilizadas para aumentar ao carregamento sobre a amostra. Considerou-se que um carregamento utilizando pesos-mortos de massa total de 1 kg resulta numa força externa adicional de aproximadamente 10 N. A Figura 3.17 ilustra o SIMMC Portátil com estes pesos-mortos.

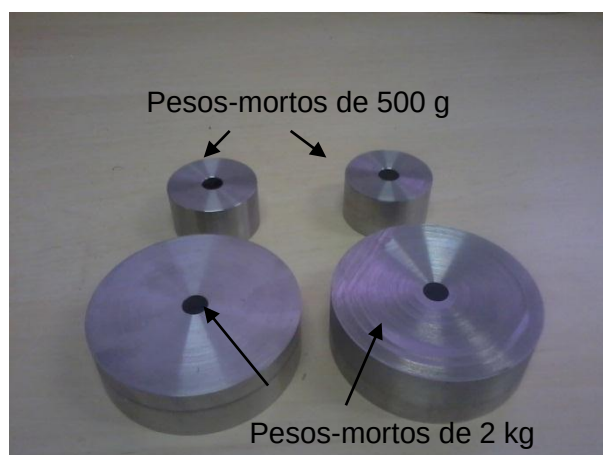


Figura 3.16 – Pesos-mortos utilizados como carregamento no teste de desgaste

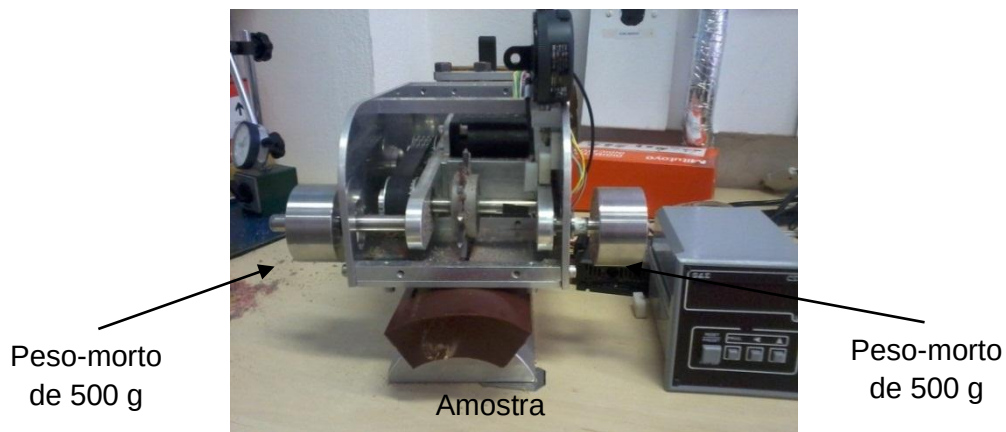


Figura 3.17 – SIMMC Portátil com destaque para as peças

Para avaliar a influência desta variável de entrada nos resultados do teste de abrasão, quatro configurações foram abordadas:

- a) uma força adicional de 10 N, utilizando dois pesos-mortos de 500 g cada;
- b) uma força adicional de 20 N, utilizando quatro pesos-mortos de 500 g cada;
- c) uma força adicional de 30 N, utilizando um peso-morto de 2 kg e dois de 1 kg;
- d) uma força adicional de 40 N, utilizando dois pesos-mortos de 2 kg cada.

O número de ciclos da roda de penetradores é a segunda variável de interesse. Fisicamente, esta variável significa quantos giros a roda de penetradores dará sobre a amostra, igualmente influenciando no valor de desgaste observado e na duração do ensaio. Os valores utilizados para o mapeamento do número ideal de ciclos foram 30, 50, 100, 150, 200 e 250.

Cabe ressaltar que não foram utilizados valores menores que 30 ciclos porque alguns materiais testados não sofrem desgaste mensurável nesta condição. Por sua vez, para valores maiores que 250 ciclos, o teste torna-se demorado, ultrapassando 12 minutos.

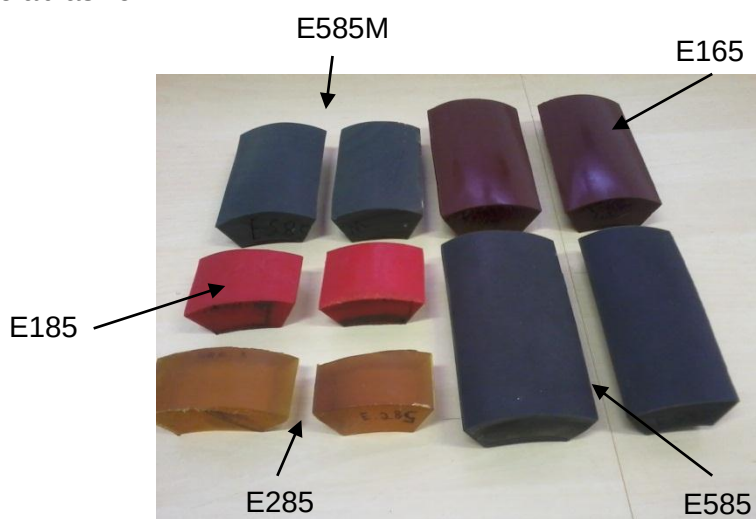
Identificadas as variáveis a serem avaliadas (fatores) e os valores assumidos por cada uma delas (níveis), foi proposto um planejamento fatorial completo 6x4, replicado cinco vezes, objetivando investigar se estas variáveis influenciam os valores de desgaste. Entretanto, os pré-testes mostraram a impossibilidade de efetuar testes com massas iguais a 3 kg e 4 kg, pois o motor de passo empregado não possuía torque suficiente para acionar o sistema. Assim sendo, o planejamento foi reduzido para um planejamento fatorial completo 6x2 com 12 combinações de teste.

A Tabela 3.4 mostra a matriz de planejamento para o planejamento proposto. Durante este experimento foram testadas apenas amostras do material E585.

Tabela 3.4 – Matriz de planejamento para o experimento 6x2

Fator 1 (Número de ciclos)	Fator 2 (Carga)
-3	-1
-2	-1
-1	-1
1	-1
2	-1
3	-1
-3	1
-2	1
-1	1
1	1
2	1
3	1

Como a análise de variância (ANOVA) demonstrou que ambas as variáveis testadas influenciam significativamente os valores de desgaste, procedeu-se à definição dos valores de carga e de número de ciclos adequados para realização dos testes por abrasão. Nesta etapa foram testadas outras quatro amostras de poliuretanos, quais sejam: E585M, E185, E285 e E165. Antes de iniciar os testes, estas foram limpas com álcool etílico para retirar resíduos superficiais, como lubrificantes e poeira. Essas amostras são apresentadas na Fig. 3.18. Estas amostras foram escolhidas dentre o universo de materiais que podem ser utilizados como capas protetoras dos *risers*, apresentando diferentes níveis de resistência ao desgaste abrasivo.

Figura 3.18 – Amostras de poliuretano utilizadas como calhas protetoras de *risers*

As amostras foram fixadas no SIMMC Portátil por meio do próprio peso do dispositivo, que comprime a amostra entre a parte superior e o cilindro de fixação na parte inferior do

dispositivo, como mostra a Fig. 3.19. Para permitir a colocação da amostra e sua movimentação para modificar a região de teste, existe uma alavanca na parte posterior do dispositivo que afasta a parte superior do dispositivo, aliviando a pressão sobre o corpo de prova.

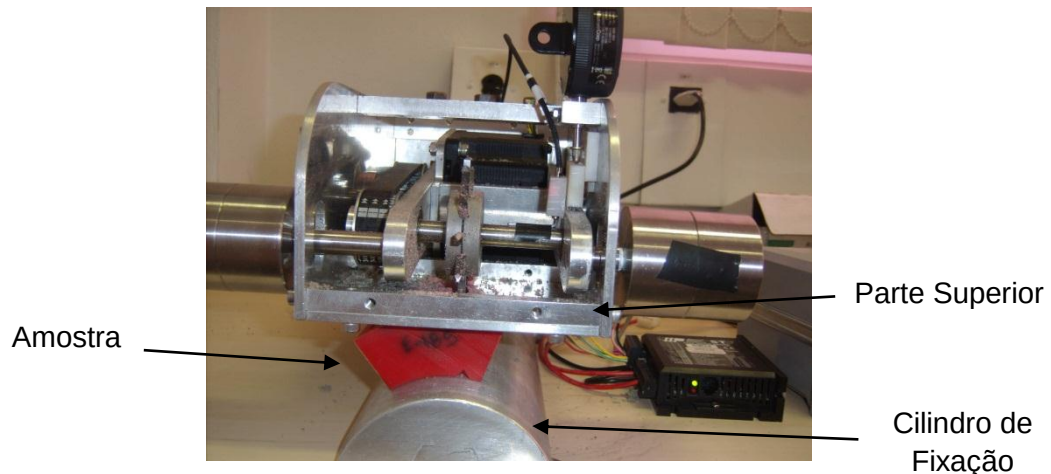


Figura 3.19 – SIMMC com detalhe para a fixação da amostra

Para cada configuração de força adicional (10 N e 20 N), foram realizados cinco testes de abrasão, variando-se o número de ciclos conforme especificado anteriormente.

Um aspecto importante observado durante a realização do teste foi a distância entre os riscos realizados pelo ensaio. Isto se faz necessário porque a deformação elástica do material nas proximidades do risco pode modificar a resistência ao desgaste, e, consequentemente, os valores obtidos, comprometendo a confiabilidade das medições.

Neste trabalho, foi adotado o seguinte critério: distância entre riscos igual a duas vezes e meia a largura das trilhas de desgaste.

Como a largura das trilhas era de 4 mm (correspondente à largura do penetrador), a distância entre riscos adotada foi de 10 mm, como ilustrado na Fig. 3.20.

Adicionalmente, foram deixados 5 mm entre o extremo do risco e a borda da amostra. Os ensaios foram realizados somente na parte convexa da calha de proteção.

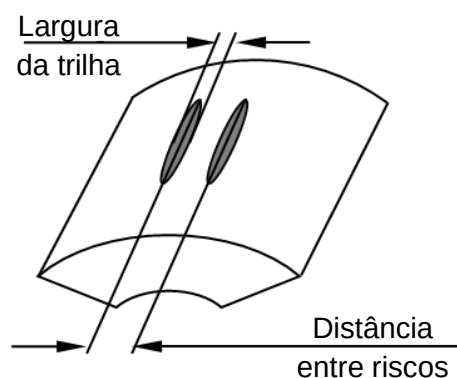


Figura 3.20 – Distribuição dos riscos na superfície da calha

O tempo de duração dos testes foi medido utilizando-se um cronômetro analógico do fabricante SEIKO, com resolução de 0,2 segundos e faixa nominal de 30 minutos.

Observou-se, durante a realização dos testes, que o penetrador utilizado como referência durante a medição nem sempre parava na mesma posição, gerando um erro de posicionamento o que pode influenciar os valores de desgaste obtidos. Desta forma, este erro foi considerado como uma variável de influência na avaliação da incerteza, sendo aplicada uma correção no modelo matemático.

Para determinar o valor dessa correção foram efetuados 10 testes, em vazio, considerando 30 ciclos. Após a parada da roda o penetrador de referência era encostado na amostra coberta com massa de modelar, de forma que ficasse em cada experimento uma marca da ponta do penetrador sobre a amostra. A seguir utilizando o projetor de perfis, do fabricante Mitutoyo, modelo PJA3000, de resolução igual 0,001 mm, foi medida a distância entre a primeira e a última marca. Para tanto foram efetuadas três medições, resultando no valor médio de 1,21 mm. Em seguida foi determinada a contribuição deste erro de posicionamento no valor do desgaste medido, sendo de 0,005 mm.

O modelo matemático proposto para a avaliação de incerteza associada à medição do desgaste (D) é dado na Eq. (3.5).

$$D = \Delta s(L_{RC}) + \Delta R_{RC} + \Delta IC_{RC} + \Delta H_{RC} + \Delta \alpha \quad (3.5)$$

onde:

$\Delta s(L_{RC})$: correção associada ao desvio padrão dos valores do mensurando indicados pelo relógio comparador;

ΔR_{RC} : correção devido à resolução do relógio comparador (incremento digital);

ΔIC_{RC} : correção associada à incerteza padrão da calibração do relógio comparador;

ΔH_{RC} : correção associada à histerese do relógio comparador;

$\Delta \alpha$: correção associada ao ângulo de parada da roda de penetradores.

3.5. Planejamento e Execução da Afiação

O processo de afiação foi realizado com a afiadora modelo PP-MC160 do fabricante ATLASMAQ (Fig. 3.21a). Utilizou-se um rebolo diamantado específico para usinagem de metal-duro.

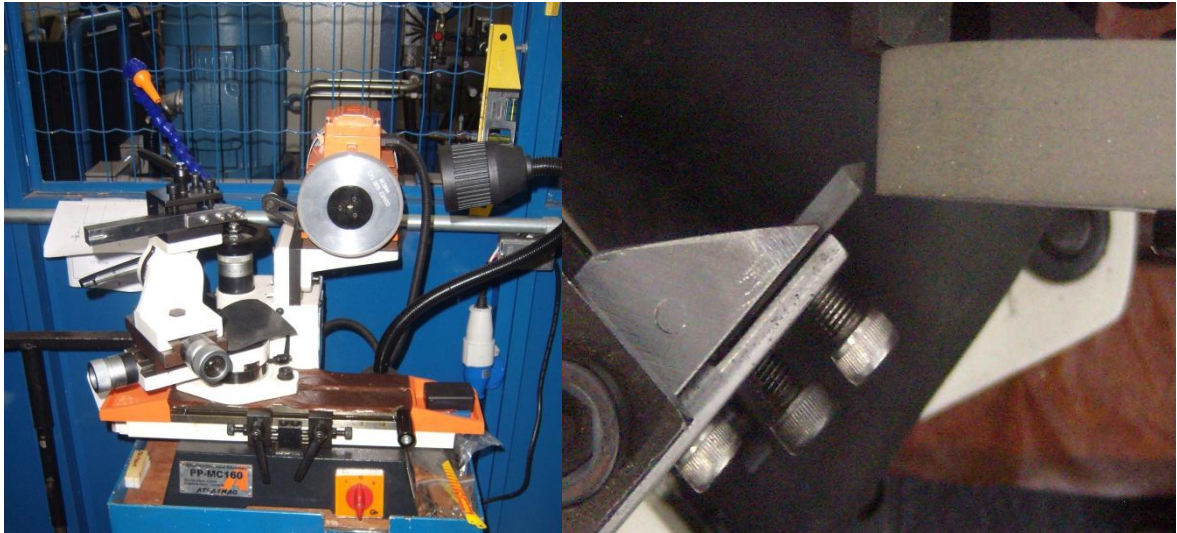


Figura 3.21 – Afiadora PP-MC160

Este processo foi utilizado para se atingir dois parâmetros de controle dos penetradores, quais sejam: a) as dimensões das arestas que formam o cume e b) o ângulo entre a base e as faces da pirâmide.

Quando as arestas do cume possuíam dimensões menores que a dimensão nominal ($500\ \mu\text{m}$), o penetrador foi usinado com um ângulo de 180° em relação ao rebolo. Dessa forma, a ponta trucada era usinada de tal sorte a se ter o valor máximo ao estipulado pela tolerância, conforme valores apresentados na Tab. 3.1.

Quando as arestas do cume possuíam dimensões maiores que a nominal, o ângulo da mesa foi modificado para 35° , permitindo que as faces laterais fossem usinadas (Fig. 3.21b). É importante ressaltar que, nesta segunda condição, todas as quatro faces precisam ser trabalhadas com o mesmo passo, mantendo-se, assim, a geometria do cume.

Considerando que os penetradores trabalhados já possuíam uma afiação prévia (porém fora das tolerâncias exigidas), a usinagem com um ângulo de 35° foi utilizada para corrigir e garantir o ângulo das faces da pirâmide. Cabe ressaltar que o valor de 35° foi utilizado porque a medida foi tomada levando em consideração o ângulo externo, uma vez que este é o complemento de 145° (Fig. 3.22)

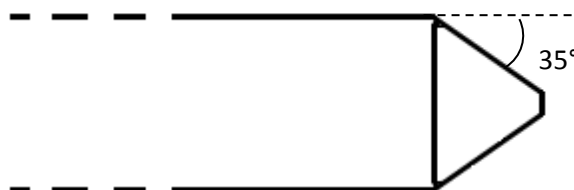


Figura 3.22 – Ângulo efetivo na afiação

3.6. Planejamento e Execução da Lapidação

O processo de lapidação foi realizado utilizando uma lapidadora modelo 15 do fabricante LAPMASTER (Fig. 3.23).



Figura 3.23 – Lapidadora modelo 15

Utilizou-se uma emulsão abrasiva de diamante, código LAP5-DIAS-S00-E003, do mesmo fabricante, de granulometria de 3 μm . Como lubrificante, utilizou-se uma suspensão a base de óleo, código LAP5-LUBP-500-0004. O prato de lapidação empregado é de ferro fundido de alta densidade, específico para lapidação de metal duro.

3.6.1. Parâmetros de Processo

Para lapidar as faces laterais, utilizou-se uma lapidação com emulsão abrasiva durante 15 minutos com uma rotação de 40 rpm.

Já para a lapidação do cume dos penetradores, a rotação foi mantida, mas o tempo de lapidação foi de apenas 5 minutos, uma vez que a área é significativamente menor.

3.6.2. Porta-penetradores

Dois dispositivos foram projetados e fabricados para fixação do penetrador numa determinada posição durante a operação de lapidação, seja para lapidação do cume ou das faces da pirâmide do penetrador. Estes dispositivos foram denominados de Porta-penetradores.

O material escolhido para fabricação dos dispositivos foi o aço inoxidável AISI 304/. A escolha deste material se justifica porque possui excelentes propriedades, como por exemplo, a resistência à corrosão.

Durante o projeto, para elaborar o desenho em 3D e a planificação dos dispositivos (Anexos 1 e 2) foi utilizado o programa Autodesk Inventor 2013.

a) Porta-penetradores em forma de cruzeta

O primeiro dispositivo foi projetado com formato de cruzeta (Fig. 3.24). Nesse dispositivo, os penetradores são fixados nas laterais dos braços da cruzeta, em rasgos devidamente projetados para permitir a lapidação das faces da pirâmide. A inclinação destas cavidades é de 145° , conforme as especificações de projeto dos penetradores.

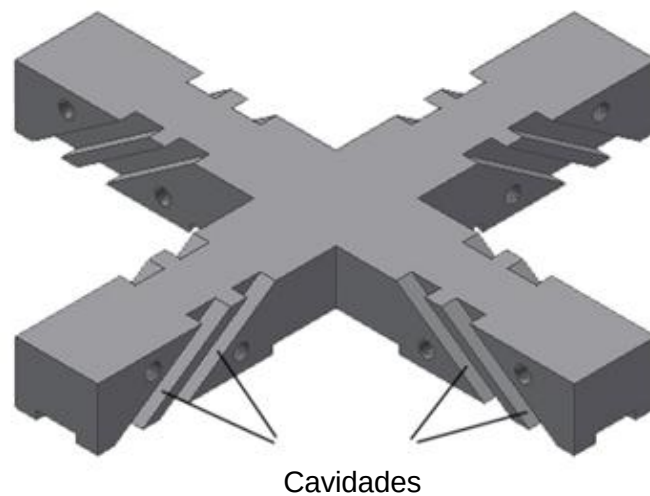


Figura 3.24 – Vista do porta-penetradores em forma de cruzeta, desenvolvido e construído

A cruzeta possui largura e comprimento com dimensões de 136 mm e altura de 15 mm (Fig. 3.25). Cada face comporta dois penetradores, totalizando 16 penetradores que podem ser trabalhados simultaneamente.

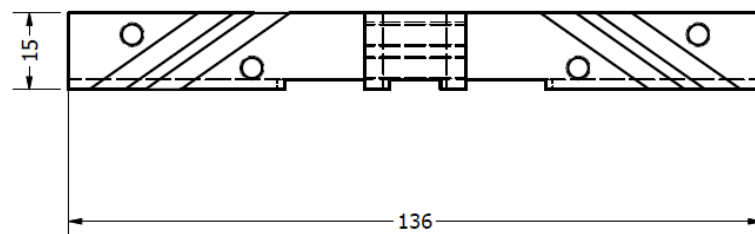


Figura 3.25 – Vista lateral do porta-penetradores em forma de cruzeta

A Figura 3.25 apresenta também os furos de fixação dos penetradores. Esta fixação é realizada por chapas metálicas de comprimento, largura e espessura de 30 mm, 15 mm e 3 mm, respectivamente.

Na parte inferior do porta-penetradores foi adotado um rebaixo (retirada de material) para diminuir a área de contato com o prato de lapidação, permitindo assim que o processo de lapidação se concentre mais na superfície dos penetradores e menos na superfície do porta-penetradores. A Figura 3.26 evidencia este detalhe.

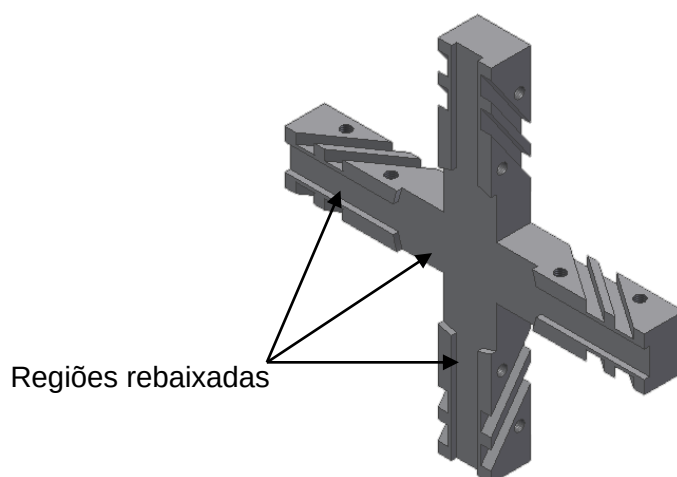


Figura 3.26 – Detalhe do rebaixo na parte inferior no porta-penetradores em forma de cruzeta.

Para garantir a qualidade geométrica, foram aplicadas as seguintes tolerâncias de forma e orientação (Tab. 3.5).

Tabela 3.5 – Tolerâncias geométricas do porta-penetradores em forma de cruzeta

Símbolo	Tipo de tolerância	Valor [mm]
	Planeza da base	0,01
	Planeza da face de união	0,01
	Perpendicularidade do rasgo vertical	0,01
	Inclinação do rasgo inclinado	0,05

A indicação de uma tolerância de planeza na base do dispositivo justifica-se, em primeiro lugar, por ser esta a superfície que entra em contato com o abrasivo durante a lapidação. Em segundo lugar, porque a superfície da base serve como referência para indicação das tolerâncias de orientação dos furos que posicionam o penetrador.

As tolerâncias de inclinação dos rasgos justificam-se na medida em que são necessárias para garantir que o penetrador estará posicionado na posição desejada para a lapidação das quatro faces da pirâmide.

Como tolerância microgeométrica, definiu-se o valor de rugosidade superficial das faces dos rasgos inclinados como sendo Ra igual a 4 μm .

b) Porta-penetradores cilíndrico

O segundo dispositivo foi projetado com formato cilíndrico de 50 mm de diâmetro e 31 mm de altura. A altura foi escolhida de tal forma que o furo vertical acomodasse completamente o penetrador na posição vertical (para lapidação do cume), uma vez que este possui comprimento de 29,6 mm. O diâmetro do porta-penetradores foi definido considerando que um penetrador é posicionado em um ângulo de 35 graus com relação à base do porta-penetrador (para lapidação das faces do penetrador), resultando num comprimento de aproximadamente 25 mm.

Cabe ressaltar que o porta-penetradores (Fig. 3.27) não foi projetado como uma peça única, mas como um cilindro bipartido. Este formato foi escolhido porque facilita sua fabricação, uma vez que os detalhes internos, considerando a peça inteira, podem ser trabalhados diretamente em uma das faces planas.

Uma das metades do cilindro (Fig. 3.27b), denominada peça 1, possui dois rasgos quadrados de arestas de 4 mm, que quando acoplada à peça 2 (Fig. 3.27a) formam os furos destinados a acomodar o penetrador. O primeiro furo destina-se à fixação do penetrador durante a lapidação da superfície do cume. Este furo tem como principal característica a indicação de uma tolerância dimensional em suas faces, de modo a obter-se um ajuste indeterminado (H/js) com tendência à folga quando do ajuste com o penetrador.

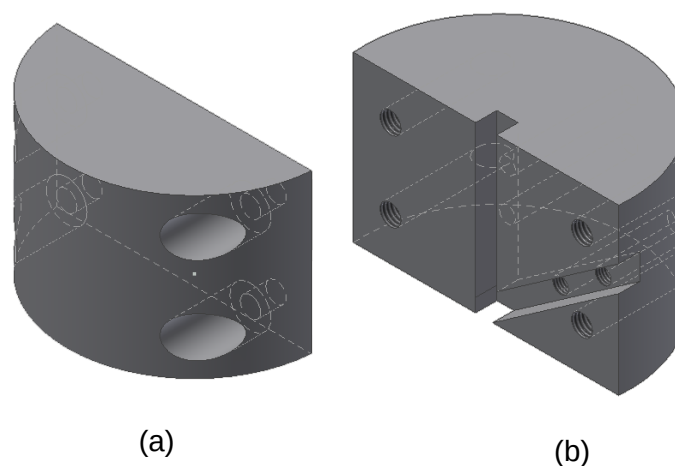


Figura 3.27 – Vista tridimensional do porta-penetradores cilíndrico

O segundo furo possui uma inclinação de 35° em relação à base do porta-penetradores e se destina à fixação deste para a lapidação das faces da pirâmide. A mesma tolerância dimensional descrita no parágrafo anterior se aplica ao segundo furo.

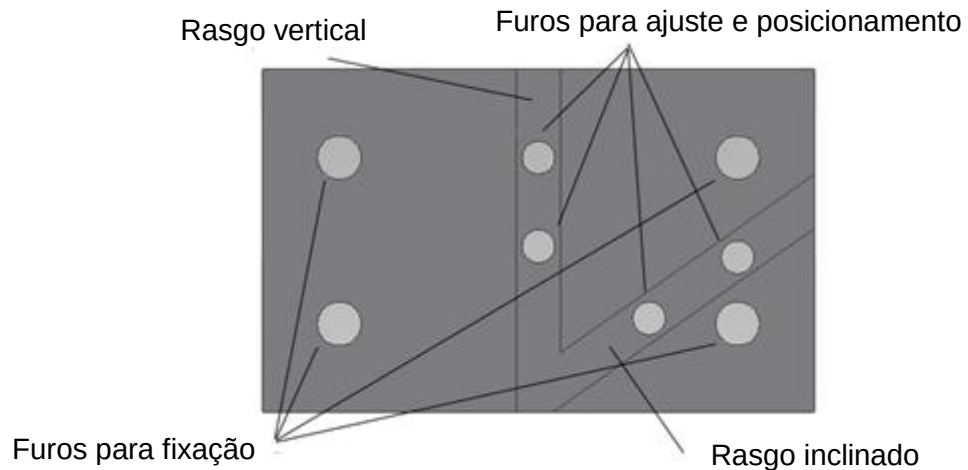


Figura 3.28 – Vista frontal da peça 1 do porta-penetradores cilíndrico

Além da tolerância dimensional, foram indicadas, na peça 1, quatro tolerâncias geométricas conforme mostra a Tab. 3.6.

Tabela 3.6 – Tolerâncias na peça 1 do porta-penetrador cilíndrico

Símbolo	Tipo de tolerância	Valor [mm]
	Planeza da base	0,01
	Planeza da face de união	0,01
	Perpendicularidade do rasgo vertical	0,01
	Inclinação do rasgo inclinado	0,05

A indicação de uma tolerância de planeza na base do dispositivo tem a mesma justificativa da apresentada para o porta-penetradores em forma de cruzeta.

A tolerância de planeza indicada em ambas as faces de união entre as peças 1 e 2 visa garantir o encaixe sem folgas quando do acoplamento. Já as tolerâncias de perpendicularidade e inclinação dos dois rasgos justificam-se para garantir que o penetrador estará exatamente na posição desejada para a lapidação do cume e das quatro faces da pirâmide, respectivamente. Como tolerância microgeométrica, definiu-se o valor de rugosidade superficial R_a igual a $4 \mu\text{m}$ para as faces dos rasgos vertical e inclinado.

Na Figura 3.28 os furos para fixação são destinados à união das duas metades do porta-penetradores. Já os furos para ajuste e posicionamento são destinados à fixação do penetrador dentro do porta-penetrador evitando assim que folgas comprometam o processo de lapidação.

A peça 2 do porta-penetrador (Fig. 3.27a) possui apenas os furos para os parafusos de fixação como mostrado na vista frontal da mesma (Fig. 3.29).

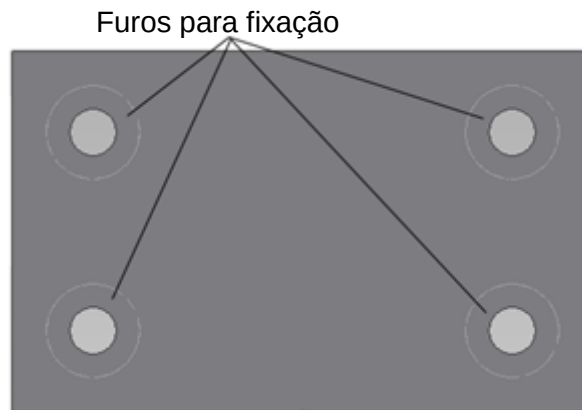


Figura 3.29 – Vista frontal da peça 2 do porta-penetradores cilíndrico

Quanto às tolerâncias geométricas, a Tab. 3.7 mostra as indicadas na peça 2.

Tabela 3.7 – Tolerâncias na peça 2 do porta-penetradores cilíndrico

Símbolo	Tipo de tolerância	Valor [mm]
	Planeza da base	0,01
	Planeza da face de união	0,01
	Perpendicularidade da face de união	0,01

A montagem do dispositivo é ilustrada na Fig. 3.30.

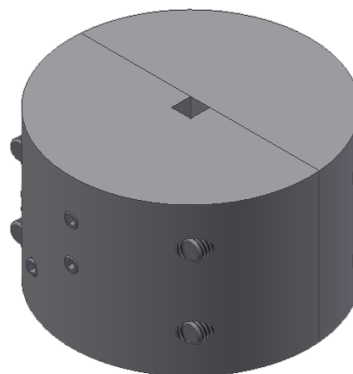


Figura 3.30 – Montagem do porta-penetradores cilíndrico

A lapidadora Lapmaster Model 15 possui três estações de trabalho para lapidação. Em cada uma destas estações, três penetradores podem ser trabalhados simultaneamente, inseridos no porta-penetradores descrito anteriormente. Cada estação de trabalho possui diâmetro de 140 mm.

A fim de conter o porta-penetradores na estação de trabalho, projetou-se um anel de contenção de diâmetro de 139,5 mm e altura de 5 mm (Fig. 3.31). A folga radial de 0,25 mm foi determinada para permitir um encaixe sem interferência, uma vez que o dispositivo pode se movimentar dentro da estação de trabalho sem prejuízos para o processo.

O material escolhido para a fabricação do anel de contenção foi o *Celeron*. O laminado técnico denominado *Celeron* é um plástico industrial duro e denso fabricado por processo de alta pressão e por aplicação de calor, conhecido popularmente por laminado termorrígido. O laminado é formado, basicamente, por camadas de tecido de algodão e aglutinado em uma massa única com o uso de resina fenólica de altas características mecânicas.

Internamente, o anel de contenção possui três furos de diâmetro de 51 mm destinados a conter os três porta-penetradores. Além de considerações de espaço, o número de três furos foi escolhido para garantir que os três pontos de contato de interesse (a superfície de cada penetrador que está sendo lapidada) estejam em atrito constante com o disco de lapidação durante o processo, uma vez que três pontos forma um único plano paralelo ao disco.

Outro parâmetro de projeto importante é a localização de cada furo. A velocidade de lapidação depende, dentre outros fatores, da distância radial do centro do disco de lapidação. Assim, definiu-se o centro de cada furo numa distância radial de 63% do raio do anel, isto é, 87,5 mm. Além disso, os três furos são equiespaçados de 120°, garantindo o equilíbrio do anel.

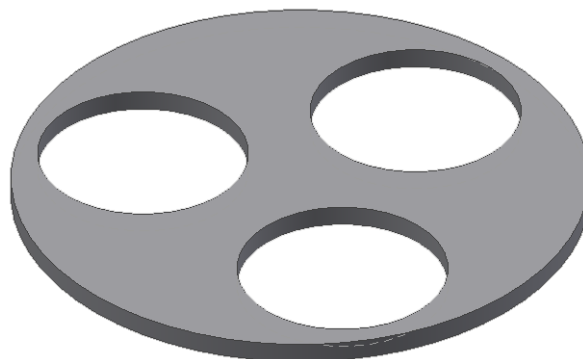


Figura 3.31 - Vista tridimensional do anel de contenção

3.7. Planejamento e Realização dos Testes Finais de Desgaste Abrasivo

Com os penetradores totalmente prontos no que diz respeito à fabricação e controle de qualidade dimensional e geométrico e definidos os valores de força externa e de número de ciclos, realizou-se uma nova sequência de testes. Estes testes tiveram como objetivo avaliar o desempenho do SIMMC Portátil utilizando os penetradores projetados e fabricados especificamente para efetuar os testes de abrasão.

Os parâmetros para realização dos mesmos foram: número de ciclos igual a 200 e força externa de 20 N. Todos os outros parâmetros importantes para o teste, como materiais testados, número de repetições, instrumentação e metodologia para avaliação da incerteza foram os mesmos descritos no item 3.4.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nesse trabalho. Para um melhor entendimento, o mesmo foi dividido em sete etapas, descritas a seguir:

4.1. Resultados da Preparação do SIMMC Portátil para Ensaios de Desgaste

A Figura 4.1 mostra o SIMMC Portátil pronto para realização dos ensaios de desgaste abrasivo nas amostras escolhidas. Todos os sistemas necessários foram instalados com sucesso.

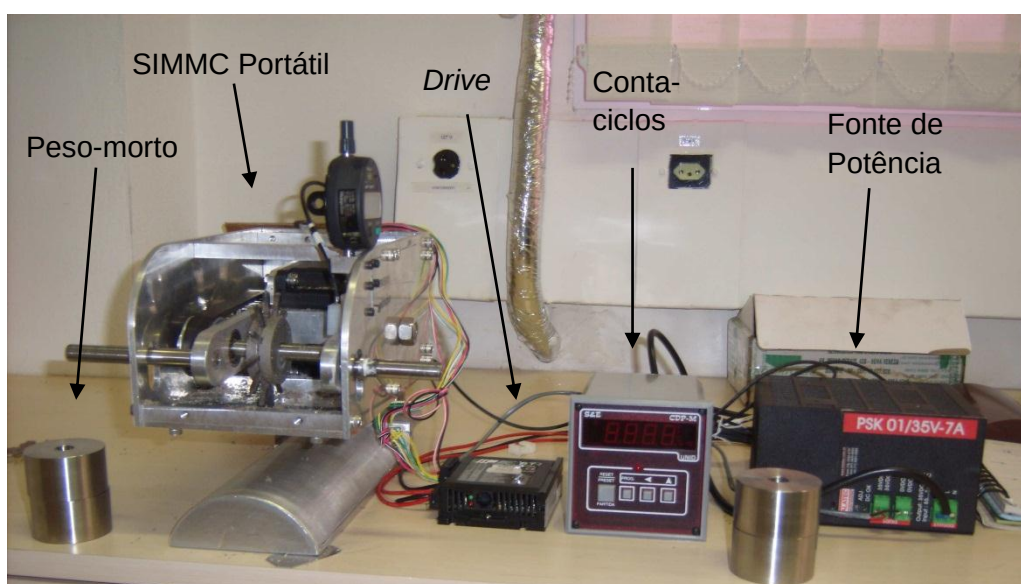


Figura 4.1 – SIMMC Portátil pronto para operação

4.2. Resultados da Medição da Massa dos Pesos-Mortos e Avaliação de Incerteza

A medição de massas dos quatro pesos-mortos utilizando a balança BELL MARK 4100 forneceu os seguintes valores de massa média considerando as dez leituras (Tab. 4.1). Cabe ressaltar que o desvio padrão em todos os casos foi igual a zero.

Tabela 4.1 – Valores médios de massa dos pesos-mortos

Peça	Massa [g]
Peso-morto 1	500,59
Peso-morto 2	501,19
Peso-morto 3	497,94
Peso-morto 4	499,91
Peso-morto 5	2050,32
Peso-morto 6	1930,22

A Tabela 4.1 mostra que a massa dos pesos-mortos 1 a 4 varia entre 497,94 g e 501,19 g e a dos pesos-mortos 5 e 6, entre 1930,22 g e 2050,32 g. Esta variação pode ser considerada grande para os fins pretendidos e, portanto, recomenda-se retirar ou acrescentar material de forma que a massa final dos pesos-mortos seja de $(500,00 \pm 0,10)$ g. Isto se faz necessário para garantir a precisão do carregamento aplicado durante a realização dos testes de desgaste. A Tabela 4.2 mostra, de forma resumida, os dados utilizados na avaliação da incerteza associada à medição de massa para o peso-morto 1.

Tabela 4.2 – Valores de incerteza da medição de massa do peso-morto 1 (95%)

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa [g]	TI	DP	GL	CS	Incerteza padrão [g]
LB	500,59	A	Normal	9	1	0,0032
RB	0,01	B	Retangular	∞	1	0,0058
DZ	0	B	Retangular	∞	1	0,0000
DE	0,01	B	Retangular	∞	1	0,0058
DL	0,01	B	Retangular	∞	1	0,0058
l_{CB}	0,00476	B	Normal	25	1	0,0048
Incerteza padrão combinada (u_c) em g						0,0115
Grau de liberdade efetivo ν_{eff}						555,67
Fator de abrangência k						1,96
Incerteza expandida (U) em g						0,0226

Nesta tabela, TI representa o tipo de avaliação; DP, a distribuição de probabilidade; GL, o grau de liberdade e CS, o coeficiente de sensibilidade. Na Tab. 4.2, foram acrescentados dois algarismos nos valores da incerteza-padrão e da incerteza padrão combinada visando minimizar a propagação dos erros decorrentes do arredondamento. Estas observações são válidas para todas as tabelas que contêm a avaliação da incerteza de medição.

Na Tabela 4.2 observa-se que o valor de incerteza expandida associada à medição da massa do peso-morto 1 é de 0,03 g para $k=1,96$ e 95% de probabilidade de abrangência.

Para identificar qual a variável de maior contribuição na incerteza final deve-se multiplicar a incerteza padrão da variável em questão pelo coeficiente de sensibilidade correspondente. Assim sendo, tem-se que as variáveis resolução, desvio de excentricidade e desvio de linearidade da balança são as que mais contribuíram para a incerteza final, sendo que cada uma delas é responsável por, aproximadamente, 25 % da incerteza padrão combinada.

De forma similar foi estimada a incerteza da medição de massa de todos os pesos-mortos. Os resultados obtidos são apresentados na Tab. 4.3. Para cada peso-morto é mostrada a massa média, a incerteza padrão combinada, os graus de liberdade efetivos da medição, o fator de abrangência e a incerteza expandida.

Tabela 4.3 – Valores de incerteza para os pesos-mortos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 (95%)

	Massa média [g]	u_c [g]	ν_{eff}	k	U [g]
Peça1	500,59	0,09	>100	1,96	0,03
Peça 2	501,19	0,09	>100	1,96	0,03
Peça 3	497,94	0,09	>100	1,96	0,03
Peça 4	499,91	0,09	>100	1,96	0,03
Peça 5	2050,32	0,02	>100	1,96	0,03
Peça 6	1930,22	0,02	>100	1,96	0,03

A partir da Tab.4.3, conclui-se que a incerteza expandida associada à medição de massa de todos os pesos-mortos é de 0,03 g para k igual 1,96 e 95% de probabilidade de abrangência. Assim, pode-se dizer que os pesos mortos utilizados como carregamento no SIMMC Portátil possuem os seguintes valores de massa (Tab. 4.4).

Tabela 4.4 – Valores de massa dos pesos-mortos considerando as incertezas (95%)

Peso-morto	Massa final em g
Peso-morto 1	500,59 $\pm$ 0,03
Peso-morto 2	501,19 $\pm$ 0,03
Peso-morto 3	497,94 $\pm$ 0,03
Peso-morto 4	499,91 $\pm$ 0,03
Peso-morto 5	2050,32 $\pm$ 0,03
Peso-morto 6	1930,22 $\pm$ 0,03

4.3. Resultados do Controle Dimensional e Geométrico dos Penetradores Pré-afiação

Os resultados do controle dimensional e geométrico dos penetradores antes da realização das operações de afiação e lapidação são apresentados nesta seção.

4.3.1. Dimensões do cume do penetrador pré-afiação

A Tabela 4.5 mostra os valores encontrados para as quatro arestas dos 12 penetradores inspecionados antes da afiação.

Na Tabela 4.5, $\bar{V}$ representa a média aritmética das cinco medições efetuadas para cada aresta e s , o desvio padrão correspondente. Esta tabela mostra que todos os penetradores possuem pelo menos a dimensão de uma das arestas fora da especificação de projeto (488 μm até 512 μm). O penetrador de número 8, por exemplo, possui um desvio significativo, maior que 100 μm para todas as arestas, sendo que o menor comprimento foi observado para a aresta de número 4 com 384 μm .

Os valores de desvios padrão observados variam entre 0,8 μm (para a quarta aresta do penetrador 10) e 3,3 μm (para a primeira aresta do penetrador 8). Esta variabilidade pode ser justificada por dois motivos, em primeiro lugar porque na medição com microscópio óptico, os pontos que limitam o mensurando objeto de medição são definidos pelo operador, em segundo lugar e no menos importante pela degradação das arestas do cume como mostra a Fig. 4.2a (penetrador 3) e 4.2b (penetrador 12).

Tabela 4.5 – Dimensões das arestas do cume pré-afiação em μm

Penetrador	Estatística	Aresta 1	Aresta 2	Aresta 3	Aresta 4
1	$\bar{V}$	479,8	468,0	485,3	468,6
	s	1,0	1,7	1,7	2,2
2	$\bar{V}$	515,6	517,3	474,3	534,2
	s	1,3	2,9	2,5	2,0
3	$\bar{V}$	522,8	499,7	508,6	497,4
	s	2,4	1,2	2,2	2,8
4	$\bar{V}$	506,7	521,0	511,1	498,3
	s	1,1	1,7	2,6	1,4
5	$\bar{V}$	437,7	449,8	479,2	481,7
	s	1,4	2,4	2,1	3,1
6	$\bar{V}$	497,7	520,2	489,1	499,2
	s	2,1	1,8	2,0	1,8
7	$\bar{V}$	458,7	483,4	462,8	462,9
	s	3,1	1,3	1,4	0,9
8	$\bar{V}$	397,4	397,3	392,1	383,8
	s	3,4	1,8	1,4	1,8
9	$\bar{V}$	531,7	493,3	530,1	485,1
	s	0,8	2,0	2,2	2,9
10	$\bar{V}$	488,2	506,1	475,3	482,3
	s	1,4	2,0	3,3	0,8
11	$\bar{V}$	480,5	477,3	483,2	468,8
	s	1,2	1,7	1,4	1,3
12	$\bar{V}$	556,0	539,6	547,6	535,6
	s	1,7	1,8	2,5	1,5

Por meio das Fig. 4.2c e 4.2d, é possível observar a variação nas dimensões entre os dois penetradores. Enquanto o penetrador número 7 (Fig. 4.2c) possui dimensões próximas da dimensão nominal especificada no projeto (500 μm), o penetrador número 8 (Fig. 4.2d) possui dimensões muito menores que a dimensão mínima especificada.

Nas quatro imagens apresentadas, observa-se que o formato da superfície dos penetradores difere significativamente de um quadrado, principalmente porque as arestas não são retas e os vértices estão deteriorados. Com relação ao acabamento superficial,

observam-se riscos paralelos entre si, porém não periódicos, levando a crer que o acabamento superficial está aquém do esperado.

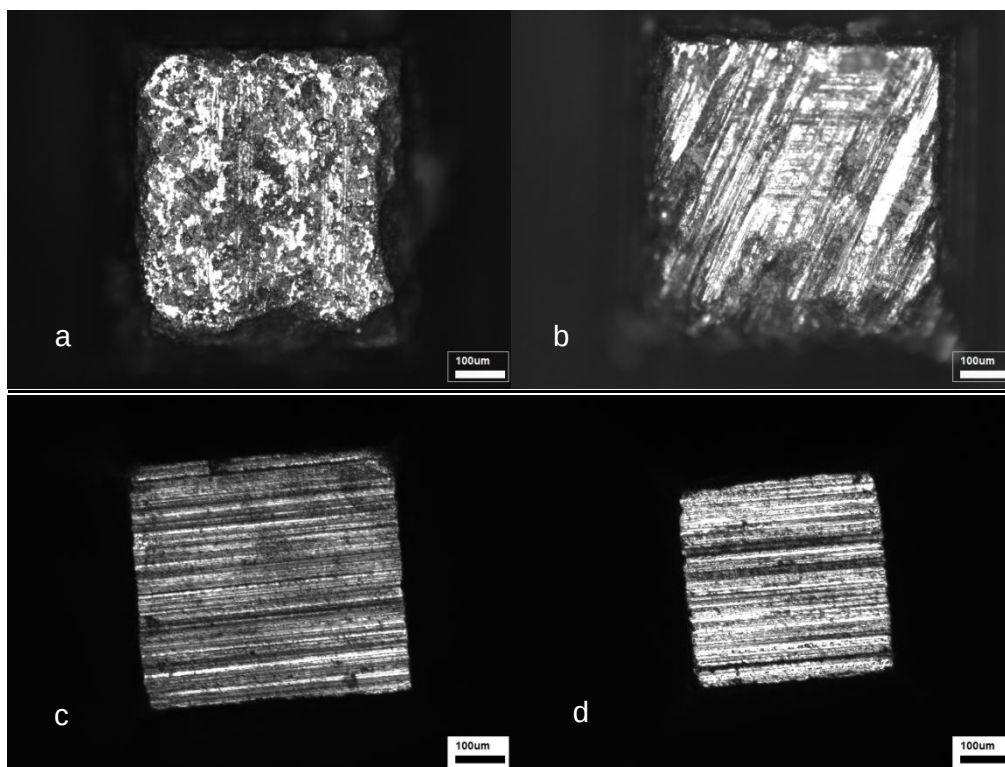


Figura 4.2 – Superfícies do cume dos penetradores 3, 7, 8 e 12, respectivamente antes da afiação

A Tabela 4.6 mostra, de forma resumida, os dados utilizados na avaliação da incerteza associada à medição do comprimento da aresta 1 do penetrador 1.

Tabela 4.6 – Incerteza da medição do comprimento da aresta 1 do penetrador 1 (95%)

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa [μm]	TI	DP	GL	CS	Incerteza padrão [μm]
$\Delta s(L_M)$	1,0	A	Normal	2	1	0,57735
ΔR_M	0,2	B	Retangular	∞	1	0,05773
ΔIC_M	0,37859	A	Normal	∞	1	0,37859
Incerteza padrão combinada (u_c) em μm						0,69282
Grau de liberdade efetivo v_{eff}						4,13
Fator de abrangência k						2,776
Incerteza expandida (U) em μm						1,92357

Na Tabela 4.6, observa-se que o valor de incerteza expandida associada à medição do comprimento da aresta 1 do penetrador de número 1 é de 2 μm para $k=2,77$ e 95% de probabilidade de abrangência. A variável que mais influenciou a incerteza final foi a variabilidade dos valores indicados pelo microscópio, sendo responsável por, aproximadamente, 69% do valor total.

De forma similar foi estimada a incerteza da medição do comprimento das quatro arestas dos 12 penetradores. Os resultados obtidos são apresentados na Tab. 4.7.

Tabela 4.7 - Incerteza expandida da medição do comprimento das arestas pré-afiação (95%)

Incerteza expandida em μm				
Penetrador	Aresta 1	Aresta 2	Aresta 3	Aresta 4
1	1,9	4,6	4,6	5,7
2	2,8	7,4	6,3	5,2
3	6,2	2,5	5,8	7,0
4	2,3	4,6	6,6	3,9
5	2,8	6,2	5,4	7,8
6	5,4	4,7	5,3	4,7
7	7,8	2,6	3,8	1,7
8	8,5	4,7	2,8	4,8
9	1,5	5,2	5,8	7,4
10	3,9	5,3	8,4	1,6
11	2,5	4,5	3,9	2,6
12	4,6	4,7	6,3	4,1

A partir da Tab. 4.7, conclui-se que a incerteza expandida associada à medição do comprimento das arestas varia de 1,5 μm até 8,5 μm . A variabilidade observada entre os valores de incerteza expandida pode ser atribuída à pouca repetibilidade dos valores indicados pelo microscópio durante a medição de uma determinada aresta, sendo esta a variável que mais influenciou a incerteza final. Isso se deu porque a maioria dos penetradores apresentava a superfície do cume muito danificada, dificultando a definição dos limites das arestas durante a medição.

4.3.2. Rugosidade do cume dos penetradores pré-afiação

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram os gráficos da área medida para o cume do penetrador 1 antes da afiação.

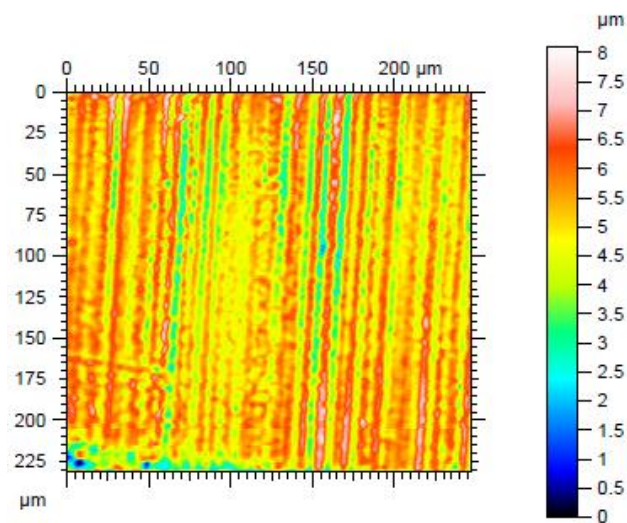


Figura 4.3 – Área do cume do penetrador 1 antes da afiação

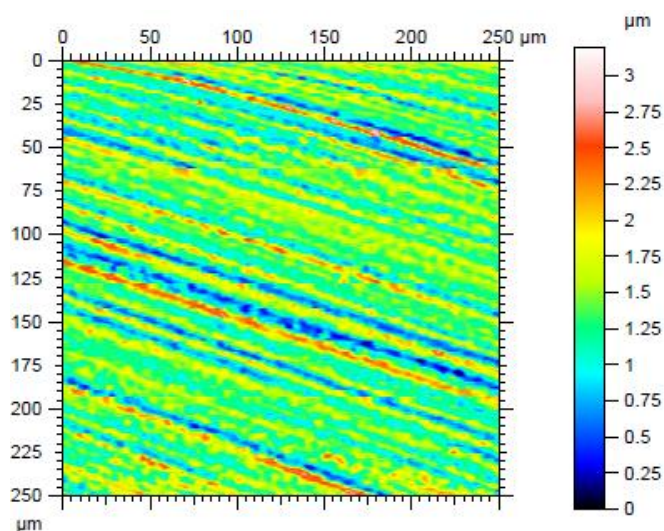


Figura 4.4 – Área do cume do penetrador 2 antes da afiação

A medição no interferômetro evidenciou os riscos já observados no microscópio ótico. A orientação unidirecional destes demonstra que o acabamento superficial é aquele dado pelo processo de fabricação anterior.

A Tabela 4.8 lista os valores dos parâmetros de rugosidade encontrados para o penetrador 1. Observa-se que o valor de S_a é de $0,43 \mu\text{m}$ para o penetrador 1. Como esperado o parâmetro S_z apresenta um valor elevado, de $4,19 \mu\text{m}$, o que pode ser justificado porque este parâmetro é fortemente influenciado pela presença de picos e vales isolados. O valor do *skewness* é de $0,11$ indicando que os picos prevalecem com relação aos vales. Por sua vez, a *kurtosis* maior que 3 indica que a função densidade de probabilidade dos valores das ordenadas dos pontos da superfície de rugosidade é afinada.

Tabela 4.8 – Parâmetros de rugosidade do cume do penetrador 1 pré-afiação

Parâmetro	Valor [μm]	Significado
Sq	0,43	Média aritmética da altura
Sa	0,3	Média quadrática da altura
Sp	2,12	Pico máximo
Sv	2,07	Vale máximo
Sz	4,19	Altura máxima
Ssk	0,11	<i>Skewness</i>
Sku	5,55	<i>Kurtosis</i>

A Tabela 4.9 apresenta os valores de rugosidade para todos os penetradores.

Tabela 4.9 – Valores de rugosidade do cume para todos os penetradores pré-afiação

Penetrador	Sq [μm]	Sa [μm]	Sp [μm]	Sv [μm]	Sz [μm]	Ssk	Sku
2	0,86	0,67	2,93	5,16	8,09	-0,45	3,67
3	0,96	0,74	8,05	2,53	10,57	0,85	6,64
4	0,94	0,74	3,39	3,22	6,61	0,27	3,10
5	0,39	0,31	1,84	1,36	3,20	0,19	3,32
6	1,02	0,80	3,85	4,08	7,93	0,23	3,32
7	0,50	0,40	1,84	1,84	3,68	-0,27	2,68
8	0,87	0,70	4,29	2,95	7,24	0,16	2,89
9	1,03	0,79	6,71	3,03	9,74	0,70	4,74
10	0,91	0,73	4,18	3,34	7,52	0,01	3,03
11	0,86	0,67	3,23	4,21	7,45	0,27	3,19
12	0,81	0,64	3,23	3,03	6,26	0,00	3,11

A partir da Tab. 4.9 se conclui que o acabamento superficial dos penetradores não é homogêneo. O Sa, por exemplo, assume valores de 1,03 μm para o penetrador 9, enquanto que para o penetrador 5 é de 0,39 μm . Para os penetradores 2 e 7, o *skewness* é negativo indicando que os vales prevalecem com relação aos picos. Já para o resto dos penetradores este parâmetro assume valores positivos, indicando o contrário.

O valor do parâmetro Sq é significativamente maior que o Sa para todos os penetradores. Isto se justifica pela presença de picos e vales isolados. Cabe lembrar que o Sq ao elevar ao quadrado os valores das ordenadas dos pontos do perfil evidencia a presença destes picos e vales.

Com relação à *kurtosis*, ela se apresenta maior que 3 para os penetradores 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11 e 12 e desta forma a função densidade de probabilidade dos valores das ordenadas dos pontos da superfície de rugosidade é afinada. Por sua vez, para os demais penetradores o *kurtosis* é menor que 3 demonstrando o achatamento da função densidade de probabilidade.

Além dos valores dos parâmetros superficiais, também foram registrados os valores de parâmetros considerando apenas um perfil (Fig. 4.5). Para tanto, foi escolhido aleatoriamente um perfil pertencente à superfície avaliada.

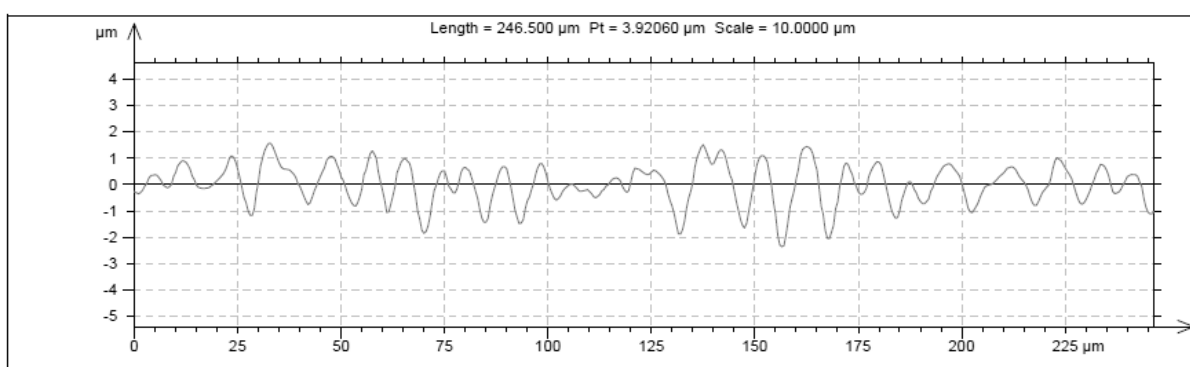


Figura 4.5 – Perfil de rugosidade do cume para o penetrador 1 antes da afiação

Na Figura 4.5 é possível observar a distribuição não homogênea de picos e vales do perfil de rugosidade bidimensional. A Tabela 4.10 mostra os valores dos principais parâmetros de rugosidade para o perfil avaliado.

Tabela 4.10 – Valores de rugosidade do cume para o penetrador 1 pré-afiação

Parâmetro	Valor [μm]	Significado
Rq	0,78	Média quadrática da altura
Ra	0,64	Média aritmética da altura
Rz	3,36	Altura máxima
RSm	9,37	Largura média dos elementos do perfil

O perfil de rugosidade apresenta picos e vales largos, o que é indicativo de um valor de RSm elevado, que neste caso é de 9,37 μm.

A Tabela 4.11 apresenta os dados utilizados na avaliação da incerteza associada à medição do parâmetro da rugosidade Sa do cume do penetrador 1.

Tabela 4.11 – Incerteza da medição da rugosidade S_a do cume do penetrador 1 (95%)

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa [μm]	TI	DP	GL	CS	Incerteza padrão [μm]
$\Delta s(L_R)$	0,01	A	Normal	499	1	0,00045
ΔR_R	0,01	B	Retangular	∞	1	0,00289
ΔIC_R	0,07	B	Normal	17	1	0,07000
Incerteza padrão combinada (u_c) em μm						0,07006
Grau de liberdade efetivo v_{eff}						17,06
Fator de abrangência k						2,11
Incerteza expandida (U) em μm						0,14783

Na Tabela 4.11, observa-se que o valor de incerteza expandida associada à medição do parâmetro de rugosidade S_a do cume do penetrador de número 1 é de 0,15 μm para $k=2,11$ e 95% de probabilidade de abrangência. Estes valores podem ser estendidos para todos os parâmetros avaliados para o penetrador 1, bem como para todos os outros parâmetros de todos os penetradores avaliados tanto na face quanto no cume.

4.3.3. Rugosidade da face lateral dos penetradores pré-afiação

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram os gráficos de rugosidade para a área avaliada na face lateral do penetrador 1 e 5.

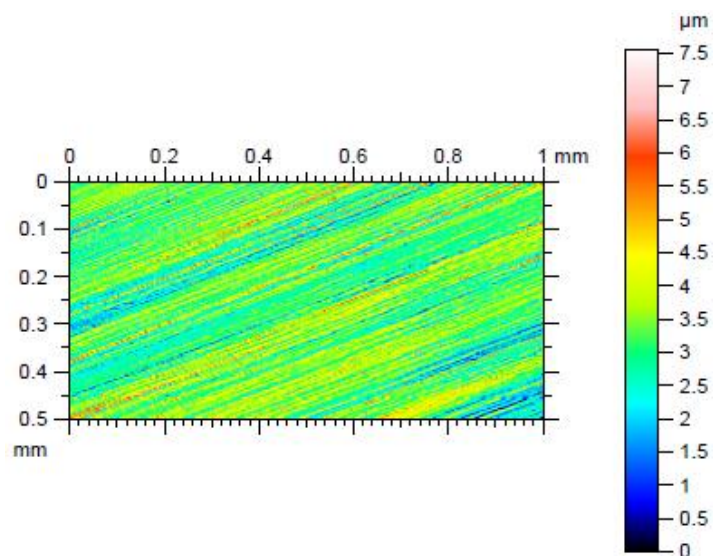


Figura 4.6 – Área medida na face lateral do penetrador 1 antes da afiação

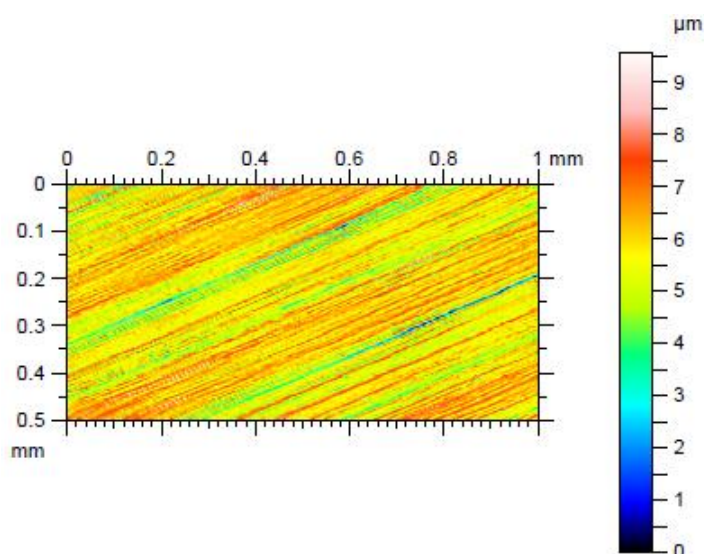


Figura 4.7 – Área medida na face lateral do penetrador 5 antes da afiação

Pelas Figuras 4.6 e 4.7, é possível observar as marcas deixadas pela ferramenta usada na usinagem da superfície dos penetradores. A passagem da ferramenta gerou riscos na superfície, contribuindo para o aumento da rugosidade.

A Tabela 4.12 apresenta os valores destes parâmetros para todas as amostras. A partir dela, se conclui que o acabamento superficial da face se apresenta de forma não homogênea. Quando comparados os valores de S_a e de S_q da face com os encontrados para o cume se observa que para a face os valores são maiores.

Tabela 4.12 – Valores de rugosidade da face lateral para os penetradores (pré-afiação)

Penetrador	S_q [μm]	S_a [μm]	S_p [μm]	S_v [μm]	S_z [μm]	S_{sk}	S_{ku}
1	0,82	0,63	4,36	3,74	8,10	-0,03	3,71
2	0,73	0,56	3,55	3,30	6,85	0,31	3,77
3	0,97	0,76	5,91	3,10	9,01	0,69	3,84
4	0,90	0,57	20,71	5,45	26,16	3,57	38,49
5	0,63	0,49	3,14	2,44	5,58	-0,08	3,26
6	0,66	0,52	3,20	3,01	6,21	0,06	3,43
7	0,82	0,64	4,30	3,27	7,57	0,30	3,41
8	0,88	0,70	3,51	4,03	7,55	-0,07	3,23
9	0,75	0,60	3,59	2,78	6,37	0,30	3,22
10	0,91	0,70	3,74	5,84	9,58	-0,34	4,49
11	0,77	0,60	6,00	3,51	9,51	0,36	3,66
12	0,80	0,62	5,64	3,68	9,32	0,46	6,77

Observou-se, ainda, que para todos os penetradores o valor do parâmetro S_q é maior que o do S_a . Esta diferença é da ordem de 20%, indicando a presença de picos e vales isolados na face dos penetradores.

Além de parâmetros superficiais, também foram medidos parâmetros de perfil. Este perfil (Fig. 4.8) foi aleatoriamente escolhido.

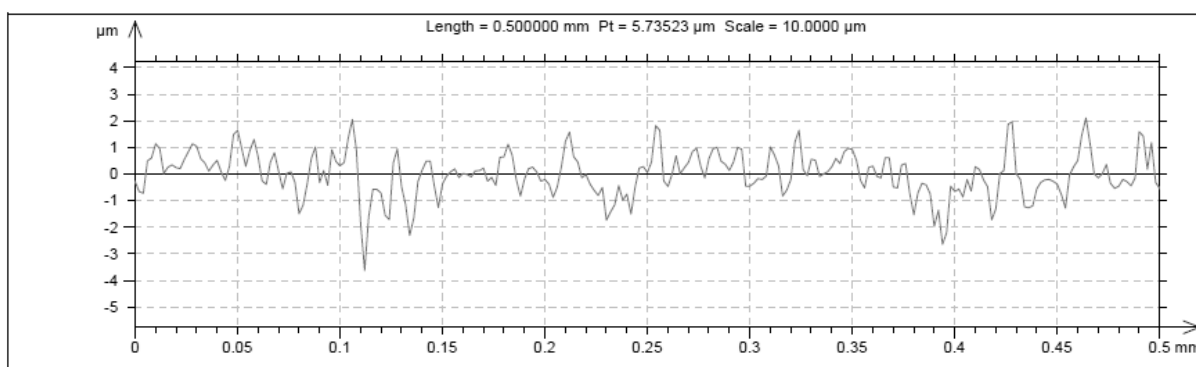


Figura 4.8 – Perfil de rugosidade da face lateral para o penetrador 1 antes da afiação

Na Figura 4.8 é possível observar a distribuição não uniforme de picos e vales ao longo do perfil de rugosidade. Os valores dos principais parâmetros de rugosidade para este perfil são mostrados na Tab. 4.13.

Tabela 4.13 – Valores de rugosidade para a face lateral do penetrador 1 (pré-afiação)

Parâmetro	Valor [μm]	Significado
R_q	0,60	Média quadrática da altura
R_a	0,46	Média aritmética da altura
R_z	3,24	Altura máxima
R_{Sm}	0,01	Largura Média dos Elementos do Perfil

4.4. Resultados dos Testes de Desgaste Abrasivo com os Penetradores Pré-afiação

Nesta etapa são apresentados os resultados obtidos durante a realização dos pré-testes de abrasão. Para um melhor entendimento estes resultados são apresentados em seis itens, que são: ensaios com força adicional de 10 N para a amostra E585; ensaios com força de 20 N para a amostra E585; ensaios com força externa de 30 e 40 N; experimento fatorial completo 6x2; resultados dos testes de desgaste para as amostras restantes e força de 20 N e tempo de duração dos testes.

É importante ressaltar que todos os testes listados nessa seção foram realizados com penetradores que não passaram pelos processos de afiação e lapidação.

4.4.1. Ensaios pré-afiação com força adicional de 10 N para a amostra E585

A Tabela 4.14 mostra os resultados obtidos durante os testes realizados na amostra E585, variando o número de ciclos para a força externa de 10 N. São apresentados, ainda, os valores da média e do desvio padrão.

Tabela 4.14 – Valores de desgaste para amostra E585 e força de 10 N (pré-afiação)

Número de ciclos	Desgaste em mm						
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Média	Desvio padrão
30	0,210	0,143	0,160	0,180	0,155	0,170	0,026
50	0,250	0,210	0,201	0,539	0,367	0,313	0,142
100	0,350	0,430	0,320	1,040	0,815	0,591	0,320
150	0,740	0,860	0,653	0,900	0,810	0,793	0,098
200	1,058	0,975	1,205	0,825	1,104	1,033	0,143
250	1,226	1,105	1,316	1,267	1,304	1,244	0,085

A partir da Tab. 4.14 observa-se que os valores de desgaste obtidos para a amostra E585 e força externa de 10 N variam entre 0,170 mm (para 30 ciclos) e 1,244 mm (para 250 ciclos). Os valores de desvio padrão são grandes, o que pode ser explicado pelo fato de que a trilha de desgaste não se apresenta de forma uniforme, como mostrado na Fig. 4.9.

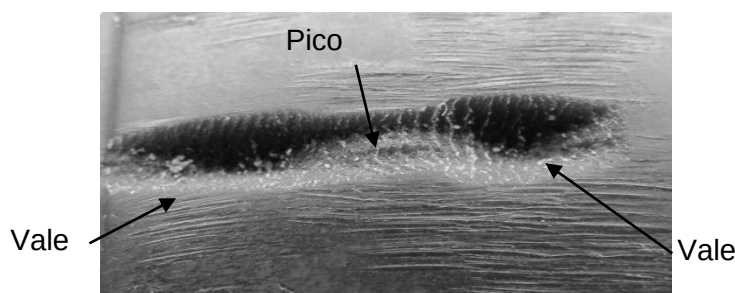


Figura 4.9 – Trilha de desgaste do material E585 com força adicional de 10 N

Na Figura 4.9 é facilmente observável que a trilha é formada por dois vales e um pico entre eles. Cabe ressaltar que este fato acontece para todos os testes realizados nesta condição, demonstrando a impossibilidade de empregar-se esta configuração. Observou-se, ainda, que a roda de penetradores, para a força adicional de 10 N, trepida

significativamente, provocando vibrações no SIMMC Portátil, o que compromete tanto o ensaio de desgaste (pois os penetradores podem se afastar da amostra) quanto a leitura dos resultados.

A Tabela 4.16 mostra, de forma resumida, os dados utilizados na avaliação da incerteza associada à medição do desgaste para a amostra E585 e força de 10 N.

Tabela 4.15 – Incerteza da medição do desgaste para E585, força de 10 N (95%) e 30 ciclos (pré-afiação)

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa [mm]	TI	DP	GL	CS	Incerteza padrão [mm]
$\Delta s(L_{RC})$	0,01163	A	Normal	4	1	0,01163
ΔR_{RC}	0,00058	B	Retangular	∞	1	0,00058
ΔH_{RC}	0,00029	B	Triangular	∞	1	0,00029
$\Delta \alpha$	0,00289	B	Triangular	∞	0	0,00289
ΔIC_{RC}	0,00045	B	Normal	100	1	0,00045
Incerteza padrão combinada (u_c) em mm						0,01200
Grau de liberdade efetivo v_{eff}						4,55
Fator de abrangência k						2,776
Incerteza expandida (U) em mm						0,03333

Na Tabela 4.15, observa-se que o valor de incerteza expandida associada à medição do desgaste experimentado pela amostra E585 para a força externa de 10 N e 30 ciclos é de 0,034 mm para $k=2,77$ e 95% de probabilidade de abrangência. A variável que mais influenciou a incerteza final foi a variabilidade dos valores do mensurando, sendo responsável por 93,92% do valor da incerteza padrão combinada. Em segundo lugar de destaque está o erro de posicionamento com 5,8% de contribuição.

De forma similar foi estimada a incerteza da medição do desgaste para todos os testes realizados com a amostra E585 e força de 10 N. Os resultados obtidos são apresentados na Tab. 4.16.

Tabela 4.16 – Incerteza associada à medição de desgaste para a amostra E585, força de 10 N e diferentes valores de ciclos (95%) (pré-afiação)

Número de ciclos	Média (mm)	u_c (mm)	v_{eff}	k	U (mm)
30	0,170	0,012	4,55	2,77	0,034
50	0,313	0,063	4,01	2,77	0,177
100	0,591	0,143	4,00	2,77	0,398
150	0,793	0,044	4,04	2,77	0,122
200	1,033	0,064	4,02	2,77	0,178
250	1,244	0,038	4,05	2,77	0,106

A Tabela 4.16 mostra que a incerteza expandida associada à medição do desgaste para o material E585 e força de 10 N varia entre 0,034 mm para 30 ciclos e 0,398 mm para 100 ciclos. Em todos os casos a variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a variabilidade dos valores indicados pelo relógio comparador.

Cabe ressaltar que não foram efetuados testes com as outras amostras para a força externa de 10 N porque os resultados preliminares mostraram pouca precisão dos valores de desgaste obtidos devido à não homogeneidade da trilha de desgaste.

4.4.2. Ensaios pré-afiação com força externa de 20 N para a amostra E585

A Tabela 4.17 mostra os resultados obtidos durante os testes realizados na amostra E585, variando o número de ciclos para uma força externa de 20 N. São apresentados, ainda, os valores da média e do desvio padrão.

Tabela 4.17 – Valores de desgaste para a amostra E585 e força de 20 N (pré-afiação)

Número de ciclos	Desgaste em mm						
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Média	Desvio padrão
30	0,580	0,470	0,551	0,509	0,350	0,492	0,090
50	0,615	0,650	0,720	0,525	0,499	0,602	0,091
100	1,065	0,895	1,170	0,837	0,930	0,979	0,136
150	1,125	1,114	1,250	1,243	1,304	1,207	0,084
200	1,307	1,205	1,366	1,364	1,372	1,323	0,071
250	1,395	1,302	1,410	1,250	1,400	1,351	0,071

A partir da Tab. 4.17 se conclui que os valores de desgaste obtidos quando aplicada uma força adicional de 20 N variam entre 0,492 mm (para 30 ciclos) e 1,351 mm (para 250 ciclos) e são maiores quando comparados com aqueles obtidos utilizando 10 N. Os valores de desvio padrão também são menores quando comparados com o teste anterior. Desta forma, conclui-se que os resultados do teste utilizando uma força de 20 N são mais precisos.

A Tabela 4.18 mostra os valores de incerteza associados à medição do desgaste da amostra E285 para uma abrangência de 95%.

Tabela 4.18 – Incerteza da medição de desgaste para amostra E585 e força de 20 N (95%)

Número de ciclos	Média (mm)	u_c (mm)	v_{eff}	k	U (mm)
30	0,492	0,040	4,04	2,77	0,113
50	0,602	0,041	4,04	2,77	0,114
100	0,979	0,061	4,02	2,77	0,170
150	1,207	0,038	4,05	2,77	0,105
200	1,323	0,032	4,07	2,77	0,089
250	1,351	0,032	4,07	2,77	0,089

A Tabela 4.18 mostra que a incerteza expandida associada à medição do desgaste para o material E585 e força de 20 N varia entre 0,089 mm e 0,170 mm. Em todos os casos, a variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a variabilidade dos valores indicados pelo relógio comparador.

A Figura 4.10 mostra a trilha de desgaste deste ensaio. É notável que ela se apresenta mais uniforme, sem a ocorrência do efeito mostrado na Fig. 4.9 (trilha de desgaste para 1 kgf).

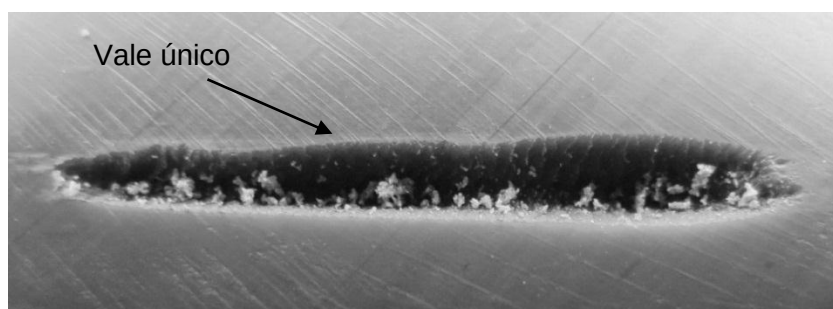


Figura 4.10 – Trilha de desgaste para o material E585 com força adicional de 20 N

Para a força adicional de 20 N, a roda continua trepidando em alguns casos, porém em menor proporção que para 10 N. O nível de ruído também é menor. Em nenhum dos ensaios realizados com a força de 20 N, para todos os cinco materiais escolhidos, observou-se a ocorrência do fenômeno vale-pico-vale na trilha de desgaste. Pelos resultados até aqui

obtidos pode-se concluir que a força externa de 20 N é mais adequada para realização dos testes de desgaste.

4.4.3. Ensaios pré-afiação com força externa de 30 N e 40 N

Ao tentar realizar ensaios com carregamentos mais severos (isto é, força adicional superior a 20 N), percebeu-se que o torque do motor não é o suficiente para realizar o ensaio de desgaste. Ao invés disso, a roda de penetradores trava sobre a amostra. Por isso, ensaios com força externa adicional de 30 N e 40 N foram descartados do planejamento.

4.4.4. Experimento fatorial completo 6x2

A Tabela 4.19 mostra os dados de entrada para efetuar a análise de variância (ANOVA) para o experimento fatorial completo proposto. Por sua vez a Tabela 4.20 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA), indicando a soma de quadrados (SQ), o número de graus de liberdade (GL), a razão de variância (F) e a probabilidade (p).

Tabela 4.19 – Resultados do teste de desgaste para a amostra E585

Número de Ciclos	Força (N)	Desgaste (mm)
30	10	0,170
50	10	0,313
100	10	0,591
150	10	0,793
200	10	1,033
250	10	1,244
30	20	0,492
50	20	0,602
100	20	0,979
150	20	1,207
200	20	1,323
250	20	1,351

Tabela 4.20 – Resultados da ANOVA para a amostra E585

Variável	SQ	GL	F	p
Média	8,497467	1	14,48169	0,000000
Var. 1 (Número de Ciclos)	1,515098	5	51,642	0,000265
Var. 2 (Força)	0,273008	1	46,527	0,001033
Resíduos	0,029339	5		
Total	10,31491	12		

Pode-se observar na Tab. 4.20 que as variáveis número de ciclos e força influenciam de modo significativo os valores de desgaste obtidos para a amostra E585 para um nível de confiança de 95%.

A Figura 4.11 mostra o resultado do teste de normalidade dos resíduos. Observa-se que a maioria dos valores dos resíduos encontra-se sobre a reta teórica ou próxima desta. Assim sendo, a hipótese de normalidade dos mesmos pode ser aceita.

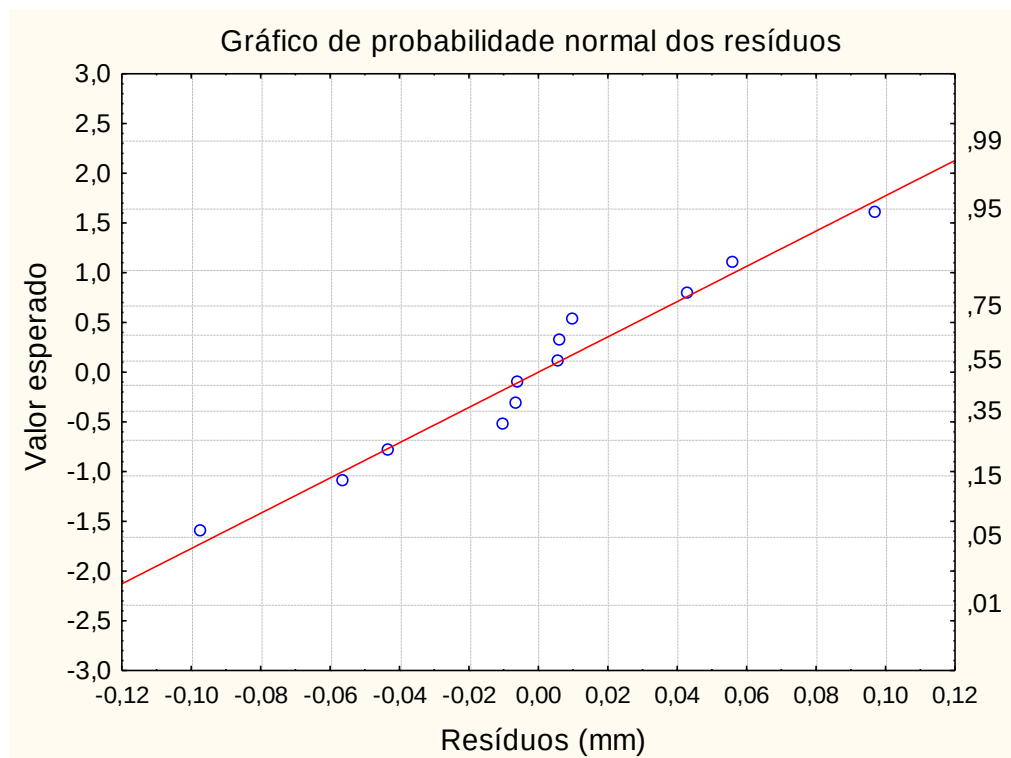


Figura 4.11 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos

É possível concluir que as variáveis de interesse (número de ciclos e força) influenciam os resultados do teste de abrasão no SIMMC Portátil e, portanto, devem ser efetuados outros experimentos visando determinar os valores mais adequados para estas variáveis.

A Figura 4.12 mostra um gráfico com os valores de desgaste obtidos para a amostra E585 para ambas as forças, permitindo comparar o desempenho do dispositivo.

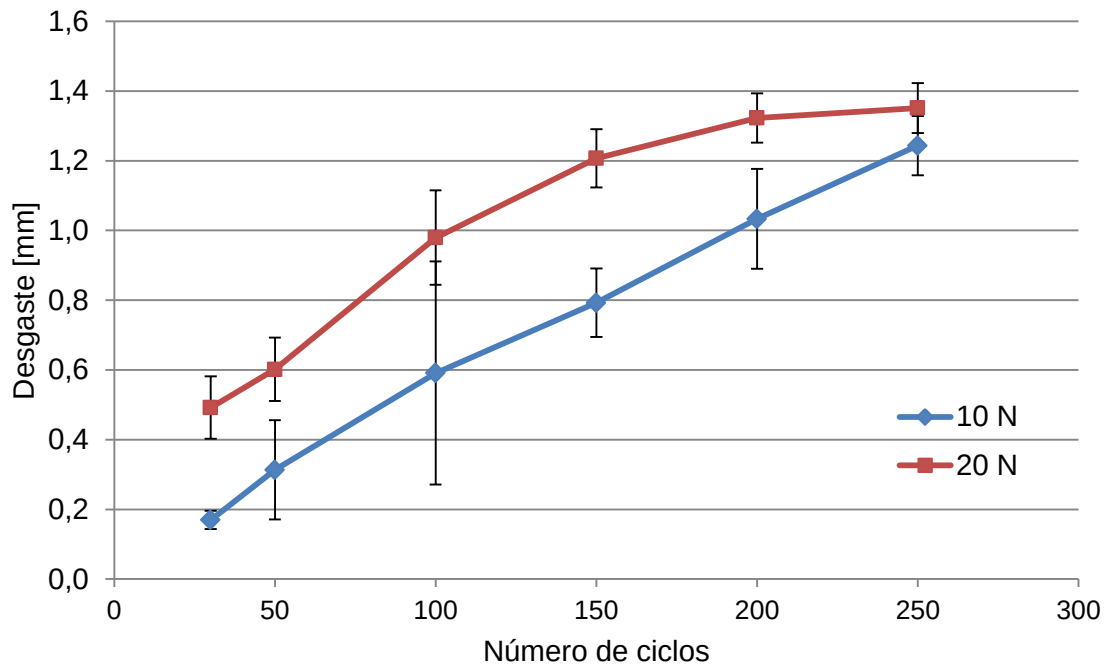


Figura 4.12 – Valores de desgaste para a amostra E585 para 10 e 20 N com penetradores antes da afiação

A partir da Fig. 4.12 se conclui que o desgaste do material E585 varia quase linearmente com o aumento do número de ciclos. Para o teste com força adicional de 20 N, o desgaste é maior e os desvios padrão são menores, o que aumenta a confiabilidade da medição.

Os desvios padrão da curva azul (ensaio com 10 N) apresentam valores elevados devido ao fato da trilha de desgaste não ser uniforme (Fig. 4.9). Nota-se que para os ensaios com 20 N o desvio padrão tende a diminuir, uma vez que a trilha se torna mais uniforme (Fig. 4.10).

4.4.5. Resultados dos pré-testes de desgaste para as amostras restantes e 20 N

As Tabelas 4.21 a 4.24 mostram, respectivamente, os resultados obtidos durante os testes pré-afiação realizados nas amostras E285, E185, E585M e E165 variando o número de ciclos para uma força externa de 20 N. São apresentados, ainda, os valores da média e do desvio padrão.

Tabela 4.21 – Valores de desgaste para a amostra E285 e força de 20 N (pré-afiação)

Número de ciclos	Desgaste em mm						
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Média	Desvio padrão
30	1,210	1,140	1,226	1,350	1,292	1,244	0,080
50	1,821	1,807	1,801	1,870	1,755	1,811	0,041
100	2,375	2,255	2,455	2,307	2,362	2,351	0,075
150	2,860	2,782	2,768	2,735	2,785	2,786	0,046
200	3,115	2,905	3,070	2,967	2,875	2,986	0,104
250	3,233	3,195	3,199	3,124	3,101	3,170	0,055

Tabela 4.22 – Valores de desgaste para a amostra E185 e força de 20 N (pré-afiação)

Número de ciclos	Desgaste em mm						
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Média	Desvio padrão
30	0,466	0,612	0,479	0,624	0,536	0,543	0,073
50	0,976	0,761	0,951	0,954	0,845	0,897	0,092
100	1,105	1,019	1,280	1,256	1,255	1,183	0,115
150	1,395	1,401	1,600	1,540	1,547	1,497	0,093
200	1,625	1,471	1,726	1,603	1,651	1,615	0,093
250	1,815	1,812	1,819	1,875	1,844	1,833	0,027

Tabela 4.23 – Valores de desgaste para a amostra E585M e força de 20 N (pré-afiação)

Número de ciclos	Desgaste em mm						
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Média	Desvio padrão
30	0,619	0,414	0,551	0,590	0,497	0,534	0,081
50	0,891	0,789	0,798	0,899	0,837	0,843	0,051
100	1,156	1,315	1,157	1,143	1,110	1,176	0,080
150	1,570	1,502	1,545	1,420	1,415	1,490	0,071
200	1,734	1,570	1,620	1,591	1,583	1,620	0,067
250	1,880	1,737	1,702	1,620	1,622	1,712	0,107

Tabela 4.24 – Valores de desgaste para a amostra E165 e força de 20 N (pré-afiação)

Número de ciclos	Desgaste em mm						
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Média	Desvio padrão
30	0,484	0,388	0,490	0,385	0,502	0,450	0,058
50	0,620	0,532	0,588	0,650	0,691	0,616	0,060
100	1,004	1,048	1,169	1,193	1,245	1,132	0,102
150	1,511	1,551	1,578	1,478	1,617	1,547	0,055
200	1,698	1,799	1,834	1,735	1,789	1,771	0,054
250	1,925	1,822	1,918	2,002	1,859	1,905	0,069

Para facilitar a análise dos resultados, a Fig. 4.13 mostra o comportamento do desgaste médio dos cinco materiais para diferentes valores de ciclos e força de 20 N.

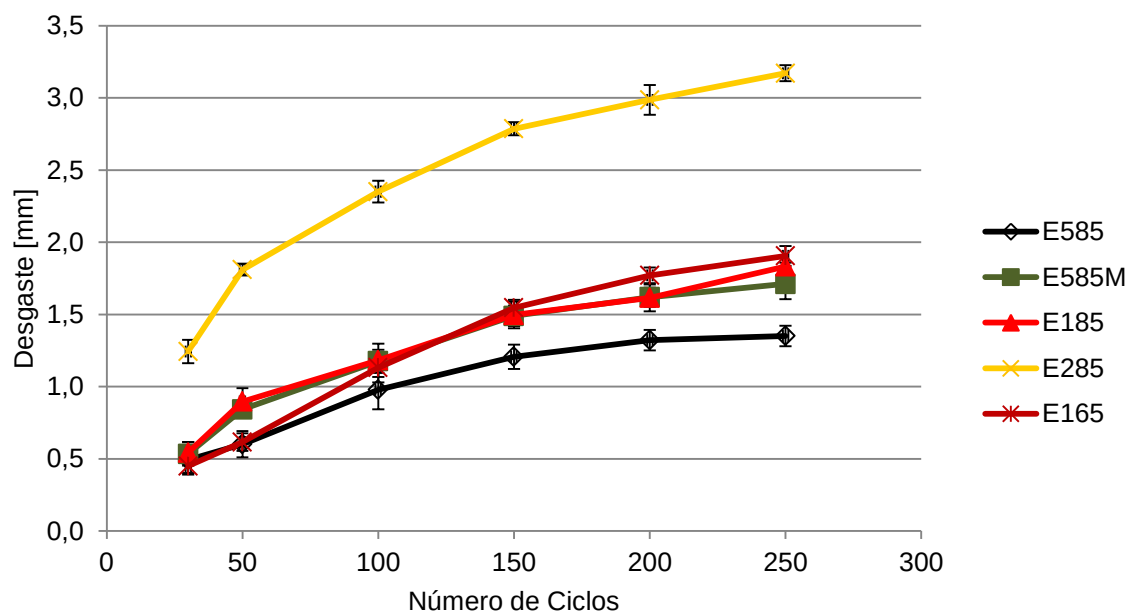


Figura 4.13 – Valores de desgaste para as cinco amostras utilizando 20 N (pré-afiação)

A partir da Fig. 4.13 é possível concluir que os valores médios de desgaste crescem com o aumento do número de ciclos para todos os materiais. Ainda, observa-se que o material E285 apresenta uma resistência ao desgaste menor que os outros materiais, enquanto que o material E585 é o mais resistente de todos os materiais testados.

A Tabela 4.25 apresenta os valores de incerteza expandida associados à medição do desgaste das amostras E285, E185, E585M e E165 para uma abrangência de 95%.

Tabela 4.25 – Incerteza expandida da medição de desgaste para as amostras E285, E185, E585M e E165 e força de 20 N antes da afiação (95%)

Número de ciclos	Incerteza expandida (U) em mm			
	E285	E185	E585M	E165
30	0,100	0,092	0,101	0,073
50	0,052	0,115	0,064	0,075
100	0,094	0,144	0,100	0,127
150	0,058	0,116	0,089	0,069
200	0,130	0,116	0,084	0,068
250	0,069	0,035	0,134	0,087

A Tabela 4.25 mostra que a incerteza expandida associada à medição do desgaste para os diferentes materiais e força de 20 N varia entre 0,035 mm e 0,144 mm. Em todos os casos a variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a variabilidade dos valores de desgaste. Ainda, não se observou nenhuma tendência entre os valores de incerteza e o número de ciclos. Em todos os casos, o fator de abrangência é igual a 2,77.

4.4.6. Tempo de duração dos testes de desgaste

A Tabela 4.26 mostra os valores de tempo médio gastos na realização dos testes em função do número de ciclos.

Tabela 4.26 – Tempo de duração dos testes de desgaste

Número de ciclos	Tempo médio (s)	Desvio padrão (s)
30	56,0	2,6
50	94,4	3,1
100	188,0	2,2
150	280,8	2,0
200	375,0	2,4
250	469,2	2,5

Na Tabela 4.26 observa-se que o tempo de execução do teste para todos os valores de número de ciclos avaliados é pequeno, alcançando o valor máximo de $(469,2 \pm 5,0)$ segundos para 250 ciclos, considerando uma confiabilidade de 95,45%. Cabe ressaltar que o cronômetro utilizado não possui certificado de calibração, assim sendo, não foi possível avaliar a incerteza associada à medição do tempo.

A partir da análise dos resultados do experimento fatorial completo e dos tempos de duração dos testes, concluiu-se que, nas condições deste trabalho, para realizar os ensaios de desgaste no SIMCC Portátil devem ser utilizados os seguintes parâmetros: força adicional de 20 N e 200 ciclos.

4.5. Resultados do Controle Dimensional e Geométrico dos Penetradores Pós-lapidação

4.5.1. Dimensões do cume dos penetradores pós-lapidação

A Tabela 4.27 mostra os valores médios de comprimento da aresta e o desvio padrão correspondente para cada penetrador.

Tabela 4.27 – Comprimento das arestas do cume dos penetradores pós-afiação em μm

Penetrador	Estatística	Aresta 1	Aresta 2	Aresta 3	Aresta 4
1	$\bar{V}$	488,5	507,4	488,6	502,3
	s	1,3	1,3	1,5	0,2
2	$\bar{V}$	507,9	508,7	507,2	507,1
	s	1,4	1,1	1,8	1,4
3	$\bar{V}$	510,2	493,6	508,4	492,4
	s	1,9	2,6	0,3	0,6
4	$\bar{V}$	503,6	508,2	501,3	509,8
	s	0,9	0,4	0,9	1,6
5	$\bar{V}$	489,6	491,5	489,8	491,7
	s	1,5	1,6	1,4	1,1
6	$\bar{V}$	496,1	494,9	493,2	492,0
	s	1,2	0,8	1,4	0,8
7	$\bar{V}$	500,0	510,5	498,7	510,1
	s	2,5	0,9	1,6	1,0
8	$\bar{V}$	496,4	491,1	494,6	492,8
	s	1,2	1,2	1,2	1,0
9	$\bar{V}$	492,8	490,3	492,3	488,6
	s	1,0	0,9	2,2	1,4
10	$\bar{V}$	502,4	503,8	500,7	500,1
	s	0,7	0,1	0,3	1,2

Tabela 4.27 - Comprimento das arestas do cume dos penetradores pós-afiação em μm (continuação)

11	$\bar{V}$	511,4	511,9	511,5	512,5
	s	1,2	1,0	0,5	0,5
12	$\bar{V}$	506,1	490,1	504,9	488,6
	s	1,3	0,3	1,5	0,5

A Tabela 4.27 mostra que todos os penetradores estão com dimensões dentro da tolerância especificada ($500 \mu\text{m} \pm 12 \mu\text{m}$). Ainda, os valores do desvio padrão se mostram menores do que aqueles apresentados na Tab. 4.5 (comprimento das arestas pré-afiação). Isto pode ser justificado pelo fato de que o processo de afiação, além de possibilitar a obtenção das dimensões do cume com maior exatidão, proporciona arestas melhor definidas, facilitando o controle dimensional das mesmas. Estes dois resultados ratificam a importância do processo de afiação controlada na fabricação dos penetradores.

A Figura 4.14 mostra quatro imagens do cume do penetrador de número 6 em diferentes estágios do processo de fabricação.

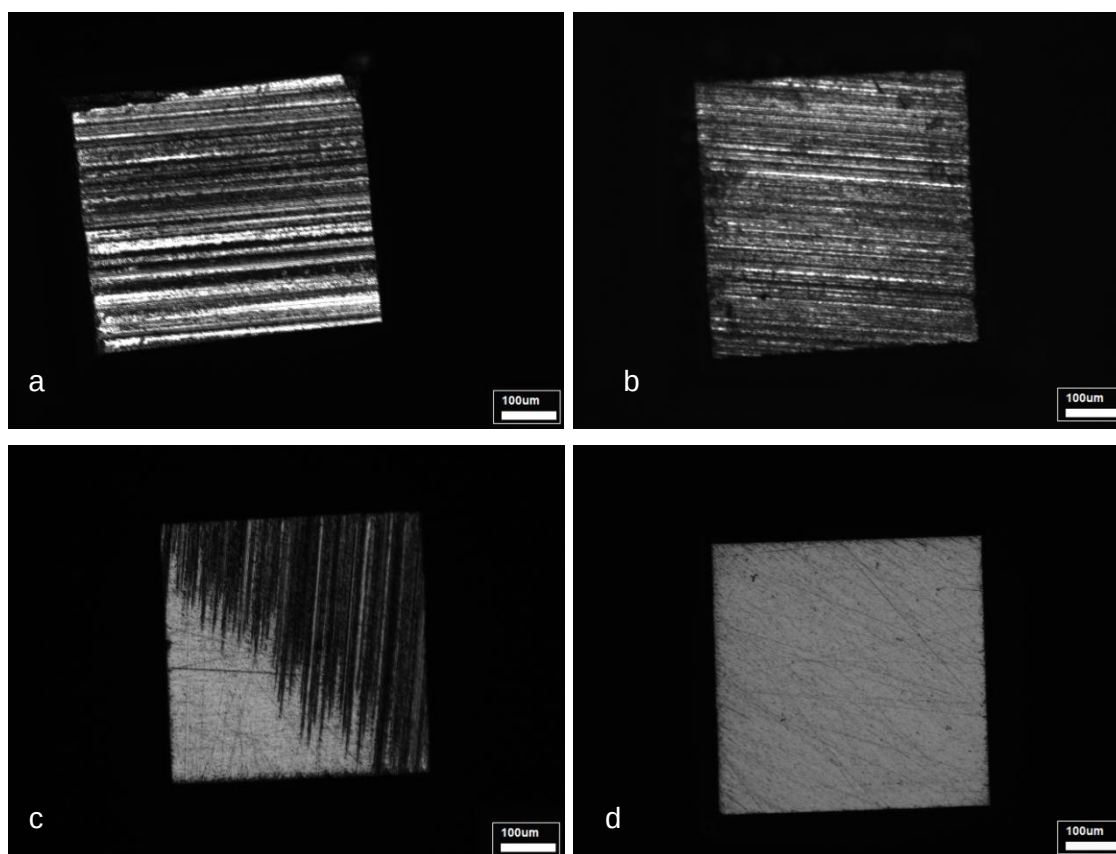


Figura 4.14 – Etapas dos processos de fabricação: a) como fornecido, b) após a afiação, c) durante a lapidação e d) após a lapidação do cume do penetrador 6

A Figura 4.14a mostra o penetrador antes da lapidação. Além de apresentar um formato retangular, a aresta superior mostra sinais de deterioração e a superfície apresenta riscos irregulares provenientes do processo de usinagem anterior. Na Fig. 4.14b, o penetrador já passou pela afiação, sendo possível observar um formato quadrado e uma boa definição das arestas. Riscos ainda podem ser observados, mas estes são de menores dimensões do que aqueles apresentados na Fig. 4.15a.

A Figura 4.14c mostra o cume do penetrador durante o processo de lapidação. Observa-se uma diferença significativa quanto ao acabamento superficial entre a parte lapidada e a ser lapidar. Por fim, a Fig. 4.14d mostra o penetrador lapidado. Além de uma ótima definição das arestas, o acabamento superficial do cume melhorou significativamente, resultando numa superfície espelhada. Imagens do cume similares às apresentadas para o penetrador 6 foram obtidas para todos os outros penetradores e, portanto, não serão aqui apresentadas.

A Tabela 4.28 apresenta os dados referentes à avaliação da incerteza de medição do comprimento da aresta 1 do penetrador de número 1 após a lapidação. Enquanto que a Tab. 4.29 traz os resultados da avaliação da incerteza da medição do comprimento das quatro arestas dos 12 penetradores.

Tabela 4.28 – Incerteza da medição do comprimento da aresta 1 do cume do penetrador 1 após a lapidação (95%)

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa [μm]	TI	DP	GL	CS	Incerteza padrão [μm]
$\Delta s(L_M)$	1,25949	A	Normal	2	1	0,75055
ΔR_M	0,1	B	Retangular	∞	1	0,05773
ΔIC_M	0,37859	A	Normal	∞	1	0,37859
Incerteza padrão combinada (u_c) em μm						0,84261
Grau de liberdade efetivo v_{eff}						3,17
Fator de abrangência k						3,18
Incerteza expandida (U) em μm						2,68157

Na Tabela 4.28 observa-se que o valor de incerteza expandida associada à medição do comprimento da aresta 1 do penetrador de número 1 é de 2,7 μm para $k=3,18$ e 95% de probabilidade de abrangência. A variável que mais influenciou a incerteza final foi a

variabilidade dos valores indicados pelo microscópio ótico, sendo responsável por, aproximadamente, 78% do valor da incerteza padrão combinada.

Tabela 4.29 – Valores de incerteza expandida da medição do comprimento das arestas do cume pós-lapidação (95%)

Penetrador	Incerteza expandida em μm			
	Aresta 1	Aresta 2	Aresta 3	Aresta 4
1	2,6	2,7	4,1	0,8
2	3,8	2,4	4,7	3,9
3	5,0	6,7	0,8	1,2
4	1,8	0,9	1,8	4,2
5	4,1	4,3	3,8	2,3
6	2,5	1,6	3,9	1,6
7	6,4	1,8	4,2	1,9
8	2,5	2,5	2,5	1,9
9	2,2	1,7	5,7	3,9
10	1,3	0,7	0,8	2,5
11	2,5	1,9	1,0	1,0
12	2,8	0,9	4,2	1,0

A partir da Tab. 4.29, conclui-se que a incerteza expandida associada à medição do comprimento das arestas varia de 0,7 μm até 6,7 μm . Igualmente, a variável que mais influenciou a incerteza final foi a variabilidade dos valores indicados pelo microscópio ótico. Verificou-se, ainda, que os valores de incerteza expandida associados à medição do comprimento das arestas do cume dos 12 penetradores é significativamente menor após a lapidação.

4.5.2. Ângulos das faces laterais dos penetradores pós-lapidação

A Tabela 4.30 mostra os valores médios de ângulo e o desvio padrão correspondente para cada penetrador após a lapidação. Observa-se que todos os ângulos das faces laterais estão dentro da tolerância especificada ($145^\circ \pm 30'$). Os valores do desvio padrão foram menores que 7', à exceção do quarto ângulo do penetrador 12, cujo o valor máximo atinge 11'. Esta variabilidade pode ser atribuída ao próprio processo de medição, onde o operador pode constituir uma fonte significativa de erros.

Tabela 4.30 – Valores de ângulos entre a face lateral e a base para os penetradores após a lapidação

Penetrador	A1		A2		A3		A4	
	Média	s	Média	s	Média	s	Média	s
1	144° 54'	0° 06'	144° 40'	0° 02'	144° 59'	0° 01'	145° 08'	0° 07'
2	145° 14'	0° 05'	144° 42'	0° 07'	145° 04'	0° 02'	145° 22'	0° 00'
3	144° 57'	0° 02'	144° 51'	0° 02'	144° 53'	0° 06'	144° 52'	0° 02'
4	145° 03'	0° 00'	144° 54'	0° 06'	145° 13'	0° 02'	144° 51'	0° 02'
5	145° 07'	0° 05'	145° 07'	0° 03'	144° 55'	0° 02'	144° 49'	0° 03'
6	145° 04'	0° 01'	145° 07'	0° 06'	144° 56'	0° 02'	144° 48'	0° 06'
7	144° 53'	0° 03'	144° 47'	0° 03'	145° 05'	0° 04'	144° 48'	0° 03'
8	145° 27'	0° 03'	145° 28'	0° 06'	145° 24'	0° 01'	145° 29'	0° 01'
9	145° 25'	0° 02'	145° 12'	0° 04'	145° 20'	0° 02'	145° 12'	0° 04'
10	145° 28'	0° 02'	145° 20'	0° 02'	144° 54'	0° 04'	145° 05'	0° 05'
11	144° 44'	0° 02'	145° 13'	0° 01'	144° 45'	0° 01'	144° 55'	0° 04'
12	144° 43'	0° 02'	145° 18'	0° 07'	145° 26'	0° 05'	144° 52'	0° 11'

A Tabela 4.31 apresenta os dados referentes à avaliação da incerteza de medição do ângulo 1 do penetrador de número 1.

Tabela 4.31 – Incerteza da medição ângulo entre a face lateral e a base 1 do penetrador 1 pós lapidação (95%)

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	Incerteza padrão
$\Delta s(L_{pp})$	35° 06'	A	Normal	2	1	0° 04'
ΔR_{pp}	0° 01'	B	Retangular	∞	1	0° 01'
ΔIC_{pp}	0° 00'	B	Normal	11	1	0° 01'
Incerteza padrão combinada (u_c)						0° 04'
Grau de liberdade efetivo v_{eff}						2,16
Fator de abrangência k						4,30
Incerteza expandida (U)						0° 15'

Na Tabela 4.31 observa-se que o valor de incerteza expandida associada à medição do ângulo é de $0^{\circ} 15'$ para $k=4,30$ e 95% de probabilidade de abrangência. A variável que mais influenciou a incerteza final foi a variabilidade dos valores indicados pelo projetor.

De forma similar foi estimada a incerteza da medição dos ângulos dos 12 penetradores. Os resultados obtidos são apresentados na Tab. 4.32.

A partir da Tab. 4.32, conclui-se que a incerteza expandida associada à medição do ângulo das faces é menor ou igual a $0^{\circ} 17'$, à exceção do quarto ângulo do penetrador de número 12 cuja incerteza assume o valor máximo de $0^{\circ} 27'$.

Tabela 4.32 – Valores de incerteza expandida associada à medição dos ângulos entre a face lateral e a base de todos os penetradores após a lapidação (95%)

Penetrador	A1		A2		A3		A4	
	U	k	U	k	U	k	U	k
1	$0^{\circ} 15'$	4,30	$0^{\circ} 04'$	3,19	$0^{\circ} 15'$	2,18	$0^{\circ} 17'$	4,30
2	$0^{\circ} 12'$	4,30	$0^{\circ} 17'$	4,30	$0^{\circ} 04'$	3,19	$0^{\circ} 01'$	1,99
3	$0^{\circ} 04'$	3,19	$0^{\circ} 04'$	3,19	$0^{\circ} 15'$	4,30	$0^{\circ} 04'$	3,19
4	$0^{\circ} 01'$	1,99	$0^{\circ} 15'$	4,30	$0^{\circ} 04'$	3,19	$0^{\circ} 04'$	3,19
5	$0^{\circ} 12'$	4,30	$0^{\circ} 17'$	4,30	$0^{\circ} 08'$	4,30	$0^{\circ} 07'$	4,30
6	$0^{\circ} 02'$	2,18	$0^{\circ} 15'$	4,30	$0^{\circ} 04'$	3,19	$0^{\circ} 15'$	4,30
7	$0^{\circ} 05'$	3,18	$0^{\circ} 15'$	4,30	$0^{\circ} 02'$	2,18	$0^{\circ} 05'$	4,30
8	$0^{\circ} 05'$	4,30	$0^{\circ} 15'$	4,30	$0^{\circ} 04'$	3,19	$0^{\circ} 12'$	4,30
9	$0^{\circ} 04'$	3,19	$0^{\circ} 07'$	4,30	$0^{\circ} 04'$	3,19	$0^{\circ} 07'$	4,30
10	$0^{\circ} 04'$	3,19	$0^{\circ} 04'$	3,19	$0^{\circ} 07'$	4,30	$0^{\circ} 12'$	4,30
11	$0^{\circ} 04'$	3,19	$0^{\circ} 02'$	2,18	$0^{\circ} 02'$	2,18	$0^{\circ} 07'$	4,30
12	$0^{\circ} 04'$	3,19	$0^{\circ} 17'$	4,30	$0^{\circ} 12'$	4,30	$0^{\circ} 27'$	4,30

4.5.3. Rugosidade do cume do penetrador pós-lapidação

As Figuras 4.15 e 4.16 mostram os gráficos da área medida para os penetradores 3 e 10, respectivamente.

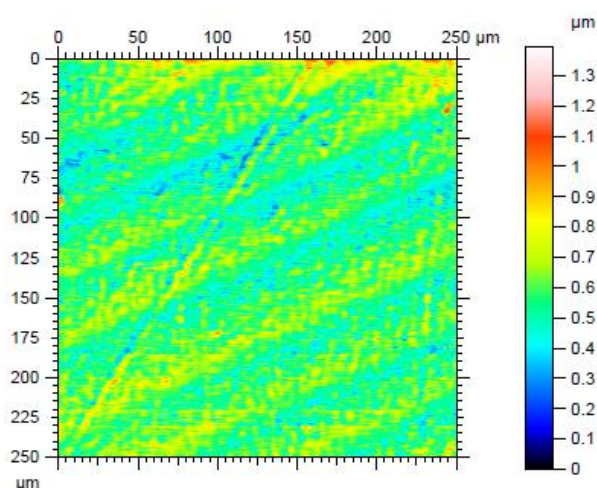


Figura 4.15 – Área do cume do penetrador 3 após a lapidação

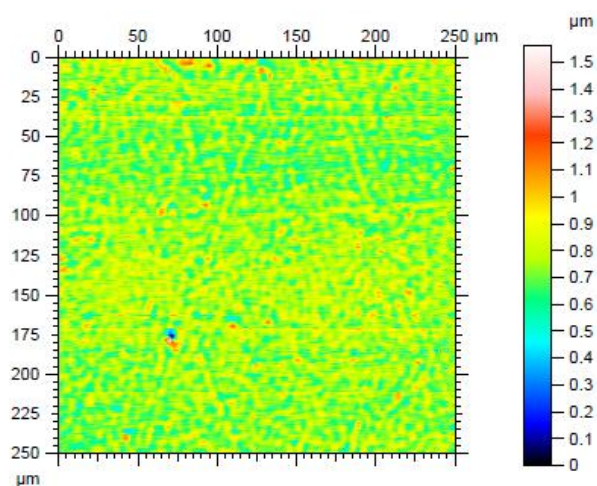


Figura 4.16 – Área do cume do penetrador 10 após a lapidação

A medição da rugosidade pós-lapidação mostrou superfícies com acabamentos superficiais mais homogêneos e melhores do que aqueles apresentados na medição pré-lapidação, evidenciados pela menor quantidade de cores presentes na imagem obtida. A Tabela 4.33 traz os valores de rugosidade para os penetradores pós-lapidação.

Tabela 4.33 – Valores de rugosidade do cume para todos os penetradores pós-lapidação

Penetrador	Sq [μm]	Sa [μm]	Sp [μm]	Sv [μm]	Sz [μm]	Ssk	Sku
1	0,11	0,08	0,82	0,58	1,40	0,43	4,27
2	0,09	0,07	0,59	0,54	1,13	0,17	4,39
3	0,09	0,07	0,36	0,39	0,74	-0,08	2,87
4	0,18	0,12	1,76	1,16	2,92	1,02	9,57
5	0,07	0,06	0,43	0,43	0,86	0,07	3,68
6	0,10	0,07	0,81	0,75	1,57	0,23	3,99

Tabela 4.33 – Valores de rugosidade para todos os penetradores pós-lapidação (continuação)

7	0,09	0,07	0,81	0,57	1,38	0,17	5,00
8	0,11	0,08	0,64	0,56	1,20	0,05	3,44
9	0,10	0,08	0,51	0,78	1,29	-0,37	4,33
10	0,10	0,07	0,61	0,57	1,18	-0,22	3,77
11	0,08	0,06	0,58	0,51	1,09	0,00	4,14
12	0,12	0,09	1,06	0,87	1,93	0,27	6,59

A partir da Tab. 4.33 se conclui que o acabamento superficial dos penetradores se apresenta de forma homogênea e melhor quando comparado com os valores apresentados antes dos processos de afiação e lapidação (Tab. 4.9). O Sa, por exemplo, assume valores próximos de 0,10 para a maioria dos penetradores e, em alguns casos, valores bem abaixo disso. Isto mostra que o processo de lapidação se mostrou eficaz, possibilitando melhorar significativamente o acabamento superficial do cume dos penetradores.

A Figura. 4.17 mostra um gráfico comparativo dos valores de Sa antes e após o processo de lapidação, evidenciando a significativa melhora nos valores obtidos.

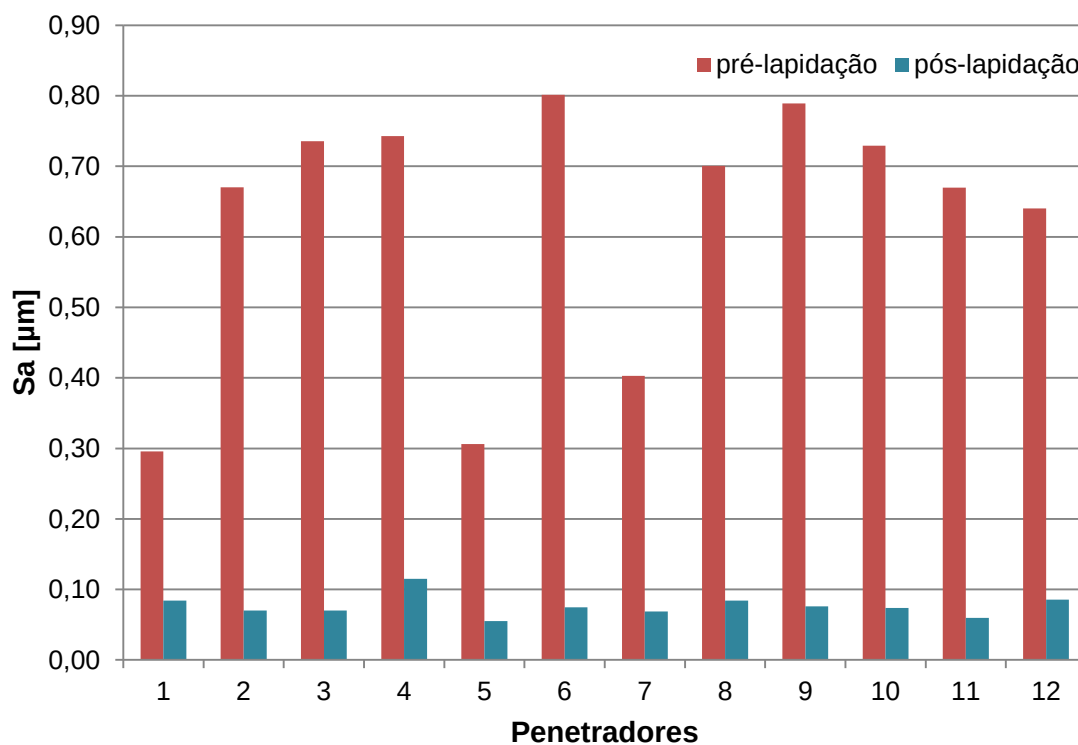


Figura 4.17 – Gráfico comparativo entre a rugosidade do cume dos penetradores

A Figura 4.18 mostra que o valor do parâmetro S_a diminuiu significativamente para todos os cumes dos 12 penetradores, esta redução foi de até 80% (para o penetrador de número 2). Isto mostra que o processo é capaz de atender a especificação mínima de $0,2\ \mu\text{m}$ para a rugosidade.

Além dos valores dos parâmetros superficiais, também foram registrados os valores de parâmetros considerando apenas um perfil (Fig. 4.18). Para tanto foi escolhido aleatoriamente um perfil pertencente à superfície avaliada.

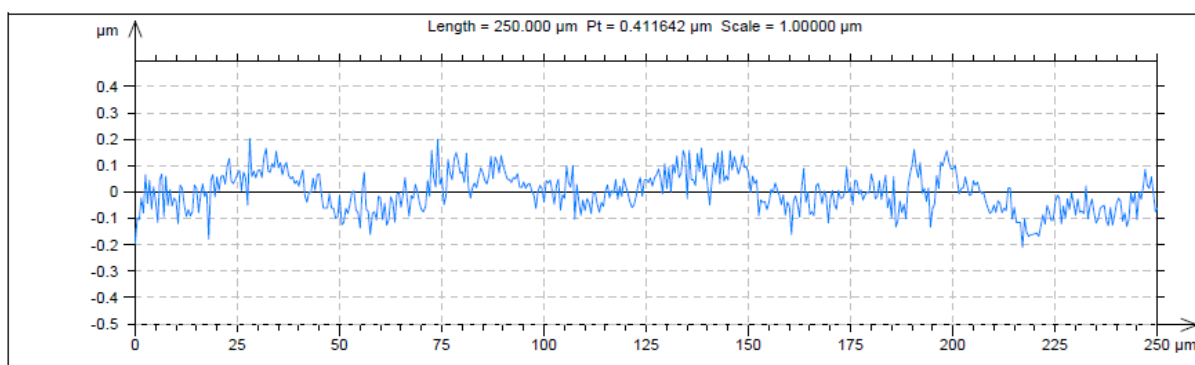


Figura 4.18 – Perfil de rugosidade para o cume do penetrador 1 pós-lapidação

Na Figura 4.19 é possível observar uma distribuição mais suave de picos e vales quando em comparação com o perfil antes da lapidação. A Tabela 4.34 mostra os valores dos principais parâmetros de rugosidade para o perfil avaliado.

Tabela 4.34 – Valores de rugosidade para o cume do penetrador 1 pós-lapidação

Parâmetro	Valor [μm]
R_q	0,05
R_a	0,04
R_z	0,22
R_{Sm}	6,24

Quando comparados os valores de rugosidade (R_a , R_q e R_z) encontrados no perfil para o penetrador 1 pré-afiação e pós-lapidação, pode-se dizer que estes também são significativamente menores como mostra a Fig. 4.19.

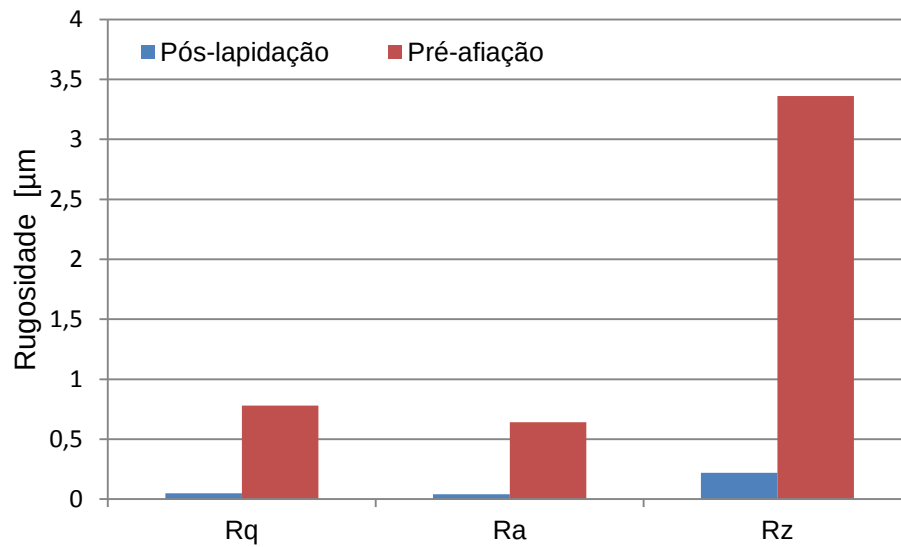


Figura 4.19 – Valores de rugosidade para o perfil pré e pós-lapidação para o penetrador 1

A redução observada na rugosidade, na Fig. 4.19, foi de mais de 90% para todos os parâmetros. Cabe ressaltar que a redução dos valores dos parâmetros de amplitude é muito importante para peças que trabalham com atrito, uma vez que estes parâmetros são definidos a partir dos valores das ordenadas dos pontos do perfil em relação à linha média.

4.5.4. Rugosidade da face lateral dos penetradores pós-lapidação

As Figuras 4.20 e 4.21 mostram os gráficos de rugosidade para a área avaliada em 2D e 3D na face lateral do penetrador 1 após a lapidação

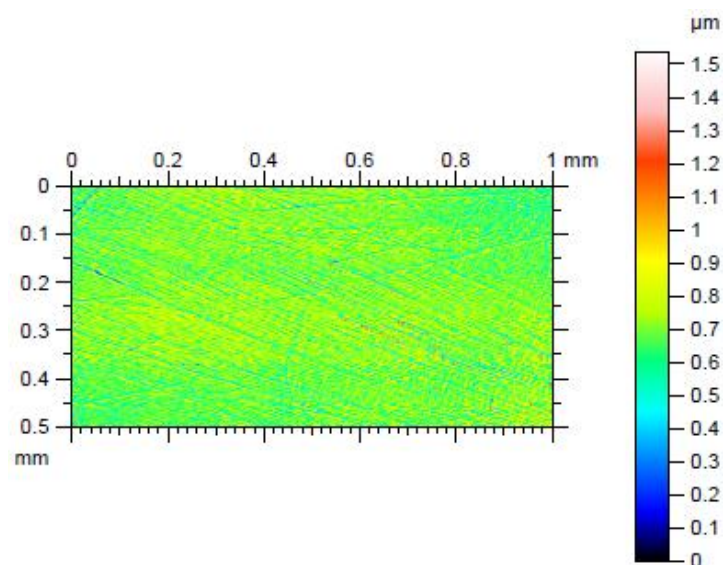


Figura 4.20 – Área medida na face lateral do penetrador 1 pós-lapidação

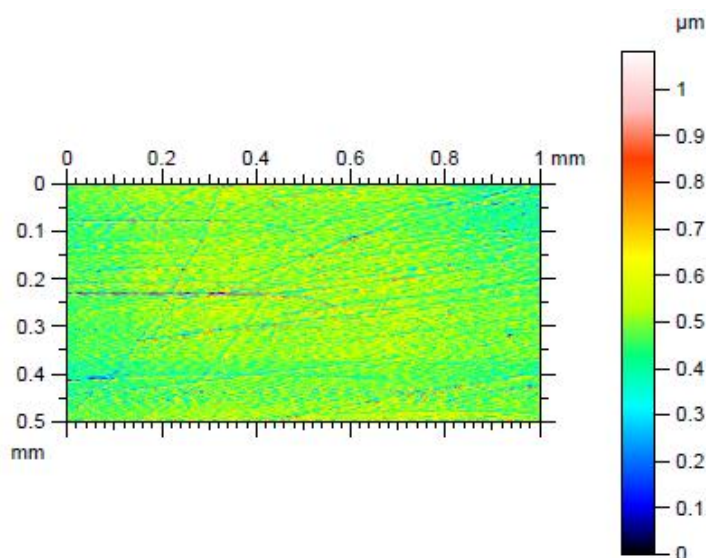


Figura 4.21 – Área medida na face lateral do penetrador 5 pós-lapidação

Pelas Figuras 4.20 e 4.21, é possível observar superfícies com acabamento superficial homogêneo. Mesmo onde é possível observar riscos provenientes do processo de lapidação (isto é, do riscamento causado pelo grão abrasivo), estes são de pequenas dimensões, não contribuindo para elevação do valor de rugosidade superficial.

A Tabela 4.35 traz os valores destes parâmetros para todos os penetradores.

Tabela 4.35 – Valores de rugosidade da face lateral para os penetradores pós-lapidação

Penetrador	Sq [μm]	Sa [μm]	Sp [μm]	Sv [μm]	Sz [μm]	Ssk	Sku
1	0,09	0,07	0,62	0,60	1,22	0,14	3,40
2	0,11	0,07	3,46	3,13	6,59	0,18	3,79
3	0,10	0,08	0,83	0,71	1,54	0,05	3,89
4	0,08	0,07	0,56	0,47	1,03	-0,11	3,12
5	0,06	0,04	0,42	0,44	0,86	0,04	4,16
6	0,11	0,09	0,52	0,57	1,09	-0,11	2,95
7	0,05	0,04	0,47	0,42	0,88	0,03	3,98
8	0,09	0,07	0,58	0,50	1,08	0,10	4,25
9	0,12	0,08	7,31	1,74	9,05	11,12	5,48
10	0,05	0,04	0,50	0,39	0,88	0,09	4,64
11	0,08	0,06	1,15	0,80	1,95	-0,19	5,50
12	0,09	0,07	0,45	0,53	0,97	0,08	3,05

A partir da Tab. 4.35 se conclui que o acabamento superficial das faces laterais do penetrador apresenta valores inferiores àqueles apresentados antes dos processos de retífica (Tab. 4.13), mais homogêneos entre si e abaixo da tolerância de projeto de $0,2 \mu\text{m}$.

A Figura 4.22 mostra um gráfico comparativo dos valores de S_a das faces antes e após o processo de lapidação evidenciando a significativa melhora nos valores obtidos.

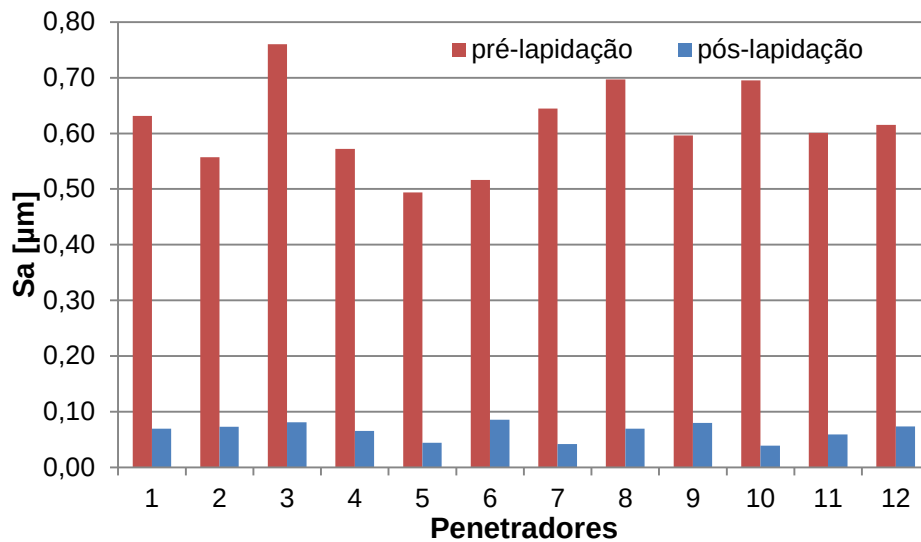


Figura 4.22 – Gráfico comparativo entre a rugosidade S_a das faces dos penetradores

A Figura 4.22 mostra que o valor do parâmetro S_a diminuiu significativamente, também, para todas as faces avaliadas. Entretanto, quando comparados os valores de S_a da face com os encontrados para o cume, se conclui que o acabamento deste último é melhor. Resultados similares foram observados para todas as faces avaliadas. Pode-se explicar essa melhor rugosidade do cume devido à sua menor dimensão, o que facilita o processo de usinagem.

Além de parâmetros superficiais, também foram colhidos parâmetros de perfil. Este perfil (Fig. 4.23) foi aleatoriamente escolhido.

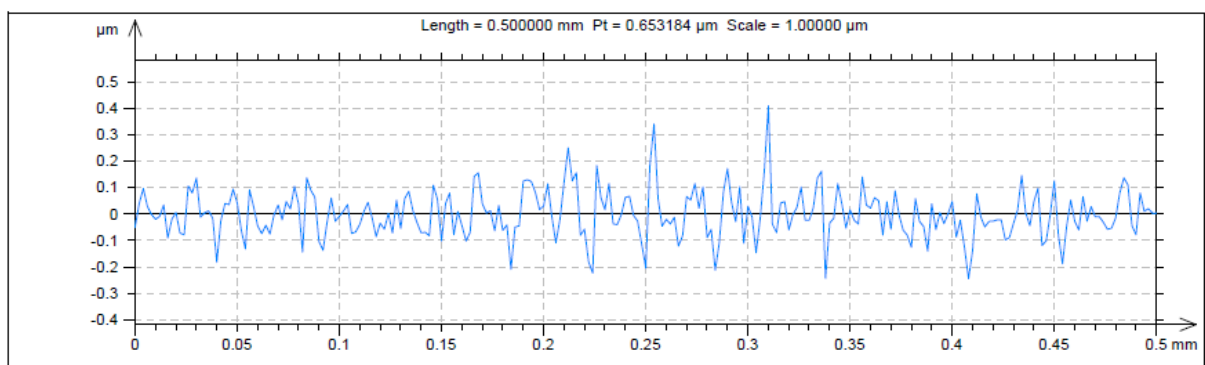


Figura 4.23 – Perfil de rugosidade da face para o penetrador 1 pós-lapidação

Na Figura 4.23 é possível observar uma distribuição homogênea dos picos e vales, característica das consequências do processo de lapidação. Ao comparar este perfil com aquele pertencente ao cume (Fig. 4.18) observa-se a uma maior frequência de picos e vales e que estes são mais acentuados. Este fato pode ser justificado porque os valores de rugosidade das faces antes da lapidação eram maiores que os do cume, assim sendo, ao submeter estas faces a um processo de lapidação similar aos do cume, não se atingiu o mesmo acabamento superficial. Uma alternativa, neste caso, pode ser aumentar o tempo de lapidação para as faces.

Os valores dos parâmetros de rugosidade para este perfil são mostrados na Tab. 4.36.

Tabela 4.36 – Valores de rugosidade para a face do penetrador 1 pós-lapidação

Parâmetro	Valor [μm]
Rq	0,08
Ra	0,06
Rz	0,50
RSm	0,01

Comparando estes valores de rugosidade (Ra, Rq e Rz) encontrados no perfil de uma face do penetrador 1 pós e pré-lapidação pode-se dizer que estes, também, são significativamente menores, como mostra a Fig. 4.24.

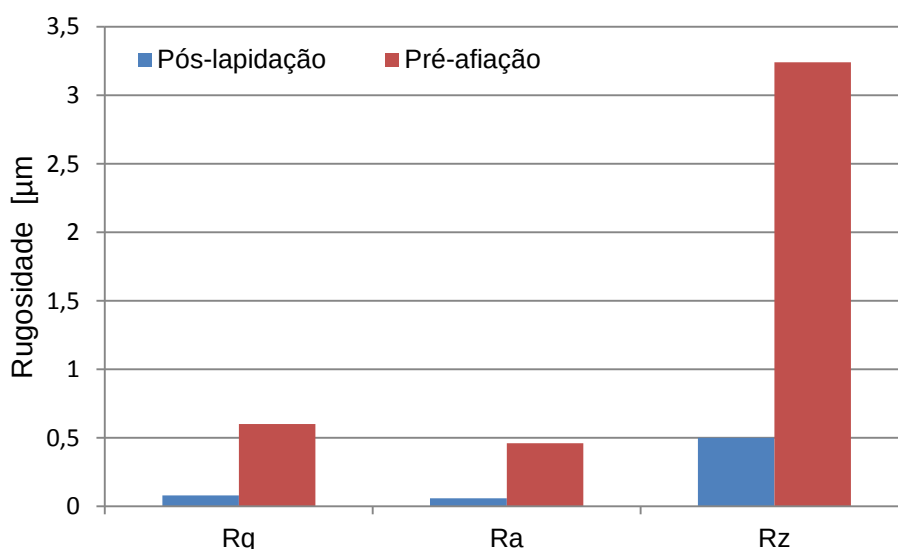


Figura 4.24 – Valores de rugosidade para o perfil pré e pós-lapidação

A redução observada, na Fig. 4.25, foi de mais de 90% para os três parâmetros.

4.6. Resultados dos Testes Finais de Desgaste Abrasivo

A Tabela 4.37 mostra os resultados dos testes finais de desgaste abrasivo, realizados com os penetradores após os processos de lapidação. Foram realizados cinco testes de desgaste para cada amostra sob as condições previamente estabelecidas nos pré-testes: força externa de 20 N e 200 ciclos da roda de penetradores.

Tabela 4.37 – Valores de desgaste para as cinco amostras usando 20 N e 200 ciclos

Amostra	Desgaste em mm						
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Média	s
E585	1,496	1,435	1,503	1,429	1,455	1,46	0,034
E585M	1,665	1,610	1,601	1,680	1,674	1,65	0,037
E165	1,885	1,925	1,875	1,918	1,876	1,90	0,024
E185	1,950	1,934	1,896	1,920	1,915	1,92	0,020
E285	2,884	2,865	2,789	2,864	2,826	2,85	0,038

A partir da Tab. 4.37 e da Fig. 4.25, é possível observar que os valores médios de desgaste das amostras não foram muito diferentes daqueles apresentados nos pré-testes (Tab. 4.21 a Tab. 4.24). Isto se justifica porque não foram propostas mudanças na macrogeometria ou na macrodimensão dos penetradores. Observa-se que, para as amostras E585, E585M, E165, E185, os valores foram ligeiramente maiores, enquanto que, para a amostra E285, ele foi ligeiramente menor.

Entretanto, os valores do desvio padrão foram significativamente menores àqueles obtidos nos pré-testes (Tab. 4.38). Isto evidencia uma melhor precisão dos ensaios de desgaste e esta precisão se traduz como maior confiabilidade e uma repetibilidade melhor dos resultados apresentados pelo dispositivo.

Tabela 4.38 – Diminuição do desvio padrão dos testes de desgaste

Amostra	Pré-afiação [μm]	Pós- Lapidação [μm]	Redução Percentual (%)
E585	0,071	0,034	51,77
E585M	0,067	0,037	44,04
E165	0,054	0,024	55,72
E185	0,093	0,020	78,15
E285	0,104	0,038	63,46

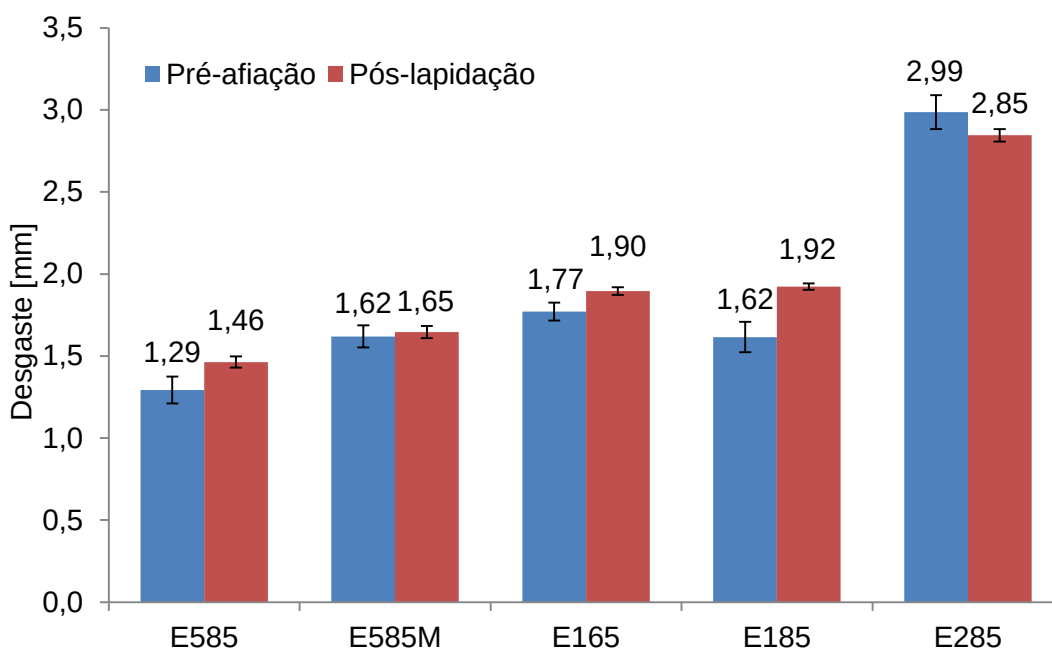


Figura 4.25 – Valores de desgaste das 5 amostras após 200 ciclos antes e após a lapidação

A Tabela 4.39 mostra os valores de incerteza expandida associados à medição do desgaste das amostras durante a realização dos testes finais, para uma abrangência de 95%.

Tabela 4.39 – Incerteza expandida da medição de desgaste obtido nos testes finais (95%)

Número de ciclos	Incerteza expandida (U) em mm				
	E585	E285	E185	E585M	E165
200	0,043	0,048	0,027	0,047	0,031

A Tabela 4.39 mostra que a incerteza expandida associada à medição do desgaste para os diferentes materiais e força externa de 20 N assume valores entre 0,027 mm e 0,048 mm para k igual a 2,77. Em todos os casos a variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a variabilidade dos valores de desgaste indicados pelo relógio comparador utilizado.

A Figura 4.26 mostra os valores de incerteza expandida associada aos valores de desgaste obtidos nos pré-testes (penetradores não controlados) e nos testes finais (penetradores usinados).

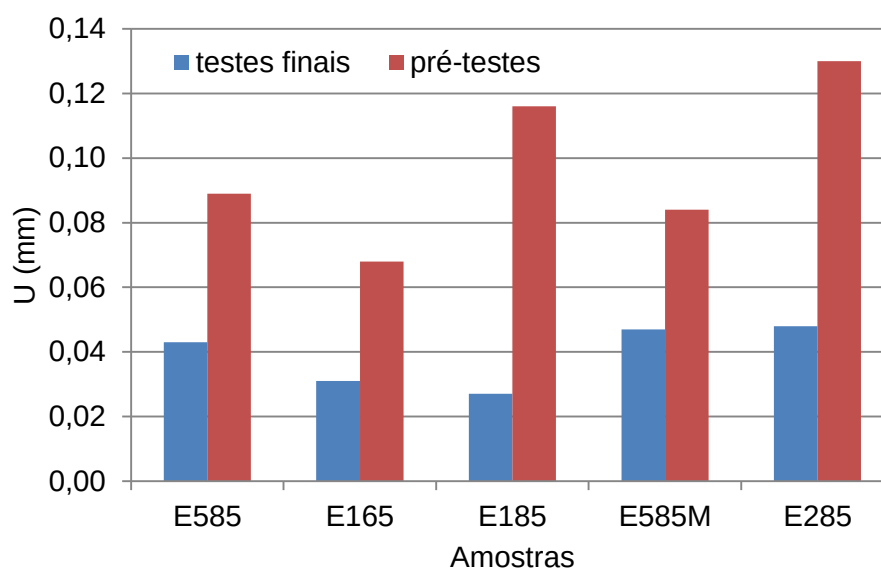


Figura 4.26 – Valores de incerteza expandida para as 5 amostras nos pré-testes e nos testes finais após 200 ciclos

Observa-se na Fig. 4.26 que os valores de incerteza foram reduzidos de forma considerável. Esta redução foi da ordem de 51%, 63%, 76%, 44% e 54% para as amostras E585, E285, E185, E585M e E165, respectivamente. Assim sendo, pode-se concluir que a qualidade dos valores de desgaste obtidos após a lapidação é maior.

A excelente precisão dos resultados dos testes de abrasão efetuados com os penetradores fabricados neste trabalho evidencia a necessidade, a viabilidade e a eficácia dos processos de afiação e lapidação. Estes processos têm uma importância ímpar para garantir o compromisso com a qualidade e confiabilidade dos testes de abrasão realizados no SIMMC Portátil.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Ao fim deste trabalho, foi possível concluir que:

- Os processos de usinagem propostos para a fabricação dos penetradores (a saber, afiação e lapidação) são adequados e suficientes para se garantir a qualidade dimensional e geométrica dos penetradores utilizados no SIMMC Portátil. A afiação foi determinante para atender as tolerâncias dimensionais indicadas para o comprimento das arestas do cume do penetrador e o ângulo da face lateral da ponta do penetrador. Por sua vez, a lapidação garantiu o atendimento das tolerâncias impostas para a rugosidade do cume do penetrador e das faces laterais da ponta do penetrador diminuindo os valores de rugosidade de forma significativa.
- A análise de variância dos ensaios do planejamento fatorial completo evidenciou que os fatores de controle ou variáveis de entrada, número de ciclos e força externa, influenciam significativamente os valores da variável resposta (desgaste) obtidos nos ensaios de abrasão.
- A força externa de 20 N é adequada para realizar os ensaios de desgaste no SIMMC Portátil, pois a trilha de desgaste resultante é homogênea, possibilitando a medição de forma adequada. Enquanto que forças externas de 10 N ou menos não são adequadas, pois as trilhas de desgaste produzidas no ensaio de abrasão não são homogêneas levando a resultados imprecisos e pouco confiáveis. Por sua vez, forças externas iguais ou maiores que 30 N não são viáveis, pois geram o travamento do dispositivo, uma vez que o motor de passo não possui torque suficiente para vencer a resistência do material.
- No que se diz respeito ao número de ciclos da roda de penetradores, conclui-se que 200 ciclos são suficientes para se produzir uma trilha profunda o bastante para

avaliar o desgaste experimentado pela amostra. Neste caso o tempo de duração do ensaio é de 375 s, aceitável para a realização dos mesmos em campo.

- O ensaio de abrasão realizado com o SIMMC Portátil utilizando os penetradores fabricados neste trabalho é capaz de fornecer resultados condizentes com a resistência específica de cada material. A calha polimérica E285, por exemplo, apresentou trilhas de desgaste de profundidade de 2,850 mm, enquanto outros materiais mais resistentes, como o E585, apresentaram valores próximos de 1,460 mm.
- Os ensaios de abrasão efetuados com os penetradores que passaram pelos processos de afiação e lapidação apresentaram resultados mais precisos e confiáveis do que aqueles obtidos durante a realização dos ensaios com penetradores que não foram usinados.
- O cálculo da incerteza associada à medição de desgaste trouxe maior credibilidade para os resultados obtidos, uma vez que permitiu observar a melhora na precisão destes.

PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- Otimizar o sistema de instrumentação para minimizar o erro de posição de parada da roda de penetradores, a fim de diminuir a contribuição desta fonte de erros nos valores de desgaste e na incerteza associada à medição.
- Elaborar as folhas de fabricação dos penetradores, objetivando a fabricação em série dos mesmos.
- Realizar ensaios de longa duração para estimar a vida útil dos penetradores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. Edgard Blucher, 1977. 295p.

ARENCIBIA, R. V., MORAES, J. O., FRANCO, S.D. **Relatório de Medição de Penetradores 1 a 16**, Documento do Sistema de Gestão da Qualidade do LTAD, 22 páginas. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6158. **Sistemas de Tolerâncias e Ajustes**, Rio de Janeiro, Brasil. 1995. 79 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6409. **Tolerâncias Geométricas – Tolerâncias de Forma, Orientação, Posição e Batimento – Generalidades, Símbolos, Definições e Indicações em Desenho**, Rio de Janeiro, Brasil. Maio 1997. 19 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287, Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Set. 2002. 18p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR ISO 4288, Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil-regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**. 2008. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC 17025, Requisitos gerais para competência de laboratório de ensaios e calibrações**. Rio de Janeiro, Brasil, 2005. 20p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR ISO 3274, Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Características nominais de instrumentos por contato (pontas de apalpação)**. 2008. 13p.

American Society for Testing and Materials (ASTM). **D1242-95a Standard Test Methods for Resistance of Plastic Materials to Abrasion**. 1995. 7p.

BLAU, J. P. **Friction, Lubrication and Wear Technology**. ASM Handbook. v.18. 1995. 220p.

BHUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook**, Volume One. Chapter 2: Surface roughness analysis and measurement techniques, 2002, pp. 49-120.

BROOKES, K. J. A. **World Directory and Handbook of HARDMETALS and HARDMATERIALS**; Six edition; International Carbide Data; United Kingdom; 1996.

BUTTERY, T.C.; ARCHARD, J.F. **Grinding and abrasive wear**, Proc. Inst. Mech. Eng., v. 185, 1970/71. 537p-551p

CHANDRASEKAR, S., SHAW, M.C.; BRUSHAN, B. Comparison of grinding and lapping of ferrites and metals, **Journal of Engineering for Industry**, v.109, 1987.

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**, V. 49, 2011, pp 335-339.

DE BEERS INDUSTRIAL DIAMOND DIVISION. **Introduccion a los materiales De Beers PCD y PCBN para herramientas de corte**. 1998.

DE MELLO, J. D. B. **Struture Metalurgique et Caracterization de l'Abrasion dès Fontes Blaches au Chrome**. Tese de Doutorado, L'Institute National Polytechnique de Grenoble. 1983.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 8589 - Manufacturing processes chip removal - Part 14: Honing and superfinishing; Classification, subdivision, terms and definitions**. 2003.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 8580 - Rough summary for energy intensity of production processes**. Berlin: Beuth Verlag, 1985.

DUARTE, D. **Tribologia, Lubrificação e Mancais de Deslizamento**. 2005.

FRANCO, S.D., MORAES, J.O., ARANTES, M. **Avaliação “Insitu” da Resistência ao Desgaste Abrasivo de Calhas Protetoras de Linhas Flexíveis**. Relatório Final de Projeto do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste. 2007.

FRANCO, S.D., MORAES, J.O. **Relatório Interno 1 para Petrobrás – SIMMC Portátil**. Relatório 1 de Projeto do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste. 11 p. 2011.

FRANCO, S.D., MORAES, J.O. **Relatório Interno 2 para Petrobrás – SIMMC Portátil**. Relatório 2 de Projeto do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste. 11 p. 2013.

GATES, J.D. **Two-body and three-body abrasion: a critical discussion**. V.215, 1998, pp. 139-146.

HUTCHINGS, I.M. Tribology. **“Friction and Wear of Engineering Materials”**, 1ª ed. Arnold, London, 1992. 273 pg.

INMETRO, **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados**. Rio de Janeiro, Brasil, 2012, 78 p.

ISO TAG 4/WG 3, 2008, **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**, Geneva Switzerland, 131p.

JOST, H. P., 1966, **Lubrication (Tribology) – A Reporter of the Present Position and Industry’s Needs**. Dep. of Education and Science, H. M. Stationary Office, London.

KAYSER JR, D.L., 2003, **Análise Dinâmica de Linhas Flexíveis com Elemento de Pórtico não Linear Geométrico Híbrido**, Dissertação de Mestrado Eng. Civil UFRJ, 275 pgs.

KÖNIG W.; MESSER J. **Dressing conventional grinding whells with polycrystalline diamond**. Industrie-Anzeiger 102, 35-38, 1980.

LAMY, B. **Contribution a l'étude phenomenologique de l'elevation de matiere et de la deformation des surfaces antagonistes dans lês processus d'abrasion**. Tese de Doutorado, Univerité de Haute Alsace, França. 1982

LAPMASTER. **Model 15 - Precision Open Face Flat Lapping Machine**. Disponível em: <http://www.lapmaster.com/files/docs/15LMOF2011.pdf> . Fevereiro 2013. 2 p.

LAWN, B. R. and FULLER, E. R. Equilibrium penny-like cracks in indentation fracture. Journal of Mathematical Science. v. 10, 1975. pp 2016-2024.

LEACH, R. **Measurement Good Practice guide: The measurement of surface texture using stylus instrument**. United Kingdom, 2001.

LINK, W. **Metrologia mecânica. Expressão da incerteza de medição**. 1ª edição. Editorial MITUTOYO Sul América Ltda. Brasil. 1997.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. 2. ed. São Paulo. 2000.

MARINESCU, I.; INASAKI, I. ULHMANN, E. **Handbook of machining with grinding wheel**, CRC Press, 596 p. 2007

MORAES, J. O., 2005. **Avaliação da Resistência ao Desgaste Abrasivo de Risers Flexíveis – Proposição de uma Nova Metodologia de Teste**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

MORAES, M. A. F. **Desenvolvimento de Planilhas Eletrônicas para Calcular Incerteza de Medição**. 2011. 101 f. Monografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PAES, M. T. P., FRANCO, S. D., MORAES, J. M., MOTA, A. M. R, LONTRA FILHO, L. L. **Evaluation of Abrasive Wear of Polymeric Materials Using Single-Pass Pendulum Scratching**. 2002. OMAE'02, 6 pgs.

PIRATELLI FILHO, A.; **Rugosidade superficial. Palestra.** 3 Seminário de metrologia. FEMEC-UFU. 16 1 18 de maio de 2011. 41p. Disponível em <http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/metrologia/?op=sobre>.

POON, C.Y.; BHUSHAN, B. **Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler.** Wear 190, 1995, pp. 76-88.

RAMOS NETO, F. F. **Desgaste Abrasivo em Materiais Poliméricos Utilizados na Proteção de Linhas Flexíveis de Condução de Petróleo.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2003, 175 pg.

REDE METROLÓGICA RS. **Incerteza de medição: guia prático do avaliador de laboratórios. Procedimento do sistema de gestão da qualidade revisão.** 2009. 32p.

RHEE, H.G., LEE, Y.W. and VORBURGER, T.V.J. **Opt Soc Korea**, 10, 2006, 48p.

SEDLAČEK, M.; PODGORNIK, B.; VIŽINTIN, J. Correlation between standard roughness parameters skewness and kurtosis and tribological behaviour of contact surfaces. **Tribology International**, v. 48, 2012, p. 102-112.

SMITH, G. T. **Industrial metrology: Surfaces and Roundness.** London: Springer, 2002. 352p.

SOUSA, A.R., WANDEK, M. Deficiências da metrologia industrial no Brasil no correto entendimento do GD&T e na definição de estratégias de medição consistentes para o seu controle geométrico, **V CONGRESSO BRASILEIRO DE METROLOGIA.** Salvador, Bahia – Brasil. 2009. 5p.

SOUZA, A.J. **Processos de Fabricação por Usinagem.** Apostila UFRGS. 2011

TAYLOR HOBSON. **Surface Finish Metrology.** 2003. 329 slides.

TOUGE, M.; MATSUO, T. Removal rate and surface roughness in high-precision lapping of Mn-Zn ferrite, **Annals of the CIRP**, v. 45, pp. 307-310. 1996.

VORBURGER, T.B., RHEE, H.G., RENEGAR, T.B., SONG, J.F.; ZHENG, A. **Int J Adv Manufacture Technology**, 33, 2007, 100p.

WECKENMANN, A., KNAUER, M., KILLMAIER, T. Uncertainty of coordinate measurements on sheet-metal parts in the automotive industry. **Journal of Material Processing**. 1997.

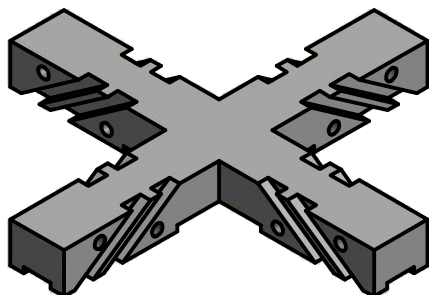
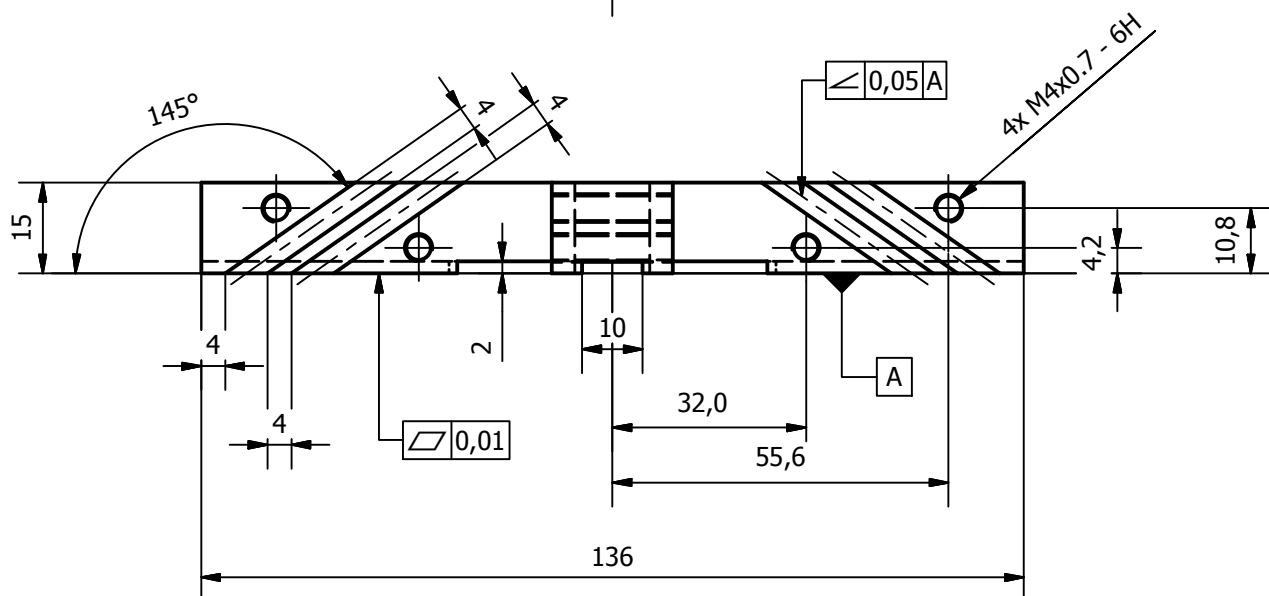
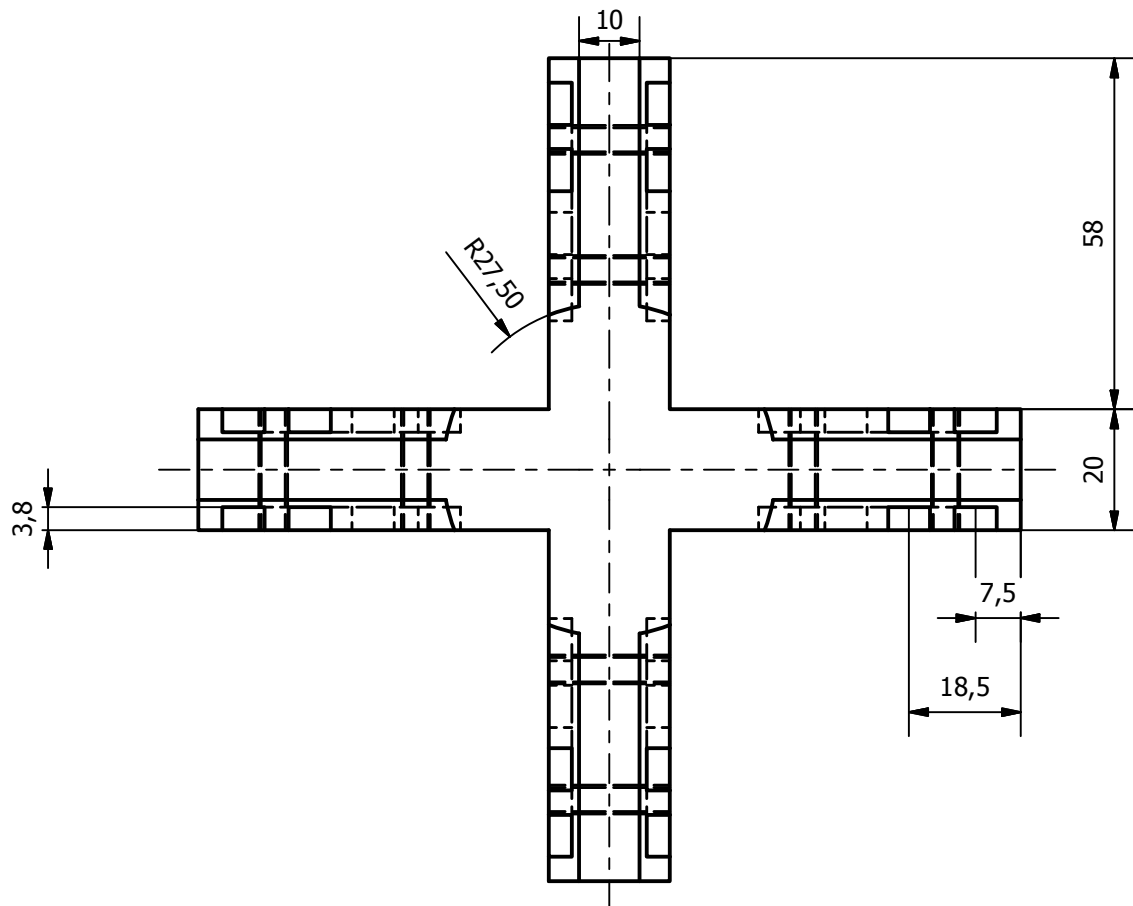
ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and Wear of Materials**, Amsterdam, Elsevier, 1987. 560p.

Anexos

Anexo 1: Planificação do Porta-penetradores em forma de cruzeta

Anexo 2: Planificação da Peça 1 do Porta-penetradores cilíndrico

Anexo 3: Planificação da Peça 2 do Porta-penetradores cilíndrico

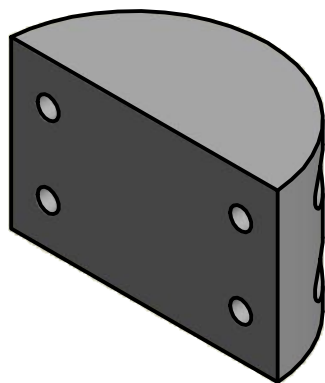
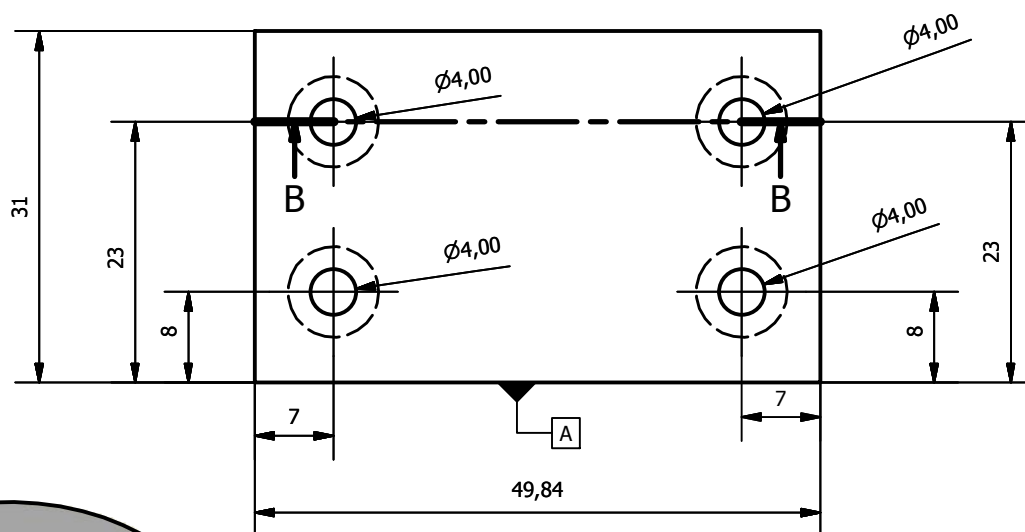
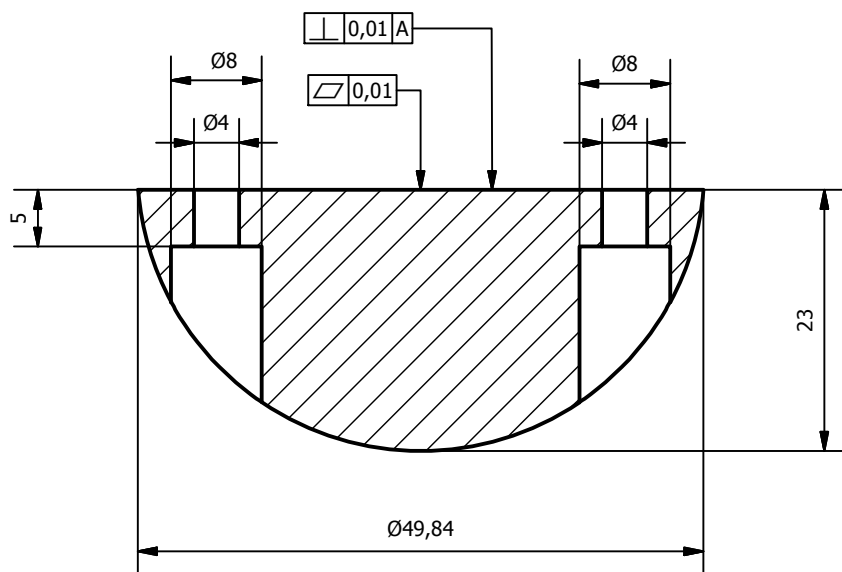


Obs: na parte inferior, há dois tipos de alívio: um circular a partir do centro e outro retangular ao longo dos braços.

 Universidade Federal de Uberlândia  Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste	Programa:	Projeto: SIMMC Portátil	Subprojeto:	Equipamento:		
	Projetado por: L. Magalhaes	Revisado por:	Aprovado por: J. Moraes	Material: ANSI 304		
	Título: Porta-penetradores em forma de cruzeta			Escala: 4:5	Quant.:	Revisão:
	Item:			Data:	Folha:	

As informações deste documento são de propriedade do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD), sendo proibida a utilização fora de sua finalidade.

B-B (3:2)



 Universidade Federal de Uberlândia  Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste	Programa:	Projeto: SIMMC Portátil	Subprojeto:	Equipamento: Porta Penetrador		
	Projetado por: L. Magalhães	Revisado por:	Aprovado por: J. Moraes	Material: AISI 304		
	Título: Porta Penetradores Cilíndrico			Escala: 3:2	Quant.: 1	Revisão:
	Item: Porta Penetrador			Data: 25/10/2012	Folha: 1 de 1	

As informações deste documento são de propriedade do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD), sendo proibida a utilização fora de sua finalidade.

Apêndices

Apêndice 1: Certificado de Calibração do Relógio Comparador

Apêndice 2: Certificado de Calibração da Balança

Apêndice 3: Projeto do Penetrador de WC-Co

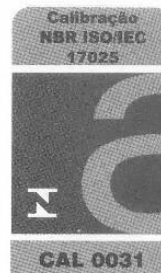
Apêndice 4: Certificado de Calibração do Termo-higrômetro

Apêndice 5: Certificado de Calibração do Interferômetro

Apêndice 6: Certificado de Calibração do Projetor de Perfil

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



Pag.:1/2

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 06206/13

Cliente : FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA.

Endereço : Avenida João Naves Avila, 2121 - Uberlândia- MG Cep: 38408-100

Ordem de serviço: 066.912

1 - Objeto Calibrado

RELÓGIO COMPARADOR DIGITAL

Fabricante: Mitutoyo

Código: 543-691

N°. de Série: 11165713

Faixa nominal : 12,7 mm

Resolução: 0,001 mm

Identificação do proprietário : Não Consta

2 - Padrões utilizados na Calibração:

Calibrador de Relógio Comparador i - Checker

Número : 0060203

Certificado N°. 00716/13 - RBC - Mitutoyo.

Validade : 07/2013

3 - Procedimento de Medição: PML - 0042 - Revisão 3

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

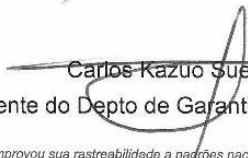
Os " Erros " representam os erros a serem considerados no instrumento no respectivo ponto de medição.

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

O ponto zero foi definido com pressão inicial de 0,2 mm, a partir do início do curso do fuso.

Data da calibração: 13 de Junho de 2013

Data da emissão: 13 de Junho de 2013


Carlos Kazuo Suetake
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. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Ráfio - 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

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 06206/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Pag.:2/2

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

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

Indicação (mm)	Erro (µm)	
	Crescente	Decrescente
0,0	0,0	0,6
0,2	-0,3	-0,2
0,4	-0,2	0,5
0,6	-0,2	0,4
0,8	0,1	0,4
1,0	-0,2	0,1
1,2	-0,2	0,1
1,4	-0,1	0,3
1,6	-0,1	0,3
1,8	-0,1	0,2
2,0	-0,3	0,2
2,5	-0,3	0,1
3,0	0,0	0,1

Indicação (mm)	Erro (µm)	
	Crescente	Decrescente
3,5	-0,5	0,1
4,0	0,1	0,8
4,5	0,1	0,0
5,0	0,2	0,5
6,0	0,2	-0,1
7,0	0,5	0,9
8,0	0,3	0,8
9,0	0,3	0,8
10,0	0,3	0,7
11,0	0,4	0,6
12,0	0,4	0,6
12,7	0,5	0,8

Parâmetros de Análise		Erro (µm)
fe	Erro máximo no sentido crescente	1,0
fges	Erro total (crescente / decrescente)	1,4
fu	Erro de retorno	0,7
U pa	Incerteza expandida para determinação dos parâmetros	1,3

5 - Incerteza de Medição: $U = 0,9 \mu m$

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,01$, o qual para uma distribuição t com $V_{eff} = 339$ 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: $(20,0 \pm 0,5) ^\circ C$

**Balanças Indelt Minas**

Rede Brasileira de Calibração

Laboratório de Calibração de Balança acreditado pelo Inmetro sob Nº 0460

Certificado de Calibração

Nº 1724

Calibração
NBR ISO/IEC
17025

CAL 0460

Solicitante do serviço

Cliente : MARCIO BACCI DA SILVA CAPES / PROEX
Endereço: AVENIDA JOAO NAVES DE AVILA 2121 BLOCO 1M
Cidade: Uberlândia
CNPJ/CPF: 53935578687
Telefone: 34-3239-4016 Fax: 34-3239-4206
Contato: ROSENDA VALDES ARENCIBIA

N.Fantasia : MARCIO BACCI DA SILVA CAPES / Ficha 8398
Bairro : CAMPUS SANTA MONICA
UF : MG CEP : 38400902
Insc. Estadual :
E-mail:
Setor : PROFESSORA

Informações administrativas

Data da Calibração : 16/04/2013

Data da Emissão do Certificado : 23/04/2013

Local da Calibração : Nas dependências do cliente

Nº do Certificado de Calibração : 1724

Objeto de Calibração

Objeto	BALANÇA	Tipo Instrumento	Digital	Fabricante	BEL
Nº de Série :	00417112	Modelo :	MARK 4100		
Carga Máxima (g) :	4.100,00	Resolução (g) :	0,01		
Divisão de verificação (g) :	0,10	Localização :	LABORATORIO		
Classe :	II	Nº do Ativo :	015545		

Padrões utilizados

TAG/ Cód de Identificação	Identificação dos padrões	Rastreabilidade	Validade da Calibração
CJ - 19 - 1mg a 200g	200mg,100g	CERTI 4143/11	12/08/2013
CJ 22 - 200g a 10kg	1kg,2kg	IDRAO BAL.MA 017_07	06/07/2014

Padrões de medição ambiental utilizados

TAG/ Cód de Identificação	Identificação dos padrões	Rastreabilidade	Validade da Calibração
OREGON BAR988HG.T	THG.02	VISOMES LV08296-13-	01/03/2015
OREGON RTG328N	THG.02	VISOMES LV08297-13-	01/03/2015
OREGON BAR988HG.T BARO	THG.02	VISOMES LV08536-13-	04/03/2015

Condições ambientais

Temperatura (°C) :	Umidade Relativa do Ar (%) :	Pressão (h Pa) :	Massa específica do ar (kg/m³) :
22,4 a 22,5	55 a 56	1021	NÃO APLICAVEL

Método de calibração

- A calibração foi realizada através da comparação direta entre o valor de um padrão de referência e a média das leituras indicadas pelo instrumento, conforme procedimento específico PI 5.4 - Calibração de balanças.
- A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição, multiplicada pelo fator de abrangência calculado para cada ponto de medição, o qual para uma distribuição t encontrará, os graus de liberdade, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95,45%.
- A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- Esta calibração não isenta o instrumento do controle estabelecido na regulamentação metrológica.
- Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer outros instrumentos de medição, ainda que similares.
- Este documento somente poderá ser reproduzido em sua totalidade. Reprodução parcial deverá ser precedida de autorização formal do laboratório da Balanças Indelt Minas.
- O ajuste de instrumento, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.
- O presente certificado de calibração atende aos requisitos da NBR ISO/IEC 17025:2005 e é válido apenas para o instrumento de medição acima caracterizado, não sendo extensivo a quaisquer outros instrumentos de medição, ainda que similares.
- Uma cópia deste certificado ficará armazenada eletronicamente durante 05 anos.

Interlagos 108 - Contagem - MG - 32141-005

CNPJ : 22.339.626/0001-60 Insc. Est. : 186.875102.0028 Telefax : (31) 3354-9742
Homepage : www.balancasindelt.com.br E-mail : laboratorio@balancasindelt.com.br

For 5.4/02 - Certificado de Calibração, Rev. 03 de 20/05/2011

Pág.1/2



Balanças Indelt Minas

Rede Brasileira de Calibração

Laboratório de Calibração de Balança acreditado pelo Inmetro sob N° 0460

Certificado de Calibração

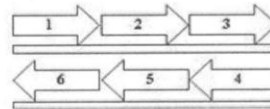
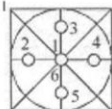
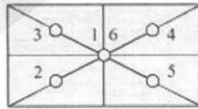
N° 1724

Calibração
NBR ISO/IEC
17025



CAL 0460

Ensaio de excentricidade



Outro / Não aplicável

Posição	1	2	3	4	5	6
Unidade	g					
Antes do Ajuste	1.999,46	1.999,47	1.999,45	1.999,45	1.999,47	1.999,46
Depois do Ajuste	2.000,00	2.000,00	1.999,99	1.999,99	2.000,00	2.000,00

Faixa de medição

0 a 4100g

Pontos de Calibração						
Valor de Referência (g)	Valor antes da calibração (g)	Média das Leituras (g)	Erro da Indicação (g)	Incerteza Expandida (+/- g)	Fator de Abrangência (k)	Graus de Liberdade (veff)
0,20	0,19	0,20	0,00	0,01	2,06	38,03
100,00	99,97	100,00	0,00	0,01	2,09	29,63
1.000,00	999,72	1.000,01	0,01	0,01	2,11	22,80
4.000,00	3.998,83	4.000,00	0,00	0,01	2,11	22,83
4.100,00	4.098,81	4.100,00	0,00	0,01	2,11	22,86

FÁBIO EDUARDO E LISBOA
Técnico executante

ALEXANDRE GOMES CARDOSO
Signatário autorizado

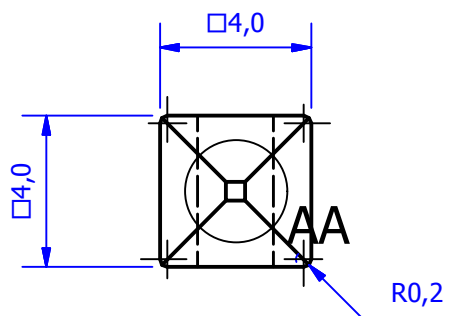
Interlagos 108 - Contagem - MG - 32141-005

CNPJ : 22.339.626/0001-60 Insc. Est. : 186.875102.0028 Telefax : (31) 3354-9742

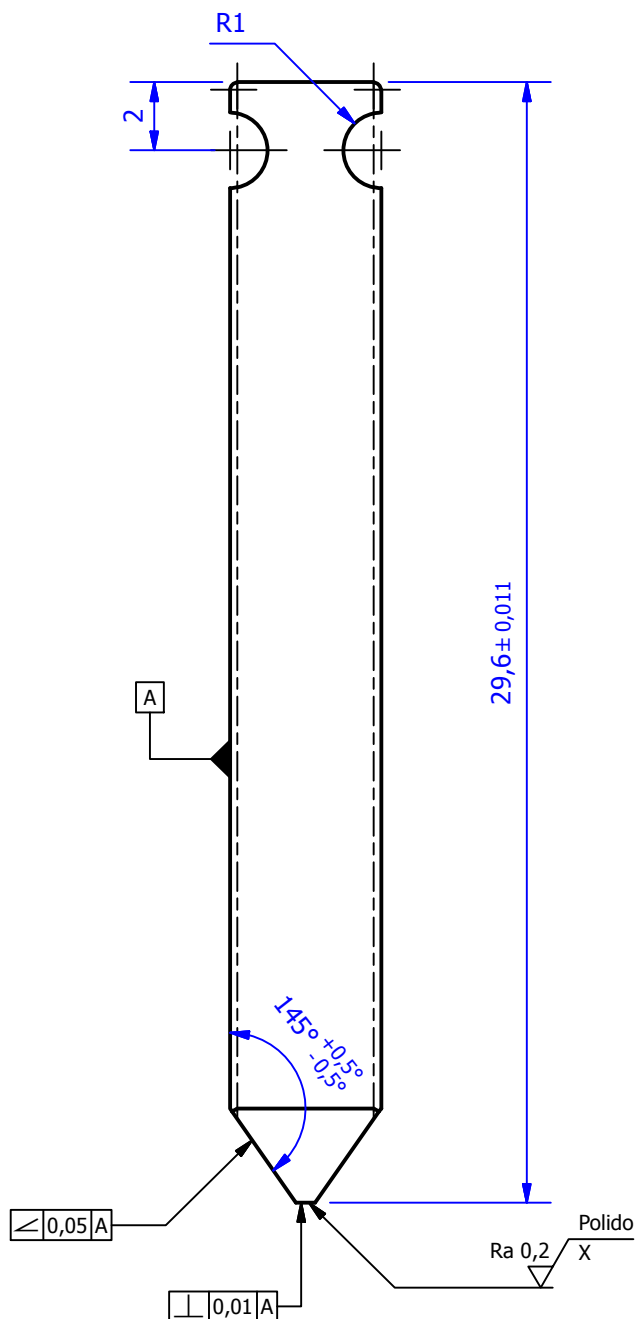
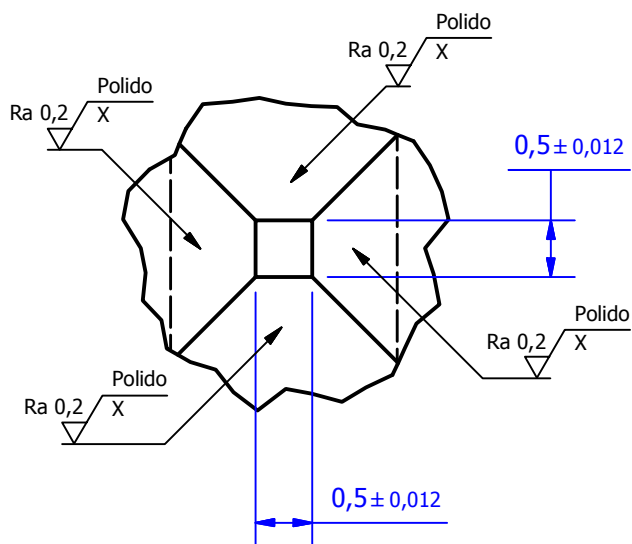
Homepage : www.balancasindelt.com.br E-mail : laboratorio@balancasindelt.com.br

For 5.4/02 - Certificado de Calibração, Rev. 03 de 20/05/2011

Pág. 2/2



AA (15: 1)



Desenhado Por: Larissa Lemos	Aprovado Por: Eng. Juliano	Material: WC-Co sinterizado	Quant. 1	Data 30/5/2011	Escala 5:1
Projeto			Item		
 Portátil			Penetrador		
			Equipamento Portátil	Revisão 1	Folha

RELATÓRIO DA CALIBRAÇÃO

V.I.T. (°C)	M.V.I.P. (°C)	DESVIO (°C)
19,2	19,3	0,10
25,5	25,6	0,10

Incerteza = $\pm 0,50$ °C

UMIDADE RELATIVA (U.R.)

V.I.T. (%)	M.V.I.P. (%)	DESVIO (%)
38,0	38,6	0,60
47,0	47,2	0,20

Incerteza = $\pm 1,0$ %

V.I.T. Valor indicado no instrumento em teste.
M.V.I.P. Média dos valores indicados no padrão.
Desvio M.V.P.-V.I.T. ou M.V.I.T.-V.P.

Roberto Lombardi
Diretor Técnico

Este certificado apresenta resultados que se referem, exclusivamente, ao objeto calibrado, não sendo extensivo a nenhum outro equipamento ou lote. A sua reprodução somente poderá ser feita se integral e com a autorização formal da Beta-X Metrologia Ltda.

Ajuste: ☐ equipamento não foi ajustado.

Local: ☐ A calibração foi efetuada no local de instalação, no endereço do cliente.
☒ A calibração foi efetuada no laboratório da Beta-X Metrologia Ltda.

Solicitante do Serviço

Nome: **FUNDACAO DE APOIO UNIVERSITARIO**
Endereço: **AV ENGENHEIRO DINIZ, 1.178 - MARTINS - UBERLANDIA / MG**

Contratante do Serviço

Nome: **Itest Medição e Automação Ltda.**
Endereço: **Rua Delmira Ferreira, 15 Sala 07 -Alto do Ipiranga -São Paulo -SP**

Identificação do Instrumento de Medição/Padrão Calibrado

Instrumento de Medição/padrão: **Termohigrômetro**
Marca: **Instrutherm**
Modelo/Tipo: **HT-600/ Digital**
Nº de Série: **11021400762575**
Nº de Identificação: **11021400762575**

Característica do Instrumento de Medição/Padrão Calibrado

Faixa de Indicação: **50 a 70°C**
Menor divisão: **0,1°C / 1%**

Informações Administrativas

Procedimento de Calibração: **BX-PC-051**
Procedimento de Controle de Dispositivos de Medição e Monitoramento: **BX-PS-7.6**

Data da calibração: **19/12/2011**
Data do recebimento: **18/12/2011**
Ordem de serviço: **10382**
Data da emissão do certificado: **22/12/2011**

Informações Pertinentes à Calibração

Padrão utilizado / vencimento: **Termohigrômetro / Março 2012**
Marca: **Testo**
Nº de Identificação: **BX-TH-03**
Nº de Série: **NC**
Incerteza de Medição: **$\pm 0,3^{\circ}\text{C}$, $\pm 1,8\%$**
Nº do Certificado/Órgão Emissor: **LV 07369/10 Visomes RBC**

Temperatura da Calibração: **$23 \pm 3^{\circ}\text{C}$**
Umidade da Calibração: **$50 \pm 20\%$**

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Issued By Taylor Hobson Calibration Laboratory

Issue Date: 15-July-2009

Certificate No: 47596

Date of Calibration : 14-July-2009



0026



Taylor Hobson Limited
2 New Star Road
Leicester, LE4 9JQ
England

Tel: +44 116 2463104
Fax: +44 116 2463058
E-Mail: calibration-uk.lei@ametek.co.uk
Internet: <http://www.taylor-hobson.com>

Page 1 of 2 Pages

APPROVED
SIGNATORY

C.J.Phillips

Description: Roughness Standard
Code Number: 112/1534
Serial Number: 8556
Manufactured by: Taylor Hobson Ltd
Calibrated For: Taylor Hobson do Brazil Ltd
R Gaspar
Lourenco 605 CEP Vila Mariana
Sao Paulo
04107-001
Brazil

Acting as Agent for:

Customer Order Number: THB 1321
Taylor Hobson Order Number: 236710

Previous Certificate Number: Not Applicable
Records Reference: Network
Calibration Temperature: 20°C $\pm$ 1°C
Date Received into Laboratory: 13-July-2009

division of
AMETEK

Certified:

This certificate is issued in accordance with the laboratory accreditation requirements of both the United Kingdom Accreditation Service and ISO.17025. It provides traceability of measurement to recognised national standards, and to units of measurement realised at the National Physical Laboratory or other recognised national standards laboratories. This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.

The reported uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k=2$, providing a level of confidence of approximately 95%. The uncertainty evaluation has been carried out in accordance with UKAS requirements.

CERTIFICATE OF CALIBRATION

UKAS ACCREDITED CALIBRATION LABORATORY 0026

15 July 2009

Serial Number: 47596

Page 2 of 2

This standard has been calibrated using computerised traceable measuring techniques on a Taylor Hobson Form Talysurf instrument. All measurements were taken using a 90° conisphere diamond tip stylus with a nominally 2µm spherical radius. A traversing speed of 0.5mm per second, an X-axis sampling rate of 0.25µm, Z-axis resolution of 3.2nm and software stylus tip/arcuate correction have been applied throughout the measurements.

The surface finish portion of the standard was calibrated in accordance with ISO 4287:2000 and ISO 4288:1998 utilising a 0.8mm Gaussian filter cut-off with a bandwidth ratio of 300:1. The mean Ra value was calculated from twenty measurements taken 0.8mm apart within the calibration rectangle, the results obtained, rounded to the nearest 0.01µm, are shown in Table 1.

The uncertainty of calibration for amplitude parameters is $\pm(2\%+0.004\mu\text{m})$ of the mean value. When added to the standard deviation of the measurements, this gives a maximum uncertainty of calibration as stated in Tables 1 & 2.

Included in the tabulated results is a calculated imperial equivalent.

Table 1

Mean Ra Value	Standard Deviation	Maximum Uncertainty
6.11µm	0.017µm	±0.144µm
241µin	0.7µin	±5.7µin

The measured surface finish data was re-analysed using a 0.8mm 2CR filter cut-off with a bandwidth ratio of 100:1, the mean Ra result, rounded to the nearest 0.01µm, is shown in Table 2. This value should be used when calibrating instruments with filter options that do not conform to ISO 4288:1996.

Table 2

Mean Ra Value	Standard Deviation	Maximum Uncertainty
6.05µm	0.017µm	±0.142µm
238µin	0.7µin	±5.6µin

Upon receipt into the laboratory the standard was marked: 6.00µm
236µin

Certified:



The reported uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor k=2, providing a level of confidence of approximately 95%. The uncertainty evaluation has been carried out in accordance with UKAS requirements.

Interessado : " FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITÁRIO "

Endereço : Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M, Campos Santa Mônica - Uberlândia - MG.

Local da calibração : Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M, Campos Santa Mônica - Uberlândia - MG.

Pág. 1/4

Ordem de Serviço : 034.514/001

1 - OBJETO CALIBRADO

PROJETOR DE PERFIL

Fabricante : Mitutoyo

Código : 302-714A

Modelo : PJA3000

No. de Série : D00101012

Tambor Micrométrico

Código : 164-164

N°. série : 000636

Código : 164-164

N°. série : 000619

Resolução da unidade de leitura : 0,001 mm

Resolução do goniômetro : 0 ° 01 '

Identificação do Proprietário : 088180

2 - PADRÃO UTILIZADO NA CALIBRAÇÃO

Régua Graduada de Vidro

N°. de Série : 21164

Certificado N°. : 01647/11

Validade: 30/02/2013

N°. de Série : 24364

Certificado N°. : 08755/11

Validade: 30/06/2013

Padrão Angular

N°. de Série : RET 1

Certificado N°. : 110381/101

Validade: 30/06/2013

3 - PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO : PML - 0043 Versão 1/2.

O erro de ampliação e a indicação foi verificado projetando a régua padrão sobre a tela do projetor e a medição através de comparação com a régua.

O erro de indicação do goniômetro foi verificado comparativamente com um padrão angular projetado sobre a tela e a leitura feita no goniômetro.

Data de calibração : 22 de Agosto de 2012

Data de emissão : 05 de Setembro de 2012

Carlos Kazuo Suetake
Gerente do Dpto. 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. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Ralfo - 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

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 12137/12

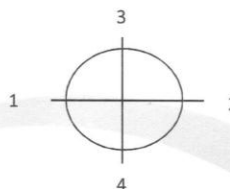
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

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

4 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :

Pág.2/4

4.1 - Resultado Ampliação



Lente de Ampliação de 10 X

Número lente: 013012

Item	Posição				Incerteza de Medição (U)	Fator de abrangência (k)	Graus de liberdade (V _{eff})
	1	2	3	4			
Erro (%)	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01 %	2,00	infinito

LABORATÓRIO DE
CALIBRAÇÃO
BRASIL

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 12137/12

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

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

Pág.3/4

4 -RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :

4.2 - Resultado da Indicação

Eixo " X "

Indicação	Resultado	Incerteza de medição
(mm)	(mm)	(mm)
0,000	0,000	0,002
2,500	2,500	
5,100	5,100	
7,700	7,700	
10,300	10,300	
12,900	12,900	
15,000	15,000	
17,600	17,600	
20,200	20,200	
22,800	22,800	
25,000	25,000	
30,000	30,000	
35,000	35,001	
40,000	40,000	
45,000	45,000	
50,000	50,001	

Fator de abrangência (k) = 2,03
Graus de liberdade (Veff) = 99

Eixo " Y "

Indicação	Resultado	Incerteza de medição
(mm)	(mm)	(mm)
0,000	0,000	0,002
2,500	2,499	
5,100	5,100	
7,700	7,701	
10,300	10,300	
12,900	12,900	
15,000	15,000	
17,600	17,600	
20,200	20,200	
22,800	22,800	
25,000	25,000	
30,000	30,000	
35,000	35,000	
40,000	40,001	
45,000	45,001	
50,000	50,001	

Fator de abrangência (k) = 2,03
Graus de liberdade (Veff) = 99

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 12137/12

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

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

Pág.4/4

4 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :**4.3 - Resultado da indicação do Anteparo Goniométrico**

Indicação	Resultado	Incerteza de Medição (U)	Fator de abrangência (k)	Graus de liberdade (V _{eff})
0	0 ° 00 '	0 ° 01 '	2,29	11
30	29 ° 59 '			
60	60 ° 00 '			
90	90 ° 00 '			
120	119 ° 59 '			
150	149 ° 59 '			
180	180 ° 00 '			
210	210 ° 00 '			
240	240 ° 01 '			
270	270 ° 00 '			
300	300 ° 01 '			
330	330 ° 02 '			
360	360 ° 02 '			

5 - INCERTEZA DE MEDIÇÃO :

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com V_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

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

6 - Nota: Temperatura ambiente : (19,6 ± 0,5) °C.