

MONIQUE ALVES FRANCO DE MORAES

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS DE
AVALIAÇÃO E MONITORAMENTO DO
DESGASTE NO PAR TRIBOLÓGICO
*RISER/ENRIJECEDOR***



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2013

MONIQUE ALVES FRANCO DE MORAES

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO E
MONITORAMENTO DO DESGASTE NO PAR TRIBOLÓGICO
*RISER/ENRIJECADOR***

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

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

Co-orientadora: Profa. Dra. Ing.- Rosenda Valdés Arencibia

**UBERLÂNDIA - MG
2013**

Aos meus pais, Eron e Magda, aos meus irmãos, Cristiano e Renan, ao meu
namorado, Dênis, pelo costumeiro apoio, e aos amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo que sempre me concedeu.

À minha família e ao meu namorado pela confiança e apoio incondicional.

Ao meu orientador, professor Sinésio Domingues Franco, e a minha co-orientadora, professora Rosenda Valdés Arencibia, pela competência e pelo acompanhamento durante este trabalho.

Aos engenheiros e técnicos do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) pelo apoio e pela contribuição nesse trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro durante o desenvolvimento deste trabalho.

MORAES, M. A. F. **Desenvolvimento de Metodologias de Avaliação e Monitoramento do Desgaste no Par Tribológico *Riser*/Enrijecedor**. 2013. 143 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.

Resumo

Neste trabalho foram desenvolvidas e aplicadas duas metodologias para quantificar o desgaste em amostras de *risers* e enrijecedores utilizando uma máquina de medir a três coordenadas (MM3C). Tais amostras foram testadas em um tribômetro capaz de realizar ensaios de desgaste por deslizamento em escala real. Adicionalmente, foram correlacionados os eventos que ocorrem durante o processo de desgaste destas amostras com as vibrações na estrutura do tribômetro. A primeira metodologia foi aplicada na estimativa do desgaste linear em amostras de *risers*, com base na variação de espessura, enquanto que a segunda foi destinada à estimativa do desgaste volumétrico em amostras de enrijecedores, tendo por base a perda de volume das mesmas. Para avaliar a perda de espessura nas amostras de *riser* foi utilizado o *software* Calypso® na definição do alinhamento e na determinação e execução da estratégia de medição. Já na avaliação do volume das amostras de enrijecedores, foi utilizado o mesmo *software* na definição do alinhamento. O *software* Dimension Volume® foi empregado na definição e execução da estratégia de medição, e, para calcular o volume destas amostras, foi elaborado e utilizado um programa em Matlab®. Com o intuito de analisar as vibrações durante o ensaio de desgaste, foi desenvolvida e implementada uma rotina de aquisição, monitoramento e salvamento dos sinais de vibrações no *software* Labview®. Os resultados obtidos permitiram concluir que a metodologia desenvolvida para quantificação da perda de espessura de *risers* usando uma MM3C é uma técnica viável e eficiente. Constatou-se, também, que o programa desenvolvido em Matlab® foi uma ferramenta eficaz na avaliação volumétrica das amostras de enrijecedores. A estratégia de medição com malha 1 mm x 1 mm foi considerada a mais adequada para estimar o volume de uma amostra de enrijecedor, com precisão e com a menor quantidade de pontos possível. Além disso, verificou-se que o pico da amplitude vibratória esteve localizado em 16,71 Hz, que deve estar relacionado ao processo de desgaste.

Palavras-chave: Taxa de desgaste; metodologias de avaliação e monitoramento; MM3C; dutos flexíveis.

MORAES, M. A. F. **Development of monitoring and evaluation methodologies of wear on tribological pair riser/bend stiffener.** 2013. 143 f. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.

Abstract

In this work, methodologies to evaluate the wear of flexible riser pipe and bend stiffener samples were developed. In order to achieve this goal, a three coordinate measuring machine (3CMM) was used to evaluate the wear rates of samples tested in a large-scale tribometer. Additionally, the events that occur during the sliding wear of these samples were correlated with vibration signals from the tribometer structure. The first methodology was applied to estimate the linear wear of riser samples of the polyamide outer coating that was based on the thickness reduction during the test. The second methodology was designed to estimate the volumetric wear loss of the bend-stiffener samples. To evaluate the thickness loss of the riser samples, the Calypso[®] software was used to define the alignment and to determine and execute the measurement strategy. In order to assess the bend-stiffener volume, the same software was used to define the system alignment. The Dimension Volume[®] software was used to define and to perform the measurement strategy. The sample volume was calculated using a specially designed program that was developed in Matlab[®]. In order to analyze the vibrations during the wear test, a routine of data acquisition, monitoring and storage of vibration signals in Labview[®] software was developed and implemented. The results showed that the developed methodology to quantify the riser thickness loss using a 3CMM is viable and efficient in measuring the wear process of this tribosystem. It was also found that the developed program using Matlab[®] was an effective tool to evaluate the volumetric losses of bend-stiffeners samples. The measurement strategy using a mesh spacing of 1 mm x 1 mm was considered the most adequate to estimate the volume of a bend-stiffener sample accurately and with the least possible amount of points. Furthermore, it was observed a vibration peak located at 16.71 Hz, that should be related to the wear process.

Keywords: *Wear rate; monitoring and evaluation methodologies; 3CMM; Flexible riser pipes.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Localização das diversas regiões características dos dutos flexíveis utilizados em um sistema de produção flutuante (RAMOS NETO, 2003)	2
Figura 1.2 - Constituição física dos dutos flexíveis: a) estrutura de multicamadas (metálica e polimérica) na parte interna e b) revestimento de poliamida na camada mais externa (RAMOS NETO, 2003)	2
Figura 1.1 - Enrijecedor conectado ao <i>riser</i> (CAIRE, 2005)	3
Figura 1.4 - Visão geral do projeto da plataforma P50 de ancoragem do tipo <i>spread-mooring</i> , em que os <i>risers</i> ficam distribuídos na lateral da embarcação (RAMOS NETO, 2010 <i>apud</i> LADEIRA, 2011)	4
Figura 1.2 - Ilustração dos elementos construtivos que compõem o enrijecedor (<i>bend-stiffener</i>) e dos elementos de fixação do enrijecedor à boca de sino (LEMOS <i>et al.</i> , 2004)	4
Figura 1.6 - Desgaste da capa externa (feita de poliamida 11) do duto flexível, proveniente do contato com a trombeta metálica que constitui o enrijecedor (HWANG <i>et al.</i> , 2008 <i>apud</i> LADEIRA, 2011)	5
Figura 1.3 - Novo projeto de <i>bend-stiffener</i> com <i>liner</i> polimérico (LEMOS <i>et al.</i> , 2004)	6
Figura 1.8 - Representação esquemática do tribossistema adotado para simular o contato entre <i>riser</i> e enrijecedor (PAES <i>et al.</i> , 2012)	7
Figura 1.9 - Representação esquemática do tribômetro construído. (1) cilindro hidráulico horizontal, (2) estrutura em aço, (3) célula de carga para medição da força normal, (4) porta-amostra, (5) amostra do enrijecedor, (6) sensor de posição do tipo LVDT, (7) cilindro hidráulico vertical, (8) amostra do <i>riser</i> e (9) reservatório de água (PAES <i>et al.</i> , 2012)	8
Figura 2.1 - Mecanismos do desgaste por deslizamento, a) adesão; b) fadiga superficial em sólidos dúcteis; c) fadiga superficial em sólidos frágeis e d) reação triboquímica e/ou abrasão (ZUM GAHR, 1987)	12
Figura 2.2 - Fontes de erros em MMCs (WECKENMANN; KNAUER; KILLMAIER, 2001)	19
Figura 2.3 - Pontos de contato o elemento apalpador na superfície rugosa da peça (ANBARI; BECK, 1990 <i>apud</i> MAY, 2007)	21

Figura 2.4 - Composição de um acelerômetro piezelétrico (PIEZOTRONICS ^{INC} , 2013)	27
Figura 2.5 - Acelerômetros piezoelétricos com geometria de cisalhamento (PIEZOTRONICS ^{INC} , 2013)	27
Figura 2.6 - Padrões de <i>stick-slip</i> , considerando diferentes carregamentos e velocidade de deslizamento de 0,1 mm/s (YOON <i>et al.</i> , 2012)	30
Figura 3.1 - MM3C utilizada no desenvolvimento do trabalho, fabricada pela Carl Zeiss, modelo Contura G2 RDS/XXT	32
Figura 3.2 - Cabeçote articulado RDS com sensor VAST XXT (ZEISS, 2007)	33
Figura 3.3 - Amostras resultantes do corte, no centro da trilha de desgaste, de uma seção longitudinal da camada externa de uma amostra de riser, testada durante 1.280 horas no tribômetro. Amostra 1 – metade esquerda; amostra 2 – metade direita	37
Figura 3.4 - Fixação da amostra e definição do sistema de referência, a) superfície externa e b) interna	37
Figura 3.5 - Alinhamento básico para a definição do sistema de referência das amostras 1 e 2	38
Figura 3.6 - Regiões analisadas: de RI a 0, região não desgastada superior; de 0 a 1 e de 2 a 3, correspondem às regiões desgastadas e expostas à água durante o teste; de 1 a 2, região desgastada central; de 3 a RF, região não desgastada inferior	39
Figura 3.7 - Fixação de uma amostra de enrijecedor, após testada no tribômetro durante 1.280 horas	41
Figura 3.8 - Alinhamento básico para a definição do sistema de referência da amostra de enrijecedor analisada	42
Figura 3.9 - Indicação das características dimensionais da amostra, avaliadas para a confecção do modelo CAD	42
Figura 3.10 - Visualização, no software Dimension Volume®, do modelo CAD da superfície de interesse da amostra de enrijecedor desgastada, de uma estratégia de medição, do cubo de segurança da medição e do sistema de referência, a) detalhe e b) vista geral	43
Figura 3.11 - Acelerômetro piezelétrico utilizado (PIEZOTRONICS ^{INC} , 2013)	46
Figura 3.12 - Placa de aquisição de dados utilizada na instrumentação do tribômetro (INSTRUMENTS®, 2013)	46
Figura 3.13 - Localização dos acelerômetros na estrutura do tribômetro	47

Figura 3.14 - Diagrama de fluxo dos dados do sistema de aquisição e monitoramento de vibrações do tribômetro	48
Figura 3.15 - Interface do programa desenvolvido para a aquisição, tratamento, monitoramento e salvamento dos dados de vibração do tribômetro	49
Figura 3.16 - Fluxograma de funcionamento do programa de aquisição e monitoramento das vibrações decorrentes do ensaio de desgaste	50
Figura 3.17 - Método do trapézio aplicado na determinação da área sob uma função	51
Figura 3.18 - Determinação do alinhamento básico do bloco-padrão no <i>software</i> Calypso®	53
Figura 3.19 - Elementos utilizados no alinhamento do bloco-padrão no <i>software</i> Calypso®	54
Figura 3.20 - Área de medição selecionada dentro da superfície original do bloco-padrão	55
Figura 4.1 - Amostra de riser de 4 in (101,6 mm) de diâmetro interno analisada, a) vista geral e b) detalhe da superfície mostrando uma maior irregularidade da superfície	63
Figura 4.2 - Desvio de retitude da camada de PA, a) amostra 2 (metade direita de uma seção da amostra de riser), b) amostra 1 (metade esquerda da mesma seção da amostra de riser) e c) localização das regiões analisadas nas amostras 1 e 2	64
Figura 4.3 - Contribuição de cada fonte de incerteza para a incerteza final da perda de espessura da amostra 1, considerando as regiões 0 – 1, 1 – 2 e 2 – 3	67
Figura 4.4 - Contribuição de cada fonte de incerteza para a incerteza final da perda de espessura da amostra 2, considerando as regiões 0 – 1, 1 – 2 e 2 – 3	67
Figura 4.5 - Taxas de desgaste calculadas, a) amostra 2 (metade direita de uma seção da amostra de riser), b) amostra 1 (metade esquerda da mesma seção da amostra de riser) e c) localização das regiões analisadas nas amostras 1 e 2	69
Figura 4.6 - Contribuição de cada fonte de incerteza para a incerteza total associada ao volume do bloco-padrão abaixo da área selecionada	71
Figura 4.7 - Contribuição de cada fonte de incerteza para a incerteza total do volume da amostra desgastada, considerando a matriz de pontos 0,8 mm x 0,5 mm	74
Figura 4.8 - Valores do volume da amostra desgastada de enrijecedor, obtidos com o <i>software</i> Dimension Volume®, em relação ao número de pontos, considerando as estratégias de medição da Tab. 4.8	75
Figura 4.9 - Valores do volume da amostra desgastada de enrijecedor, obtidos com o <i>software</i> Dimension Volume®, em relação à distância entre as linhas, considerando as estratégias de medição da Tab. 4.8	76

Figura 4.10 - Representação dos limites da área selecionada a partir da execução da estratégia com a matriz de pontos 0,7 mm x 0,5 mm	78
Figura 4.11 - Valores do volume da amostra desgastada de enrijecedor, obtidos com o programa desenvolvido em Matlab® com base na área de interesse selecionada, em função do número de pontos pertencentes à área, considerando as estratégias de medição da Tab. 4.10 que utilizam a distância entre pontos ao longo da linha igual a 1 mm.	81
Figura 4.12 - Valores do volume da amostra desgastada de enrijecedor, obtidos com o programa desenvolvido em Matlab® com base na área de interesse selecionada, em função do número de pontos pertencentes à área, considerando as estratégias de medição da Tab. 4.10 que utilizam a distância entre pontos ao longo da linha igual a 0,5 mm	81
Figura 4.13 - Valores do volume da amostra desgastada de enrijecedor, obtidos com o programa desenvolvido em Matlab® com base na área de interesse selecionada, em função da distância entre as linhas de medição, considerando as estratégias de medição da Tab. 4.9.	82
Figura 4.14 - Fixação de uma amostra nova de enrijecedor para riser de 6 in (152,4 mm) de diâmetro interno	83
Figura 4.15 - Alinhamento básico para a definição do sistema de referência das amostras de enrijecedor analisadas	84
Figura 4.16 - Características avaliadas das amostras para a confecção do modelo CAD	84
Figura 4.17 - Representação dos limites da área selecionada na amostra esquerda de enrijecedor a partir da execução da estratégia com a matriz de pontos 1 mm x 1 mm	86
Figura 4.18 - Espectros médios de velocidade, obtidos após 3 horas de ensaio, através dos acelerômetros localizados a) e b) nos eixos Z e Y sobre a célula de carga esquerda, respectivamente e c) e d) nos eixos Y e X sobre o cilindro vertical, respectivamente	88
Figura 4.19 - Espectros de velocidade obtidos através dos acelerômetros posicionados a) e b) nos eixos Z e Y, respectivamente, sobre a célula de carga esquerda e c) e d) nos eixos Y e X sobre o cilindro vertical	90
Figura 4.20 - Espectros de velocidade obtidos através dos acelerômetros localizados a) no eixo Z sobre a célula de carga esquerda, b) e c) nos eixos Z e X sobre o cilindro vertical, respectivamente	92
Figura 4.21 - Evolução das amplitudes máximas ao longo do tempo de ensaio analisado	93
Figura 4.22 - Espectros de frequência obtidos a partir de impactos sobre o mancal próximo à célula de carga esquerda, com acelerômetros localizados a) e b) nos eixos Z e Y sobre a célula de carga esquerda, respectivamente, c) e d) nos eixos Z e X sobre o cilindro vertical, respectivamente	94

Figura 4.23 - Espectro de frequência obtido a partir de impactos no cilindro vertical, com acelerômetros localizados a) e b) nos eixos Z e Y sobre a célula de carga esquerda, respectivamente, c) e d) nos eixos Z e X sobre o cilindro vertical, respectivamente

96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Vantagens entre a metrologia dimensional convencional e a metrologia por coordenadas (ADEMIR, 2003; BOSCH, 1995 <i>apud</i> MAY, 2007)	18
Tabela 3.1 - Estratégias de medição de volume executadas na amostra de enrijecedor, testada durante 1.280 horas no tribômetro	44
Tabela 3.2 - Características dos acelerômetros piezelétricos utilizados nas medições de vibração	46
Tabela 3.3 - Características da placa de aquisição dos sinais captados pelos acelerômetros piezelétricos	47
Tabela 3.4 - Parâmetros utilizados na determinação da incerteza padrão combinada da quantificação do desgaste linear ou volumétrico com uma MM3C	57
Tabela 4.1 - Redução de espessura da camada externa do riser e incertezas associadas	64
Tabela 4.2 - Componentes de incerteza da estimativa da perda de espessura da amostra 1 na região 0 – 1	65
Tabela 4.3 - Componentes de incerteza da estimativa da perda de espessura da amostra 2 na região 0 – 1	66
Tabela 4.4 - Valor do volume do bloco-padrão contido abaixo da área selecionada, calculado a partir das coordenadas teóricas dos pontos da estratégia de medição definida no <i>software</i> Calypso®	70
Tabela 4.5 - Valor do volume do bloco-padrão contido abaixo da área selecionada, calculado a partir das coordenadas dos pontos medidos	70
Tabela 4.6 - Valores do volume abaixo da área selecionada do bloco-padrão, obtidos com o programa desenvolvido utilizando o <i>software</i> Matlab®	70
Tabela 4.7 - Parâmetros de avaliação da amostra de enrijecedor	72
Tabela 4.8 - Valores de volume da amostra desgastada de enrijecedor, obtidos com o <i>software</i> Dimension Volume®, a partir da execução de várias estratégias de medição	73
Tabela 4.9 - Componentes de incerteza da estimativa do volume, com a estratégia 0,8 mm x 0,5 mm, da amostra desgastada de enrijecedor	74
Tabela 4.10 - Resultados de volume da amostra desgastada de enrijecedor com base na área de interesse selecionada, obtidos com o programa desenvolvido em Matlab®	80
Tabela 4.11 - Análise dimensional das amostras de enrijecedores	85

Tabela 4.12 - Valores de volume da amostra nova de enrijecedor (amostra esquerda), obtidos com o programa desenvolvido em Matlab® com base na área de interesse selecionada	87
Tabela 4.13 - Valores de volume da amostra nova de enrijecedor (amostra direita), obtidos com o programa desenvolvido em Matlab® com base na área de interesse selecionada	87

LISTA DE SÍMBOLOS

ADC	Conversor analógico/digital
AFM	Microscopia de força atômica
CAD	Computer Aided Design
CS	Coeficiente de sensibilidade
c_i	Coeficiente de sensibilidade do mensurando em relação a cada fonte de entrada i.
DP	Distribuição de probabilidade
E_m	Erro de penetração das malhas dos elementos finitos
GL	Graus de liberdade
ICP [®]	Integrated Circuit Piezoelectric
IEPE	Integrated Electronics Piezo Electric
k	Fator de abrangência
L_0	Valor da coordenada do ponto avaliado (X, Y ou Z)
$L_{x\text{máx}}$	Valor da coordenada máxima avaliada na direção X
$L_{y\text{máx}}$	Valor da coordenada máxima avaliada na direção Y
$L_{z\text{máx}}$	Valor da coordenada máxima avaliada na direção Z
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MM3C	Máquina de medir a três coordenadas
N	Número de avaliações do mensurando
PA	Poliamida
PU	Poliuretano
RI	Referência inicial
RF	Referência final
s	Desvio padrão dos valores do mensurando
$s(L_{MMC})$	Variabilidade dos valores do mensurando (espessura ou perda de espessura ou volume ou perda de volume)
$s_{\Delta T_{20}}$	Desvio padrão dos valores de temperatura coletados
TDP	<i>Touch Down Point</i>
TI	Tipo de incerteza
TPU	Poliuretano termoplástico

U	Incerteza expandida
U_A	Incerteza expandida do sistema de apalpação da MM3C
$u_c(C)$	Incerteza padrão combinada
$U_{C_xmáx}$	Incerteza expandida da calibração da MM3C na direção do máximo comprimento avaliado da amostra no eixo X
$U_{C_ymáx}$	Incerteza expandida da calibração da MM3C na direção do máximo comprimento avaliado da amostra no eixo Y
$U_{C_zmáx}$	Incerteza expandida da calibração da MM3C na direção do máximo comprimento avaliado da amostra no eixo Z
u_i	Incerteza padrão de cada variável de entrada
v_{eff}	Graus de liberdade efetivos
v_i	Graus de liberdade de cada variável de entrada
X	Valor da coordenada do ponto de medição na direção X
Y	Valor da coordenada do ponto de medição na direção Y
Z	Valor da coordenada do ponto de medição na direção Z
α_{Pe}	Coefficiente de expansão térmica linear do material da amostra
ΔD_{El}	Correção devido à deformação elástica da superfície da amostra
ΔI_{CMMC}	Correção devido à incerteza associada à calibração da MM3C
ΔI_A	Correção devido à incerteza padrão de apalpação da MM3C
$\Delta I_{Cvol_máx}$	Correção devido à incerteza máxima da estimativa do volume da amostra
ΔI_{C_T}	Correção devido à incerteza padrão da calibração do termohigrômetro
ΔR_{MMC}	Correção devido à resolução da MM3C
ΔR_T	Correção associada à resolução do termohigrômetro utilizado para medir a temperatura e a umidade
δT	Correção devido à variação de temperatura durante as medições
ΔT	Correção devido ao afastamento da temperatura ambiente em relação a 20°C
ΔT_{20}	Correção devido ao afastamento da temperatura em relação a 20°C

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	8
1.2. Estrutura do trabalho	9
1.3. Contribuição técnico-científica do trabalho	9
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. Tribologia	10
2.2. Desgaste por deslizamento	11
2.3. Alguns polímeros utilizados em dutos flexíveis e enrijecedores	13
2.3.1. Poliamida (PA)	14
2.3.2. Poliuretano (PU)	14
2.4. Técnicas empregadas para a avaliação do desgaste de diversos materiais	15
2.4.1. Avaliação do desgaste utilizando LVDT (<i>Linear Variable Differential Transformer</i>)	15
2.4.2. Avaliação do desgaste utilizando balança	16
2.4.3. Avaliação do desgaste utilizando máquinas de medir a três coordenadas (MM3C)	17
2.5. Correlação entre vibrações e desgaste	25
CAPÍTULO III – METODOLOGIA	31
3.1. Descrição do sistema de medição	31
3.1.1. <i>Software</i> Calypso® 5.2	34
3.1.2. <i>Software</i> Dimension Volume® 1.6	35
3.2. Desenvolvimento de metodologias de avaliação do desgaste em amostras do par tribológico <i>riser</i> /enrijecedor	36
3.2.1. Desenvolvimento de metodologia de avaliação do desgaste em amostras de <i>risers</i> com base na variação de espessura	36
3.2.1.1. Estimativa da deformação elástica da camada externa do <i>riser</i> de 4 in (101,6 mm) de diâmetro interno, proveniente da força de medição aplicada pelo apalpador da MM3C	40
3.2.2. Desenvolvimento de metodologia de avaliação do	40

desgaste em amostras de enrijecedores com base na variação de volume	
3.2.2.1. Estimativa da deformação elástica do material do enrijecedor, proveniente da força de medição aplicada pelo apalpador da MM3C	45
3.3. Desenvolvimento de um programa supervisor para aquisição, tratamento, monitoramento e salvamento dos dados de vibração do tribômetro	45
3.4. Desenvolvimento de um programa para estimar o volume de uma peça a partir das coordenadas dos pontos medidos com uma MM3C	50
3.4.1. Validação do programa	52
3.5. Avaliação da incerteza da quantificação do desgaste em <i>risers</i> e enrijecedores a partir da utilização de uma MM3C	55
3.5.1. Identificação das variáveis que afetam o resultado da medição	55
3.5.2. Definição do modelo matemático	56
3.5.3. Aplicação da Lei de Propagação de Incertezas	56
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1. Avaliação do desgaste linear em uma amostra de <i>riser</i> testada durante 1.280 horas no tribômetro	62
4.2. Validação do programa desenvolvido para estimar o volume de uma peça a partir das coordenadas dos pontos medidos com uma MM3C	69
4.3. Avaliação do volume em uma amostra de enrijecedor testada durante 1.280 horas no tribômetro	71
4.3.1. Avaliação do volume em uma amostra desgastada de enrijecedor, testada por 1.280 horas, utilizando o <i>software</i> Dimension Volume®	72
4.3.2. Avaliação do volume em uma amostra desgastada de enrijecedor, testada por 1.280 horas, utilizando o programa desenvolvido no <i>software</i> Matlab®	77
4.4. Avaliação do volume de amostras novas de enrijecedor, para <i>riser</i> de 6 in (152,4 mm) de diâmetro interno, utilizando o programa desenvolvido no <i>software</i> Matlab®	82
4.5. Resultados de vibrações no tribômetro durante o ensaio de	87

desgaste por deslizamento de amostras do par tribológico *riser/enrijecedor*

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES	99
CAPÍTULO VI – TRABALHOS FUTUROS	102
CAPÍTULO VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
CAPÍTULO VIII – ANEXOS	111
ANEXO 1 – Certificado de calibração da MM3C	111
ANEXO 2 - Certificado de calibração do termohigrômetro	122
ANEXO 3 – Certificado de calibração do bloco-padrão	124

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

No Brasil, grande parte da produção de petróleo ou de gás dos poços é escoada através de dutos flexíveis que interligam os poços de extração/produção às plataformas ou navios (RAMOS NETO, 2003).

Na exploração de petróleo em águas profundas, os dutos flexíveis vêm sendo utilizados de longa data. No Brasil, os primeiros dutos flexíveis foram utilizados no campo de Garoupa na Bacia de Campos, em 1978 (PADILHA, 2009). Estes dutos são comumente considerados nos projetos devido a, principalmente, sua versatilidade de aplicação e recolhimento, o que contribui no desembarço logístico das operações.

Os dutos flexíveis possuem diversos segmentos, os quais recebem diferentes denominações de acordo com seu local de aplicação (Fig. 1.1): se estão apoiadas no fundo do mar são chamadas de *flow lines*; quando se elevam do fundo do mar em direção à plataforma ou navio passam a ser chamadas de *risers* e a região de interface dos dois é chamada de TDP (*Touch Down Point*) (RAMOS NETO, 2003).

Em qualquer uma destas regiões, o duto flexível tem de suportar altas pressões internas e externas, sendo o carregamento externo uma função da profundidade. Elas também têm de resistir a agentes químicos agressivos além do ambiente marinho e, ao mesmo tempo, a carregamentos devido às correntezas, ondas e movimentações da plataforma ou navio (RAMOS NETO, 2003).

A configuração estrutural destes dutos é composta por multicamadas (Fig. 1.2): internamente são constituídos por uma carcaça em aço inoxidável e uma camada polimérica, a qual possui a função de conter o fluido transportado (óleo bruto, gás e água), bem como propiciar uma barreira química e manter as suas propriedades térmicas; externamente são revestidos originalmente por uma camada de poliamida, oferecendo proteção contra corrosão e abrasão e, na região central, são constituídos por malhas de aço

intercaladas com material composto que confere a resistência mecânica ao duto (RAMOS NETO, 2003).

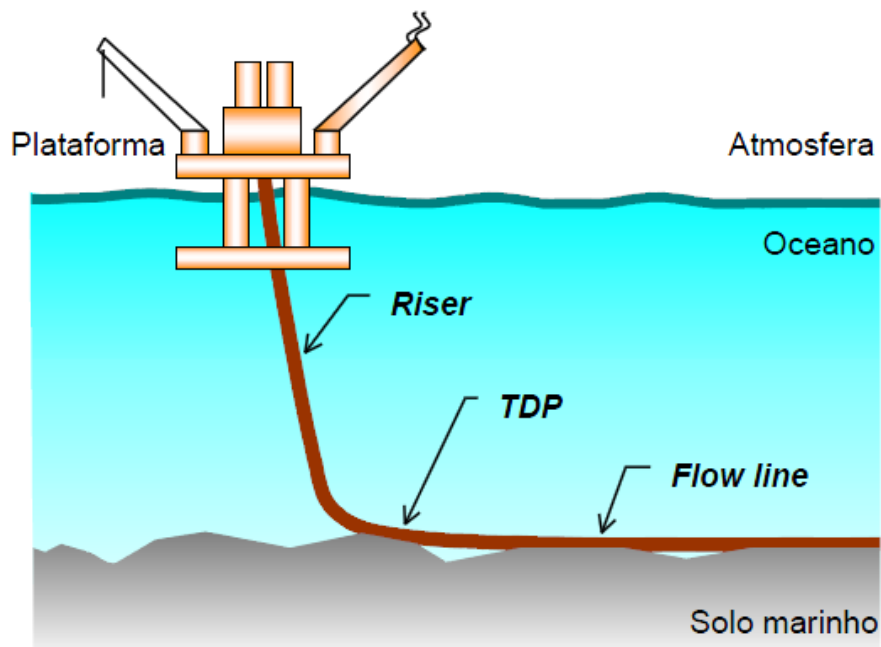


Figura 1.1 - Localização das diversas regiões características dos dutos flexíveis utilizados em um sistema de produção flutuante (RAMOS NETO, 2003)



a)



b)

Figura 1.2 – Constituição física dos dutos flexíveis: a) estrutura de multicamadas (metálica e polimérica) na parte interna e b) revestimento de poliamida na camada mais externa (RAMOS NETO, 2003)

Os elevados custos de aquisição desses dutos estão relacionados com os preços das matérias primas utilizadas (poliamida e materiais metálicos). Adicionalmente, o processo de fabricação muito oneroso, terminais de acoplamento complexos e pouca concorrência no fornecimento dos dutos flexíveis contribuem para elevar ainda mais esses preços (RAMOS NETO, 2003).

Com o intuito de evitar a flexão exagerada nas extremidades (conectores) destes dutos na porção *riser*, trecho vertical (Fig. 1.1), em virtude dos movimentos causados por ondas e correntes marítimas, são utilizados enrijecedores (ou *bend-stiffeners*), Fig. 1.3. Estes enrijecedores são instalados aproximadamente a 30 m abaixo da conexão com a plataforma, conforme Fig. 1.4 (LADEIRA, 2011), e são constituídos por segmentos, de acordo com a Fig. 1.5.



Figura 1.3 – Enrijecedor conectado ao *riser* (CAIRE, 2005)



Figura 1.4 - Visão geral do projeto da plataforma P50 de ancoragem do tipo *spread-mooring*, em que os *risers* ficam distribuídos na lateral da embarcação (RAMOS NETO, 2010 *apud* LADEIRA, 2011)

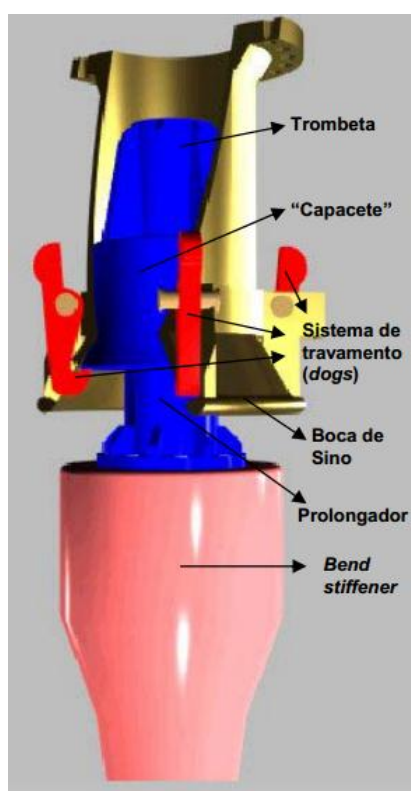


Figura 1.5 – Ilustração dos elementos construtivos que compõem o enriecedor (*bend-stiffener*) e dos elementos de fixação do enriecedor à boca de sino (LEMOS *et al.*, 2004)

Entretanto, os *risers* são livres para oscilar longitudinalmente em relação ao enrijecedor. Assim, ocorre um deslizamento entre a capa externa do duto e a superfície interna da trombeta metálica do enrijecedor (PAES *et al.*, 2012).

Como resultado dessa movimentação, a capa polimérica externa dos *risers* é desgastada, podendo levar à exposição das fitas metálicas (Fig. 1.6) e ao aumento do risco de vazamentos e danos ambientais, e, conseqüentemente, à necessidade de substituição do duto ou a sua reterminação (PAES *et al.*, 2012). Estas manobras, além do custo direto da sua execução e manutenção, têm impacto direto na produção do petróleo.

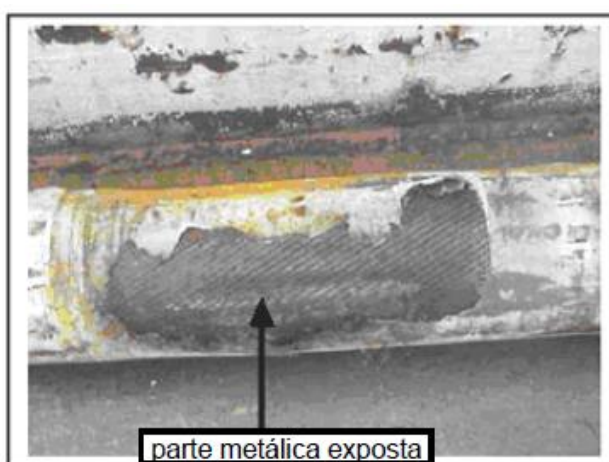


Figura 1.6 - Desgaste da capa externa (feita de poliamida 11) do duto flexível, proveniente do contato com a trombeta metálica que constitui o enrijecedor (HWANG *et al.*, 2008 *apud* LADEIRA, 2011)

Em virtude do contato entre a capa externa do *riser* e o material metálico da trombeta do enrijecedor, um novo conceito de *bend-stiffener* foi avaliado e escolhido para construção e teste em campo. Trata-se da instalação de *liners* poliméricos (feitos de material de sacrifício em poliuretano) no interior da trombeta, conforme Fig. 1.7. Todos os *bend-stiffeners* que estão sendo adquiridos já contemplam estas modificações (LEMOS *et al.*, 2004).

Sendo assim, haverá o contato e o movimento relativo entre o *riser* e o *liner*. Devido a isso, surge, então, a necessidade de quantificar o desgaste dos materiais envolvidos e, conseqüentemente, avaliar o seu desempenho através de uma previsão confiável de vida útil nas condições de aplicação.

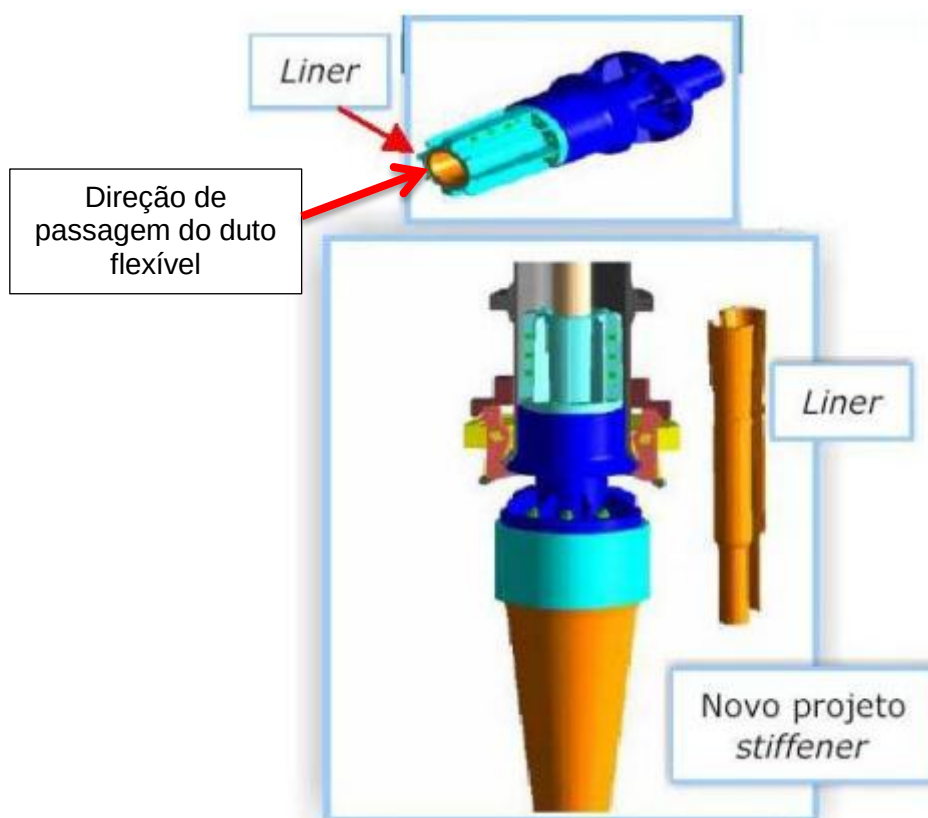


Figura 1.7 – Novo projeto de *bend-stiffener* com *liner* polimérico (LEMOS *et al.*, 2004)

Neste contexto, com o intuito de simular o desgaste por deslizamento que ocorre no par tribológico *riser*/enrijecedor (Fig. 1.8), o Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) em parceria com o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES) da PETROBRAS, concebeu, projetou e construiu um tribômetro (Fig. 1.9) capaz de reproduzir em escala real condições semelhantes àsquelas que ocorrem em campo. Isto é, os ensaios de desgaste são realizados sob a ação de esforços, movimentos e condições do ambiente similares às condições reais de aplicação.

A Figura 1.8 mostra esquematicamente o tribossistema adotado para simular o contato entre o *riser* e o enrijecedor. No caso, duas amostras do material do enrijecedor foram testadas simultaneamente.

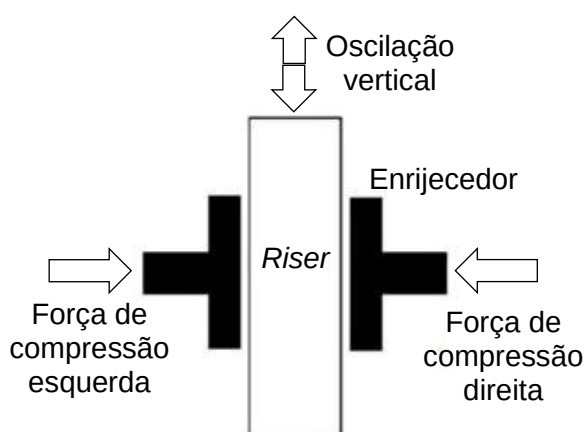


Figura 1.8 - Representação esquemática do tribossistema adotado para simular o contato entre *riser* e enrijecedor (PAES *et al.*, 2012)

A Figura 1.9 apresenta o equipamento desenvolvido para simular o tribossistema da Figura 1.8. Ele é constituído de quatro cilindros hidráulicos, sendo os dois verticais (7) responsáveis pela reprodução do movimento alternado vertical do *riser* e os dois horizontais (1) fazem a aplicação dos esforços normais à linha. A posição desses cilindros hidráulicos é monitorada e controlada através de sensores do tipo LVDT (*linear variable differential transformer*) (6). Todo o sistema foi montado em uma estrutura metálica (2) bastante rígida, projetada para gerar mínimas deformações em ensaios com carga normal máxima (1 MN). Essas forças são monitoradas através de células de carga (3), montadas na direção de cada uma das forças verticais e horizontais. Tanto as amostras do material do enrijecedor (5), quanto a amostra do *riser* (8) são submergidas em um tanque (9), cuja temperatura é monitorada e controlada, de tal forma a reproduzir as condições de campo (PAES *et al.*, 2012).

Diante do anteriormente exposto, este trabalho é justificado pela necessidade de se desenvolver uma técnica confiável e robusta para a quantificação do desgaste em amostras do par *riser-bend-stiffener*.

Das técnicas passíveis de aplicação, destaca-se a que utiliza uma máquina de medir a três coordenadas. Todavia, ainda não existe, na literatura, uma metodologia específica para a análise do desgaste nestas amostras.

Também, este trabalho visa correlacionar os eventos que ocorrem durante o processo de desgaste, reproduzido em amostras do par *riser-bend-stiffener*, com as vibrações na estrutura do tribômetro. Neste contexto, é justificado o desenvolvimento de um programa de aquisição, monitoramento e armazenamento dos sinais de vibrações durante os ensaios.

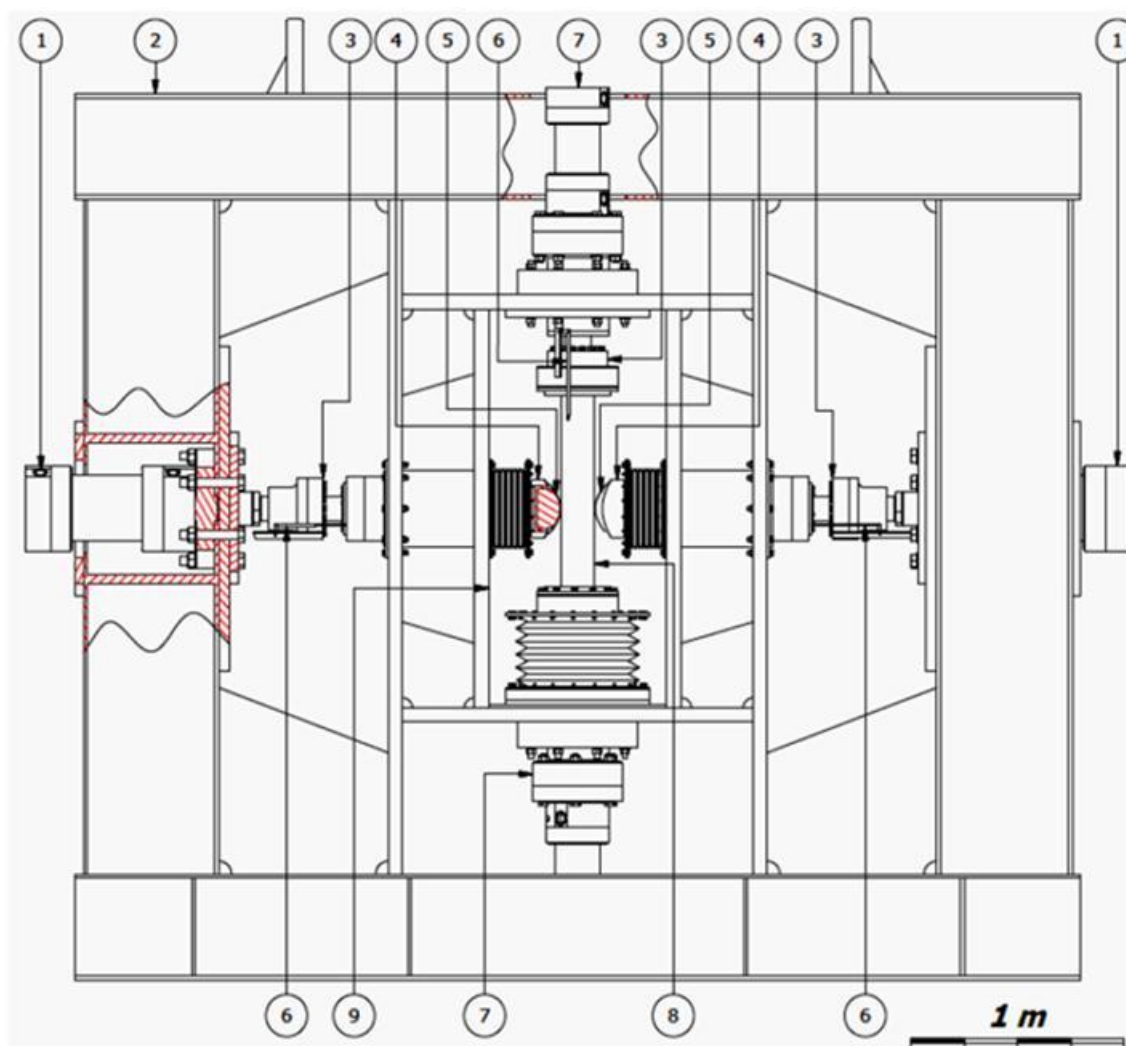


Figura 1.9 - Representação esquemática do tribômetro construído. (1) cilindro hidráulico horizontal, (2) estrutura em aço, (3) célula de carga para medição da força normal, (4) porta-amostra, (5) amostra do enrijecedor, (6) sensor de posição do tipo LVDT, (7) cilindro hidráulico vertical, (8) amostra do *riser* e (9) reservatório de água (PAES *et al.*, 2012)

1.1. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver e aplicar uma metodologia para quantificar o desgaste em amostras de *risers* e enrijecedores testadas em um tribômetro de grandes dimensões. Destaca-se que, com a estimativa da taxa de desgaste, há possibilidade de determinar o tempo de duração em campo do revestimento do duto flexível e do material de sacrifício acoplado ao *bend-stiffener*, bem como dimensionar os dutos flexíveis e os enrijecedores de tal forma que tenham um tempo de vida pré-estimado.

Portanto, ao longo deste trabalho, a denominação *bend-stiffener* será genericamente atribuída a este material de sacrifício (chamado, também, de *liner*), com função essencialmente tribológica, dentro dos diversos componentes que compõem o sistema *bend-stiffener*.

Adicionalmente, pretende-se desenvolver e implementar uma rotina de aquisição, monitoramento e armazenamento dos sinais de vibrações, de tal forma a monitorar eventos importantes para o ensaio de desgaste, como, por exemplo, *stick-slip*, ou situações anômalas.

1.2. Estrutura do trabalho

Os assuntos pertinentes a este trabalho estão organizados com a seguinte estrutura: no Capítulo II é feita uma revisão bibliográfica; no Capítulo III são apresentadas as metodologias e os procedimentos experimentais referentes aos ensaios realizados; no Capítulo IV são apresentados os resultados e as discussões. No Capítulo V estão resumidas as principais conclusões e, por fim, no Capítulo VI são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

1.3. Contribuição técnico-científica do trabalho

Os resultados deste trabalho ampliam o estado atual do conhecimento nos seguintes aspectos:

- Metodologia para avaliação do desgaste de amostras do par tribológico *riser-enrijecedor* submetidas a ensaios de desgaste por deslizamento;
- Quantificação ou predição da vida útil do revestimento do duto flexível e do material de sacrifício acoplado ao *bend-stiffener*;
- Monitoramento das vibrações na estrutura do tribômetro e determinação da correlação entre o desgaste e as vibrações.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Tribologia

Os avanços e a difusão da tecnologia no mundo trazem diversas vantagens para o setor produtivo industrial como, por exemplo, nas áreas de controle de processos e manutenção. Entretanto, vários problemas relacionados às falhas e/ou paradas de máquinas são provenientes da interação das peças em movimento, ou seja, da interação entre as superfícies (RADI *et al.*, 2007).

Deve-se perceber que praticamente todos os mecanismos desenvolvidos pelo homem funcionam quase sempre como o resultado do movimento relativo entre as superfícies e que os problemas provenientes destes sistemas são, geralmente, tribológicos. A tribologia é um campo da ciência que aplica uma análise operacional para problemas de grande significância econômica tais como confiabilidade, manutenção e desgaste de equipamentos técnicos que abrangem desde aparelhos domésticos às naves espaciais (RADI *et al.*, 2007).

No ano de 1966, através do relatório de Jost (1966), o termo tribologia, que origina do grego (tribo – atritar e logos - estudo), foi definido como a “ciência e tecnologia de superfícies interagindo em movimento relativo e das práticas e assuntos relacionados” (HUTCHINGS, 1992).

Basicamente, a tribologia inclui o estudo da lubrificação, atrito e desgaste resultante da interação entre corpos em movimento relativo.

O atrito é definido como a resistência ao movimento relativo. Ele surge de interações dos sólidos na área real de contato e depende do par de materiais em contato e do tribossistema (ZUM GAHR, 1987).

O atrito promove desgaste e dissipação de energia e é considerado como fonte principal de perda de materiais e de desempenho mecânico. Pode-se dizer que a lubrificação é um método de controlar o desgaste e reduzir o atrito (HUTCHINGS, 1992).

2.2. Desgaste por deslizamento

Segundo Zum-Gahr (1987), a norma DIN 50320 (1979) define desgaste como sendo a perda progressiva do material da superfície de um corpo sólido devido à ação mecânica, ou seja, o contato e o movimento relativo contra um contra-corpo sólido, líquido ou gasoso. Ainda de acordo com esta norma, os mecanismos de desgaste são agrupados em quatro tipos principais, sendo eles:

- Adesão;
- Abrasão;
- Fadiga de contato;
- Triborreação.

O desgaste por deslizamento é o mais importante para este trabalho, sendo, por isso, o único aqui abordado.

Segundo Zum Gahr (1987), o desgaste por deslizamento pode ser caracterizado pelo movimento relativo entre duas superfícies lisas em contato, sujeitas a uma carga aplicada, onde um dano superficial durante o movimento relativo não ocorre pela formação de sulcos profundos oriundos da penetração de asperidades ou partículas duras. As superfícies podem ser de natureza metálica ou não, e lubrificadas ou não.

Zum Gahr (1987) afirma que, durante o deslizamento, o desgaste pode ocorrer devido aos seguintes mecanismos ou processos físicos: adesão (Fig. 2.1 a), fadiga superficial (Fig. 2.1 b) e c), reação triboquímica e/ou abrasão (Fig. 2.1 d). Muitos fatores influenciam na prevalência de um determinado mecanismo de desgaste. Todavia, de acordo com a caracterização do desgaste por deslizamento, a abrasão não pode ser um mecanismo dominante. Um dos fatores que determinam os mecanismos de desgaste é o tipo do contato, elástico ou plástico, que é função da força de atrito, da área de contato e das propriedades dos materiais. Além disso, os outros fatores são: as propriedades do corpo e do contra-corpo, os elementos interfaciais e as condições de carregamento.

Basicamente, os parâmetros que compõem um tribossistema e que são influentes durante o desgaste por deslizamento são: rugosidade superficial; carregamento; velocidade de deslizamento; vibração; forma e dimensão dos corpos; propriedades triboquímicas das superfícies, tais como quantidade e tipo dos filmes interfaciais (óxidos, por exemplo); reatividade química; condutividade térmica e elétrica dos materiais; lubrificação; umidade;

temperatura; pressão atmosférica; e propriedades metalúrgicas (dureza, ductilidade, resistência à tração, por exemplo) (ZUM GAHR, 1987).

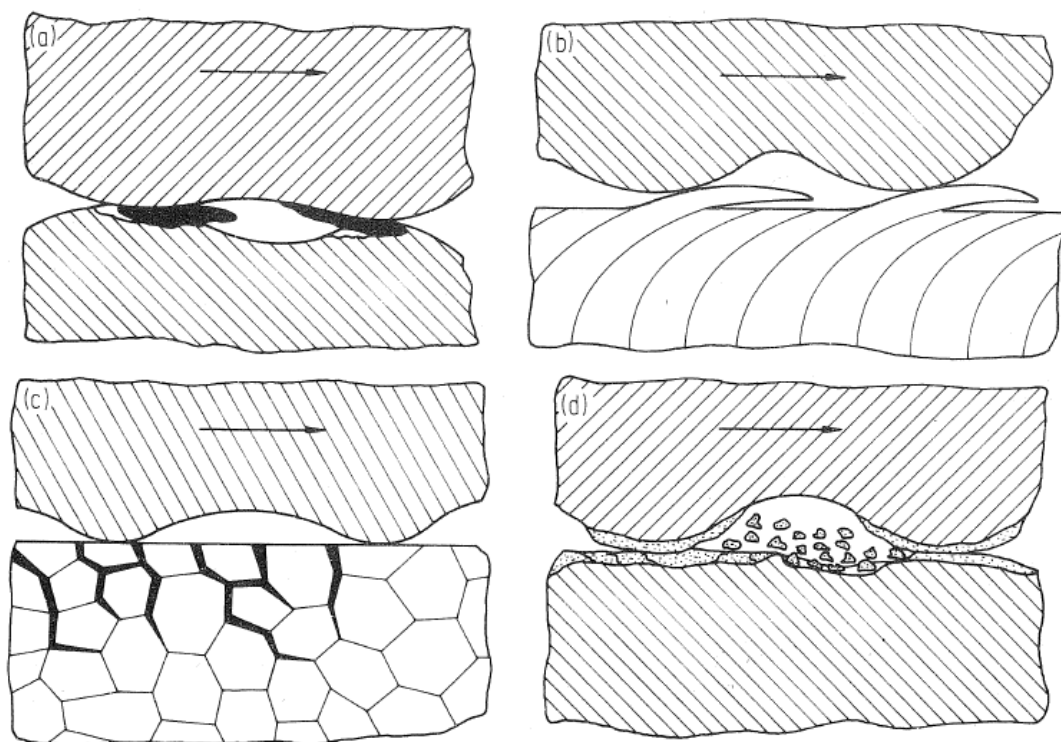


Figura 2.1 - Mecanismos do desgaste por deslizamento, a) adesão; b) fadiga superficial em sólidos dúcteis; c) fadiga superficial em sólidos frágeis e d) reação triboquímica e/ou abrasão (ZUM GAHR, 1987)

Como resultado da alta pressão e subsequente reação entre as superfícies de contato, a adesão (Fig. 2.1 a) é a formação de uma junção localizada devido à deformação plástica causada pelo movimento de discordâncias e das superfícies deslizantes (HUTCHINGS, 1992). A adesão interfacial entre duas superfícies em contato pode ocorrer devido às ligações iônicas, covalentes, metálicas, pontes de hidrogênio e/ou de van der Waals (ZUM GAHR, 1987).

Em virtude do prosseguimento do movimento relativo, estas junções formadas aumentam de tamanho devido à deformação plástica. A deformação plástica necessária para o rompimento destas junções encrua estas ligações, aumentando sua dureza. O consequente rompimento ou cisalhamento das junções ocorre dentro de um ou de outro dos materiais de base, ou de ambos os materiais de base envolvidos, se a ligação interfacial for forte. Tal ruptura das junções geralmente conduz à transferência de material de uma superfície para outra ou os fragmentos arrancados podem ficar livres entre as superfícies em deslizamento. A aplicação de esforços mecânicos nestes fragmentos causa ainda mais

encruamento, tornando-os mais duros. Isto permite que estes fragmentos atuem como partículas abrasivas, sulcando a superfície de contato menos dura (ZUM GAHR, 1987).

Conforme a Figura 2.2 b), devido à fadiga superficial, a superfície menos dura sofre delaminação por ter sido submetida a tensões cíclicas, provocando, assim, deformação plástica com o consequente destacamento de fragmentos na forma de lâmina (ZUM GAHR, 1987).

A Fig. 2.2 c) mostra que pela total ou quase completa ausência de deformação plástica, tensões trativas na superfície deslizante podem conduzir à formação de trincas em materiais frágeis como nos materiais cerâmicos (ZUM GAHR, 1987).

A Fig. 2.2 d) mostra que a ruptura de filmes triboquímicos pode resultar na formação de partículas de desgaste. Essas partículas podem atuar como agentes abrasivos, se forem mais duras que o material base (ZUM GAHR, 1987).

De acordo com as condições existentes na utilização do componente, é possível conhecer qual o mecanismo de desgaste que ocorrerá predominantemente. Entretanto, a intensidade deste é de difícil previsão, já que está envolvida uma série de variáveis implícitas ao sistema. Portanto, as dificuldades na previsão do comportamento ao desgaste estão, normalmente, associadas às variações dos parâmetros que compõe o sistema tribológico (ZUM GAHR, 1987).

2.3. Alguns polímeros utilizados em dutos flexíveis e enrijecedores

Polímeros são macromoléculas formadas a partir de moléculas menores, os monômeros. O processo de transformação desses monômeros em polímero é denominado de polimerização.

Os polímeros, graças às suas propriedades de isolamento elétrico e térmico, sua estabilidade química em meios diversos e relativa facilidade de processamento, substituem ligas metálicas de alto desempenho ou cerâmicos. Os materiais poliméricos são utilizados, por exemplo, como revestimento ou substrato em ambientes marinhos, onde a utilização de aço comum é comprometida pela corrosão acentuada (MORAES, 2005).

Os polímeros classificados como poliamida (PA) e poliuretano (PU) serão brevemente caracterizados a seguir, já que este trabalho abrange a avaliação do desgaste em amostras de *risers*, cujo revestimento polimérico é feito de PA, especificamente PA 11, e em amostras de *liners* de enrijecedores, fabricados em PU, especificamente em elastômeros de poliuretano termoplástico (TPU).

2.3.1. Poliamida (PA)

As poliamidas são polímeros termoplásticos, com alta resistência mecânica, devido às ligações das cadeias serem por pontes de hidrogênio, e com estabilidade dimensional. A presença das ligações de pontes de hidrogênio, por outro lado, facilita a permeação de moléculas de água, as quais se difundem entre as cadeias e se posicionam na ponte de hidrogênio. Esta capacidade de absorção de água torna as poliamidas higroscópicas (CANEVAROLO JR, 2006).

Dentre as várias poliamidas empregadas pela indústria, destaca-se a poliamida 11 (PA 11). Ela é derivada do ácido 11 amino undecanóico através de mecanismos de autocondensação (RAMOS NETO, 2003).

2.3.2. Poliuretano (PU)

Os poliuretanos são produzidos pela reação de poliadição de um isocianato (di ou polifuncional) com um poliol 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, entre outros. 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 (VILAR, 2004 *apud* MORAES, 2005).

Os poliuretanos podem ser polímeros termoplásticos, termofixos, elastoméricos ou fibrosos (CANEVAROLO JR, 2006). Os poliuretanos elastoméricos apresentam as seguintes características mecânicas: resistência à tração, à compressão, ao rasgo, à fadiga, ao cisalhamento, à abrasão e resiliência. Eles possuem, também, resistência química à água, aos solventes aromáticos, aos hidrocarbonetos alifáticos, aos ácidos orgânicos e às bases (SANTOS, 2007).

Os elastômeros de poliuretano termoplástico (TPU) possuem excelentes propriedades mecânicas e elevada resistência ao rasgo, à oxidação e à umidade (SINHA; BRISCOE, 2009). Estes materiais podem ser processados por várias vezes, com reciclagem e novas conformações. Este processamento pode ser feito através de aquecimento, fusão, injeção, extrusão, prensagem ou compactação.

2.4. Técnicas empregadas para a avaliação do desgaste de diversos materiais

Existem vários métodos, relatados na literatura, para avaliar o desgaste. Alguns deles utilizam medição sem contato, tais como: microscópio de interferência à luz branca (TASAN; ROOIJ; SCHIPPER, 2005); perfilômetro de varredura, com o levantamento da topografia 3D da superfície, e posterior análise com *software* específico (PÁCZELT; KUCHARSKI; MRÓZ, 2012); método de mudança de fase utilizando padrões de franja para avaliar o desgaste através da construção de um mapa 3D (WANG; WONG; HONG, 2006); método de medição confocal codificado cromaticamente, que permite a visualização 3D da superfície e a medição do desgaste volumétrico (TUKE *et al.*, 2010); microscopia de força atômica (AFM), através da diferença topográfica entre as superfícies desgastada e não desgastada (GAHLIN; JACOBSON, 1998).

Todavia as técnicas mais comuns e amplamente empregadas são através dos métodos com contato, tais como aqueles que utilizam: LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), MM3C (Máquina de Medir a três Coordenadas) e balança. Estas serão abordadas a seguir.

2.4.1. Avaliação do desgaste utilizando LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*)

Silva *et al.* (2006) utilizaram um sensor LVDT para a determinação da taxa de desgaste de pinos poliméricos, ensaiados contra discos em alumina (Al_2O_3) e em aço inoxidável duplex.

Estes sensores indutivos de deslocamento possibilitam a medição do desgaste através da variação de comprimento da amostra analisada. No caso dos *risers*, a avaliação do desgaste, utilizando estes instrumentos, ocorre através da perda de espessura.

No tribossistema considerado neste trabalho, o uso desta técnica na avaliação do desgaste em amostras de *risers* seria complicada, pois a estimativa da redução de espessura seria influenciada pelos efeitos da deformação elástica e da absorção de água das amostras durante os ensaios. Também, esta avaliação resultaria na quantificação do desgaste total de ambos os materiais do par tribológico *riser*/enrijecedor, isto é, não permitiria diferenciar a perda de espessura de cada material desgastado. Além disso, os LVDTs do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) possuem resolução de 0,0187 mm, o que é considerada inadequada para a avaliação de pequenas reduções de espessura.

2.4.2. Avaliação do desgaste utilizando balança

A técnica mais comumente utilizada para a avaliação do desgaste é através da perda mássica, com a utilização de uma balança. Este processo, conhecido como método gravimétrico interrompido, inclui a medição da massa dos corpos de prova antes e depois dos ensaios de desgaste e a diferença entre os valores de massa fornece, então, o valor da perda de massa devido ao desgaste.

Os trabalhos de Baldacim (2000), Unal; Sen; Mimaroglu (2004) e Santana (2009) utilizaram os resultados da perda mássica para obter o volume desgastado dos corpos de prova analisados. Isto porque, a perda volumétrica das amostras desgastadas pode ser derivada da razão entre a perda mássica e o valor da densidade do material destas amostras.

O trabalho desenvolvido por Tedesco (2010) comparou o método gravimétrico, utilizando uma balança de resolução 0,0001 g, com o método geométrico (alteração dimensional), utilizando microscopia ótica da superfície e, em alguns casos, microscopia eletrônica de varredura, para medir o diâmetro da circunferência da marca de desgaste nas pontas dos pinos utilizados.

Tedesco (2010) comparou os resultados obtidos a partir de ambos os métodos e foi constatada uma tendência a se obter maiores valores de volume desgastado pelo método gravimétrico quando comparado com o geométrico. Algumas explicações, que justificam este fato e a escolha do método geométrico como procedimento padrão de medida de volume desgastado no trabalho de Tedesco (2010), são apresentadas a seguir:

- A fração volumétrica desgastada em alguns ensaios é muito pequena, sendo que a diferença de massa antes e após o ensaio se encontra na quarta casa decimal, ou seja, muito próxima ao erro do próprio equipamento de medida;
- No momento de pesagem das amostras, a perda de material, gerada pelo lascamento da superfície decorrente de trincas, foi somada no valor e, portanto, considerada erroneamente como massa desgastada. Também, óxidos na superfície da peça, da mesma forma, foram somados ao valor de perda de massa erroneamente.

O método gravimétrico interrompido, se aplicada na quantificação do desgaste em amostras de enrijecedores e *risers*, oferece limitações, pois:

1. A variação da massa pode ser muito pequena, menor que a resolução da balança utilizada. Desta forma, há dificuldade de se encontrar uma balança com uma resolução adequada para a exatidão requerida durante a medição. Além disso, quanto maior a precisão da balança, menor será a sua capacidade de medição de

massa, o que impõe outra limitação na avaliação das massas das amostras de *risers* e enrijecedores (7,5 kg, aproximadamente), que são relativamente grandes;

2. A perda de massa, em grande parte das ocasiões, não reflete o verdadeiro desgaste. Pois, o teste é feito com as amostras submersas em água e, após o ensaio, a secagem da amostra de enrijecedor e, principalmente, de *riser* não é facilmente garantida. Isto porque, estas amostras são constituídas de materiais poliméricos, os quais absorvem água. Ainda há de se considerar que o *riser* contém internamente inúmeras cavidades, dificultando a sua secagem.
3. A quantificação da perda mássica não fornece informações sobre a superfície desgastada (CARMIGNATO *et al.*, 2011). Desta forma, não é possível saber como o desgaste foi distribuído ao longo da superfície (GAHLIN; JACOBSON, 1998).

Visto isso, conclui-se que a balança não é uma alternativa eficiente para a avaliação do desgaste em enrijecedores e, principalmente, em *risers*.

2.4.3. Avaliação do desgaste utilizando máquinas de medir a três coordenadas (MM3C)

Outra técnica de avaliação do desgaste é a que utiliza uma MM3C. Esta máquina tem sido utilizada extensivamente durante anos em muitos setores da indústria para a inspeção da produção e para assegurar a qualidade dos produtos. Esse processo de inspeção, através da MM3C, demanda pouco tempo de trabalho, de forma a permitir um rápido controle das formas e dimensões dos elementos produzidos.

Uma MM3C é um sistema mecatrônico de medição cujo objetivo é obter as coordenadas cartesianas de pontos individuais sobre superfícies de peças (CARDOZA, 1995). A grande vantagem destas máquinas está na capacidade de calcular, a partir desses pontos, diversas características dimensionais e geométricas (HOCKEN; BOSCH, 2011).

Segundo a ASME B89.4.1. (1997), existem variados tipos de máquinas de medir, que diferem entre si essencialmente pelo tipo de construção e pela exatidão de medida. Todas elas apresentam, no entanto, componentes comuns tais como: uma estrutura mecânica com três eixos e escalas de medição que simulam um sistema cartesiano; sensores, ou sistema apalpador, responsáveis por atingir os pontos a serem inspecionados; uma unidade de controle e um computador com *softwares* especialmente desenvolvidos (PEREIRA, 2011).

Na metrologia dimensional convencional, para resolver os complexos problemas da medição tridimensional, é necessário usar de forma integrada diversos instrumentos, acessórios e padrões, tais como paquímetros, relógios comparadores, micrômetros, blocos padrão, desempenos, esquadros, etc. (MAY, 2007).

A medição por coordenadas vem se tornado cada vez mais importante na inspeção de peças fabricadas na indústria, já que são sistemas de medição extremamente flexíveis,

precisos e confiáveis, que possibilitam a medição de diversas propriedades metrológicas de uma peça (KUNZMANN; WÄLDELE, 1988). Sua excelente versatilidade tem proporcionado a substituição de grande parte dos instrumentos da metrologia convencional (HOCKEN; BOSCH, 2011).

Na Tabela 2.1 é apresentada uma breve comparação entre a metrologia dimensional convencional e a metrologia por coordenadas (MAY, 2007).

Tabela 2.1 – Vantagens entre a metrologia dimensional convencional e a metrologia por coordenadas (ADEMIR, 2003; BOSCH, 1995 *apud* MAY, 2007)

Metrologia Convencional	Metrologia por coordenadas
Alinhamento manual.	Alinhamento automático.
Instrumentos de propósito único, difíceis de adaptar quando são requeridas múltiplas tarefas.	Múltiplas tarefas de medição podem ser executadas através da capacidade de adaptação do <i>software</i> de medição.
Comparação das medições com medidas materializadas (Ex.: blocos-padrão).	Comparação com modelos matemáticos.
Maior tempo de inspeção de peças complexas.	Menor tempo de inspeção de peças complexas.
Avaliação separada para forma, tamanho, localização e orientação, utilizando instrumentos diferentes.	Avaliação de forma, tamanho, localização e orientação, utilizando uma única configuração no sistema coordenado.

Apesar das vantagens apresentadas pelas MM3Cs, a exatidão e a precisão dos resultados das medições efetuadas nestas máquinas podem ser afetadas por diversos fatores como mostra a Fig. 2.2.

No primeiro grupo aparecem os erros decorrentes dos processos de fabricação e montagem dos diversos componentes da MM3C. Estes são denominados de erros geométricos e se materializam durante a movimentação dos eixos coordenados, devido à interação entre os componentes. Segundo BOSCH (1995) estes erros constituem a parcela mais significativa do erro volumétrico.

As MM3Cs são sensíveis às mudanças nas condições ambientais, sendo que de todas elas, são as variações de temperatura que produzem os maiores efeitos sobre a exatidão e repetibilidade dos resultados das medições. De acordo com a NBR NM ISO 1 (1997), as medições devem ser efetuadas a uma temperatura de 20°C, definida como a temperatura padrão.

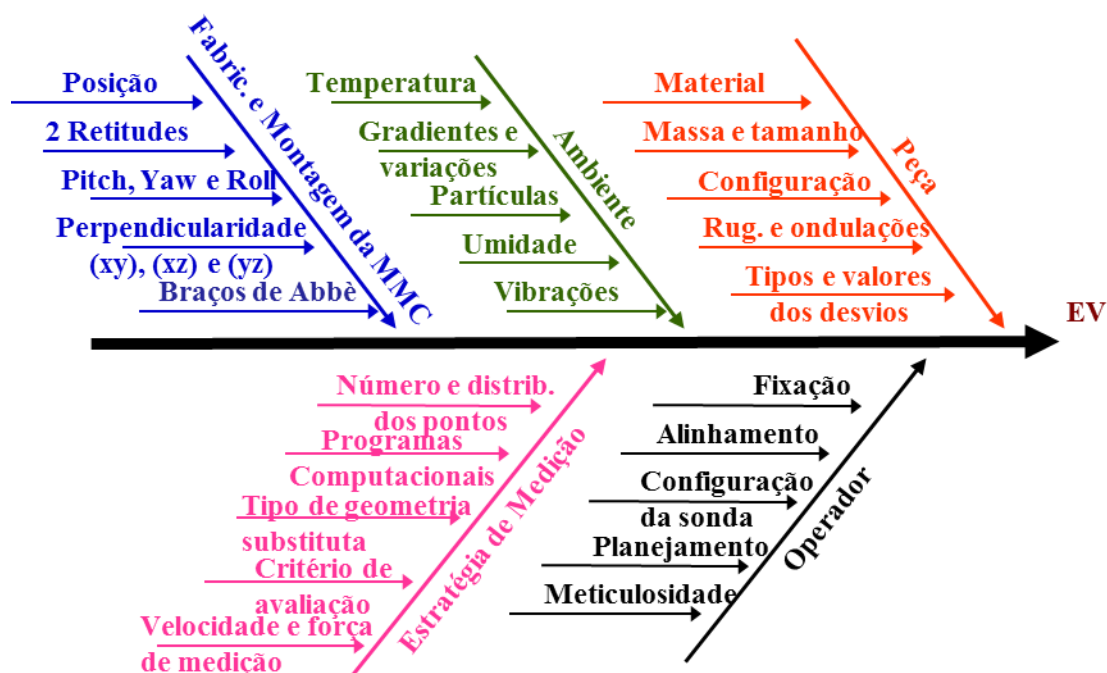


Figura 2.2 – Fontes de erros em MM3Cs (WECKENMANN; KNAUER; KILLMAIER, 2001)

Vibrações transmitidas pelo ar ou pelo solo podem constituir fontes de erros significativas. Segundo Meredith (1996) *apud* Pereira; Ni (2011), as vibrações externas constituem um problema em potencial quando se exige elevada exatidão nos resultados das medições com MM3C. Dentre as principais fontes de vibrações estão: máquinas ferramentas; compressores de ar alternativos; trânsito nas proximidades da instalação; vibrações acústicas; entre outros.

A integridade dos programas computacionais e o método de ajuste utilizado podem influenciar de forma significativa o resultado das medições (CARDOZA, 1995, PHILLIPS, 2011). Assim sendo, nos últimos anos, as MM3Cs passaram a ter *softwares* mais desenvolvidos, possibilitando a análise e o levantamento de maior quantidade de informações durante o processo de medição. Estas máquinas tornaram-se, então, um sistema de medição de alta precisão e flexibilidade. Sendo possível não apenas realizar processos de inspeção, mas também avaliar o desgaste e, ainda, avaliar a distribuição do desgaste ao longo da superfície analisada, realizando um mapeamento superficial.

O objeto a medir pode induzir a erros no processo de medição devido à geometria, tamanho, massa, material e rigidez próprios. A rigidez da peça deve ser observada, pois pode exigir cuidados especiais na fixação, na força de apalpação e na distribuição dos pontos sobre a superfície, particularmente para peças flexíveis e delgadas (peças plásticas ou estampadas) (JÚNIOR, 2010).

Segundo May (2007), peças plásticas deformam com aplicação de pequenas forças, inclusive com a força de contato do sensor de medição de uma MM3C. Desta forma, é importante que os sistemas de fixação da peça estejam bem distribuídos e colocados de modo que estas deformações sejam minimizadas.

May (2007) também alerta sobre as influências das irregularidades da superfície da peça a ser medida nos resultados das medições. Esta influência aparece na medição ponto a ponto, mas afeta em maior grau a medição por *scanning*.

A influência da rugosidade da superfície das peças pode ser diminuída pelo uso de um diâmetro adequado do sensor. Anbari e Trumpold (1990) *apud* May (2007) realizaram um estudo que mostra a influência do diâmetro do sensor, com diferentes acabamentos superficiais da peça. O apalpador acaba tornando-se um filtro mecânico que atenua a rugosidade da superfície e induz erros sistemáticos e aleatórios (Fig. 2.3). Outras falhas na superfície da peça, tais como rebarbas, rechupes, bolhas, pingos de solda, oxidação, partículas impregnadas, também contribuem para gerar erros de medição. Assim, o conhecimento do processo de fabricação é de grande valia, para que erros devido a tais características possam ser evitadas.

Segundo Júnior (2010), deve-se utilizar apalpador com ponta de diâmetro pequeno quando houver maior interesse no erro de forma da peça. Já para peças com superfície em bruto, recomenda-se utilizar apalpador com ponta de diâmetro maior.

No caso das peças desgastadas de *riser* e enrijecedor, as superfícies apresentam bastante irregularidades, que por serem de interesse na avaliação do desgaste, induz à utilização de um apalpador com ponta de diâmetro menor.

May (2007) ressalta que o material da peça também pode apresentar afinidade química com o material do sensor, por exemplo, quando se usa um sensor de rubi para medir uma peça de alumínio. Na medição por *scanning*, pode ocorrer desprendimento do material da peça e este, por sua vez, ficar aderido no sensor, gerando erros significativos.

A quantidade de pontos apalpados e sua distribuição na superfície da peça (estratégia de amostragem) podem influenciar de forma significativa os resultados das medições e a incerteza a eles associada (WECKENMANN; HEIGRICHOWSKI; MORDHORST, 1991 *apud* PHILLIPS, 2011).

Os trabalhos desenvolvidos, segundo Bills *et al.* (2007) e Bills *et al.* (2012), constam uma metodologia que utiliza uma MM3C para a análise do desgaste, através da variação volumétrica em próteses de quadril, as quais caracterizam um par metal-metal. Esta metodologia mostrou-se eficiente na medição de desgaste volumétrico, visto a alta repetibilidade dos resultados.

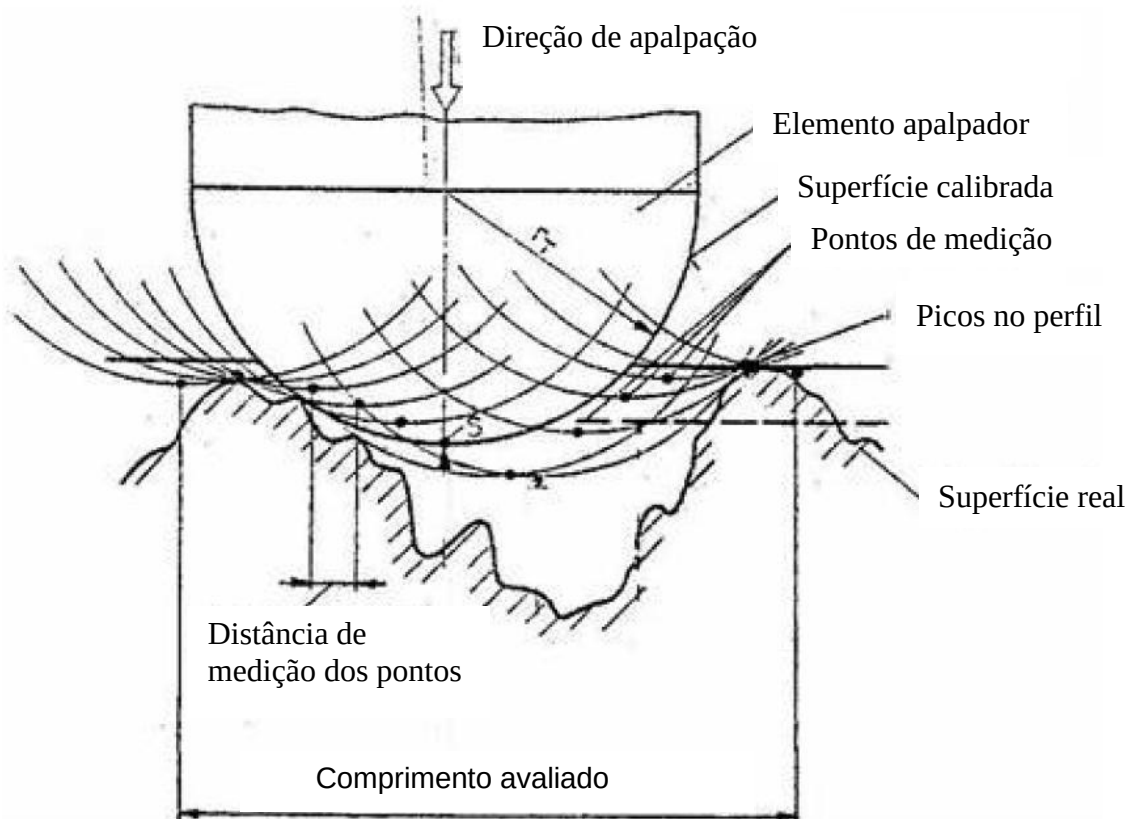


Figura 2.3 – Pontos de contato o elemento apalpador na superfície rugosa da peça (ANBARI; BECK, 1990 *apud* MAY, 2007)

O procedimento aplicado nestes trabalhos baseou-se na norma ISO 14242-2 (2000), utilizada para análise do desgaste de próteses totais de articulação do quadril, a qual sugere um método de medição do desgaste geométrico utilizando uma MM3C, denominado método de alteração dimensional. Por exemplo, ele prescreve que:

- O erro máximo de medida da posição axial (D) tem de ser de $D = 4 + 4L \times 10^{-6}$ (D em μm , L é a distância medida em m);
- O espaçamento entre os pontos ao longo da linha de medição não deve ser superior a 1 mm.

O objetivo do trabalho de Bills *et al.* (2007) foi de estudar a viabilidade da utilização de técnicas avançadas com MM3C para acessar o desgaste dos componentes de substituição total do quadril implantados, mesmo sem conhecimento prévio disponível da geometria da superfície original. O uso destas técnicas permitiu não apenas a determinação do volume desgastado, mas também a localização exata do desgaste associado através de mapas de desgaste.

Este estudo surgiu como uma alternativa ao método gravimétrico, pois a aplicação deste último não é viável para avaliação do desgaste em articulações protéticas, por não

haver dados das dimensões e formas originais da superfície. E ainda, o método amplamente utilizado na medição do desgaste clínico “in vivo”, que é através da análise radiográfica, não é muito preciso.

Bills *et al.* (2012) afirmaram que a avaliação do desgaste é uma ferramenta para diagnosticar os mecanismos de falha e para estimar o desempenho de longo prazo das próteses. Para isto, os parâmetros mais utilizados na avaliação do desgaste são a determinação do desgaste volumétrico, do desgaste linear e das taxas de desgaste.

O estudo de Bills *et al.* (2012) objetivou: desenvolver um método para analisar o desgaste de próteses de quadril, baseado nos princípios da ISO 14242-2 (2000); quantificar a incerteza de medição; manipular os dados para estimar a geometria da superfície original; aplicar o método nos pares protéticos metal-metal.

Este trabalho relatou que fatores como espaçamento entre os pontos ao longo da linha de medição e a distância entre as linhas podem ter um grande efeito na incerteza de medição e, dependendo da distribuição dos pontos ao longo da superfície de medição, a incerteza pode ser da mesma ordem do desgaste medido.

Nestes trabalhos de Bills *et al.* (2007) e Bills *et al.* (2012), foi utilizada uma MM3C, fabricada pela Zeiss, modelo PRISMO, com faixa nominal de 1.800 mm, 1.000 mm e 1.000 mm para os eixos X, Y e Z, respectivamente. O erro máximo de medida da posição axial é de $1,9 + L/300 \mu\text{m}$ para os três eixos, onde L é a distância medida em mm, o erro de apalpação é de $0,7 \mu\text{m}$ e o erro de varredura é de $1,3 \mu\text{m}$.

Em ambos os trabalhos, para reproduzirem uma superfície próxima à original antes do desgaste, foi medida uma porção não desgastada dos componentes desgastados, acetábulo e/ou cabeça do fêmur, para criar um modelo CAD mais exato. Os pontos medidos nesta região foram exportados para um *software* com plataforma CAD (Catia, Dassault Systemes, France), que serviram como base para obter a criação de uma superfície próxima à anterior ao desgaste.

Tal modelo CAD, representativo do componente não desgastado, foi utilizado para definir o alinhamento da peça no *software* de medição e, posteriormente, utilizado para definir a distribuição dos pontos a serem apalpados.

No trabalho de Bills *et al.* (2007) foi utilizada uma malha de $0,5 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$ para a medição dos pontos na superfície, sendo que foram executados seis ciclos de medição para posterior determinação da média aritmética.

Já no trabalho de Bills *et al.* (2012), os pontos foram medidos utilizando uma malha polar, para que os pontos ficassem concentrados no pólo, onde ocorre maior desgaste, com máximo espaçamento equatorial entre as linhas de $0,262 \text{ mm}$ e uma distância entre os pontos ao longo da linha de $0,1 \text{ mm}$, totalizando 600 linhas e 236.400 pontos. Esta malha foi

assim definida após utilizar pontos teóricos correspondentes a uma semi-esfera perfeita e, em seguida, foram realizadas simulações, no *software* de cálculo de volume, com a utilização de várias densidades de pontos. Portanto, a malha utilizada foi aquela que forneceu uma pequena diferença entre o volume calculado pelo *software* e o volume teórico, isto é, um erro sistemático relativamente pequeno da ordem de $0,714 \text{ mm}^3$. Não foi utilizada a malha que forneceu o menor erro sistemático, da ordem de $0,233 \text{ mm}^3$, por demandar maior tempo de medição.

Em ambos os trabalhos, o desgaste foi quantificado através da diferença entre o volume obtido a partir dos pontos medidos e o volume da superfície que representou a peça na condição não desgastada, e foi visualizado através de mapas de desgaste.

Reinisch *et al.* (2003) também avaliaram as taxas de desgaste volumétricas em um par metal-metal de próteses de quadril através da utilização de uma MM3C.

Já o trabalho de CARMIGNATO *et al.* (2011), avaliou os componentes da cabeça femoral cerâmica antes do desgaste, obtendo, assim, um modelo CAD de referência, e após o desgaste. Foi utilizada uma MM3C, fabricada pela Zeiss, modelo PRISMO VAST 7, juntamente com o *software* para o cálculo do volume (PolyWorks, InnovMetric Software Inc., Canada). Através deste *software* foi possível obter: a) mapas mostrando o desgaste local das superfícies desgastadas em relação ao modelo CAD; b) o volume desgastado, o qual foi calculado como o volume incluído entre a superfície representada pelos pontos medidos e a superfície do modelo CAD de referência.

Este trabalho concluiu que as fontes de incerteza predominantes foram, em primeiro lugar, a incerteza associada ao sistema de apalpamento da MM3C, em segundo lugar, a estratégia de medição adotada, especificamente o espaçamento entre os pontos de medição, a qual pode ser minimizada utilizando uma malha de pontos mais refinada, embora isto aumente o tempo de medição.

Os estudos realizados para a análise do desgaste utilizando uma MM3C, em geral, forneceram resultados de desgaste volumétrico dos componentes analisados, através da diferença entre o volume da superfície que representa a peça na condição não desgastada e o volume medido da peça após o desgaste. Com o auxílio de *softwares* específicos para a análise do volume, foram obtidos resultados de desgaste volumétrico, bem como mapas de desgaste, identificando em cores as regiões mais desgastadas e a profundidade do desgaste ocorrida.

Neste contexto, é justificada a utilização de uma MM3C para avaliação do desgaste em amostras do par *riser-bend-stiffener*. Todavia, a quantificação do desgaste pela variação volumétrica somente é aplicável em amostras de enrijecedores. Isto porque o valor do volume medido após o desgaste em amostras de *risers* pode ser influenciado pelas

deformações de seu material, ocasionadas durante o processo de desgaste. Além disso, é inviável a utilização e a fixação de toda a amostra do *riser* no desempenho da MM3C, para uma possível análise do volume, devido à dificuldade de se retirar a água absorvida pelas camadas internas do *riser*, durante o ensaio. Para amostras de *risers* é conveniente, então, realizar uma análise do desgaste linear, isto é, através da variação de espessura da camada polimérica externa ao longo da região desgastada.

Antes de se realizar medições em MM3C, para que sejam alcançados resultados confiáveis, é de grande importância a elaboração de um planejamento da medição adequado e consistente com a tarefa de medição (MORSE, 2011). Assim sendo, a estratégia de medição é sempre uma solução de compromisso.

Visto isso, para a quantificação do desgaste em amostras do par *riser-bend-stiffener* deve ser elaborada uma estratégia de medição, que consiste em definir: o comprimento da haste e o diâmetro da ponta de medição, o posicionamento da peça no volume de trabalho da máquina, a forma de fixação, a qualificação, o alinhamento, a definição do número de pontos a serem apalpados e a distribuição dos mesmos (MORSE, 2011), bem como, o número de ciclos de medição a serem efetuados.

Como o metrologista deve criar as condições para obter resultados com a menor incerteza possível, estratégias com grande número de pontos apalpados são de praxe. Deve-se atentar, todavia, em se realizar as medições de maneira econômica. Desta forma, o operador da MM3C deve ter, além de conhecimento técnico, bom senso com relação ao custo-benefício. Como consequência natural, a capacitação do profissional que irá operar a MM3C deve ser condizente com a complexidade das tarefas que são executadas, de modo a garantir a qualidade dos resultados da medição (HANSEN; CHIFFRE; ADEMIR, 2006; WILHELM; HOCKEN; SCHWENKE, 2001 *apud* MAY, 2007).

Portanto, a estratégia de medição apropriada, utilizando-se uma MM3C, é aquela que assegura a minimização da incerteza de medição dentro do menor tempo de medição (GAPINSKI; RUCKI, 2007). Sabe-se que, quanto maior o número de pontos medidos, maior a exatidão dos resultados. Todavia, este aumento do número de pontos está diretamente relacionado ao tempo de medição e ao custo do processamento dos dados. Em contrapartida, de acordo com as regras estatísticas, se poucos pontos são medidos, a incerteza de medição aumenta (OLLISON; ULMER; McELROY, 2012).

A expressão dos resultados da estimativa do desgaste, neste trabalho, foi respaldada nos documentos: ISO/TAG 4/WG 3 (2008) e a ISO/IEC 17025 (2005), atualmente em vigor. Esta última norma contém todas as especificações e exigências que os laboratórios responsáveis pela realização de ensaios e calibrações devem atender para garantir a emissão de resultados confiáveis.

Esta norma prevê que, após a realização de qualquer medição, a incerteza deve ser calculada, utilizando-se métodos apropriados. Quando não for possível utilizar todos os critérios estatísticos, deve-se, ao menos, realizar uma estimativa razoável desse parâmetro, para se ter noção da dispersão dos valores medidos.

A expressão da incerteza de medição juntamente aos resultados de medição de desgaste aumenta a confiabilidade da medição, contribui para a rastreabilidade dos resultados das medições aos padrões nacionais e a possibilidade de comparação dos resultados com outros obtidos por outros métodos ou equipamentos.

Já o documento “*Guide to the expression of uncertainty in measurements*” (popularmente conhecido como GUM), publicado em 1993, padroniza os procedimentos de avaliação e de expressão da incerteza de medição. Este guia apresenta critérios e regras gerais para expressar e combinar as incertezas individuais que afetam o processo de inspeção e, assim, determinar a incerteza de medição, que pode seguir vários níveis de exatidão e complexidade. Pela sua extrema relevância, o referido documento foi traduzido no Brasil por um grupo de especialistas. E a sua edição mais recente, em português, data de 2012.

2.5. Correlação entre vibrações e desgaste

As vibrações de um sistema mecânico geralmente ocorrem devido a: movimentos gerados por folgas; atrito entre peças; ruídos elétricos de baixa frequência; e devido a forças desequilibradas de componentes rotativos. Elas podem resultar em ruídos indesejáveis, fratura de peças, aumento da taxa de desgaste e, em situações extremas, instabilidades importantes no sistema mecânico.

A transformada de Fourier permite a análise em frequência dos sinais de vibração, possibilitando, assim, a identificação das frequências presentes nestes sinais e, ainda, da frequência onde está ocorrendo a maior amplitude de vibração.

A amplitude de vibração de um espectro de frequência indica a severidade do problema, enquanto que a frequência representa a fonte do defeito (PENG; KESSISSOGLOU, 2003).

Para a análise de sinais amostrados no domínio do tempo, utiliza-se a transformada discreta de Fourier, o que resulta em um espectro de frequência. O módulo do espectro tem simetria em relação à frequência de Nyquist, que é a metade da frequência de aquisição do sinal e é, portanto, a máxima frequência observável no espectro.

A resolução em frequência é calculada pela divisão da taxa de aquisição pelo número de amostras coletadas. Se houver frequências do sinal que não são múltiplas da

resolução em frequência, ocorre o erro de amostragem, denominado de vazamento. Os efeitos do vazamento no espectro de frequência são: erro na amplitude, sendo menor que o valor verdadeiro; e aumento da largura do pico, pois a energia do sinal dispersa para as frequências vizinhas do espectro. Para minimizar este erro, uma das soluções é reduzir a resolução em frequência e a outra é aplicar uma janela, que é multiplicada ao sinal no domínio do tempo, antes de realizar a transformada de Fourier.

Ribeiro (1999) desenvolveu uma metodologia para processar os sinais de vibrações, com o objetivo de detectar, minimizando o erro de vazamento, as componentes de frequência com amplitudes maiores em sinais que contém alto nível de ruído. Esta metodologia será adaptada e aplicada para o processamento dos sinais de vibrações decorrentes do ensaio de desgaste por deslizamento.

Para a análise dos sinais de vibração no domínio da frequência, a representação das amplitudes vibratórias é feita com base nos parâmetros de aceleração, velocidade ou deslocamento. Segundo Taylor (1994), baixas frequências geram altos níveis de deslocamento, enquanto que altas frequências geram baixos níveis de deslocamento. Portanto, espectros de frequência de deslocamento são indicados para medição de frequências abaixo de 10 Hz. Já para a medição de frequências na faixa de 10 Hz a 2000 Hz, é indicado o espectro de velocidade. E o espectro de aceleração deve ser utilizado para a medição de altas frequências, acima de 2000 Hz, já que estas geram altos níveis de aceleração.

Os acelerômetros são sensores que podem ser utilizados para a medição de vibrações, podendo ser feitos com elementos: piezoresistivos, piezocapacitivos e piezelétricos. O acelerômetro utilizado neste trabalho é do tipo piezelétrico.

Um acelerômetro piezelétrico é composto por uma pastilha de material piezelétrico, geralmente feita em quartzo ou cerâmica artificialmente polarizada, que apresenta o efeito piezelétrico típico. Quando submetido à pressão mecânica, quer por tensão, compressão ou cisalhamento, gera uma carga elétrica nas faces, a qual é proporcional à força aplicada, Fig. 2.4. O sinal elétrico de saída deste acelerômetro, sendo proporcional, por consequência, à aceleração vibratória da superfície, aplicada ao sensor, pode ser integrada de modo a fornecer sinais proporcionais à velocidade e ao deslocamento.

Os acelerômetros que operam pelo modo de cisalhamento, Fig. 2.5, têm o seu material piezelétrico situado entre uma coluna e uma massa sísmica. E a existência de um anel de compressão justifica-se pela necessidade de se aplicar uma força de pré-carga para criar uma estrutura rígida linear. O princípio de funcionamento deste tipo de sensor consiste no fato de a massa causar uma tensão de cisalhamento sobre os cristais de sensoriamento, quando sob o efeito da aceleração (PIEZOTRONICS^{INC}, 2013).

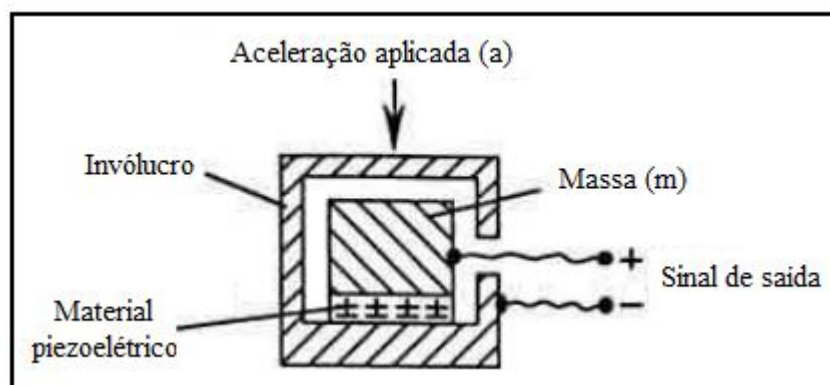


Figura 2.4 - Composição de um acelerômetro piezoelétrico (PIEZOTRONICS^{INC}, 2013)

Os sensores com esta geometria de sensoriamento apresentam as vantagens de (PIEZOTRONICS^{INC},2013):

- rejeitem transientes térmicos e efeitos de flexão de base, já que os cristais de sensoriamento são isolados a partir da base e do invólucro;
- apresentarem pequeno tamanho, o que minimiza os efeitos de carregamento de massa sobre a estrutura de teste.

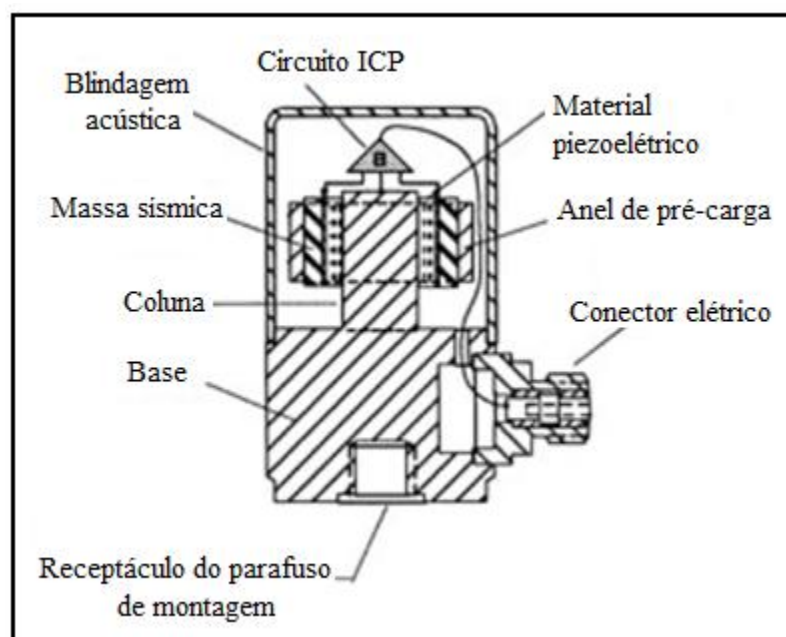


Figura 2.5: Acelerômetros piezoelétricos com geometria de cisalhamento (PIEZOTRONICS^{INC}, 2013)

Nos acelerômetros piezoelétricos, em geral, enquanto os eletrodos coletam, os fios transmitem a carga para um condicionador de sinal, que pode ser remoto ou incorporado ao acelerômetro (PIEZOTRONICS^{INC},2013).

Os acelerômetros ICP[®] (Integrated Circuit – Piezoelectric, marca registrada da PCB[®]) ou IEPE (Integrated Electronics Piezoelectric) possuem um condicionador de sinal microeletrônico embutido. A eletrônica embutida converte o sinal de carga de alta impedância, que é gerado pelo elemento piezelétrico de sensoriamento, em um sinal de tensão utilizável de baixa impedância que pode ser facilmente transmitido, mais comumente por cabos de dois fios ou cabos coaxiais, para qualquer leitor de voltagem ou dispositivo de gravação (PIEZOTRONICS^{INC},2013).

O sinal de baixa impedância pode ser transmitido a longas distâncias de cabo e utilizado em ambientes sujos ou em ambientes de fábrica com pouca degradação (PIEZOTRONICS^{INC},2013).

Em geral, os condicionadores incluem basicamente circuitos de: conversão da impedância de saída; amplificação do sinal; filtragem do sinal.

As vibrações são um fenômeno correlacionado ao atrito e ao movimento relativo das superfícies. Tedesco (2010) afirma que, durante o ensaio de deslizamento, pequenas vibrações podem ocorrer devido ao movimento relativo dos corpos. E, segundo Zum-Gahr (1987), a redução da eficiência de operação e mudanças dimensionais de componentes ou danos superficiais devido ao desgaste pode causar problemas secundários como vibração e desalinhamento.

Neste contexto, em virtude do processo de desgaste reproduzido nas amostras de *riser*/enrijecedor durante os ensaios em escala real no tribômetro do LTAD, torna-se relevante, então, a análise das vibrações, de tal forma a verificar e analisar eventos importantes para o ensaio de desgaste, como o *stick-slip*.

Visto a dificuldade de se encontrar trabalhos que relacionam o fenômeno *stick-slip* às vibrações, considerando um par polímero-polímero, foram, então, abordados trabalhos referentes à análise em um material composto utilizado em freios.

Sabe-se que, quando dois sólidos em contato deslizam relativamente um ao outro com um componente acionado a uma velocidade constante, dois processos de deslizamento podem ocorrer. O movimento pode ser contínuo ou intermitente. No segundo caso, as superfícies de deslizamento ficam aderidas (fase do *stick*) até que há uma ruptura brusca com um consequente e rápido deslizamento (fase do *slip*). Este comportamento é chamado de *stick-slip* (BOUISSOU; PETIT; BARQUINS, 1998).

Stick-slip é um processo onde os episódios de adesão (*stick*) e deslizamento (*slip*) alteram durante o movimento relativo entre dois materiais e, como resultado, o coeficiente de atrito varia continuamente entre um valor estático (fase do *stick*) e um valor dinâmico (fase do *slip*). Durante a fase do *stick*, a velocidade relativa entre as superfícies da interface

é nula. Durante a fase do *slip*, a velocidade relativa e a força de atrito são diferentes de zero e variam em um período de tempo relativamente pequeno (NEIS *et al.*, 2011).

O trabalho de Neis *et al.* (2011) investigou como as vibrações induzidas pelo atrito, tais como o *stick-slip* ou oscilações harmônicas, são relacionadas com parâmetros do sistema mecânico, tais como inércia, rigidez, amortecimento e velocidade de deslizamento. Os resultados experimentais mostraram um típico comportamento de *stick-slip* para baixas velocidades enquanto que, para altas velocidades (acima de 2,5 mm/s), o *stick-slip* desapareceu e um deslizamento suave prevaleceu.

A ocorrência de instabilidades devido ao atrito, como o *stick-slip* ou deslizamento harmônico, depende da velocidade de deslizamento, pressão de contato, características mecânicas do sistema (inércia, rigidez e amortecimento) e propriedades físico-químicas dos materiais (NEIS *et al.*, 2011).

Segundo Neis *et al.* (2011), existe a seguinte classificação para os modos de deslizamento, tais como: deslizamento suave, *stick-slip*, oscilação harmônica, *stick-slip* negativo e *stick-slip* irregular.

As oscilações durante o deslizamento, também chamadas de oscilações harmônicas, ocorrem quando a velocidade relativa entre o par tribológico analisado varia entre valores positivos e negativos ou somente entre valores positivos, não havendo o período de adesão (*stick*) durante o processo. As variações no coeficiente de atrito são menos significativas durante as oscilações do deslizamento do que no movimento de *stick-slip* (NEIS *et al.*, 2011).

O trabalho de Yoon *et al.* (2012) estudou a propensão de ocorrência do *stick-slip* no material composto utilizado em freios, analisando a amplitude do *stick-slip* em função da carga e da velocidade de deslizamento. Resultados mostraram que a amplitude do *stick-slip* diminuiu em função da velocidade de deslizamento, enquanto que a frequência aumentou. E a intensidade do *stick-slip* aumentou em função da carga, enquanto que a frequência diminuiu. Portanto, o *stick-slip* ocorreu em baixas velocidades de deslizamento e a velocidade crítica para a ocorrência do *stick-slip* aumentou em altas cargas.

A Figura 2.6 evidencia que a máxima frequência do fenômeno *stick-slip* foi de 10 Hz, considerando um período de 0,1 s, quando foi empregado o carregamento de 3,2 kN e velocidade de deslizamento de 0,10 mm/s.

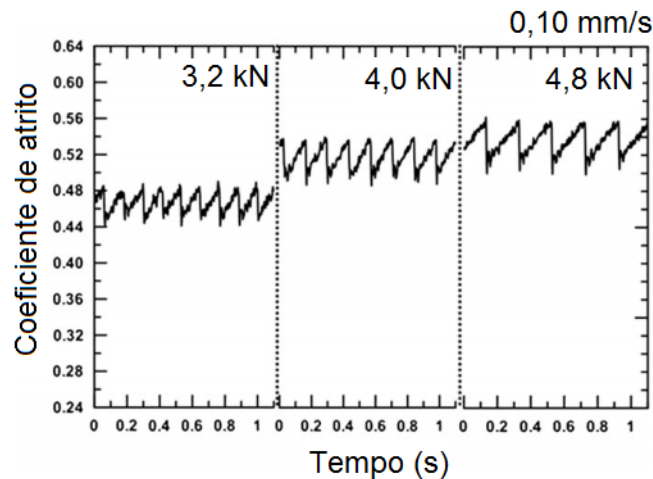


Figura 2.6 – Padrões de *stick-slip*, considerando diferentes carregamentos e velocidade de deslizamento de 0,1 mm/s (YOON *et al.*, 2012)

Lee *et al.* (2013) estudaram o fenômeno *stick-slip* de materiais de atrito de freio com diferentes condições de superfície. A fim de examinarem o efeito da velocidade de deslizamento sobre o fenômeno *stick-slip*, fizeram testes a diferentes velocidades de deslizamento, que variaram de 0,1 mm/s a 3,0 mm/s. Mostrou-se que o período do *stick-slip* diminuiu com a velocidade de deslizamento e a amplitude de oscilação foi subitamente reduzida para um tamanho muito pequeno, numa determinada velocidade de deslizamento, sugerindo que a velocidade de deslizamento é superior a velocidade crítica para a ocorrência de *stick-slip*. A velocidade crítica, a qual permite a ocorrência do *stick-slip* e acima da qual se elimina tal fenômeno, foi aproximadamente de 3 mm/s para materiais afetados termicamente e de 1,5 mm/s para materiais sem história térmica, indicando maior propensão ao *stick-slip* em materiais afetados termicamente.

Segundo Lee *et al.* (2013), em geral, a baixa frequência de vibração é associada ao *stick-slip* na interface do deslizamento, enquanto que a vibração de alta frequência está relacionada com outras fontes de vibração associadas, por exemplo, à folgas mecânicas do sistema.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Os procedimentos experimentais adotados no presente trabalho, tendo em vista a determinação da taxa de desgaste de capas de *risers* e amostras de enrijecedores, bem como a análise das vibrações decorrentes do ensaio de desgaste, são apresentados a seguir.

3.1. Descrição do sistema de medição

Para a avaliação do desgaste, foi utilizada uma máquina de medir a três coordenadas (MM3C) do tipo ponte móvel, fabricada pela Carl Zeiss, modelo Contura G2 RDS/XXT, com os *softwares* Calypso® 5.2 e Dimension Volume® 1.6 (Fig. 3.1).

Esta máquina tem resolução de 0,2 μm e faixa nominal de medição de 1.000 mm, 1.200 mm e 600 mm para os eixos X, Y e Z, respectivamente. De acordo com o certificado de calibração (ANEXO 1), número 046/2012, a MM3C tem uma incerteza expandida linear de $0,7 + L/278 \mu\text{m}$ para um fator de abrangência $k= 2,00$ e 95% de nível de abrangência para os três eixos, onde L é a distância medida em mm. O erro de apalpação é de 0,2 μm .

As medições, utilizando esta máquina, foram realizadas em uma sala com temperatura ambiente de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e umidade (entre 45% e 65%). Um termohigrômetro digital, do fabricante Extech, modelo RHT20, com resolução de 0,1 $^{\circ}\text{C}$ para a temperatura e 0,1% para a umidade relativa, e com faixa de medição de -40 $^{\circ}\text{C}$ a 70 $^{\circ}\text{C}$ e de 0 a 100%, foi utilizado para monitorar a temperatura e a umidade do ambiente. De acordo com o certificado de calibração (ANEXO 2), número TI0322/12, este instrumento tem uma incerteza expandida de 0,3 $^{\circ}\text{C}$ para a temperatura e de 3% para a umidade relativa, assumindo um fator de abrangência $k= 2,0$ e 95% de probabilidade de abrangência. Este termohigrômetro exibe as leituras em um visor LCD e é capaz de registrar até 16.350

leituras de temperatura e umidade a uma dada taxa de amostragem programável pelo usuário. Após o registro, os dados podem ser transferidos para o computador via interface USB.



Figura 3.1- MM3C utilizada no desenvolvimento do trabalho, fabricada pela Carl Zeiss, modelo Contura G2 RDS/XXT

A estrutura da MM3C é em forma de uma ponte que se movimenta relativamente a um desempenho de granito sobre o qual devem ser posicionadas e fixadas as peças objeto de medição.

Todos os três eixos da máquina, X, Y e Z, se movimentam sobre mancais aerostáticos, os quais necessitam de ar comprimido, seco e limpo, para criar o colchão de ar que sustenta a parte móvel da estrutura.

As guias dos eixos X e Z da MM3C são fabricadas em cerâmica, o que lhes confere estabilidade térmica. Além disso, as escalas dos três eixos são feitas do material cerâmico zerodur®, cujo coeficiente de expansão térmica linear é aproximadamente nulo. Assim, os efeitos térmicos na estrutura da máquina são minimizados, bem como sua influência nos resultados das medições.

A Contura G2 RDS/XXT é equipada por um cabeçote articulado RDS (Fig. 3.2), o qual pode ser orientado para 20.736 posições em incrementos de $2^{\circ} 30'$, possibilitando o alcance de uma grande quantidade de ângulos espaciais com uma única configuração de apalpador.

Os apalpadores disponíveis para a medição possuem uma ponta esférica, feita de rubi (óxido de alumínio), e uma haste em fibra de carbono. O apalpador utilizado nas medições realizadas neste trabalho possui uma ponta única, com diâmetro da esfera de 3 mm e comprimento da haste de 50 mm.

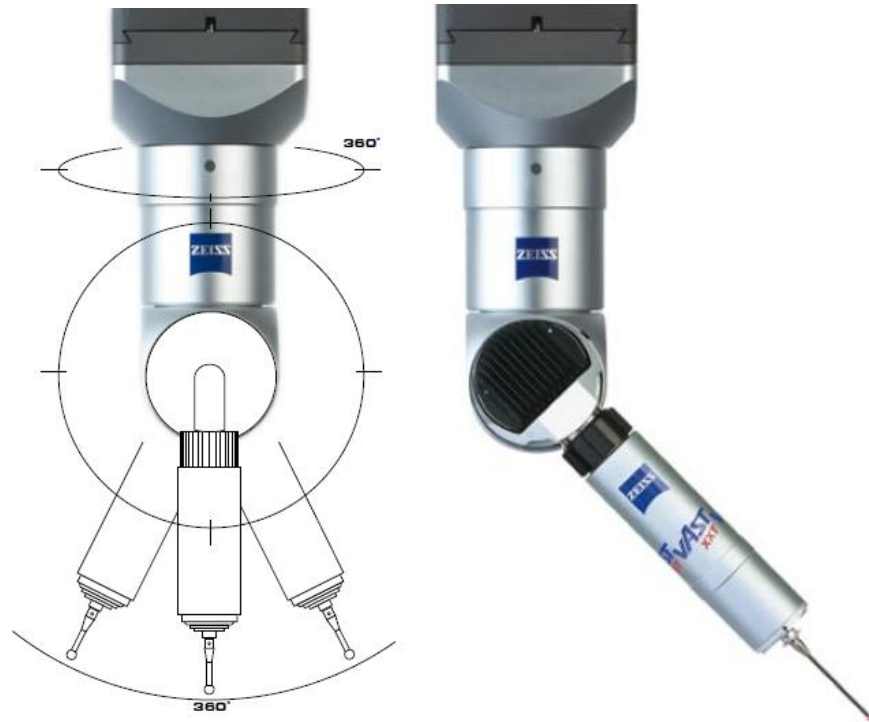


Figura 3.2 - Cabeçote articulado RDS com sensor VAST XXT (ZEISS, 2007)

As coordenadas dos pontos apalpados nas superfícies das peças são determinadas através de um sensor de posição passivo com a tecnologia VAST XXT, o qual é fixado ao cabeçote articulado (Fig. 3.2). Este sensor pode atuar no modo de medição por varredura ou no modo de medição de ponto a ponto, em ambos os casos de forma sincronizada ao controlador eletrônico e ao *software* Calypso®.

O sensor VAST XXT é passivo, porque a força de medição é gerada, controlada e aplicada não pelo cabeçote, mas sim pelo controlador da máquina, para reduzir as influências dinâmicas, como por exemplo, a flexão da haste dos apalpadores.

No modo de medição por varredura, a MM3C oferece informações mais precisas sobre a peça medida. Pois, a medição contínua de características fornece a densidade de pontos necessária para a determinação de uma dimensão mais próxima da real (ZEISS, 2013).

3.1.1. *Software Calypso*® 5.2

Com o *software Calypso*®, a MM3C determina e armazena as coordenadas X, Y e Z dos pontos apalpados e obtém as características de interesse dos elementos geométricos da peça objeto de medição. Este *software* apresenta as seguintes características:

- facilidade na criação e alteração de planos de medição;
- apresentação dos resultados medidos através de relatórios de medição que podem ser personalizados;
- medição manual ou CNC;
- modo de conexão com a MM3C ou modo simulação;
- medição de formas geométricas padrão ou superfícies de forma livre;
- estação CAD para auxiliar na extração de elementos geométricos.

O *Calypso*® utiliza implicitamente os procedimentos de cálculo (ajuste gaussiano, Chebyshev, mínimo elemento circunscrito, máximo elemento inscrito e elemento tangencial) para todas as análises de comprimento, forma e posição. No presente trabalho, foi utilizado o método de ajuste de Gauss para as medições realizadas.

Antes de executar uma medição com o *software Calypso*®, a primeira etapa a cumprir é a qualificação do apalpador a ser utilizado. Inicialmente a posição da esfera padrão de cerâmica com diâmetro nominal de 30 mm, que é utilizada na qualificação dos apalpadores, é determinada através de uma configuração padrão de apalpador.

Após a localização desta esfera no volume de trabalho, prossegue-se à qualificação do apalpador a ser utilizado na medição. Esse procedimento permite que o programa da máquina identifique não somente as dimensões e o posicionamento do apalpador, como também a flexão de sua haste para uma dada força de medição utilizada durante este processo. Dessa forma, o *Calypso*® é capaz de realizar, a partir dos pontos medidos, a compensação da flexão, do comprimento da haste e do raio da esfera do apalpador (ZEISS, 2011).

A força de medição, definida para a qualificação, é a mesma a ser utilizada durante a medição. No *software*, os valores da força de medição estão disponíveis em níveis: sensível, padrão e robusto. O modo padrão corresponde a 200 mN (ZEISS, 2012), cujo valor foi verificado com uma célula de carga. Este valor de força foi utilizado na qualificação do apalpador para as medições realizadas neste trabalho.

A periodocidade da qualificação é função da frequência de uso da MM3C. Recomenda-se, como regra geral, que o apalpador a ser utilizado nas medições seja qualificado quando for instalado pela primeira vez; após a ocorrência de uma colisão do apalpador com a peça objeto de medição ou com algum dispositivo de fixação da mesma;

quando houver influências específicas do material da peça, como a rugosidade; e quando houver mudanças térmicas (ZEISS, 2011).

Depois de assegurado que o apalpador a ser utilizado na medição está qualificado, prossegue-se ao alinhamento da peça, isto é, a transferência do sistema de coordenadas da máquina para a peça.

Em princípio, é possível medir uma peça em qualquer posição e orientação dentro do volume de trabalho da MM3C, mas às vezes não é possível calcular uma dimensão de forma direta, com relação ao sistema de coordenadas da mesma. Então são utilizados “sistemas de coordenadas na peça”. Estes sistemas são definidos com relação ao sistema de coordenadas da máquina e facilitam e agilizam as medições, sendo possível definir um ou mais sistemas na peça, dependendo das características a medir.

Em seguida, definem-se o cubo de segurança da peça, a estratégia de medição para os elementos geométricos a serem medidos e a seleção das características de interesse. Após, basta executar a medição.

3.1.2. *Software Dimension Volume® 1.6*

O *software* Dimension Volume® permite o cálculo do volume de uma peça a partir de seu correspondente modelo CAD, cujas dimensões devem ser próximas das dimensões reais do modelo físico.

A estratégia de medição é definida neste *software* através da criação dos pontos de medição nas faces do modelo CAD, de forma manual ou automática. E o cubo de segurança também deve ser definido para evitar possíveis colisões. Vale salientar que apenas o modo de medição ponto a ponto está disponível para este *software*, isto é, não é possível implementar a opção de medição por varredura.

A execução dessa programação de medição somente é realizada se este *software* estiver conectado ao Calypso®, para que, assim, possa reconhecer o alinhamento da peça e coletar as coordenadas do conjunto de pontos apalpados.

Após a execução da medição, as coordenadas dos pontos apalpados são exportadas do Calypso® para o Dimension Volume®, o qual faz uma associação entre os pontos teóricos da estratégia, obtidos do modelo CAD, e os pontos medidos.

Dessa forma, este *software* de volume estima o valor do volume da peça em cm³, a partir do método dos mínimos quadrados utilizado para ajustar os pontos medidos. Ele calcula, também, o volume nominal ou teórico, obtido a partir da seleção, no modelo CAD, das faces de medição, e o desvio entre os volumes nominal e medido. A estimativa destes volumes é feita em relação a um plano de referência e à posição deste plano em relação ao sistema de referência adotado para a peça (alinhamento).

3.2. Desenvolvimento de metodologias de avaliação do desgaste em amostras do par tribológico *riser/enrijecedor*

Duas metodologias foram desenvolvidas para a quantificação do desgaste em amostras do par tribológico *riser/enrijecedor*, utilizando uma MM3C. Uma delas foi aplicada na avaliação do desgaste em amostras de *risers*, com base na variação de espessura, e a outra foi destinada à estimativa do desgaste volumétrico em amostras de enrijecedores, tendo por base a perda de volume das mesmas.

Ambas as metodologias possuem, em comum, as seguintes etapas:

- a) Qualificação do apalpador, utilizando o *software* Calypso®. Neste processo, foi empregada uma força de medição de 200 mN;
- b) Alinhamento das amostras, utilizando o *software* Calypso®. Com isto, foi feita a transferência do sistema de coordenadas da máquina para a peça objeto de medição;
- c) Definição do cubo de segurança, para evitar possíveis colisões. Esta etapa foi realizada tanto no *software* Calypso®, quanto no *software* Dimension Volume®, quando este foi empregado na avaliação do volume das amostras de enrijecedores;
- d) Definição da estratégia de medição, que representa a escolha do número e da distribuição dos pontos sobre a superfície de interesse das amostras. Esta etapa foi realizada no *software* Calypso®, quando as amostras de *risers* foram avaliadas e, no *software* Dimension Volume®, quando as amostras de enrijecedores foram analisadas;
- e) Execução da medição utilizando o *software* Calypso®, quando as amostras de *risers* foram avaliadas, e o *software* Dimension Volume® conectado ao Calypso®, quando as amostras de enrijecedores foram analisadas.

As metodologias desenvolvidas são apresentadas, detalhadamente, a seguir.

3.2.1. Desenvolvimento de metodologia de avaliação do desgaste em amostras de *risers* com base na variação de espessura

Nesse caso, a avaliação do desgaste em amostras de *risers* é baseada na redução de espessura de sua camada de proteção. Para tanto, após o ensaio de desgaste, esta camada foi cortada longitudinalmente, sendo que a seção obtida foi dividida no centro da trilha de desgaste, como mostrado na Fig. 3.3. O corte foi realizado utilizando uma esmerilhadeira, seguido de lixamento com lixa fina.

Cada uma das amostras medidas foi fixada no desempenho da MM3C (Fig. 3.4 a) e b) e alinhada (Figs. 3.4 a) e 3.5) utilizando o *software* Calypso®. A Figura 3.5 mostra os elementos para a determinação do sistema de coordenadas cartesianas da peça, que, no caso, foram: plano do desempenho, linha e ponto da base de fixação da peça.

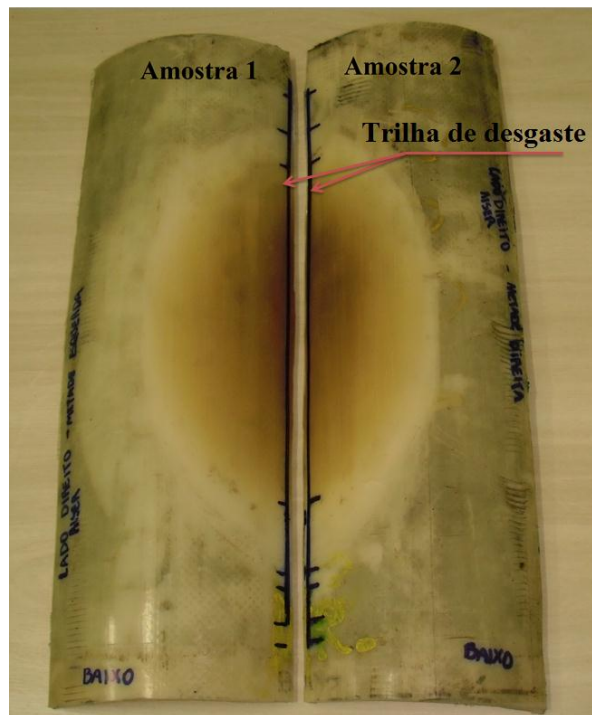


Figura 3.3 – Amostras resultantes do corte, no centro da trilha de desgaste, de uma seção longitudinal da camada externa de uma amostra de *riser*, testada durante 1.280 horas no tribômetro. Amostra 1 – metade esquerda; amostra 2 – metade direita

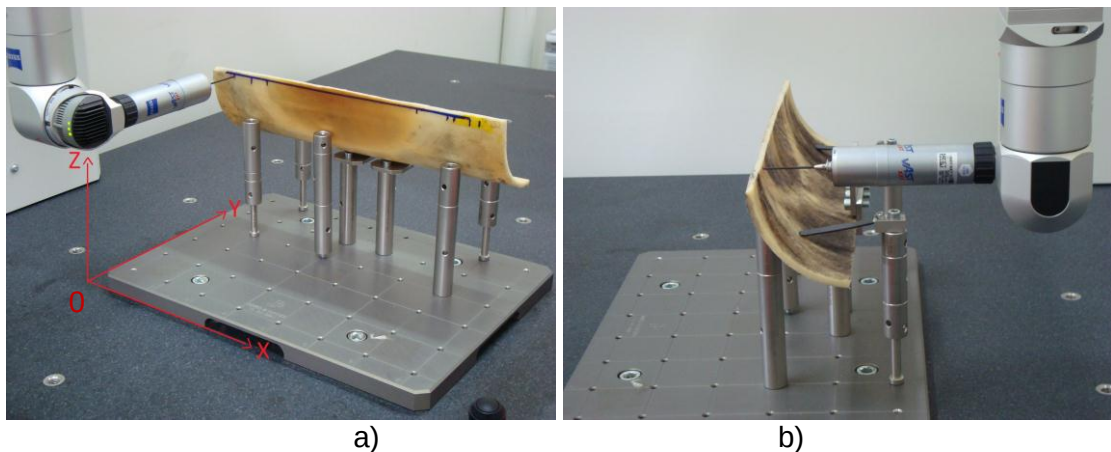


Figura 3.4 – Fixação da amostra e definição do sistema de referência, a) superfície externa e b) interna

Conforme as Figuras 3.4 a) e 3.5, percebe-se que, com o alinhamento básico, foi definido um sistema de coordenadas de referência para a peça, com a origem localizada no ponto 0. Isto se justifica porque a geometria da amostra analisada é irregular devido à presença de ondulações superficiais e de um desvio de retitude significativo.

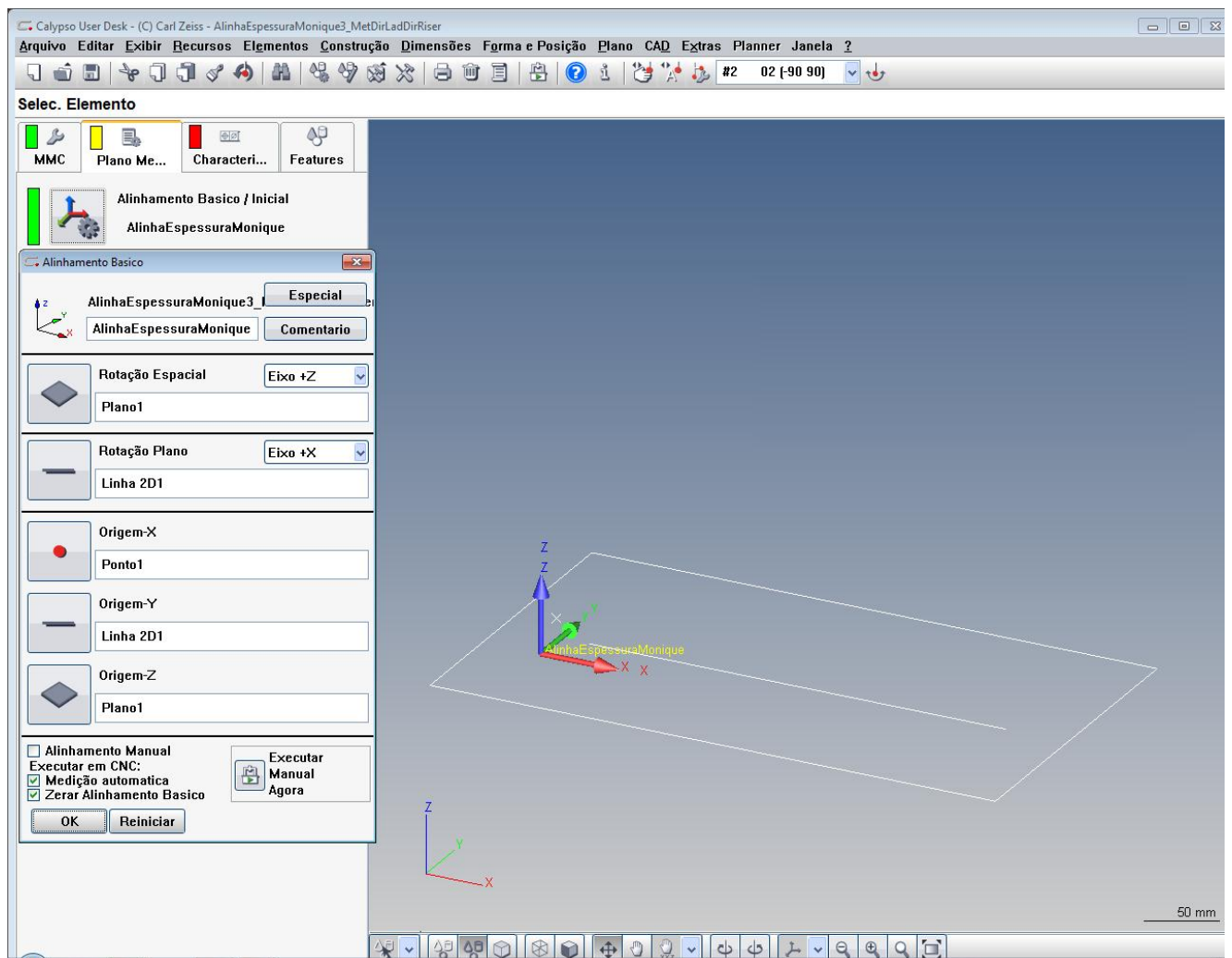


Figura 3.5 – Alinhamento básico para a definição do sistema de referência das amostras 1 e 2

Quando os erros de forma da peça forem grandes ou a peça for flexível, Sousa *et al.* (2010) *apud* Júnior (2010) recomendam utilizar, durante o alinhamento, elementos de uma contra-peça, de gabaritos, do desempenho e/ou de outros dispositivos com desvios de forma menores.

Também, no intuito de minimizar os erros de medição, durante a fixação da peça, foi feito um nivelamento manual, utilizando como referência a linha em azul marcada paralelamente à linha do corte longitudinal da amostra. Feito isso, aumentou-se a probabilidade de a linha de medição da peça ser paralela ao eixo X do alinhamento.

Embora o modelo CAD da peça objeto de medição facilite a definição dos elementos geométricos a serem utilizados no alinhamento, ele não é essencial para o trabalho no *software* Calypso®. E considerando que os elementos geométricos utilizados na determinação do alinhamento não pertencem à peça em análise, optou-se por não utilizar um modelo CAD para tal peça.

Após a etapa de fixação e alinhamento da peça, foi realizada a medição da face interna e da face externa, garantindo-se que os pontos apalpados externa e internamente fossem opostos. As regiões avaliadas incluíram as regiões desgastadas e não desgastadas, sendo estas últimas utilizadas para a estimativa da espessura do revestimento antes do desgaste. Cada amostra (Fig. 3.3) foi medida três vezes em ambas as faces (Fig. 3.4 a e b).

Vale salientar que as regiões avaliadas de cada uma das amostras foram delimitadas conforme a Fig. 3.6, com base na análise visual de suas superfícies externas. Os comprimentos das regiões não desgastadas, compreendidas entre RI e 0 e entre 3 e RF foram diferentes, já que, após a marcação de RF, a superfície apresentava uma camada de tinta. Assim, para evitar a medição sobre a tinta, o que poderia introduzir erros de medição e influenciar nos resultados, a região 3 – RF foi reduzida em comparação à região RI – 0.

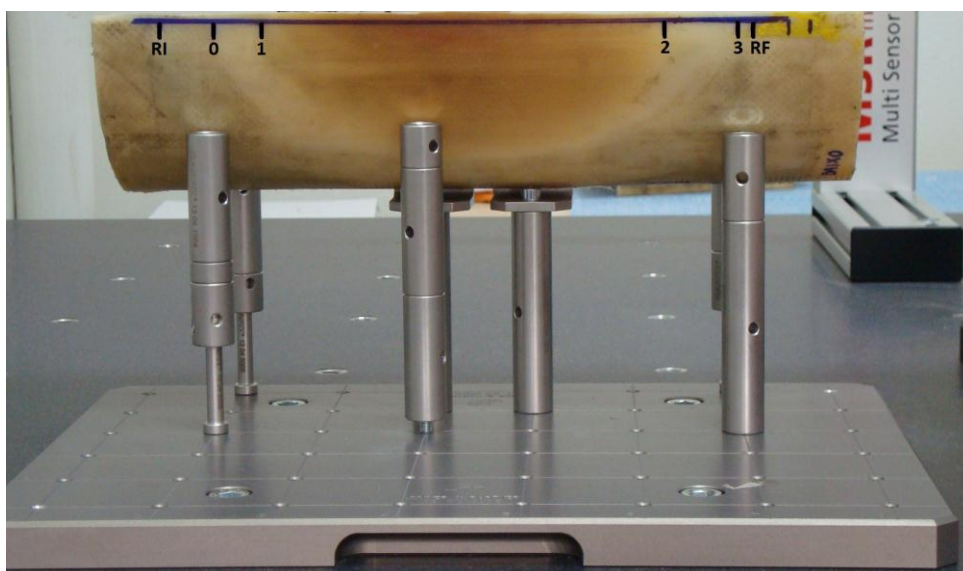


Figura 3.6 - Regiões analisadas: de RI a 0, região não desgastada superior; de 0 a 1 e de 2 a 3, correspondem às regiões desgastadas e expostas à água durante o teste; de 1 a 2, região desgastada central; de 3 a RF, região não desgastada inferior

Neste trabalho, foram utilizados 196 pontos de medição distribuídos ao longo da trilha de desgaste na face externa, com espaçamento de 1,4 mm entre eles, totalizando um comprimento de avaliação de 273 mm, entre RI e RF (Fig. 3.6). A face interna foi medida de forma similar.

Durante estas medições, o *software* Calypso® forneceu os valores das coordenadas X, Y e Z de cada ponto apalpado. Assim, a espessura foi determinada como sendo a diferença entre os valores das coordenadas Y do ponto interno e de seu ponto externo oposto. Posteriormente, a perda de espessura, devido ao desgaste, foi obtida subtraindo a espessura da região desgastada da espessura da região não desgastada.

A taxa de desgaste foi calculada dividindo a perda de espessura pelo número de ciclos do ensaio de desgaste por deslizamento, que, no caso, foram 296 mil ciclos.

3.2.1.1. Estimativa da deformação elástica da camada externa do riser de 4 in (101,6 mm) de diâmetro interno, proveniente da força de medição aplicada pelo apalpador da MM3C

A deformação elástica do material da camada externa do *riser* (poliamida ou nylon 11), proveniente da força de medição aplicada pelo apalpador da MM3C, foi determinada a partir de uma simulação computacional em elementos finitos (BERTHOLDI, 2013), assumindo uma força de medição de 200 mN e diâmetro do apalpador de 3 mm.

Vale ressaltar que o apalpador foi simulado como sendo de aço estrutural, que teve comportamento “indeformável” com relação à poliamida.

Na simulação, o modelo de elementos finitos foi composto de tetraedros. Com o intuito de reduzir o número de elementos avaliados, foi utilizado apenas metade da geometria dos modelos CAD, aproveitando, desta forma, a simetria em relação ao eixo longitudinal dos modelos. Esta simetria também foi considerada quando da aplicação da força do apalpador sobre a capa do *riser*, ou seja, apenas metade da força (100 mN) foi empregada no modelo de elementos finitos.

A restrição de não movimentação lateral do apalpador referiu-se à primeira condição de contorno, sendo, assim, a única movimentação permitida do apalpador foi na direção e no sentido da força imposta.

A segunda condição de contorno foi definida quando se considerou a amostra de *riser* apoiada em suas extremidades, de forma a restringir todos os seus graus de liberdade.

O tipo de contato empregado entre o apalpador e o *riser* foi o “colado”, devido aos outros tipos terem resultado em um erro de penetração de malha de uma ordem de grandeza maior que a deformação obtida.

3.2.2. Desenvolvimento de metodologia de avaliação do desgaste em amostras de enrijecedores com base na variação de volume

A avaliação do desgaste em amostras de enrijecedores proposta é baseada na redução de volume. Para tanto, antes do ensaio de desgaste, deve-se estimar o volume da amostra a ser ensaiada, e, após o ensaio, deve-se estimar o volume desta mesma amostra. Desta forma, a diferença entre estes valores de volume possibilitará quantificar a perda volumétrica e, também, a taxa de desgaste volumétrica, que é calculada dividindo a perda de volume pelo número de ciclos do ensaio de desgaste por deslizamento.

Como duas amostras de enrijecedores são testadas simultaneamente no tribômetro, cada uma delas deve passar por esta avaliação do volume, antes e após o ensaio de desgaste, de forma a permitir a estimativa da taxa de desgaste volumétrica de cada amostra.

A Figura 3.7 mostra uma destas amostras, já ensaiada, que foi fixada no desempenho da MM3C e alinhada utilizando o *software* Calypso® (Fig. 3.8).



Figura 3.7 - Fixação de uma amostra de enrijecedor, após testada no tribômetro durante 1.280 horas

A Figura 3.8 mostra os elementos geométricos utilizados para efetuar o alinhamento desta amostra, que foram: cilindro interno, plano da base e círculo da amostra. Desta forma, a origem do sistema de coordenadas foi localizada no centro da base da amostra.

Previamente à estimativa do volume da amostra de enrijecedor, foram determinadas, com o auxílio do Calypso®, as dimensões da amostra (Fig. 3.9) para a confecção de um modelo CAD. Dessa forma, o modelo CAD teve suas dimensões próximas à dimensão da peça real. Isto possibilitou que o *software* Dimension Volume®, utilizando este modelo, calculasse o volume da peça, já que a altura do modelo, em relação à altura da peça, era menor que o desvio máximo de 2 mm permitido pelo *software*.

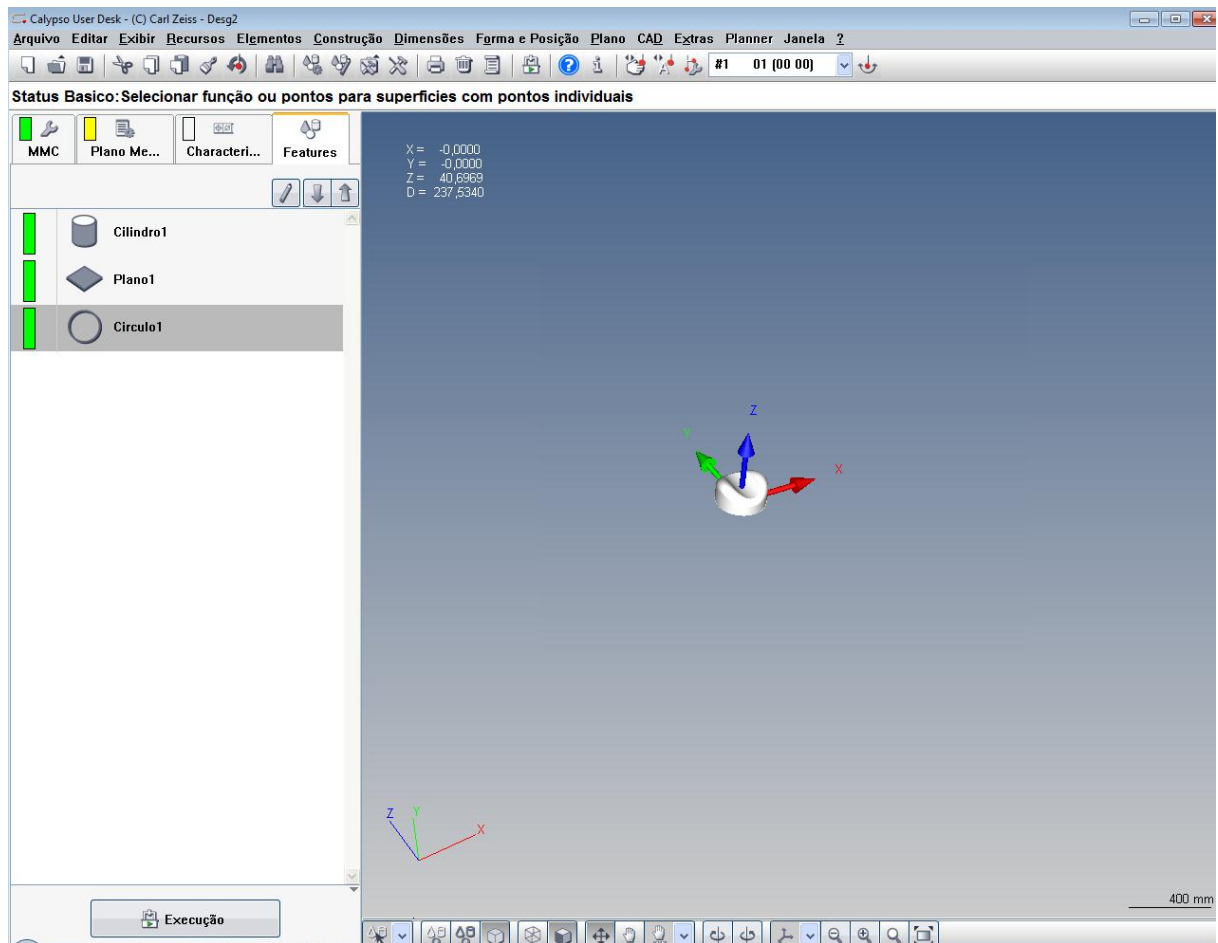


Figura 3.8 – Alinhamento básico para a definição do sistema de referência da amostra de enrijecedor analisada

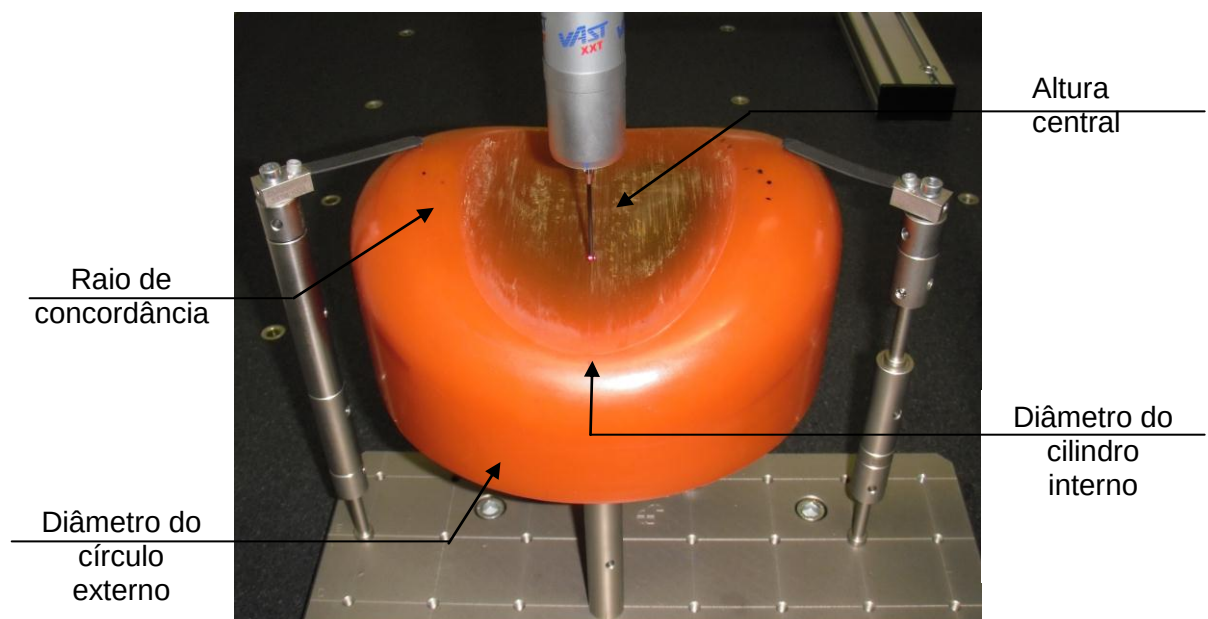


Figura 3.9 – Indicação das características dimensionais da amostra, avaliadas para a confecção do modelo CAD

O modelo CAD confeccionado (Fig. 3.10) para a amostra analisada representou apenas a região desgastada e as regiões que circundam próximas ao desgaste, no intuito de minimizar o tempo de medição.

O modelo CAD, após ser importado para o *software* Dimension Volume®, deve ter seu sistema de coordenadas com a localização e a orientação idênticas ao sistema de coordenadas do alinhamento básico da amostra, definido no Calypso®.

Neste caso, foi necessário transladar o sistema de referência do modelo CAD confeccionado, Fig. 3.10, em relação ao eixo Z, para que tal sistema ficasse localizado na base da peça, coincidindo, assim, com o sistema de coordenadas definido durante o alinhamento da peça.

Este modelo CAD foi utilizado para a definição da estratégia de medição, conforme exemplificada na Fig. 3.10, a qual abrange a malha de pontos a serem medidos. Vale ressaltar que os vetores dos pontos teóricos da estratégia, que são normais à superfície, devem estar em sentido contrário ao sentido de medição para que não ocorra colisão (Fig. 3.10). Caso não estejam, o sentido destes vetores deve ser alterado no *software* de volume, o que foi feito neste modelo CAD analisado.

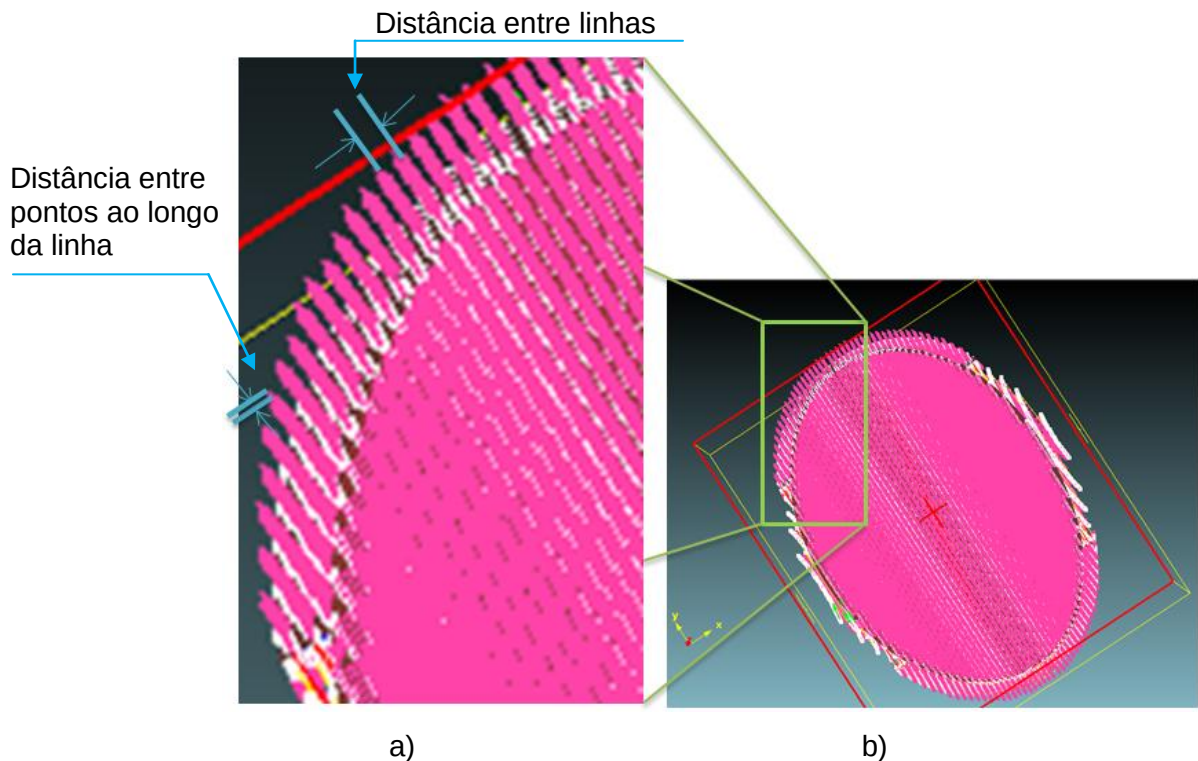


Figura 3.10 – Visualização, no *software* Dimension Volume®, do modelo CAD da superfície de interesse da amostra de enrijecedor desgastada, de uma estratégia de medição, do cubo de segurança da medição e do sistema de referência, a) detalhe e b) vista geral

Para estimar de forma precisa o volume, deve-se utilizar uma malha de pontos representativa da superfície de medição. Visto isso, o volume da amostra, Fig. 3.9, foi avaliado através da execução de diferentes estratégias (Tab. 3.1), variando-se a quantidade e a distribuição dos pontos sobre a superfície de interesse. O intuito disso foi possibilitar a seleção da melhor estratégia para a avaliação precisa do volume de enrijecedores.

Como a amostra de enrijecedor (Fig. 3.9) não teve seu volume avaliado antes do desgaste, devido ao fato de o LTAD não ter adquirido a MM3C anteriormente ao período de ensaio desta peça, apenas foi feita a análise do volume nesta amostra na condição desgastada. Esta avaliação, portanto, não permitiu a quantificação da perda volumétrica desta amostra.

A Tabela 3.1 representa as estratégias de medição executadas sobre a superfície de interesse da amostra desgastada (Fig. 3.9). O maior espaçamento entre os pontos ao longo da linha de medição foi de 1 mm, conforme prevê a ISO 14242-2 (2000), e a maior distância entre as linhas medidas foi de 6 mm, baseando-se no trabalho de Bills *et al.* (2012).

Tabela 3.1 – Estratégias de medição de volume executadas na amostra de enrijecedor, testada durante 1.280 horas no tribômetro

Número de linhas	Distância entre linhas [mm]	Distância entre pontos ao longo da linha [mm]	Número de pontos da malha
24	6	1	4.130
		0,5	8.270
48	3	1	8.283
		0,5	16.578
96	1,5	1	16.550
		0,5	33.126
143	1	1	24.833
		0,5	49.676
179	0,8	1	31.050
		0,5	62.102
205	0,7	1	35.492
		0,5	70.989

Cada uma das estratégias de medição, Tab. 3.1, foi executada três vezes. Posteriormente, a média dos volumes estimados foi expressa juntamente com a incerteza de medição. Dentre os resultados obtidos, foi definida a malha de pontos que forneceu a melhor precisão e o menor tempo de medição possível para a estimativa do volume da amostra de enrijecedor.

3.2.2.1. Estimativa da deformação elástica do material do enrijecedor, proveniente da força de medição aplicada pelo apalpador da MM3C

A deformação elástica do material (PU) que constitui os *bend-stiffeners* para *risers* de 4 in (101,6 mm) e 6 in (152,4 mm) de diâmetro interno, proveniente da força de medição aplicada pelo apalpador da MM3C, foi determinada a partir de simulação computacional em elementos finitos (BERTHOLDI, 2013), assumindo uma força de medição de 200 mN e diâmetro do apalpador de 3 mm.

Na simulação, o modelo de elementos finitos foi composto de tetraedros e, com o objetivo de reduzir o número de elementos avaliados, foi utilizado apenas 1/4 da geometria dos modelos CAD empregados. Esta simetria também foi considerada quando da aplicação da força do apalpador sobre as amostras, ou seja, apenas 1/4 da força (50 mN) foi empregada no modelo de elementos finitos.

Na simulação da deformação do material do *bend-stiffener* para *riser* de 4 in (101,6 mm) de diâmetro interno, o apoio da peça foi definido através de apoios suspensos a partir da base da peça, condição similar à de medição. Já, para a simulação do *bend-stiffener* para *riser* de 6 in (152,4 mm) de diâmetro interno, o apoio foi feito em toda a base da peça (apoio da peça sobre o desempenho da MMC), o que não foi feito na prática. Todavia, não foram encontradas diferenças significativas na deformação elástica das peças em ambas as condições. Vale salientar que ambas as simulações foram executadas com a formulação de contato *rough* e a rigidez foi recalculada a cada iteração.

3.3. Desenvolvimento de um programa supervisor para aquisição, tratamento, monitoramento e salvamento dos dados de vibração do tribômetro

Foi desenvolvido um programa supervisor utilizando o *software* Labview® para aquisição, tratamento, monitoramento e salvamento dos dados de vibração do tribômetro, de tal forma a monitorar eventos importantes para o ensaio de desgaste, como, por exemplo, *stick-slip*, ou situações anômalas. Para a medição dos sinais de vibração, foram utilizados quatro acelerômetros piezelétricos (Fig. 3.11), cujas características são apresentadas na Tab. 3.2.



Figura 3.11 - Acelerômetro piezelétrico utilizado (PIEZOTRONICS^{INC}, 2013)

Tabela 3.2 - Características dos acelerômetros piezelétricos utilizados nas medições de vibração

CARACTERÍSTICAS DOS ACELERÔMETROS		
Fabricante: PCB Piezotronics®.		
Modelo: 352C67.		
Tipo IEPE – “Integrated Electronics Piezo Electric” ou ICP® (Integrated Circuit Piezoelectric).		
Faixa de medição: $\pm 491 \text{ m/s}^2$ pico.		
Geometria de sensoriamento: cisalhamento.		
Faixa de frequência ($\pm 5 \%$): 0,5 Hz a 10 kHz.		
Variação de $\pm 3 \text{ dB}$ na faixa de 0,2 Hz a 20 kHz.		
Frequência de ressonância: $\geq 35 \text{ kHz}$.		
Elemento de sensoriamento: cerâmica.		
Sensibilidade [mV/g]	Acelerômetro 0	101,1
	Acelerômetro 1	102,2
	Acelerômetro 2	101,6
	Acelerômetro 3	100,6

Estes acelerômetros, por possuírem pré-amplificador interno, enviam os sinais elétricos por eles captados diretamente para uma placa de aquisição de dados (Fig. 3.12), cujas características são apresentadas na Tab. 3.3.



Figura 3.12 - Placa de aquisição de dados utilizada na instrumentação do tribômetro (INSTRUMENTS[®], 2013)

Tabela 3.3 - Características da placa de aquisição dos sinais captados pelos acelerômetros piezelétricos

CARACTERÍSTICAS DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	
Fabricante:	National Instruments.
Modelo:	USB 9233.
Condicionador de sinal para acelerômetros	IEPE.
Conversor analógico-digital (ADC) tipo	delta-sigma. Pré-filtragem analógica pela taxa de Nyquist (filtro anti-aliasing).
Resolução do conversor AD:	24 bits.
Faixa de tensão de entrada:	± 5 V.
4 canais de entradas analógicas.	
Aquisição simultânea de dados dos canais a taxa de	2 kHz a 50 kHz.
Comunicação USB 2.0 de alta velocidade.	

A montagem experimental dos acelerômetros, conforme a Fig. 3.13, consistiu em fixá-los, utilizando cera, em locais específicos do tribômetro de tal forma a obter os efeitos das vibrações devido ao desgaste. Os acelerômetros foram identificados como 0, 1, 2 e 3, já que foram conectados aos canais 0, 1, 2 e 3 da placa de aquisição, respectivamente.

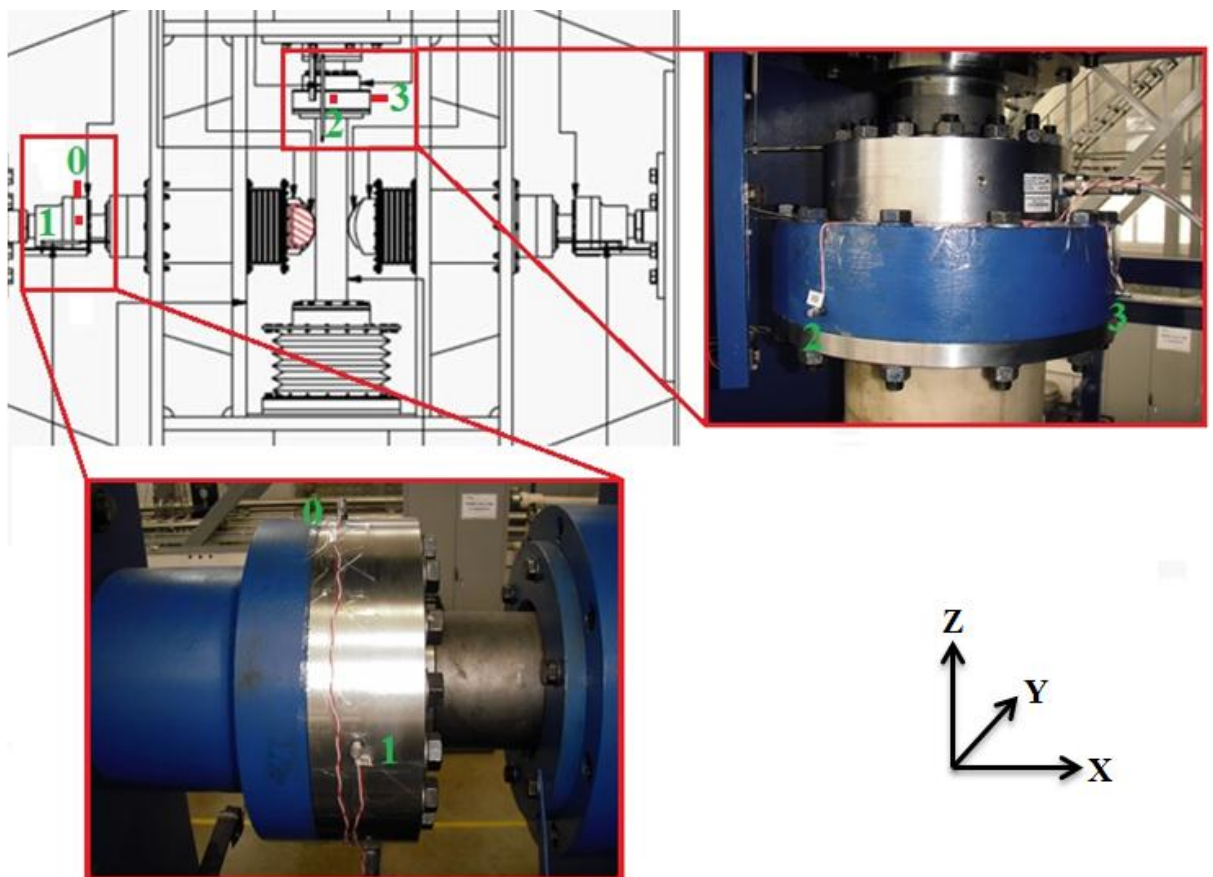


Figura 3.13 - Localização dos acelerômetros na estrutura do tribômetro

A Figura 3.14 apresenta o diagrama de fluxo dos dados entre os componentes do sistema de aquisição de vibrações. Basicamente, a placa de aquisição adquiriu os sinais elétricos captados pelos acelerômetros a uma dada taxa de aquisição e os dados de vibração foram transferidos, via USB, da placa até o computador onde era executado o programa supervisor de vibrações.

O Labview[®] possui como uma de suas ferramentas o servidor *DataSocket*, que pode ser utilizado na comunicação de variáveis em computadores diferentes e que, para isso, utiliza o padrão *Ethernet*. Através deste servidor, que está instalado no computador principal do tribômetro, pôde ser acessada a variável que indica se o ensaio foi iniciado ou finalizado. Esta variável foi a mesma que indicou o início da aquisição e do monitoramento dos sinais de vibração.

Vale salientar que, em ensaio de desgaste preliminar, ocorreu perda de desempenho na execução do programa principal de aquisição e controle dos parâmetros de processo do tribômetro, quando o programa supervisor elaborado foi executado no mesmo computador. Em virtude disso, o programa desenvolvido foi destinado para ser executado separadamente em outro computador.

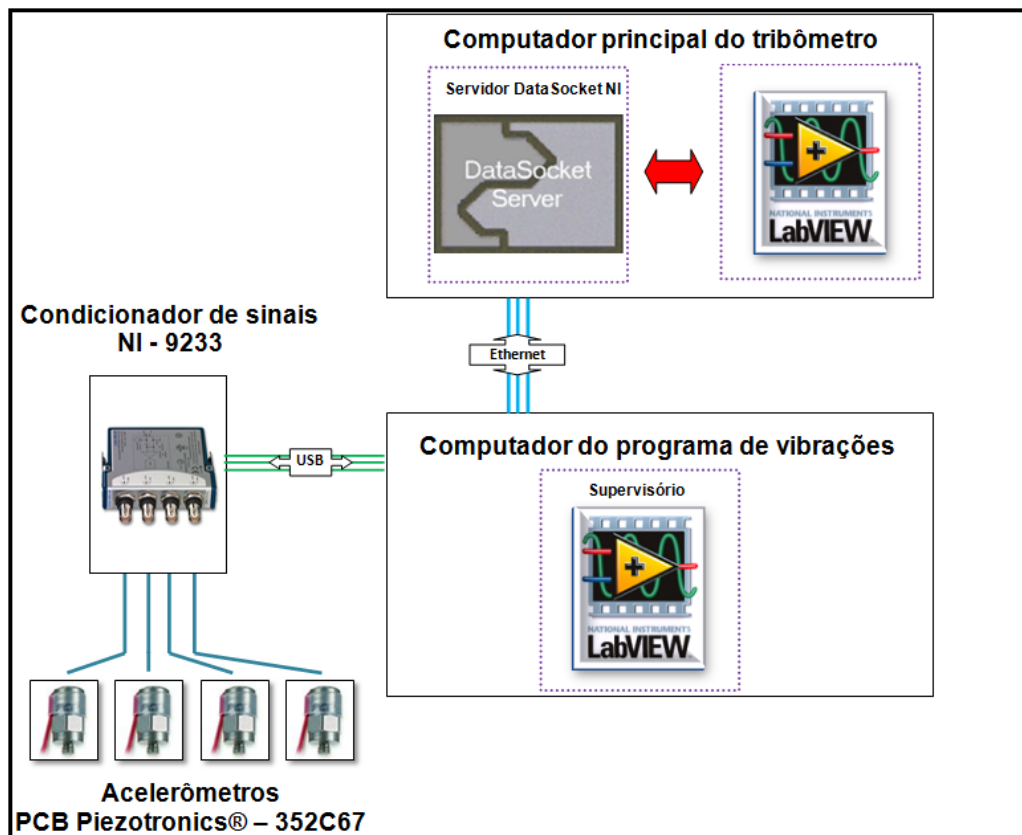


Figura 3.14 – Diagrama de fluxo dos dados do sistema de aquisição e monitoramento de vibrações do tribômetro

A Figura 3.15 mostra a interface do programa supervisorio desenvolvido. Na interface, podem ser visualizados os possíveis erros na aquisição ou nos sinais captados pelos acelerômetros. Também, são mostrados os gráficos com as amplitudes de vibração [mm/s], as quais estão dispostas em níveis de cores em função da frequência [Hz] no eixo Y e do tempo em que ocorrem [hora] no eixo X.

Os gráficos apresentam os dados de vibração a um dado período de tempo de ensaio. A escala de cores pode ser ajustada a qualquer momento pelo usuário.

Para a análise das vibrações foram utilizados espectros de velocidade, já que são mais eficientes para a análise de frequências na faixa de 10 a 2.000 Hz (TAYLOR, 1994). Com base nos trabalhos de Yoon et al. (2012) e de Lee et al. (2013), espera-se que os eventos de *stick-slip* dos ensaios de desgaste por deslizamento ocorram nesta faixa de frequência.

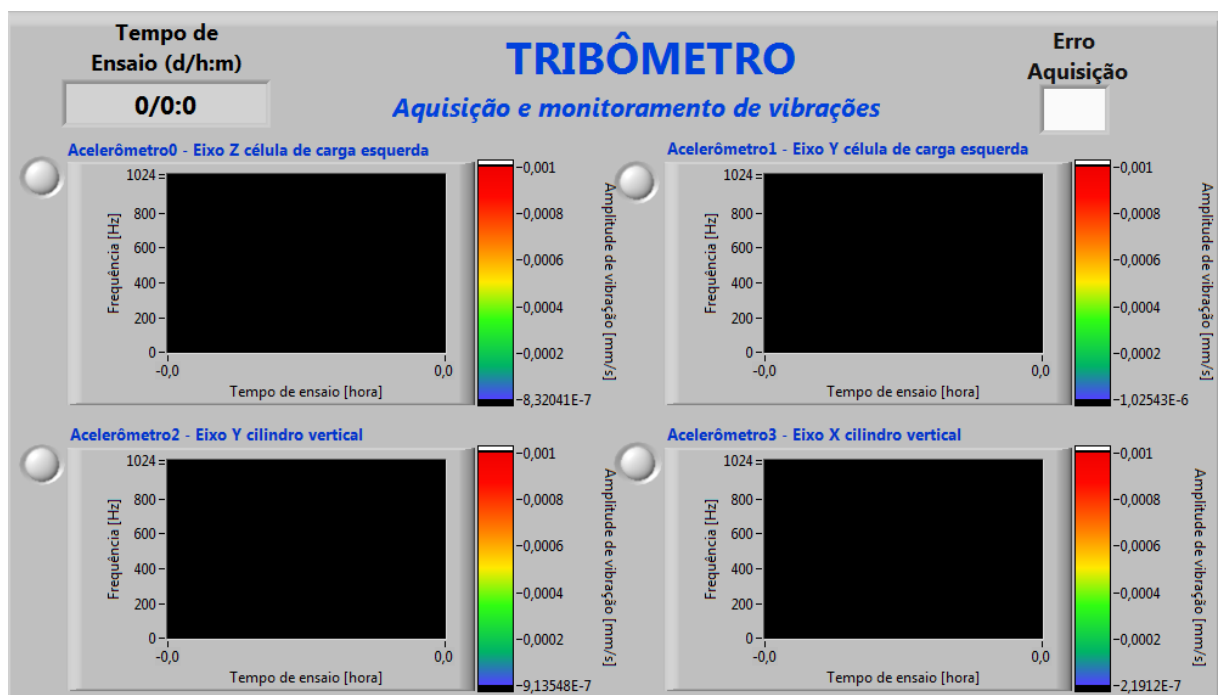


Figura 3.15 - Interface do programa desenvolvido para a aquisição, tratamento, monitoramento e salvamento dos dados de vibração do tribômetro

O fluxograma de funcionamento deste programa é mostrado na Fig. 3.16, descrevendo as etapas principais que norteiam a aquisição, o tratamento, o monitoramento e o salvamento dos dados de vibração.

O salvamento dos dados, Fig. 3.16, foi realizado no intervalo de 8 a 24 mm de curso de deslizamento, para que não fossem armazenados os dados de vibração [m/s²] obtidos durante a inversão do sentido de deslizamento do cilindro vertical, isto é, quando a posição

medida pelo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) fosse de 0 mm e de 30 mm, sendo que a amplitude do deslizamento alternado é de 30 mm. Também, para que não fossem armazenados os dados obtidos durante o recuo dos cilindros horizontais, que ocorreu quando a posição medida pelo LVDT foi igual a 0 mm.

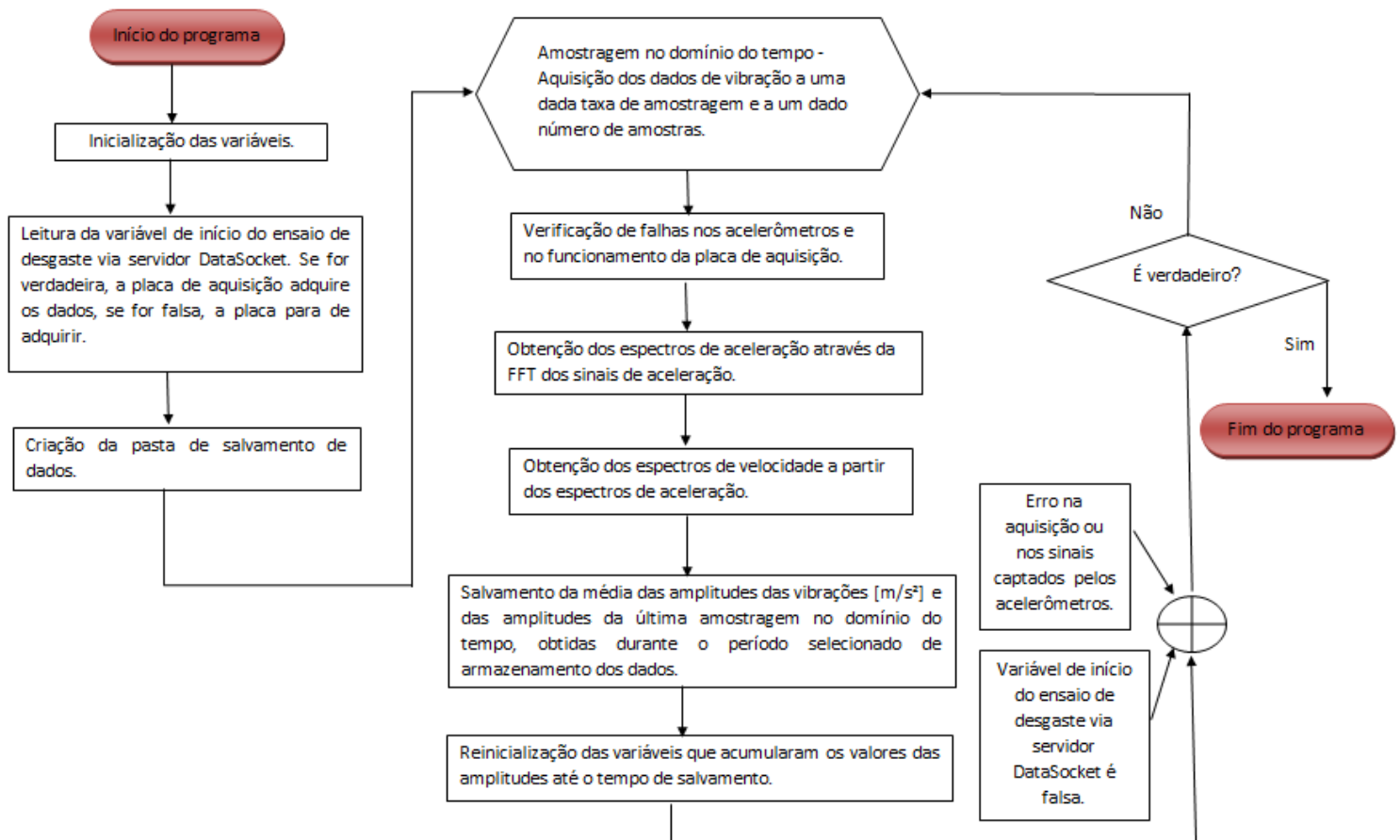


Figura 3.16 - Fluxograma de funcionamento do programa de aquisição e monitoramento das vibrações decorrentes do ensaio de desgaste

3.4. Desenvolvimento de um programa para estimar o volume de uma peça a partir das coordenadas dos pontos medidos com uma MM3C

Neste trabalho, foi desenvolvido um programa utilizando o *software* Matlab® para estimar o volume a partir das coordenadas dos pontos medidos pela MM3C, no intuito de suprir a incapacidade do *software* Dimension Volume® na análise do volume das amostras de enrijecedores para *riser* de 6 in (152,4 mm) e, também, confrontar os resultados obtidos com este programa e aqueles fornecidos pelo *software* Dimension Volume® na análise do volume de uma amostra de enrijecedor para *riser* de 4 in (101,6 mm) de diâmetro interno.

O programa desenvolvido é capaz de fornecer resultados de volume em unidades diferentes de cm^3 , que é a única que o *software* Dimension Volume[®] consegue exprimir. Além disso, haja vista que a resolução volumétrica da MM3C é de $8 \times 10^{-15} \text{ cm}^3$, o programa elaborado é capaz de emitir resultados com mais de 4 algarismos significativos, diferentemente do Dimension Volume[®], que é limitado em 4.

O procedimento matemático utilizado no cálculo do volume pelo programa desenvolvido utiliza o método do trapézio, o qual é aplicado a cada par de pontos. Através deste método, dois pontos adjacentes de uma dada linha de medição são ajustados por um polinômio interpolador de primeira ordem. A integral, que graficamente é interpretada como a área sob o gráfico da função, é aproximada pela área do trapézio, conforme pode ser visualizado pelas áreas denominadas de a1, a2, a3 e a4 na Fig. 3.17. A Equação 3.1 exemplifica o cálculo de “a1”.

$$\text{Área} = \frac{(f(x_1) + f(x_2)) \cdot (x_2 - x_1)}{2} \quad (3.1)$$

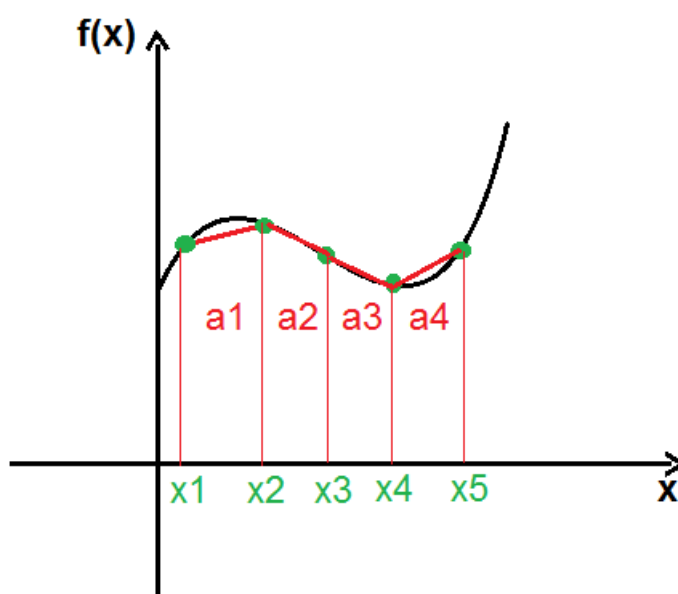


Figura 3.17 - Método do trapézio aplicado na determinação da área sob uma função

A somatória de todas as áreas, definidas pelos trapézios, a cada par de pontos medidos ao longo de uma linha, define a área total sob tal linha medida. E a multiplicação desta área total sob uma linha pelo valor do passo, dado pela distância entre as linhas, resulta em uma parcela do volume total. Portanto, o volume total é a soma de todas as parcelas de volume obtidas.

Vale salientar que, para que a coordenada Z dos pontos medidos representem a altura real do ponto, a origem do sistema de referência da peça deve estar localizado em sua base para facilitar o cálculo do volume, evitando, assim, possíveis manipulações dos valores das coordenadas Z caso a referência estiver deslocada da base.

Como regra geral, quanto menor a distância entre os pontos ao longo da linha e quanto menor a distância entre linhas, maior será a precisão do método para a estimativa do volume, haja vista que uma maior quantidade de pontos implica em maiores informações e detalhes sobre as dimensões e as irregularidades das superfícies analisadas das peças. Em contrapartida, o tempo de medição é maior e, consequentemente, os custos são maiores.

Com a utilização do procedimento de cálculo do volume descrito, pode-se dizer que há uma grande probabilidade deste programa ser sensível às variações provocadas pelo desgaste na peça medida, já que o ajuste dos pontos medidos é feito ponto a ponto e, não, meramente um ajuste de todos os pontos a uma dada função. Quando todas as coordenadas dos pontos apalpados são ajustadas a uma função, pode acontecer de as coordenadas dos pontos apalpados sobre as irregularidades da peça devido ao desgaste não pertencerem à função da regressão.

3.4.1. Validação do programa

Com o intuito de validar o programa desenvolvido em Matlab®, que calcula o volume de qualquer peça a partir das coordenadas dos pontos teóricos e medidos sobre a superfície desta peça, foi necessário realizar um teste experimental em uma peça com volume conhecido. Desta forma, foi utilizado um bloco-padrão de aço, com dimensão nominal de 75 mm. Segundo o certificado de calibração (ANEXO 3), número 1505/11, emitido pelo Laboratório de Metrologia Laroy S. Starrett, este bloco-padrão possui uma incerteza expandida de 0,12 μm para k igual a 2,00 e 95% de probabilidade de abrangência.

Posteriormente à fixação do bloco-padrão na mesa da MM3C, foi realizado o alinhamento básico deste bloco com o auxílio do *software* Calypso®, Fig. 3.18. Os elementos utilizados para a determinação e posicionamento do sistema de coordenadas de referência do bloco foram: plano, linha e ponto, conforme a Fig. 3.19. A origem do sistema de referência foi colocado no ponto 0.

Sabe-se que, para a medição do volume com este programa desenvolvido, a origem do sistema de referência deve estar localizado na base da peça, no intuito de a coordenada medida na superfície da peça, no caso a coordenada do eixo Z, representar a altura da mesma.

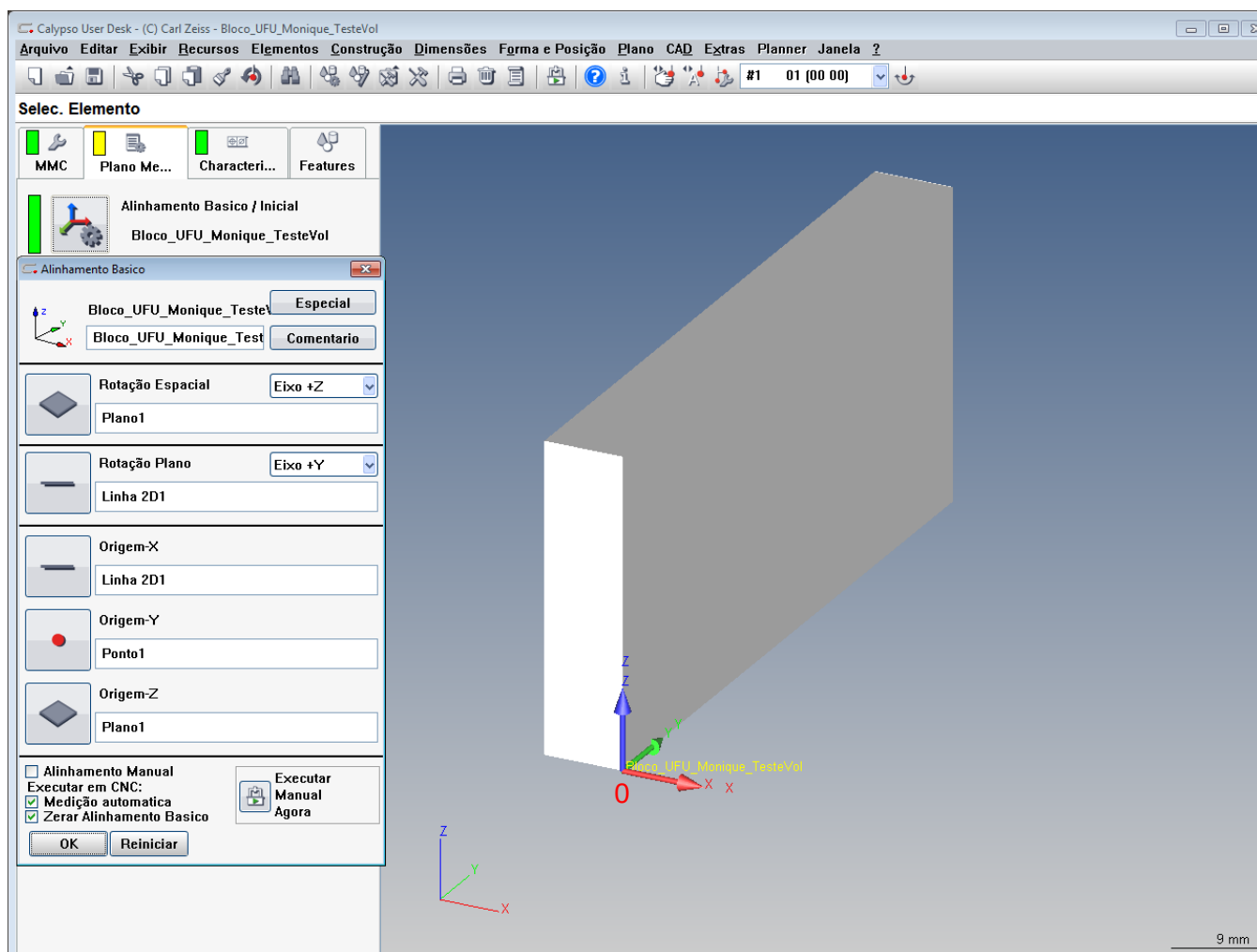


Figura 3.18 - Determinação do alinhamento básico do bloco-padrão no *software* Calypso®

Depois de realizado o alinhamento, foi definida uma estratégia de medição sobre a área do plano superior do bloco (utilizado no alinhamento, Fig. 3.19). Vale salientar que não é possível determinar uma estratégia que permita apalpar exatamente os pontos que delimitam a superfície do bloco-padrão, isto é, os pontos que representam realmente os limites exatos do plano considerado durante a medição do bloco.

Visto isso, foi selecionada uma área conhecida na superfície de medição (Fig. 3.20) de forma que fosse possível apalpar tanto os limites quanto dentro de tal região selecionada.

A estratégia de medição adotada consistiu em distribuir 24 pontos nesta área de medição selecionada, Fig. 3.20. Esta estratégia foi considerada representativa para a avaliação do volume, embora utilize poucos pontos, já que se trata de uma peça com geometria simples e elevada exatidão dimensional e geométrica. Três repetições desta estratégia foram realizadas com a MM3C e o *software* Calypso®.

Para cada execução da medição com a MM3C, gerou-se um relatório de medição, que conteve as coordenadas dos pontos medidos e as correspondentes coordenadas

teóricas. As coordenadas teóricas foram definidas pelo próprio *software* Calypso®, com base no alinhamento básico do bloco-padrão.

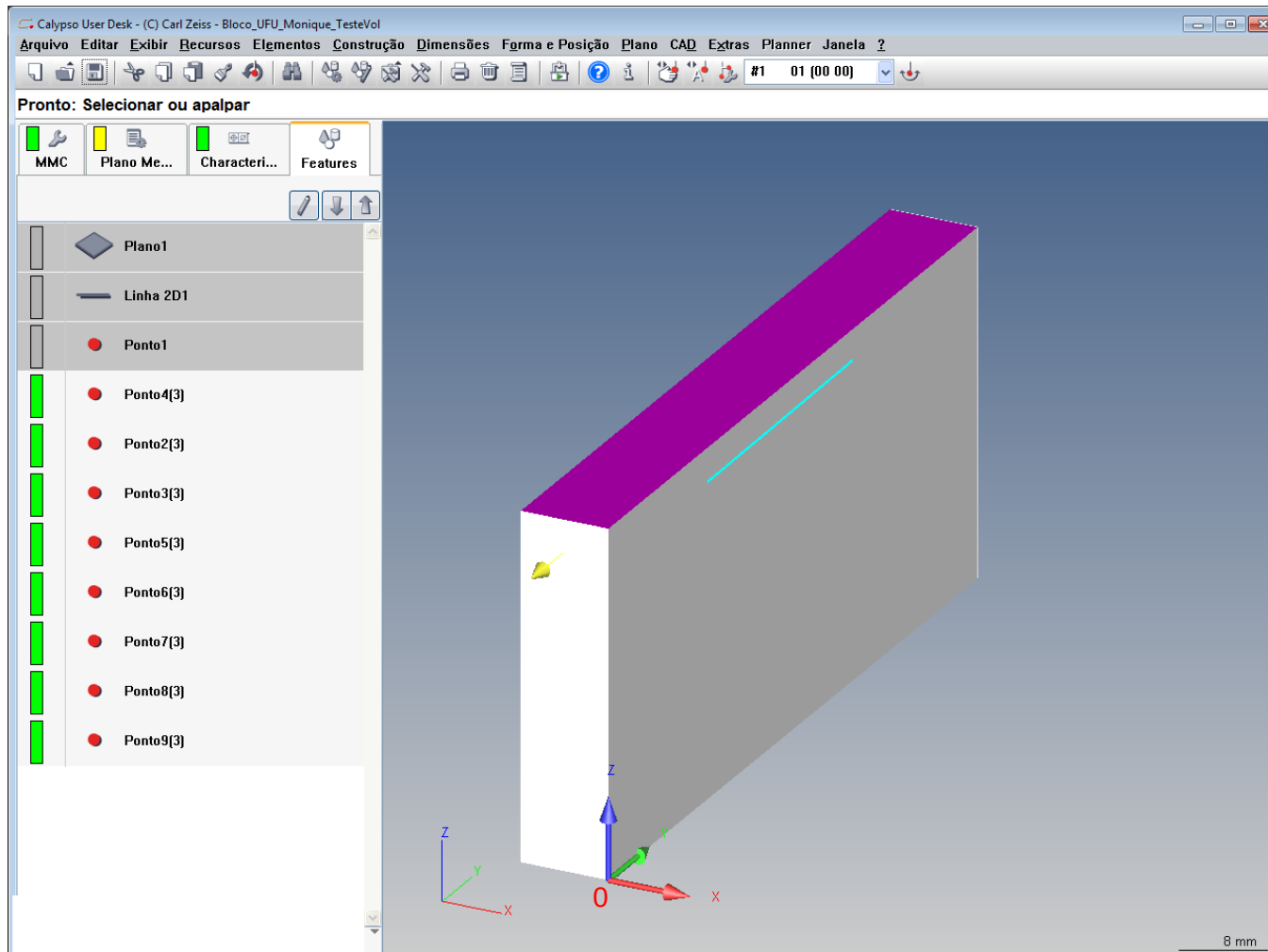


Figura 3.19 - Elementos utilizados no alinhamento do bloco-padrão no *software* Calypso®

Os arquivos com as coordenadas dos pontos foram, então, inseridos no programa desenvolvido no *software* Matlab®.

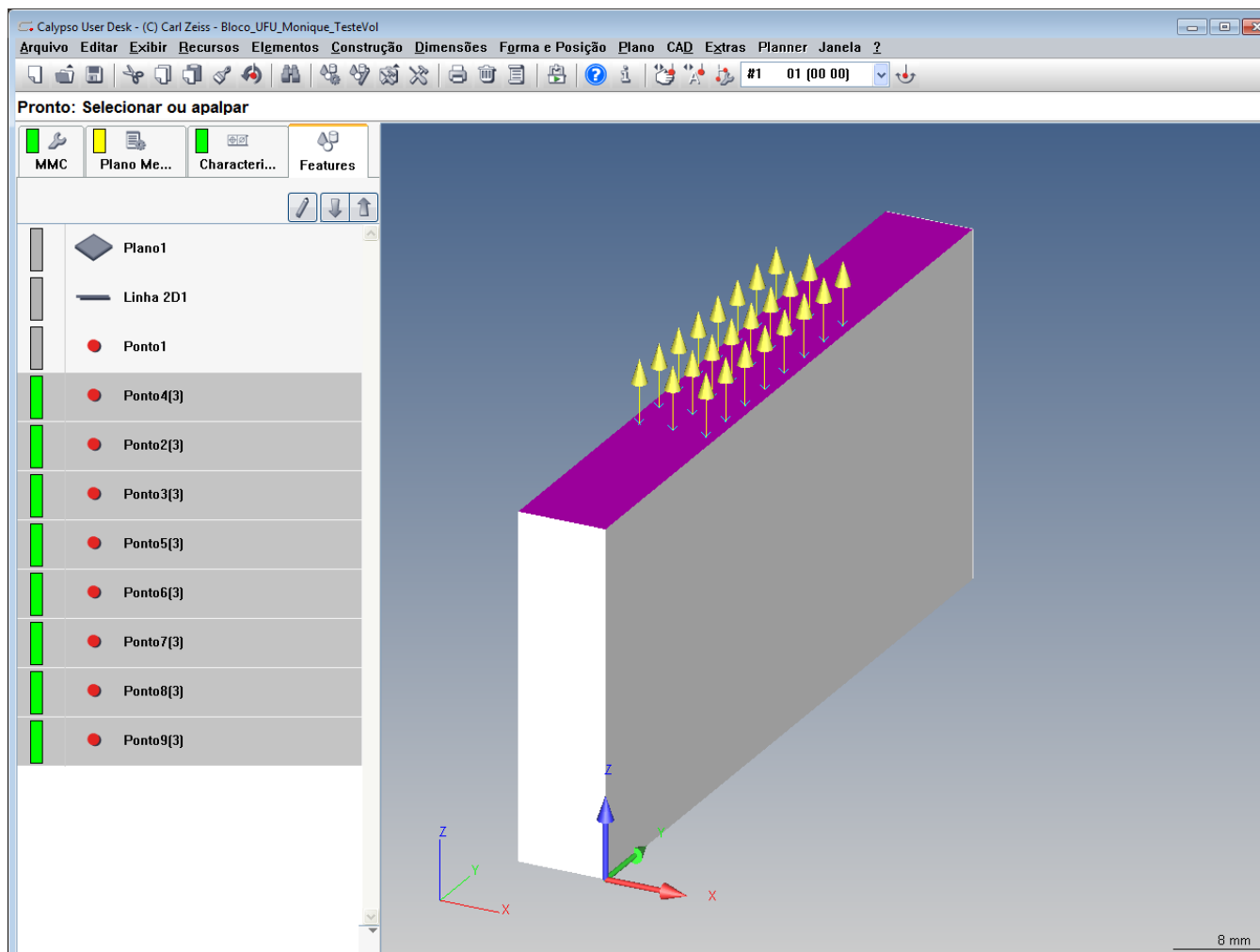


Figura 3.20 - Área de medição selecionada dentro da superfície original do bloco-padrão

3.5. Avaliação da incerteza da quantificação do desgaste em *risers* e enrijecedores a partir da utilização de uma MM3C

Os procedimentos para a avaliação e expressão da incerteza associada à estimativa do desgaste linear e volumétrico em amostras de *risers* e enrijecedores, respectivamente, a partir da utilização de uma MM3C, são apresentados a seguir, com base no ISO/TAG 4/WG 3 (2008).

3.5.1. Identificação das variáveis que afetam o resultado da medição

Os fatores que influenciam nos resultados das avaliações do desgaste, utilizando uma MM3C, com base na perda de espessura ou volume, são:

- $s(L_{MMC})$: Variabilidade dos valores do mensurando (espessura ou perda de espessura ou volume ou perda de volume);

- ΔR_{MMC} : Correção devido à resolução da MM3C;
- ΔD_{El} : Correção devido à deformação elástica da superfície da amostra;
- ΔI_A : Correção devido à incerteza padrão de apalpação da MM3C;
- ΔI_{CMMC} : Correção devido à incerteza associada à calibração da MM3C;
- δT : Correção devido à variação de temperatura durante as medições;
- ΔT : Correção devido ao afastamento da temperatura ambiente em relação a 20°C;
- α_{Pe} : Coeficiente de expansão térmica linear do material da amostra;
- L_0 : Valor da coordenada do ponto avaliado (X, Y ou Z).

3.5.2. Definição do modelo matemático

O modelo matemático expressa o mensurando em função de todas as grandezas que afetam o processo de medição. Este modelo é a base para a aplicação da Lei de Propagação de Incertezas.

Para a análise do desgaste linear ou volumétrico com a MM3C, ele foi expresso pela Eq. 3.2.

$$C = s(L_{MMC}) + \Delta R_{MMC} + \Delta D_{El} + \Delta I_A + \Delta I_{CMMC} + L_0 \cdot \Delta T \cdot \alpha_{Pe} + L_0 \cdot \delta T \cdot \alpha_{Pe} \quad (3.2)$$

3.5.3. Aplicação da Lei de Propagação de Incertezas

A Lei de Propagação de Incertezas foi aplicada na Eq. 3.2, obtendo-se a Eq. 3.3.

$$u^2_c(C) = \left(\frac{\partial C}{\partial s(L_{MMC})} \right)^2 \cdot (u_{s(L_{MMC})})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \Delta R_{MMC}} \right)^2 \cdot (u_{\Delta R_{MMC}})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \Delta D_{El}} \right)^2 \cdot (u_{\Delta D_{El}})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \Delta I_A} \right)^2 \cdot (u_{\Delta I_A})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \Delta I_{CMMC}} \right)^2 \cdot (u_{\Delta I_{CMMC}})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \alpha_{Pe}} \right)^2 \cdot (u_{\alpha_{Pe}})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \delta T} \right)^2 \cdot (u_{\delta T})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \Delta T} \right)^2 \cdot (u_{\Delta T})^2 \quad (3.3)$$

A raiz positiva do segundo membro da Eq. 3.3 forneceu o valor da incerteza padrão combinada associada à estimativa do desgaste linear ou volumétrico com a MMC.

Os parâmetros necessários para determiná-la, são apresentados na Tab. 3.4.

Tabela 3.4 - Parâmetros utilizados na determinação da incerteza padrão combinada da quantificação do desgaste linear ou volumétrico com uma MM3C

COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE	AValiação DAS INCERTEZAS PADRÃO
$\frac{\partial C}{\partial s(L_{MMC})} = 1$	Avaliação Tipo A: Se $N \leq 30$, distribuição T-student; se $N > 30$, distribuição normal. G.L.: N-1 $u(s(L_{MMC})) = \sqrt{\frac{s^2}{N}}$ N= número de avaliações do mensurando; s= desvio padrão dos valores do mensurando; G.L.= graus de liberdade.
$\frac{\partial C}{\partial \Delta R_{MMC}} = 1$	Avaliação Tipo B: Distribuição retangular. G.L.: ∞ Para a avaliação do desgaste linear: $u(\Delta R_{MMC}) = \frac{R_{MMC}}{2\sqrt{3}}$ Para a avaliação do desgaste volumétrico: $u(\Delta R_{MMC}) = \frac{(R_{MMC})^3}{2\sqrt{3}}$
$\frac{\partial C}{\partial \Delta D_{El}} = 1$	Avaliação Tipo B: Distribuição normal. G.L.: ∞ Para a avaliação do desgaste linear: $u(\Delta D_{El}) = \sqrt{\left(\frac{D_{El}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{E_m}{\sqrt{3}}\right)^2}$ Para a avaliação do desgaste volumétrico: $u(\Delta D_{El}) = \sqrt{\left(\frac{(D_{El})^3}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{(E_m)^3}{\sqrt{3}}\right)^2}$ E_m= erro de penetração das malhas dos elementos finitos.
$\frac{\partial C}{\partial \Delta I_A} = 1$	Avaliação Tipo B: Distribuição normal. G.L.: v_{eff} Para a avaliação do desgaste linear: $u(\Delta I_A) = \frac{U_A}{k}$ Para a avaliação do desgaste volumétrico:

	$u(\Delta I_A) = \left(\frac{U_A}{k} \right)^3$ U_A= incerteza expandida de apalpação; k= fator de abrangência; v_{eff}= graus de liberdade efetivos.
Para avaliação linear: $\frac{\partial C}{\partial \alpha_{Pe}} = L_0 \cdot (\Delta T + \delta T)$ Para avaliação volumétrica: $\frac{\partial C}{\partial \alpha_{Pe}} = 3 \cdot \alpha_{Pe}^2 \cdot Vol_{\text{máx}} \cdot (\Delta T^3 + \delta T^3)$	Avaliação Tipo B: Distribuição retangular. G.L.: ∞ $u(\alpha_{Pe}) = \frac{0,01 \cdot \alpha_{Pe}}{\sqrt{3}}$ $Vol_{\text{máx}} = L_{\text{xmáx}} \cdot L_{\text{ymáx}} \cdot L_{\text{zmáx}}$ $L_{\text{xmáx}}$, $L_{\text{ymáx}}$, $L_{\text{zmáx}}$= valores das coordenadas máximas avaliadas nas direções X, Y e Z, respectivamente.
Para avaliação linear: $\frac{\partial C}{\partial \Delta T} = L_0 \cdot \alpha_{Pe}$ Para avaliação volumétrica: $\frac{\partial C}{\partial \Delta T} = 3 \cdot \Delta T^2 \cdot Vol_{\text{máx}} \cdot \alpha_{Pe}^3$	Avaliação Tipo A: Distribuição normal. G.L.: v_{eff} $u(\Delta T) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta T}{\partial \Delta T_{20}} \right)^2 \cdot (u_{\Delta T_{20}})^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial \Delta R_T} \right)^2 \cdot (u_{\Delta R_T})^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial \Delta I_{C_T}} \right)^2 \cdot (\Delta I_{C_T})^2}$
Para avaliação linear: $\frac{\partial C}{\partial \delta T} = L_0 \cdot \alpha_{Pe}$ Para avaliação volumétrica: $\frac{\partial C}{\partial \delta T} = 3 \cdot \delta T^2 \cdot Vol_{\text{máx}} \cdot \alpha_{Pe}^3$	Avaliação Tipo B: Distribuição retangular. G.L.: ∞ $u(\delta T) = \frac{\delta t}{\sqrt{3}}, \quad \delta t = T_{\text{máximo}} - T_{\text{mínimo}}$
$\frac{\partial C}{\partial \Delta I_{\text{CMMC}}} = 1$	Avaliação Tipo B: Distribuição normal. G.L.: v_{eff} Para a avaliação do desgaste linear: $u(\Delta I_{\text{CMMC}}) = \frac{U_{\text{CMMC}}}{k}$ Para a avaliação do desgaste volumétrico: $u(\Delta I_{\text{CMMC}}) = u(\Delta I_{\text{Cvol_máx}}) = \left(\frac{U_{\text{C_xmáx}}}{k} \right) \left(\frac{U_{\text{C_ymáx}}}{k} \right) \left(\frac{U_{\text{C_zmáx}}}{k} \right)$ $\Delta I_{\text{Cvol_máx}}$= correção devido à incerteza máxima da estimativa do volume da amostra; $U_{\text{C_xmáx}}$, $U_{\text{C_ymáx}}$, $U_{\text{C_zmáx}}$ = incerteza expandida da calibração da MMC na direção do máximo comprimento avaliado

	da amostra nos eixos X, Y e Z, respectivamente.
--	---

Vale ressaltar que, na medida em que a temperatura se afasta de 20°C, o sistema de medição e a peça se dilatam. Essa dilatação é expressa através da Eq. 3.4.

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha_{pe} \cdot \Delta T \quad (3.4)$$

A dilatação das escalas da MM3C não foi considerada, pois o coeficiente de expansão térmica do material que constitui as mesmas é aproximadamente nulo.

O monitoramento da temperatura durante o processo de medição com a MM3C foi considerado um segundo processo de medição. Portanto, para a análise do afastamento térmico em relação a 20°C, tem-se que as variáveis de influência foram:

- ΔT_{20} : correção devido ao afastamento da temperatura em relação a 20°C;
- ΔR_T : correção associada à resolução do termohigrômetro utilizado para medir a temperatura e a umidade;
- ΔI_{C_T} : correção devido à incerteza padrão da calibração do termohigrômetro.

Assim, o modelo matemático para estimar a incerteza associada à variação da temperatura ambiente em relação a 20°C é dado pela Eq. (3.5).

$$\Delta T = \Delta T_{20} + \Delta R_T + \Delta I_{C_T} \quad (3.5)$$

Aplicando a Lei de Propagação de Incertezas na Eq. 3.5, foi obtida a equação da Tab. 3.4.

Para calcular a incerteza padrão associada à diferença de temperatura da medição em relação a 20°C utilizou-se a Eq. 3.6.

$$u(\Delta T_{20}) = \frac{s_{\Delta T_{20}}}{\sqrt{n}} \quad (3.6)$$

Em que $s_{\Delta T_{20}}$ representa o desvio padrão dos 'n' valores de temperatura obtidos durante as medições, os quais foram armazenados pelo termohigrômetro e, posteriormente, transferidos para o computador. Cabe salientar que o afastamento da temperatura com

relação a 20°C foi determinado como a diferença entre a média aritmética dos valores de temperatura coletados e 20°C.

Por sua vez, a incerteza associada ao δT foi calculada pela Eq. 3.7.

$$\delta T = \delta t + \Delta R_T + \Delta I_{C_T} \quad (3.7)$$

Em que δt representa a amplitude da amostra dos 'n' valores de temperatura coletados durante a medição da peça e que foram utilizados para determinar o valor do afastamento da temperatura com relação a 20°C.

Cabe ressaltar que ambas as variáveis (ΔT e δT) foram medidas com o mesmo termohigrômetro e, portanto, são correlacionadas. Desta forma, aplicando a Lei de Propagação de Incertezas na Eq. 3.7, obtém-se a equação da Tab. 3.4.

Para calcular a incerteza padrão associada à calibração do termohigrômetro utilizou-se a Eq. 3.8.

$$\Delta I_{C_T} = \frac{U_P}{k} \quad (3.8)$$

A incerteza padrão associada à resolução do termohigrômetro foi expressa pela Eq. 3.9.

$$u(\Delta R_T) = \frac{R_T}{2\sqrt{3}} \quad (3.9)$$

A incerteza expandida foi calculada, conforme Eq. 3.10, considerando 95% como intervalo de abrangência.

$$U = u_c(C).k \quad (3.10)$$

Em que $u_c(C)$ representa a incerteza padrão combinada e k é o fator de abrangência, determinado em função do grau de liberdade efetivo de $u_c(C)$ e da probabilidade de abrangência especificada. Este fator é assim determinado, quando o número de leituras realizado é menor que 30; sendo, então, possível utilizar a distribuição t-student para obtê-lo.

O número de graus de liberdade efetivos da incerteza padrão combinada foi calculado através da equação de Welch-Satterthwaite, Eq. 3.11.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(u_i \cdot c_i)^4}{v_i} \right)} \quad (3.11)$$

Em que ‘ v_i ’, ‘ u_i ’ e ‘ c_i ’ são, respectivamente, os graus de liberdade e a incerteza padrão de cada variável de entrada e o coeficiente de sensibilidade do mensurando em relação a cada fonte de entrada.

Foram desenvolvidas planilhas em *Excel* para facilitar a avaliação e a expressão da incerteza dos resultados de quantificação do desgaste. A partir destas planilhas, todas as informações coletadas da avaliação da incerteza foram dispostas, automaticamente, em uma tabela.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados provenientes da aplicação das metodologias de avaliação do desgaste no par *riser*-enrijecedor e os resultados da medição das vibrações são apresentados a seguir.

4.1. Avaliação do desgaste linear em uma amostra de *riser* testada durante 1.280 horas no tribômetro

A Figura 4.1 apresenta a parte interna da camada externa de uma amostra de *riser* de 4 in (101,6 mm) de diâmetro interno. As irregularidades desta região são inerentes ao processo de fabricação do revestimento polimérico.

A Figura 4.2 mostra o desvio de retitude da camada de PA, evidenciado pelos valores da coordenada Y dos pontos medidos na face interna (Y internos) e os correspondentes valores obtidos na face externa (Y externos). Este desvio ocorreu devido às irregularidades inerentes às superfícies externa e interna das amostras, bem como ao desgaste.

Observou-se ainda que os valores da espessura média obtidos nas regiões entre RI e 0 e entre 3 e RF diferenciaram-se de aproximadamente 0,1541 mm. Esta diferença está relacionada a variações normais na espessura da capa do *riser*.



a)



b)

Figura 4.1 – Amostra de *riser* de 4 in (101,6 mm) de diâmetro interno analisada, a) vista geral e b) detalhe da superfície mostrando uma maior irregularidade da superfície

A Tabela 4.1 apresenta a redução de espessura média nas regiões desgastadas e suas incertezas associadas, para a amostra 1 e 2. Em todos os casos, a probabilidade de abrangência foi de 95%.

Cabe salientar que o tempo de medição de ambas as faces, interna e externa, das amostras foi de 30 minutos. Sendo assim, os três ciclos de medição realizados para cada amostra demandaram, no total, 1 hora e 30 minutos.

Uma similar redução de espessura foi observada em ambas as amostras (Tab. 4.1), o que era esperado, haja vista que constituem partes do mesmo material e da mesma seção da amostra de *riser* analisada. A variabilidade observada pode ser atribuída principalmente ao péssimo acabamento superficial da face interna da amostra.

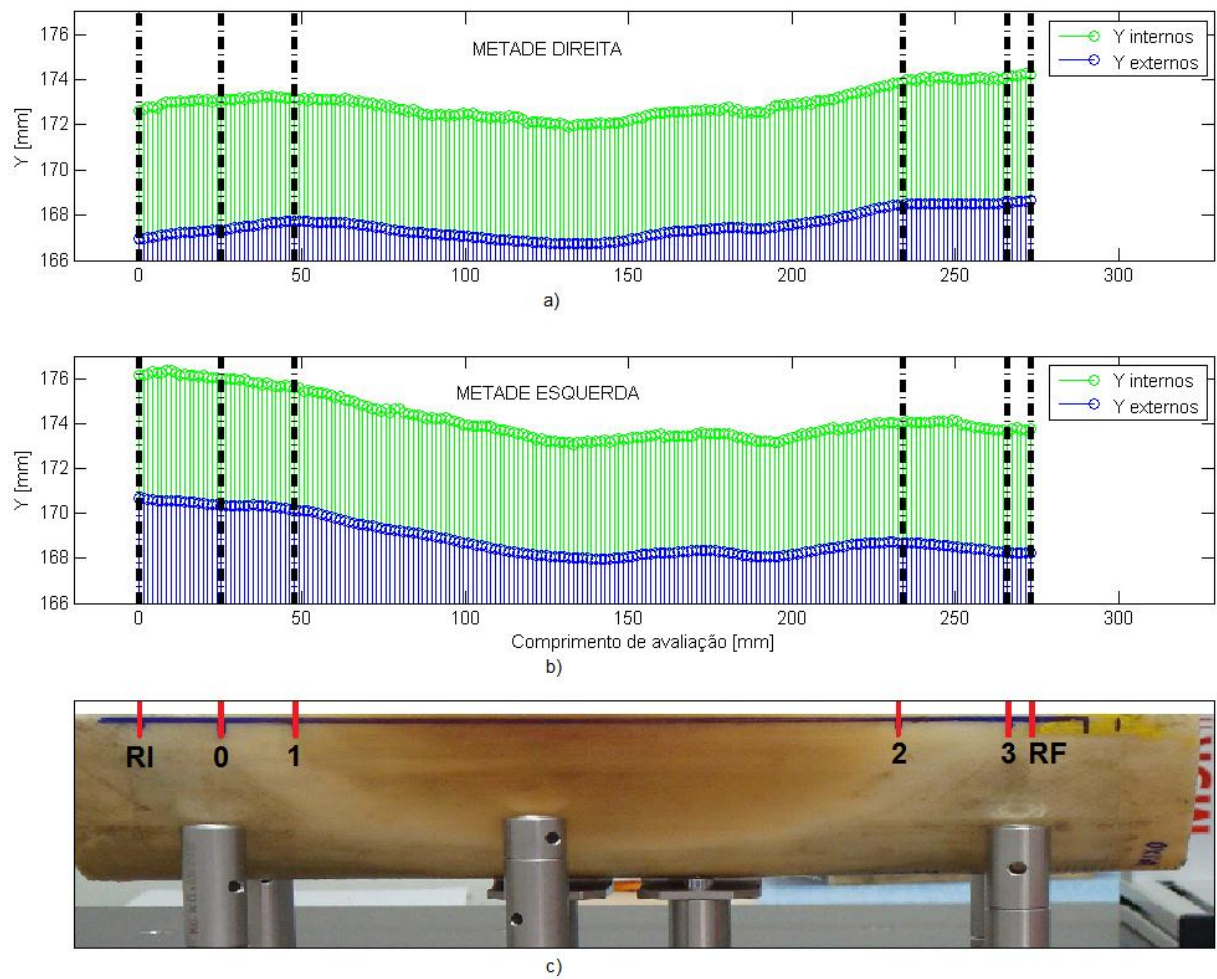


Figura 4.2 – Desvio de retitude da camada de PA, a) amostra 2 (metade direita de uma seção da amostra de *riser*), b) amostra 1 (metade esquerda da mesma seção da amostra de *riser*) e c) localização das regiões analisadas nas amostras 1 e 2

Tabela 4.1. Redução de espessura da camada externa do *riser* e incertezas associadas

Região	Redução de espessura [μm]	Fator de abrangência, k	Grau de liberdade efetivo, v_{eff}	Incerteza expandida [μm]
Amostra 1				
0 - 1	124,5	4,30	2,54	5,6
1 - 2	366,8	2,10	18,29	1,1
2 - 3	183,3	2,02	41,18	1,0
Amostra 2				
0 - 1	116,6	4,30	2,84	4,7
1 - 2	400,1	2,45	6,07	1,6
2 - 3	193,5	4,30	2,55	5,5

Conforme a Tabela 4.1, a incerteza expandida mostrou valores máximos de 5,6 μm na região 0 - 1 da amostra 1 e de 5,5 μm na região 2 - 3 da amostra 2. Estas incertezas podem ser consideradas adequadas para a exatidão da medição, já que elas representam 4,50% e 2,84% da perda de espessura, respectivamente.

As Tabelas 4.2 e 4.3 exemplificam a forma como foram expressas as componentes de incerteza das estimativas das perdas de espessura nas regiões 0 – 1 das amostras 1 e 2, respectivamente. Em ambas as tabelas foram acrescentados algarismos aos valores da incerteza padrão e da incerteza padrão combinada para diminuir os erros devido ao arredondamento.

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram graficamente a contribuição em porcentagem de cada variável de entrada ou fator de influência para a incerteza padrão combinada associada à perda de espessura das amostras 1 e 2, respectivamente, considerando as regiões 0 – 1, 1 – 2 e 2 – 3.

Tabela 4.2 – Componentes de incerteza da estimativa da perda de espessura da amostra 1 na região 0 – 1

Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	Incerteza padrão [mm]
ΔE_{MMC} [mm]	0,1245	A	T-student	2	1	0,00121701
ΔR_{MMC} [mm]	0,0002	B	Retangular	∞	1	0,00005774
ΔT [°C]	0,47136	A	Normal	∞	1,2E-05 [mm.°C ⁻¹]	0,17321522
δT [°C]	0,1	B	Retangular	∞	1,2E-05 [mm.°C ⁻¹]	0,05773503
$\Delta \alpha_{Pe}$ [°C ⁻¹]	0,0001	B	Retangular	∞	0,07112 [mm.°C]	0,00000058
Δl_A [mm]	0,00025	B	Normal	∞	1	0,00025000
Δl_{CMMC} [mm]	0,00035	B	Normal	∞	1	0,00035022
ΔD_{EI} [mm]	1,65E-05	B	Normal	∞	1	0,00000997
Incerteza padrão combinada (u_c) [mm]						0,00129217
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						2,54
Fator de abrangência (k)						4,30
Incerteza expandida (U) [mm]						0,0056
TI= tipo de incerteza; DP= distribuição de probabilidade; GL= graus de liberdade; CS= coeficiente de sensibilidade						

A estimativa da incerteza associada à deformação elástica da capa do *riser* devido à força de medição, Tabs. 4.2 e 4.3, foi baseada nos resultados da simulação utilizando

elementos finitos. Pôde-se concluir que, sob as condições especificadas, a deformação elástica do *riser* de 4 in (101,6 mm) de diâmetro interno, oriunda da força de medição de 200 mN, foi de 16,5 nm, com um erro de penetração de malha de 5 nm.

Tabela 4.3 – Componentes de incerteza da estimativa da perda de espessura da amostra 2 na região 0 – 1

Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	Incerteza padrão [mm]
ΔE_{MMC} [mm]	0,1166	A	T-student	2	1	0,00099387
ΔR_{MMC} [mm]	0,0002	B	Retangular	∞	1	0,00005774
ΔT [°C]	0,52181	A	Normal	∞	1,2E-05 [mm.°C ⁻¹]	0,17321305
δT [°C]	0,1	B	Retangular	∞	1,2E-05 [mm.°C ⁻¹]	0,05773503
$\Delta \alpha_{Pe}$ [°C ⁻¹]	0,0001	B	Retangular	∞	0,07252 [mm.°C]	0,00000058
ΔI_A [mm]	0,00025	B	Normal	∞	1	0,00025000
ΔI_{CMMC} [mm]	0,00035	B	Normal	∞	1	0,00035021
ΔD_{EI} [mm]	1,65E-05	B	Normal	∞	1	0,00000997
Incerteza padrão combinada (u_c) [mm]						0,00108460
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						2,84
Fator de abrangência (k)						4,30
Incerteza expandida (U) [mm]						0,0047

Considerando todas as regiões analisadas das amostras 1 (Fig. 4.3) e 2 (Fig. 4.4), exceto as regiões 1 – 2 e 2 – 3 da amostra 1, a variabilidade dos valores de perda de espessura (ΔE_{MMC}), decorrentes de três ciclos de medição, foi a grandeza que mais contribuiu para a incerteza total. Isto é justificado pela rugosidade superficial e pelo desvio de retitude presente nas amostras. O segundo fator mais influente foi a incerteza da calibração (ΔI_{CMMC}) associada à medição da coordenada Y, a qual foi utilizada na definição da espessura. A terceira grandeza que mais influenciou foi a incerteza associada ao sistema de apalamento (ΔI_A).

Para as regiões 1 – 2 e 2 – 3 da amostra 1, Fig. 4.3, os três fatores, em ordem decrescente de contribuição na incerteza total, foram: ΔI_{CMMC} , ΔE_{MMC} , ΔI_A .

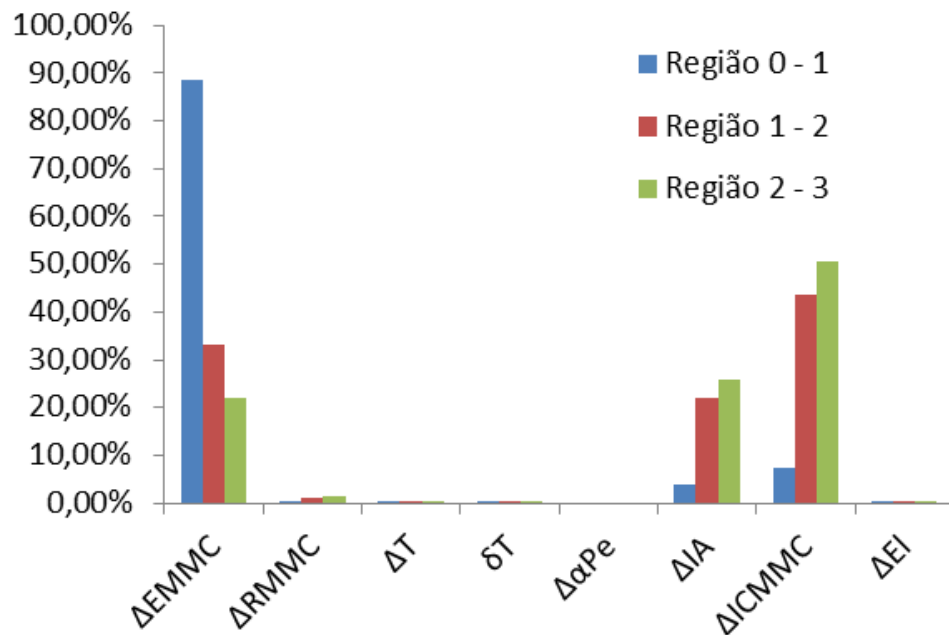


Figura 4.3 - Contribuição de cada fonte de incerteza para a incerteza final da perda de espessura da amostra 1, considerando as regiões 0 – 1, 1 – 2 e 2 – 3

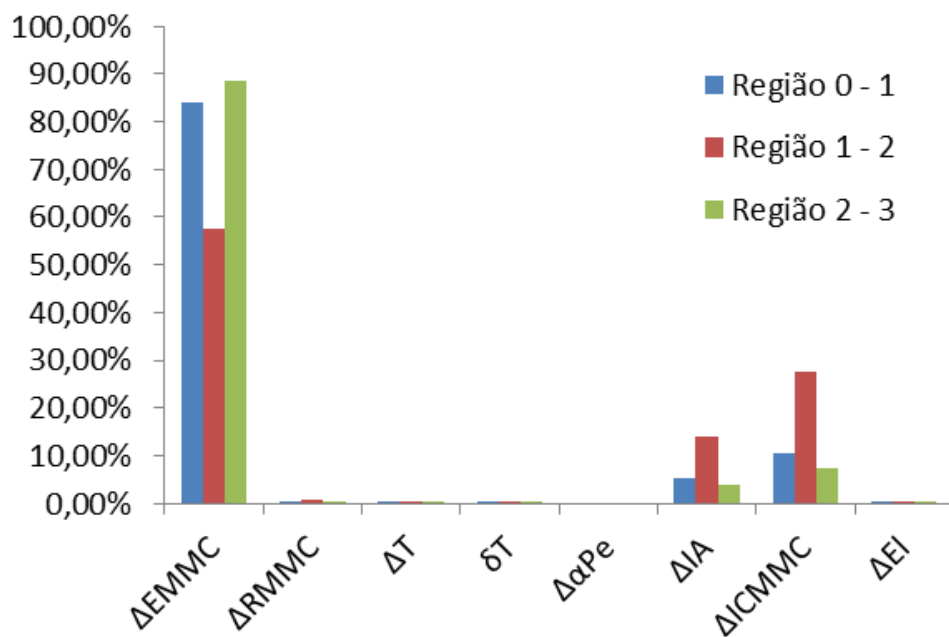


Figura 4.4 – Contribuição de cada fonte de incerteza para a incerteza final da perda de espessura da amostra 2, considerando as regiões 0 – 1, 1 – 2 e 2 – 3

Conforme as Figuras 4.3 e 4.4, tanto para as regiões da amostra 1 quanto para as da amostra 2, os efeitos térmicos (ΔT , δT , $\Delta \alpha_{Pe}$) foram os fatores menos influentes na incerteza padrão combinada. Isto é justificado porque as medições foram efetuadas a $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Os outros fatores cujos efeitos na incerteza padrão combinada também foram quase nulos

foram a incerteza associada à deformação elástica do material do *riser* (ΔD_{EI}) devido à força de medição e a incerteza associada à resolução da MM3C (ΔR_{MMC}).

A Figura 4.5 mostra os valores das taxas de desgaste ao longo da trilha de desgaste para as amostras 1 e 2. As taxas de desgaste nas regiões 0-1 e 2-3 foram inferiores às aquelas obtidas na região intermediária.

Este comportamento pode ser devido ao fato de que a região intermediária da amostra do *riser* esteve constantemente em contato com a parte interna da amostra do enrijecedor. Desta forma, as partículas de desgaste nesta região tiveram mais dificuldade de escapar do que aquelas formadas nas regiões que ora estiveram em contato com a amostra de enrijecedor e ora estiveram expostas à água.

Segundo Hawthorne (1991), uma interface repleta de partículas de desgaste implica em um maior coeficiente de atrito e taxas de desgaste maiores, quando comparada a uma interface sem essas partículas.

Além disso, na região central, as trocas térmicas com a água são mínimas, o que pode levar a aumentos significativos de temperatura e, conseqüentemente, a um aumento da taxa de desgaste.

Os resultados mostraram, portanto, que a região intermediária, a qual estava menos exposta à água, teve as maiores taxas de desgaste. Nesta região, a taxa de desgaste média para a amostra 1 foi de $1,2 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\text{ciclo}$, para uma perda de espessura de 366,8 μm , após 296 mil ciclos, com incerteza expandida de 1,1 μm para $k=2,10$ e 18,29 graus de liberdade efetivos. Já a taxa de desgaste média para a amostra 2 foi de $1,3 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\text{ciclo}$, para uma perda de espessura de 400,1 μm com incerteza expandida de 1,6 μm para $k=2,45$ e graus de liberdade efetivos iguais a 6,07. Em todos os casos, a probabilidade de abrangência foi de 95%.

A perda de espessura da camada de proteção do *riser* testado e a taxa de desgaste representaram os principais resultados obtidos com a aplicação da metodologia desenvolvida. Desses resultados, conclui-se que os valores da taxa de desgaste da região intermediária devem ser considerados para estimar o tempo de vida do material do revestimento do duto flexível, pois esses são maiores e, portanto, determinantes na vida do componente.

Vale salientar que o *riser* testado era um material usado e que, provavelmente, já havia sofrido degradação por algum mecanismo de desgaste. Isto pode ter influenciado os resultados da taxa de desgaste.

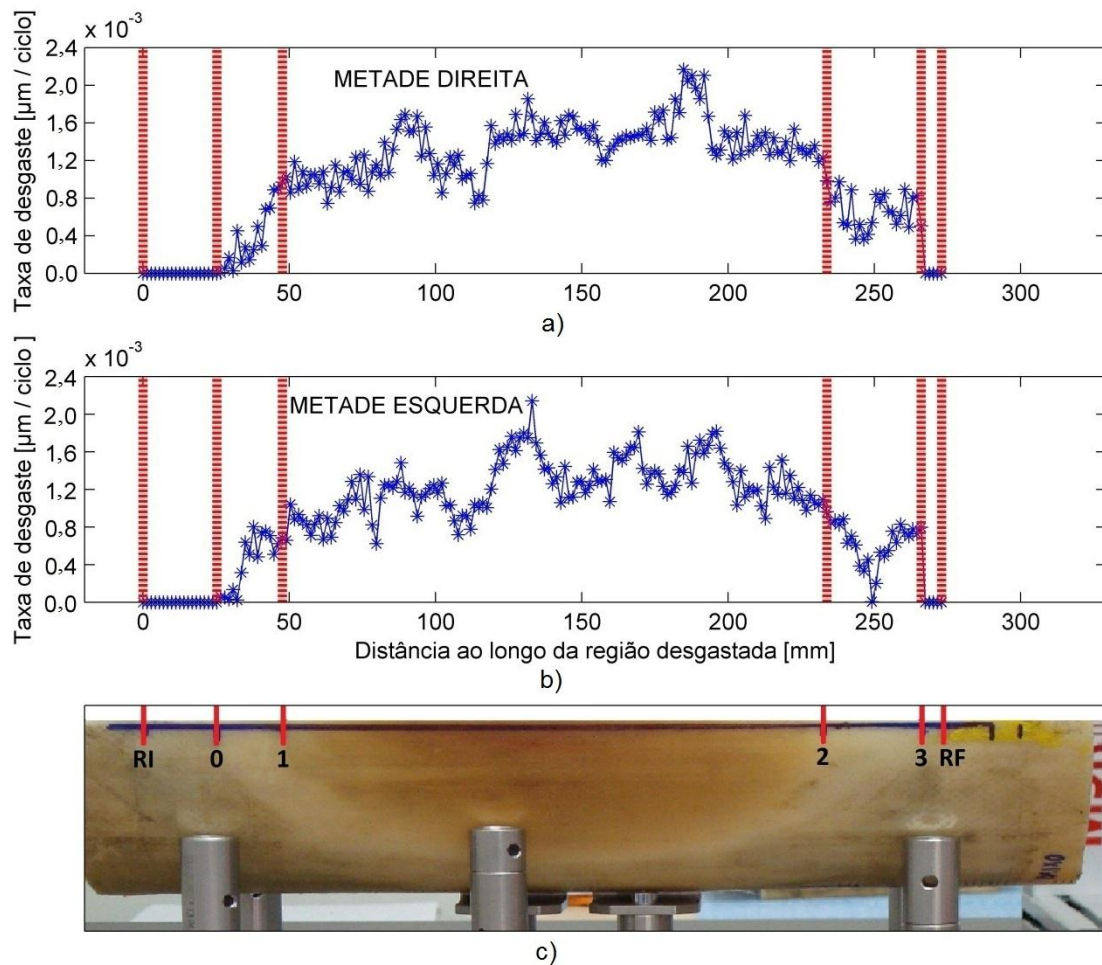


Figura 4.5 - Taxas de desgaste calculadas, a) amostra 2 (metade direita de uma seção da amostra de *riser*), b) amostra 1 (metade esquerda da mesma seção da amostra de *riser*) e c) localização das regiões analisadas nas amostras 1 e 2

4.2. Validação do programa desenvolvido para estimar o volume de uma peça a partir das coordenadas dos pontos medidos com uma MM3C

A Tabela 4.4 mostra o volume teórico contido abaixo da área selecionada do bloco-padrão, enquanto que a Tab. 4.5 mostra o volume obtido a partir da multiplicação dos valores médios dos comprimentos que definem a área, decorrentes de 6 repetições da estratégia. Já a Tabela 4.6 mostra os resultados obtidos com o programa desenvolvido utilizando o Matlab®, que foram decorrentes das execuções da estratégia de medição sobre a área selecionada.

O volume teórico selecionado do bloco-padrão (Tab. 4.4), de 6,621228 cm³, foi equivalente ao volume teórico calculado pelo programa desenvolvido (Tab. 4.6), a partir das coordenadas teóricas dos pontos da estratégia de medição definida no *software* Calypso®. Desta forma, o procedimento matemático utilizado pelo programa desenvolvido está correto, sendo, portanto, validado para estimar o volume de uma peça.

Conforme mostrado na Tabela 4.6, a incerteza associada ao volume obtido com o programa desenvolvido é ínfima, correspondendo a uma parcela de 0,0048% em relação ao valor total do volume. Isto é justificado, em primeiro lugar, pela excelente repetibilidade da MM3C utilizada e, em segundo lugar e não menos importante, pela eficiência do programa desenvolvido. Todavia, a incerteza de medição é significativa quando comparada com a resolução volumétrica da MM3C, que é de $8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^3$. Sabe-se que 1 cm³ corresponde a $10^{12} \mu\text{m}^3$, logo a incerteza de 0,000319 cm³ representa um valor $3,9875 \times 10^{10}$ maior que a resolução volumétrica. Isto é aceitável e justificável devido o valor da incerteza total ser fortemente influenciado pela variabilidade das leituras, o que pode ser comprovado pela Fig. 4.6.

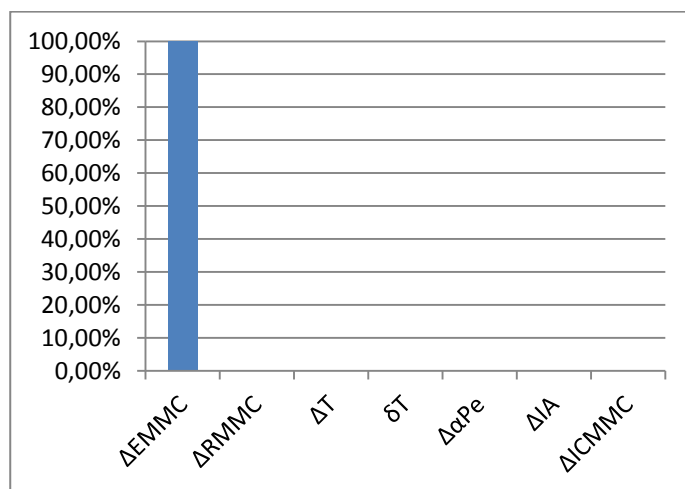


Figura 4.6 - Contribuição de cada fonte de incerteza para a incerteza total associada ao volume do bloco-padrão abaixo da área selecionada

4.3. Avaliação do volume em uma amostra de enrijecedor testada durante 1.280 horas no tribômetro

Como a amostra de enrijecedor para *riser* de diâmetro interno de 4 in (101,6 mm) não teve seu volume avaliado antes do desgaste, apenas foi feita a análise do volume nesta amostra na condição desgastada, após ensaio de 1.280 horas no tribômetro. Esta

avaliação, portanto, não permitiu a quantificação da perda volumétrica desta amostra. Todavia, possibilitou a seleção da melhor estratégia de medição, isto é, a combinação de distância entre linhas de medição e distância entre pontos ao longo da linha.

4.3.1. Avaliação do volume em uma amostra desgastada de enrijecedor, testada por 1.280 horas, utilizando o software *Dimension Volume*®

A Tabela 4.7 apresenta os resultados das medições das características dimensionais da amostra desgastada de enrijecedor, para a confecção do modelo CAD. Os valores obtidos correspondem à média de três medições dos respectivos mensurandos.

A Tabela 4.8 apresenta os resultados da medição de volume da amostra de enrijecedor, obtidos com a utilização do *software Dimension Volume*® através da execução das estratégias de medição definidas neste *software*. As incertezas associadas aos valores de volume estimados, em todos os casos, foram avaliadas para k igual a 4,30 e 2 graus de liberdade efetivos.

Tabela 4.7 – Parâmetros de avaliação da amostra de enrijecedor

Características de avaliação	Valores médios [mm]
Diâmetro do cilindro interno	175,8900
Diâmetro do círculo externo	237,5340
Altura da região central	77,0000
Raio de concordância	34,0000

A Tabela 4.8 mostra que todas as incertezas associadas aos resultados obtidos são pequenas quando comparadas aos volumes médios obtidos a partir de três execuções de cada estratégia. Todavia, quando comparadas à resolução volumétrica da MM3C, que é de $8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^3$, são significativas. Sendo que a máxima incerteza de medição obtida, de 0,0774 cm^3 , associada ao resultado da estratégia 0,8 mm x 0,5 mm, representa um valor $9,675 \times 10^{12}$ maior que a resolução volumétrica. Isto é aceitável e justificável devido os valores das incertezas totais serem fortemente influenciados pela variabilidade das leituras, o que pode ser comprovado pela Tab. 4.9 e Fig. 4.7, com o exemplo da estratégia cuja matriz de pontos foi de 0,8 mm x 0,5 mm.

Na Tabela 4.9 foram acrescentados Algarismos aos valores da incerteza padrão e da incerteza padrão combinada para diminuir os erros devido ao arredondamento.

Tabela 4.8 – Valores de volume da amostra desgastada de enrijecedor, obtidos com o *software* Dimension Volume[®], a partir da execução de várias estratégias de medição

Número de linhas	Distância entre linhas [mm]	Distância entre pontos ao longo da linha [mm]	Número total de pontos	Volume medido [cm³]	Volume médio [cm³]	Desvio padrão [cm³]	Máxima incerteza expandida com 95% de probabilidade de abrangência		Tempo de execução
							U [cm³]	U [%]	
24	6	1	4130	2113,9122	2113,9212	0,009603	0,0239	0,0011	3 h 6 min
				2113,9313					
				2113,9200					
		0,5	8270	2113,8738	2113,8613	0,012214	0,0303	0,0014	6 h 12 min
				2113,8494					
				2113,8606					
48	3	1	8283	2112,9189	2112,9129	0,007006	0,0174	0,0008	6 h 13 min
				2112,9146					
				2112,9052					
		0,5	16578	2112,9805	2112,9787	0,006782	0,0168	0,0008	12 h 40 min
				2112,9844					
				2112,9712					
96	1,5	1	16550	2113,1833	2113,1858	0,013381	0,0332	0,0016	12 h 36 min
				2113,1739					
				2113,2003					
		0,5	33126	2113,2203	2113,2202	0,008200	0,0204	0,0010	26 h
				2113,2284					
				2113,2120					
143	1	1	24833	2113,1125	2113,1249	0,013634	0,0339	0,0016	19 h 17 min
				2113,1395					
				2113,1227					
		0,5	49676	2113,1180	2113,1337	0,020044	0,0498	0,0024	43 h
				2113,1269					
				2113,1563					
179	0,8	1	31050	2113,2948	2113,3020	0,006476	0,0161	0,0008	24 h
				2113,3037					
				2113,3074					
		0,5	62102	2113,4537	2113,4310	0,031160	0,0774	0,0037	51 h
				2113,4439					
				2113,3955					
205	0,7	1	35492	2113,2197	2113,2159	0,004895	0,0122	0,0006	28 h
				2113,2177					
				2113,2104					
		0,5	70989	2113,2021	2113,1884	0,012810	0,0318	0,0015	60 h
				2113,1767					
				2113,1865					

A estimativa da incerteza associada à deformação elástica do material do enrijecedor devido à força de medição, Tab. 4.9, foi obtida através dos resultados da simulação utilizando elementos finitos. Pôde-se concluir que, sob as condições especificadas, a deformação elástica nas amostras de PU, oriunda da força de medição de 200 mN, foi de 27,8 µm, com um erro de penetração de malha de 1,6 µm.

Tabela 4.9 - Componentes de incerteza da estimativa do volume, com a estratégia 0,8 mm x 0,5 mm, da amostra desgastada de enrijecedor

Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	Incerteza padrão [cm ³]
ΔE_{MMC} [cm ³]	2113,4310	A	T-student	2	1	0,01799049
ΔR_{MMC} [cm ³]	8E-15	B	Retangular	∞	1	2,3094E-15
ΔT [°C]	0,46317	A	Normal	∞	7,55E-06 [mm.°C ⁻¹]	0,15275563
δT [°C]	0,9	B	Retangular	∞	7,55E-06 [mm.°C ⁻¹]	0,51961524
$\Delta \alpha_{Pe}$ [°C ⁻¹]	0,0000576	B	Retangular	∞	2,92E-05 [mm.°C]	0,00000033
ΔI_A [cm ³]	0,000025	B	Normal	∞	1	1,5625E-14
ΔD_{EI} [cm ³]	2,78E-09	B	Normal	∞	1	0,00000001
ΔI_{CMMC} [cm ³]	5,4124E-14	B	Normal	∞	1	5,41244E-14
Incerteza padrão combinada (u_c) [cm ³]						0,01799050
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						2,00
Fator de abrangência (k)						4,30
Incerteza expandida (U) [cm ³]						0,0774

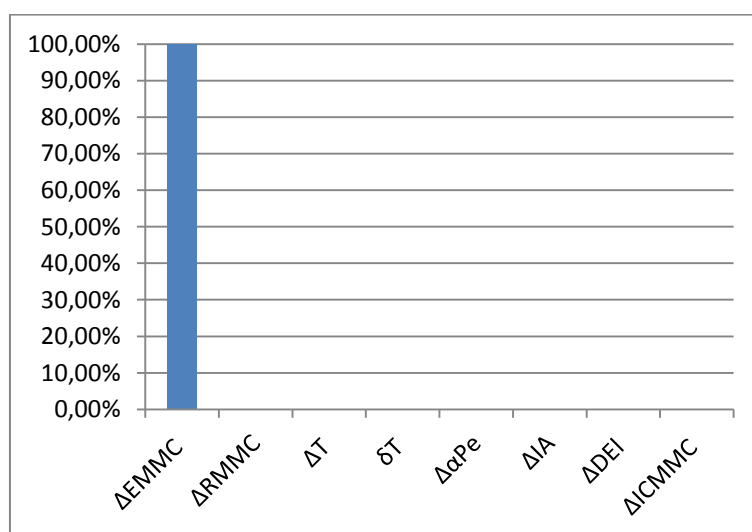


Figura 4.7 - Contribuição de cada fonte de incerteza para a incerteza total do volume da amostra desgastada, considerando a matriz de pontos 0,8 mm x 0,5 mm

Os valores de volume obtidos e as incertezas totais associadas, mostrados na Tab. 4.8, estão dispostos em forma de gráficos, conforme as Figs. 4.8 e 4.9. Ambas as figuras representam, de forma diferente, os resultados da medição de volume obtidos pelo *software* Dimension Volume[®], sendo que, na Fig. 4.8, estes são expressos em função do número de pontos, enquanto que, na Fig. 4.9, estes resultados estão apresentados em função do

espaçamento entre as linhas utilizadas para distribuir os pontos de medição na superfície da peça.

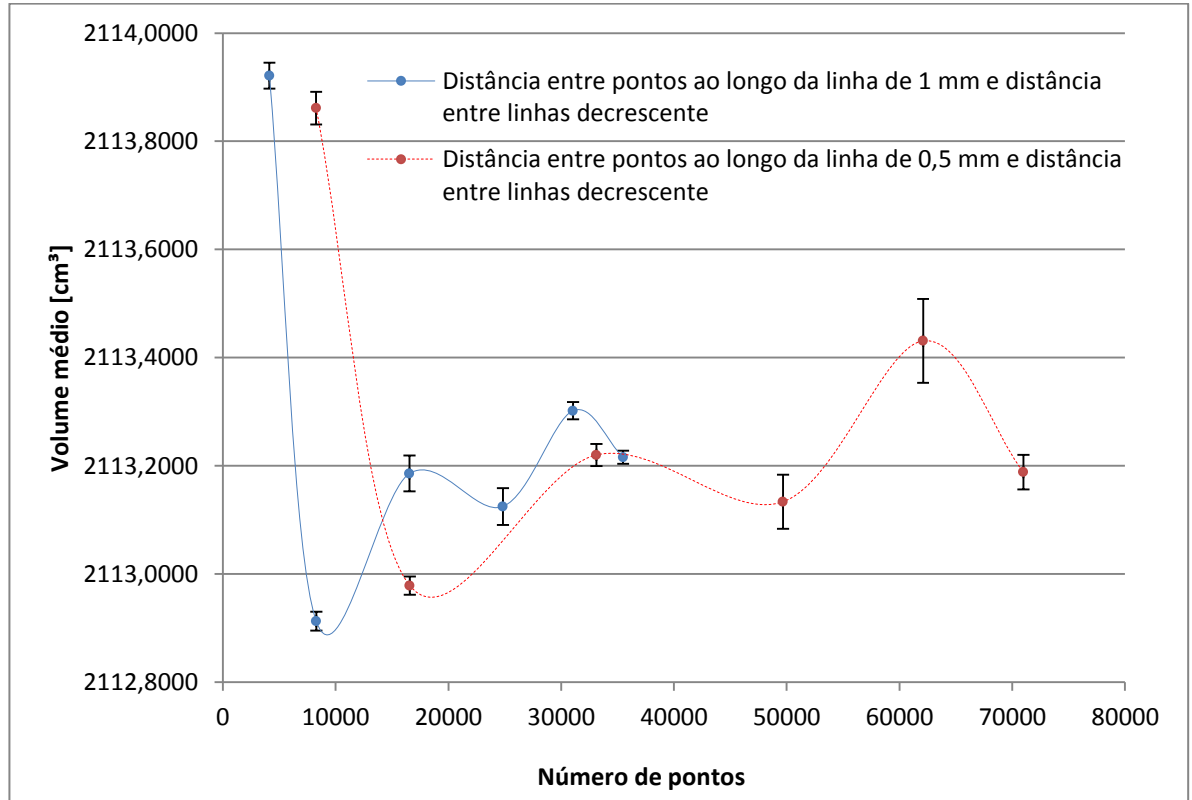


Figura 4.8 – Valores do volume da amostra desgastada de enrijecedor, obtidos com o *software* Dimension Volume®, em relação ao número de pontos, considerando as estratégias de medição da Tab. 4.8

As Figuras 4.8 e 4.9 mostram que, para as duas situações, o volume começou a apresentar menores oscilações a partir do terceiro ponto, o qual representa a malha de 96 linhas, com distância entre linhas de 1,5 mm. Estas oscilações podem ser devido a erros sistemáticos do ajuste dos pontos pelo *software*.

Analisando as Figuras 4.8 e 4.9 pôde-se constatar que os resultados fornecidos pelo *software* Dimension Volume® não são condizentes com a estatística. Pois, à medida em que se aumenta o número de pontos medidos, os valores do mensurando, considerando vários ciclos de medição, tendem à estabilização. Com isto, o valor do desvio padrão tende a diminuir e, conseqüentemente, a incerteza de medição associada. E isto não aconteceu, havendo, em contrapartida, oscilações dos valores estimados de volume.

A estratégia de medição ideal, que garantiria uma avaliação precisa do volume da amostra analisada, seria, então, aquela a partir da qual os valores de volume se

estabilizassem, utilizando a menor quantidade de pontos possível. Todavia, com base nos resultados das Figs. 4.8 e 4.9, isto não foi possível.

Na Figura 4.9, pôde-se observar que, para as estratégias que consideram uma distância entre linhas igual a 1 mm, houve praticamente uma equivalência entre os valores obtidos quando se utilizou tanto uma distância entre pontos ao longo da linha de 1 mm quanto uma distância de 0,5 mm. Isto fez com que a estratégia com a matriz de pontos 1 mm x 1 mm fosse considerada a mais adequada para estimar o volume desta peça com precisão e com a menor quantidade de pontos possível, 24.833 pontos.

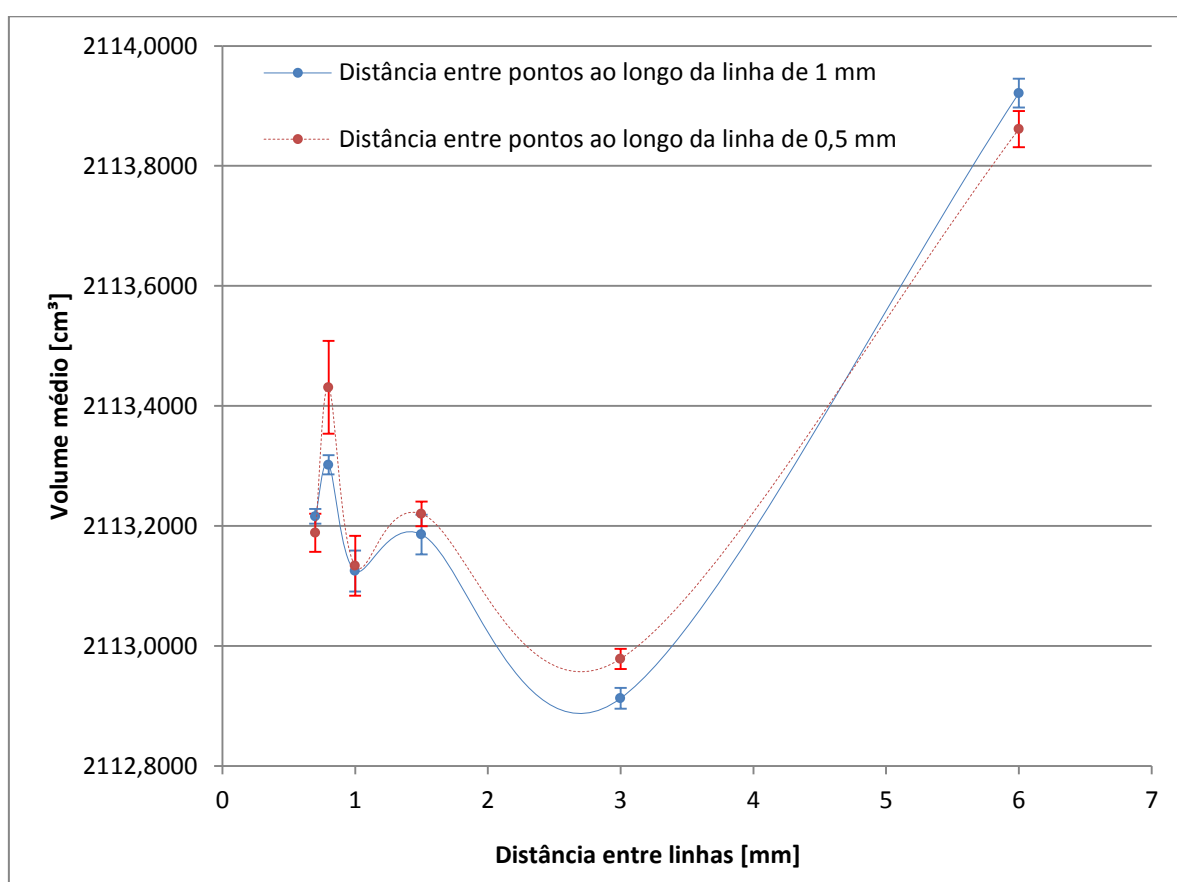


Figura 4.9 – Valores do volume da amostra desgastada de enrijecedor, obtidos com o *software* Dimension Volume®, em relação à distância entre as linhas, considerando as estratégias de medição da Tab. 4.8

Desta forma, a estratégia de medição a ser adotada na estimativa do volume antes e após o desgaste das amostras de enrijecedores para *risers* de 6 in (152,4 mm) de diâmetro interno será a malha de pontos 1 mm x 1 mm.

4.3.2. Avaliação do volume em uma amostra desgastada de enrijecedor, testada por 1.280 horas, utilizando o programa desenvolvido no software Matlab®

O programa desenvolvido, utilizando o software Matlab®, para calcular o volume a partir dos pontos medidos com a MM3C, objetivou suprir a incapacidade do software Dimension Volume® na análise do volume das amostras de enrijecedores para *riser* de 6 in (152,4 mm) de diâmetro interno, ver item 4.4. E, posteriormente, foi utilizado para obter valores de volume a partir das estratégias da Tab. 4.8 e confrontar estes resultados com aqueles obtidos a partir da utilização do software Dimension Volume®, Figs. 4.8 e 4.9.

Vale ressaltar as limitações até então observadas no software Dimension Volume®:

- A unidade de volume é em cm³ apenas, fornecendo somente quatro algarismos após a vírgula. Sendo que a MM3C tem resolução volumétrica para que o software fosse capaz de fornecer resultados com maior precisão;
- O ajuste dos pontos é efetuado através do método dos mínimos quadrados. Por isso, há uma grande probabilidade de o software não ter sensibilidade para perceber as irregularidades da peça devido ao desgaste. Isto porque, este método faz um ajuste dos pontos com base na geometria da superfície de referência do modelo CAD, fazendo com que informações importantes do desgaste sejam suprimidas por este ajuste.

Visto isso, o programa desenvolvido utilizando o Matlab® irá ser a ferramenta para o cálculo do volume, enquanto que o software Dimension Volume®, por ter apresentado um comportamento inadequado na estimativa do volume, será utilizado apenas como uma ferramenta para a definição da estratégia de medição sobre a superfície de interesse no modelo CAD da peça, para a execução desta estratégia e para o fornecimento das coordenadas dos pontos teóricos e medidos.

Deve-se atentar que, no software Dimension Volume®, dependendo do espaçamento entre os pontos ao longo da superfície avaliada, ora os pontos a serem medidos ficam mais próximos ou mais afastados dos limites da superfície. Ou seja, para qualquer estratégia de medição, não é possível distribuir pontos exatamente sobre os limites da superfície de medição.

Isto não é um problema quando se utiliza o método de ajuste dos pontos pelo software Dimension Volume®, já que ele aproxima os pontos medidos posicionando-os com relação ao modelo CAD da peça. Assim, os pontos limites do próprio modelo CAD são utilizados como referência durante o cálculo do volume.

Todavia, quando as coordenadas destes pontos medidos forem inseridas e manipuladas através do programa desenvolvido em Matlab®, os valores de volume obtidos

como resultados das execuções das estratégias não podem ser comparados, já que cada um é resultante da medição de áreas de limites diferentes.

Para solucionar este problema e possibilitar a comparação entre os volumes obtidos pelo programa desenvolvido, foi selecionada uma área (Fig. 4.10), cujos limites foram previamente medidos. Os pontos delimitantes desta área foram selecionados após a execução da estratégia mais refinada, aquela definida pela matriz de pontos, 0,7 mm x 0,5 mm, no intuito de possibilitar, com maior precisão, a inserção, caso necessário, de pontos limites por interpolação.

Assim, foram analisados para o cálculo do volume apenas os pontos medidos pertencentes a tal área e, caso os limites selecionados da área não fossem medidos em uma dada estratégia, eles foram inseridos por interpolação.

No intuito de evitar os erros provenientes do ajuste dos pontos medidos nas bordas da peça, a região da borda não foi, portanto, avaliada. Logo, a área de avaliação do volume foi aquela localizada na região central da amostra de enrijecedor, que é, também, onde se prevê o maior desgaste (Fig. 4.10).

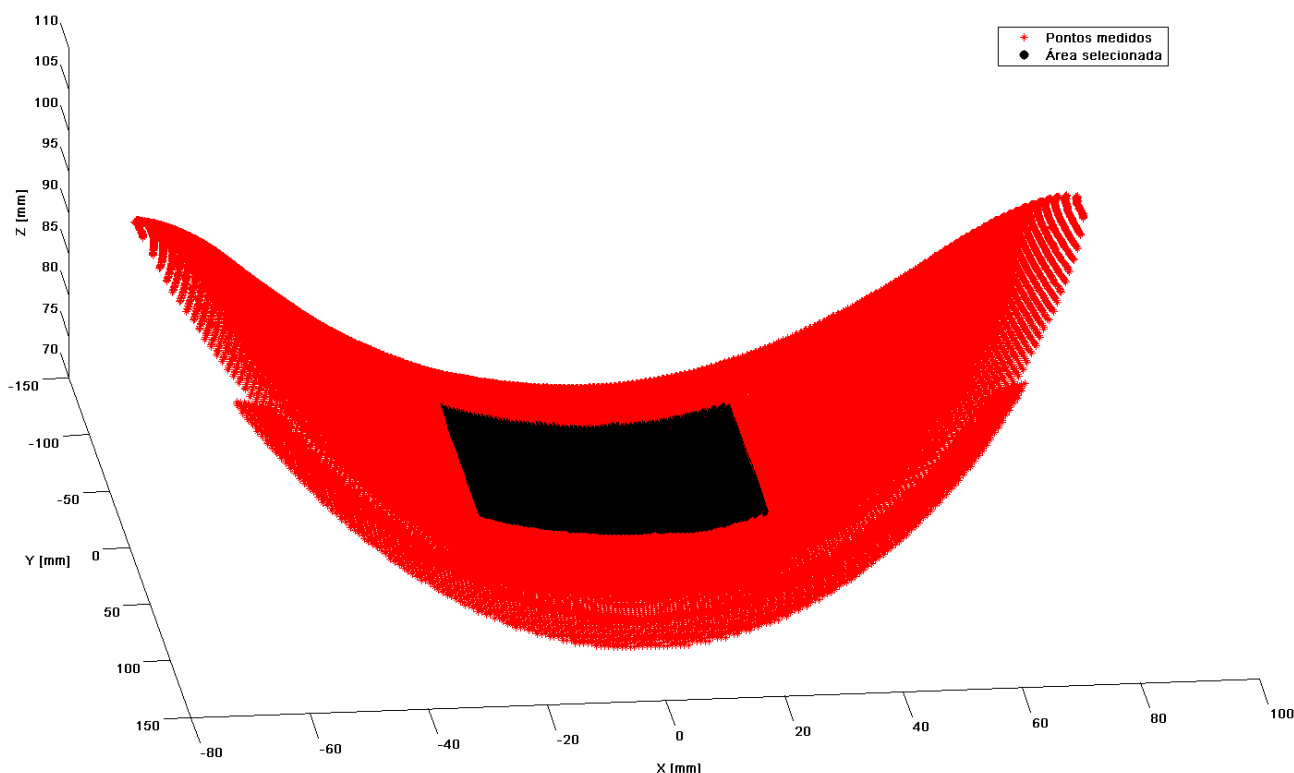


Figura 4.10 – Representação dos limites da área selecionada a partir da execução da estratégia com a matriz de pontos 0,7 mm x 0,5 mm

Assim, os arquivos com as coordenadas dos pontos teóricos e dos pontos medidos através da execução das várias estratégias de medição, expressas na Tab. 4.8, foram inseridos e manipulados no programa desenvolvido em Matlab®.

A Tabela 4.10 contém as informações pertinentes à análise do volume da amostra desgastada de enrijecedor, a partir da avaliação dos pontos medidos pertencentes à área selecionada. As incertezas associadas aos valores de volume estimados, em todos os casos, foram avaliadas para k igual a 4,30 e 2 graus de liberdade efetivos.

A Tabela 4.10 mostra que o máximo valor de incerteza associado à medição do volume, de $0,042014 \text{ cm}^3$, corresponde à estratégia dada pela malha de pontos $1,5 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$. Embora represente apenas $0,0123\%$ do volume médio obtido, quando comparada à resolução volumétrica da MM3C, que é de $8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^3$, é significativa, sendo $5,25175 \times 10^{12}$ maior que a resolução volumétrica. Isto é aceitável e justificável devido os valores das incertezas totais serem fortemente influenciados pela variabilidade das leituras.

Os resultados da Tabela 4.10, juntamente com as incertezas associadas, podem ser melhor visualizados pelos gráficos das Figs. 4.11 e 4.12.

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram que o volume calculado começa a estabilizar a partir do quarto ponto, o qual corresponde, na Fig. 4.11, à estratégia com 24.833 pontos totais medidos e 4.890 pontos medidos pertencentes à área selecionada, constituindo a matriz de pontos com espaçamento $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ em direção aos eixos X e Y, respectivamente. Já na Figura 4.12, este quarto ponto corresponde à estratégia com 49.676 pontos totais medidos e 9.261 pontos medidos pertencentes à área selecionada, constituindo a matriz com distribuição de pontos $1 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$.

Conforme a Figura 4.11, a estratégia com a matriz de pontos $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ (4.890 pontos) apresentou, como resultado de volume, $342,165100 \pm 0,014096 [\text{cm}^3]$, com 95% de probabilidade de abrangência, considerando $k= 4,3027$ e o número de graus de liberdade efetivos igual a 2. Este intervalo abrangeu, portanto, os valores que podem ser atribuídos ao mensurando (volume da peça) a partir da execução das estratégias que corresponderam às matrizes $0,8 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ e $0,7 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$.

Também, analisando a Figura 4.12, a estratégia cujos pontos foram distribuídos conforme a matriz $1 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$ (9.261 pontos) apresentou, como resultado de volume, $342,166720 \pm 0,012561 [\text{cm}^3]$, com 95% de probabilidade de abrangência, considerando $k= 4,3027$ e o número de graus de liberdade efetivos igual a 2. Este intervalo também abrangeu os valores que podem ser atribuídos ao mensurando a partir da execução das estratégias $0,8 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$ e $0,7 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$.

Tabela 4.10 – Resultados de volume da amostra desgastada de enrijecedor com base na área de interesse selecionada, obtidos com o programa desenvolvido em Matlab®

Número de linhas medidas	Número de linhas pertencentes à área	Distância entre linhas [mm]	Distância entre pontos ao longo da linha [mm]	Número de pontos medidos	Número de pontos pertencentes à área	Volume medido [cm³]	Volume médio [cm³]	Desvio padrão [cm³]	Máxima incerteza expandida com 95% de probabilidade de abrangência	
									U [cm³]	U [%]
24	9	6	1	4130	1069	342,392087	342,388630	0,008475	0,021052	0,0061
						342,378973				
						342,394829				
			0,5	8270	1735	342,379745	342,370553	0,009508	0,023620	0,0069
						342,371156				
						342,360757				
48	17	3	1	8283	1853	342,256621	342,250483	0,005675	0,014098	0,0041
						342,249402				
						342,245426				
			0,5	16578	3278	342,277025	342,270375	0,007437	0,018474	0,0054
						342,262345				
						342,271755				
96	32	1,5	1	16550	3322	342,189989	342,188223	0,002834	0,007041	0,0021
						342,189727				
						342,184954				
			0,5	33126	6171	342,194230	342,190771	0,016913	0,042014	0,0123
						342,205687				
						342,172396				
143	48	1	1	24833	4890	342,171332	342,165100	0,005674	0,014096	0,0041
						342,163735				
						342,160232				
			0,5	49676	9261	342,161230	342,166720	0,005056	0,012561	0,0037
						342,167744				
						342,171186				
179	59	0,8	1	31050	5968	342,163283	342,170263	0,006347	0,015768	0,0046
						342,171817				
						342,175689				
			0,5	62102	11382	342,170606	342,162921	0,006791	0,016871	0,0049
						342,157727				
						342,160429				
205	67	0,7	1	35492	6754	342,176236	342,173184	0,003120	0,007751	0,0023
						342,170000				
						342,173315				
			0,5	70989	12928	342,172401	342,163042	0,010152	0,025218	0,0074
						342,152250				
						342,164474				

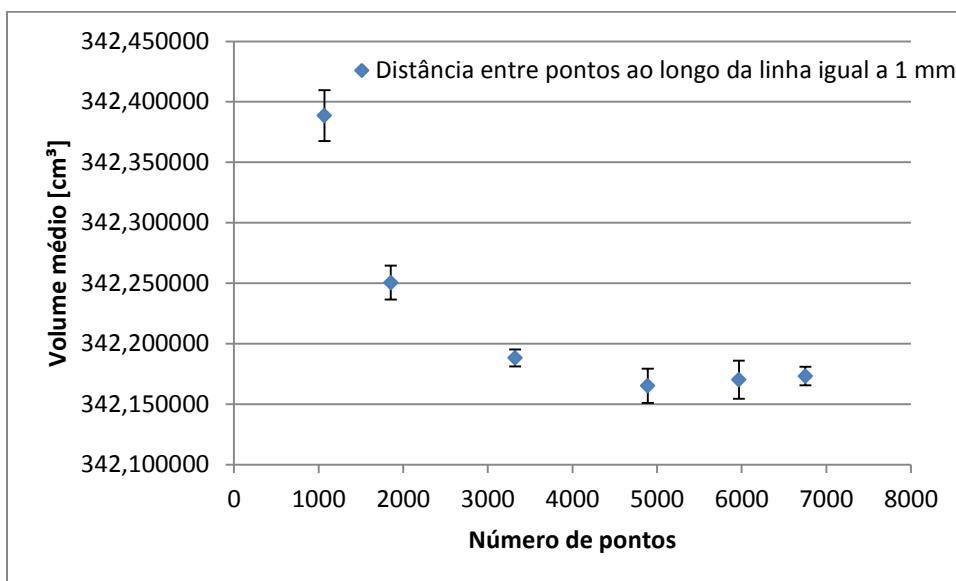


Figura 4.11 - Valores do volume da amostra desgastada de enrijecedor, obtidos com o programa desenvolvido em Matlab® com base na área de interesse selecionada, em função do número de pontos pertencentes à área, considerando as estratégias de medição da Tab. 4.10 que utilizam a distância entre pontos ao longo da linha igual a 1 mm.

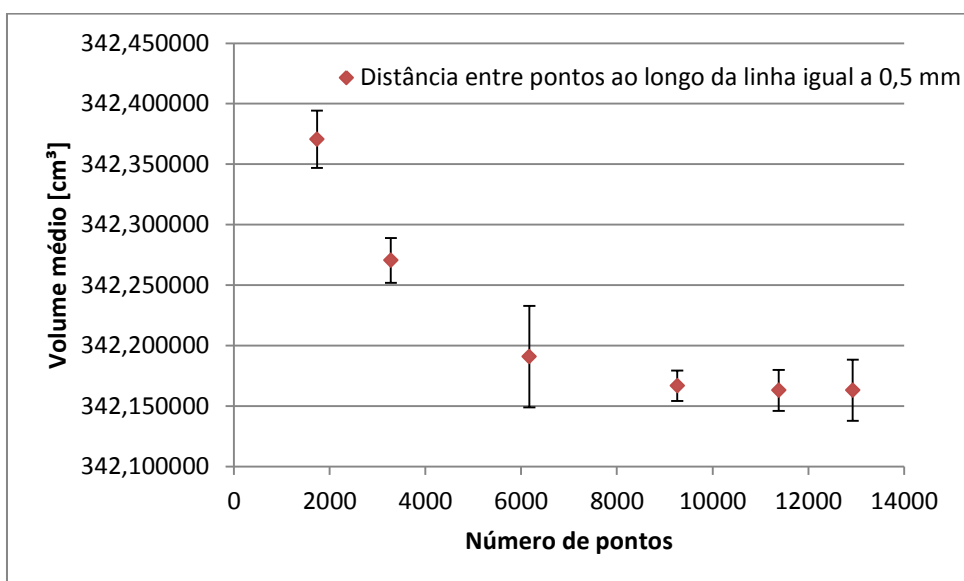


Figura 4.12 – Valores do volume da amostra desgastada de enrijecedor, obtidos com o programa desenvolvido em Matlab® com base na área de interesse selecionada, em função do número de pontos pertencentes à área, considerando as estratégias de medição da Tab. 4.10 que utilizam a distância entre pontos ao longo da linha igual a 0,5 mm

Assim, pode-se considerar a matriz de pontos 1 mm x 1 mm como sendo a melhor estratégia até então, já que pertenceu à região de estabilidade dos valores de volume e seu intervalo abrangeu praticamente todos os valores que podem ser atribuídos ao mensurando

considerando os intervalos obtidos a partir da execução das estratégias 0,8 mm x 1 mm e 0,7 mm x 1 mm, conforme a Fig. 4.11. Além disso, o tempo de execução desta estratégia (19 h 17 min) é muito menor quando comparado ao tempo de execução das estratégias mais refinadas, bem como é menor que o tempo demandado na execução da estratégia 1 mm x 0,5 mm (43 h), cujo valor de volume obtido pode ser considerado equivalente ao obtido com a estratégia 1 mm x 1 mm, Fig. 4.13.

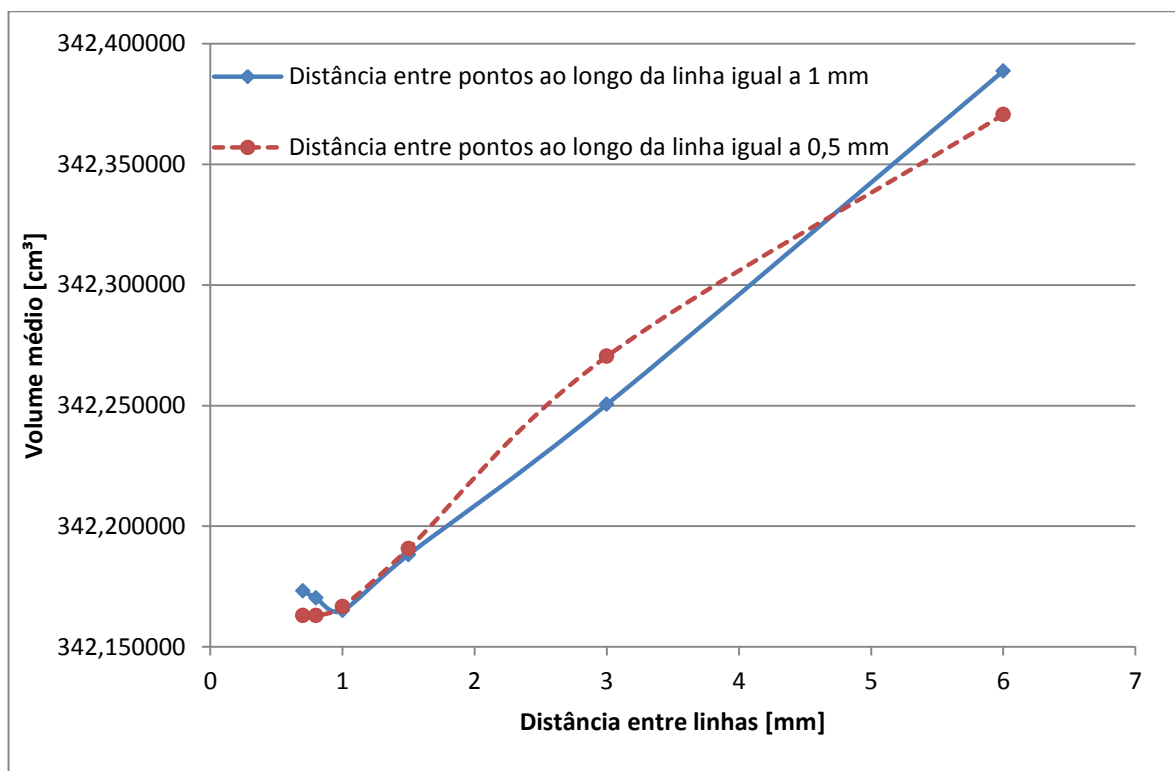


Figura 4.13 - Valores do volume da amostra desgastada de enrijecedor, obtidos com o programa desenvolvido em Matlab® com base na área de interesse selecionada, em função da distância entre as linhas de medição, considerando as estratégias de medição da Tab. 4.9.

4.4. Avaliação do volume de amostras novas de enrijecedor, para *riser* de 6 in (152,4 mm) de diâmetro interno

Considerando que os testes realizados na amostra desgastada de enrijecedor, para *riser* de 4 in (101,6 mm) de diâmetro interno, possibilitaram obter uma estratégia de medição precisa para estimar o volume da amostra, aplicou-se, então, esta estratégia na avaliação volumétrica de duas amostras novas de enrijecedor para *riser* de 6 in (152,4 mm). Assim, foi utilizada a malha de pontos 1 mm x 1 mm.

Estas duas amostras tiveram seus volumes avaliados antes dos respectivos ensaios de desgaste. Como o ensaio de desgaste destas amostras contra uma amostra de *riser* de 6 in (152,4 mm) de diâmetro interno ainda estava em execução durante a finalização deste trabalho de mestrado, não foi possível estimar o volume após a condição desgastada e, conseqüentemente, estimar o desgaste volumétrico das mesmas.

Embora conhecidas algumas limitações do *software* Dimension Volume® para a estimativa do volume, foi realizada uma tentativa de avaliação volumétrica das duas novas amostras com este *software*.

As amostras de enrijecedores foram, então, fixadas na mesa da MM3C (Fig. 4.14) e alinhadas utilizando o *software* Calypso® (Fig. 4.15).



Figura 4.14 – Fixação de uma amostra nova de enrijecedor para *riser* de 6 in (152,4 mm) de diâmetro interno

A análise dimensional das amostras de enrijecedores foi realizada para a confecção do modelo CAD, conforme Tab. 4.11. As características avaliadas são representadas na Fig. 4.16.

No *software* Dimension Volume®, foi definida e executada uma estratégia para teste com 1.483 pontos distribuídos nas superfícies de interesse de uma das amostras (esquerda). A execução foi bem sucedida e o *software* estimou rapidamente o volume. Isto mostrou que o modelo CAD tinha dimensões próximas à peça, propiciando o funcionamento correto do *software*.

Todavia, após a execução da estratégia 1 mm x 1 mm (40.445 pontos), cujos pontos foram distribuídos nas superfícies de interesse da mesma amostra (esquerda), o *software* não conseguiu estimar o volume.

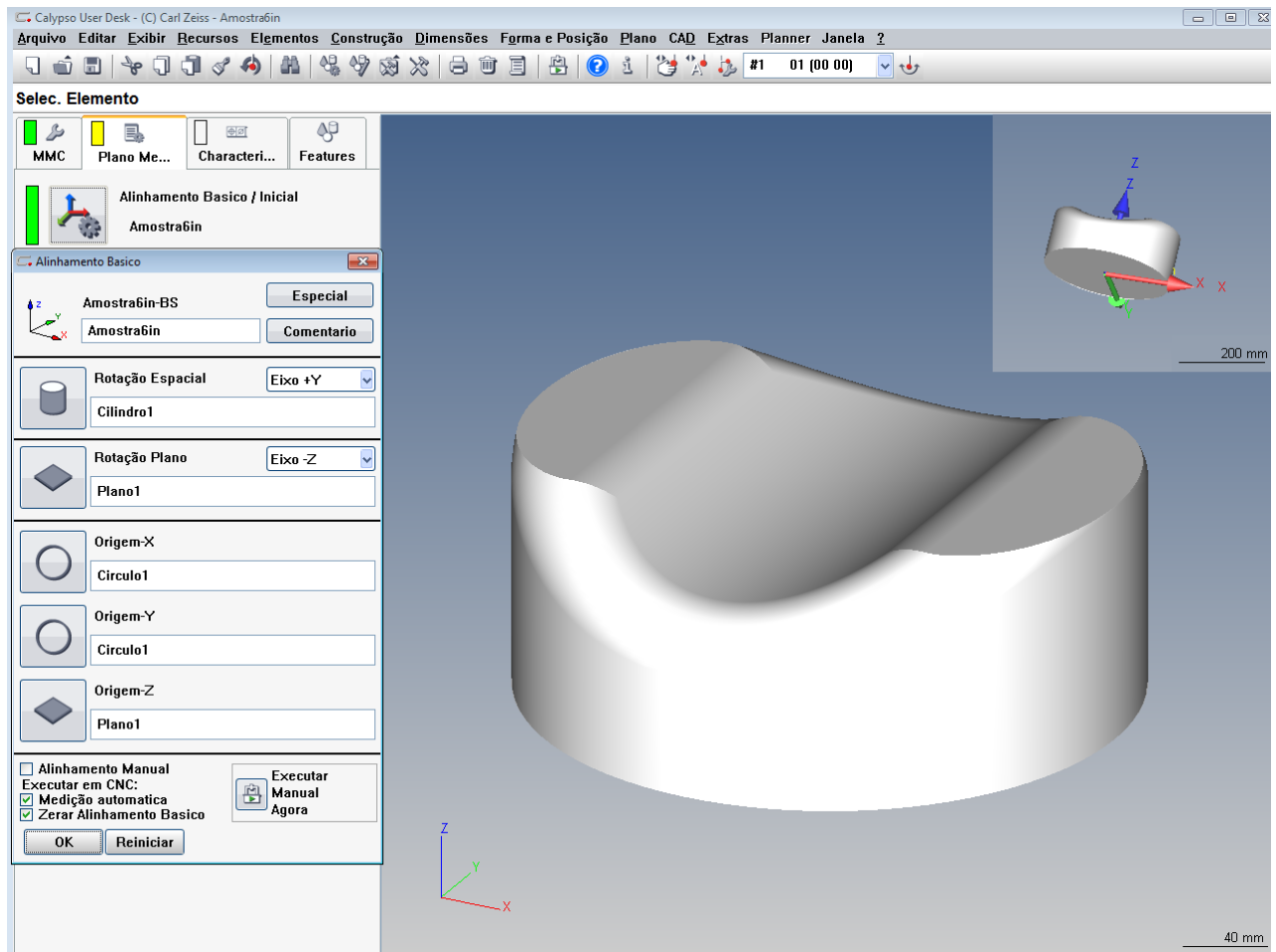


Figura 4.15 – Alinhamento básico para a definição do sistema de referência das amostras de enrijecedor analisadas

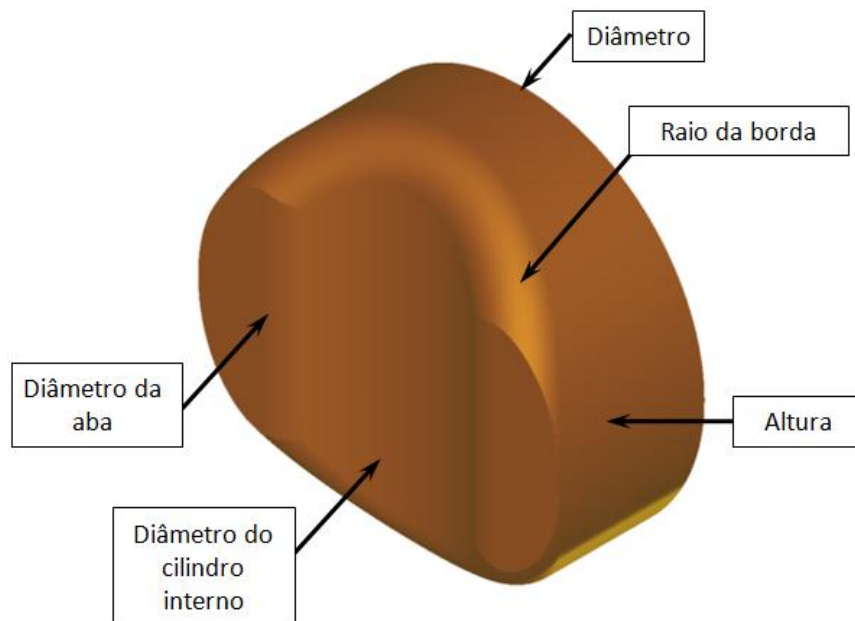


Figura 4.16 – Características avaliadas das amostras para a confecção do modelo CAD

Tabela 4.11 – Análise dimensional das amostras de enrijecedores

Características	Amostra esquerda				Amostra direita			
	Valores medidos [mm]				Valores medidos [mm]			
Diâmetro	299,2350				299,1565			
	299,2343				299,1253			
	299,2347				299,1252			
Média	299,2347				299,1357			
Diâmetro da aba	78,7105	Lado esquerdo	76,9953	Lado direito	78,9626	Lado esquerdo	76,4948	Lado direito
	78,7132		76,9908		78,9708		76,4931	
	78,7143		76,9906		78,9578		76,5046	
Média	78,7127		76,9922		78,9637		76,4975	
Altura	122,5172	Lado esquerdo	120,7718	Lado direito	122,8335	Lado esquerdo	119,4931	Lado direito
	122,5173		120,7716		122,8332		119,4931	
	122,5171		120,7717		122,8330		119,4932	
Média	122,5172		120,7717		122,8332		119,4931	
Diâmetro do cilindro interno	246,7456				246,6820			
	246,7451				246,6817			
	246,7448				246,6818			
Média	246,7452				246,6818			
Diâmetro da borda	60,3991				60,4951			
	60,3984				60,4968			
	60,3974				60,4971			
Média	60,3983				60,4963			
Altura central	92,5310				91,8855			
	92,5309				91,8856			
	92,5310				91,8855			
Média	92,5310				91,8855			

O *software* Dimension Volume® apresentou ainda outra limitação em sua utilização para o cálculo do volume em amostras de enrijecedores: capacidade de processamento limitada quando há a combinação entre um modelo matemático complexo (modelo CAD com grandes dimensões) e uma grande quantidade de pontos de medição.

Para a análise do volume nas amostras de enrijecedores para *risers* de 6 in (152,4 mm) de diâmetro interno, foi, então, empregado o método de cálculo do volume do programa desenvolvido utilizando Matlab®.

No intuito de evitar os erros provenientes do ajuste dos pontos medidos nas bordas da peça, a região da borda não foi, portanto, avaliada. Logo, a área de avaliação do volume foi aquela localizada na região central da amostra de enrijecedor, que é, também, onde se prevê o maior desgaste, Fig. 4.17.

A Figura 4.17 evidencia esta área, que tem os seus pontos limites medidos em uma das três execuções da estratégia 1 mm x 1 mm. Estes pontos limites foram tomados como referência para a avaliação dos volumes abaixo desta área para as três execuções da estratégia 1 mm x 1 mm. A seleção desta área, com base nos pontos medidos, foi realizada para cada uma das duas amostras novas de enrijecedores.

Portanto, os arquivos com as coordenadas dos pontos teóricos e medidos através da execução das estratégias de medição, expressas na Tab. 4.12 e 4.13, foram inseridos e manipulados no programa desenvolvido em Matlab®.

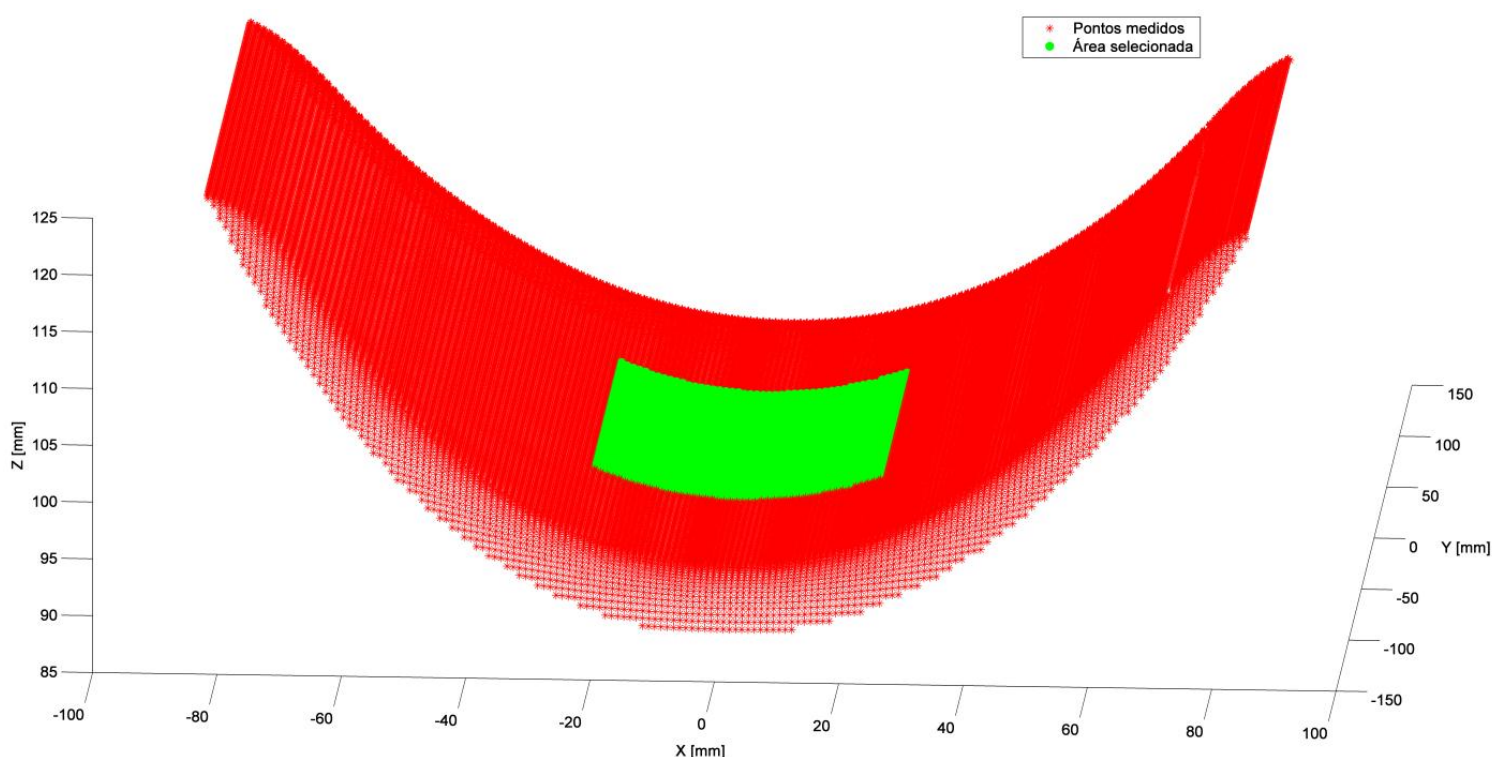


Figura 4.17 - Representação dos limites da área selecionada na amostra esquerda de enrijecedor a partir da execução da estratégia com a matriz de pontos 1 mm x 1 mm

As Tabelas 4.12 e 4.13 contêm as informações pertinentes à análise do volume, antes do desgaste, das amostras de enrijecedor, esquerda e direita, respectivamente, a partir da avaliação dos pontos medidos pertencentes à área selecionada. As incertezas associadas aos valores de volume estimados, em todos os casos, foram avaliadas para k igual a 4,3027 e 2 graus de liberdade efetivos.

Analisando as Tabelas 4.12 e 4.13, percebe-se que as incertezas obtidas, em relação ao volume médio, são insignificantes. Todavia, em relação à resolução volumétrica da MM3C, são significantes, porém justificáveis devido à variabilidade das leituras ter sido o fator mais influente na incerteza total.

Também, pôde ser observado que os valores volumétricos das primeiras medições foram os que provocaram uma discrepância significativa entre os outros dois valores, refletindo, assim, num aumento do desvio padrão.

Tabela 4.12 – Valores de volume da amostra nova de enrijecedor (amostra esquerda), obtidos com o programa desenvolvido em Matlab® com base na área de interesse selecionada

Número de linhas medidas	Número de linhas pertencentes à área	Número total de pontos medidos	Número de pontos pertencentes à área	Volume medido [cm³]	Volume médio [cm³]	Desvio padrão [cm³]	Máxima incerteza expandida com 95% de probabilidade de abrangência		Tempo de execução
							U [cm³]	U [%]	
168	48	40445	5083	441,874182	441,977463	0,089497	0,222322	0,0503	27 h 20 min
				442,032179					
				442,026028					

Tabela 4.13 - Valores de volume da amostra nova de enrijecedor (amostra direita), obtidos com o programa desenvolvido em Matlab® com base na área de interesse selecionada

Número de linhas medidas	Número de linhas pertencentes à área	Número total de pontos medidos	Número de pontos pertencentes à área	Volume medido [cm³]	Volume médio [cm³]	Desvio padrão [cm³]	Máxima incerteza expandida com 95% de probabilidade de abrangência		Tempo de execução
							U [cm³]	U [%]	
167	48	39641	5082	438,939260	438,975047	0,031191	0,077482	0,0177	26 h 50 min
				438,989430					
				438,996451					

4.5. Resultados de vibrações no tribômetro durante o ensaio de desgaste por deslizamento de amostras do par tribológico *riser*/enrijecedor

A análise das vibrações na estrutura do tribômetro foi feita considerando o ensaio de amostras de enrijecedores contra uma amostra de *riser* de 6 in (152,4 mm) de diâmetro interno. Os parâmetros de ensaio foram os seguintes: 56 kN de força de compressão, 4 mm/s de velocidade de deslizamento e 30 mm de curso de deslizamento.

A Figura 4.18 mostra as amplitudes médias de vibrações [mm/s] em função da frequência [Hz], obtidas após 3 horas de ensaio, utilizando o programa supervisorio desenvolvido em Labview®. A frequência de aquisição foi de 2.048 Hz e o número de pontos coletados por amostragem foi de 2.048. Como o período de salvamento dos dados foi a cada 3 horas de ensaio, aproximadamente 5.400 espectros foram utilizados para a determinação da média das amplitudes.

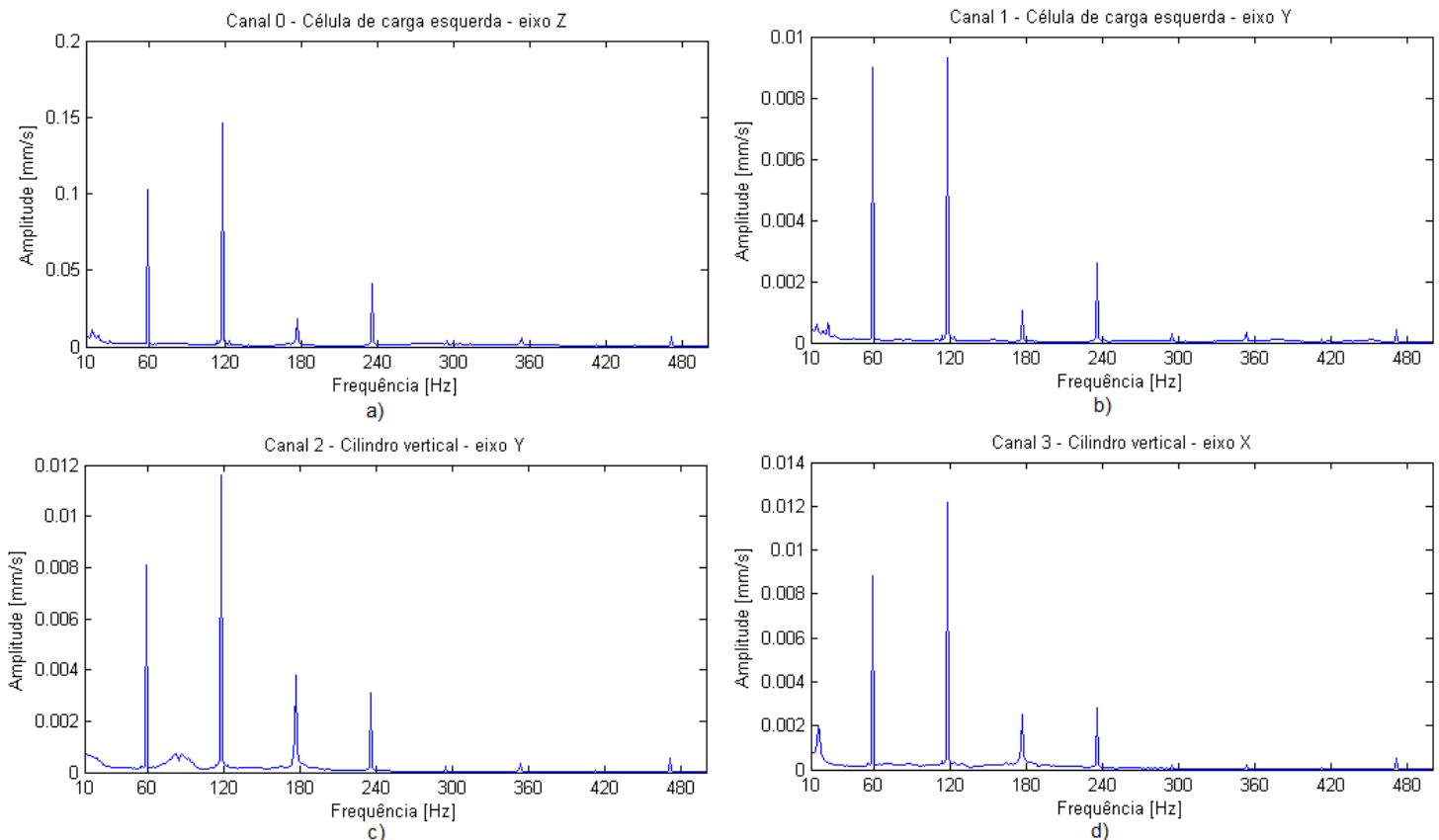


Figura 4.18 – Espectros médios de velocidade, obtidos após 3 horas de ensaio, através dos acelerômetros localizados a) e b) nos eixos Z e Y sobre a célula de carga esquerda, respectivamente e c) e d) nos eixos Y e X sobre o cilindro vertical, respectivamente

A Figura 4.18 evidencia, na faixa de frequências analisada de 10 a 500 Hz, a presença de ruídos da rede elétrica, os quais foram constatados pelos picos das amplitudes em 60 Hz e nas frequências múltiplas de 60 Hz.

Visto isso, a presença dos ruídos provenientes da rede elétrica “mascarou” as amplitudes de outras frequências excitadas na estrutura do tribômetro devido ao processo de desgaste, dificultando, portanto, a possível identificação do evento *stick-slip* no espectro de frequência.

Devido à necessidade de evidenciar as amplitudes máximas dos espectros para a identificação das frequências dominantes do sinal, com a minimização do vazamento, a manipulação dos dados das avaliações seguintes das vibrações foi feita com um programa desenvolvido em Matlab® a partir da adaptação do método utilizado por Ribeiro (1999). Neste programa, os picos resultantes do ruído elétrico foram anulados, de forma que não fossem representados nos espectros.

O efeito do ruído residual dos sinais de vibrações obtidos durante os ensaios de desgaste foi avaliado em uma nova análise. Este ruído foi caracterizado pelo espectro de

frequência das vibrações durante apenas à oscilação do cilindro vertical. Para isso, foi realizada uma aquisição dos sinais durante este momento. Como o programa supervisor desenvolvido fazia a aquisição das vibrações de forma automática, foi, então, desenvolvido um outro programa no *software* Labview®, para permitir a seleção manual do momento em que fosse desejado realizar a aquisição e o salvamento dos sinais de vibrações.

Para adquirir os sinais de vibrações com melhor resolução em frequência, aumentou-se a quantidade de pontos para 16.384, mantendo a taxa de aquisição de 2.048 Hz. Logo, o período de tempo de aquisição correspondeu a 8 segundos, o que representou uma aquisição durante meio ciclo de deslizamento, haja vista que este perdura por 16 segundos.

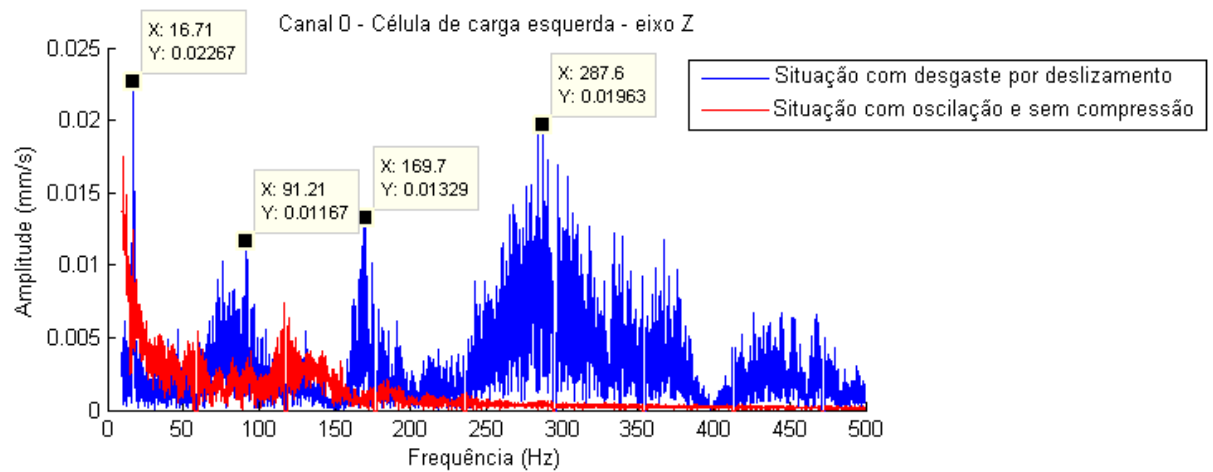
Os dados de vibração durante o deslizamento, Fig. 4.19, foram coletados após a seleção manual da aquisição no momento em que os cilindros horizontais iniciaram a compressão nas amostras de enrijecedores, com o objetivo de verificar frequências relativas ao processo de deslizamento.

A Figura 4.19 mostra os espectros de frequência dos sinais de vibrações coletados durante o desgaste, juntamente com o espectro obtido quando os cilindros horizontais estavam afastados e o cilindro vertical estava oscilando, que foi denominado de ruído residual.

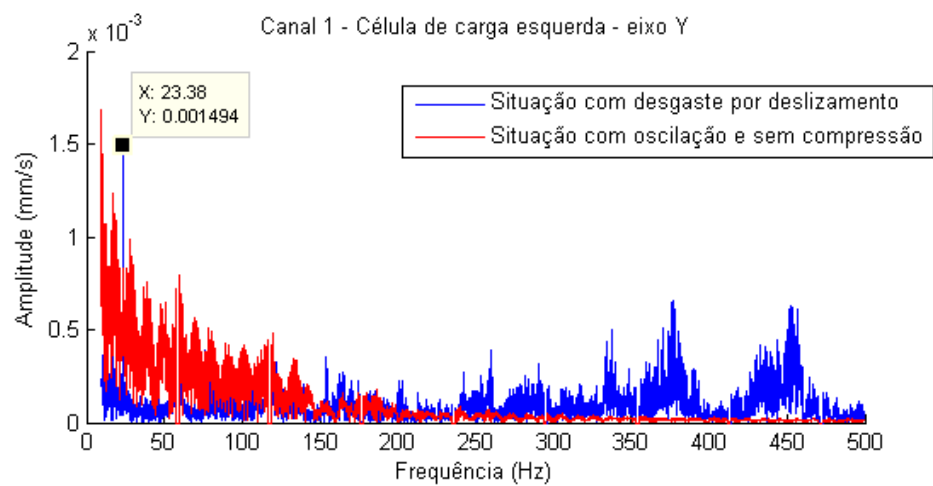
As amplitudes observadas através do espectro do sinal obtido do acelerômetro localizado sobre a célula de carga esquerda, na direção do eixo Z, Fig. 4.19 a), foram maiores quando comparadas com as obtidas através dos espectros dos sinais obtidos a partir dos outros 3 acelerômetros, Fig. 4.19 b), c) e d).

Conforme a Figura 4.19 a) e d), o pico da amplitude de vibração esteve localizado em 16,71 Hz. Este valor de amplitude foi influenciado pela vibração da estrutura devido à oscilação do cilindro vertical (gráfico vermelho). Todavia, esta frequência não teve amplitude dominante quando apenas o cilindro vertical estava movimentando. Pode-se dizer, então, que 16,71 Hz pode ser uma frequência relativa ao processo de deslizamento.

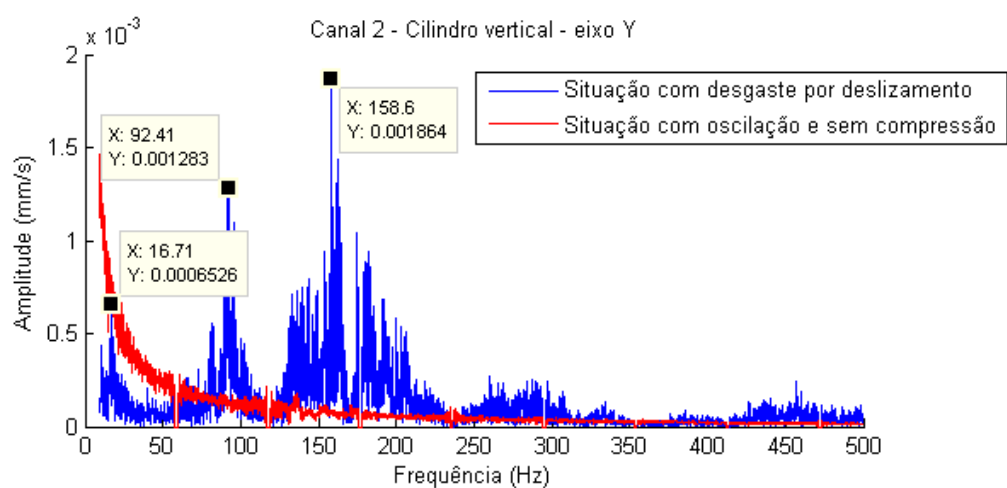
O espectro do sinal de vibração captado pelo acelerômetro posicionado na direção do eixo Y da célula de carga (Fig. 4.19 b) não possibilitou observar as amplitudes dominantes dos sinais e o ruído residual influenciou bastante nas amplitudes das vibrações abaixo de 200 Hz. No espectro do sinal de vibração captado pelo acelerômetro posicionado na direção do eixo Y do cilindro vertical (Fig. 4.19 c), a relação sinal/ruído foi baixa na banda de frequência de 10 a 50 Hz. Portanto, optou-se, em uma nova análise das vibrações, fixar o acelerômetro do cilindro vertical na direção do eixo Z.



a)

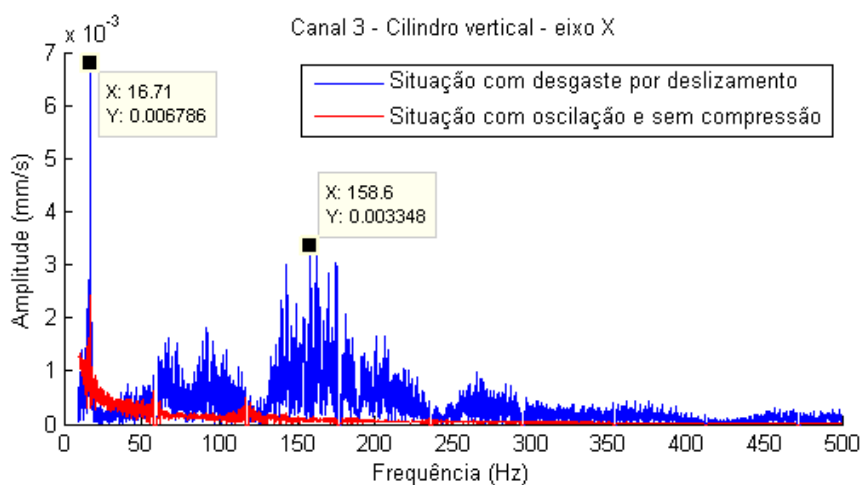


b)



c)

Figura 4.19 – Espectros de velocidade obtidos através dos acelerômetros posicionados a) e b) nos eixos Z e Y, respectivamente, sobre a célula de carga esquerda e c) e d) nos eixos Y e X sobre o cilindro vertical



d)

Figura 4.19 – Espectros de velocidade obtidos através dos acelerômetros posicionados a) e b) nos eixos Z e Y, respectivamente, sobre a célula de carga esquerda e c) e d) nos eixos Y e X sobre o cilindro vertical

Em uma nova análise das vibrações, para melhorar a resolução em frequência, foi aumentada a quantidade de pontos de 16.384 para 32.768, mantendo a taxa de aquisição de 2.048 Hz. Assim, o período de tempo de aquisição correspondeu a 16 segundos, o que representa uma aquisição durante um ciclo de deslizamento.

A Figura 4.20 a), correspondente ao espectro de frequência obtido através do acelerômetro localizado no eixo Z da célula de carga esquerda, mostra que a maior amplitude foi a referente à frequência de 281,2 Hz, seguida pela amplitude da frequência de 16,72 Hz. A influência das amplitudes vibratórias nas frequências excitadas na estrutura do tribômetro devido à movimentação do cilindro vertical foi pequena, indicando que o efeito das amplitudes vibratórias relacionadas ao processo de desgaste foi superior ao ruído residual.

O espectro de vibração obtido através do acelerômetro localizado no eixo Z do cilindro vertical, Fig. 4.20 b), indicou forte influência do ruído residual no sinal de vibração adquirido. Desta forma, este acelerômetro, localizado na mesma direção do deslizamento, não foi adequado para a medição das vibrações devido ao desgaste, haja vista que o efeito da oscilação do cilindro vertical, na situação sem compressão, propiciou amplitudes vibratórias significativas e que “mascaram” as vibrações, na faixa de 10 a 100 Hz, quando se considera o atrito entre as amostras testadas.

O espectro de frequência do sinal coletado a partir do acelerômetro localizado no eixo X, Fig. 4.20 c), mostra que o pico da amplitude vibratória esteve localizado na frequência de 16,07 Hz. A relação sinal/ruído neste espectro foi alta.

A Figura 4.21 mostra que as amplitudes máximas de vibração ao longo dos 35 minutos iniciais de ensaio não evoluíram de maneira crescente e nem decrescente. Em contrapartida, as amplitudes aparentemente oscilaram em torno de um valor médio.

Com o objetivo de verificar a frequência natural da estrutura do tribômetro, a partir da resposta em frequência do sistema, a estrutura foi excitada por impulsos aplicados por um martelo de borracha sobre o mancal próximo à célula de carga esquerda, obtendo-se os espectros da Fig. 4.22, e sobre o cilindro vertical, obtendo-se os espectros da Fig. 4.23.

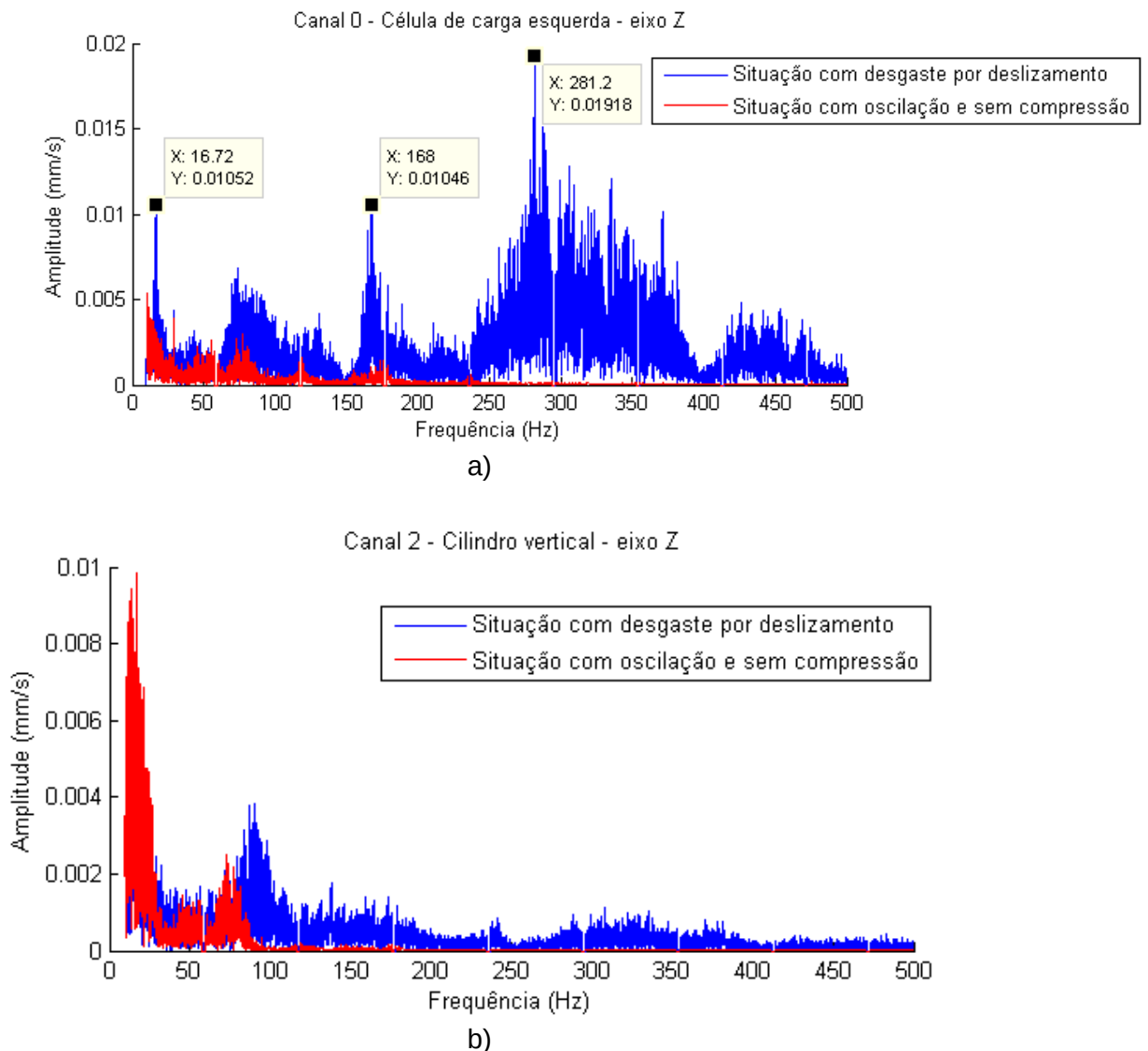
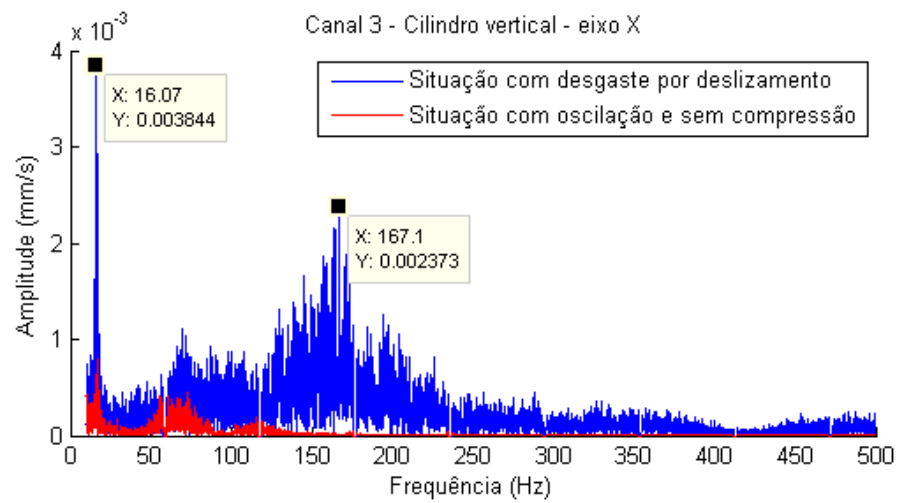


Figura 4.20 – Espectros de velocidade obtidos através dos acelerômetros localizados a) no eixo Z sobre a célula de carga esquerda, b) e c) nos eixos Z e X sobre o cilindro vertical, respectivamente



c)

Figura 4.20 – Espectros de velocidade obtidos através dos acelerômetros localizados a) no eixo Z sobre a célula de carga esquerda, b) e c) nos eixos Z e X sobre o cilindro vertical, respectivamente

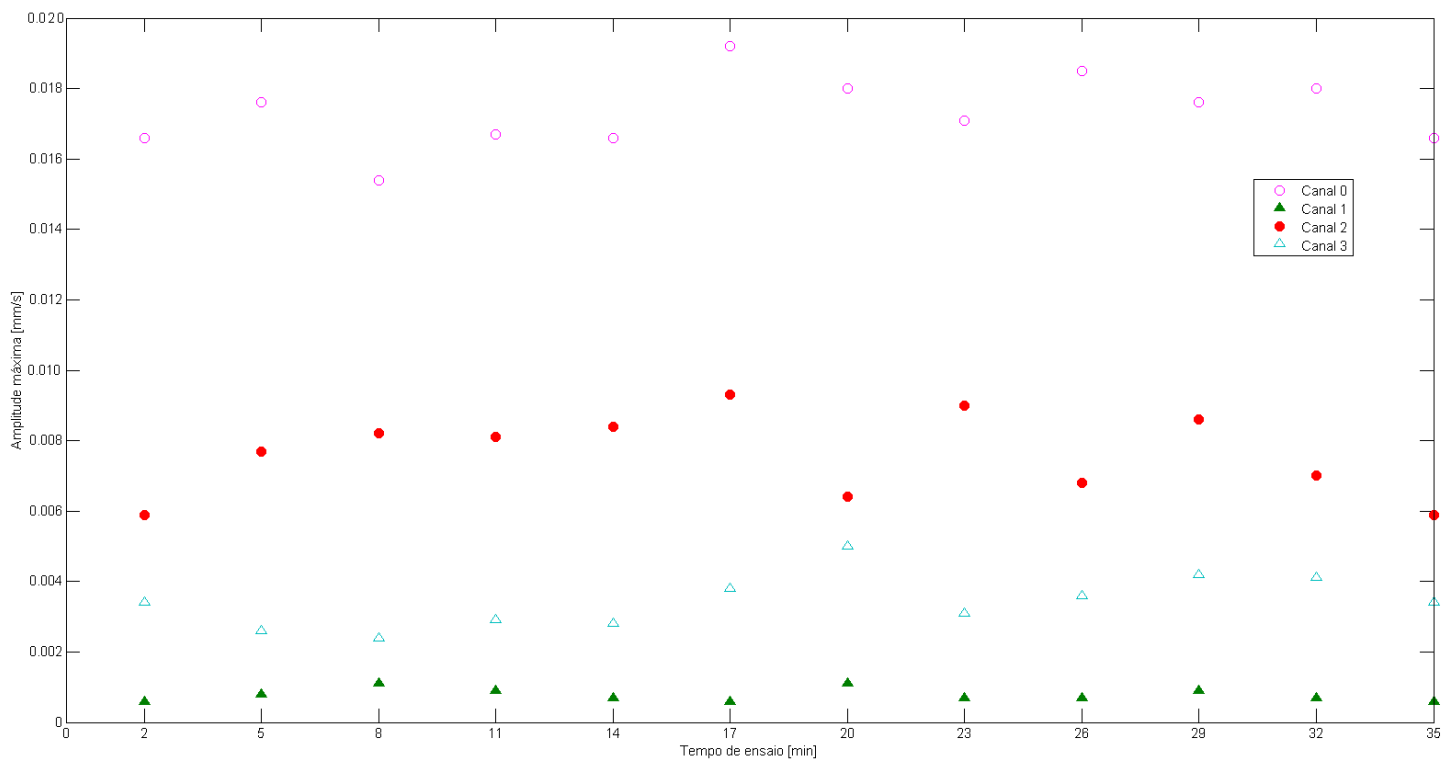


Figura 4.21 – Evolução das amplitudes máximas ao longo do tempo de ensaio analisado

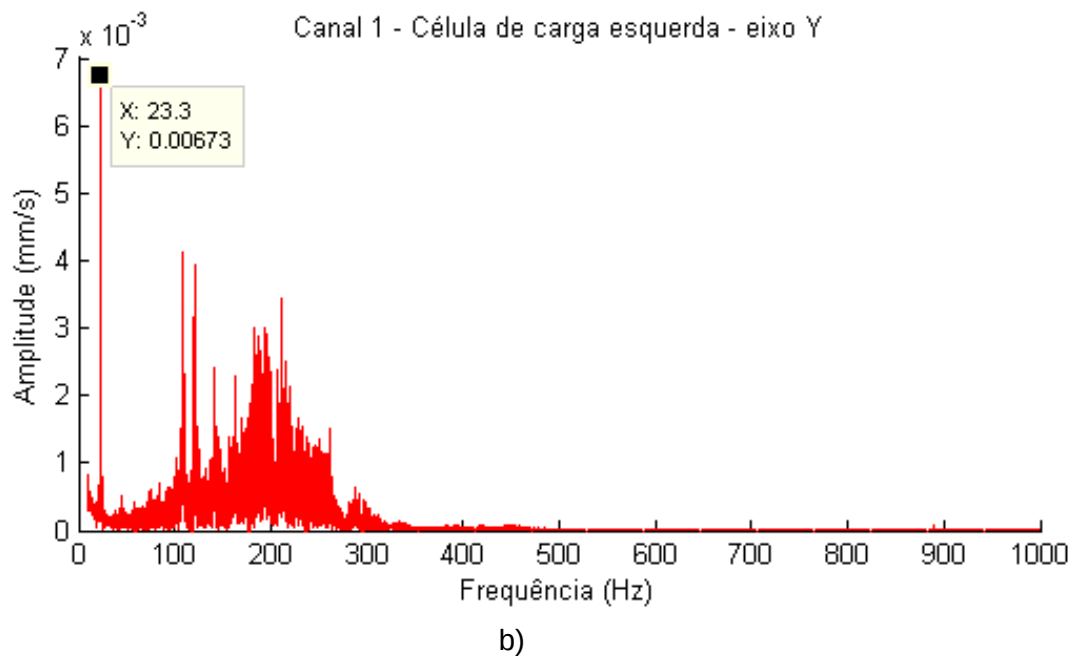
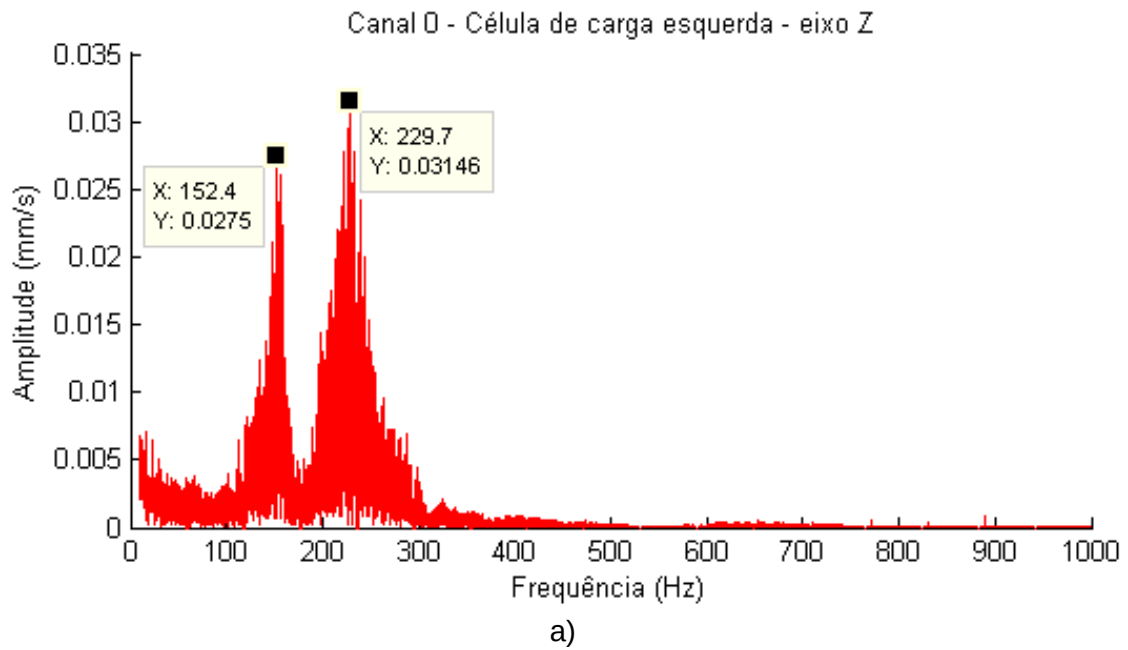
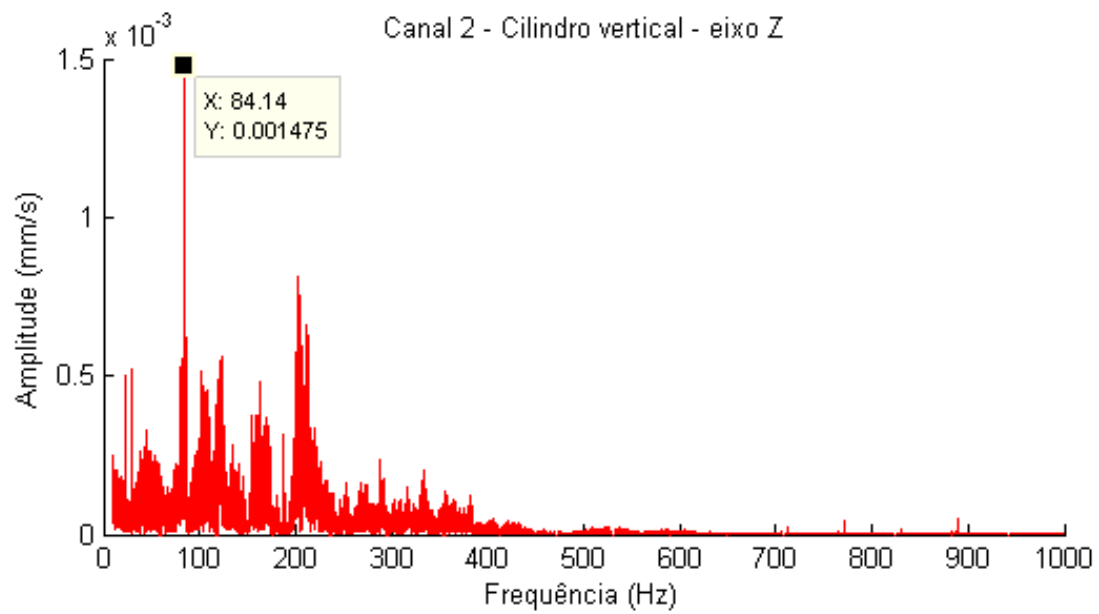
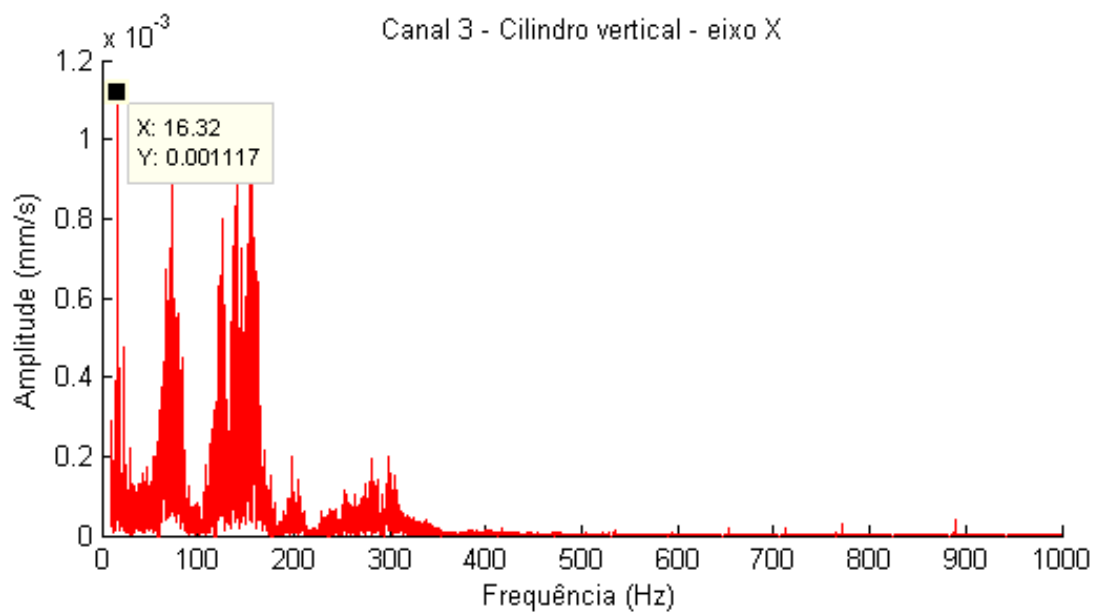


Figura 4.22 – Espectros de frequência obtidos a partir de impactos sobre o mancal próximo à célula de carga esquerda, com acelerômetros localizados a) e b) nos eixos Z e Y sobre a célula de carga esquerda, respectivamente, c) e d) nos eixos Z e X sobre o cilindro vertical, respectivamente

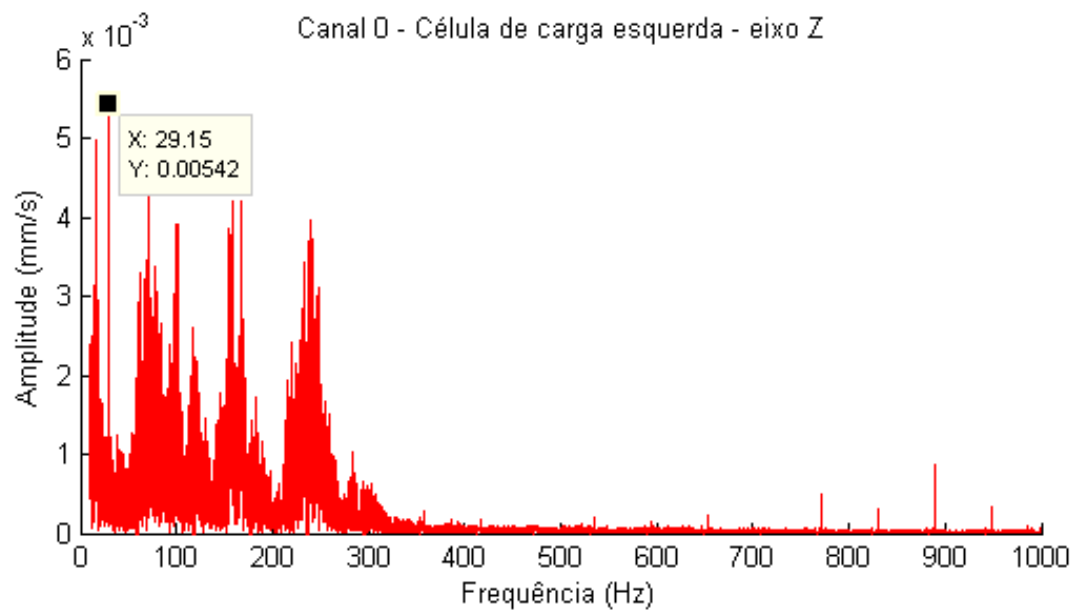


c)

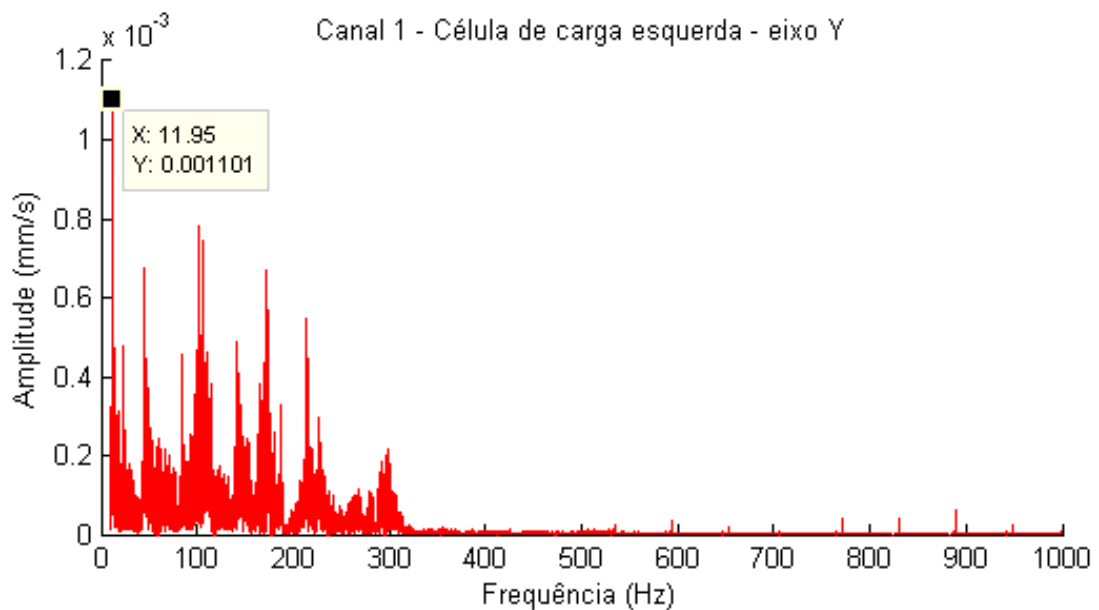


d)

Figura 4.22– Espectros de frequência obtidos a partir de impactos sobre o mancal próximo à célula de carga esquerda, com acelerômetros localizados a) e b) nos eixos Z e Y sobre a célula de carga esquerda, respectivamente, c) e d) nos eixos Z e X sobre o cilindro vertical, respectivamente

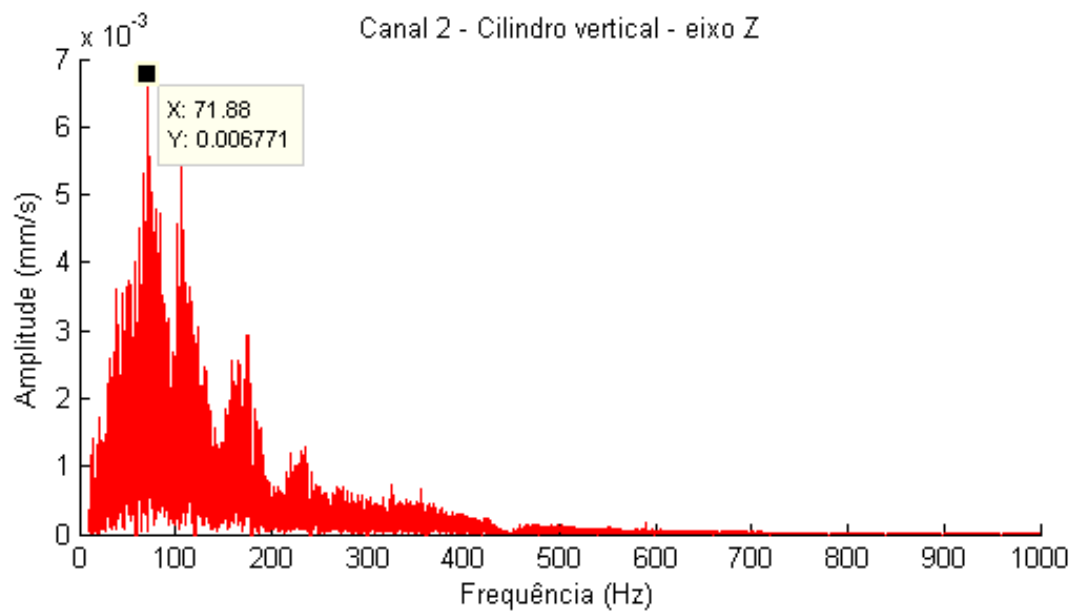


a)

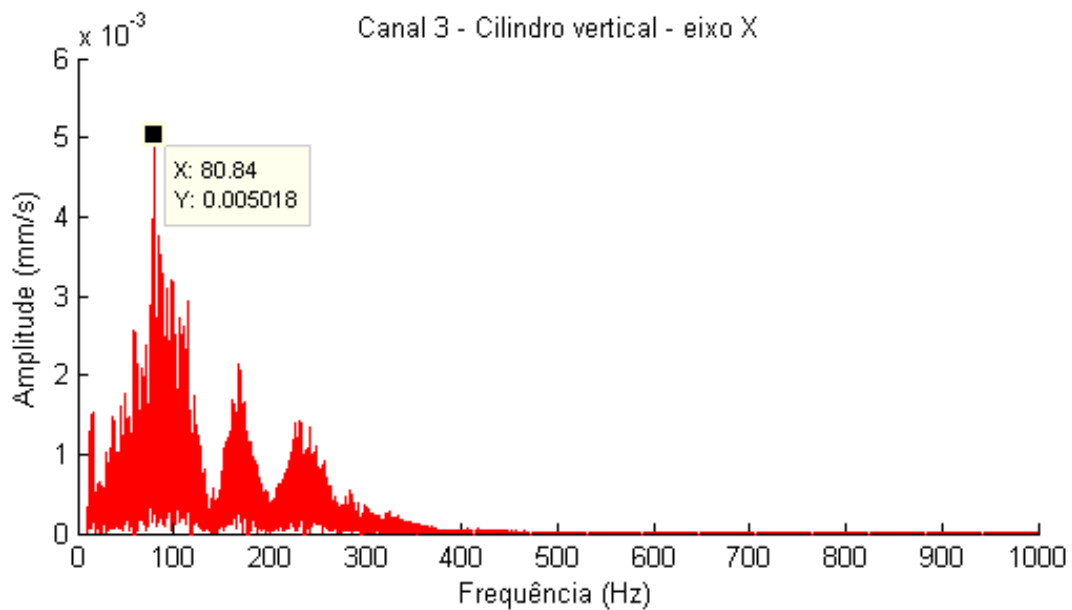


b)

Figura 4.23 – Espectro de frequência obtido a partir de impactos no cilindro vertical, com acelerômetros localizados a) e b) nos eixos Z e Y sobre a célula de carga esquerda, respectivamente, c) e d) nos eixos Z e X sobre o cilindro vertical, respectivamente



c)



d)

Figura 4.23 – Espectro de frequência obtido a partir de impactos no cilindro vertical, com acelerômetros localizados a) e b) nos eixos Z e Y sobre a célula de carga esquerda, respectivamente, c) e d) nos eixos Z e X sobre o cilindro vertical, respectivamente

Conforme as Figuras 4.22 e 4.23, notou-se que a frequência de 16,71 Hz observada nos espectros de vibração devido ao desgaste não foi excitada na estrutura durante os impactos com o martelo. Isto denota que esta frequência não tem possibilidade de ser a frequência natural da estrutura e que, portanto, pode ser correlacionada ao processo de desgaste.

Pelas condições em que o coeficiente de atrito é adquirido, com taxa de aquisição de 25 Hz, não foi possível observar o efeito do *stick-slip* quando se utiliza o gráfico do coeficiente de atrito. Isto porque este fenômeno tende a ocorrer em 16,71 Hz, e, para que fosse observado no gráfico do coeficiente de atrito, de acordo com o teorema de Nyquist, a taxa de aquisição do coeficiente de atrito teria de ser no mínimo o dobro da frequência do *stick-slip*, isto é, 33,42 Hz.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

No presente trabalho, foram desenvolvidas e testadas metodologias para a avaliação do desgaste por deslizamento no par tribológico *riser*/enrijecedor. Além disso, foi desenvolvido um *software* para aquisição e análise de vibrações do referido tribossistema. Os resultados permitiram concluir que:

- a) A metodologia desenvolvida para quantificação da perda de espessura com a utilização de uma MM3C, é uma técnica viável que permite avaliar o desgaste de amostras de *risers* de forma eficiente;
- b) A região intermediária do revestimento do *riser*, a qual estava menos exposta à água, teve as maiores taxas de desgaste. Nesta região, a taxa de desgaste média para a amostra 1 foi de $1,2 \times 10^{-3} \mu\text{m/ciclo}$, para uma perda de espessura de 366,8 μm , após 296 mil ciclos, com incerteza expandida de 1,1 μm para $k= 2,10$ e 18,29 graus de liberdade efetivos. Já a taxa de desgaste média para a amostra 2 foi de $1,3 \times 10^{-3} \mu\text{m/ciclo}$, para uma perda de espessura de 400,1 μm com incerteza expandida de 1,6 μm para $k= 2,45$ e graus de liberdade efetivos iguais a 6,07. Em todos os casos, a probabilidade de abrangência foi de 95%;
- c) Os valores das taxas de desgaste da região central do *riser* foram os maiores e, portanto, determinantes na vida do revestimento polimérico do *riser*. Estes valores devem, portanto, ser considerados na estimativa do tempo de vida dos dutos flexíveis em campo, bem como no dimensionamento dos dutos de tal forma que tenham uma expectativa de vida pré-estimada;
- d) A metodologia proposta para quantificação do volume com a utilização de uma MM3C e o programa desenvolvido em Matlab® como ferramenta para calcular o volume a partir das coordenadas dos pontos medidos, permitiram avaliar o volume de amostras de enrijecedores de forma eficiente;
- e) O *software* Dimension Volume® não pôde ser aplicado para avaliar o volume de amostras de enrijecedores, já que, além de não perceber as irregularidades da peça

devido ao desgaste, não se conseguiu processar grandes modelos matemáticos (modelos CAD) e grandes quantidades de pontos (acima de 4.200 pontos), essenciais para estimar, com precisão, o volume de um enrijecedor;

- f) O *software* Dimension Volume® somente pode ser aplicado na verificação volumétrica, após a fabricação, de peças com geometrias regulares, para conferir se o desvio do volume está dentro da tolerância especificada no projeto. Isto é justificado devido às limitações que o método dos mínimos quadrados apresenta para a manipulação de uma grande quantidade de dados em modelos matemáticos complexos;
- g) A estratégia de medição com malha 1 mm x 1 mm foi considerada a mais adequada para estimar o volume de uma amostra de enrijecedor, com precisão, confiabilidade e menor custo;
- h) Quando empregado o programa desenvolvido utilizando o Matlab® para a estimativa do volume do enrijecedor, observou-se que os valores de volume a partir da estratégia cuja malha de pontos foi de 1 mm x 1 mm (24.833 pontos apalpados) ou de 1 mm x 0,5 mm (49.676 pontos apalpados) se estabilizaram. Já os valores de volume obtidos pelo *software* Dimension Volume® não tenderam à estabilização, considerando as mesmas estratégias de medição, o que pode ser justificado por possíveis erros sistemáticos do método de cálculo do volume;
- i) O programa desenvolvido, utilizando o Matlab®, para calcular o volume de uma peça tem uma grande probabilidade de ser sensível às irregularidades da peça deixadas pelo desgaste. Isto é justificado porque ele realiza o cálculo do volume a partir de um ajuste ponto a ponto dos pontos distribuídos em uma linha de medição;
- j) A variabilidade dos valores de volume da amostra de enrijecedor obtidos considerando os três ciclos de medição efetuados, pode estar associada a efeitos aleatórios, tais como as vibrações transmitidas pelo solo, que podem constituir fontes de incertezas significativas;
- k) A partir da utilização do programa desenvolvido no Matlab®, foi definida uma área de interesse nas duas amostras de enrijecedor para *riser* de 6 in (152,4 mm) de diâmetro interno. E, considerando a estratégia com a matriz de pontos 1 mm x 1 mm, foram obtidos, como resultados de volume, $441,977463 \pm 0,222322$ (0,05%) [cm³], para uma das amostras (esquerda), e $438,975047 \pm 0,077482$ (0,02%) [cm³], para a outra amostra (direita), com 95% de probabilidade de abrangência, considerando $k = 4,30$ e o número de graus de liberdade efetivos igual a 2. Em ambos os casos, a incerteza associada ao volume obtido foi pequena em relação ao valor total do volume, o que é

justificado pela excelente repetibilidade da MM3C utilizada e pela eficiência do programa desenvolvido;

- I) O programa supervisor desenvolvido no *software* Labview® para aquisição, monitoramento e armazenamento dos sinais de vibrações do tribômetro, permitiu avaliar as frequências dominantes dos sinais de vibração, obtidos durante o ensaio de desgaste por deslizamento. Constatou-se um pico da amplitude vibratória localizado na frequência de 16,71 Hz, que pode estar correlacionado ao processo de desgaste.

CAPÍTULO VI

TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade a este trabalho, sugere-se:

- a) Estimar a tolerância dimensional da espessura do revestimento polimérico externo do *riser* e incluir uma correção associada a esta tolerância no modelo matemático utilizado para a avaliação da incerteza da quantificação do desgaste linear em amostras de *risers*;
- b) Avaliar o volume das amostras de enrijecedores para *riser* de 6 in (152,4 mm) de diâmetro interno, após o ensaio de desgaste, considerando a estratégia de medição proposta, para que seja estimado o desgaste volumétrico e, conseqüentemente, prever a vida útil do material quando submetido às condições de campo similares às simuladas nos ensaios com o tribômetro;
- c) Realizar medições por varredura sobre as superfícies de interesse das amostras de enrijecedores, utilizando, para isso, a MM3C e o *software* Calypso® como ferramenta para a definição e execução da estratégia de medição (malha 1 mm x 1 mm). O programa desenvolvido em Matlab® deve ser utilizado para estimar o volume destas amostras. As medições por varredura apresentam a vantagem de demandarem menor tempo de medição em comparação à medição ponto a ponto. Este último modo de medição era o único disponível pelo *software* Dimension Volume®, que não deve ser utilizado devido à sua inviabilidade no cálculo do volume destas amostras;
- d) Comparar os valores de volume provenientes das medições por varredura e das medições ponto a ponto quanto à repetibilidade e confiabilidade, com o intuito de se definir o melhor modo de medição;
- e) Avaliar as perdas de espessura das amostras de enrijecedores;
- f) Monitorar as vibrações no desempenho da MM3C durante o processo de medição, com o intuito de quantificar as amplitudes das mesmas, bem como

estimar a incerteza associada e determinar sua parcela de influência na incerteza total de medição;

- g) Realizar mais investigações sobre os sinais de vibração durante o processo de desgaste, para verificar qual fenômeno ou qual a fonte de vibração que está associada à frequência de 16,71 Hz;
- h) Avaliar a incerteza associada à medição das vibrações da estrutura do tribômetro, decorrentes do ensaio de desgaste.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASME B89.4.1. Methods for performance evaluation of coordinate measuring machines. New York. American Society of Mechanical Engineers. 1997.

BALDACIM, S. A. **Desenvolvimento, processamento e caracterização de compósitos cerâmicos Si_3N_4 – $\text{SiC}_{(w)}$** . 2000. 147 f. Tese de doutorado. Tecnologia Nuclear – Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) - Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo.

BERTHOLDI, J. Relatório técnico interno do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). 2013.

BILLS, P.J.; BLUNT, L.; JIANG, X. Development of a technique for accurately determining clinical wear in explanted total hip replacements. **Wear**, v. 263, p. 1133-1137, 2007.

BILLS, P.J.; RACASAN, R.; UNDERWOOD, R.J.; CANN, P.; SKINNER, J.; HART, A. J.; JIANG, X.; BLUNT, L. Volumetric wear assessment of retrieved metal-on-metal hip prostheses and the impact of measurement uncertainty. **Wear**, v. 274-275, p. 212-219, 2012.

BOUISSOU, S.; PETIT, J. P.; BARQUINS, M. Normal load, slip rate and roughness influence on the polymethylmethacrylate dynamics of sliding 1. Stable sliding to stick-slip transition. **Wear**, v. 214, p. 156-164, 1998.

CAIRE, M. **Análise de enrijecedores à flexão**. 2005. 115 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros**. 2ª edição; Editora Artliber; 2006; 277 p.

CARDOZA, J.A.S. **Máquinas virtuais de medir a três coordenadas**. 1995. 225 f. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

CARMIGNATO, S.; SPINELLI, M.; AFFATATO, S.; SAVIO, E. Uncertainty evaluation of volumetric wear assessment from coordinate measurements of ceramic hip joint prostheses. **Wear**, v. 270, p. 584-590, 2011.

DIN 50320: **Verschleiß – Begriffe, Analyse Von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes**. BeuthVerlag, Berlin 1979.

GAHLIN, R.; JACOBSON, S. A novel method to map and quantify wear on a micro-scale. **Wear**, v. 222, p. 93-102, 1998.

GAPINSKI, B.; RUCKI, M. Uncertainty in CMM measurement of roundness. **AMUEM 2007** – International Workshop on Advanced Methods for Uncertainty Estimation in Measurement. Sardinia, Trento, Italy, 16-18 Julho 2007.

HAWTHORNE, H.M. On the role of interfacial debris morphology in a conforming contact tribosystem, **Wear**, v. 149, p. 169-185, 1991.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 1ª ed. Edward Arnold, 1992. 273 p.

INMETRO, Sistema internacional de Unidades – SI. Rio de Janeiro, Brasil, 2012. 94 p.

INMETRO, Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados – VIM. Rio de Janeiro, Brasil, 2012, 95 p.

INSTRUMENTS®, N. Disponível em: <http://sine.ni.com/psp/app/doc/p/id/psp-30/lang/pt>. Acesso em: 2013.

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

ISO/IEC 17025, Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. 2005.

ISO 14242-2: Implantes para cirurgia – Desgaste de próteses totais de articulação do quadril – Parte 2: Métodos de medida. Rio de Janeiro, Brasil, 2000, 5p.

JÚNIOR, L. S. **Sistemática para garantia da qualidade na medição de peças com geometria complexa e superfície com forma livre utilizando máquina de medir por coordenadas**. 2010. 186 f. Tese de doutorado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

KUNZMANN, H. WÄLDELE, F. Performance of CMMs. In: CIRP, 1988, vol. 39/2, pp. 633-640. **Anais**.

LADEIRA, G. M. V. **Instrumentação de um tribômetro para ensaios de deslizamento em dutos flexíveis**. 2011. 102 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

LEE, S. M.; SHIN, M. W.; LEE, W. K.; JANG, H. The correlation between contact stiffness and stick-slip of brake friction materials. **Wear**, v. 302, p. 1414-1420, 2013.

LEMOES, C. A. D.; FILHO, L. L. L.; SANTOS, J. M.; CAPLLONCH, R. W.; MOTTA, A. M. R.; CUSTÓDIO, A. B.; MENICONI, L. C.; COSTA, L. C. S.; FONSECA, M. M. C.; ESCUDERO, C. C.; VARDARO, E.; PAES, M. T. P. Tratamento de danos em *risers* flexíveis na região do *bend stiffener*. In: **I Seminário de Engenharia Submarina**, 2004, Búzios, RJ.

MAY, F. P. **Incertezas na medição por coordenadas com ênfase na contribuição da forma da peça e da estratégia de medição**. 2007. 87 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MORAES, J. O. **Avaliação da Resistência ao Desgaste Abrasivo de Risers Flexíveis – Proposição de uma Nova Metodologia de Teste**. 2005. 142 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

MORSE, E. **Operating a coordinate measuring machine**. Chapter 5, 2011, p. 81-92. in HOCKEN, R.J.; PEREIRA, P.H, **Coordinate Measuring machines and Systems**. Second edition, CRC Press Taylor & Francis Group, New York, 2011, 574 p.

NBR NM-ISO 1: Temperatura padrão de referência para medições industriais de comprimento, 1997. 2p.

NBR ISO/IEC 17025. Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, Brasil, 2005, 20 p.

NEIS, P. D.; BAETS, P. DE; OST, W.; DELGADO, Y. PEREZ; LOCCUFIER, M.; ALBENDER F.; FERREIRA, N. F.; LORINI, F. J. Investigation of the dynamic response in a dry friction process using a rotating stick-slip tester. **Wear**, v. 271, p. 2640-2650, 2011.

OLLISON, T. E.; ULMER, J. M.; McELROY, R. Coordinate measurement technology: a comparison of scanning versus touch trigger probe data capture. **International Journal of Engineering Research and Innovation**, v. 4, n. 1, p. 60 – 67, 2012.

PÁCZELT, I; KUCHARSKI, S.; MRÓZ, Z. The experimental and numerical analysis of quasi-steady wear processes for a sliding spherical indenter. **Wear**, v. 274-275, p. 127-148, 2012.

PADILHA, J. A. P. **Análise Estrutural de Riser Flexível com Armaduras de Tração em Titânio**. 2009. 122 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro.

PAES, M. T. P.; RAMOS NETO, F. F.; PIRES, R. R.; FREITAS, D. S.; LADEIRA, G. M. V.; FRANCO, V. L. D. S.; FRANCO, S. D. Desenvolvimento de infraestrutura e metodologia para ensaios de desgaste por deslizamento em dutos flexíveis. In: **67º Congresso ABM – Internacional**, 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PENG, Z.; KESSISSOGLOU, N. An integrated approach to fault diagnosis of machinery using wear debris and vibration analysis. **Wear**, v. 255, p. 1221-1232, 2003.

PEREIRA, P.H. **Cartesian coordinate measuring machines**. Chapter 4, 2011, pp. 57-80. in HOCKEN, R.J.; PEREIRA, P.H, **Coordinate Measuring machines and Systems**. Second edition. CRC Press Taylor & Francis Group. New York. 2011. 574p.

PEREIRA, P.H.; NI, J. **Environmental control**. Chapter 11, 2011, pp. 305-318, in HOCKEN, R.J.; PEREIRA, P.H, **Coordinate Measuring machines and Systems**. Second edition. CRC Press Taylor & Francis Group. New York. 2011. 574p.

PHILLIPS, S.D. **Performance evaluation**. Chapter 9, p. 183-272, in HOCKEN, R.J.; PEREIRA, P.H. **Coordinate Measuring machines and Systems**. Second edition. CRC Press Taylor & Francis Group. New York. 2011. 574 p.

PIEZOTRONICS^{INC}, P. Disponível em: <www.pcb.com>. Acesso em: 2013.

RADI, P. A.; SANTOS, L. V.; BONETTI, L. F.; TRAVA-AIROLDI, V. J. Tribologia, conceitos e aplicações. In: 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA (Instituto Tecnológico de Aeronáutica) – **XIII ENCITA**, 2007, São José dos Campos, SP.

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

REINISCH, G.; JUDMANN, K. P.; LHOTKA, C.; LINTNER, F.; ZWEYMÜLLER, K. A. Retrieval study of uncemented metal-metal hip prostheses revised for early loosening. **Biomaterials**, v. 24, p. 1081-1091, 2003.

RIBEIRO, M. P. **INACCESSIBLE EQUIPMENT MONITORING VIA VIBRATORY SIGNATURE ANALYSIS UTILISING DATA COLLECTED BY REMOTE ACCELEROMETERS**. 1999. 260 f. Tese de doutorado. University of London, Londres.

SANTANA, J. S. **Avaliação tribológica dos polímeros NBR, PTFE e PTFE grafitado em contato com aço AISI 52100**. 2009. 89 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SANTOS, F. C. **Otimização de poliuretanos para protetores de linhas flexíveis sujeitos ao desgaste abrasivo**. 2007. 136 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SILVA, C. H.; GIRALDO, D. H.; SOUZA, R. M.; SINATORA, A. Estudo da influência das características do contra-corpo na taxa de desgaste do polioximetileno em ensaio pino-contra-disco. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**, v. 18, n. 1/2, 2006.

SINHA, S. K.; BRISCOE, B. J. **Polymer Tribology**. Imperial College Press. 2009. 697 pg.

TAYLOR, J. I. **The Vibration Analysis Handbook: A Practical Guide for Solving Rotating Machinery Problems** – 1ª Edição; Editora Vibration Consultants; 1994; 360 p.

TASAN, Y. C.; ROOIJ, M. B.; SCHIPPER, D. J. Measurement of wear on asperity level using image-processing techniques. **Wear**, v. 258b, p. 83-91, 2005.

TEDESCO, N. R. **Caracterização do comportamento de desgaste de cerâmicas de alumina densa: efeitos de parâmetros do ensaio do tipo pino no disco**. 2010. 197 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

TUKE, M.; TAYLOR, A.; ROQUES, A.; MAUL, C. 3D linear and volumetric wear measurement on artificial hip joints – Validation of a new methodology. **Precision Engineering**, v. 34, p. 777-783, 2010.

UNAL, H.; SEN, U.; MIMAROGLU, A. Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers against steel counterface. **Tribology International**, v. 37, p. 727-732, 2004.

WANG, W. H.; WONG, Y. S.; HONG, G. S. 3D measurement of crater wear by phase shifting method. **Wear**, v. 261, p. 164-171, 2006.

WECKENMANN, A.; KNAUER, M.; KILLMAIER, T. Uncertainty of coordinate measurements on sheet-metal parts in the automotive industry. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.115, p.9-13, 2001.

YOON, S. W.; SHIN, M. W. LEE, W. G.; JANG, H. Effect of surface contact conditions on the stick-slip behavior of brake friction material. **Wear**, v. 294-295, p. 305-312, 2012.

ZEISS, C. Disponível em: <http://www.zeiss.com.br>>. Acesso em: fevereiro de 2013.

ZEISS, C. Apostila de treinamento do *software* Calypso®, 2012, 156 p.

ZEISS, C. Catálogo dos sensores de contato e ópticos, 2007, 28 p.

ZEISS, C. Catálogo das especificações do *software* Calypso[®], 2011, 900 p.

ZUMGAHR, K.-H. **Microstructure and wear of materials**. Elsevier, Amsterdam, 1987.