

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

**AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM CURVAS DE FADIGA S-N
ATRAVÉS DO MÉTODO DE MONTE CARLO**

Lisiane Trevisan

Tese para Obtenção do Título de Doutor
em Engenharia

Porto Alegre
2015

Trevisan, Lisiane

Avaliação da incerteza de medição em curvas de fadiga S-N através do Método de Monte Carlo / Lisiane Trevisan. -- 2015.
151 f.

Orientador: Afonso Reguly.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2015.

1. Ensaio de Fadiga . 2. Incerteza de Medição . 3. Método de Monte Carlo. I. Reguly, Afonso, orient.
II. Título.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

**AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM CURVAS DE FADIGA S-N
ATRAVÉS DO MÉTODO DE MONTE CARLO**

Lisiane Trevisan
Engenheira Metalúrgica

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre
2015

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Prof^a. Dra. Carla Schwengber ten Caten, DEPROT/UFRGS
Prof^a. Dra. Rejane Maria Candiota Tubino, PPGE3M/UFRGS
Dra. Mariane Chludzinski, PPGE3M/UFRGS
Prof. Dr. Fabiano Dornelles Ramos, IFRS

Prof. Dr. Carlos Perez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

Dedico essa tese a minha filha Rafaella.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Afonso Reguly pelos ensinamentos e todo o apoio no desenvolvimento desta pesquisa;

A Professora Dra. Carla ten Caten pelo auxílio no planejamento dos experimentos;

Ao LAMEF pelo apoio, fornecendo estrutura para o desenvolvimento dessa pesquisa;

Aos bolsistas, mestrandos e doutorandos que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho. Em especial, ao Grupo de Ensaios Mecânicos – GEM onde foram realizados os ensaios mecânicos e principalmente os ensaios de fadiga;

Ao Aços Favorit pelo fornecimento do material metálico usado nesse estudo;

Aos meus pais, Francisco e Maria Aparecida por todo o amor dedicado aos seus filhos, e toda a ajuda na realização deste trabalho; Suzana e João Pedro, meus irmãos.

Ao Vinicius Paz e nossa filha Rafaella pela compreensão e apoio nas horas de estudo, estando sempre ao meu lado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XIII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
1.0 INTRODUÇÃO	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Incerteza de Medição	3
2.1.1 Método ISO GUM	4
2.1.2 Método Kragten	6
2.1.3 Fontes de Incerteza: Tipo A e B	7
2.1.4 Fontes de Incerteza: Distribuição de Probabilidade	8
2.1.5 Método de Monte Carlo	10
2.1.6 Método de Monte Carlo: Uso e Aplicação	11
2.1.7 Método de Monte Carlo : Matemática	13
2.2 Incerteza de Medição e sua importância para Ensaio de Fadiga	18
2.2.1 Desalinhamento	20
2.2.2 Calibração Estática e Dinâmica da Célula de Carga	23
2.2.3 Acabamento Superficial: Rugosidade	25
2.2.4 Composição Química e Microestrutura	30
2.2.5 Outros fatores relacionados a incerteza de medição no ensaio de fadiga	35
2.2.6 Influência de outros fatores secundários	36
3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	38
3.1.1 Barras de Aço – Corte	45
3.1.2 Usinagem e Preparação da Superfície	46
3.1.3 Composição Química	48
3.1.4 Metalografia	49
3.1.5 Dureza	49
3.1.6 Ensaio de Tração	49
3.1.7 Rugosidade	50
3.1.8 Instrumentação dos corpos de prova	52

3.1.9	Desalinhamento e Calibração Estática	54
3.1.10	Ensaio de Fadiga.....	55
3.1.11	Calibração Dinâmica	55
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1	Composição Química e Metalografia.....	59
4.2	Ensaio de tração	66
4.2.1	Tensão de Escoamento Estimado	66
4.3	Ensaio de Dureza	67
4.4	Verificação do Desalinhamento da Máquina de Ensaios.....	68
4.5	Calibração Estática - verificações na Máquina Universal de Ensaios	71
4.6	Avaliação do Sistema de Medição	73
4.7	Ensaio de Rugosidade e Fator de Correção	76
4.8	Ensaio de Fadiga e Curva S-N.....	82
4.9	Incerteza de Medição através do uso do Método de Monte Carlo.....	98
4.10	Comparação entre diferentes métodos (Proporção entre Fontes de Incerteza) para Tensão Corrigida	100
4.11	Comparativo entre valores de Incerteza de Medição e Probabilidade de Falha	103
5.0	CONCLUSÕES	107
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	108
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
	APÊNDICE A – RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA [% em peso].....	1
	APÊNDICE B – RESULTADOS – MEDIDA DO TAMANHO DE GRÃO [adimensional]... 1	
	APÊNDICE C – RESULTADOS – ENSAIO DE DUREZA BRINELL [HB]	2
	APÊNDICE D – RESULTADOS DE RUGOSIDADE R_a [μM].....	3
	APÊNDICE E – RESULTADOS DE RUGOSIDADE R_z [μM].....	4
	APÊNDICE F – RESULTADOS DE RUGOSIDADE R_y [μM].....	5
	APÊNDICE G – RESULTADOS DEFORMAÇÃO – CALIBRAÇÃO ESTÁTICA	6

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma para a determinação da incerteza de medição pelo ISO/GUM.	5
Figura 2.2 – Método de Monte Carlo, mostrando esboço da rotina matemática.....	13
Figura 2.3 – Probabilidade de falha por fadiga determinada para Liga de Titânio através do Método de Monte Carlo.....	16
Figura 2.4 – Influência do número de iterações em função do resultado obtido, a esquerda iterações é igual a 50 e a direita 10^4	17
Figura 2.5 – Intervalo dos valores do mensurando obtidos pelo Método de Monte Carlo e GUM para função $Y = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$	18
Figura 2.6 – Fontes de incerteza relacionados à incerteza de medição no ensaio de fadiga. ...	21
Figura 2.7 – Alinhamento e possível condições de desalinhamento do sistema de fixação.....	22
Figura 2.8 – Posicionamento dos strain-gauges e desalinhamento do sistema de fixação.	23
Figura 2.9 – Instabilidade inicial da tensão exercida no ensaio de fadiga.....	24
Figura 2.10 – Flutuação de tensão em uma curva que não possui forma senoidal perfeita.	25
Figura 2.11 – Relação entre limite de resistência à fadiga e rugosidade média para aço SAE 4140.	26
Figura 2.12 – Rugosidade da superfície em função do processo de usinagem.	27
Figura 2.13 – Ensaio de Fadiga em corpos de prova submetidos a distintas direções de lixamento.	28
Figura 2.14 – Relação entre rugosidade e vida em fadiga (número de ciclos) para o aço SAE 4340.	29
Figura 2.15 – Efeito de elementos de liga na estrutura do aço 17% Cr 4% Ni.	32
Figura 2.16 – Tensão calculada ao longo da interface matriz e ferrita- δ para tensão axial determinada através do método de elementos finitos.	32
Figura 2.17 – Resistência a fadiga para AISI 304 com distintos tamanhos de grão: 1, 17 e 47 μm	34
Figura 2.18 – Histograma relativo as medições do tamanho de grão para aço duplex.	34
Figura 2.19 – Influência da razão de carregamento sobre a curva S-N para um aço microligado.....	36
Figura 2.20 – Vida em fadiga do AISI 316 para ensaios realizados a distintas temperaturas..	36
Figura 3.1 – Distribuição dos corpos de prova para diferentes níveis de rugosidade.	39

Figura 3.2 – Diagrama Espinha de Peixe relacionando as fontes de incerteza relacionadas à tensão de ensaio.	40
Figura 3.3 – Diagrama Espinha de Peixe relacionando as fontes de incerteza para o número de ciclos suportado pelo material.	41
Figura 3.4 – Descrição das etapas realizadas para a obtenção dos resultados.....	45
Figura 3.5 – Distribuição dos corpos de prova para os ensaios de fadiga e ensaios mecânicos.	46
Figura 3.6 – Dimensões dos corpos de prova para ensaio de fadiga, tolerâncias conforme NBR ISO 2768-1 (ABNT, 2001).....	47
Figura 3.7 – Dimensões do corpo de prova usinado para a realização do ensaio de tração.	50
Figura 3.8 – Sistema de fixação dos corpos de prova para medição da rugosidade superficial.	51
Figura 3.9 – Instrumentação dos corpos de prova com posição <i>strain gauges</i> indicados na seção B.....	53
Figura 3.10 – Sistema de leitura da deformação realizada pelos <i>strain gauges</i>	54
Figura 3.11 – Sistema de aquisição de dados, mostrando valores experimentais e sua respectiva função.	56
Figura 4.1 – Diagrama de Schaeffler modificado para o aço AISI 316L.	62
Figura 4.2 – Microestrutura AISI 316L mostra grãos de austenita. Ataque <i>Kalling's #1</i> . 100X.	63
Figura 4.3 – Microestrutura AISI 316L mostra a presença de ferrita delta. Ácido oxálico 10% mais água. 1000X.	64
Figura 4.4 – Histograma para os valores estimados da tensão de escoamento.	67
Figura 4.5 – Desalinhamento calculado para cada corpo de prova, separados pelo conjunto de três <i>strain gauges</i> nomeados por Garras Superior e Inferior.....	69
Figura 4.6 – Resultado obtido para o desalinhamento para cada um dos três corpos de prova em função da carga usada.	70
Figura 4.7 – Fator de conversão ($C_{\sigma,R}$) entre rugosidade e tensão para número de simulação de 100.000 iterações.	80
Figura 4.8 – Fator de conversão ($C_{\sigma,R}$) para os valores de ($Ru_{1\#500p}$) para diferentes tensões de ensaio.	81
Figura 4.9 – Fator de conversão ($C_{\sigma,R}$) para os valores de $Ru_{2\#500}$ para diferentes tensões de ensaio.	81

Figura 4.10 – Fator de conversão ($C_{\sigma,R}$) para os valores de Ru3#320 para diferentes tensões de ensaio.	81
Figura 4.11 – Distintas regiões relacionadas ao início, propagação e sobrecarga da superfície de fratura dos corpos de prova.....	83
Figura 4.12 – Região de iniciação da falha e superfície de fratura do corpo de prova número 05. Mostra no detalhe marcas de ferramentas geradas no processo de usinagem.	86
Figura 4.13 – Região de iniciação da falha e superfície de fratura do corpo de prova número 16, mostra no detalhe marcas de ferramentas geradas no processo de usinagem.	88
Figura 4.14 – Região de iniciação da falha e superfície de fratura do corpo de prova número 35.	93
Figura 4.15 – Curva de Wöhler para cada um dos grupos de rugosidade.	94
Figura 4.16 – Distribuição de probabilidade obtidos relacionados $\sigma_{corrigida}$ para nível de rugosidade Ru1#800p.	97
Figura 4.17 – Distribuição de probabilidade obtidos relacionados $\sigma_{corrigida}$ para nível de rugosidade Ru2#500.....	97
Figura 4.18 – Distribuição de probabilidade obtidos relacionados $\sigma_{corrigida}$ para nível de rugosidade Ru3#320.....	98
Figura 4.19 – Probabilidade de falha calculado com base nos resultados obtidos no ensaio de fadiga.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Método de Kragten, descrição em etapas.	7
Tabela 2.2 – Características das distribuições de probabilidade mais comuns.	10
Tabela 2.3 – Proporção matemática de distintas variáveis relacionadas ao limite de fadiga. ...	19
Tabela 2.4 – Incerteza no limite de fadiga em função do acabamento da superfície.	27
Tabela 3.1 – Número de corpos de prova em função da análise de resultados no ensaio de fadiga.	39
Tabela 3.2 – Fontes de Incerteza e sua respectiva relação com sistema de medição utilizado.	42
Tabela 3.3 – Desvio-padrão da amostra relativa ao desvio-padrão de uma variável aleatória com distribuição normal.	44
Tabela 3.4 – Composição química do padrão de verificação utilizado no equipamento.	48
Tabela 3.5 – Possíveis parâmetros determinados no ensaio de rugosidade.	50
Tabela 4.1 – Intervalos de confiança para nível de confiança.	59
Tabela 4.2 – Resultados de composição química [% em peso].	60
Tabela 4.3 – Valores médios calculados pelo Método de Monte Carlo para o Níquel e Cromo equivalente. [%].	61
Tabela 4.4 – Resultados medidos para o tamanho de grão austenítico. [Adimensional]	65
Tabela 4.5 – Conversão entre tamanho de grão, considerando distribuição uniforme, grãos equiaxiais e orientados aleatoriamente.	65
Tabela 4.6 – Limite de Escoamento teórico obtidos através do Método de Monte Carlo. [MPa]	66
Tabela 4.7 – Resultados obtidos no ensaio de dureza <i>Brinell</i> . [HB]	68
Tabela 4.8 – Combinação de carga para verificação da calibração estática da máquina de ensaios.	71
Tabela 4.9 – Resultado das medições de diâmetro. [mm]	74
Tabela 4.10 – Resultados da análise de variância (ANOVA) obtidos pelo Minitab.	74
Tabela 4.11 – Estudo da variância calculado com base nos resultados da Tabela 4.10.	75
Tabela 4.12 – Distribuição da rugosidade dos corpos de prova e respectiva rugosidade.	76
Tabela 4.13 – Rugosidade superficial R_z . [μm].	77
Tabela 4.14 – Relação entre material e constante relacionada a rugosidade e resistência mínima à tração.	78
Tabela 4.15 – Valores de C_R para cada nível de confiança.	78

Tabela 4.16 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 480 MPa e rugosidade Ru1#800p.	84
Tabela 4.17 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 480 MPa e rugosidade Ru2#500.	84
Tabela 4.18 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 480 MPa e rugosidade Ru3#320.	86
Tabela 4.19 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 500 MPa e rugosidade Ru1#800p.	87
Tabela 4.20 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 500 MPa e rugosidade Ru2#500.	88
Tabela 4.21 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 500 MPa e rugosidade Ru3#320.	89
Tabela 4.22 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 520 MPa e rugosidade Ru1#800p.	90
Tabela 4.23 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 520 MPa e rugosidade Ru2#500.	91
Tabela 4.24 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 520 MPa e rugosidade Ru3#320.	92
Tabela 4.25 – Curva média de Wöhler calculada para cada nível de rugosidade e desvio padrão de log(N) em relação a curva média para cada tensão de ensaio.....	96
Tabela 4.26 – Incerteza de medição expandida calculada para cada uma das condições de ensaio.	99
Tabela 4.27 – Cálculo da incerteza de medição combinada obtida através do método <i>Kragten</i> em diferentes rugosidades para tensão de 480 MPa.	101
Tabela 4.28 – Cálculo da incerteza de medição combinada obtida através do método <i>Kragten</i> em diferentes rugosidades para tensão de 500 MPa.	102
Tabela 4.29 – Cálculo da incerteza de medição combinada obtida através do método <i>Kragten</i> em diferentes rugosidades para tensão de 520 MPa.	103
Tabela 4.30 – Cálculo da probabilidade de falha para os corpos de prova ensaiados.	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$u_c(y)$	Incerteza padrão combinada;
Cr_{equiv}	Cromo Equivalente;
Ni_{equiv}	Níquel Equivalente;
$C_{\sigma,R}$	Fator de correção;
$\sigma_{corrigida}$	Tensão de ensaio corrigida devido influência da rugosidade superficial;
σ_{ensaio}	Tensão utilizada no ensaio de fadiga;
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> ;
Ferrita- δ	Microestrutura ferrita delta;
FKM	<i>Fracture Mechanics Proof of Strength for Engineering Component</i> ;
GEM	Grupo de Ensaio Mecânicos do LAMEF;
GUM	<i>Guide to the expression of Uncertainty in Measurement</i> – Guia para expressão da incerteza de medição;
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia;
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> ;
k	Fator de Abrangência;
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS;
NBR	Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas;
PB	Porcentagem de dobramento (<i>percent bending</i>)
PDF	Função Densidade de Probabilidade;
R	Razão de carregamento;
RM	Rede Metrológica do Rio Grande do Sul;
U	Incerteza Expandida;

RESUMO

Esta tese tem por objetivo avaliar a incerteza de medição no ensaio de fadiga do aço inoxidável AISI 316L em corpos de prova instrumentados ensaiados em temperatura ambiente em três níveis de rugosidade. Para isso, foi utilizado o método matemático de Monte Carlo para calcular o valor da incerteza com base nas variáveis de entrada. Para atingir esse objetivo foram realizados diversos ensaios de fadiga utilizando um número de corpos de prova suficientes para garantir confiabilidade estatística conforme norma ASTM E739-10 (ASTM, 2010), a uma frequência de ensaio de 20 Hz e razão de carregamento de 0,1. Nesta etapa 36 corpos de prova foram divididos em três grupos com valores de tensão 480, 500 e 520 MPa com três níveis de rugosidade distintos. Para o desenvolvimento do modelo matemático, cada fonte de incerteza teve distribuição de probabilidade determinada com base no comportamento estatístico característico de cada variável. Sendo assim, a partir de um modelo matemático desenvolvido foi possível determinar incerteza de medição do valor da tensão corrigida e do n° de ciclos, com uso do software Matlab®. Os resultados de incerteza de medição foram comparados aos valores obtidos pelo método Kragten, mostrando valores semelhantes entre os dois métodos matemáticos.

Palavras chave: Incerteza de Medição; Método de Monte Carlo; Ensaio de Fadiga.

ABSTRACT

This thesis aims to evaluate the measurement uncertainty in the fatigue test of AISI 316L stainless steel in instrumented specimens tested at room temperature in three levels of roughness. For this, the mathematical method of Monte Carlo was used to evaluate the value of uncertainty based on the input variables. To achieve this goal several fatigue tests using a number of specimens sufficient to ensure statistical reliability according to ASTM E739-10 (ASTM, 2010) at test frequency of 20 Hz and stress ratio of 0.1 were tested. In this step 36 specimens were divided into three stress values of 480, 500 and 520 MPa with three different levels of roughness. For the mathematical development, each source of uncertainty probability distribution was initially determined based on the statistical behavior characteristic of each variable. A mathematical model was derived to determine the uncertainty of the stress value and number of cycles, using the Matlab[®] software. The combined uncertainty of results were compared to values obtained by Kragten method, showing similar values between the two mathematical methods.

Key words: Uncertainty; Monte Carlo Method; Fatigue Testing.

1.0 INTRODUÇÃO

Uma das tarefas de um engenheiro é estimar o comportamento de um componente frente aos esforços mecânicos durante o uso. Além desse desafio, é necessário relacionar tal comportamento com as características metalúrgicas do material, processo de fabricação, tratamento térmico, acabamento superficial, dentre outros fatores relevantes. As propriedades mecânicas são determinadas com base em experimentos realizados como ensaios mecânicos, químicos e/ou físico-químico, se necessário.

Fadiga é o processo localizado em que ocorre a alteração estrutural permanente em um material submetido a ciclos de tensões e deformações. Esses ciclos de carregamento podem provocar a fratura completa depois de um número suficiente de ciclos (ASTM E1823-13). Os mais variados componentes do cotidiano são submetidos a esforços de fadiga, como prédios, pontes, componentes de automóveis e aeronaves (SURESH, 1998; STEPHENS *et al.*, 2001) além de componentes biomédicos, cita-se *ISO 7206-4-02 – Implants for surgery – Partial and total hip joint prostheses – Part 4: Determination of endurance properties of stemmed femoral components* (COSTA, 2010).

A certificação de produtos tem se tornado uma imposição indireta do mercado mundial. A certificação de conformidade do produto é demonstrada através de normas técnicas específicas para cada componente e sua utilização. Essas normas exigem do processo produtivo documentação relativa aos procedimentos utilizados, citando principalmente o controle de variáveis de processo. Para cada variável de processo é preciso que as medições realizadas sejam confiáveis, realizadas por técnicos treinados.

Nenhuma medição pode ser realizada sem que existam erros associados (GUM, 2008). Tais erros ocorrem devido a diversos problemas, como imperfeição dos instrumentos, erros de leitura ou procedimento utilizado nesta medição. Além desses problemas, os ensaios realizados em laboratório com atmosfera e condições de esforços controláveis dificilmente terão seus valores reproduzidos em meio industrial, pois nesse meio existem inúmeras variáveis que, individual ou conjuntamente, influenciam o comportamento do material frente aos esforços (CASTRO, 2007).

Os componentes dos erros de medição contribuem para o valor da incerteza de medição. Assim, o resultado de uma medição deve ser expresso acompanhado deste valor. A incerteza de medição está relacionada à dúvida em relação ao resultado obtido em uma medição. Este

valor indica, de certa forma, a dispersão dos resultados experimentais e permite descrever a contribuição de cada fonte de incerteza em relação ao valor do mensurando.

Vários fatores justificam o cálculo da incerteza de medição na área de ensaios e calibração. É através do valor da incerteza que é possível verificar a confiabilidade dos resultados obtidos, permitindo a aprovação destes resultados dentro do limite de tolerância. O ensaio de fadiga é um ensaio mecânico destrutivo, além de exigir um grande tempo de desenvolvimento experimental, grande número de corpos de prova, acarreta a um custo elevado para obter resultados com confiabilidade estatística. Esta pesquisa justifica-se, então, mostrar as etapas experimentais e os cálculos exigidos em cada etapa do cálculo da incerteza de medição em um projeto para determinação da incerteza pelo método de Monte Carlo .

Em uma avaliação da literatura, verificou-se a existência de poucas pesquisas desenvolvidas para o cálculo de incerteza de medição sob as condições que foram realizadas com o material metálico estudado (AISI 316L) e também considerando estas fontes de incerteza pesquisadas. Além disso, em grande parte dos estudos realizados, o método matemático utilizado na determinação da incerteza dá-se através do cálculo de derivadas parciais por coeficientes de sensibilidade (ISO GUM) e neste trabalho serão utilizados o método de Monte Carlo e o método Kragten, com objetivo de comparar os valores obtidos.

O objetivo principal desse trabalho é realizar o cálculo da incerteza de medição tanto do valor de tensão corrigida, quanto do número de ciclos suportado pelo material, através do uso do método matemático de Monte Carlo, para três níveis distintos de rugosidade. Esta tese contribuirá para os conhecimentos das distintas fontes de incerteza e como cada uma destas fontes alteram o valor de tensão e número de ciclos suportados pelo aço inoxidável AISI 316L. As tensões residuais ao qual o material foi submetido não serão consideradas nesta pesquisa.

Os objetivos específicos são: a) comparar os valores de incerteza combinada obtida pelo Monte Carlo com os valores de incerteza obtidos pelo método *Kragten*, método baseado no ISO/GUM em que as derivadas parciais são resolvidas de forma numérica; b) determinar a principal fonte de incerteza no valor da incerteza de medição da tensão corrigida em condições distintas ensaiadas.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo será apresentada a revisão da literatura dos principais assuntos desenvolvidos nesse trabalho, dividido em três grandes grupos. Primeiramente, apresenta-se uma revisão sobre incerteza de medição, descrevendo o método ISO/GUM e o método Kragten, fontes de incerteza e distribuições de probabilidade de cada variável, com possíveis características de cada uma destas. Posteriormente, será descrito o Método de Monte Carlo, incluindo breve histórico, características, vantagens e desvantagens e principais etapas para sua organização matemática. Por último, será mostrado as principais fontes de incerteza de medição no ensaio de fadiga e sua importância em relação ao valor da incerteza de medição da tensão e no número de ciclos.

2.1 Incerteza de Medição

Todo o resultado de uma medição é apenas uma estimativa do valor verdadeiro, devido à influência de diversas fontes de incerteza. Por isso, em relação ao resultado de medição, os Institutos de Normalização Industrial de vários países uniram-se para criar uma normalização que determine, de uma forma matemática, o valor da incerteza. Este valor indica a qualidade do valor medido ou confiabilidade no valor medido através do uso de instrumentos e equipamentos (GUM, 2008).

Incerteza é considerada um parâmetro determinístico, ou seja, é um valor calculado e o mesmo não possui incerteza do seu próprio valor. Se a variável de entrada tem seu valor representado por uma distribuição de probabilidade, seu comportamento é probabilístico ou estocástico. O Método de Monte Carlo utiliza modelos matemáticos envolvendo eventos probabilísticos (CORRAR, 1993).

A palavra incerteza significa “dúvida”, e este questionamento está relacionado a validade do resultado de uma medição. Pode ser descrita por um parâmetro não-negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando (GUM, 2008), com base nas informações utilizadas, segundo o Vocabulário Internacional da Metrologia – VIM (GUM, 2012). De outra forma, a incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando (ARENCEBIA; RIBEIRO, 2009).

Para uma regra geral, quanto menor a incerteza em um determinado sistema de medição, maior necessidade do uso de equipamentos com maior precisão e maior será o custo para

realizar esta medição (RM 68, 2013). Nos últimos anos, a indústria associou a incerteza de medição aos valores medidos devido as exigências de normas internacionais de controle de qualidade, como a ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005 (SCHWENKE *et al.*, 2000).

É importante reconhecer que nem todas fontes de incerteza contribuirão significativamente para a incerteza do sistema de medição. As fontes de incerteza que possuem valor menor do que um terço, comparado a fonte de incerteza com maior contribuição, recomenda-se desprezar a sua avaliação (GUM, 2008).

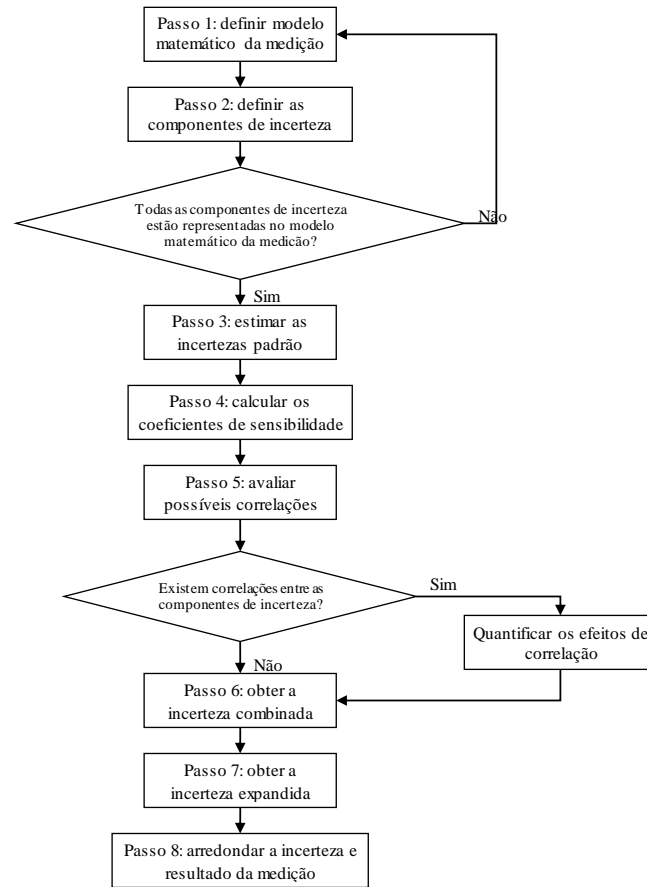
É possível determinar a incerteza através do uso do método computacional, com base em rotinas numéricas. Em geral, a distribuição e propagação da incerteza partem de um modelo matemático, com dados e constantes matemáticas utilizadas neste cálculo. Este modelo pode implicar seriamente na confiança dos resultados obtidos e as decisões que partem destes mesmos resultados. Ressalta-se o uso de algoritmos significativos considerados na solução destes problemas (LI, 2004).

2.1.1 Método ISO GUM

O Guia para a expressão da Incerteza em Medição (GUM, 2008) é um documento que estabelece critérios para calcular e expressar a incerteza de medição, usando os diferentes componentes da incerteza de medição.

O método tradicional para a análise da incerteza é descrito no ISO/GUM 2008, resumidamente mostrado no fluxograma da Figura 2.1. No Passo 4 da Figura 2.1, mostra que é necessário descrever o efeito de cada variável de entrada em relação ao mensurando, utilizando para isso os coeficientes de sensibilidade. Esses coeficientes de sensibilidade são descritos através de uma derivada parcial de cada fonte de incerteza em relação ao mensurando, e sua determinação pode ser complexo. Cabe ressaltar que anteriormente ao Passo 4, o Passo 3 exige a estimativa do valor da incerteza padrão para cada fonte de incerteza (PAPADOPOULOS, 2001).

Figura 2.1 – Fluxograma para a determinação da incerteza de medição pelo ISO/GUM.



Fonte: Rede Metrológica do RS (RM 68 2013).

Considerando os passos apresentados na Figura 2.1, mostra-se necessário esclarecer alguns conceitos utilizados: Incerteza Combinada e Incerteza Expandida. Em GUM (2008), a incerteza padrão combinada é obtida por meio dos valores de várias outras fontes de incerteza, sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, que constituem as variâncias ou covariâncias de cada grandeza, ponderadas pela derivada parcial respectiva de cada fonte $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)$, dada pela Equação 2.1:

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

Equação 2.1

Na Equação 2.1, f é a função que expressa o mensurando. Cada $u(x_i)$ relaciona a cada fonte de incerteza considerada no cálculo desse mensurando. E, finalmente, o valor da incerteza padrão combinada é representada pelo $u_c(y)$.

Já o conceito da Incerteza Combinada segundo o GUM (2012) é descrito pela grandeza que define um intervalo em torno de um resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. A incerteza expandida é representada por U e é obtida pela multiplicação da incerteza padrão combinada por um fator de abrangência (k), mostrado na Equação 2.2.

$$U = k \cdot u_c(y) \quad \text{Equação 2.2}$$

O resultado de uma medição pode ser expresso por $Y = y \pm U$, ou seja, o mensurando encontra-se dentro do intervalo $y - U$ a $y + U$ com nível de confiança determinado pelo fator de abrangência descrito na Equação 2.2. Esse intervalo também pode ser expresso por $y - U \leq Y \leq y + U$ para o qual abrange a distribuição de probabilidade (GUM, 2008).

No entanto, este procedimento padrão do cálculo da incerteza é cansativo ou às vezes, em certos casos, impossíveis quando são realizadas com variáveis complexas. Se caso a medição exigir um grande número de medições, algoritmos numéricos complexos precisam ser derivados e, nesta etapa, há grande influência na descrição de quantidade de medições. Este problema ocorre, por exemplo, em medições realizadas tanto em paquímetro ou micrômetro (SCHWENKE, 2000).

2.1.2 Método Kragten

O método Kragten foi utilizado para a comparação dos valores de incerteza de medição combinada obtida pelo método de Monte Carlo e a determinação da maior fonte de incerteza de medição. Esse método determina a incerteza de medição com uso de derivadas parciais resolvidas numericamente (MACHADO, 2013; RM 68, 2013).

É importante destacar que esse método segue as mesmas recomendações do ISO/GUM e geralmente é usado em medições analíticas (EURACHEM, 1995). Para obter resultados semelhantes aos obtidos pelo método descrito pelo ISO/GUM é necessário que a função $y = f(x)$ seja linear, valor da incerteza de medição seja pequeno quando comparado ao valor médio e que haja a suposição da normalidade do mensurando (GUM, 2008). As etapas para realização do método Kragten estão descritas na Tabela 2.1, sendo x_1, x_2, x_3 fontes de incerteza e $u(x_1)$ o valor da incerteza padrão da fonte de incerteza representada por x_1 , e mesma regra segue para as outras fontes de incerteza.

Tabela 2.1 – Método de Kragten, descrição em etapas.

$y = f(x_1, x_2, x_3)$	
$y' = f((x_1 + u(x_1)), x_2, x_3)$	$\Delta y_1 = y - y' $
$y'' = f(x_1, (x_2 + u(x_2)), x_3)$	$\Delta y_2 = y - y'' $
$y''' = f(x_1, x_2, (x_3 + u(x_3)))$	$\Delta y_3 = y - y''' $
Incerteza Combinada	
$u_c = \sqrt{(\Delta y_1)^2 + (\Delta y_2)^2 + (\Delta y_3)^2}$	

Fonte: Adaptado de EURACHEM/CITAE (1995).

Para a realização do método Kragten, foi aproximado o valor da incerteza padrão u de cada fonte pelo desvio-padrão das medidas. É importante ressaltar que essa é uma aproximação, o método *Kragten* segue a mesma metodologia do ISO/GUM, e neste método utiliza-se no cálculo da incerteza: desvio-padrão das medições, incerteza herdada do equipamento, entre outros.

2.1.3 Fontes de Incerteza: Tipo A e B

Ao calcular a incerteza de medição de um mensurando deverão ser consideradas estimativas de cada fonte de incerteza (x_i), com sua respectiva incerteza padrão associada a este valor $u(x_i)$. A incerteza padrão associada a cada fonte de incerteza (x_i) é determinada com base na distribuição de possíveis valores desta variável, podendo ser classificada como tipo A e tipo B (GUM, 2008).

Para as fontes de incerteza com distribuição do tipo A, a estimativa destas variáveis é feita através da média aritmética dos valores observados desta grandeza. É importante ressaltar que para determinar a distribuição destas variáveis do tipo A, determina-se a média aritmética e a dispersão dos resultados em torno da média, representado pelo desvio padrão. Assim, é necessário uma análise estatística dos resultados (SCHENEIDER, 2003).

Já para variáveis do tipo B, a avaliação da incerteza de medição é realizada por outros meios, diferentes a análise estatística das medidas, sendo assim sua determinação exige maior elaboração (JUNIOR; SILVEIRA, 2011). É possível realizar esta análise partindo de outros dados obtidos, como dados tabelados (propriedades dos materiais), especificação de equipamentos e até mesmo dados fornecidos em certificados de calibração (SCHENEIDER;MADDOX, 2003).

2.1.4 Fontes de Incerteza: Distribuição de Probabilidade

A probabilidade descreve a chance, com valor numérico, de uma medida cair dentro de um conjunto de valores. A distribuição de probabilidade de uma variável X é uma descrição do conjunto de probabilidades associadas com os valores possíveis para X (MONTGOMERY *et al.*, 2011).

Através de um experimento, é possível determinar se a variável é aleatória contínua ou aleatória discreta. A variável aleatória contínua apresenta natureza eminentemente contínua, como tempo de resposta ou rendimento de processos. Já as variáveis aleatórias discretas apresentam grande número de possíveis resultados, aos quais será necessário determinar a sua respectiva distribuição de probabilidade (BARBETTA *et al.*, 2010).

A função densidade de probabilidade $f(x)$ expressa a distribuição de probabilidade de uma variável aleatória contínua X. A probabilidade do valor de X esteja entre a e b é descrita pela integral da função $f(x)$ entre os valores a e b e sua fórmula é representada pela Equação 2.3 (MONTGOMERY *et al.*, 2011). Para cada distribuição de probabilidade descrita na Tabela 2.2, a Equação 2.3 é adequada usando estes parâmetros.

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x)dx$$

Equação 2.3

Assim, experimentalmente, ao utilizar resultados obtidos em outros ensaios é possível determinar a distribuição de probabilidade utilizando técnicas estatísticas. Já quando não existem dados anteriores, é necessário estimar o comportamento a partir da experiência do especialista, podendo ser uma estimativa otimista, estimativa mais provável e/ou estimativa pessimista, diferindo entre si o valor do desvio-padrão acima ou abaixo da média (CORRAR, 1993).

A distribuição de probabilidade para cada fonte de incerteza depende do tipo de informação disponível a respeito do componente de incerteza (RM 68, 2013). A distribuição retangular é usualmente aplicada quando não existe conhecimento suficiente em torno dos dados de entrada, não há informações em torno dos limites de ocorrência. A distribuição triangular é aplicada quando existe um claro agrupamento das medições em torno da média. Entretanto, a distribuição normal é aplicada quando experiência indica agrupamento das medições em torno da média com distribuição simétrica em torno da mesma (KOVACEVIC *et al.*, 2011).

Com base nas informações e comportamento matemático de cada variável é possível atribuir uma distribuição de probabilidade ao qual aproxima o comportamento desta variável à realidade. As características, função matemática e representação gráfica serão demonstradas na Tabela 2.1. A distribuição de probabilidade de cada variável é fundamental para o cálculo do mensurando, neste estudo tensão corrigida e número de ciclos, pelo Método de Monte Carlo.

Tabela 2.2 – Características das distribuições de probabilidade mais comuns.

Distribuição de Probabilidade	Características /Prováveis fontes de incerteza	Função de Probabilidade
Normal	Determinado a partir da média e do desvio-padrão populacional. Representa muitos fenômenos naturais. Grande parte dos erros em cálculos de incerteza possui esta distribuição.	$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$
Log-normal	Uma variável aleatória x tem a distribuição Log-Normal quando seu logaritmo possui distribuição Normal. Não é utilizada para dados negativos.	$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\ln(x) - \mu^2}{2\sigma^2}\right]$
Retangular	São determinados os valores máximos e mínimos de variação ($\pm a$) O erro máximo admissível para um determinado equipamento.	$f(x; a; b) = 0 \rightarrow x < a$ $f(x; a; b) = \frac{1}{b-a} \rightarrow a \leq x \leq b$ $f(x; a; b) = 0 \rightarrow x > b$
Triangular	Quando se conhecem os valores máximos e mínimos de variação ($\pm a$) e o valor de maior ocorrência. Resolução de um equipamento analógico. Erro de posicionamento.	$f(x) = \frac{2(x-a)}{(m-a)(b-a)} \rightarrow a \leq x \leq m$ $f(x) = \frac{2(b-x)}{(b-m)(b-a)} \rightarrow m \leq x \leq b$ $f(x) = 0 \rightarrow a < x \rightarrow x > b$
t-Student	Determinado a partir do desvio-padrão amostral para uma amostra de tamanho n é conhecido. Quanto maior tamanho da amostra, mais a distribuição se aproxima da normal.	$f(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right)}{\sqrt{n\pi}\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \left(1 + \frac{x^2}{n}\right)^{-\left(\frac{n+1}{2}\right)}$

Fonte: Rede Metrológica do RS (2013).

Quando organiza-se o modelo matemático, não é necessário apenas a identificação dos fatores que contribuem como fonte de incerteza, mas sua contribuição é representada pela identificação adequada da distribuição de probabilidade de cada uma destas fontes de incerteza. Como se trata de um fenômeno físico, a distribuição de probabilidade descreve o comportamento de cada variável, sendo descrito por um modelo probabilístico mais adequado, já que se trata de um fenômeno natural (TITMAN, 2008).

2.1.5 Método de Monte Carlo

Ao manipular dados puramente estatísticos verifica-se algumas dificuldades computacionais relacionadas tanto ao modelamento probabilístico quanto à interferência estatística. Para o primeiro é necessário a representação detalhada das causas do fenômeno,

incluindo a exploração de como cada variável influi no próprio fenômeno e como estas mesmas estão relacionadas. Quanto à interferência estatística, a problemática é voltada para a determinação do nível de interferência entre as variáveis no modelo probabilístico, como esta interferência influencia no fenômeno estudado e com que nível de interferência estatística no modelo isso ocorre (ROBERT; CASELLA, 2004).

O método de Monte Carlo tem este nome porque esse tipo de análise resultou do trabalho sobre as apostas realizadas nos cassinos. Este método consiste em uma técnica de amostragem artificial que opera numericamente sistemas complexos que possuem variáveis de entrada independentes (BRUNI, 2013). A primeira etapa para realizar a simulação deste método é organizar um modelo matemático que considere as diferentes variáveis, além de especificar a distribuição de probabilidade de cada variável de entrada (BRIGHAM, 2001). A precisão dos resultados obtidos depende do número de iterações realizadas com números aleatórios a partir da distribuição de probabilidade usados na simulação (PIDD, 2004).

A simulação de Monte Carlo não tem sido amplamente usada pela indústria devido aos problemas gerados na especificação da distribuição de probabilidade de cada variável e suas respectivas correlações entre essas variáveis (BRIGHAM, 2001).

Além disso, existem outras limitações, como o tempo necessário para a execução da simulação que é maior em modelos complexos e também as dificuldades no entendimento do fenômeno físico que ocorre no processo estudado. A precisão da simulação numérica depende da qualidade da geração do número randômico, o que conseqüentemente, depende do software usado na simulação (HERRADOR; GONZÁLEZ, 2004).

2.1.6 Método de Monte Carlo: Uso e Aplicação

O nome “Monte Carlo” foi aplicado por uma classe de cientistas, estudantes de uma disciplina de matemática para energia nuclear em Los Alamos em 1940. A essência desse método foi desenvolvido para determinar o comportamento de jogos eletrônicos e sua respectiva chance de ganhos e também foi usada para estudar alguns fenômenos naturais. Nesta época não seria necessário o uso de computadores para a realização das simulações, posteriormente, a necessidade do uso de computadores tornou-se cada vez mais necessária (KALOS; WHITLOCK, 1986).

Este método pode ser utilizado tanto na área de administração de empresas e economia, para avaliação de investimentos e análise de risco quanto nas áreas da engenharia. Com este

modelo de simulação é possível que uma empresa avalie o comportamento do investimento proposto, considerando as faixas de valores possíveis e não apenas um valor constante, possibilitando compreender seu comportamento financeiro, reduzindo o grau de risco referente a este novo negócio (LUCATO, 2005). Outro exemplo é uso na engenharia nuclear, o Método de Monte Carlo pode prever a efetiva porcentagem de fissão de um material nuclear (AO, 2011).

Este método foi usado para a previsão dos custos de produção do aço para comparar duas condições distintas. Uma desconsiderando os efeitos da privatização e outro que considerava a CVRD – Companhia Vale do Rio Doce como estatal. Foi possível observar a influência do fator privatização nos custos de produção. Verificou-se grande distanciamento entre os valores reais e simulados anteriormente à privatização, fato que não ocorreu após esse evento (GARCIA *et al.*, 2007).

A flexibilidade da utilização do Método de Monte Carlo é demonstrada na inserção de variáveis ambientais no fluxo de caixa de uma grande empresa siderúrgica. Com base em informações dos principais executivos, o fluxo de caixa foi organizado de forma a identificar possíveis problemas relacionados ao ambiente que possam afetar o sucesso do planejamento financeiro desta empresa (CARDOSO; AMARAL, 2000).

Curiosamente, esse mesmo método pode ser utilizado nos diversos ramos da ciência. A probabilidade de ocorrer uma nova inundação em Roma é baixa, pois o monitoramento do rio Tiber está sendo realizada desde a primeira inundação ocorrida em 1937. Cientistas tem estudado o cenário das inundações ao longo dos anos utilizando o Método de Monte Carlo. O estudo mostrou diversas inundações retornam a ocorrer em um período de 180 anos, e eventos extremos ocorreram a 1000 anos atrás, onde parte do centro monumental de Roma foi inundado (NATALE; SAVI, 2007).

Já em relação ao uso do Método de Monte Carlo para a determinação da incerteza de medição na calibração é verificado em vários estudos relatados na literatura, como Herrador e González (2004) aos quais determinou a incerteza de medição na preparação de um padrão de cádmio 1,000 mg/l. Moncati (2004) calculou a incerteza de medição para calibração de um multímetro. Arencibia (2009) usou o Método de Monte Carlo para determinar a incerteza de medição na calibração de paquímetros e micrômetros (DOMENEGHETTI, 2011).

Também é possível usar o Método de Monte Carlo para a determinação da incerteza de medição em ensaios mecânicos. Como por exemplo, a determinação da incerteza de medição no ensaio de tração para corpos de prova em ferro fundido e alumínio (DOMENEGHETTI, 2011). Para o ensaio de dureza Brinell, torque e ensaio de tração obteve-se os mesmos valores de incerteza tanto determinados pelo ISO GUM (GUM, 2008) quanto pelo Método de Monte

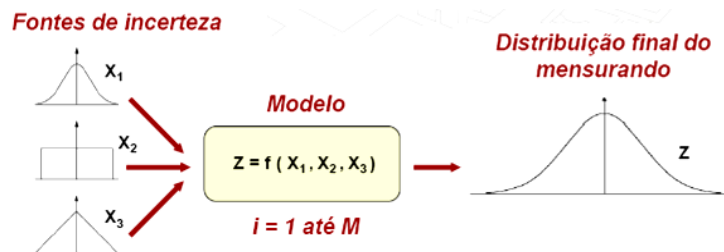
Carlo (COUTO *et al.*, 2006). Lembrando que o objetivo principal desta pesquisa é determinar a incerteza da tensão e do número de ciclos no ensaio de fadiga, o ensaio de fadiga é um ensaio mecânico destrutivo, sendo então possível utilizar este método matemático para o cálculo da incerteza de medição.

Verifica-se que é possível aplicar o Método de Monte Carlo para a determinação da incerteza de medição independente se for ensaio mecânico ou calibração. Além disso, é possível comparar os valores obtidos por dois métodos matemáticos tanto na área da calibração quanto de ensaios mecânicos. Independente do método matemático utilizado, os resultados fornecidos por modelos de simulação fornecem duas informações: valor médio do mensurando e seu respectivo desvio-padrão (BRUNI, 2008).

2.1.7 Método de Monte Carlo : Matemática

A Figura 2.2 mostra graficamente o método matemático de Monte Carlo com base nos dados de entrada com respectiva distribuição de probabilidade. O modelo é uma função matemática a qual considera todas as variáveis de entrada para a obtenção do mensurando (Z). A distribuição de probabilidade do mensurando é construída com base em várias simulações, onde cada iteração o valor do mensurando é calculado com base em um valor qualquer de cada variável dentro da sua distribuição de probabilidade, calculando através do modelo matemático.

Figura 2.2 – Método de Monte Carlo, mostrando esboço da rotina matemática.



Fonte: Adaptado de HERRADOR (2004).

A simulação numérica utilizando o Método de Monte Carlo é possível em qualquer software numérico que permita a geração de números aleatórios, sendo mais utilizados tanto o Microsoft Excel[®] (LAPPONI, 2007) quanto o Matlab[®]. As principais etapas a serem seguidas para a organização do Método de Monte Carlo podem ser resumidas da seguinte forma: (BRIGHAM, 2001; COX *et al.*, 2001)

1. Definir o mensurando e o seu modelo. Relacionar todas as variáveis ao modelo matemático;

2. Identificar todas as fontes de incerteza. Certificar que as variáveis são independentes entre si, o valor de cada variável não influencia em outros valores das outras variáveis;

3. Construir o diagrama causa-efeito (Diagrama Espinha de Peixe);

4. Definir as distribuições de probabilidade para cada fonte de incerteza;

5. Gerar valores aleatórios de cada fonte de incerteza com base na distribuição de probabilidade de cada variável de entrada.

6. Os valores selecionados para cada variável através do artifício randômico serão usados no modelo matemático para calcular o valor do mensurando.

7. As etapas 5 e 6 são repetidas inúmeras vezes, resultando a distribuição de probabilidade do mensurando, com a sua respectiva média e desvio-padrão. O número de simulações/iterações pode ser determinado pelo técnico ou pelo erro máximo admissível.

8. Declarar o resultado final utilizando o intervalo formado pela distribuição de probabilidade para um determinado nível de confiança (geralmente igual a 95%).

A descrição das fontes de incerteza e descrição da distribuição de probabilidade é baseada tanto em fontes relacionadas a fenômenos físicos quanto a componentes técnicos como linearidade, resolução do instrumento/equipamento, repetitividade, incerteza na calibração e outros erros secundários (SCHWENKE *et al.*, 2000).

Cita-se algumas desvantagens do uso do Método de Monte Carlo (COX *et al.*, 2001):

- Geração de números aleatórios deve ser disponível dentro do intervalo determinado pela distribuição de probabilidade;

- Não pode haver indícios de sequência numérica usada na geração dos números aleatórios. Os valores não podem ser repetitivos, este fato pode acarretar em falsos resultados no final da simulação;

- Coeficientes de sensibilidade não são utilizados pelo Método de Monte Carlo;

- O tempo de processamento para a obtenção do mensurando depende da complexidade do modelo matemático usado.

Como vantagens pode-se citar (COX, 2001; HERRADOR, 2004):

- O Método de Monte Carlo permite utilizar grande variabilidade de modelos matemáticos (linear e/ou não-linear);

- Não é necessário simetrizar qualquer distribuição de probabilidade. O Método de Monte Carlo constrói a distribuição de probabilidade do mensurando a partir dos dados de entrada;

- Não é necessário utilizar a derivação numérica, pois não utiliza-se coeficientes de sensibilidade;
- Tempo de Simulação linear. Quanto maior for o número de variáveis a serem usadas no modelo matemático, maior será o tempo de simulação;
- O Método de Monte Carlo permite o uso de modelos multi-estágios. Em modelos multi-estágios o mensurando de um modelo será usado como variável de entrada para um segundo modelo.

A formulação da incerteza de medição envolve vários estágios para determinar a influência de cada fonte ao longo do ensaio. Destaca-se a importância da propagação da função da distribuição de probabilidade para cada variável de entrada X , obtendo-se a distribuição de probabilidade do mensurando (Z) (GUM, 2008).

É importante ressaltar que a incerteza de medição é determinada pelo menor intervalo cuja área delimitada pela função densidade de probabilidade (PDF) dos dados de medição, para o nível de confiança estabelecido inicialmente. Sendo assim, é necessária a determinação ou estimativa real de qual distribuição de probabilidade se aproxima do comportamento estatístico do mensurando (NERY; KALID, 2009).

Para a obtenção do mensurando é necessário o uso de uma função em que não só se relaciona as variáveis de entrada como também se leve em consideração diferenças entre observadores, instrumentos, laboratórios e tempo de medição. Sendo assim, a função matemática não descreve somente a lei física, mas também descreve o processo de medição (PAPADOPOULOS, 2001).

O número de simulações realizadas é um fator importante para obtenção dos resultados: quanto maior for o número de simulações, melhor será a análise dos resultados (LAPPONI, 2007). Não existe um método mais adequado para estimar o número de iterações que produza um resultado adequado, no entanto é possível estimar esse número pelo erro máximo admissível, na maioria dos casos: 10^5 ou 10^6 iterações (SHAHANAGHI; NAKHJIRI, 2010).

Além disso, o número de iterações depende da tolerância dos resultados ou a própria dispersão aceitável. De um modo geral, os valores do mensurando obtidos com nível de confiança de 95% e com um ou dois números significativos, obtêm-se com um número de iterações de 10^6 (GUM, 2008).

Para a simulação de uma função com a soma de cinco termos envolvendo: cosseno, seno, inverso tangente, exponencial e raiz quadrada e cada uma das fontes com função densidade de probabilidade Gaussiana, usando Matlab[®], o tempo de processamento é de 5 segundos utilizando 10^6 iterações (COX *et al.*, 2001).

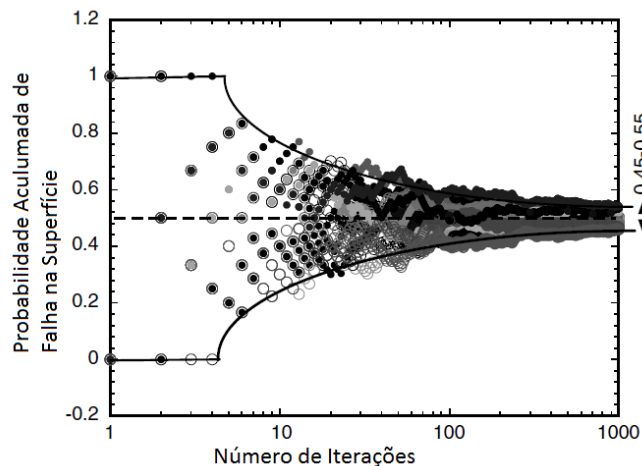
O número de simulações também pode ser determinado com base no erro estimado inicialmente, expresso pela Equação 2.4.

$$\varepsilon = \frac{3\sigma}{\sqrt{N}} \quad \text{Equação 2.4}$$

Sendo que σ é o desvio-padrão da variável randômica e N é o número de iterações. Inicialmente, é determinado o erro máximo a ser aceitável e com base neste valor (em porcentagem) e no desvio padrão da amostra, é calculado o número de iterações que devem ser realizadas para obtenção deste erro determinado inicialmente. O erro computacional é proporcional a $\frac{1}{\sqrt{M}}$, sendo M o número de ensaios ou experimentos, e a velocidade de processamento será determinada pela adequação do resultado à precisão requerida inicialmente (HERRADOR; GONZÁLEZ, 2004).

A importância do número de iterações na convergência dos resultados obtidos em uma simulação usando Método de Monte Carlo é mostrada na Figura 2.3. A Figura 2.3 mostra a probabilidade de falha acumulada na superfície de um componente fabricado em uma liga de titânio. O eixo da abscissa mostra o número de iterações realizadas e o eixo das ordenadas mostra os valores de probabilidade calculados. Essa figura mostra que quanto maior o número de simulações realizadas, maior será a convergência para valores do mensurando em torno de 0,45 a 0,55 (CHANDRAN;RAVI, 2005).

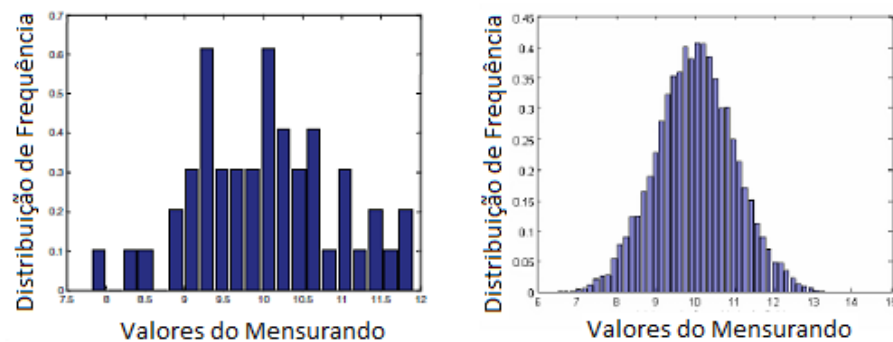
Figura 2.3 – Probabilidade de falha por fadiga determinada para Liga de Titânio através do Método de Monte Carlo.



Fonte: Adaptado de CHANDRAN;RAVI (2005).

Considerando que o mensurando possui uma distribuição normal, a expectativa do valor médio é determinado através da média dos resultados simulados e seu respectivo desvio-padrão é determinado com base nos valores do mensurando calculados anteriormente. A Figura 2.4 mostra para uma distribuição de probabilidade normal, o valor do mensurando em função do número de iterações realizadas, de modo geral, quanto maior o número de iterações, melhor a qualidade do resultado obtido.

Figura 2.4 – Influência do número de iterações em função do resultado obtido, a esquerda iterações é igual a 50 e a direita 10^4 .

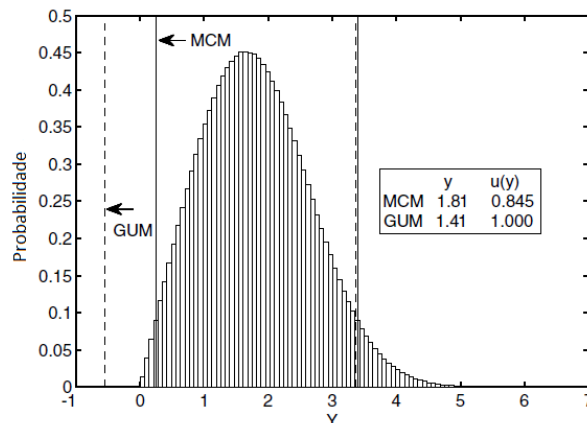


Fonte: Adaptado de DONATELLI (2005).

Com base no intervalo de confiança determinado anteriormente, verifica-se pequenas diferenças entre os dois métodos (ISO GUM e Monte Carlo), lembrando que cada método possui vantagens e desvantagens. Além disso, é necessária a adequação do método para cada uso específico. Considerando os valores obtidos de incerteza descritos na Figura 2.5, comparando os resultados obtidos pelo método ISO/GUM e o Método de Monte Carlo, esta diferença não é significativa se for considerar o tipo de análise ou quando o resultado não afetar a aprovação de um projeto. No entanto, o Método de Monte Carlo é considerado mais confiável do que o método ISO/GUM porque esse método não envolve aproximações, como o uso de coeficientes de sensibilidade (THEODOROU *et al.*, 2011).

Figura 2.5 – Intervalo dos valores do mensurando obtidos pelo Método de Monte Carlo e GUM para função

$$Y = \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \cdot$$



Fonte: WUBBELER *et al.* (2008).

Algumas características estatísticas são consideradas no cálculo da incerteza, enquanto o método ISO/GUM assume que $k=2$ para nível de confiança de 95%, o Método de Monte Carlo não utiliza estas aproximações. Além disso, o método ISO/GUM utiliza a expansão de forma simétrica em seu intervalo, enquanto o Monte Carlo proporciona a expansão da incerteza não necessariamente simétrica, independente do comportamento do mensurando. A simulação pelo Método de Monte Carlo não assume qualquer restrição e pode ser compatível a um sistema de medição complexo, o que dificultaria se fosse utilizado o método pelo ISO/GUM (SHAHANAGHI; NAKHJIRI, 2010).

A incerteza de medição também pode ser um parâmetro relacionado ao controle de qualidade de um processo industrial. Em um levantamento de dados com mais de 1.000 artigos em que esses descrevem o uso da incerteza de medição em seus projetos, aproximadamente 55% destes utilizavam o método descrito pelo ISO/GUM para realizar seus cálculos, alternativamente outros métodos matemáticos podem ser usados, como uso da lógica *Fuzzy* em 8,8% destes (HACK; TEN CATEN, 2012).

2.2 Incerteza de Medição e sua importância para Ensaio de Fadiga

Para a indicação da incerteza no ensaio de fadiga é necessário a determinação propriamente de qual incerteza será determinada: incerteza do limite de fadiga, incerteza do número de ciclos suportados pelo material, incerteza no fator do concentrador de tensão e no tamanho de entalhe crítico. Além disso, cada fonte de incerteza necessita da descrição de quais

são as variáveis necessárias para seu respectivo cálculo e quais são aquelas que influenciam (ou não) no seu próprio valor (UNCERT COP 01, 2000).

A Tabela 2.3 descreve algumas fontes de incerteza de medição relacionadas ao limite de fadiga. Para isso relaciona quantitativamente sua proporção matemática de cada uma dessas fontes em relação à vida em fadiga. Ressalta-se na Tabela 2.3 alguns coeficientes como: o diâmetro inicial tem proporção multiplicada por 2, já a seção transversal, a sua relação matemática é inversa.

Tabela 2.3 – Proporção matemática de distintas variáveis relacionadas ao limite de fadiga.

Fonte de Incerteza	Proporção matemática
Calibração da Célula de Carga	1
Sensibilidade da Célula de Carga	1
Alinhamento da Máquina de Ensaio	1
Controle dinâmico da Carga	1
Erro(<i>Drift</i>) da Carga Estática	1
Seção Transversal inicial do corpo de prova	-1
Diâmetro inicial do corpo de prova	2
Sensibilidade do Sistema de Medição	2

Fonte: Adaptado de UNCERT COP 01 (2000).

Além dos fatores descritos na Tabela 2.3 existem as influências dos parâmetros metalúrgicos aos quais alteram o limite de fadiga: como tamanho de grão, elementos de liga e tratamento térmico, além das condições de serviço, incluindo histórico de carga, tensão imposta sobre qual regime e temperatura (YE *et al.*, 2010).

A estimativa do limite da vida em fadiga depende da consideração destas solicitações dinâmicas, do coeficiente de segurança exigido pelo projeto e, principalmente, da relação matemática entre as diferentes fontes de incerteza que fazem parte deste cálculo (BENGTSSON; RYCHLIK, 2009). Além de outros fatores associados ao material, como o processamento mecânico sofrido, a maneira como foi realizado o carregamento cíclico durante o ensaio e o acabamento superficial.

Recomenda-se que as principais fontes de incerteza no cálculo da vida em fadiga sejam: variabilidade da microestrutura do material, variabilidade no processo de manufatura do material, qualidade da produção dos componentes (variabilidade em relação a geometria), comprimento inicial da trinca (quando houver), erro contido no modelamento do fenômeno da fadiga, erro no modelamento de tensão e incerteza de cargas exercidas em campo (BENGTSSON; RYCHLIK, 2009).

Para a interação entre os fatores que influenciam a incerteza durante o ensaio de fadiga é fundamental que o modelo matemático descreva suas simplificações e complexidades. Pode-se usar modelos simples baseados em simplificações, usados em vários casos específicos, e também se pode usar modelos extremamente complexos, esse tipo de modelo é computacionalmente mais caro, mas é possível quantificar o mensurando com algum nível de confiança (WEATHERS *et al.*, 2009).

2.2.1 Desalinhamento

O alinhamento do corpo de prova é fundamental para evitar a geração de esforços indesejáveis, sendo que este problema no alinhamento do corpo de prova é denominado desalinhamento. De um modo geral, o corpo de prova encontra-se alinhado ao sistema de fixação da máquina de ensaios quando a aplicação do eixo de força passa pela linha central do eixo do corpo de prova. Conforme descrito na norma ASTM E1012-14 (ASTM, 2014), o desalinhamento pode causar, entre outros problemas, a dobra ou deformação do corpo de prova, o carregamento não-uniforme na célula de carga causando erros de leitura e esforços distintos ao longo da microestrutura.

Existem várias formas de minimizar o desalinhamento do corpo de prova. Primeiramente, verifica-se o desgaste dos componentes da máquina de teste. Estes devem garantir a concentricidade do sistema, pois se este desgaste não for minimizado pode gerar tensões indesejáveis. Além disso, verifica-se que o sistema de fixação do corpo de prova também é importante no alinhamento. As garras, como são chamados estes sistemas de fixação, devem ser submetidas à manutenção e alinhamento próprio. Algumas podem apresentar batentes para que os corpos de prova sejam posicionados de forma exata e reproduzível.

O alinhamento do mecanismo de garras altera o alinhamento do corpo de prova. Em alguns casos, o grau de alinhamento das garras é função de detalhes no desenvolvimento do projeto deste componente, sendo que este deve garantir a concentricidade entre os eixos através do aperto a ser realizado no corpo de prova. Para STP 566, (ASTM,1974) este aperto é perpendicular à direção da tensão. Geralmente, para solicitações tratativas, o desalinhamento diminui ao aumentar a carga aplicada ao corpo de prova (COSTA, 2010).

Matematicamente, o valor do desalinhamento é relacionado à deformação surgida no dobramento, calculado de acordo com a Norma ASTM E1012-14 (ASTM, 2014), multiplicado pelo modo de elasticidade do material (Lei de *Hooke*). A Lei de *Hooke* relaciona a tensão e

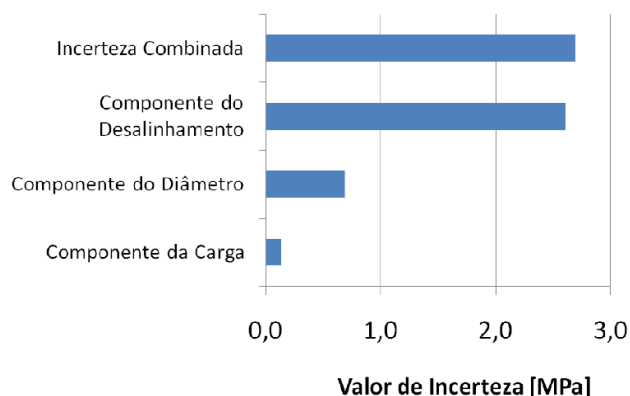
deformação na região elástica do diagrama de tensão-deformação de engenharia através de uma relação linear para metais e ligas através da Equação 2.5 (SMITH; HASHEMI, 2012).

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad \text{Equação 2.5}$$

Sendo que o símbolo σ descreve a tensão ao qual o material será submetido, e E o módulo de elasticidade do material, para o aço será atribuído o valor de 210.000 MPa. E finalmente o símbolo ϵ descreve a deformação medida pelos *strain gauges*. A deformação medida nos *strain gauges* instrumentados no corpo de prova serão utilizados para calcular o valor de *PB* (*percent bending*) descritos no item 10 da norma ASTM E1012-14 (ASTM, 2014).

Conforme dados mostrados na Figura 2.6, para um valor de tensão de 480 MPa, o desalinhamento é a fonte de incerteza mais significativa em relação a todas as outras fontes consideradas para o ensaio de fadiga, como diâmetro e carga (COSTA, 2010).

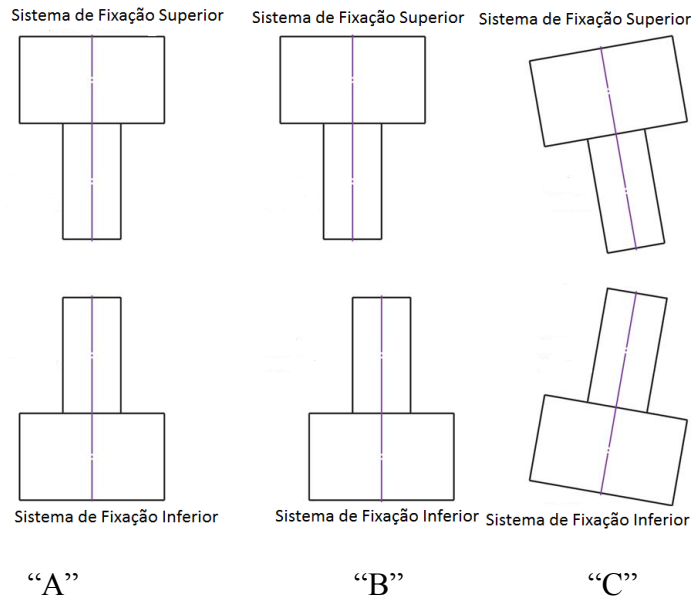
Figura 2.6 – Fontes de incerteza relacionados à incerteza de medição no ensaio de fadiga.



Fonte: COSTA (2010).

O desalinhamento geralmente é especificado pelas condições de excentricidade e paralelismo do sistema de fixação. A Figura 2.7 descreve os componentes de fixação superior e inferior da máquina de ensaios. O esquema “A” mostra um sistema de fixação propriamente alinhado, já no esquema “B” é possível verificar o desalinhamento concêntrico entre o componente superior e inferior. Finalmente, no esquema “C” é possível verificar o desalinhamento angular entre os componentes. Durante o ensaio, a verificação do desalinhamento é possível através de medições dos componentes de tensão ao longo da geometria dos corpos de prova.

Figura 2.7 – Alinhamento e possíveis condições de desalinhamento do sistema de fixação.

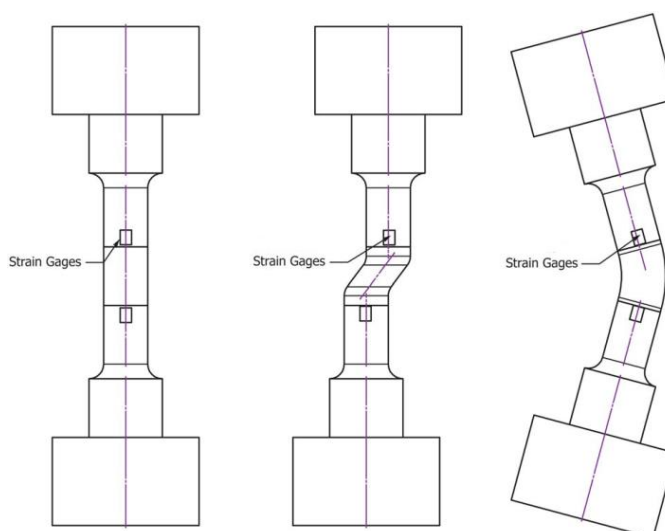


Fonte: Adaptado de ASTM E1012-14 (2014).

Conforme STP 566 (ASTM, 1974), é essencial garantir o alinhamento no instante inicial do ensaio, sendo que este alinhamento não é suficiente para garantir o valor do PB nulo durante o ensaio ao aplicar uma tensão uniforme. Conforme descrição da norma ASTM E467-08 (ASTM, 2008), o desalinhamento não será nulo durante o ensaio, devendo ser menor que 5%.

É recomendado o uso de *strain gauges* para medir o desalinhamento do corpo de prova, lembrando que a configuração da instalação desses deve ser inter-relacionada com a magnitude da tensão utilizada no ensaio de fadiga. Recomenda-se que sua instalação siga as recomendações do fabricante e também da ASTM E1012-14 (ASTM, 2014). A Figura 2.8 mostra o respectivo posicionamento do *strain gauge* para cada condição de desalinhamento mostrada na Figura 2.7, evidenciando assim os respectivos problemas de leitura para cada desalinhamento "A", "B" e "C".

Figura 2.8 – Posicionamento dos strain-gauges e desalinhamento do sistema de fixação.



Fonte: Adaptado de ASTM E1012-14 (2014).

2.2.2 Calibração Estática e Dinâmica da Célula de Carga

A calibração é fundamental no processo de medição de qualquer processo. É através desta etapa indispensável que se obtém resultados confiáveis nas medições realizadas. A calibração estática da máquina de ensaio em fadiga é realizada através da instrumentação do sistema de medição de força, utilizando para isso sua faixa nominal nos diferentes ensaios, aplica-se a carga de forma crescente sem oscilações.

Idêntica às exigências para a realização da calibração estática, a calibração dinâmica também exige a verificação do sistema no intervalo abrangendo todas as cargas e frequências que serão testados para distintos corpos de prova. Esta verificação pode ser difícil de ser realizada em uma simples operação, pois para isso, é necessário que a instrumentação abranja o intervalo de combinações entre frequência e carga.

A descrição do procedimento de calibração e sua respectiva incerteza de medição, originadas tanto na calibração estática quanto dinâmica, são descritas em distintas normas como ASTM E467-08 (ASTM, 2008), ISO DIS 4965-1 (ISO, 2011), ISO DIS 4965-2 (ISO, 2011) e ISO DIS F7500-1 (ISO, 2004). Como fonte de incerteza relacionada à calibração dinâmica cita-se: incerteza da calibração estática, rigidez do sistema (máquina de ensaios, corpo de prova e sistema de fixação), frequência de ensaio, amplitude da carga, inércia e vibrações do sistema (COSTA, 2010).

A calibração da carga dinâmica e estática aplicada no ensaio de fadiga é efetuada por meio de calibração dos dispositivos utilizados na máquina de ensaios (COSTA, 2010). As

verificações do sistema são necessárias sempre que algum problema ocorrer, afetando a precisão dos resultados.

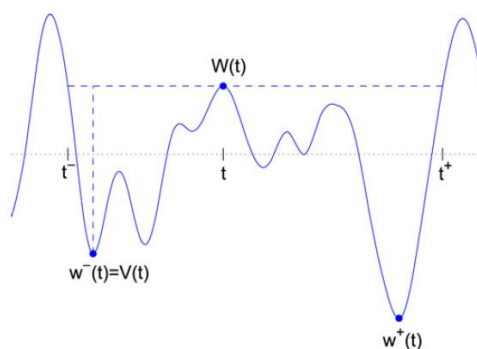
Um dos principais erros considerados inicialmente no sistema de medição é a diferença entre o valor da carga medida no corpo de prova (*strain gauge*) e o valor da carga efetivamente aplicada pela máquina de ensaios. Para que os valores sejam iguais são necessárias correções entre estes valores.

O valor da incerteza de medição da carga aplicada pode ser estimada pelo cálculo do desvio-padrão das medidas realizadas no corpo de prova instrumentado dividido pela raiz do número das observações. Considerando a incerteza da calibração estática como fonte herdada, este procedimento será utilizado considerando esta variável como uma fonte de incerteza do tipo A.

O ensaio de fadiga é um ensaio mecânico onde a tensão é oscilatória, geralmente aplicada em forma senoidal, sendo a amplitude um valor constante para cada valor de tensão. Durante os primeiros instantes do ensaio, o valor de tensão aplicado não é constante, sendo caracterizado por um processo randômico instável.

Uma das principais fontes de incerteza na calibração dinâmica é a instabilidade da tensão máxima em função do tempo, mostrado na Figura 2.9. Observa-se que o valor de tensão para cada um dos tempos: t^- , t , t^+ não é um valor idêntico para cada um destes. Mesmo com ciclo completo, o valor de tensão máximo é aleatório. Esta instabilidade ocorre durante alguns instantes iniciais, sendo esta função da carga, equipamentos utilizados e tempo de resposta deste conjunto (BENGTSSON, RYCHLIK, 2009).

Figura 2.9 – Instabilidade inicial da tensão exercida no ensaio de fadiga.

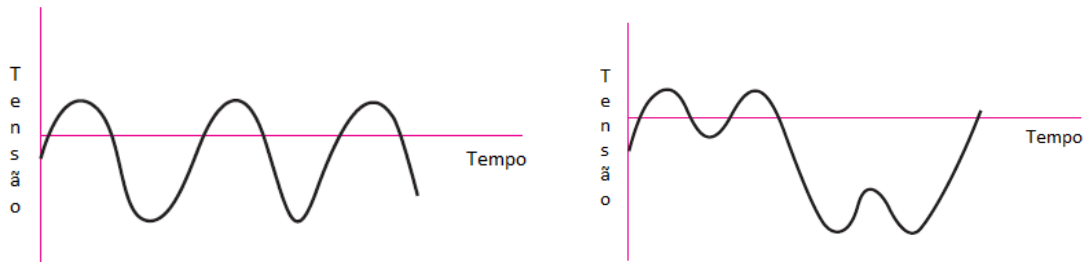


Fonte: BENGTSSON, RYCHLIK (2009).

Independente da instabilidade inicial pode ocorrer o problema da instabilidade de tensão durante o ensaio que também pode ser de forma irregular. Sendo o ciclo descrito pelo valor

máximo e mínimo de tensão, a forma da onda do sinal relativo à tensão não é importante, mas sim o valor do pico, tanto do valor máximo quanto mínimo. Na Figura 2.10 é possível verificar que para os dois gráficos, o valor de tensão mínimo e máximo são os mesmos, mas o carregamento durante o ensaio é diferente (SHIGLEY, 2006).

Figura 2.10 – Flutuação de tensão em uma curva que não possui forma senoidal perfeita.



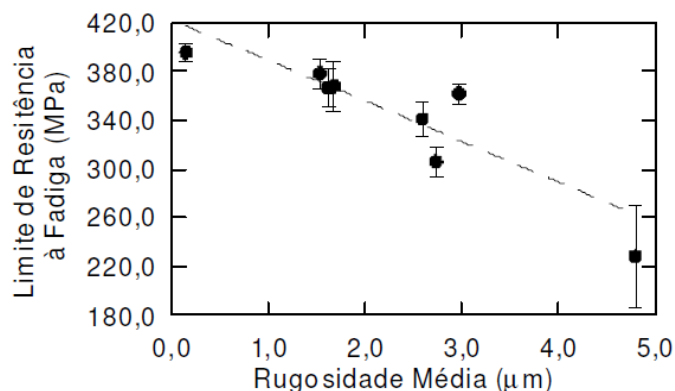
Fonte: SHIGLEY (2006).

A precisão da calibração estática é a precisão obtida do sistema para um valor de tensão sem movimento oscilatório. Já a precisão da calibração dinâmica é a precisão do pico de tensão considerando a amplitude pico a pico quando o teste é cíclico. Esta precisão é variável, pois depende do referencial utilizado como velocidade ou taxa de ciclos. De um modo geral, quanto maior a velocidade de ensaio, menor será a precisão de medida do sistema.

2.2.3 Acabamento Superficial: Rugosidade

A falha por fadiga, em muitos casos, inicia-se na superfície percorrendo para o restante do componente, isso ocorre devido a vários fatores como alta tensão na superfície exercida durante o ensaio, concentrador de tensão, corrosão, altas temperaturas e desgaste. A otimização do acabamento da superfície do material melhora a resistência global de qualquer material submetido a esforços dinâmicos (ANDREWS; SEHITOGU, 2000). Na Figura 2.11, observa-se o limite de resistência à fadiga [MPa] em função da rugosidade média do corpo de prova, de um modo geral, quanto maior a rugosidade menor será o limite de resistência à fadiga (MPa).

Figura 2.11 – Relação entre limite de resistência à fadiga e rugosidade média para aço SAE 4140.



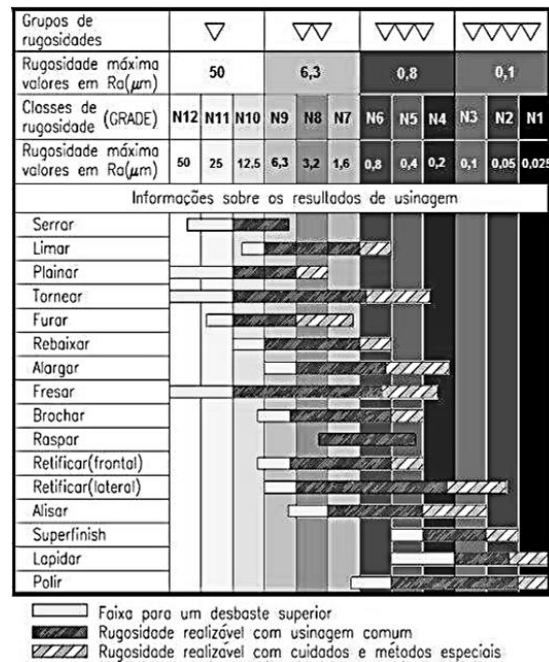
Fonte: LOPES (2006).

A vida em fadiga é sensível a rugosidade superficial. A trinca inicia pelas irregularidades superficiais, sendo perpendicular ao eixo da tensão. O tamanho, espaçamento, forma e distribuição das marcas existentes na superfície influenciam diretamente no crescimento da trinca. Ao ensaiar dois materiais: AISI 304 e AISI 316 ao ar, com acabamentos superficiais distintos, foi possível verificar que melhores acabamentos superficiais mostram maiores ciclos em fadiga antes da ruptura (NUREG/CR-6878, 2005).

Qualquer entalhe ou descontinuidade geométrica gerada a partir do método de preparação da superfície e/ou usinagem pode atuar como concentrador de tensões e sítio de iniciação (nucleação) de trinca (FROST *et al.*, 1974). Existem três fatores que descrevem a importância da escolha do processo de manufatura adequado na produção de um componente: (1) entalhes ou defeitos que podem ter sido gerados durante o processo de usinagem; (2) as características do material da superfície podem ser alteradas em função do processo de manufatura; (3) tensão residual que possa ter sido introduzida à superfície durante a preparação/usinagem da superfície (FROST *et al.*, 1974).

A Figura 2.12 mostra um comparativo entre os processos de usinagem e sua respectiva rugosidade obtida na superfície. Destaca-se que, para o mesmo processo de usinagem, o valor de rugosidade é expresso sob um intervalo, considerando o desbaste superior, usinagem comum e usinagem sob cuidados especiais. É possível obter mesmos valores de rugosidade submetendo o material a distintos métodos de usinagem.

Figura 2.12 – Rugosidade da superfície em função do processo de usinagem.



Fonte: Adaptado de NISTIR 89-4088 (1990).

Mesmo que a Figura 2.12 mostre a relação entre processos de usinagem com respectivo valor de rugosidade médio, é um desafio relacionar o limite de fadiga com o processo de usinagem, sendo que há valores de incerteza em cada uma das medições de rugosidade. Uma estimativa da incerteza de medição para o limite de fadiga é mostrada na Tabela 2.4, nessa tabela o valor da incerteza de medição foi determinado para dois materiais distintos: aço com 0,49% de carbono e ferro com pureza acima de 99%.

Tabela 2.4 – Incerteza no limite de fadiga em função do acabamento da superfície.

Processamento – Acabamento Superficial	Limite de Fadiga ($\frac{MN}{m^2}$)	
	Aço 0,49% C	Ferro com elevada pureza (min 99%)
Torneamento grosseiro	± 282	± 154
Torneamento fino	± 294	± 167
Lixamento circunferencial	± 316	-
Polimento longitudinal (polimento fino)	± 340	± 185
Polimento longitudinal (polimento grosseiro)	± 352	-

Fonte: Adaptado de FROST *et al.* (1974).

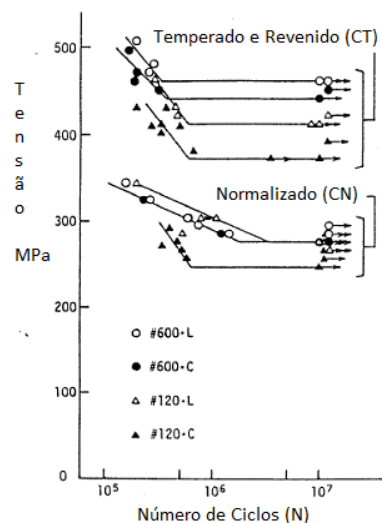
Conforme mostrado na Tabela 2.4 com base na Figura 2.12, por semelhança de processos, quanto pior o acabamento do processo observa-se o valor decrescente no valor da

rugosidade R_a . Entretanto, verificou-se que para processos de usinagem com melhor acabamento (menor valor de R_a) obtêm-se maior incerteza de medição no limite de fadiga.

A rugosidade pode ser medida tanto longitudinalmente quanto transversalmente, geralmente é expressa ao longo do comprimento da superfície transversal do corpo de prova, expresso pelo centro da linha média (CLA). Para aço carbono, submetido ao torneamento fino ou lixamento fino, o valor de CLA é em torno de $0,125 \mu\text{m}$, sendo que para superfície somente torneada o valor de CLA varia entre $0,75 - 1,25 \mu\text{m}$. Para mesmo material, observa-se uma pequena diferença no valor do limite de fadiga para corpos de prova com lixamento fino (CLA $- 0,125 \mu\text{m}$) e corpos de prova polidos mecanicamente (CLA $- 0,06 \mu\text{m}$) submetidos ao ensaio de fadiga rotacional (NISITANI; IMAI, 1985).

A Figura 2.13 mostra um aço carbono com 0,45% de carbono submetido a um ensaio de fadiga rotacional. Foram realizados estudos da influência de dois acabamentos superficiais com lixa #120 e #600 para direções longitudinais (L) e transversais (C) e todas as condições seguidas de polimento eletrolítico. A rugosidade é maior nas amostras 120C, 120L, 600C e 600L respectivamente. Conclui-se que a tensão submetida para mesmo número de ciclos é menor para corpos de prova com pior acabamento superficial e direções de lixamento transversais (NISITANI; IMAI, 1985).

Figura 2.13 – Ensaio de Fadiga em corpos de prova submetidos a distintas direções de lixamento.

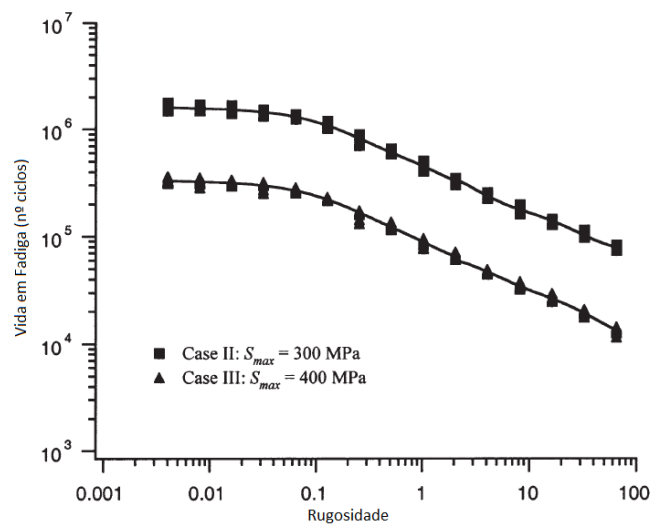


Fonte: NISITANI; IMAI (1985).

Ainda relacionando a Figura 2.13, para o mesmo aço carbono foram comparados dois tratamentos térmicos distintos (revenido e temperado; normalizado), independente do processo de acabamento, o tratamento térmico sobrepõe suas características. Além disso, o lixamento realizado com lixas com menor granulometria suporta maior tensão [MPa] para mesmo número de ciclos sob mesmo tratamento térmico. Observa-se também que o lixamento em relação a seção longitudinal suporta maior tensão no ensaio de fadiga do que o lixamento realizado em relação à seção transversal. Lixamento grosseiro reduz o limite de fadiga entre 10 a 25 %, já corpos de prova torneados reduzem em torno de 10% no limite de fadiga (FROST *et al.*, 1974).

Os efeitos das características da superfície usinada em relação ao limite de fadiga podem ser determinados através de distintas simulações computacionais. O limite de fadiga pode ser determinado pelo número de ciclos em que a primeira trinca alcança o tamanho crítico. Resultados mostraram que a vida em fadiga é grandemente alterada quando o valor da rugosidade exceder 0,1 μm (ANDREWS; SEHITOGU, 2000). A Figura 2.14 mostra o efeito da rugosidade para o aço SAE 4340 submetidos a distintas tensões (300 MPa e 400 MPa), em resumo, quanto maior a rugosidade menor será a vida em fadiga.

Figura 2.14 – Relação entre rugosidade e vida em fadiga (número de ciclos) para o aço SAE 4340.



Fonte: ANDREWS; SEHITOGU (2000).

Mostra-se também na Figura 2.14 que para rugosidades menores que 0,1 μm , a vida em fadiga praticamente não se altera com o aumento da rugosidade. No entanto, para rugosidades acima de 0,1 μm , o número de ciclos suportados depende da rugosidade de forma inversamente

proporcional. Também é possível verificar que a forma da curva é a mesma tanto para 300 MPa quanto 400 MPa (ANDREWS, 2000).

A rugosidade superficial pode ser determinada experimentalmente através de equipamentos como perfilômetro ou rugosímetro (mais utilizado). O seu valor pode ser expresso por: R_a , R_z e R_y , sendo que a diferença entre cada parâmetro é o modo através do qual seu valor é determinado. A linha média é a linha do perfil de rugosidade que é disposta paralelamente à direção da superfície, com o comprimento determinado de tal forma que a soma das áreas superiores sejam iguais às inferiores (JIS B0601 (JIS,1994)).

Os aços inoxidáveis austeníticos são materiais que apresentam grande dificuldade para usinagem devido à baixa condutividade térmica, alta sensibilidade à tensão e encruamento. A baixa condutividade térmica acarreta uma zona de concentração de calor no ponto de corte e altas temperaturas localizadas ao longo da superfície. Com base em teorias de elementos finitos, é possível desenvolver um modelo numérico para a usinagem do SAE 316L, com objetivo de prever a tensão residual gerada por cada parâmetro de corte. Verifica-se que o corte sequencial tende a aumentar a tensão residual na superfície (OUTEIRO *et al.*, 2006).

2.2.4 Composição Química e Microestrutura

Sabe-se que as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos são sensíveis à variação tanto da composição química quanto da microestrutura (tamanho de grão e porcentagem de ferrita delta) (DI SCHINO; KENNY, 2003).

Irvine, Gladman citados por PADILHA;GUEDES, 2004, realizaram ensaio de tração em distintos aços inoxidáveis austeníticos em temperatura ambiente (PICKERING,1971), obtiveram a Equação 2.6, descrevendo o limite de escoamento em função da composição química, diâmetro médio dos grãos (d) e fração volumétrica de ferrita- δ ($\% \delta$), obtido em $[\frac{ton}{pol^2}]$:

$$Lim.Escoamento = 4,1 + 32(\%N) + 23(\%C) + 1,3(\%Si) + 0,24(\%Cr) + 0,94(\%Mo) + 1,2(\%V) + 0,29(\%W) + 2,6(\%Nb) + 1,7(\%Ti) + 0,82(\%Al) + 0,46(d^{-1/2}) + 0,16(\% \delta) \quad \text{Equação 2.6}$$

MC GUIDE (2008) mostra que é possível estimar a tensão de escoamento em material recozido relacionando com a composição química e microestrutura, considerando o limite de escoamento como 0,2% para aços inoxidáveis austeníticos em [MPa], conforme Equação 2.7.

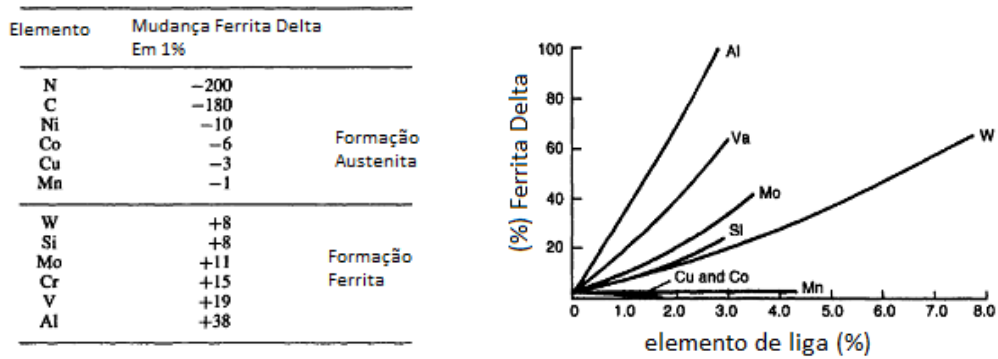
$$Lim.Escoamento = 15,4 * \left[\begin{array}{l} 4,4 + 23(\%C) + 32(\%N) + 1,3(\%Si) + 0,24(\%Cr) + 0,94(\%Mo) \\ 1,2(\%V) + 0,29(\%W) + 2,6(\%Nb) + 1,7(\%Ti) + 0,82(\%Al) + \\ 0,16(\%\delta) + 0,46d^{-1/2} \end{array} \right] \text{Equação 2.7}$$

Conforme indicado na Equação 2.7, a presença dos principais elementos de liga aumenta o limite de escoamento do material. Esta alteração no limite de escoamento ocorre devido a alteração de cada elemento químico na microestrutura, formando carbonetos, fases intermetálicas e/ou nitretos. A forma, distribuição e proporção destes elementos são decisivos no seu comportamento frente a esforços mecânicos, além da presença da ferrita- δ (ISHIDA, 2009).

A microestrutura que apresenta maior resistência à iniciação da trinca em fadiga não necessariamente é a mais desejável para a propagação da trinca em fadiga. Para o comprimento da trinca crítico da ordem do tamanho de um grão, verifica-se a influência da microestrutura na vida em fadiga. Entretanto, a partir do aumento do tamanho crítico da trinca, a microestrutura não afeta mais seu crescimento, seu comportamento depende também de outros fatores (NISITANI; IMAI, 1985).

Para ligas suscetíveis a estabilização da ferrita- δ , este fator está condicionado a composição química da liga, homogeneidade química e conformação mecânica a quente. Em especial, as ligas que possuem baixo carbono: AISI 304L, 316L, possuem baixa tendência a sensitização, mas grande tendência à estabilização da ferrita- δ (ASM, 1987). A Figura 2.15 mostra a tendência de formação de ferrita- δ relacionada à tendência ferritizante e autenitizante de cada elemento de liga, existem elementos de liga que influenciam de forma positiva (favorecem a formação de ferrita- δ) e negativa (prejudicam a formação de ferrita- δ). Destaca-se a tendência negativa do nitrogênio e carbono na formação da ferrita- δ . Além disso, a Figura 2.15 mostra a relação entre a porcentagem de elemento de liga e formação da ferrita delta.

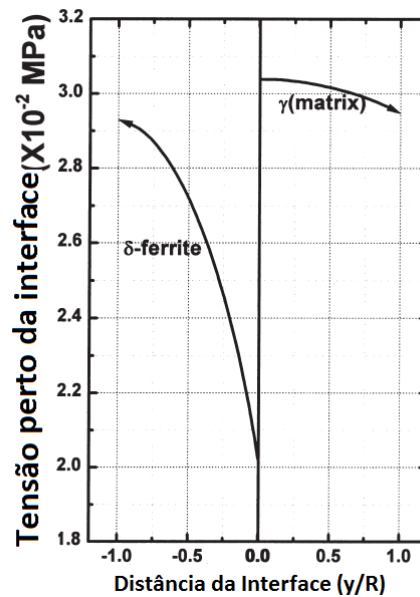
Figura 2.15 – Efeito de elementos de liga na estrutura do aço 17% Cr 4% Ni.



Fonte: LLEWELLYN (1994).

O efeito da ferrita- δ em aço AISI 304L para baixo ciclo de fadiga mostra que para corpos de prova onde a fase ferrita- δ estiver alinhada ao longo do eixo de tensão possui menor vida em fadiga do que corpos de prova que estão paralelas ao eixo de tensão, devido a interface entre a matriz e a ferrita- δ . A interface é o sítio de iniciação a trinca em fadiga. Conforme demonstrado na Figura 2.16 ocorre uma redução da resistência mecânica na interface entre a matriz e a ferrita- δ (RHO *et al.*, 2000).

Figura 2.16 – Tensão calculada ao longo da interface matriz e ferrita- δ para tensão axial determinada através do método de elementos finitos.



Fonte: RHO *et al.* (2000).

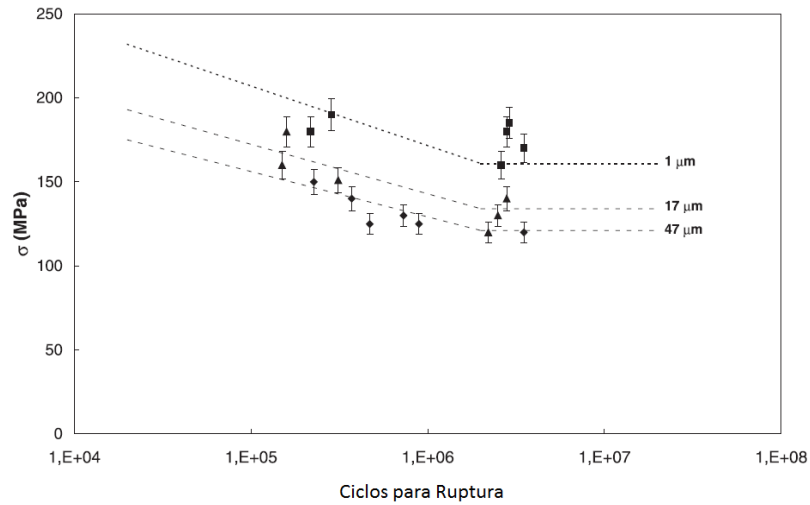
Como mostra a Figura 2.16, a ferrita- δ trabalha como um sítio de nucleação de trinca isso devido a redução da resistência mecânica na região. Recomenda-se que o teor de ferrita- δ seja menor que 5% na matriz metálica (LLEWELLYN, 1994). A morfologia e a porcentagem de ferrita- δ depende da composição química do material (relação entre Cr/Ni) e da velocidade de resfriamento.

Sabendo-se que o tamanho de grão influencia decisivamente na resistência a fadiga, o refino do grão em ligas metálicas tem sido buscado em projetos na engenharia (PLEKHOV *et al.*, 2011). Além disso, é possível utilizar outros meios para aumentar a resistência mecânica: técnicas como eletrodeposição, *Ball milling*, deformação plástica severa e compactação de nanopartículas. Com estes métodos é possível obter tamanho de grão da ordem de 100 *nm*, e em alguns casos abaixo de 5 *nm*. Estes materiais com grãos mínimos são chamados de nanoestruturados ou metais com grãos ultrafinos. O menor tamanho de grão promove um retardamento na nucleação da trinca (UENO *et al.*, 2011).

O efeito do contorno de grão relacionado a distribuição e configuração geométrica na microestrutura influencia diretamente na propagação da trinca e do tamanho da trinca em fadiga de aços inoxidáveis austeníticos. Sendo assim, a propagação da trinca em fadiga pode ser controlada pela otimização de parâmetros como a conectividade entre contornos de grãos e distribuição do plano de orientação do contorno de grão na microestrutura de materiais policristalinos (KOBAYASHI *et al.*, 2010).

O efeito do tamanho do grão no limite de fadiga para o aço inoxidável AISI 304 foi estudado por DI SCHINO; KENNY (2003). Três corpos de prova foram submetidos a três tratamentos térmicos diferentes (tempo e temperaturas distintos) com o objetivo de obter distintos tamanhos de grão austenítico: 1, 17 e 47 μm . Os dados apresentados na Figura 2.17 mostram que para mesmo número de ciclos, quanto menor for o tamanho de grão, maior será a tensão suportada no ensaio de fadiga (SEGHIR, 2012). Assim, mostra-se o efeito benéfico na resistência à fadiga ao reduzir o tamanho de grão (DI SCHINO; KENNY, 2003).

Figura 2.17 – Resistência a fadiga para AISI 304 com distintos tamanhos de grão: 1, 17 e 47 μm .

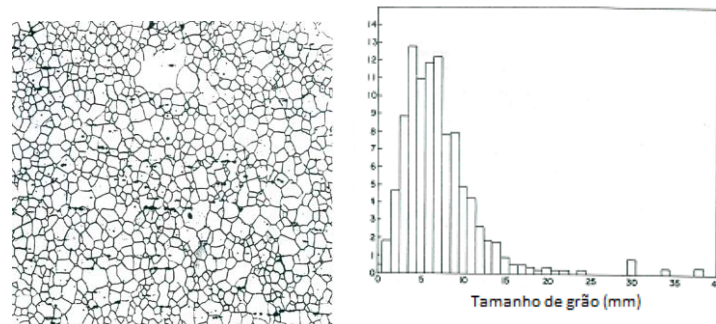


Fonte: DI SCHINO; KENNY (2003).

Na Figura 2.17 é possível verificar a relação entre o tamanho de grão e o número de ciclos suportados para uma tensão qualquer. No entanto, o tamanho de grão médio descrito nessa figura precisa ser determinado de forma que represente este material. Sabe-se que qualquer material metálico possui grãos dos mais variados diâmetros (CALLISTER, 2009).

Assim, para demonstrar esta dispersão referente ao tamanho de grão, Vander Voort (1984) mostrou para um aço duplex, um histograma representativo do tamanho de grão para sua microestrutura (Figura 2.18). Na Figura 2.18, à esquerda mostra-se uma imagem da microestrutura desse aço duplex e à direita é representado o referente histograma relativo a porcentagem e valores obtidos nessas medições. É possível verificar a aproximação destas medidas por uma distribuição de probabilidade log-normal.

Figura 2.18 – Histograma relativo as medições do tamanho de grão para aço duplex.



Fonte: Adaptado de Vander Voort (1984).

2.2.5 Outros fatores relacionados a incerteza de medição no ensaio de fadiga

Entre outros fatores, a frequência influencia sobre a vida em fadiga, estando associada ao ambiente ao qual o material sofre fadiga. Para valores de frequência em torno de 25Hz sob atmosfera padrão não há influência significativa deste parâmetro sobre a vida em fadiga (FROST *et al.*, 1974).

Em ensaios de fadiga realizados em temperatura ambiente, o valor da frequência não muda significativamente a vida em fadiga, se o valor de frequência for menor que 200 Hz. Para aço carbono 0,2%C, com uma vida em fadiga de 10^7 ciclos, não há diferença significativa no comportamento do material, se o valor de frequência estiver entre 13 Hz e 250 Hz (FROST *et al.*, 1974).

Para frequências maiores que 200 Hz, o limite de fadiga geralmente aumenta com o aumento da frequência. No entanto, alguns dados mostram que existe um limite de frequência ao qual o material pode suportar, acima deste limite, o material tende a diminuir o seu limite de fadiga (FROST *et al.*, 1974).

Já em relação à razão de carregamento (R) utilizada durante o ensaio, quanto maior sua razão maior será a solicitação exigida do material. Na prática, mesmo mantendo-a constante, o valor da tensão média pode variar. Quanto maior for o valor da razão de carregamento (R), maior será o seu deslocamento em direção ao eixo horizontal (BELTRÃO, 2005). Para o cálculo serão utilizadas as Equações 2.8 e 2.9:

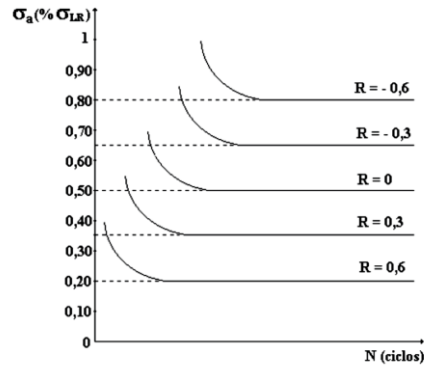
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad \text{Equação 2.8}$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad \text{Equação 2.9}$$

Sendo σ_m a tensão média utilizada no ensaio e R= razão entre tensões mínima σ_{\min} e tensão máxima σ_{\max} .

A Figura 2.19 mostra a influência da razão de carregamento em função do número de ciclos em fadiga. Observa-se que quanto maior for o módulo da razão de carregamento, menor será a tensão suportada para mesmo número de ciclos. O gráfico mostra a tensão do ensaio de fadiga proporcional à tensão de escoamento do material. Já para o gráfico demonstrado na direita, observa-se a influência da tensão média no ensaio de fadiga (COSTA, 2010).

Figura 2.19 – Influência da razão de carregamento sobre a curva S-N para um aço microligado.



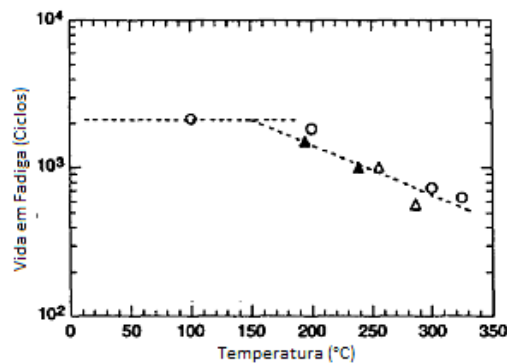
Fonte: COSTA (2010).

2.2.6 Influência de outros fatores secundários

A temperatura e umidade atmosférica são consideradas no caso em que o material metálico sofre influência da atmosfera, como materiais susceptíveis a corrosão, como o aço carbono, por exemplo. Para ensaios realizados em temperatura ambiente e umidade em torno de 60 %, a influência destes dois parâmetros serão considerados desprezíveis para material estudado: aços inoxidáveis (NUREG/CR-6815, 2003).

Resultados apresentados indicam que a vida em fadiga para aços inoxidáveis austeníticos ensaiados ao ar, independe da temperatura, se for abaixo de 427°C (NUREG/CR-6878, 2005). Já para KEISLER *et al.* (1996), se o aço AISI 304 e AISI 316 for ensaiado a temperaturas entre 25°C e 450°C, a vida em fadiga dos aços, ao ar, não dependem da temperatura. Na Figura 2.20 é possível verificar a vida em fadiga para distintas temperaturas de ensaio em um aço AISI 316. Através da análise dos dados, temperaturas abaixo de 150°C não apresentam variações significativas no limite de fadiga.

Figura 2.20 – Vida em fadiga do AISI 316 para ensaios realizados a distintas temperaturas.



Fonte: NUREG/CR-6815 (2003).

Verifica-se na Figura 2.20, a redução da vida em fadiga a partir da temperatura de 150°C, havendo assim, uma diferença significativa deste valor de temperatura dependendo da referência bibliográfica considerada no projeto de cada componente. Além disso, o efeito da tensão utilizada no ensaio pode ser alterada caso a temperatura de ensaio seja maior do que 400°C (fluência). Variações na taxa de deformação entre 0.4 a 0,008% não demonstra efeito em aços inoxidáveis austeníticos para temperaturas acima de 400°C (NUREG/CR-6878, 2005).

A área da seção transversal também influencia significativamente o valor da tensão e conseqüentemente o número de ciclos suportados. O limite de fadiga tende a diminuir com o aumento do diâmetro, relacionando a tensão utilizada no ensaio. Para ensaio de fadiga com nível de tensão completamente inversa e a superfície do corpo de prova submetido ao polimento mecânico para aço níquel-cromo (aço inoxidável) dentro do intervalo de diâmetro entre 4,8 a 33 mm, o limite de fadiga é independente do diâmetro (FROST *et al.*, 1974).

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material utilizado neste trabalho é o aço inoxidável AISI 316 L, pois além de possuir estabilidade dimensional, apresenta ótima resistência à corrosão nos mais distintos ambientes. Considerando as diversas etapas de preparação necessárias para o ensaio de fadiga, desde sua usinagem, preparação de superfície e propriamente o ensaio de fadiga, a resistência à corrosão reflete no impedimento do surgimento de pites superficial, o que prejudicaria o desempenho do material frente a esforços dinâmicos (AKITA; TOKAJI, 2006).

É importante lembrar que o aço inoxidável AISI 316L não é endurecível por tratamento térmico. Seu aumento de resistência mecânica é obtido através de deformação a frio chamado encruamento ou por transformação martensítica ocorrida em fadiga de baixo ciclo (SANTOS, 2006). O encruamento ocorre através da deformação do material provocando o aumento da densidade de discordâncias na microestrutura e por consequência alterando a dureza do material (HARVEY, 1982; CALLISTER, 2009).

Em relação a matéria-prima usada, essa foi produzida pela siderúrgica Gerdau S/A, sendo fornecida em barra laminada redonda, solubilizado, descascado e polido, com rastreabilidade pelo certificado de qualidade nº 555310, lote 88194710 e corrida 12.341.667. Com bitola de 22,23 mm para uma temperatura de solubilização de 1080°C durante 1 hora, com temperatura de início de 25°C e final 50°C e dureza no produto final de 150 HB, limite de resistência de 585 MPa, limite de escoamento de 325 MPa, alongamento de 60% e estrição de 75%, conforme dados indicados no mesmo certificado.

Para a determinação da incerteza de medição no ensaio de fadiga é necessário um estudo estatístico com base em várias medidas realizadas em distintos corpos de prova. Ressalta-se a importância da variabilidade das amostras, pois os corpos de prova possuem inúmeros fatores mecânico-metalúrgicos que influenciam no seu comportamento (SOUZA, 1982). Será realizado este estudo a partir do mesmo lote ou corrida do material metálico, para que sejam minimizados o efeito dessas variáveis. O número de corpos de prova aos quais serão estudados, atenderão as exigências da norma ASTM E739-10 (ASTM, 2010) e foram descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Número de corpos de prova em função da análise de resultados no ensaio de fadiga.

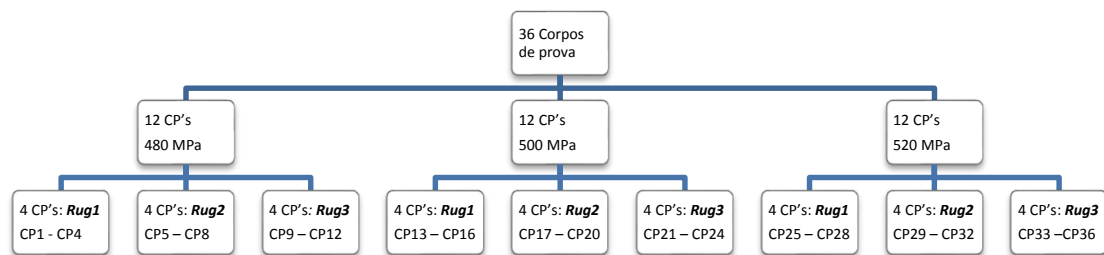
Análise de resultados	Número recomendado de corpos de prova
Análise preliminar do material	6 a 12
Pesquisa e desenvolvimento de componentes	6 a 12
Dados utilizados em projeto de componentes	12 a 24
Dados usados com confiabilidade estatística	12 a 24

Fonte: Adaptado de ASTM E739-10 (2010).

Conforme descrito na Tabela 3.1, para garantir a confiabilidade estatística de um projeto serão necessários ensaiar de 12 a 24 corpos de prova. Para este projeto serão ensaiados 36 corpos de prova: distribuídos em 3 grupos com 12 corpos de prova cada. Cada grupo será ensaiado para um valor de tensão determinado inicialmente para três níveis de rugosidade.

Como um dos objetivos específicos deste estudo é verificar a influência da rugosidade em função do número de ciclos, cada grupo de corpos de prova será distribuído para 3 níveis de rugosidade: Ru1_{#800p}, Ru2_{#500} e Ru3_{#320}. Sendo Ru1_{#800p}: lixamento com lixa #800 e polimento com pasta de diamante de 6 µm, Ru2_{#500}: lixamento com lixa #500 isento de polimento e, Ru3_{#320}: lixamento com lixa #320 e isento de polimento. Para facilitar o entendimento, a Figura 3.1 mostra a distribuição dos corpos de prova e seus respectivos níveis de rugosidade.

Figura 3.1 – Distribuição dos corpos de prova para diferentes níveis de rugosidade.



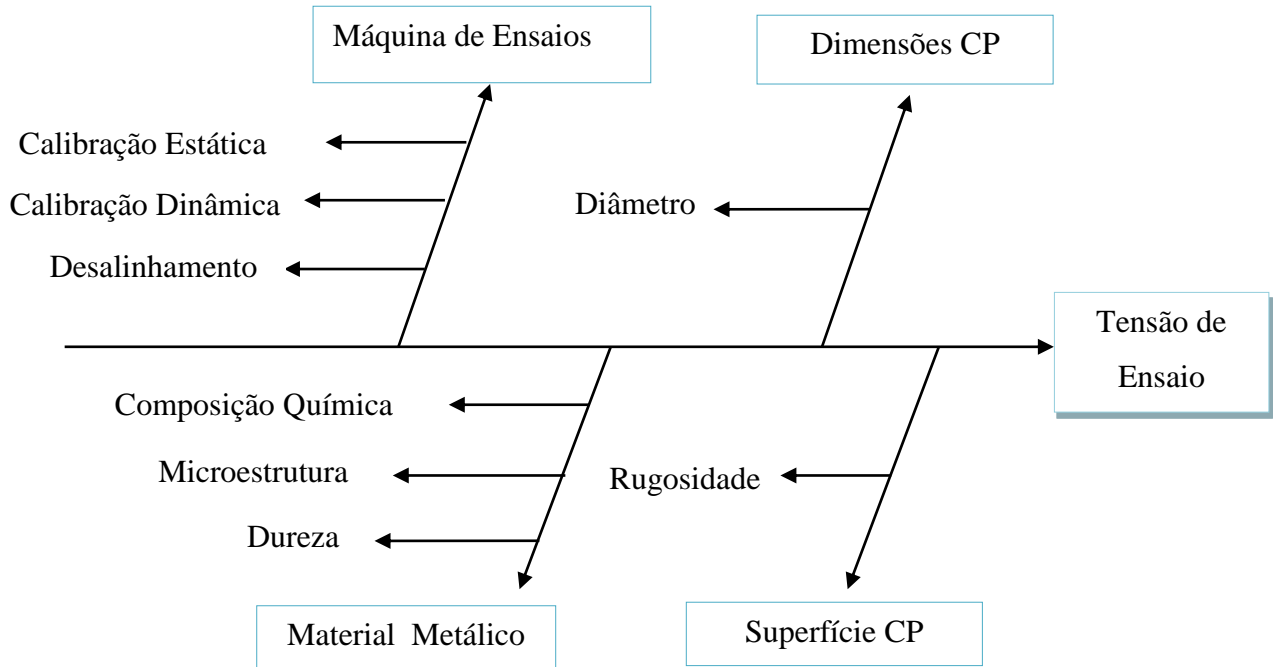
Conforme mostrado na Figura 3.1, a mesma carga será distribuída em três níveis de rugosidade, de outra forma, mesmo intervalo de rugosidade será ensaiada em três tensões distintas.

Como o objetivo principal desta pesquisa é determinar a incerteza de medição no ensaio de fadiga através do método de Monte Carlo, o primeiro passo é listar as principais fontes de incerteza.

Nessa pesquisa será determinada a incerteza de medição expandida para o número de ciclos suportados pelo material e também para o valor da tensão de ensaio considerando a influência da rugosidade superficial, a qual será chamada de tensão corrigida. O cálculo da incerteza de medição expandida será realizado para cada valor da tensão de ensaio e cada intervalo de rugosidade. Estes parâmetros foram escolhidos para que possam ser comparados aos valores de incerteza de medição obtidos por COSTA (2010).

Para a listagem de todas as fontes de incerteza as quais influenciam na incerteza de medição relacionadas ao valor da tensão de ensaio, utilizou-se o diagrama espinha de peixe para sua organização. O diagrama espinha de peixe ou diagrama Causa-Efeito é uma representação gráfica de todas as possíveis causas que levam a um determinado problema (ISNARD *et al.*, 2010). Na Figura 3.2, representa-se o diagrama espinha de peixe relacionando algumas fontes de incerteza na determinação deste parâmetro, classificado em 3 grandes grupos: Máquina de Ensaio, Dimensões do Corpo de Prova e Material Metálico.

Figura 3.2 – Diagrama Espinha de Peixe relacionando as fontes de incerteza relacionadas à tensão de ensaio.



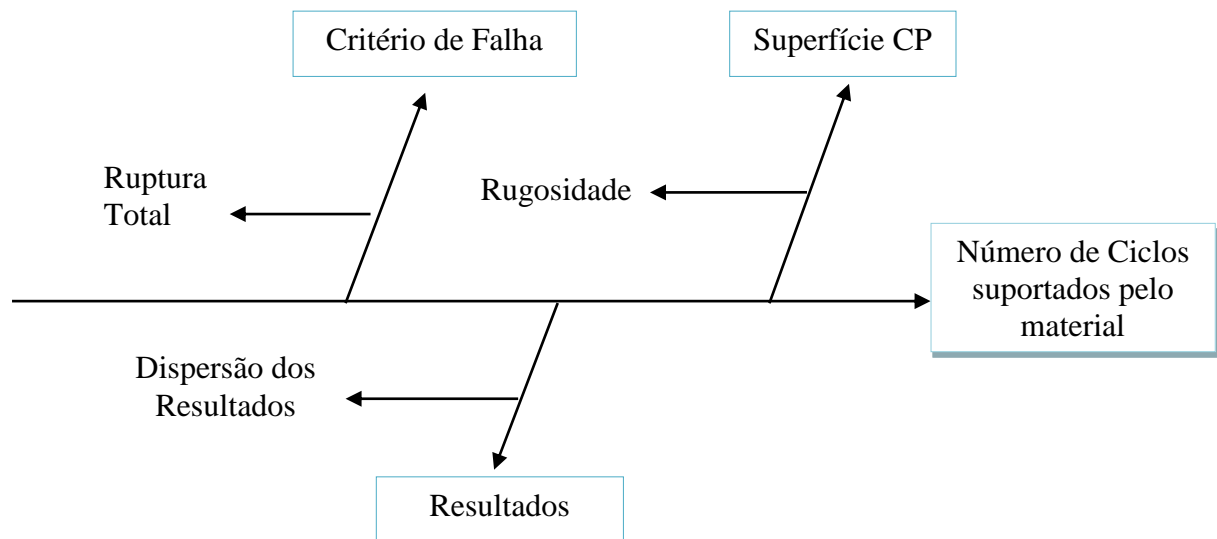
A classificação mostrada na Figura 3.2 facilita a organização tanto experimental quanto matemática. Através do planejamento dos experimentos, verificou-se algumas limitações em relação à função matemática utilizada na determinação do mensurando: tensão corrigida. Isso

ocorre devido ao modelo matemático utilizado (FKM-Guideline, 2003), em que nem todas as fontes de incerteza listadas na Figura 3.2 serão utilizadas nesse modelo.

Assim, nas variáveis relacionadas à “Máquina de Ensaios” serão realizadas verificações comparando medições experimentais com os valores determinados por norma. Já as fontes de incerteza relacionadas ao item “Material Metálico”: Composição química, microestrutura – tamanho de grão e microestrutura – ferrita delta serão utilizados no cálculo da tensão de escoamento teórico com o uso do Método de Monte Carlo. E, finalmente, as fontes de incerteza: dureza, rugosidade e diâmetro serão consideradas no cálculo da tensão corrigida média e também no valor da incerteza de medição expandida desse mesmo valor conforme descrito no FKM-Guideline (2003).

Para o cálculo da incerteza do número de ciclos para o ensaio de fadiga, foram listadas as fontes de incerteza descritas na Figura 3.3. Este diagrama espinha de peixe está baseado nas fontes listadas por COSTA (2010).

Figura 3.3 – Diagrama Espinha de Peixe relacionando as fontes de incerteza para o número de ciclos suportado pelo material.



Fonte: COSTA (2010).

Já a incerteza no número de ciclos, apresentada na Figura 3.3, pode ser determinada de duas formas: considerando a dispersão dos resultados constante para todos os níveis de tensão assim a incerteza de medição terá um valor único para qualquer tensão ou determinar um valor de incerteza de medição para cada valor de tensão (COSTA, 2010). Nesta tese será calculada a

incerteza de medição para o número de ciclos em cada valor de tensão para cada nível de rugosidade.

Os diagramas espinha de peixe apresentados nas Figuras 3.2 e 3.3 não descartam a influência de outros parâmetros na determinação da tensão e do número de ciclos, como por exemplo outros intervalos de rugosidade, propriedades físicas-químicas relacionadas ao material metálico entre outros.

O número de ciclos é função da tensão ao qual o material é submetido. Apesar de que seja possível relacionar matematicamente a tensão e o número de ciclos, ao realizar o ensaio de fadiga não é possível realizar um projeto experimental inverso, ou seja, determinar inicialmente o número de ciclos em que ocorrerá a ruptura e posteriormente determinar exatamente a tensão necessária para que a ruptura ocorra, conforme descrito por ASTM E739-10 (ASTM, 2010).

Para cada fonte de incerteza será utilizado um sistema de medição adequado aos valores relacionados à fonte de incerteza. A Tabela 3.2 mostra cada uma das fontes de incerteza e o sistema de medição a ser utilizado nesse projeto (manual ou eletrônico). Em um sistema de medição em que a influência do operador seja considerável, será necessário o estudo de R&R (Repetitividade & Reprodutibilidade).

Tabela 3.2 – Fontes de Incerteza e sua respectiva relação com sistema de medição utilizado.

Variável	Fonte de incerteza	Mensurando	Sistema de Medição	R&R	
Ensaio	Desalinhamento	Tensão	Eletrônico	Não	
	Calibração Estática	Tensão	Eletrônico	Não	
	Calibração Dinâmica	Tensão	Eletrônico	Não	
Vida em Fadiga	Preparação	Diâmetro	Tensão	Manual	Sim
		Rugosidade	Número de Ciclos	Eletrônico	Não
	Material	Composição Química	Tensão	Eletrônico	Não
		Microestrutura (Tamanho de Grão)	Tensão	Manual - preparação Análise -eletrônico	Não
		Microestrutura (% de Ferrita Delta)	Tensão	Manual - preparação Análise -eletrônico	Não

A partir dos dados mostrados na Tabela 3.2, verifica-se a importância da realização do estudo de repetitividade e reprodutibilidade (R&R) para a fonte de incerteza: Diâmetro. As outras fontes de incerteza possuem um processo de medição eletrônico ou automático, sendo

que sua variação relativa a reprodutibilidade será desprezada. Isso porque no sistema de medição eletrônico ou automático não existe ou é muito pequena a influência do operador (FRANK, 2013).

O estudo de R&R para o diâmetro dos corpos de prova será desenvolvido a partir de 3 medidas realizadas pelo mesmo técnico, com mesmo instrumento para 36 corpos de prova, assim verifica-se a repetitividade. Já para a determinação da reprodutibilidade, será determinada pela medição sob mesmas condições por outro técnico. Ressalta-se a importância da certificação NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2005) ao qual o Laboratório de Metalurgia Física-LAMEF é acreditado, assim, os técnicos que participaram desta etapa possuem treinamento para o uso, operação e manutenção do micrômetro.

Para cada uma das fontes de incerteza é necessário realizar um número de medições para que se possa estimar seu valor médio e respectivo desvio padrão para esta amostragem. Para que a estimativa do valor médio e o desvio padrão da amostragem seja igual aos valores médios da população, seria necessária a realização de um número infinito de medições.

No entanto, torna-se inviável a realização de infinitas medições, assim o GUM 2008 indica a relação entre o desvio-padrão de um número de medidas em função do desvio-padrão para infinitas medidas, conforme Equação 3.1. A *Razão_entre_desvios_padrao(%)* é calculada pela razão entre desvio padrão do desvio padrão em função de cada amostragem \bar{q} de n observações independentes de uma variável aleatória com distribuição de probabilidade normal q . A grandeza $s(\bar{q})$ é uma estimativa, com base no desvio padrão da distribuição de probabilidade de (\bar{q}) , seria obtido se a medição fosse repetida infinitas vezes. A Tabela 3.3 mostra alguns valores calculados para a *Razão_entre_desvios_padrao(%)*.

$$Razão_entre_desvios_padrao(\%) = \frac{\sigma[s(\bar{q})]}{\sigma(\bar{q})} \quad \text{Equação 3.1}$$

Tabela 3.3 – Desvio-padrão da amostra relativa ao desvio-padrão de uma variável aleatória com distribuição normal.

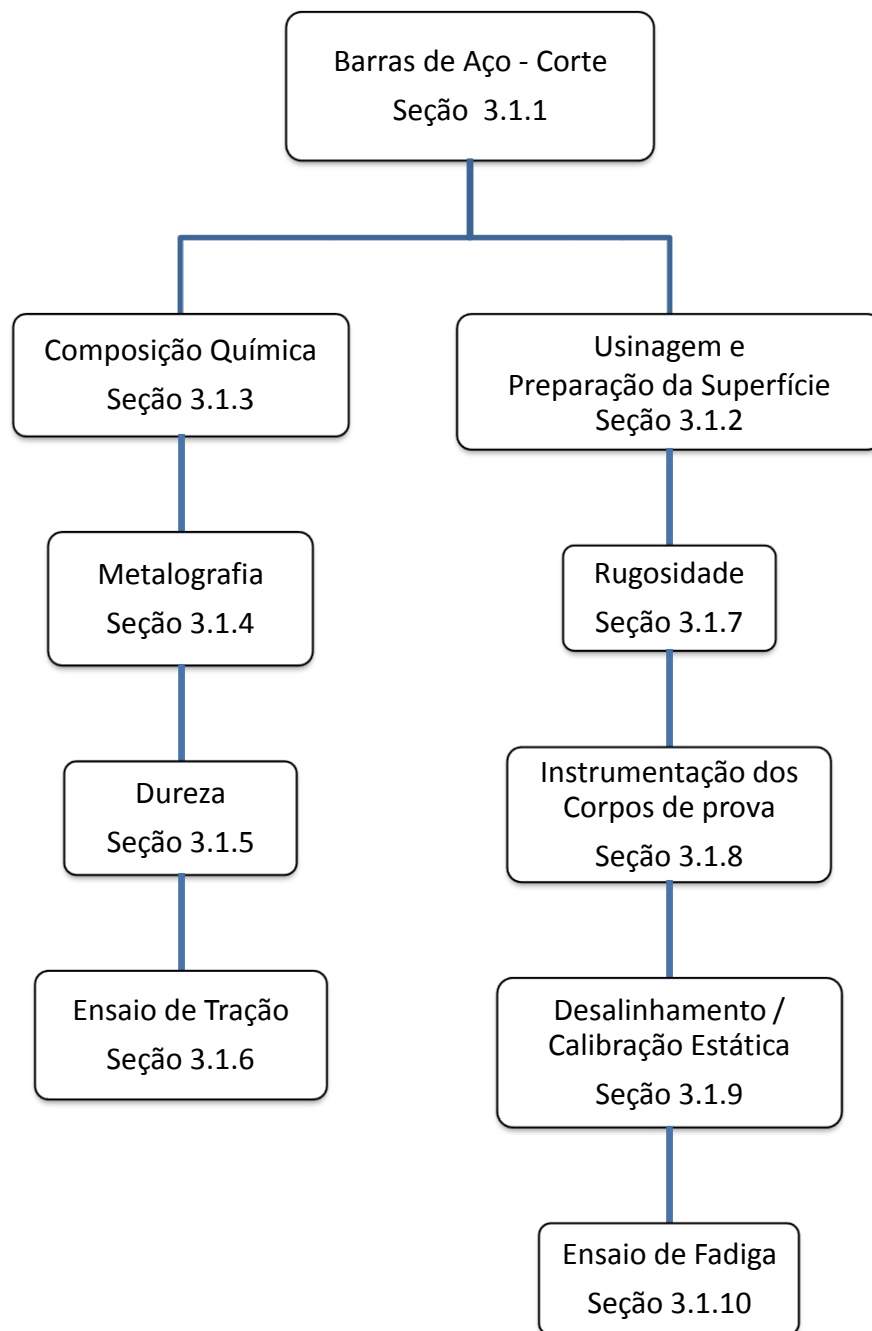
Número de observações	<i>Razão _entre _desvios _padrão(%)</i>
2	76
3	52
4	42
5	36
10	24
50	10

Fonte: Adaptado de GUM (2008).

Conforme a Tabela 3.3, quanto maior o número de medições, menor será o desvio entre a amostra e o universo (infinitas medições). Assim, foi determinada a realização de cinco (05) medições para cada fonte de incerteza em cada corpo de prova, considerando uma variável aleatória com distribuição normal conforme recomendação do GUM (2008). Sendo assim, a *Razão _entre _desvios _padrão(%)* será estimada em 36%.

A fim de ilustrar o caminho metodológico que será percorrido nesta pesquisa, apresenta-se a Figura 3.4 que representa de forma simbólica a relação entre ensaios realizados e suas respectivas fontes de incerteza. Para cada ensaio realizado será nomeado a respectiva seção descrita no Procedimento Experimental. Observa-se a realização de duas frentes de trabalho, onde uma é relacionada ao ensaio de fadiga e outra relacionada aos ensaios mecânicos.

Figura 3.4 – Descrição das etapas realizadas para a obtenção dos resultados.



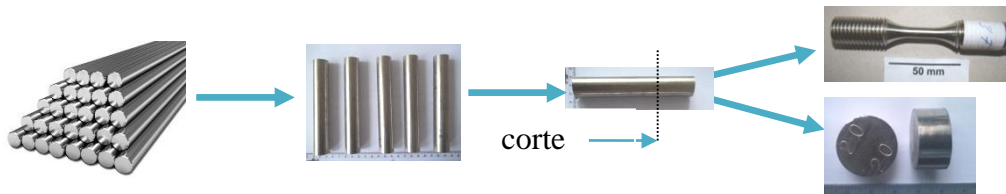
Alguns comentários relacionados a calibração dinâmica serão descritos na seção 3.1.11.

3.1.1 Barras de Aço – Corte

A primeira etapa da Figura 3.4, as barras obtidas na siderúrgica foram cortadas na policorte metalográfica para a separação dos corpos de prova para o ensaio de fadiga e os corpos

de prova para os ensaios: composição química, dureza e metalografia. Cada corpo de prova relativo ao ensaio de fadiga possui um respectivo corpo de prova para a execução dos outros ensaios, assim é possível garantir a rastreabilidade entre os mesmos. A Figura 3.5 mostra como foram distribuídos os corpos de prova a partir da matéria-prima.

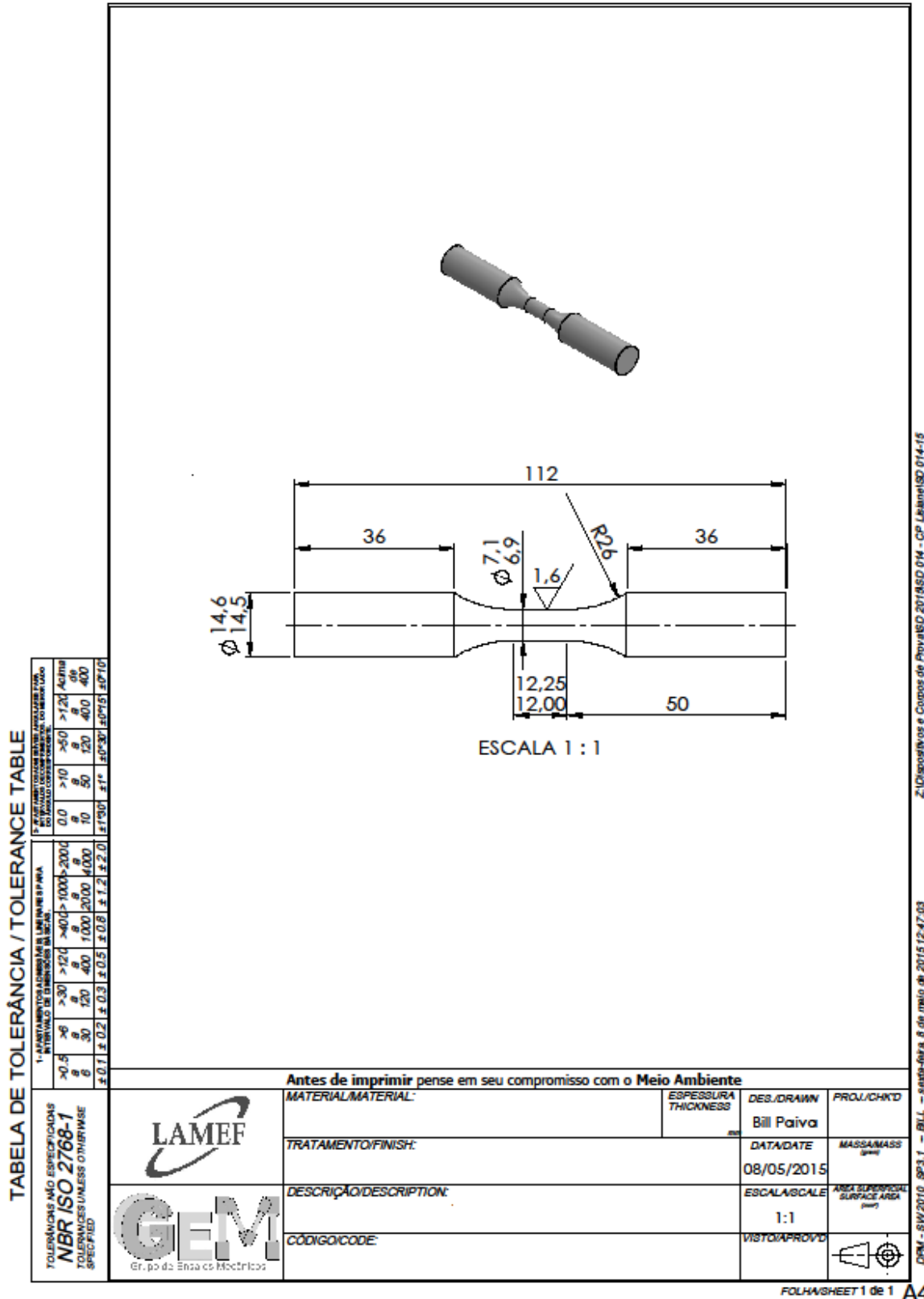
Figura 3.5 – Distribuição dos corpos de prova para os ensaios de fadiga e ensaios mecânicos.



3.1.2 Usinagem e Preparação da Superfície

A usinagem dos corpos de prova para o ensaio de fadiga foi realizada em um torno CNC, com base nas dimensões descritas por COSTA (2010) (Figura 3.6). O processo de usinagem pode provocar algumas marcas do uso das ferramentas na superfície da peça usinada. Estas marcas na superfície serão fundamentais na preparação da superfície para adequação da rugosidade. Por isso, além do processo de usinagem, os corpos de prova serão submetidos a um processo de lixamento/polimento posterior.

Figura 3.6 – Dimensões dos corpos de prova para ensaio de fadiga, tolerâncias conforme NBR ISO 2768-1 (ABNT, 2001).



Concluída a usinagem dos corpos de prova, os mesmos foram lixados na região central, conforme rugosidade de interesse. O lixamento foi realizado na direção inversa às marcas da usinagem (direção circunferencial) até que essas tenham sido minimizadas. Esta inspeção foi realizada a olho nu. O lixamento deve ser feito na direção longitudinal do corpo de prova conforme recomendação da ASTM E466-07 (ASTM, 2007), perpendicular ao sentido de usinagem, para minimizar riscos que possam reduzir a vida em fadiga.

A superfície do corpo de prova pode oxidar durante a realização das etapas de preparação e também durante o ensaio de fadiga. Recomenda-se o uso de óleo mineral ou agente anti-corrosivo a ser aplicado imediatamente após o lixamento/polimento para proteger a superfície (STP 91, 1963). Além disso, o acondicionamento de cada corpo de prova deve ser separado para evitar riscos ou marcas durante o transporte e manipulação.

Todos os ensaios mecânicos executados neste trabalho foram realizados sob temperatura média de 20°C e umidade de 60%. Conforme manual da qualidade do LAMEF, todos os ensaios possuem própria tolerância de temperatura e umidade, sendo esse controle realizado por cada técnico responsável pelo ensaio.

3.1.3 Composição Química

Para o ensaio de composição química, utilizou-se o Espectrômetro de Emissão Óptica EQ124 marca *Spectro* pertencente ao LAMEF. O equipamento é calibrado com os padrões de recalibração e sua verificação é feita com padrão código PS 316L-1 (nomenclatura LAMEF). A composição média do padrão de verificação é descrita na Tabela 3.4. Ressalta-se o uso do padrão de verificação de mesmo material usado neste trabalho, o que facilita na estimativa do erro de cada elemento químico.

Tabela 3.4 – Composição química do padrão de verificação utilizado no equipamento.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
Média	0,030	0,49	1,72	0,035	0,027	17,27	2,04	10,72	0,006
Incerteza Expandida	0,003	0,02	0,02	0,003	0,003	0,06	0,02	0,08	NI
	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	B
Média	0,138	0,34	0,087	0,002	0,086	0,179	NI	NI	NI
Incerteza Expandida	0,010	0,020	0,005	NI	0,010	0,003	NI	NI	NI

NI – Não informado

Fonte: Adaptado do documento do Sistema de Qualidade PD 38 – LAMEF.

3.1.4 Metalografia

Para a determinação do tamanho de grão e a porcentagem de ferrita- δ contido na microestrutura do AISI 316L foi realizado o ensaio metalográfico, composto pelas etapas: corte, lixamento (#80,#120,#320,#600 e #1200) e polimento com pasta de diamante.

Dentre vários ataques citados na literatura como Ácido Oxálico, Marble, HCl+HNO₃ (Vander Voort,1984), foi utilizado o ataque químico *Kalling's #1*, pois mostrou-se mais eficiente para a revelação do contorno de grão (ASM, 1985). Para a determinação da ferrita- δ foi usado ácido oxálico 10% mais água com ataque eletrolítico por 10 segundos.

As medidas foram realizadas em um microscópio óptico modelo BX51 e marca Olympus. A porcentagem de ferrita- δ é determinada pelo software de análise de imagem *Image J*. A incerteza de medição estimada para este método possui incerteza de medição de $\pm 1\%$, estimada sobre o valor medido. Já para a medição do contorno de grão, foi utilizada a metodologia descrita na norma ASTM E112-13 (ASTM, 2013) através do método linear.

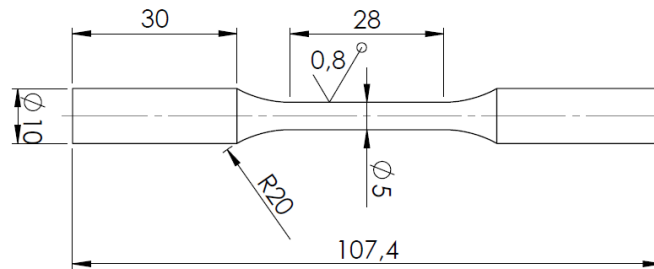
3.1.5 Dureza

A realização do ensaio de dureza em escala *Brinell* tem com o objetivo minimizar o erro de medida, já que utiliza-se no cálculo o diâmetro do penetrador e da impressão na superfície. Foi utilizado um durômetro da marca *Wolpert*, semi-automático modelo D-6700 para uma esfera de 2,5 mm de diâmetro e carga de 187,5 kgf. A calibração é realizada com um padrão de 216,0 HB com incerteza expandida de 10,3 HB para um nível de confiança de 95%.

3.1.6 Ensaio de Tração

No ensaio de tração, foi ensaiado apenas um corpo de prova devido a limitações da matéria-prima. As dimensões do corpo de prova usinado segue descrição da norma NBR ISO 6892:1 (ABNT, 2013) anexo C, mostrado na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Dimensões do corpo de prova usinado para a realização do ensaio de tração.



Fonte: Adaptado de NBR ISO 6892-1 (2013).

3.1.7 Rugosidade

Em relação ao ensaio de rugosidade é possível quantificar 3 parâmetros principais: R_a (rugosidade média), R_y (rugosidade máxima) e R_t ou R_z (rugosidade total) no ensaio. A norma JIS B0601 (JIS, 1994) descreve os principais parâmetros obtidos no ensaio de rugosidade e quais são as vantagens e desvantagens de cada um destes parâmetros, resumidos na Tabela 3.5.

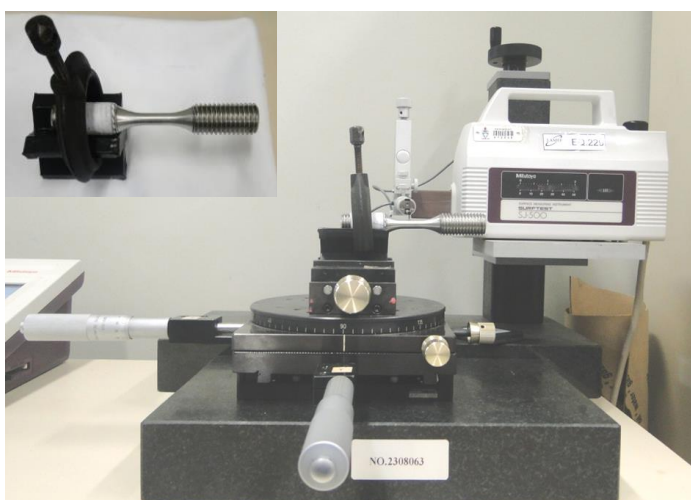
Tabela 3.5 – Possíveis parâmetros determinados no ensaio de rugosidade.

Parâmetro	Características	Representação Gráfica
R_a	É representado pela linha média determinada a partir da curva média da rugosidade. O valor da Rugosidade R_a é representado com base no eixo Y.	
R_y	A linha média é obtida a partir dos valores dos picos de rugosidade. O valor de R_y é determinado entre maior vale e o maior pico medido na superfície.	
R_z	A partir da linha média, o valor do R_z é calculado pela média entre a soma dos cinco maiores picos da superfície com a soma dos 5 maiores vales, dividido por 5.	

Fonte: Adaptado de JIS B0601 (1994).

O rugosímetro converte defeitos superficiais em um valor numérico, possui um apalpador que acompanha essas imperfeições da superfície, envia para o equipamento, para converter em sinal elétrico. Para realizar a medição de rugosidade com mínimo de erros possível recomenda-se a fixação da superfície a ser medida em um dispositivo que minimize sua movimentação (por exemplo, despenpeno). O rugosímetro usado é da marca *Mitutoyo* modelo SJ-500 pertencente ao LAMEF. O dispositivo usado neste estudo para a fixação dos corpos de prova é mostrado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Sistema de fixação dos corpos de prova para medição da rugosidade superficial.



Nas medidas de rugosidade, a maior fonte de incerteza ocorre devido ao sistema de fixação do corpo de prova. O dispositivo mostrado na Figura 3.8 tem por objetivo minimizar a influência do técnico no deslocamento do apalpador. A cada troca do corpo de prova, o técnico fixa o novo corpo de prova no dispositivo, ajustando o apalpador na região de análise.

Para a calibração do rugosímetro foi utilizado um padrão de rugosidade marca *Mitutoyo*, rastreabilidade LAMEF código 178-601, com rugosidade nominal de $2,94 \mu m$ e incerteza de $\pm 3\%$ deste valor. Para cada corpo de prova fora determinado inicialmente a realização de 5 medidas de forma aleatória na região de interesse para o ensaio de fadiga. Utilizando como parâmetro inicial o espaçamento de $0,25 \mu m$, assim será percorrida uma distância total de $1,25 \mu m$ considerando as 5 medidas realizadas, utilizando um apalpador de $2 \mu m$ de diâmetro.

3.1.8 Instrumentação dos corpos de prova

Para o desenvolvimento deste trabalho foram usados *strain gauge* marca VISHAY código 192911, número da corrida VF452020, tendo suas características técnicas: grade de resistência: $120,0 \pm 0,6\%$, fator de calibração: $2,07 \pm 2,0\%$ a 24°C e sensibilidade transversal de $+1,4 \pm 0,2\%$. Todos os *strain gauges* utilizados são do mesmo lote.

Foram utilizados três (3) corpos de prova para a verificação das variáveis relativas à “Máquina de Ensaios”: desalinhamento e calibração estática. Os três corpos de prova utilizados possuem mesma rugosidade, para que assim fossem desprezadas as alterações no comportamento do material devido a valores distintos de rugosidade. Além disso, o intervalo de rugosidade escolhido $Ru_{1\#800p}$ é o menor valor numérico de rugosidade deste estudo, o que facilita a aderência do *strain gauge* na superfície do corpo de prova. A configuração de montagem dos *strain gauges* serão as mesmas para a verificação do desalinhamento e calibração estática.

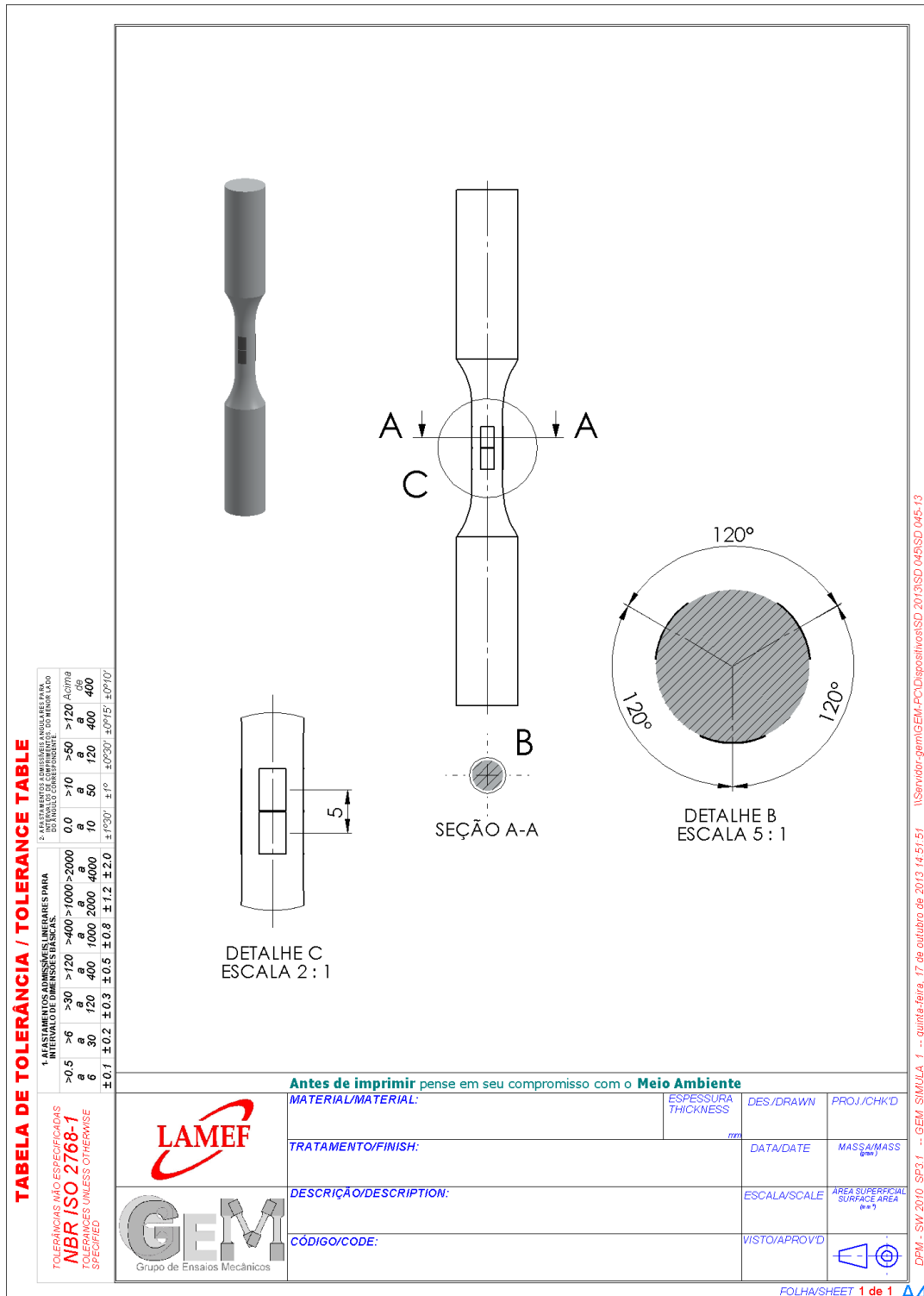
Conforme descrito na norma ASTM E1012-14 (ASTM, 2014), recomenda-se que um comprimento útil do corpo de prova maior que 12 mm permite a fixação de 2 ou 4 linhas de sensores (*strain gauges*). Para comprimento útil menor que 12 mm se recomenda a fixação de apenas uma linha de sensores.

A fixação em torno da circunferência pode ser através do uso de 4 *strain gauges* distribuídos com espaçamento de 90° em torno da circunferência ou 3 sensores distribuídos com espaçamento de 120° entre si (ASTM E1012-14 (ASTM, 2014)). A Figura 3.9 mostra a distribuição dos *strain gauges* para um corpo de prova cilíndrico ao qual fora instrumentado com 8 sensores distribuídos em 2 fileiras separados circunferencialmente em 90° . Partindo de um comprimento útil indicado pela letra A, os *strain gauges* devem ser separados por uma distância mínima de $0,375A$, equidistantes do centro longitudinal do corpo de prova ($1/2 L$).

Para a verificação do desalinhamento, calibração estática e dinâmica, COSTA (2010) utilizou corpos de prova instrumentados no centro do comprimento útil (seção transversal), com três (3) *strain gauges* distanciados 120° entre si. Neste trabalho foram utilizados três (3) corpos de prova instrumentados em duas (2) seções transversais, sendo em cada seção transversal instrumentado também com três (3) *strain gauges* distanciados 120° entre si. O objetivo

principal desta alteração deve-se à determinação de um valor médio, o que não é possível através da instrumentação de apenas uma seção, separados por convenção inicial: garra superior e inferior. Na Figura 3.9 registra-se a montagem dos *strain gauges* na superfície dos corpos de prova.

Figura 3.9 – Instrumentação dos corpos de prova com posição *strain gauges* indicados na seção B.



3.1.9 Desalinhamento e Calibração Estática

Para a verificação do desalinhamento e a calibração estática é necessária a realização da montagem do sistema de fixação para cada corpo de prova instrumentado e assim, posteriormente serão aplicadas diferentes combinações entre carga (4kN, 6kN e 8kN) e frequência (1Hz, 2Hz e 3 Hz). Estes valores de cargas foram escolhidos em função dos resultados obtidos no ensaio de tração, distribuídos na região de deformação elástica demonstrada pelo material metálico.

A leitura dos dados gerados pelos *strain gauges* foi realizada pelo *Spider 8* em conjunto com software *CatMan 4.0*. A frequência de aquisição de dados foi de 50 Hz. A avaliação deste conjunto foi realizada e aprovada com uso da norma ASTM E1942-04 (ASTM, 2004). O sistema de leitura dos *strain gauges* é mostrado na Figura 3.10, sendo que cada *strain gauge* possui um cabo para leitura dos dados, ligados a placa de aquisição de dados. Um número maior de *strain gauges* acarreta em um sistema de aquisição de dados com maior tempo de processamento.

Figura 3.10 – Sistema de leitura da deformação realizada pelos *strain gauges*.



Antes de qualquer verificação, a norma ASTM E467-08 (ASTM, 2008) recomenda que seja aplicada a carga máxima para que seja minimizado a histerese (inércia) do sistema. Ao aplicar a carga máxima, o sistema deve ser mantido sob esta carga até que os *strain gauges* façam uma leitura da deformação com mínima variação ao longo do tempo.

3.1.10 Ensaio de Fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados na mesma máquina universal de ensaios aos quais foram realizados as verificações do desalinhamento e da calibração estática. A máquina de ensaios é da marca MTS modelo 810 e capacidade de carga de 100kN. Para a realização dos ensaios fora utilizado frequência de 20Hz e razão de fadiga de 0,1. O número máximo de ciclos estipulado em um milhão (1.000.000), sendo considerado o critério de falha a ruptura total do corpo de prova.

3.1.11 Calibração Dinâmica

Em relação à calibração dinâmica, algumas observações precisam ser realizadas: o Inmetro está desenvolvendo um procedimento simples, porém completo, para a realização da calibração dinâmica que possam garantir a confiabilidade dos resultados em ensaios de fadiga. Estas metodologias foram desenvolvidas com base nos projetos de normas (*draft*) como ISO/DIS 4965-1 (ISO, 2011) e ISO/DIS 4965-2 (ISO, 2011) para dispositivos com geometrias distintas (MACHADO *et al.*, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2010; MACHADO *et al.*, 2012).

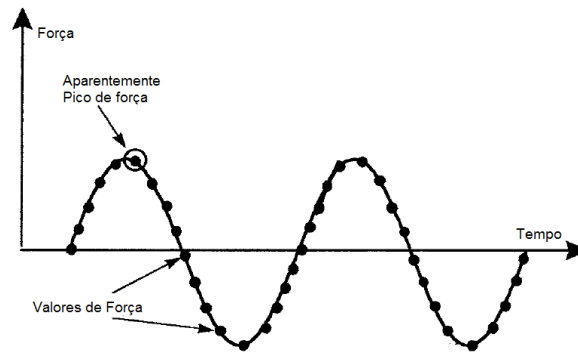
No entanto, os resultados obtidos nestes trabalhos mostram apenas o uso de dispositivos protótipos para entender como deve-se proceder em relação a calibração dinâmica, não garantindo uma metodologia que apresentem resultados confiáveis para sua reprodução.

Além disso, para comparar os valores medidos pela célula de carga e pelos sensores (*strain gauges*) é necessário que o sistema de aquisição de dados seja adequado à frequência de ensaio utilizada. Necessariamente, a frequência do ensaio de fadiga deve ser menor que a frequência de aquisição de dados dos dois sistemas (*strain gauge* e célula de carga). E isso acarreta problemas de instrumentação, pois o sistema de aquisição de dados deve ter sua velocidade suficientemente maior que a frequência de ensaio para adquirir pontos principais, como pontos de carga máxima e mínima em todos os sistemas (MACHADO *et al.*, 2012).

Existem normas que tratam do erro na calibração dinâmica como por exemplo ASTM E467-08 (ASTM, 2008), em que descreve que o valor máximo do erro entra a célula de carga e o *strain gauge* não pode ser maior que 1% do valor da carga nominal em qualquer ciclo.

A determinação do erro entre célula de carga e os sensores instrumentados no corpo de prova está condicionada ao sistema de aquisição. Este sistema deve ser robusto o suficiente para adquirir o valor máximo e mínimo da carga em cada ciclo, permitindo assim verificar diferenças nestes valores conforme mostrado na Figura 3.11 (ASTM E1942-04 (ASTM, 2004)).

Figura 3.11 – Sistema de aquisição de dados, mostrando valores experimentais e sua respectiva função.



Fonte: ASTM E1942-04 (2004).

Outra forma de minimizar o problema apresentado pela Figura 3.11, é possível utilizar um algoritmo numérico para a determinação matemática do valor máximo e mínimo de cada ciclo, determinando a curva teórica do sinal, por exemplo com o uso da Transformada Rápida de Fourier (FFT)(MACHADO *et al.*, 2012).

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo os resultados do trabalho são apresentados separadamente considerando cada ensaio realizado. Posteriormente, os resultados de incerteza de medição tanto para o número de ciclos quanto para a tensão corrigida e os comparativos destes valores de incerteza obtidos por dois métodos: Método de monte Carlo e o Método Kragten. Por último, serão apresentados os resultados relacionados a probabilidade de falha.

Verificou-se experimentalmente algumas limitações para o desenvolvimento deste projeto, estas limitações estão relacionadas tanto a determinação e/ou dificuldade na sua determinação de algumas fontes de incerteza. Destacam-se:

- Incerteza e/ou erro na estimativa das propriedades físico-químicas do material, incluindo variabilidade microestrutural entre corpos de prova ou em relação a lotes distintos (caso existisse);

- Limitações do sistema de aquisição de dados ao qual foi estimado valores do desalinhamento, calibração estática e calibração dinâmica. O tempo de resposta a leitura dos dados realizada pela máquina de ensaios MTS é maior do que a leitura da deformação dos *strain gauges* (realizado pelo *Spider 8*). Para que seja possível comparar os dados adquiridos pelos dois sistemas, recomenda-se utilizar uma frequência de leitura semelhante;

- De um modo geral, quanto maior o número de medidas realizadas para uma variável, maior será a aproximação da média da amostragem em relação à média populacional. Sendo assim, será realizado cinco (5) medidas para cada fonte de incerteza;

- As fontes de incerteza consideradas neste projeto foram inicialmente consideradas independentes entre si, não há correlação entre variáveis;

- Existem erros associados ao modelamento matemático aplicado ao cálculo da incerteza de medição, isso devido a estruturação da função matemática utilizada no Método de Monte Carlo. Além de hipóteses iniciais e aproximação de constantes numéricas utilizadas neste modelo.

Para facilitar a organização dos resultados obtidos para os 36 corpos de prova, sendo que cada corpo de prova possui várias medidas para cada fonte de incerteza, será necessário

calcular a média e o desvio-padrão tanto para cada corpo de prova quanto para todos os 36 CP's de cada fonte de incerteza.

Assim, para obter um valor numérico representativo de cada fonte de incerteza para todos os corpos de prova, será utilizado o Teorema do Limite Central. O Teorema do Limite Central descreve que a soma e conseqüentemente a média de n variáveis independentes terá distribuição normal, independente da distribuição de probabilidade individual destas variáveis (TEN CATEN; RIBEIRO, 2012).

As Equações 4.1 a 4.3 são utilizadas no cálculo dos valores médios e desvio-padrão para todos os corpos de prova. A Equação 4.1 mostra o cálculo da média das médias amostrais, \bar{x} , ou seja, a média populacional. Este valor é calculado com base na média de cada amostra para um número de amostras m .

$$\bar{x} = \mu = \frac{\sum \bar{x}}{m} \quad \text{Equação 4.1}$$

O desvio-padrão das médias amostrais $\sigma_{\bar{x}}$ é menor que o desvio padrão dos valores individuais da população σ , para a determinação destes limites ao estipular os intervalos de confiança, utiliza-se o valor do desvio-padrão das médias amostrais, descrito na Equação 4.2.

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{Equação 4.2}$$

Na Equação 4.2, o valor de n representa o tamanho da amostra, ressaltando que o desvio padrão dos valores individuais da população é descrito na Equação 4.3 para uma amostra maior que 30.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad \text{Equação 4.3}$$

Para uma amostra de tamanho menor que 30, o desvio padrão é dado pela Equação 4.4.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{Equação 4.4}$$

Assim, tendo o valor da média e desvio padrão é possível estimar os intervalos de confiança com base na distribuição de probabilidade, dentro deste intervalo deve conter a média verdadeira da população μ (MC CLAVE, 2009). A Equação 4.5 mostra como deve ser determinado o intervalo de confiança com base nos valores calculados. Observa-se o valor de Z, determinado pela Tabela 4.1 que é função do nível de confiança estabelecido.

$$\mu \pm z \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{ou} \quad \mu \pm z \sigma_x \quad \text{Equação 4.5}$$

Tabela 4.1 – Intervalos de confiança para nível de confiança.

Nível de Confiança	Z	Intervalo de Confiança
90%	1,64	$\mu \pm 1,645 \cdot \sigma_x$
95%	1,96	$\mu \pm 1,96 \cdot \sigma_x$
99%	2,58	$\mu \pm 2,575 \cdot \sigma_x$

Fonte: Adaptado de GUM (2008).

Conforme descrito na Tabela 4.1, observa-se que quanto maior o nível de confiança, maior será o valor de Z e conseqüentemente maior será o valor do termo ao qual multiplica-se o desvio-padrão. De outra forma, por exemplo, para um intervalo de confiança de 95% significa que 95 % das médias amostrais terão seus valores contidos dentro deste intervalo de confiança.

Os certificados de calibração dos equipamentos utilizados neste trabalho são determinados com base em um nível de confiança de 95%. Sendo assim, será utilizado como nível de confiança de 95% para todos os resultados apresentados nesta pesquisa.

4.1 Composição Química e Metalografia

Para cada corpo de prova foram realizadas 5 medidas da composição química, seus resultados estão demonstrados no Apêndice A. A partir do cálculo da média para cada corpo de prova fora realizado o cálculo da média de todos os corpos de prova para cada elemento químico. Estes valores serão comparados aos valores do certificado do fornecedor da matéria-prima e também a ASTM A276-15 (ASTM, 2015), apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados de composição química [% em peso].

Elemento Químico	Certificado do Fornecedor	ASTM (A276-08)	Média μ Desvio Padrão σ
Alumínio	0,003 %	Não há especificação	$\mu = 0,0076 / \sigma = 0,0067$
Boro	Não há especificação	Não há especificação	$\mu = 0,0003 / \sigma = 0,0001$
Carbono	0,015 %	máx.0,030 %	$\mu = 0,0129 / \sigma = 0,0053$
Cobalto	Não há especificação	Não há especificação	$\mu = 0,1475 / \sigma = 0,0045$
Cobre	0,44 %	Não há especificação	$\mu = 0,4689 / \sigma = 0,0087$
Cromo	16,33 %	16,0 – 18,0 %	$\mu = 16,4461 / \sigma = 0,0890$
Enxofre	0,026 %	máx.0,030 %	$\mu = 0,0212 / \sigma = 0,0017$
Estanho	Não há especificação	Não há especificação	$\mu = 0,0122 / \sigma = 0,0010$
Fósforo	0,039 %	máx.0,045 %	$\mu = 0,0394 / \sigma = 0,0018$
Manganês	1,77 %	máx.2,0 %	$\mu = 1,7604 / \sigma = 0,0202$
Molibdênio	2,05 %	2,00 – 3,00 %	$\mu = 1,9374 / \sigma = 0,0322$
Nióbio	Não há especificação	Não há especificação	$\mu = 0,0172 / \sigma = 0,0004$
Níquel	10,19 %	10,0 – 14,0 %	$\mu = 10,0018 / \sigma = 0,0503$
Nitrogênio	0,0143 %	Não há especificação	-
Silício	0,41 %	máx.1,0 %	$\mu = 0,3929 / \sigma = 0,0074$
Titânio	Não há especificação	Não há especificação	$\mu = 0,0049 / \sigma = 0,0002$
Tungstênio	Não há especificação	Não há especificação	$\mu = 0,0227 / \sigma = 0,0010$
Vanádio	Não há especificação	Não há especificação	$\mu = 0,0429 / \sigma = 0,0123$

Realizando uma análise dos resultados apresentados na Tabela 4.2, verifica-se alguns tópicos importantes: os valores descritos no Certificado do Fornecedor expressam um valor médio de algumas medidas realizadas, neste certificado não fora descrito a incerteza de medição para o qual as medidas se encontram. No entanto, comparando estes valores com os valores descritos pela norma ASTM A276-15 (ASTM, 2015) estes encontram-se dentro do especificado.

Ressalta-se que a norma ASTM A276-15 (ASTM, 2015) descreve o intervalo de confiança para alguns elementos químicos como valores máximos ao qual este pode conter, como é o caso do carbono, silício e o manganês. Entretanto, para outros elementos como titânio, vanádio ou tungstênio não há especificação, o que dificulta a análise destes elementos.

Para os elementos químicos analisados pelo espectrômetro do LAMEF comparados aos valores aos quais há especificação na norma ASTM A276-15 (ASTM, 2015), todos os elementos estão dentro do especificado, exceto molibdênio.

Com base nos resultados obtidos para a análise química, foi realizado o cálculo do cromo e níquel equivalente para cada um dos corpos de prova, conforme as Equações 4.6 e 4.7 e os resultados descritos na Tabela 4.3. Estes valores serão utilizados para a estimativa da microestrutura do aço inoxidável através do uso do diagrama de Schaeffler.

$$Cr_{equiv} = (%Cr) + (2\%Si) + (1,5\%Mo) + (5\%V) + (5,5\%Al) + (1,75\%Nb) + (1,5\%Ti) + (0,75\%W) \quad \text{Equação 4.6}$$

$$Ni_{equiv} = (%Ni) + (%Co) + (0,5\%Mn) + (0,3\%Cu) + (25\%N) + (30\%Co) \quad \text{Equação 4.7}$$

Tabela 4.3 – Valores médios calculados pelo Método de Monte Carlo para o Níquel e Cromo equivalente.[%]

CP	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9
Cr_{equiv}	20,811	20,168	20,130	20,28	2,309	20,238	20,448	20,436	20,430
Ni_{equiv}	11,481	11,404	11,419	11,522	11,450	11,318	11,378	11,494	11,479
CP	CP 10	CP 11	CP 12	CP 13	CP 14	CP 15	CP 16	CP 17	CP 18
Cr_{equiv}	20,379	20,393	20,364	20,459	20,428	20,465	20,488	20,569	20,499
Ni_{equiv}	11,430	11,431	11,873	11,487	11,747	11,723	11,834	11,490	11,590
CP	CP 19	CP 20	CP 21	CP 22	CP 23	CP 24	CP 25	CP 26	CP 27
Cr_{equiv}	20,546	20,518	20,482	20,343	20,349	20,370	20,272	20,475	20,558
Ni_{equiv}	11,534	11,671	12,144	11,721	11,566	11,605	11,874	11,419	11,475
CP	CP 28	CP 29	CP 30	CP 31	CP 32	CP 33	CP 34	CP 35	CP 36
Cr_{equiv}	20,478	20,505	20,581	20,569	20,540	20,589	20,572	20,549	20,604
Ni_{equiv}	11,522	11,450	11,451	11,450	11,540	11,577	11,414	11,451	11,579

Os valores de cromo e níquel equivalente médio de cada corpo de prova serão mostrados na Equação 4.8 e 4.9 respectivamente. Os valores mostrados na Tabela 4.3 foram obtidos pelo Método de Monte Carlo com número de iterações de 10^5 .

$$Cr_{equiv} = 20,4494 \pm 1,96.(0,1250)$$

$$Cr_{equiv} = 20,4494 \pm 0,2450$$

Equação 4.8

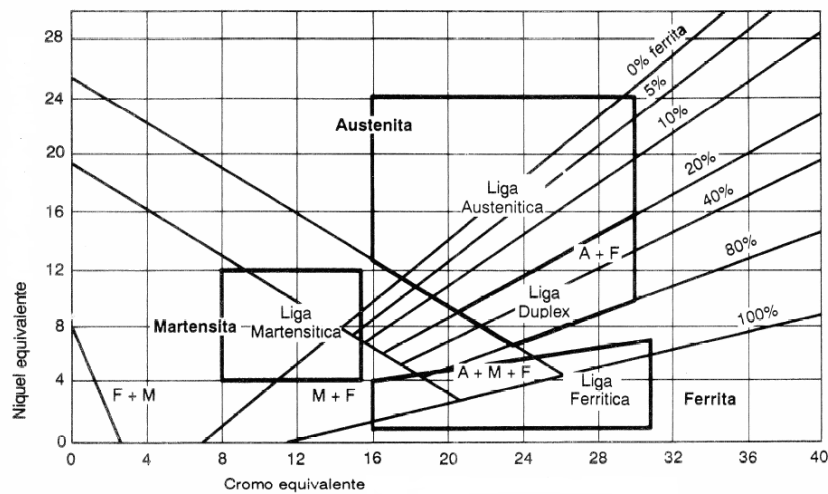
$$Ni_{equiv} = 11,5566 \pm 1,96.(0,1673)$$

$$Ni_{equiv} = 11,5566 \pm 0,3279$$

Equação 4.9

Partindo dos valores médios do cromo equivalente e níquel equivalente é possível estimar a microestrutura formada para esta combinação entre os dois valores. Esta estimativa é realizada através do uso do diagrama de Schaeffler apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Diagrama de Schaeffler modificado para o aço AISI 316L.

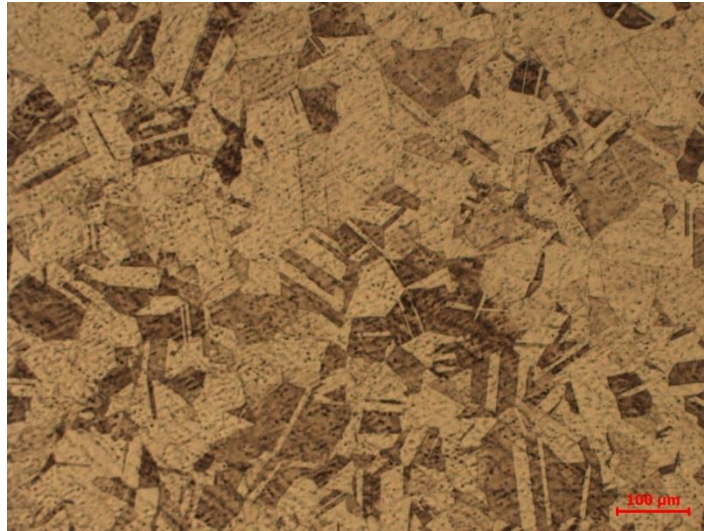


Fonte: Adaptado ASM (1994).

É importante lembrar que a distribuição dos elementos de liga durante a solidificação depende de vários fatores, como a velocidade de resfriamento, gradiente térmico entre outros. O diagrama apresentado na Figura 4.1 mostra a formação de microestruturas como austenita, ferrita- δ e martensita nos aços inoxidável austeníticos. Contudo, podem ocorrer a formação de nitretos, sulfetos, carbonetos e boretos, além de fases intermediárias como Chi χ , por exemplo (PADILHA, 1994).

A microestrutura representativa para os corpos de prova está representada na Figura 4.2 para ampliação de 100 X realizado pela microscopia óptica. A Figura 4.2 mostra grãos poligonais de austenita com maclas de recozimento.

Figura 4.2 – Microestrutura AISI 316L mostra grãos de austenita. Ataque *Kalling's #1*. 100X.



Pode ocorrer mudança na forma dos grãos se o material for submetido a trabalho a frio: encruamento, e esta alteração muda significativamente o comportamento do material quando submetido a esforços mecânicos.

Durante a solidificação de aços inoxidáveis austeníticos é possível obter alguma fração de ferrita delta, não havendo alteração ou desvio de composição química. Sabe-se que durante a solidificação, não há tempo suficiente na redistribuição completa dos solutos intersticiais. De um modo geral a ferrita delta será localizada nos intersítios dos grãos da austenita (COLPAERT, 2008).

É possível verificar a presença de ferrita delta na microestrutura da seção transversal conforme apresentado na Figura 4.3. O ataque químico realizado é combinação de ácido oxálico 10% e água para um ataque eletrolítico de 10 segundos, imagem obtida por microscopia óptica.

Figura 4.3 – Microestrutura AISI 316L mostra a presença de ferrita delta. Ácido oxálico 10% mais água. 1000X.



Ao utilizar o software *Image J*, com medição para qualquer região aleatória, fora estimado uma proporção de $0,5\% \pm 1\%$ em área para a presença de ferrita delta em relação a área total analisada. Essa proporção foi realizada para uma ampliação de 100x da microestrutura.

Já para a estimativa do valor do limite de escoamento é necessário realizar a medição do tamanho de grão, seus resultados resumidamente são mostrados na Tabela 4.4. Assim, foram realizadas 5 medidas do tamanho de grão para cada corpo de prova através do método da intersecção linear média, para uma região aleatória de análise e ampliação de 100 X. Os resultados estão descritos no Apêndice B.

Tabela 4.4 – Resultados medidos para o tamanho de grão austenítico. [Adimensional]

Corpo de Prova	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9
Média (μ)	4,9	5,1	4,8	5,3	4,5	5,0	4,9	5,1	4,9
Desvio-Padrão (σ)	0,4	0,4	0,7	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,5
Corpo de Prova	CP 10	CP 11	CP 12	CP 13	CP 14	CP 15	CP 16	CP 17	CP 18
Média (μ)	4,8	4,7	4,7	4,9	5,4	4,8	5,2	5,2	5,3
Desvio-Padrão (σ)	0,4	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3
Corpo de Prova	CP 19	CP 20	CP 21	CP 22	CP 23	CP 24	CP 25	CP 26	CP 27
Média (μ)	4,8	4,7	4,8	4,6	4,7	4,6	4,5	5,0	4,8
Desvio-Padrão (σ)	0,4	0,3	0,4	0,2	0,3	0,5	0,6	0,5	0,3
Corpo de Prova	CP 28	CP 29	CP 30	CP 31	CP 32	CP 33	CP 34	CP 35	CP 36
Média (μ)	4,8	4,8	5,0	4,4	4,5	5,1	5,1	5,2	5,2
Desvio-Padrão (σ)	0,4	0,4	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3

Finalmente, conclui-se com base na microestrutura e a medida do tamanho de grão: grãos poligonais de austenita com maclas de recozimento com presença de ferrita delta e tamanho de grão médio entre 5.0 a 5.5.

Através da conversão entre tamanho de grão e diâmetro em milímetros (mm) para ser estimado a tensão de escoamento (MPa), utilizou-se a norma ASTM E112-13 (ASTM, 2013). A Tabela 4.5 mostra a conversão entre tamanho de grão (escala ASTM) e diâmetro em milímetros (mm).

Tabela 4.5 – Conversão entre tamanho de grão, considerando distribuição uniforme, grãos equiaxiais e orientados aleatoriamente.

Tamanho do Grão	Área Média		Diâmetro Médio	
	mm^2	μm^2	mm	μm
- -				
4.0	0,00806	8065	0,0898	89,8
4.5	0,00570	5703	0,0755	75,5
5.0	0,00403	4032	0,0635	63,5
5.5	0,00285	2851	0,0534	53,4
6.0	0,00202	2016	0,0449	44,9
6.5	0,00143	1426	0,0378	37,8
7.0	0,00101	1008	0,0318	31,8

Fonte: Adaptado de ASTM E112-13 (2013).

Sendo assim, com o tamanho de grão médio entre 5.0 e 5.5, é possível estimar através do uso da Tabela 4.5 a área média de cada grão de austenita e também seu diâmetro médio. Estes resultados serão utilizados na estimativa da tensão de escoamento do material.

4.2 Ensaio de tração

Para o ensaio de tração, foram obtidos os seguintes valores: limite de escoamento = 263 MPa, limite de resistência = 581 MPa e alongamento de 60,43%.

4.2.1 Tensão de Escoamento Estimado

O cálculo da tensão de escoamento teórico considera a composição química e a microestrutura do material, conforme descrito na Equação 2.7. A Tabela 4.6 mostra os valores médios e do desvio padrão para cada corpo de prova calculado a partir do Método de Monte Carlo para 10^5 iterações. É importante lembrar que a porcentagem de ferrita delta foi estimada em $0,5\% \pm 1\%$.

Tabela 4.6 – Limite de Escoamento teórico obtidos através do Método de Monte Carlo.[MPa]

Corpo de Prova	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9
Média (μ)	199,58	200,49	195,41	198,96	198,62	198,10	198,60	197,72	198,99
Desvio-Padrão (σ)	3,63	1,24	1,11	2,34	1,15	1,80	2,72	1,90	2,21
Corpo de Prova	CP 10	CP 11	CP 12	CP 13	CP 14	CP 15	CP 16	CP 17	CP 18
Média (μ)	196,58	197,53	200,08	199,20	201,46	201,79	205,60	198,08	202,02
Desvio-Padrão (σ)	1,05	1,11	3,84	2,41	3,28	4,39	3,87	2,01	2,89
Corpo de Prova	CP 19	CP 20	CP 21	CP 22	CP 23	CP 24	CP 25	CP 26	CP 27
Média (μ)	199,36	202,64	207,10	199,61	198,28	199,33	200,05	199,19	199,13
Desvio-Padrão (σ)	2,55	2,93	7,89	1,39	1,59	2,71	3,91	2,82	2,17
Corpo de Prova	CP 28	CP 29	CP 30	CP 31	CP 32	CP 33	CP 34	CP 35	CP 36
Média (μ)	199,07	198,43	199,71	197,15	197,23	201,62	200,64	200,75	202,36
Desvio-Padrão (σ)	3,11	2,10	2,21	1,63	1,26	1,52	1,82	1,38	2,40

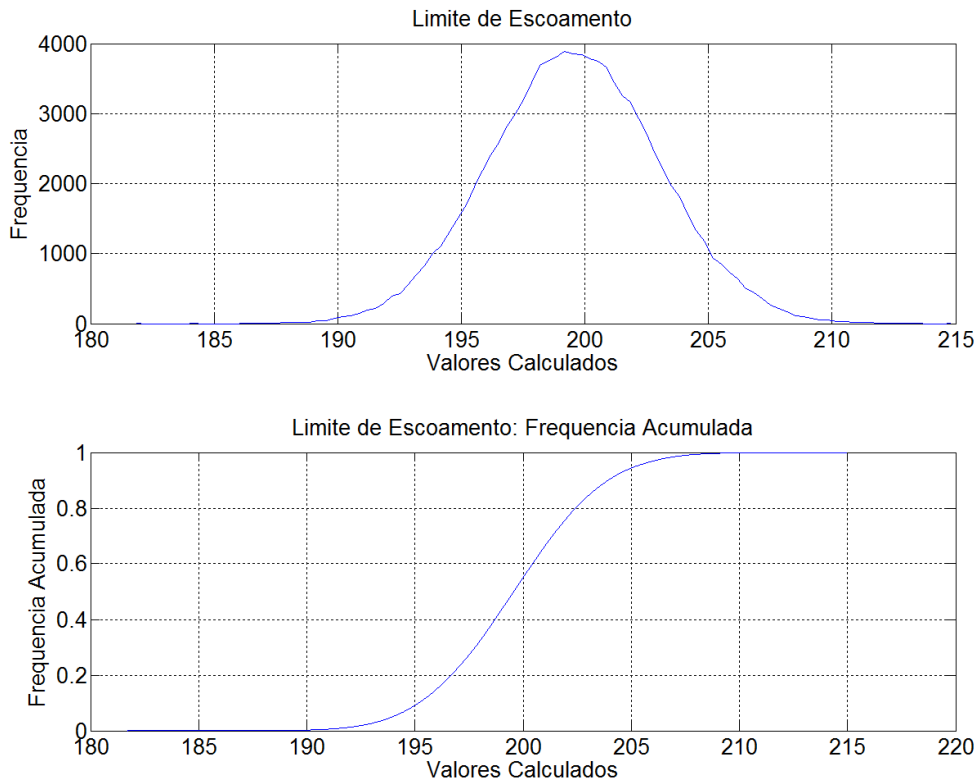
Considerando os resultados apresentados anteriormente, seguindo o Teorema do Limite Central, o resultado obtido para todos os corpos de prova estão descritos na Equação 4.10. Os respectivos histogramas obtidos pelo método de Monte Carlo serão mostrados na Figura 4.4.

$$\sigma_e = 199,5736 \pm 1,96.(3,4184)$$

$$\sigma_e = 199,5736 \pm 6,7001$$

Equação 4.10

Figura 4.4 – Histograma para os valores estimados da tensão de escoamento.



Em relação aos resultados apresentados, a tensão de escoamento obtida pelo ensaio de tração é de 263 MPa e a tensão de escoamento médio calculada com base na microestrutura e composição química é 199 MPa, verifica-se uma diferença de 64 MPa. No entanto, o valor calculado com base na microestrutura e na composição química é apenas uma razoável previsão das propriedades de tração à temperatura ambiente (PADILHA, 1994).

4.3 Ensaio de Dureza

Quanto aos resultados de dureza, a Tabela 4.7 apresenta os valores resumidos medidos para o ensaio de dureza *Brinell* e seu respectivo desvio-padrão. O Apêndice C mostra todas as 5 medições realizadas em cada corpo de prova. Justifica-se a realização deste ensaio mecânico devido ao cálculo do fator de correção da tensão de ensaio ao qual é função da rugosidade do material e também do valor de dureza do material.

Tabela 4.7 – Resultados obtidos no ensaio de dureza *Brinell*. [HB]

Corpo de Prova	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9
Média (μ)	143,0	150,8	142,4	143,6	143,0	141,0	139,8	147,4	144,2
Desvio-Padrão (σ)	0	7,9	4,6	7,4	0	7,7	4,4	2,6	9,1
Corpo de Prova	CP 10	CP 11	CP 12	CP 13	CP 14	CP 15	CP 16	CP 17	CP 18
Média (μ)	145,0	146,6	139,2	147,6	144,4	136,8	139,8	149	143,4
Desvio-Padrão (σ)	2,7	10,9	7,7	5,3	3,1	6,5	4,4	4,7	5,3
Corpo de Prova	CP 19	CP 20	CP 21	CP 22	CP 23	CP 24	CP 25	CP 26	CP 27
Média (μ)	143,4	145,0	136,6	151,2	146,0	143,4	147,6	148,6	148,6
Desvio-Padrão (σ)	5,3	7,7	3,6	4,4	2,7	5,3	5,3	4,7	0,9
Corpo de Prova	CP 28	CP 29	CP 30	CP 31	CP 32	CP 33	CP 34	CP 35	CP 36
Média (μ)	147,6	147,8	147,6	148,0	147,6	147,2	149,0	148,6	144,0
Desvio-Padrão (σ)	5,3	15,1	5,3	0,7	1,1	10,9	4,7	4,7	2,2

Conforme certificado apresentado pelo fornecedor da matéria-prima, o valor de dureza médio é de 155 HB. Já para os resultados encontrados nos ensaios a média de 145,1 HB com desvio-padrão de 3,7 HB, considerando uma distribuição de probabilidade normal.

Existe uma diferença de 9,9 HB entre o certificado do fornecedor e os valores obtidos experimentalmente, esta diferença pode ser causada devido a diversos fatores como calibração, operação e tolerância de cada equipamento bem como variações observadas entre diferentes barras oriundas do processo produtivo.

4.4 Verificação do Desalinhamento da Máquina de Ensaio

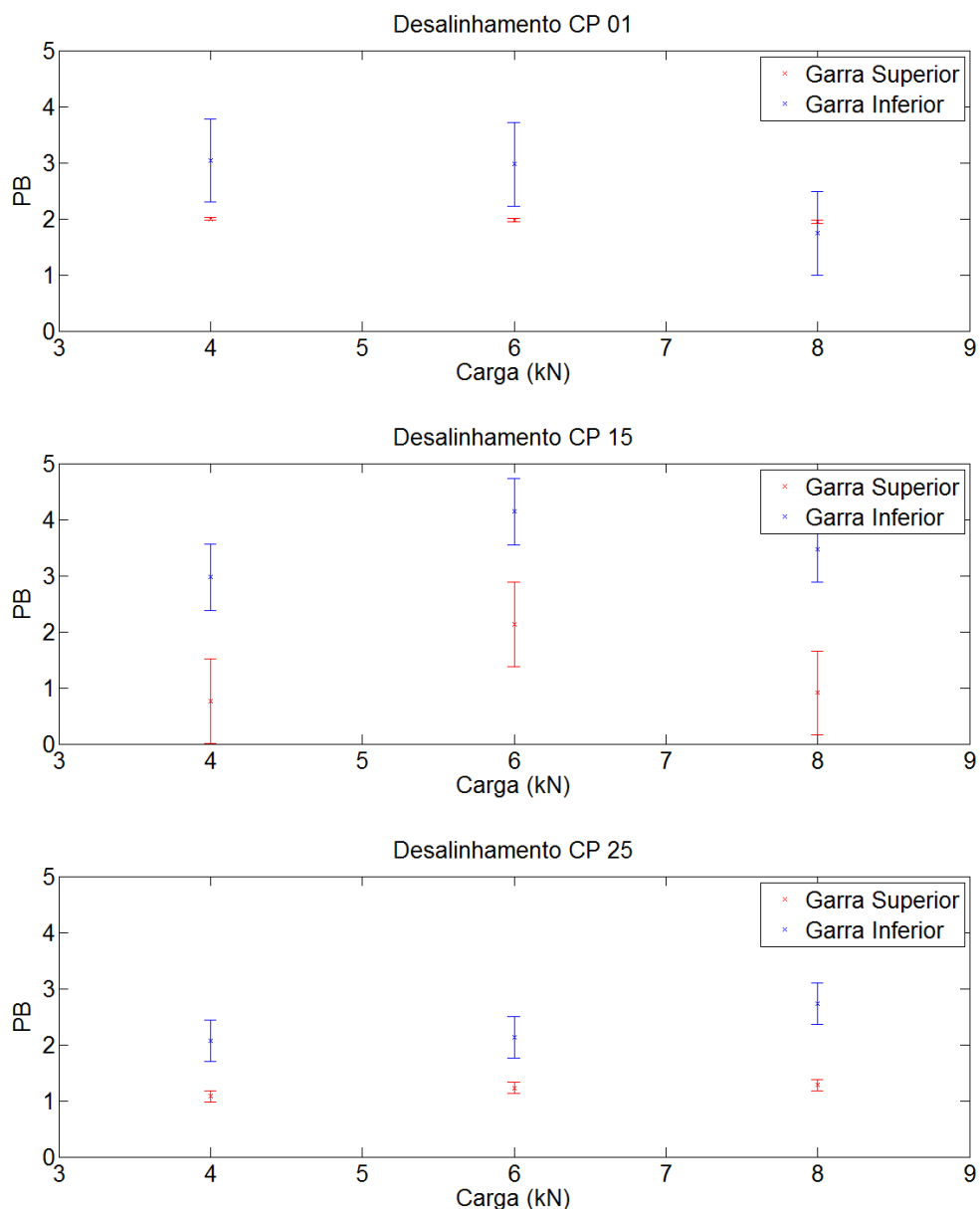
Para a avaliação do desalinhamento foi realizado a fixação do corpo de prova na máquina universal de ensaios com as garras hidráulicas. Posteriormente, aplica-se a carga máxima para a minimização da histerese (inércia do sistema).

Após este procedimento, será aplicado diferentes valores de carga e frequência, e em simultâneo realiza-se as leituras em cada um dos seis (6) *strain gauges* instrumentados no corpo de prova. As leituras dos *strain gauges* serão divididos em 2 grupos com 3 sensores cada, os sensores que estejam localizados na parte superior do corpo de prova foram atribuídos sua leitura ao desalinhamento da “garra superior”, e, de forma idêntica, os sensores localizados na seção inferior serão atribuídos a sua leitura ao desalinhamento da “garra inferior”.

Matematicamente, o cálculo do desalinhamento – PB será realizado conforme a descrição da norma ASTM E1012-14 (ASTM, 2014) item 10.2.1.

Os três corpos de prova (CP 01, CP 15 e CP 25) foram instrumentados em duas seções transversais, com o objetivo de verificar diferenças no valor do desalinhamento ao longo da seção longitudinal do corpo de prova. Os resultados do desalinhamento médio para cada corpo de prova (Garra Superior e Garras Inferior) e seu respectivo desvio padrão são mostrados na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Desalinhamento calculado para cada corpo de prova, separados pelo conjunto de três *strain gauges* nomeados por Garras Superior e Inferior.

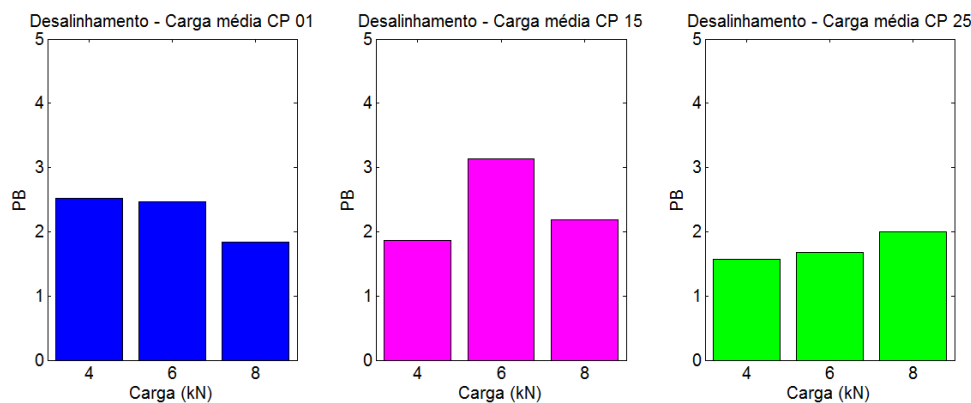


Ressalta-se que os valores de desalinhamento apresentados na Figura 4.5 foram calculados com base na leitura dos *strain gauges* no intervalo de tempo em que é aplicada a carga máxima e que esta foi estabilizada pela máquina universal de ensaios. O valor médio e o desvio padrão apresentados foram calculados com base neste valor de desalinhamento para as três combinações de carga máxima: 4 kN, 6kN e 8kN.

Os resultados mostrados na Figura 4.5 mostram que existem valores diferentes do valor do desalinhamento tanto para os *strain gauges* representativos da Garra Superior quanto a Garra Inferior. No entanto, estes valores encontram-se dentro do valor máximo estipulado na norma ASTM E466-07 (ASTM, 2007) que é de 5% da carga aplicada.

A Figura 4.6 mostra o cálculo do *PB* considerando a média entre as garras superior e inferior, para cada uma das cargas máxima e mesmo corpo de prova. Verificou-se que não há relação matemática entre carga aplicada nos corpos de prova e o valor do desalinhamento, ou seja, não há relação entre o aumento de carga com aumento do valor do desalinhamento - *PB*.

Figura 4.6 – Resultado obtido para o desalinhamento para cada um dos três corpos de prova em função da carga usada.



Mesmo não demonstrando uma relação matemática entre carga aplicada e o valor do desalinhamento *PB*, COSTA 2010 demonstra que quanto maior for a carga aplicada, maior será o assentamento do corpo de prova (menor desalinhamento), sendo que este valor não será nulo. Essa relação matemática não foi verificada experimentalmente, mas, para os três valores de carga, seu valor mantém menor que o valor máximo aceito de 5%. (ASTM E466-07 (ASTM, 2007)).

4.5 Calibração Estática - verificações na Máquina Universal de Ensaios

Um resumo do procedimento da calibração estática do dinamômetro foi organizado utilizado com base na norma ASTM E467-08 (ASTM, 2008) sendo descrito nos itens 1 a 5 – mostrados a seguir:

1. Partir da carga zero, exercitar o sistema até 5% acima da carga máxima. Retornar a carga zero. Zerar ou tarar a indicação dos *strain gauges* instalados no corpo de prova utilizado. Este procedimento tem o objetivo de minimizar a histerese do sistema.

2. Aplicar com velocidade baixa, cada um dos valores de cargas indicadas nas medidas 1 a 6 descritos na Tabela 4.8. Anotar os valores indicados pelos seis (6) *strain gauges* do corpo de prova em cada carga, assim facilita a identificação deste valor nas leituras realizadas nos sensores.

A Tabela 4.8 mostra a combinação de carga a ser aplicada pela máquina de ensaios com suas variações em cada medida. É importante ressaltar que as leituras em relação a aplicação da carga devem seguir a ordem indicada por essa tabela. A variação aplicada à carga máxima e carga mínima é função do valor da amplitude da carga, seu valor é resultado obtido a partir da Equação 4.11.

Tabela 4.8 – Combinação de carga para verificação da calibração estática da máquina de ensaios.

Medida	Carga aplicada
1	Carga máxima - 5%*(Amplitude.Carga)
2	Carga máxima
3	Carga máxima + 5%*(Amplitude.Carga)
4	Carga mínima + 5%*(Amplitude.Carga)
5	Carga mínima
6	Carga mínima - 5%*(Amplitude.Carga)

Fonte: Adaptado de ASTM E467-08 (2008).

$$Amplitude.Carga = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad \text{Equação 4.11}$$

Pela norma ASTM E467-08 (ASTM, 2008), o erro associado a repetitividade da força máxima no dinamômetro não deve exceder a $\pm 0,25\%$ da força máxima aplicada na máquina de ensaios.

3. Para realizar a verificação dinâmica: usar a mesma frequência que será usada no ensaio. Iniciar o comando cíclico na máquina de ensaios. É necessário esperar com que o sistema atinja os valores de máximos e mínimos de carga. Aguardar até que os valores de carga estejam estáveis.

4. Realizar a aquisição de no mínimo cinquenta valores de carga máxima e da carga mínima tanto na máquina de ensaios (dinamômetro) e nos *strain gauges*, simultaneamente.

5. Comparar as diferenças entre os valores de carga medidos pela carga na máquina de ensaios e os valores medidos pelos *strain gauges*. A norma ASTM E467-08 (ASTM, 2008) exige que o erro entre medições não pode ser maior que 1% para nenhum ciclo.

É importante ressaltar que o valor de carga medido pela célula de carga é diferente do valor medido pelos *strain gauges*, devido à aceleração e desaceleração dos ciclos e a inércia do sistema. Assim, é necessário corrigir os valores medidos pela célula de carga com base nos valores medidos nos sensores dos corpos de prova.

Assim, os resultados da deformação medidos separados para cada um dos corpos de prova instrumentados (CP 01, CP 15 e CP 25), pelos conjuntos dos *strain gauges* (superior e inferior), resultados da calibração estática serão mostrados no Apêndice G. Estes valores de deformação foram obtidos para o tempo de 10 segundos enquanto a carga é mantida estável pela máquina universal de ensaios – MTS, para carga máxima e também para a carga mínima (considerando razão de carregamento de 0,1).

As verificações realizadas em relação ao desalinhamento e a calibração estática encontram-se dentro do esperado. Mesmo que esses fatores são fontes de incerteza para correção da tensão de ensaio, para quantificar sua influência seria necessário realizar ensaios em que fosse possível simular diferentes valores de desalinhamento em que todas as outras variáveis fossem mantidas constantes. Já para determinar a influência da fonte de incerteza relacionada à calibração estática, onde é realizada a medição da deformação do corpo de prova, a lógica seria a mesma, variar a deformação exercida no corpo de prova, mantendo as outras fontes de incerteza constantes.

4.6 Avaliação do Sistema de Medição

A medição do diâmetro foi realizada com micrômetro da marca *Pantec* pertencente ao LAMEF, faixa de medição de 0 a 25 *mm* e resolução de 0,001 *mm*. Para este estudo, foi determinado que cada técnico realize três (3) medidas do diâmetro no centro de cada corpo de prova. Foram comparadas as medidas realizadas por 2 técnicos, sendo seus resultados mostrados na Tabela 4.9. A letra *R* representa a amplitude entre as medidas realizadas pelo mesmo operador.

Tabela 4.9 – Resultado das medições de diâmetro. [mm]

Medida (Ciclo)	Técnico A					Técnico B					Média CP
	1	2	3	\bar{x}	R	1	2	3	\bar{x}	R	
CP 1	7,003	7,005	7,007	7,005	0,004	7,002	7,000	6,997	7,000	0,005	7,002
CP 2	7,022	7,024	7,025	7,024	0,003	7,023	7,024	7,025	7,024	0,002	7,024
CP 3	7,009	7,011	7,008	7,009	0,003	7,011	7,013	7,009	7,011	0,004	7,010
CP 4	7,020	7,022	7,020	7,021	0,002	7,026	7,020	7,022	7,023	0,006	7,022
CP 5	7,003	6,997	6,998	6,999	0,006	7,006	7,002	7,002	7,003	0,004	7,001
CP 6	7,000	7,001	7,007	7,003	0,007	7,000	7,005	7,002	7,002	0,005	7,003
CP 7	7,000	6,995	6,994	6,996	0,006	7,000	7,000	6,997	6,999	0,003	6,998
CP 8	7,001	7,003	7,004	7,003	0,003	6,998	6,999	6,995	6,997	0,004	7,000
CP 9	6,997	6,975	6,997	6,990	0,022	6,980	6,993	6,989	6,987	0,013	6,989
CP 10	6,960	6,964	6,958	6,961	0,006	6,962	6,963	6,960	6,962	0,003	6,961
CP 11	6,994	7,000	6,993	6,996	0,007	7,000	7,001	6,998	7,000	0,003	6,998
CP 12	6,992	6,990	6,987	6,990	0,005	6,990	6,991	6,989	6,990	0,002	6,990
CP 13	6,991	6,993	6,994	6,993	0,003	6,992	6,997	6,993	6,994	0,005	6,993
CP 14	6,993	6,997	6,995	6,995	0,004	6,995	6,994	6,993	6,994	0,002	6,995
CP 15	7,008	7,006	7,010	7,008	0,004	7,006	7,005	7,009	7,007	0,004	7,007
CP 16	7,013	7,008	7,014	7,012	0,006	7,009	7,005	7,008	7,007	0,004	7,010
CP 17	7,011	7,010	7,006	7,009	0,005	7,003	7,004	7,005	7,004	0,002	7,007
CP 18	7,008	7,006	7,007	7,007	0,002	7,006	7,008	7,007	7,007	0,002	7,007
CP 19	7,006	7,012	7,003	7,007	0,009	7,006	7,005	7,006	7,006	0,001	7,006
CP 20	6,999	7,006	6,996	7,000	0,010	7,004	7,000	7,001	7,002	0,004	7,001
CP 21	7,004	7,002	7,003	7,003	0,002	7,005	7,007	7,011	7,008	0,006	7,005
CP 22	7,008	7,007	7,004	7,006	0,004	7,000	7,005	7,004	7,003	0,005	7,005
CP 23	7,015	7,014	7,010	7,013	0,005	7,003	7,007	7,010	7,007	0,007	7,010
CP 24	6,997	7,000	7,001	6,999	0,004	7,001	6,999	7,000	7,000	0,002	7,000
CP 25	7,004	7,003	7,001	7,003	0,003	6,998	7,002	7,004	7,001	0,006	7,002
CP 26	7,007	7,006	7,001	7,005	0,006	7,012	7,010	7,009	7,010	0,003	7,008
CP 27	7,010	7,011	7,007	7,009	0,004	7,010	7,012	7,011	7,011	0,002	7,010
CP 28	7,017	7,014	7,010	7,014	0,007	7,011	7,016	7,014	7,014	0,005	7,014
CP 29	7,015	7,017	7,012	7,015	0,005	7,016	7,013	7,014	7,014	0,003	7,015
CP 30	7,147	7,106	7,087	7,113	0,060	7,009	7,007	7,008	7,008	0,002	7,061
CP 31	7,000	7,004	6,998	7,001	0,006	7,005	6,998	6,999	7,001	0,007	7,001
CP 32	6,997	7,006	6,994	6,999	0,012	7,002	7,010	7,009	7,007	0,008	7,003
CP 33	7,016	7,010	7,012	7,013	0,006	7,009	7,007	7,006	7,007	0,003	7,010
CP 34	7,015	7,017	7,010	7,014	0,007	7,008	7,007	7,005	7,007	0,003	7,010
CP 35	7,006	7,004	7,008	7,006	0,004	7,011	7,013	7,015	7,013	0,004	7,010
CP 36	7,007	7,014	7,011	7,011	0,007	7,009	6,996	7,100	7,035	0,104	7,023
Média	Técnico A			7,007	0,007	Técnico B			7,005	0,007	7,006

Para a avaliação da reprodutibilidade e repetitividade do sistema de medição do diâmetro, foi escolhido o estudo formal de R&R pelo método da Análise de Variância (ANOVA), com este método é possível ter estimativa mais precisa da variância dos experimentos realizados (TEN CATEN; RIBEIRO, 2012). O estudo de R&R foi realizado no *software* Minitab. O resultado da análise de variância (ANOVA) de dois fatores (*Two-way*) são descritos na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Resultados da análise de variância (ANOVA) obtidos pelo Minitab.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade (DF)	Soma dos Quadrados (SS)	Quadrados médios (MS)	F	Valor p
CP	35	0,0389831	0,0011138	2,12885	0,014
Técnico	1	0,00045	0,0004594	0,87802	0,355
CP*Técnico	35	0,0183118	0,0005232	6,30741	0,000
Repetibilidade	144	0,0119447	0,0000829		
Total	215	0,0696990			

Conforme mostrado na Tabela 4.10, como o “valor p” para o CP é 0,014, menor que 0,05 (nível de significância de 5%), evidencia que há diferenças significativas entre os corpos de prova. Já para a análise realizado para Técnicos, como o valor p é maior que 0,05, não há diferença significativa entre os técnicos. Como o valor p é 0,000 para variável “CP*Técnico”, verifica assim que há diferenças significativas entre os corpos de prova (CP) e essa diferença varia entre os Técnicos.

A partir dos dados apresentados na Tabela 4.10 serão obtidos os valores de variação (Tabela 4.11).

Tabela 4.11 – Estudo da variância calculado com base nos resultados da Tabela 4.10.

Fonte de Variação	Variação		Estudo da Variância		
	Componente da Variação	Porcentagem (%)	Desvio Padrão (SD)	6*SD	Porcentagem (%)
R&R	0,0002297	70,00	0,0151558	0,090935	83,67
Repetitividade	0,0000829	25,28	0,0091076	0,054646	50,28
Reprodutibilidade	0,0001467	44,72	0,0121140	0,072684	66,87
Técnico	0,0000000	0,00	0,0000000	0,000000	0,00
Técnico * CP	0,0001467	44,72	0,0121140	0,072684	66,87
Peça-a-Peça	0,0000984	30,00	0,0099214	0,059529	54,77
Total	0,0003281	100,00	0,0181144	0,108687	100,00

O valor de R&R calculado é de 83,67%, mostra que o sistema de medição possui grande variabilidade e recomenda-se que este sistema de medição precisa ser melhorado, conforme critério do Manual de Análise de Sistemas de Medição (MSA), que recomenda que sistemas com R&R maior que 30% sejam revistos (AIAG, 2002). Na proporção reprodutibilidade x repetitividade, a contribuição maior é relativa à reprodutibilidade, cerca de 66,87%, quando comparado a 50,25% relativo a repetitividade. A variação relativa peça-a-peça deve ser considerado, sua variação proporcional é de 54,77%.

Assim, recomendam-se as seguintes melhorias para o sistema de medição dimensional: treinamento dos técnicos, melhorias no sistema de usinagem e padronização do sistema de medição.

4.7 Ensaio de Rugosidade e Fator de Correção

Para facilitar a leitura e manipulação dos corpos de prova, os mesmos foram organizados conforme descrito na Tabela 4.12, relacionando a tensão utilizada no ensaio de fadiga e a sua respectiva rugosidade. A distribuição dos corpos de prova está relacionada a um dos objetivos iniciais deste projeto: verificação da influência da rugosidade no valor da tensão corrigida e sua respectiva incerteza de medição.

Tabela 4.12 – Distribuição da rugosidade dos corpos de prova e respectiva rugosidade.

Tensão de Ensaio	Ru1 _{#800p}	Ru2 _{#500}	Ru3 _{#320}
Preparação	Lixamento #800 e Com polimento	Lixamento #500 sem polimento	Lixamento #320 sem polimento
480 MPa	CP 1	CP 5	CP 9
	CP 2	CP 6	CP 10
	CP 3	CP 7	CP 11
	CP 4	CP 8	CP 12
500 MPa	CP 13	CP 17	CP 21
	CP 14	CP 18	CP 22
	CP 15	CP 19	CP 23
	CP 16	CP 20	CP 24
520 MPa	CP 25	CP 29	CP 33
	CP 26	CP 30	CP 34
	CP 27	CP 31	CP 35
	CP 28	CP 32	CP 36

As medidas de rugosidade serão apresentadas no Apêndice D, Apêndice E e Apêndice F. No Apêndice D apresenta-se os valores da rugosidade R_a , no Apêndice E os valores de rugosidade R_z e finalmente no Apêndice F, os valores de rugosidade R_y . A Tabela 4.13 mostra os resultados médios e de desvio padrão para os valores de rugosidade R_z de cada CP com base nas 5 medidas realizadas.

Tabela 4.13 – Rugosidade superficial R_z . [μm]

Corpo de Prova	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9
Média (μ)	0,404	0,572	0,830	0,498	0,930	1,000	0,910	1,048	1,814
Desvio-Padrão (σ)	0,043	0,080	0,210	0,173	0,068	0,098	0,020	0,090	0,088
Corpo de Prova	CP 10	CP 11	CP 12	CP 13	CP 14	CP 15	CP 16	CP 17	CP 18
Média (μ)	2,052	1,850	2,154	0,830	0,498	1,192	0,838	1,376	1,386
Desvio-Padrão (σ)	0,098	0,076	0,244	0,209	0,074	0,119	0,033	0,453	0,399
Corpo de Prova	CP 19	CP 20	CP 21	CP 22	CP 23	CP 24	CP 25	CP 26	CP 27
Média (μ)	1,706	1,500	1,804	1,676	1,880	2,416	0,768	0,688	0,684
Desvio-Padrão (σ)	0,333	0,206	0,094	0,058	0,125	0,605	0,087	0,086	0,159
Corpo de Prova	CP 28	CP 29	CP 30	CP 31	CP 32	CP 33	CP 34	CP 35	CP 36
Média (μ)	0,698	1,176	1,812	1,428	1,560	1,960	2,470	2,268	2,138
Desvio-Padrão (σ)	0,120	0,127	0,779	0,227	0,301	0,277	0,603	0,342	0,192

É necessário relacionar o valor de rugosidade medido em (μm) em valor equivalente a tensão (MPa), podendo ser descrito por um fator proporcional de conversão entre as duas unidades. Esse fator de correção pode depender da temperatura de ensaio, carregamento sofrido durante o ensaio de fadiga, a existência ou não de entalhe no corpo de prova entre outros fatores.

Um dos métodos mais simples para a determinação deste fator de correção ($C_{\sigma,R}$) (Equação 4.12) é o método descrito pelo guia FKM-Guideline (2003). Este fator será então multiplicado pela tensão utilizada durante o ensaio de fadiga para cada corpo de prova. A descrição matemática (FKM-Guideline, 2003) é mostrada a partir da Equação 4.12, válida tanto para esforços axiais quanto esforços de torção.

$$C_{\sigma,R} = 1 - a_r \cdot \log(R_z) \cdot \log\left(\frac{2S_{t,u}}{S_{t,u,\min}}\right) \quad \text{Equação 4.12}$$

Os valores de a_r e $S_{t,u,\min}$ são relacionados na Tabela 4.14, e dependem do material e também da condição de tratamento termomecânico, caso haja. O valor do R_z é determinado experimentalmente através do ensaio de rugosidade.

Tabela 4.14 – Relação entre material e constante relacionada a rugosidade e resistência mínima à tração.

Material	a_R (adimensional)	$S_{t,u,min}$ (MPa)
Aço	0,22	400
Aço fundido	0,20	400
Ferro Fundido Nodular	0,16	400
Ferro Fundido Maleável	0,12	350
Ferro Fundido Cinzento	0,06	100
Liga de Alumínio Forjado	0,22	133
Liga de Alumínio Fundido	0,20	133

Fonte: Adaptado de FKM-Guideline (2003).

Como não há classificação entre os diferentes tipos de aço será utilizado os valores de a_R e $S_{t,u,min}$ para aço. Para a determinação do $S_{t,u}$, resistência mecânica real do componente, esta deve ser calculada pela Equação 4.13.

$$S_{t,u} = C_D \cdot C_R \cdot S_{t,u,std} \quad \text{Equação 4.13}$$

C_R é o fator de correção da confiança utilizado para este ensaio e o parâmetro C_D é o fator de correção para o diâmetro do corpo de prova. A Tabela 4.15 mostra os valores de C_R para distintos valores de confiança.

Tabela 4.15 – Valores de C_R para cada nível de confiança.

Nível de Confiança	C_R
0,90	0,897
0,95	0,868
0,975	0,843
0,99	0,814
0,999	0,753
0,9999	0,702
0,99999	0,659

Fonte: Adaptado de FKM-Guideline (2003).

Entretanto, para a determinação do valor do C_D , fator de correção para o diâmetro do corpo de prova, este fator é usado para a correção da tensão para corpos de prova com diâmetros reduzidos. Para todas as ligas ferrosas, se o diâmetro for menor que 7,5 mm, o valor do C_D é igual a 1,0.

Finalmente, para a conclusão do cálculo do fator de conversão, o valor da $S_{t,u,std}$ é relacionado tanto para aço quanto para ligas de alumínio, sendo a média da resistência à tração de um corpo de prova padrão, dada pela Equação 4.14.

$$S_{t,u,std} = 3,45.Dureza(HB) \quad \text{Equação 4.14}$$

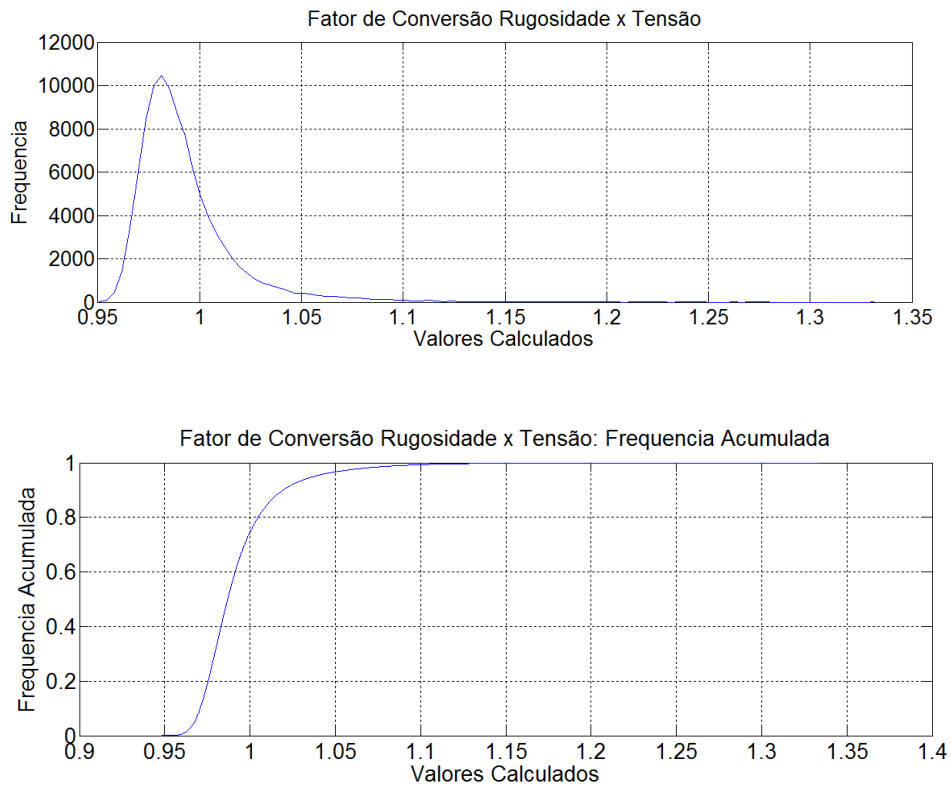
Finalmente, organizando todos os valores para cada parâmetro, a Equação 4.12 será expressa para as condições descritas para esta tese pela Equação 4.15.

$$C_{\sigma,R} = 1 - 0,22.\log(R_z).\log(0,014973.dureza(HB)) \quad \text{Equação 4.15}$$

A Equação 4.15 será usada como um termo de correção na incerteza de medição para a tensão de ensaio. Esse fator de correção também terá seu valor estimado pelo Método de Monte Carlo em conjunto com os valores experimentais medidos.

Assim, realizando simulação com uso do Método de Monte Carlo, considerando uma distribuição normal tanto para os resultados do ensaio de dureza quanto aos valores de rugosidade (R_z) para o número de iterações determinadas inicialmente 10^5 (Figura 4.7), esses valores foram usados como média das médias de todos os corpos de prova.

Figura 4.7 – Fator de conversão ($C_{\sigma,R}$) entre rugosidade e tensão para número de simulação de 100.000 iterações.



A Figura 4.7 mostrou que o fator de correção possui uma distribuição de probabilidade que se aproxima de um log-normal. Seus valores encontram-se distribuídos em um intervalo entre 0,95 a 1,15, aproximadamente. É importante ressaltar que esses valores demonstrados na Figura 4.7 foram obtidos para todos os corpos de prova, independente da tensão e rugosidade superficial dos mesmos.

Assim, é importante calcular o fator de correção para cada um dos níveis de rugosidade e tensão de ensaio. A Figura 4.8 mostra o fator de conversão para $Ru1_{\#800p}$, a Figura 4.9 mostra os valores obtidos para o fator de conversão para o $Ru2_{\#500}$, e finalmente a Figura 4.10 mostra os valores para $Ru3_{\#320}$. Para todos os resultados obtidos nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 foram utilizados um número de iterações de 100.000.

Figura 4.8 – Fator de conversão ($C_{\sigma,R}$) para os valores de ($Ru1_{\#500p}$) para diferentes tensões de ensaio.

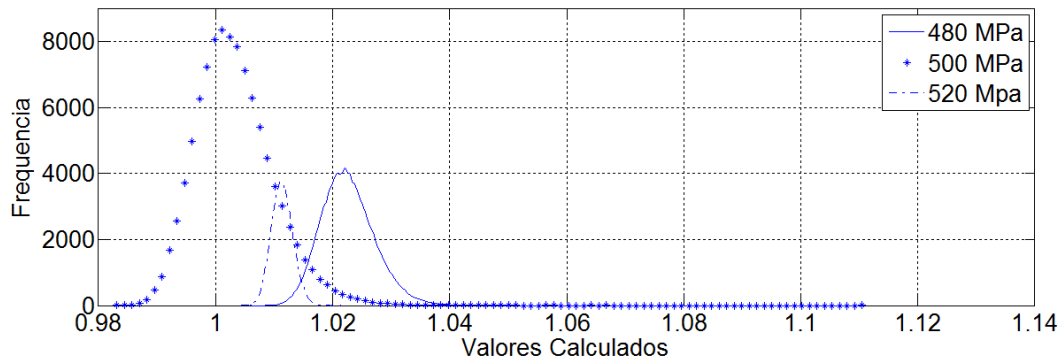


Figura 4.9 – Fator de conversão ($C_{\sigma,R}$) para os valores de $Ru2_{\#500}$ para diferentes tensões de ensaio.

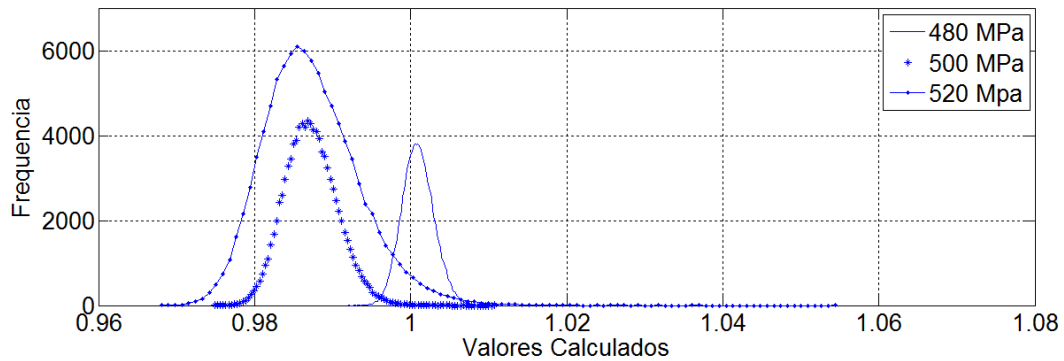
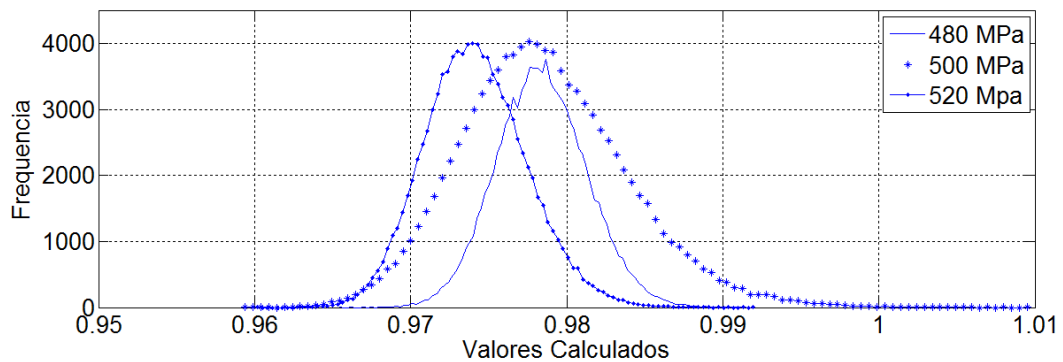


Figura 4.10 – Fator de conversão ($C_{\sigma,R}$) para os valores de $Ru3_{\#320}$ para diferentes tensões de ensaio.



Os resultados apresentados nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 mostram valores do fator de correção próximos a 1,0. É possível observar também a diferença entre as distribuições de probabilidade para mesmo nível de rugosidade, como é o caso da Figura 4.8 onde a tensão de 500 MPa possui valores com frequência maior que os outros valores de tensão, isso ocorre devido a distribuições de valores das medidas experimentais de rugosidade e dureza.

4.8 Ensaio de Fadiga e Curva S-N

A análise da superfície de fratura dos corpos de prova permite estimar o ponto inicial da trinca e possíveis alterações na superfície da fratura que possam ter ocorrido aos quais justifiquem possíveis dispersões nos valores indicados para o número de ciclos. (LAMEF, 2013)

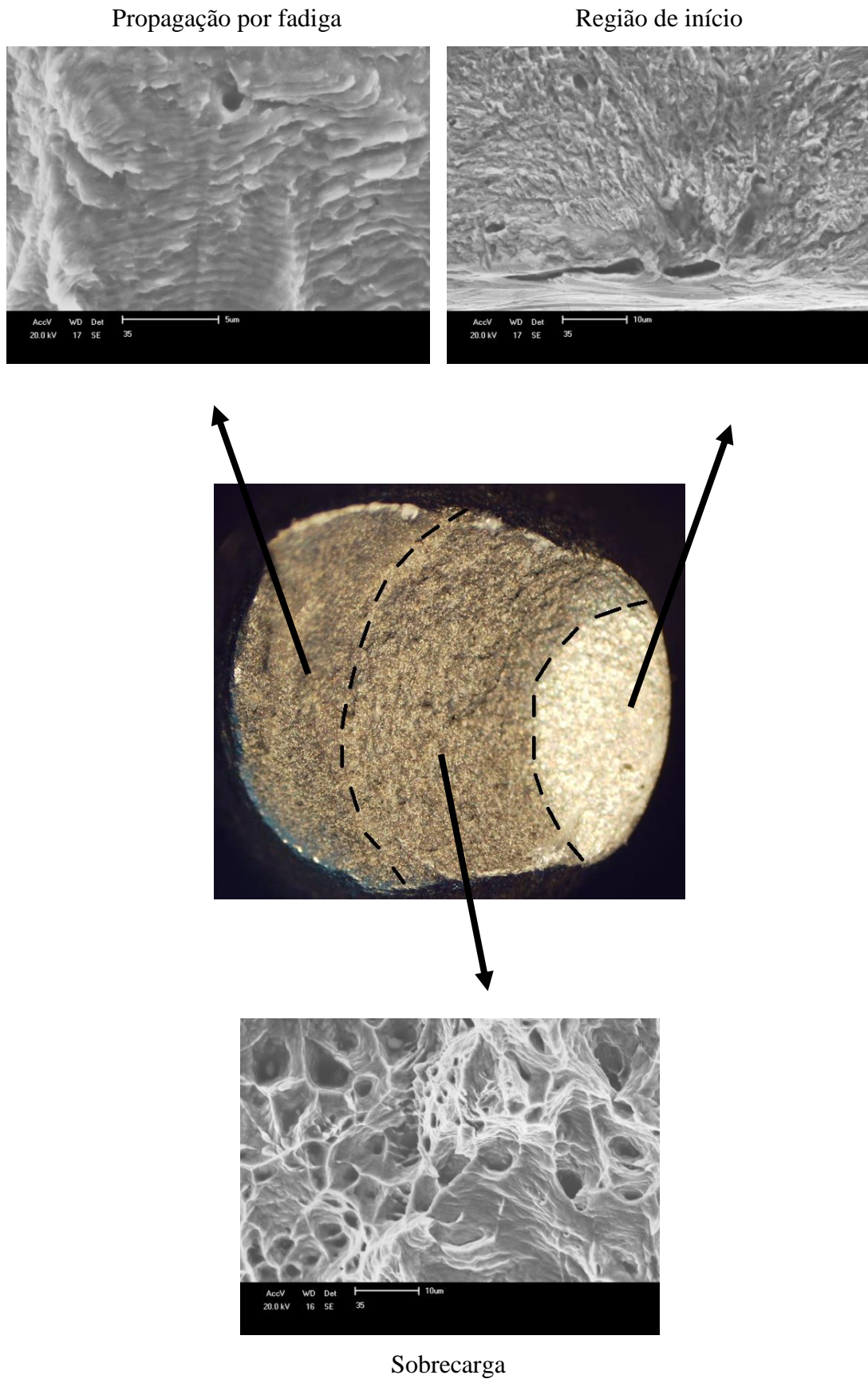
Considerando as características do ensaio de fadiga, onde o material foi submetido as mesmas condições de ensaios, mudando apenas o acabamento superficial e também a tensão de ensaio. A Figura 4.11 mostra a superfície de fratura de um corpo de prova escolhido aleatoriamente.

A análise foi realizada com uso de uma lupa para a análise macro da fratura e para cada uma das regiões da fratura foi realizada imagem com uso da microscopia eletrônica de varredura. O microscópio eletrônico de varredura utilizado é o modelo *Shimadzu – SSX 550*, pertencente ao LAMEF. Verificou-se que a superfície de fratura é dividida em 3 regiões distintas: nucleação de falha, propagação e ruptura (sobrecarga).

A nucleação da fratura por fadiga geralmente inicia em pequenas deformações na superfície do corpo de prova e estas pequenas deformações se transformam em concentradores de tensão. Por isso, ocorre a influência da rugosidade no número de ciclos suportados pelo material (LAMEF, 2013).

É na região de propagação por fadiga que ocorre o crescimento da trinca em um plano perpendicular à direção da tensão normal. A ruptura ocorre quando a seção reduz suficiente, não suportando carga e rompendo por sobrecarga (LAMEF, 2013).

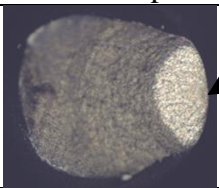
Figura 4.11 – Distintas regiões relacionadas ao início, propagação e sobrecarga da superfície de fratura dos corpos de prova.



Os ensaios de fadiga foram realizados conforme descrição realizada no capítulo Procedimento Experimental. As Tabelas 4.16 a 4.24 mostram os resultados obtidos, assim os corpos de prova serão agrupados sob mesmo valor de tensão de ensaio de fadiga e mesma rugosidade, facilitando a comparação entre si e suas respectivas conclusões. Ao final de cada tabela será apresentado valores médios e de desvio padrão para cada grupo, incluindo o fator proporção em relação ao número de ciclos calculado conforme a Equação 4.16.

$$\text{Proporção Número Ciclos (\%)} = \left(\frac{\text{Desvio-padrão}}{\text{Média}} \right) \cdot 100\% \quad \text{Equação 4.16}$$


Tabela 4.16 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 480 MPa e rugosidade Ru1#800p.

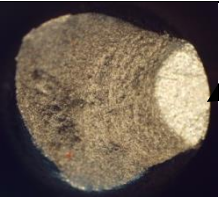


CP	Rugosidade	Número de Ciclos	Aspecto Macrográfico	Observações
1	$\bar{x} = 0,404$ $\sigma = 0,043$	1.000.000 <i>Run out</i>	---	Não ocorreu fratura
2	$\bar{x} = 0,672$ $\sigma = 0,080$	1.000.000 <i>Run out</i>	---	Não ocorreu fratura
3	Corpo de prova perdido - desprezado			
4	$\bar{x} = 0,498$ $\sigma = 0,173$	671.497		Apenas um ponto inicial da falha
Rugosidade Média	Rugosidade Desvio-padrão	Número de Ciclos Média	Número de Ciclos Desvio-padrão	Proporção Número de Ciclos
0,491	0,082	890.499	189.661	21,30%

A partir da Tabela 4.16:

- Não ocorreu fratura nos corpos de prova 1 e 2;
- CP 3 foi perdido;
- O CP 4 apresentou um ponto de iniciação de falha.

Tabela 4.17 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 480 MPa e rugosidade Ru2#500.

CP	Rugosidade	Número de Ciclos	Aspecto Macrográfico	Observações
5	$\bar{x} = 0,930$ $\sigma = 0,068$	41.963		Apenas um ponto inicial da falha

6	$\bar{x} = 1,000$ $\sigma = 0,098$	114.463		Apenas um ponto inicial da falha
7	$\bar{x} = 0,910$ $\sigma = 0,020$	137.158		Apenas um ponto inicial da falha
8	$\bar{x} = 1,048$ $\sigma = 0,090$	88.675		Apenas um ponto inicial da falha
Rugosidade Média	Rugosidade Desvio-padrão	Número de Ciclos Média	Número de Ciclos Desvio-padrão	Proporção Número de Ciclos
0,986	0,070	113.432	24.258	21,38%

A partir da Tabela 4.17:

- Todos os corpos de prova apresentaram um ponto de iniciação da falha;
- O corpo de prova número 05 possui um valor de número de ciclos abaixo do valor médio. A Figura 4.12 mostra a análise da superfície deste corpo de prova realizada no microscópio eletrônico de varredura. Verifica-se as marcas de usinagem na superfície do corpo de prova. Provavelmente estas marcas de usinagem devem ter sido originadas na preparação da superfície e assim exerceram um concentrador de tensão na superfície, ocasionando a ruptura do corpo de prova. Assim, os resultados obtidos para este corpo de prova serão desprezados nos cálculos estatísticos.

Figura 4.12 – Região de iniciação da falha e superfície de fratura do corpo de prova número 05. Mostra no detalhe marcas de ferramentas geradas no processo de usinagem.

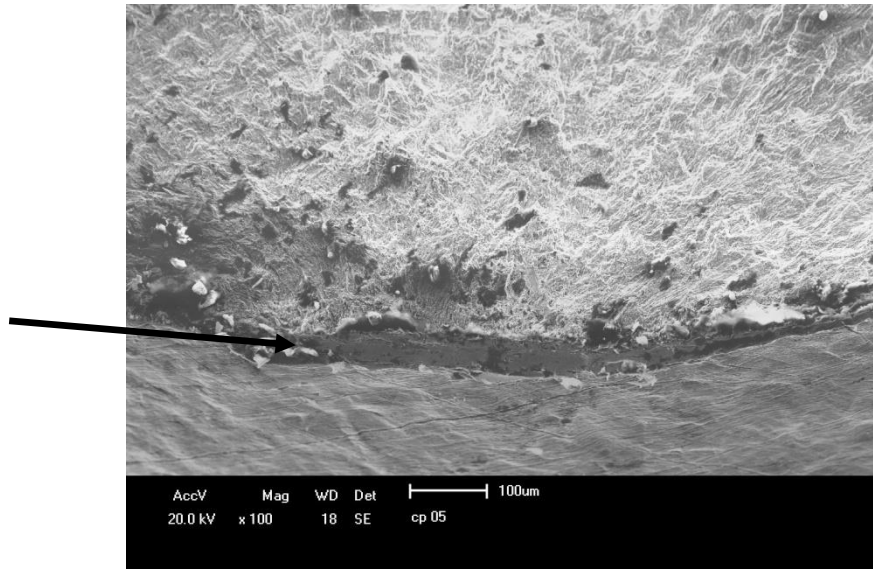
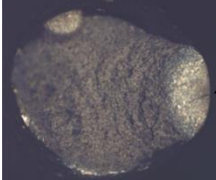









Tabela 4.18 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 480 MPa e rugosidade Ru3#320.

CP	Rugosidade	Número de Ciclos	Aspecto Macrográfico	Observações
9	$\bar{x} = 1,814$ $\sigma = 0,088$	125.315		Indicativo de mais de um ponto inicial da falha
10	$\bar{x} = 2,052$ $\sigma = 0,098$	130.174		Indicativo de mais de um ponto inicial da falha
11	$\bar{x} = 1,850$ $\sigma = 0,076$	139.225		Apenas um ponto inicial da falha
12	$\bar{x} = 2,154$ $\sigma = 0,244$	87.009		Apenas um ponto inicial da falha
Rugosidade Média	Rugosidade Desvio-padrão	Número de Ciclos Média	Número de Ciclos Desvio-padrão	Proporção Número de Ciclos
1,968	0,163	120.431	23.015	19,10%

A partir da Tabela 4.18:

- Os corpos de prova números 09 e 10 possuem dois pontos de iniciação da falha, já os corpos de prova números 11 e 12 tem apenas um ponto de iniciação de falha;
- O corpo de prova número 12 possui maior rugosidade quando comparados aos outros CP's do mesmo grupo, por isso suportou menor número de ciclos.

Tabela 4.19 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 500 MPa e rugosidade Ru1#800p.

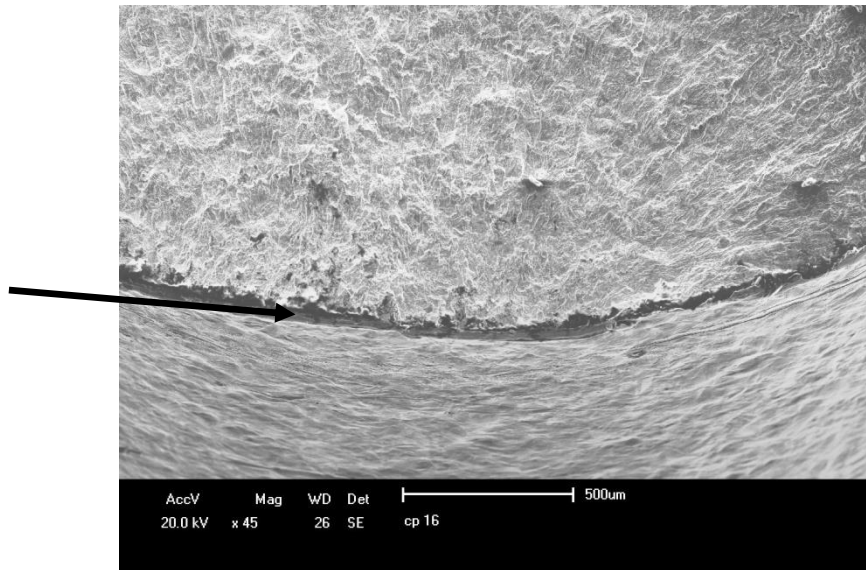
CP	Rugosidade	Número de Ciclos	Aspecto Macrográfico	Observações
13	$\bar{x} = 0,830$ $\sigma = 0,209$	209.524		Apenas um ponto inicial da falha
14	$\bar{x} = 0,814$ $\sigma = 0,132$	208.767		Apenas um ponto inicial da falha
15	$\bar{x} = 1,192$ $\sigma = 0,119$	172.120		Apenas um ponto inicial da falha
16	$\bar{x} = 0,838$ $\sigma = 0,033$	48.078		Apenas um ponto inicial da falha
Rugosidade Média	Rugosidade Desvio-padrão	Número de Ciclos Média	Número de Ciclos Desvio-padrão	Proporção Número de Ciclos
0,945	0,214	196.803	23.015	19,10%

A partir da Tabela 4.19:

- O corpo de prova número 15 foi utilizado nas verificações de desalinhamento e calibrações estática. Além disso, apresenta um valor de rugosidade acima do valor médio quando comparados aos outros corpos de prova ensaiados sob mesmas condições (CP 13 e CP 14). A relação inversa entre rugosidade e número de ciclos é descrita neste caso: maior rugosidade representa menor número de ciclos suportados no ensaio de fadiga. Este corpo de prova não será desprezado nos resultados finais desta condição;



- O corpo de prova número 16 representa número de ciclos menores quando comparado aos outros corpos de prova ensaiados sob mesmos parâmetros. No entanto, a análise da superfície de fratura mostrou marcas de ferramenta provavelmente geradas no processo de usinagem do corpo de prova, conforme mostrado na Figura 4.13;


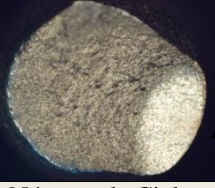
Figura 4.13 – Região de iniciação da falha e superfície de fratura do corpo de prova número 16, mostra no detalhe marcas de ferramentas geradas no processo de usinagem.



Conforme descrito anteriormente, mesmo que o valor da rugosidade encontra-se próximo aos outros corpos de prova e número de ciclos suportados foi reduzido. Sendo assim, conclui-se que, as medidas de rugosidade realizadas não foram representativas para este corpo de prova. Este corpo de prova será desprezado nos resultados finais.

Tabela 4.20 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 500 MPa e rugosidade Ru2#500.




CP	Rugosidade	Número de Ciclos	Aspecto Macrográfico	Observações
17	$\bar{x} = 1,376$ $\sigma = 0,453$	172.385		Apenas um ponto inicial da falha
18	$\bar{x} = 1,386$ $\sigma = 0,399$	156.863		Apenas um ponto inicial da falha

19	$\bar{x} = 1,706$ $\sigma = 0,333$	295.219		Apenas um ponto inicial da falha
20	$\bar{x} = 1,500$ $\sigma = 0,206$	225.464		Apenas um ponto inicial da falha
Rugosidade Média	Rugosidade Desvio-padrão	Número de Ciclos Média	Número de Ciclos Desvio-padrão	Proporção Número de Ciclos
1,492	0,153	212.483	62.490	29,41%

A partir da Tabela 4.20:

- Todos os corpos de prova apresentam um ponto de iniciação da falha por fadiga;
- A proporção Número de Ciclos possui valor maior que os outros grupos, a variabilidade dos resultados obtidos na rugosidade explica o valor de 29,41% da proporção em relação ao número de ciclos.

Tabela 4.21 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 500 MPa e rugosidade Ru3#320.





CP	Rugosidade	Número de Ciclos	Aspecto Macrográfico	Observações
21	Corpo de prova perdido – desprezado			
22	$\bar{x} = 1,676$ $\sigma = 0,058$	186.703		Apenas um ponto inicial da falha
23	$\bar{x} = 1,880$ $\sigma = 0,125$	120.822		Indicativo de mais de um ponto inicial da falha
24	$\bar{x} = 2,416$ $\sigma = 0,605$	171.546		Apenas um ponto inicial da falha
Rugosidade Média	Rugosidade Desvio-padrão	Número de Ciclos Média	Número de Ciclos Desvio-padrão	Proporção Número de Ciclos
1,991	0,382	159.690	34.504	21,60%

A partir da Tabela 4.21:

- O corpo de prova número 21 foi perdido;

- O corpo de prova número 23 apresenta mais de um ponto de iniciação da falha, apesar do valor da rugosidade superficial do corpo de prova, o número de ciclos suportados é considerável;
- Apesar dos corpos de prova números 22 e 24 apresentarem apenas um ponto de iniciação da falha por fadiga, sua diferença no número de ciclos se deve a diferença no valor da rugosidade superficial destes CP's, a rugosidade superficial do CP 22 é aproximadamente 30% menor do que CP 24.

Tabela 4.22 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 520 MPa e rugosidade $Ru1_{\#800p}$.


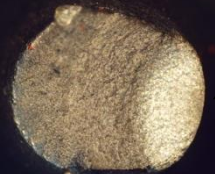


CP	Rugosidade	Número de Ciclos	Aspecto Macrográfico	Observações
25	$\bar{x} = 0,768$ $\sigma = 0,087$	326.303		Apenas um ponto inicial da falha
26	$\bar{x} = 0,688$ $\sigma = 0,086$	329.461		Apenas um ponto inicial da falha
27	$\bar{x} = 0,684$ $\sigma = 0,159$	329.266		Apenas um ponto inicial da falha
28	$\bar{x} = 0,698$ $\sigma = 0,120$	320.988		Apenas um ponto inicial da falha
Rugosidade Média	Rugosidade Desvio-padrão	Número de Ciclos Média	Número de Ciclos Desvio-padrão	Proporção Número de Ciclos
0,709	0,039	326.505	3.951	1,2%

A partir da Tabela 4.22:

- Todos os corpos de prova apresentam apenas um ponto de iniciação da falha;
- O corpo de prova número 25 foi utilizado nas verificações do desalinhamento e calibrações estáticas da máquina universal de ensaios;
- Ressalta-se a proporção do número de ciclos em valor de 1,2%, valor muito menor que a proporção considerando outras condições ensaiadas, isso se deve ao valor de rugosidade dos

CP's apresentarem próximos entre si, com proporção do desvio-padrão desta rugosidade em torno de 6%.


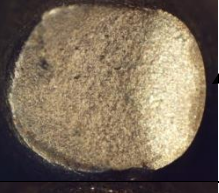


Tabela 4.23 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 520 MPa e rugosidade Ru2#500.

CP	Rugosidade	Número de Ciclos	Aspecto Macrográfico	Observações
29	$\bar{x} = 1,176$ $\sigma = 0,127$	249.930		Apenas um ponto inicial da falha
30	$\bar{x} = 1,812$ $\sigma = 0,779$	204.168		Apenas um ponto inicial da falha
31	$\bar{x} = 1,428$ $\sigma = 0,227$	190.681		Apenas um ponto inicial da falha
32	$\bar{x} = 1,560$ $\sigma = 0,301$	250.923		Apenas um ponto inicial da falha
Rugosidade Média	Rugosidade Desvio-padrão	Número de Ciclos Média	Número de Ciclos Desvio-padrão	Proporção Número de Ciclos
1,494	0,265	223.926	31.095	13,88%

A partir da Tabela 4.23:

- Todos os corpos de prova apresentam apenas um ponto de iniciação da falha;
- Para os corpos de prova número 30 e 31 o valor da rugosidade apresenta-se maior que os outros corpos de prova deste grupo, obedecendo a relação inversa entre rugosidade e número de ciclos.

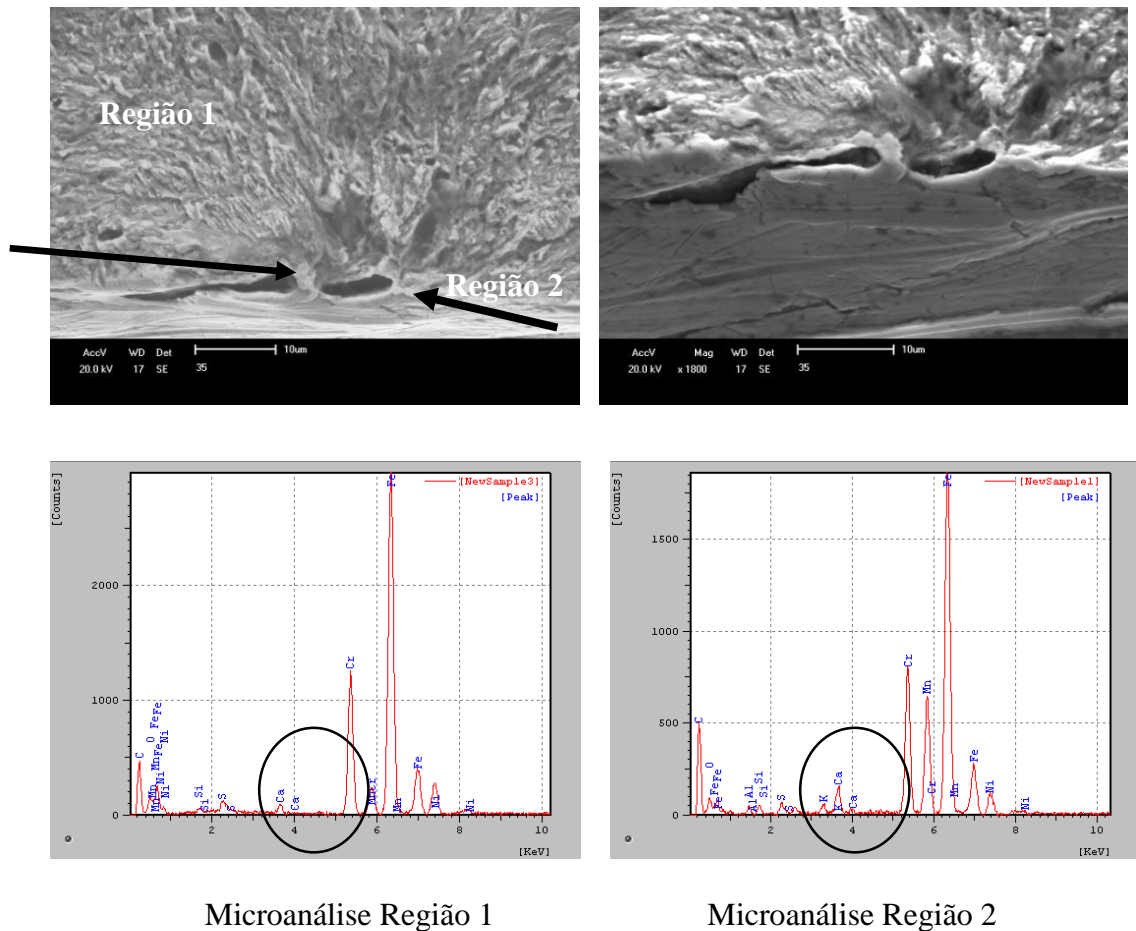
Tabela 4.24 – Resultado para corpos de prova ensaiados em 520 MPa e rugosidade Ru3#320.

CP	Rugosidade	Número de Ciclos	Aspecto Macrográfico	Observações
33	$\bar{x} = 1,960$ $\sigma = 0,277$	179.846		Indicativo de mais de um ponto inicial da falha
34	$\bar{x} = 2,470$ $\sigma = 0,603$	147.860		Apenas um ponto inicial da falha
35	$\bar{x} = 2,268$ $\sigma = 0,342$	92.301		Apenas um ponto inicial da falha
36	$\bar{x} = 2,138$ $\sigma = 0,192$	171.336		Indicativo de mais de um ponto inicial da falha
Rugosidade Média	Rugosidade Desvio-padrão	Número de Ciclos Média	Número de Ciclos Desvio-padrão	Proporção Número de Ciclos
2,209	0,215	166.347	16.566	9,95%

A partir da Tabela 4.24:

- Os corpos de prova número 33 e 34 apresentaram apenas um ponto de iniciação de trinca e valores de rugosidade próximos e mesmo número de ciclos;
- O corpo de prova número 35 mostrou um defeito próximo a superfície do corpo de prova. A Figura 4.14 mostra o defeito através da microscopia eletrônica de varredura, onde a região demarcada mostrou a presença de elementos químicos característicos de inclusões presentes no aço, como cálcio.

Figura 4.14 – Região de iniciação da falha e superfície de fratura do corpo de prova número 35.



- Devido aos problemas apresentados pelo corpo de prova número 35, seus resultados serão desprezados para este grupo.

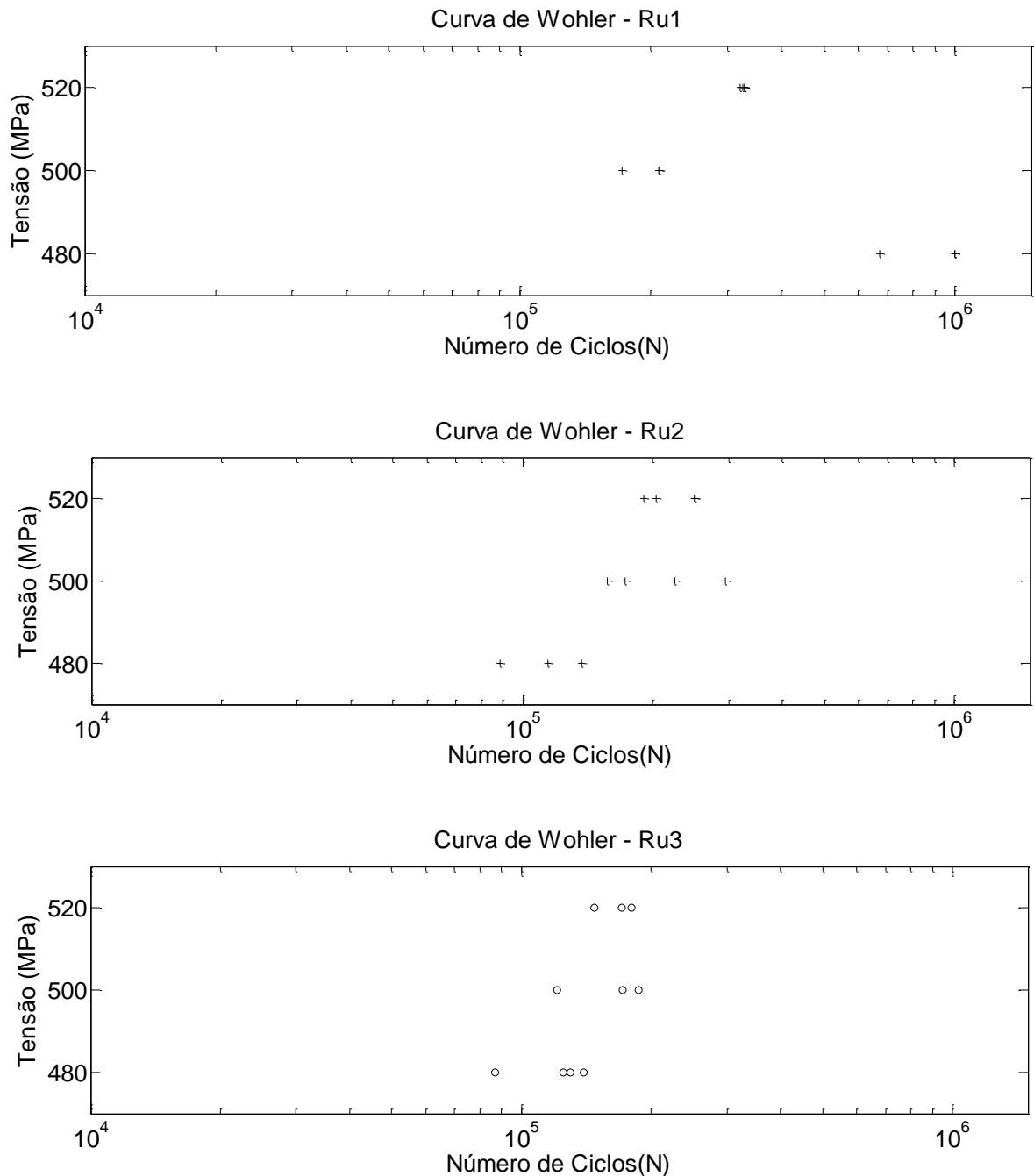
Essa etapa permitiu verificar a importância tanto da preparação da superfície, quanto da etapa de usinagem da superfície dos corpos de prova. As marcas de ferramentas provocaram erros e valores obtidos para o número de ciclos distintos quando comparados aos outros corpos de prova ensaiados sob as mesmas condições. Alguns corpos de prova foram desprezados nesse trabalho, entretanto, em um projeto com poucos corpos de prova, em que não há possibilidade de perda de material, esse fato se mostra de suma importância.

Além disso, a representatividade do ensaio de rugosidade poderia ser executada de outra forma, pois a área abrangida (*cut-off*) e o diâmetro do apalpador do rugosímetro não foram o suficiente para verificar as marcas da ferramenta utilizadas no processo de usinagem anteriormente ao ensaio de fadiga.

Em relação aos valores demonstrados é possível relacionar 3 variáveis: tensão, número de ciclos e rugosidade. A Figura 4.15 mostra a organização destes dados para um nível de

rugosidade em diferentes valores de tensão e número de ciclos, considerando a relação tensão e $\log(N)$.

Figura 4.15 – Curva de Wöhler para cada um dos grupos de rugosidade.



A estrutura austenítica em ligas de aço inoxidável da série 300 é metaestável, isso porque é possível que ocorra a transformação austenita em martensita durante o resfriamento ou durante esforços mecânicos. A desestabilização da austenita não é verificada quando o material é submetido a ciclos de baixa tensão em temperaturas ambiente mesmo com grandes

amplitudes de tensão (MAN *et al.*, 2011). Neste trabalho, verificou-se a transformação martensítica durante o ensaio de fadiga, ocasionando a mudança na inclinação da curva de Wöhler.

A curva de Wöhler relaciona matematicamente $x = \log(N)$ e $y = \log(\sigma)$ de forma linear através do uso da escala logarítmica. Os valores das constantes a e b serão calculados conforme as Equações 4.17 e 4.18, respectivamente.

$$a = - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Equação 4.17}$$

$$b = \bar{x} + a \cdot \bar{y} \quad \text{Equação 4.18}$$

Sendo os valores médios de x e y descritos pelas Equações 4.19 e 4.20.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Equação 4.19}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad \text{Equação 4.20}$$

Para uma probabilidade de falha de 50% é possível organizar a curva S-N para vários níveis de tensão, assumindo uma variação da vida em fadiga com distribuição normal e parâmetros que dependem da tensão com valores constantes. A relação entre S-N (σ -N) é descrita pela Equação 4.21, seu modelo matemático é aproximado por uma reta, utilizando para isso o auxílio do logaritmo. (BS ISO 12107-03)

$$\log(N) = b - a \cdot \log(\sigma) \quad \text{Equação 4.21}$$

A Tabela 4.25 mostra a curva média e também o cálculo do desvio-padrão em relação a curva média, conforme descrição da norma ISO BS 7608-14.

Tabela 4.25 – Curva média de Wöhler calculada para cada nível de rugosidade e desvio padrão de $\log(N)$ em relação a curva média para cada tensão de ensaio.

Rugosidade	Curva Média (Probabilidade de falha 50%)	Desvio-padrão $\log(N)$
Ru1#800p	$\log(N) = -12,4917 \cdot \log(\sigma) + 39,2947$	0,11
Ru2#500	$\log(N) = 8,6453 \cdot \log(\sigma) - 18,0953$	0,03
Ru3#320	$\log(N) = 4,2062 \cdot \log(\sigma) - 6,1884$	0,01

O valor do desvio-padrão em relação a população é calculado conforme a Equação 4.22 (ISO BS 7608-14) e seus valores foram apresentados na Tabela 4.25.

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [\log(N_i) - \log(N_i)_{curva.média}]^2}{n - 2} \quad \text{Equação 4.22}$$

Para determinar a confiabilidade estatística dos ensaios de fadiga realizados, o cálculo de replicação para estes ensaios foi realizado de acordo com a norma ASTM E739-10 (ASTM, 2010), obtendo-se o valor de 91,67%.

Para calcular o valor da tensão corrigida será considerada a rugosidade superficial R_z através do uso do fator de correção $C_{\sigma,R}$ (Equação 4.23) descrito para cada nível de rugosidade e assim, posteriormente, será calculada a respectiva incerteza de medição expandida da tensão corrigida.

$$\sigma_{corrigida} = C_{\sigma,R} \cdot \sigma_{ensaio} \quad \text{Equação 4.23}$$

Sendo que σ_{ensaio} é função da força e diâmetro do corpo de prova, assim a Equação 4.23 pode ser reescrita conforme descrito na Equação 4.24.

$$\sigma_{corrigida} = C_{\sigma,R} \cdot \left(\frac{F}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} \right) \quad \text{Equação 4.24}$$

Considerando a distribuição de probabilidade normal do mensurando $\sigma_{corrigida}$, e um número de iterações de 100.000, descritos nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 respectivamente relacionadas aos níveis de rugosidade Ru1#800p e Ru2#500 e Ru3#320.

Figura 4.16 – Distribuição de probabilidade obtidos relacionados $\sigma_{corrigida}$ para nível de rugosidade Ru1#800p.

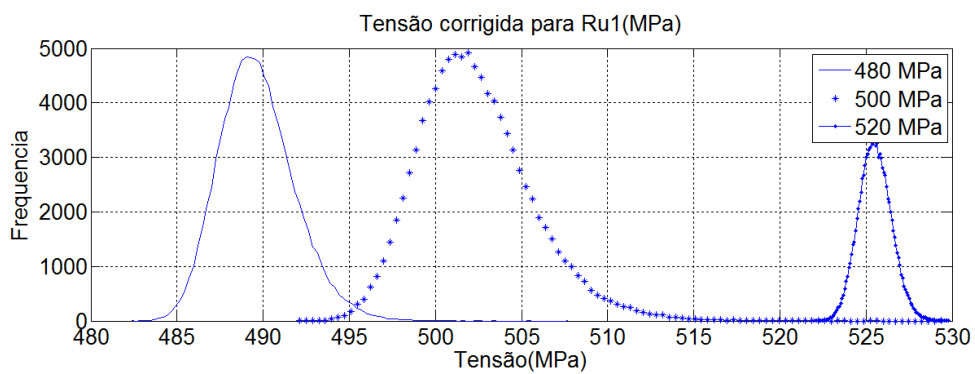


Figura 4.17 – Distribuição de probabilidade obtidos relacionados $\sigma_{corrigida}$ para nível de rugosidade Ru2#500.

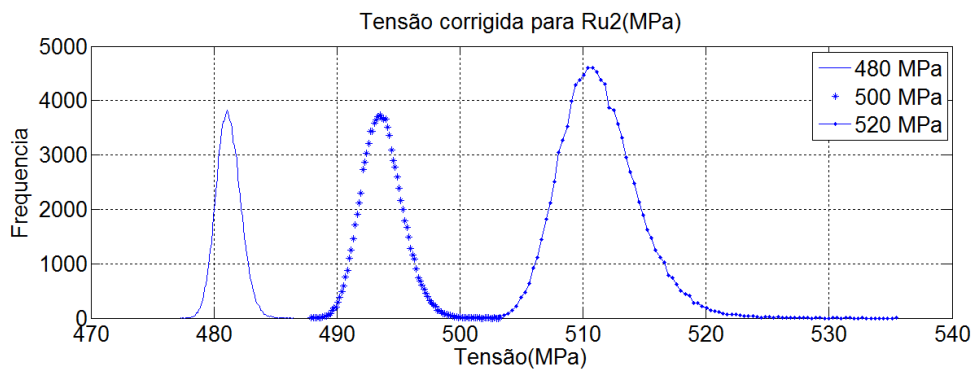
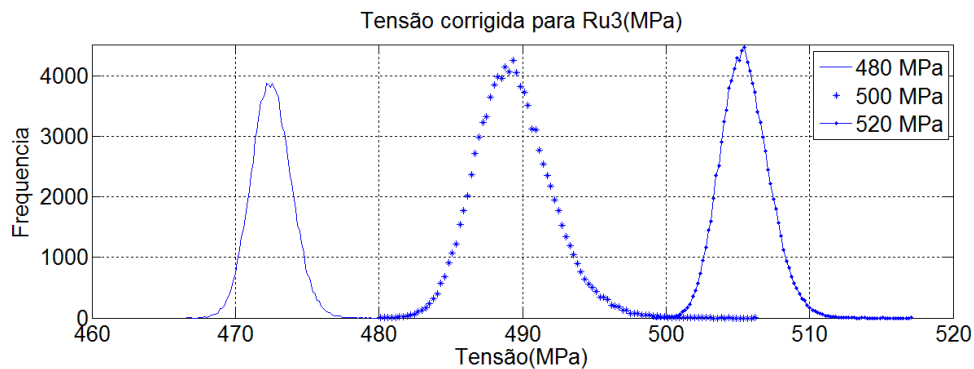


Figura 4.18 – Distribuição de probabilidade obtidos relacionados $\sigma_{\text{corrigida}}$ para nível de rugosidade Ru3#320.



O valor da incerteza de medição expandida calculada com base na distribuição de probabilidade mostrado nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18, será apresentado na Tabela 4.26.

4.9 Incerteza de Medição através do uso do Método de Monte Carlo

Para a estimativa da incerteza de medição pelo Método de Monte Carlo, partindo da determina o da função da densidade de probabilidade, o seu limite inferior (L_i) será definido pelo valor médio subtraído pelo seu valor de incerteza estimada, e o limite superior (L_s) será definido pelo valor médio mais o valor da incerteza de medição (COUTO *et al.*, 2008). As Equa es 4.25 e 4.26 mostram o cálculo destes parâmetros, para nível de confiança de 95%.

$$-1,96 = \frac{L_i - \mu}{\sigma} \quad \text{Equa o 4.25}$$

$$1,96 = \frac{L_s - \mu}{\sigma} \quad \text{Equa o 4.26}$$

Desta forma, a incerteza de medição com probabilidade de abrangência de 95% da incerteza expandida e $K=2$, aproximadamente, será descrita conforme a Equa o 4.27.

$$U(p = 95\%; K = 2) = \frac{L_s - L_t}{2} \quad \text{Equação 4.27}$$

Os resultados obtidos para o valor médio e respectiva incerteza de medição combinada ($u_c(x)$) e incerteza expandida (U) tanto para a tensão corrigida quanto para o número de ciclos serão mostrados na Tabela 4.26. A incerteza de medição combinada é calculada com base no valor da incerteza expandida, sendo seu valor a metade, devido à simetria da distribuição de probabilidade normal (COUTO, 2008).

Ressalta-se a realização do cálculo da incerteza de medição expandida para cada valor de tensão de ensaio e cada valor de rugosidade com número de iterações de 100.000.

Tabela 4.26 – Incerteza de medição expandida calculada para cada uma das condições de ensaio.

Tensão de Ensaio (MPa)	Rugosidade	Número de Ciclos $\log(N)$			Tensão corrigida (MPa)		
		Valor Médio	$u_c(x)$	U	Valor Médio	$u_c(x)$	U
480	Ru1	5,94	0,10	0,20	489,64	2,20	4,40
	Ru2	5,05	0,09	0,19	481,19	0,99	1,98
	Ru3	5,07	0,09	0,18	472,51	1,31	2,62
500	Ru1	5,29	0,05	0,10	504,73	3,24	6,49
	Ru2	5,31	0,12	0,24	493,66	1,67	3,34
	Ru3	5,20	0,10	0,20	489,42	2,62	5,25
520	Ru1	5,51	0,01	0,01	525,53	0,98	1,96
	Ru2	5,35	0,06	0,12	511,35	3,73	7,46
	Ru3	5,22	0,04	0,09	505,51	2,11	4,22

Conforme apresentado na Tabela 4.26, não foi possível verificar uma relação matemática entre os valores do número de ciclos suportados pelo material, rugosidade ou tensão. Como os valores de tensão de ensaio utilizado foram próximos, com intervalos de 20 MPa, possivelmente a dispersão nos resultados obtidos no número de ciclos deva ser maior que o próprio valor da incerteza de medição. Com isso, não há diferenças significativas entre os valores apresentados.

Não é possível comparar os resultados obtidos por este trabalho com aqueles obtidos por COSTA (2010), devido as diferenças nas etapas de preparação da superfície, acarretando a valores distintos de rugosidade. As tensões utilizadas no ensaio de fadiga também foram diferentes para os dois trabalhos.

A análise das fontes de incerteza consideradas não descarta a influência de outros parâmetros na determinação da incerteza de medição, como por exemplo, parâmetros metalúrgicos, geometria do corpo de prova, entre outros. Cabe ressaltar que a preparação da superfície dos corpos de prova foi realizada manualmente, incluindo etapas de lixamento e polimento (caso existam) e esse fator acarreta grande dispersão nos valores de rugosidade (R_z).

4.10 Comparação entre diferentes métodos (Proporção entre Fontes de Incerteza) para Tensão Corrigida

Para a análise pelo método Kragten foram realizadas 4 simulações para cada condição de ensaio, descritas nas Tabelas 4.27, 4.28 e 4.29. A simulação “A” mostra o valor obtido da tensão corrigida com os valores médios de cada uma das fontes de incerteza, chamado “Referencial”.

A simulação “B” fora realizada com a variação do valor de rugosidade (conforme descrito na Equação 4.28), mantendo as outras fontes de incerteza inalteradas. E a mesma metodologia foi aplicada para as simulações “C” e “D” onde serão variadas a dureza e o diâmetro, respectivamente. As simulações “B”, “C” e “D” são comparadas a simulação “A”, representada pelos valores de $\Delta\sigma_{corrigida}$, e posteriormente é calculada a incerteza combinada.

$$x_1 = \bar{x} + \sigma$$

Equação 4.28

Tabela 4.27 –Cálculo da incerteza de medição combinada obtida através do método *Kragten* em diferentes rugosidades para tensão de 480 MPa.

Condições de Ensaio	Simulação	Rugosidade	Dureza	Diâmetro	$\sigma_{\text{corrigida}}$	$\Delta\sigma_{\text{corrigida}}$
480 MPa Ru1#800p	A	0,492	142,75	7,014	489,58	Referencial
	B	0,559	142,75	7,014	487,64	1,94
	C	0,492	145,27	7,014	489,83	0,25
	D	0,492	142,75	7,015	489,44	0,14
	$u_c(x) = \sqrt{((1,94)^2 + (0,25)^2 + (0,14)^2)} \Rightarrow u_c(x) = 1,96$					
	Método de Monte Carlo $\Rightarrow u_c(x) = 2,20$					
Condições de Ensaio	Simulação	Rugosidade	Dureza	Diâmetro	$\sigma_{\text{corrigida}}$	$\Delta\sigma_{\text{corrigida}}$
480 MPa Ru2#500	A	0,972	141,95	7,000	481,22	Referencial
	B	1,034	141,95	7,000	480,28	0,94
	C	0,972	145,22	7,000	481,23	0,01
	D	0,972	141,95	7,001	481,07	0,15
	$u_c(x) = \sqrt{((0,94)^2 + (0,01)^2 + (0,15)^2)} \Rightarrow u_c(x) = 0,95$					
	Método de Monte Carlo $\Rightarrow u_c(x) = 0,99$					
Condições de Ensaio	Simulação	Rugosidade	Dureza	Diâmetro	$\sigma_{\text{corrigida}}$	$\Delta\sigma_{\text{corrigida}}$
480 MPa Ru3#320	A	1,967	144,90	6,984	472,49	Referencial
	B	2,127	144,90	6,984	471,28	1,21
	C	1,967	150,39	6,984	471,99	0,50
	D	1,967	144,90	6,986	472,23	0,27
	$u_c(x) = \sqrt{((1,21)^2 + (0,50)^2 + (0,27)^2)} \Rightarrow u_c(x) = 1,34$					
	Método de Monte Carlo $\Rightarrow u_c(x) = 1,31$					

Conforme verificado na Tabela 4.27, a rugosidade é a fonte de incerteza de maior proporção para a tensão de ensaio de 480 MPa. Além disso, os valores encontrados pelo método *Kragten* são próximos aos valores encontrados pelo método de Monte Carlo para os valores de incerteza de medição combinada. Ressalta-se o valor de $\Delta\sigma_{\text{corrigida}}$ para 480 MPa e Ru2#500, isso ocorre devido a multiplicação do valor do logaritmo.

A Tabela 4.28 mostra o método *Kragten* aplicado para os corpos de prova ensaiados em 500 MPa.

Tabela 4.28 – Cálculo da incerteza de medição combinada obtida através do método Kragten em diferentes rugosidades para tensão de 500 MPa.

Condições de Ensaio	Simulação	Rugosidade	Dureza	Diâmetro	$\sigma_{\text{corrigida}}$	$\Delta\sigma_{\text{corrigida}}$
500 MPa Ru1#800p	A	0,918	143,35	7,001	502,07	Referencial
	B	1,096	143,35	7,001	499,26	2,81
	C	0,918	147,03	7,001	502,12	0,05
	D	0,918	143,35	7,002	501,93	0,14
	$u_c(x) = \sqrt{(2,81)^2 + (0,05)^2 + (0,14)^2} \Rightarrow u_c(x) = 2,81$					
	Método de Monte Carlo $\Rightarrow u_c(x) = 3,24$					
Condições de Ensaio	Simulação	Rugosidade	Dureza	Diâmetro	$\sigma_{\text{corrigida}}$	$\Delta\sigma_{\text{corrigida}}$
500 MPa Ru2#500	A	1,492	145,90	7,005	493,65	Referencial
	B	1,642	145,90	7,005	492,10	1,55
	C	1,492	148,08	7,005	493,53	0,12
	D	1,492	145,90	7,007	493,37	0,28
	$u_c(x) = \sqrt{(1,55)^2 + (0,12)^2 + (0,28)^2} \Rightarrow u_c(x) = 1,58$					
	Método de Monte Carlo $\Rightarrow u_c(x) = 1,67$					
Condições de Ensaio	Simulação	Rugosidade	Dureza	Diâmetro	$\sigma_{\text{corrigida}}$	$\Delta\sigma_{\text{corrigida}}$
500 MPa Ru3#320	A	1,984	144,30	7,005	489,19	Referencial
	B	2,290	144,30	7,005	486,90	2,29
	C	1,984	150,25	7,005	488,61	0,57
	D	1,984	144,30	7,007	488,91	0,28
	$u_c(x) = \sqrt{(2,29)^2 + (0,57)^2 + (0,28)^2} \Rightarrow u_c(x) = 2,38$					
	Método de Monte Carlo $\Rightarrow u_c(x) = 2,62$					

Conforme os resultados apresentados na Tabela 4.28, a rugosidade é a maior fonte de incerteza. Porém, a condição 500 MPa e Ru1#800p, e, 500 MPa e Ru3#320, em que os valores de incerteza de medição da rugosidade representa alto valor quando comparado ao valor médio, a incerteza de medição combinada apresenta diferenças quando comparadas aos valores calculados pelo Método de Monte Carlo.

A Tabela 4.29 mostra o método Kragten aplicado para a tensão de 520 MPa para todos os níveis de rugosidade estudados.

Tabela 4.29 – Cálculo da incerteza de medição combinada obtida através do método Kragten em diferentes rugosidades para tensão de 520 MPa.

Condições de Ensaio	Simulação	Rugosidade	Dureza	Diâmetro	$\sigma_{\text{corrigida}}$	$\Delta\sigma_{\text{corrigida}}$
520 MPa Ru1#800p	A	0,709	148,10	7,008	525,61	Referencial
	B	0,747	148,10	7,008	524,71	0,90
	C	0,709	148,67	7,008	525,64	0,03
	D	0,709	148,10	7,010	525,31	0,30
	$u_c(x) = \sqrt{(0,90)^2 + (0,03)^2 + (0,30)^2} \Rightarrow u_c(x) = 0,95$					
	Método de Monte Carlo $\Rightarrow u_c(x) = 0,98$					
Condições de Ensaio	Simulação	Rugosidade	Dureza	Diâmetro	$\sigma_{\text{corrigida}}$	$\Delta\sigma_{\text{corrigida}}$
520 MPa Ru2#500	A	1,494	147,75	7,0197	511,12	Referencial
	B	1,754	147,75	7,0197	508,38	2,74
	C	1,494	147,94	7,0197	511,11	0,01
	D	1,494	147,75	7,0334	509,13	1,99
	$u_c(x) = \sqrt{(2,74)^2 + (0,01)^2 + (1,99)^2} \Rightarrow u_c(x) = 3,38$					
	Método de Monte Carlo $\Rightarrow u_c(x) = 3,73$					
Condições de Ensaio	Simulação	Rugosidade	Dureza	Diâmetro	$\sigma_{\text{corrigida}}$	$\Delta\sigma_{\text{corrigida}}$
520 MPa Ru3#320	A	2,209	147,20	7,013	505,47	Referencial
	B	2,420	147,20	7,013	503,92	1,55
	C	2,209	149,42	7,013	505,22	0,26
	D	2,209	147,20	7,022	504,18	1,29
	$u_c(x) = \sqrt{(1,55)^2 + (0,26)^2 + (1,29)^2} \Rightarrow u_c(x) = 2,03$					
	Método de Monte Carlo $\Rightarrow u_c(x) = 2,11$					

Conforme verificado na Tabela 4.29, a rugosidade também é maior fonte de incerteza apresentada pelo cálculo da incerteza de medição combinada. Foi possível verificar pequenas diferenças entre os valores calculados pelo método de Monte Carlo e o Método Kragten, sendo a maior diferença representada pela Ru2#500.

4.11 Comparativo entre valores de Incerteza de Medição e Probabilidade de Falha

É possível estimar a probabilidade de falha no ensaio de fadiga para determinado valor de tensão, sendo necessários no mínimo 28 corpos de prova para garantir a confiabilidade (ISO BS 12107-03).

Para este cálculo é necessário organizar os dados obtidos no ensaio de fadiga de modo que o número de ciclos suportados pelo material ($\log(N)$) esteja em modo crescente, sendo a numeração do corpo de prova indicado por i , número total de corpos de prova representados por n e sua respectiva probabilidade de falha representada por P_i , conforme Equação 4.29 (ISO BS 12107-03).

$$P_i = \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \quad \text{Equação 4.29}$$

Os resultados obtidos no ensaio de fadiga foram então organizados (Tabela 4.30) com uma numeração a qual não corresponde a nomenclatura utilizada anteriormente (ver coluna Numeração CP).

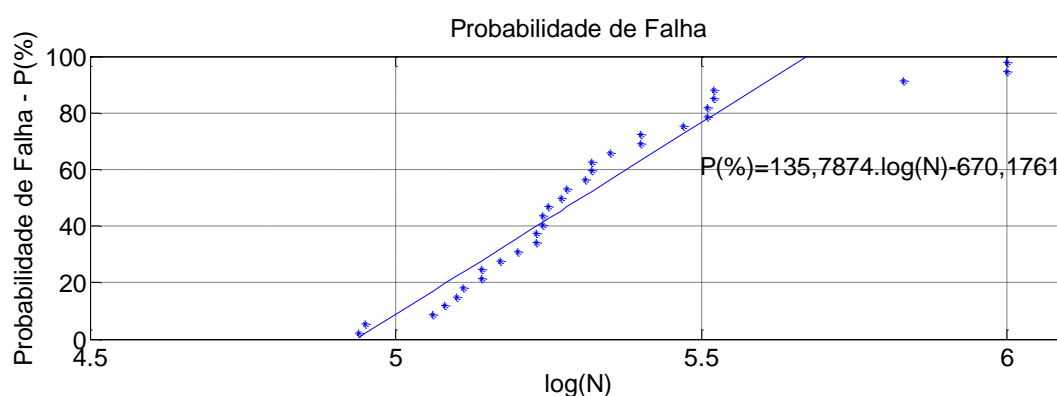
Tabela 4.30 – Cálculo da probabilidade de falha para os corpos de prova ensaiados.

Numeração CP	Número de Ciclos	$\log(N)$	Probabilidade de Falha - $P_i(\%)$
1	87009	4,94	2,23
2	88675	4,95	5,41
3	114463	5,06	8,60
4	120822	5,08	11,78
5	125315	5,10	14,97
6	130174	5,11	18,15
7	137158	5,14	21,34
8	139225	5,14	24,52
9	147860	5,17	27,71
10	156863	5,20	30,89
11	171336	5,23	34,08
12	171546	5,23	37,26
13	172120	5,24	40,45
14	172385	5,24	43,63
15	179846	5,25	46,82
16	186703	5,27	50,00
17	190681	5,28	53,18
18	204168	5,31	56,37
19	208767	5,32	59,55

20	209524	5,32	62,74
21	225464	5,35	65,92
22	249930	5,40	69,11
23	250923	5,40	72,29
24	295219	5,47	75,48
25	320988	5,51	78,66
26	326303	5,51	81,85
27	329266	5,52	85,03
28	329461	5,52	88,22
29	671497	5,83	91,40
30	1000000	6,00	94,59
31	1000000	6,00	97,77

É importante ressaltar que a Tabela 4.30 apresenta apenas 31 corpos de prova isso devido a desconsideração dos corpos de prova que foram perdidos e também aqueles que apresentaram problemas na usinagem superficial. Graficamente, os valores indicados na Tabela 4.30 podem ser expressos pela Figura 4.19. Em conjunto com os dados apresentados, foi determinada a equação da reta obtida por regressão linear (comando *polyfit* do software *Matlab*).

Figura 4.19 – Probabilidade de falha calculado com base nos resultados obtidos no ensaio de fadiga.



Ao analisar a Figura 4.19 é possível verificar que quanto maior o número de ciclos suportados pelo material, maior será a sua probabilidade de falha. É importante ressaltar que

estes dados e sua respectiva equação matemática somente serão válidas para as condições específicas para este material, ensaio, rugosidade e carga aplicada neste projeto.

5.0 CONCLUSÕES

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, foram implantadas com sucesso as rotinas numéricas no Matlab® com o uso do Método de Monte Carlo para o cálculo da incerteza de medição, tanto da tensão corrigida quanto número de ciclos para o aço AISI 316L. Verificou-se que a organização computacional da rotina depende do programador, permitindo mudanças nas variáveis de entrada e, principalmente, em relação ao tempo computacional.

As fontes de incerteza listadas inicialmente foram agrupadas conforme diferentes funções matemáticas disponíveis na literatura. Isso ocorre porque existem limitações metalúrgicas para manter um parâmetro variável e todas as outras fontes de incerteza com valores constantes, como por exemplo, a porcentagem de carbono relativo à composição química do aço estudado.

Dentre as três fontes consideradas no cálculo da tensão corrigida: rugosidade, dureza e diâmetro, a rugosidade é a maior fonte de incerteza. No entanto, não foi possível verificar uma relação matemática entre o valor da rugosidade e a incerteza de medição da tensão corrigida e/ou número de ciclos.

Realizou-se o cálculo da incerteza de medição para três níveis de rugosidade para a verificação da influência dessas no valor da tensão corrigida. Verificou-se que para valores de rugosidade (R_z) menores que 1,0 ($Ru1_{\#80p}$), a tensão corrigida média é maior que a tensão de ensaio. Já para condição em que o valor de rugosidade (R_z) maiores que 1,0 ($Ru2_{\#500}$ e $Ru3_{\#320}$) o valor médio da tensão corrigida é menor que a tensão de ensaio.

Mesmo que o desvio padrão do número de ciclos encontrado seja em média 20% do valor médio, o valor da incerteza de medição do número de ciclos é de 3 – 4% deste valor. Para esta estimativa foi considerada apenas a dispersão dos resultados.

O método de Monte Carlo e o Método Kragten apresentaram resultados comparáveis, no entanto recomenda-se o uso do método Monte Carlo por não exigir linearidade do modelo matemático relacionado ao mensurando.

Com base no número de ciclos suportados pelo material foi determinada uma equação que descreve a probabilidade de falha para 50% em cada nível de rugosidade. Essas equações são importantes para uso em projetos industriais cujo número de corpos de prova/ material metálico é escasso, além de reduzir o tempo experimental para o desenvolvimento do projeto.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As recomendações para desenvolver trabalhos futuros nesta área são:

- Estudar a influência de diferentes lotes ou corridas da matéria-prima. Verificar sua influência no valor da incerteza de medição da tensão e número de ciclos no ensaio de fadiga.
- Comparar resultados obtidos nas simulações com outros *softwares*.
- Construção das curvas *S-N-P*, a partir das curvas de Wöhler construídas sob probabilidade de 50%.
- Realizar maior número de medidas para cada variável e relacionar o número mínimo de medições com a incerteza expandida. Aumentar o número de medições para cada fonte de incerteza, reduzindo o valor da *Razão_entre_desvios_padrão(%)* conforme descrito pelo GUM, 2008.
- Realizar as medições experimentais utilizando instrumentos de medição com maior resolução, e verificar se esta alteração será significativa no valor da incerteza de medição.
- Estudar o sistema de medição usado para a medição do diâmetro dos corpos de prova.
- Realizar a etapa de calibração dinâmica e verificar a influência desta fonte de incerteza no valor da incerteza expandida da tensão corrigida e também do número de ciclos.
- Estudar a transformação martensítica ocorrida no material durante o ensaio de fadiga.
- Utilizar outros modelos matemáticos para a determinação da curva de Wöhler (Goodman, 1899, Gerber, 1874 ou Morrow, 1960) verificando assim possíveis diferenças entre os valores de incerteza de medição.
- Realizar a análise das fontes de incerteza através do método *GSA – global sensitivity analysis*.
- Criar uma interface gráfica com o usuário para que possa facilitar a etapa da determinação da incerteza de medição gerada no ensaio de fadiga. Esta interface facilitará na rotina diária do laboratório para a realização do cálculo de incerteza de medição.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIAG. MSA – Measurement Systems Analysis. AIAG. Daymlier Chrysler Corporation, Ford Motor Company and General Motors Corporation, 3.ed, 2002.

AKITA, M. TOKAJI, K. Effect of carburizing on noth fatigue behavior in AISI 316 austenitic stainless steel. **Surface & coatings technology**. Japan, v. 200, p. 6073-6078, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL. **Metals Handbook: Fatigue and Fracture**, USA: ASM, 1987.

_____. **Metals Handbook, Metallografy and microstructure**, USA: ASM, 1985.

_____. **Stainless Steels,ASM Specialty Handbook**, USA: ASM, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A276**: Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes, Pennsylvania: ASTM, 2015.

_____. **ASTM E1012**: Standard Practice for Verification of Specimen Alignment under tensile loading. Pennsylvania: ASTM, 2014.

_____. **ASTM E1942**: Standard Guide for Evaluating data acquisition systems used in cyclic fatigue and fracture mechanics testing. Pennsylvania: ASTM, 2004.

_____. **ASTM E466**: Standard Practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue test of metallic materials. Pennsylvania: ASTM, 2007.

_____. **ASTM E467**: Standard Practice for verification of constant amplitude dynamic forces in an axial fatigue testing system. Pennsylvania: ASTM, 2008.

_____. **ASTM E739**: Standard Practice for statistical analysis of linear of linearized stress-life(S-N) and strain-life(e-N) fatigue data. Pennsylvania: ASTM, 2010.

_____. **ASTM E1823**: Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing. Pennsylvania: ASTM, 2013.

_____. **ASTM E112**: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. West Conshohocken: ASTM, 2013.

_____. Special Technical Publication STP N° 91-A: A Guide for Fatigue Testing and the Statistical Analysis of Fatigue Data. 2ªed, Philadelphia, 1963.

_____. Special Technical Publication STP N° 566: Handbook of fatigue testing. 1ªed, Philadelphia, 1974.

ANDREWS, S.; SEHITOGLU, H. A computer model for fatigue crack growth from rough surface. **International Journal of Fatigue**. Urbana,v. 22, p. 619-630, 2000.

AO, Qi. Uncertainty analysis in Monte Carlo criticality computations. Nuclear Engeneering and Desing. **Elsevier**. 2011.

ARENCIBIA, R.; RIBEIRO, J. Incerteza na medição da largura de cordões de solda. **Soldagem Inspeção**. São Paulo, v. 14, nº 3, p.263-269, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 2768-1** – Tolerâncias Gerais - Parte 1: Tolerâncias para dimensões lineares e angulares sem indicação de tolerância individual. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR ISO/IEC 17025**: requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

_____. **NBR ISO 6892-1**: Materiais metálicos — Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

BARBETTA, Pedro Alberto. BORNIA, Antonio Cezar. REIS, Marcelo Menezes.*et.al.* **Estatística: para cursos de engenharia e informática**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 2010.

BELTRÃO, Marcelo Augusto Neves. Propagação de trincas de fadiga em juntas soldadas longitudinais de aço para dutos da classe API 5L X-70. Tese (Doutorado). Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

BENGTSSON, A. ;RYCHLIK, I. Uncertainty in fatigue life prediction of structures subject to Gaussian loads. **Probabilistic Engineering Mechanics**. Sweden, v. 24, p. 224-235, 2009.

BRIGHAM, Eugene F. **Administração financeira: teoria e prática**. 1. Ed. São Paulo: Atlas, 2001.

BRITISH STANDARD. BS ISO 12107:2003: Metallic materials – Fatigue testing – Statistical Planning and analysis of data. 1ªed. London. 2003.

_____. BS ISO 7608:2014: Guide to fatigue design and assessment of steel products. 2ªed. London, 2014.

BRUNI, Adriano Leal. **Avaliação de Investimentos com modelagem financeira no Excel**. 2 ed. São Paulo: Atlas, 2013.

CALLISTER, W. **Materials Science and Engineering**. 8 ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2009.

CARDOSO, Douglas. AMARAL, Hudson Fernandes. **O uso da simulação de Monte Carlo na elaboração do fluxo de caixa empresarial: Uma proposta para quantificação das incertezas ambientais**. Associação Brasileira de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro, 2000.

CASTRO, Carlos Alberto Carvalho. **Estudo de comportamento à fadiga de metais dentro e fora da água na presença da pressão hidrostática**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2007.

CHANDRAN, K. S. ; RAVI. Jha, S. K. Duality of the S-N fatigue curve caused by competing failure modes in a titanium alloy and the role of Poisson defect statistics. **Acta Materialia**. Salt Lake City, v. 53, p.1867-1881, 2005.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

CORRAR, Luiz João. O modelo econômico da empresa em condições de incerteza – aplicação do Método de Simulação de Monte Carlo. Caderno de Estudos nº08, São Paulo, FIPECAFI, Abril, 1993.

COSTA, Leandro. **Avaliação da incerteza de medição no levantamento de curvas de fadiga S-N de materiais metálicos a temperatura ambiente.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

COUTO, P.R.G.; DAMASCENO, J.C.; BORGES, R.M.H. Uncertainty Estimation of Mechanical Assays by ISO-GUM 95 and Monte Carlo Simulation – Case Study: tensile Strength, torque and Brinell Hardness Measurement. **XVIII Imeko World Congress.** Rio de Janeiro, Setembro, 2006.

COUTO, Paulo Roberto Guimarães. A Estimativa da incerteza de medição pelos métodos do ISO GUM 95 e de simulação de Monte Carlo. **INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA -INMETRO.** Nota Técnica, 2008.

COX, M. G., DAINTON, M. P., HARRIS, P.M. **Uncertainty and Statistical Modelling. Software Support for Metrology. Best Practice Guide N°6.** National Physical Laboratory, United Kingdom. March 2001.

DI SCHINO, A. KENNY, J.M. Grain size dependence of the fatigue behavior of a ultrafine-grained AISI 304 stainless steel. **Materials Letters.** Italy, v. 57, p. 3182-3185, 2003.

DOMENEGHETTI, Gustavo. **A expressão da incerteza de medição em ensaios mecânicos: ISO GUM e Monte Carlo aplicados no ensaio de tração.** Dissertação (Mestrado). Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Sociedade Educacional de Santa Catarina, Joinville, 2011.

EURACHEM, Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement. Laboratory of the Government Chemist. 1995.

FKM Guideline. **Analytical strength assessment of components in mechanical engineering.** Tradutor: E.Haibach, 2003.

FRANK, Alejandro G. Notas de Aula: Metrologia e Ensaio. Avaliação do Sistema de Medição (MAS) Parte 1 – Estudo de R&R. Disponível em [http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/387_07_avaliacao_do_sistema_de_medicao_\(msa\)_-_rer_.pdf](http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/387_07_avaliacao_do_sistema_de_medicao_(msa)_-_rer_.pdf) acesso em 06/06/2013.

FROST, N.N.E., MARSH, K.J., POOK, L.P. **Metal Fatigue.** 1 ed. New York: Oxford Press, 1974.

HACK, P.; TEN CATEN, C. Measurement Uncertainty: Literature Review and Research Trends. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.** Porto Alegre, v.61. N°8. 2012.

HARVEY, Philip D. **ASM International - Engineering Properties of Steel.** 1° ed. Ohio: American Society for metals, 1982.

HERRADOR, M. Á.; GONZÁLEZ, A. G. Evaluation of measurement uncertainty in analytical assays by means of Monte-Carlo simulation. **Talanta.** Seville, v.64, p. 415-422, 2004.

ISNARD, Marshall Junior. CIERCO, Agliberto Alves. ROCHA, Alexandre Varanda. MOTA, Edmarson Bacelar. AMORIM, Sérgio Roberto Leusin. **Gestão da Qualidade**. 10 ed. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2011.

ISHIDA, Marco Aurelio. **Avaliação comparativa de barras laminadas do aço AISI 316L com e sem tratamento térmico de solubilização**. Dissertação (Mestrado Profissional). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION. **JIS B0601**. Surface Roughness. Tokyo : Japanese Standards Association, 1994.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. **Evaluation of measurement data: guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)**. JCGM 100, 1. ed. Geneva: BIPM, 2008.

_____. **Evaluation of measurement data: Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in Measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo Method (GUM)**. JCGM 100, 1. ed. Geneva: BIPM, 2008.

_____. **International vocabulary of metrology (VIM): basic and general concepts and associated terms**. JCGM 200, 3. ed. Geneva: BIPM, 2012.

JUNIOR, Paulo Lima. SILVEIRA, Fernando Lang da. Sobre as incertezas do tipo A e B e sua propagação sem derivadas: uma contribuição para a incorporação da metrologia contemporânea aos laboratórios de física básica superior. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, 2303. 2011.

KALOS, M.; WHITLOCK, P. **Monte Carlo Methods. Volume I: Basics**. Courant Institute of Mathematical Sciences. 1 ed. New York University: John Wiley & Sons, 1986.

KEISLER, J. M. CHOPRA, O. K. SHACK, W. J. Statistical models for estimating fatigue strain-life behavior of pressure boundary materials on light water reactor environments. **Nuclear Engineering and Design**. 167. p.129-154, 1996.

KOBAYASHI, S, *et.al.* Effect of grain boundary microstructure on fatigue crack propagation in austenitic stainless steel. **Mater Sci. Springer**. Japan,v. 46, p. 4254-4260, 2011.

KOVACEVIC. A.; BRKIC, D.; OSMOKROVIC, P. Evaluation of measurement uncertainty using mixed distribution for conducted emission measurements. **Measurement**. v.44, p. 692-701, 2011.

LAMEF – Laboratório de Metalurgia Física. Departamento de Metalurgia. Escola de Engenharia. Análise de Falha em Componentes. 2013. 48 p.

LAPPONI, J. **Projetos de Investimentos na empresa**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

LI, Weiye. H.; Jmaes Mac. Computer arithmetic for probability distribution variables. Reliability Engineering and System Safety. **Los Alamos**, v. 85, p.191-209, 2004.

LLEWELLYN, D.T. **Steels: Metallurgy & Application**. 2 ed. New York: Butterworth-Heinemann, 1994.

LOPES, K. **Influência dos parâmetros de usinagem na resistência à fadiga de aços AISI 4140**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

LUCATO, Wagner Cezar. Modelo de simulação baseado no Método de Monte Carlo para avaliação de investimento em máquinas automáticas de venda. VII SEMEAD- Pós Graduação – USP. São Paulo, 2005.

MACHADO, V.; SETTI, J.; SOVIERZOSKI, M. Metrologia química e suas particularidades no cálculo da incerteza de medição. **7º Congresso Brasileiro de Metrologia**. Ouro Preto, 2013.

MC CLAVE, J; BENSON, G; SINCICH, T. **Estatística para administração e economia**. 1 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

MACHADO, R.R. OLIVEIRA, R. S..FREITAS, L. C. C. . KOCH, C. A..KNOTT, A..DIAS, R. S. Characterization and qualification of a force dynamic calibration device. **XX IMEKO World Congress**. Busan, 2012.

MACHADO, R.R. KOCH, Cláudio. OLIVEIRA, Rafael Soares. MARTINS, Ana Rosa. ROESLER, Rodrigo. CAMINHA, Iêda.. Identification of the parameters that influence the uncertainty sources in orthopaedic implants fatigue tests. **XIX IMEKO World Congress**. Portugal. 2009.

MAN, J. OBRTLÍK, K. PETRENEC, M., BERAN, P. SMAGA, M., WEIDNER, A., DLUHOŠ, J. KRUML, E.T., BIERMANN, H., EIFLER, D., POLÁK, J.. Stability of austenitic 316L steel against martensite formation during cyclic straining. **Procedia engineering**. Czech Republic, v. 10, p. 1279-1284, 2011.

MARINES, I. et. al. An understanding of very high cycle fatigue of metals. **International Journal of Fatigue**. Paris, v. 25, p. 1101- 1107, 2003.

MC GUIDE, M. **Stainless Steels for Design Engineers**. 1 ed. USA: ASM International, 2008.

MONTGOMERY, D. *et.al.* **Estatística Aplicada à Engenharia**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

NATALE, L. SAVI, F. Monte Carlo analysis of probability of inundation of Rome. **Environmental Modelling & Software**. Rome, v. 22, p. 1409-1416, 2007.

NERY, Gesner, KALID, Ricardo. Estimativa da incerteza pelo Método Monte Carlo: Comparação entre diferentes procedimentos de cálculo. V Congresso Brasileiro de Metrologia, 2009.

NISITANI, H., IMAI, R. Comparison of fatigue process in 0,45% C steel specimens polished under different conditions. **Bulletin of the JSME**, v. 28, nº 245, p. 2503-2510, 1985.

NISTIR 89-4088 Surface Finish Metrology Tutorial. U.S. Department of Commerce. National Institute of Standards and Technology, 1990.

NUREG/CR-6815 ANL-02/39. Review of the margins for ASME Code Fatigue Design Curve – Effects of surface Roughness and material Variability. Argonne National Laboratory. USA Nuclear. 2003.

NUREG/CR-6878 ANL-03/35. Effect of Material Heat treatment on fatigue Crack initiation in Austenitic Stainless Steels in LWR Environments. Argonne National Laboratory. USA Nuclear. 2005.

GARCIA, Solange. LUSTOSA, Paulo Roberto Barbosa., Barros, Nara Rosa. Aplicabilidade do Método de Simulação de Monte Carlo na previsão dos custos de produção de companhias industriais: O Caso Companhia Vale do Rio Doce. **RCO – Revista de Contabilidade e Organizações – FEA-RP/USP**, v. 4, n. 10, p. 152-173, set-dez 2010.

OLIVEIRA, Rafael Soares de Oliveira. MACHADO, Renato Reis Machado. Knott, Andrew, CAMINHA, Iêda Vieira. ROESLER, Carlos Rodrigo. Dynamic calibration of a fatigue testing machine on orthopaedic implants in accordance with the ISO 4965-1. **IMEKO 2010 TC3, TC5 and TC22 conferences**. Thailand, 2010.

OUTEIRO, J.C. UMBRELLO, D. M'SAOUBI, R. M. Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v.46, p. 1786-1794, 2006.

PADILHA, A.F.; GUEDES, L.C. **Aços Inoxidáveis Austeníticos**. 1 ed. São Paulo: Hemus, 1994.

PAPADOPOULOS, Christos E. Yeung, Hoi. Uncertainty estimation and Monte Carlo simulation method. **Flow Measurement and Instrumentation**. Cranfield, v.12, p.291-298, 2001.

PICKERING, F.B. The effect of composition and microstructure on ductility and toughness. British Steel Corporation special Steels Division. October, 1971.

PIDD, M. **Computer Simulation in Management Science**. 5 ed. Chichester: John Wiley, 2004.

PLEKHOV, O. PAGGI, M. NAIMARK, O. CARPINTERI, A. A dimensional analysis interpretation to grain size and loading frequency dependencies of the Paris and Wohler curves. **International Journal of Fatigue**. Perm, v. 33, p. 477-483, 2011.

Rede Metrológica RS – Procedimento do Sistema de Gestão da Qualidade. RM 68 – Incerteza de Medição: Guia prático do Avaliador de Laboratórios. Revisão 05. Abril/2013.

RHO, Byung Sup. HONG, Hyun Uk, NAM, Soo Woo. The Effect of δ -ferrite on fatigue cracks in 304L steels. **International Journal of Fatigue**. South Korea, v.22, p.683-690, 2000.

ROBERT, C.; CASELLA, G. **Monte Carlo Statistical Methods**. 2 ed. USA: Springer Science, 2004.

SANTOS, R. **Transformações de fases em materiais metálicos**. 1 ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2006.

SCHNEIDER, C. R. A., MADDOX, S. J. **Best Practice guide on statistical analysis of fatigue data**. International Institute of Welding. Cambridge: United Kingdom Delegation, 2003.

SCHWENKE, H.et.al. **Assessment of uncertainties in dimensional metrology by Monte Carlo Simulation: Proposal of a Modular and Visual Software**. Annual of the CIRP. Vol.49/1/2000.

SEGHIR, R. et. al. Numerical and experimental estimation of thermomechanical fields heterogeneity at the grain scale of 316L stainless steel. **Computational Materials Science**. France, v.53, p.464-473, 2012.

SHAHANAGHI, Kamran. NAKHJIRI, Pooneh. A new optimized uncertainty evaluation applied to the Monte-Carlo simulation in platinum resistance thermometer calibration. **Measurement**. Tehran, v.43, p. 901-911, 2010.

SHIGLEY. **Mechanical Engineering Design**. 8 ed. USA: McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, 2006.

SMITH, W.; HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 5 ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill, 2012.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos – Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5º ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

STANDARDS MEASUREMENT & TEST MEASUREMENTS (SM&T), **UNCERT CoP 01** – Manual of Codes of Practice for Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Material nº 01 - The Determination of Uncertainties in High Cycle Fatigue Testing (for plain and notch-sensitive specimens), 2000.

STEPHENS, R.et.al. **Metal Fatigue in Engineering**. 2 ed. New York: Wiley Interscience, 2001.

SURESH,S. **Fatigue of Materials**. 1 ed. UK: Cambridge University Press,1998.

TEN CATEN, Carla Schwengber. RIBEIRO, José Luis Duarte. **Controle Estatístico do Processo**. FEENG/UFRGS. Porto Alegre. 2012.

THEODOROU, D., MELIGOTSIDOU L, KARAVOLTSOS S, BURNETAS A, DASSENAKIS M, SCOULLOS M. Comparison of ISO-GUM and Monte Carlo methods for the evaluation of measurement uncertainty: Application to direct cadmium measurement in water by GFAAS. **Talanta**. v. 83, p.1568-1574, 2011.

TITMAN, S. **Valuation: the art and science of corporate investment decisions**. 1 ed. USA: Pearson Education, 2008.

UENO, H. KAKIHATA, K. KANEKO, Y. HASHIMOTO, S., VINOGRADOV, A. Enhanced fatigue properties of nanostructured austenitic SUS 316L stainless steel. **Acta Materialia**. Japan, v.59, p. 7060-7069, 2011.

VANDER Voort, George F. **Metallography, principles and practice**. 1 ed. USA: Mc Graw-Hill, 1984.

WEATHERS, J.B. LUCK, R. WEATHERS, J. W. An exercise in model validation: Comparing univariate statistics and Monte Carlo-based multivariate statistics. **Reliability Engineering and System Safety**. Pascagoula, v. 94, p. 1695–1702, 2009.

WÜBBELER, Gerd., KRYSTEK, Michael . ELSTER, Clemens. Evaluation of Measurement uncertainty and its numerical calculation by a Monte Carlo method. **Measurement Science and technology**. Germany, v.19, 2008.

YE, DUYI. XU, YUANDONG, XIAO, LEI. CHA, HAIBO. Effects of low-cycle fatigue on static mechanical properties, microstructures and fracture behavior of 304 stainless steel. **Materials Science and Engineering A**. China, v. 527, p. 4092-4102, 2010.

APÊNDICE A – RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA [% EM PESO]

CP 1	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0115	0,3946	1,745	0,0404	0,0225	16,41	1,956	10,02	0,0219	0,1391	0,4512	0,0169	0,0053	0,0407	0,0215	0,0124	0,0003
Medida 2	0,0100	0,3822	1,766	0,0394	0,0213	16,50	1,909	10,00	0,0101	0,1415	0,4599	0,0179	0,0049	0,0401	0,0219	0,0122	0,0003
Medida 3	0,0092	0,3761	1,790	0,0389	0,0211	16,56	1,899	9,99	0,0066	0,1431	0,4629	0,0178	0,0049	0,0405	0,0221	0,0119	0,0002
Medida 4	0,0090	0,3751	1,802	0,0390	0,0196	16,53	1,896	10,06	0,0047	0,1459	0,4639	0,0180	0,0049	0,0411	0,0228	0,0117	0,0002
Medida 5	0,0090	0,3709	1,809	0,0386	0,0203	16,52	1,897	10,01	0,0040	0,1455	0,4695	0,0183	0,0050	0,0414	0,0218	0,0118	0,0002
Média	0,0097	0,3798	1,782	0,0393	0,0210	16,50	1,911	10,02	0,0095	0,1430	0,4615	0,0178	0,0050	0,0408	0,0220	0,0120	0,0002
Desvio-Padrão	0,0011	0,0092	0,027	0,0007	0,0011	0,06	0,025	0,03	0,0073	0,0028	0,0067	0,0005	0,0002	0,0005	0,0005	0,0003	0,0001
CP 2	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0107	0,3874	1,694	0,0424	0,0235	16,21	1,918	9,96	0,0152	0,1379	0,4411	0,0158	0,0051	0,0407	0,0230	0,0128	0,0003
Medida 2	0,0095	0,3774	1,728	0,0395	0,0212	16,25	1,874	9,94	0,0078	0,1415	0,4556	0,0165	0,0048	0,0407	0,0238	0,0121	0,0003
Medida 3	0,0110	0,3954	1,706	0,0437	0,0255	16,20	1,904	10,00	0,0206	0,1421	0,4629	0,0169	0,0053	0,0414	0,0238	0,0137	0,0004
Medida 4	0,0091	0,3802	1,735	0,0417	0,0228	16,30	1,859	10,00	0,0083	0,1426	0,4623	0,0175	0,0050	0,0413	0,0248	0,0135	0,0004
Medida 5	0,0085	0,3770	1,743	0,0408	0,0223	16,30	1,864	9,96	0,0057	0,1454	0,4623	0,0170	0,0049	0,0412	0,0240	0,0127	0,0003
Média	0,0098	0,3835	1,721	0,0416	0,0231	16,25	1,884	9,97	0,0115	0,1419	0,4568	0,0167	0,0050	0,0411	0,0239	0,0130	0,0003
Desvio-Padrão	0,0011	0,0079	0,021	0,0016	0,0016	0,05	0,026	0,03	0,0062	0,0027	0,0093	0,0006	0,0002	0,0003	0,0006	0,0006	0,0001
CP 3	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0110	0,3922	1,706	0,0436	0,0231	16,21	1,907	9,93	0,0088	0,1393	0,4545	0,0164	0,0050	0,0410	0,0230	0,0133	0,0004
Medida 2	0,0092	0,3877	1,733	0,0415	0,0215	16,30	1,860	9,98	0,0051	0,1474	0,4741	0,0171	0,0049	0,0409	0,0253	0,0136	0,0004
Medida 3	0,0101	0,3926	1,725	0,0439	0,0232	16,19	1,907	10,01	0,0051	0,1487	0,4776	0,0173	0,0048	0,0419	0,0250	0,0141	0,0004
Medida 4	0,0085	0,3841	1,750	0,0421	0,0209	16,25	1,876	10,00	0,0039	0,1492	0,4815	0,0172	0,0049	0,0420	0,0242	0,0135	0,0004
Medida 5	0,0085	0,3862	1,753	0,0407	0,0204	16,22	1,870	9,98	0,0037	0,1513	0,4833	0,0185	0,0050	0,0421	0,0248	0,0129	0,0003
Média	0,0095	0,3886	1,733	0,0424	0,0218	16,23	1,884	9,98	0,0053	0,1472	0,4742	0,0173	0,0049	0,0416	0,0245	0,0135	0,0004
Desvio-Padrão	0,0011	0,0037	0,019	0,0014	0,0013	0,04	0,022	0,03	0,0021	0,0046	0,0116	0,0008	0,0001	0,0006	0,0009	0,0004	0,0000
CP 4	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0104	0,3912	1,705	0,0430	0,0238	16,20	1,934	9,98	0,0177	0,1406	0,4487	0,0156	0,0051	0,0407	0,0231	0,0136	0,0004
Medida 2	0,0084	0,3831	1,743	0,0414	0,0216	16,30	1,880	10,02	0,0078	0,1438	0,4661	0,0168	0,0050	0,0409	0,0239	0,0133	0,0004
Medida 3	0,0085	0,3797	1,742	0,0405	0,0207	16,30	1,878	10,01	0,0054	0,1448	0,4641	0,0173	0,0048	0,0407	0,0223	0,0130	0,0003
Medida 4	0,0150	0,3971	1,720	0,0467	0,0311	16,20	1,903	10,14	0,0156	0,1499	0,4788	0,0176	0,0064	0,0413	0,0243	0,0148	0,0005
Medida 5	0,0098	0,3830	1,752	0,0439	0,0253	16,30	1,858	10,13	0,0157	0,1510	0,4897	0,0186	0,0053	0,0410	0,0240	0,0141	0,0004
Média	0,0104	0,3868	1,732	0,0431	0,0245	16,26	1,891	10,06	0,0124	0,1460	0,4695	0,0172	0,0053	0,0409	0,0235	0,0138	0,0004
Desvio-Padrão	0,0027	0,0071	0,019	0,0024	0,0041	0,05	0,029	0,07	0,0055	0,0043	0,0156	0,0011	0,0006	0,0002	0,0008	0,0007	0,0001

CP 5	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0123	0,3918	1,704	0,0420	0,0255	16,32	1,935	9,99	0,0334	0,1366	0,4482	0,0165	0,0055	0,0403	0,0213	0,0128	0,0003
Medida 2	0,0091	0,3836	1,733	0,0410	0,0212	16,39	1,881	9,99	0,0116	0,1421	0,4620	0,0166	0,0050	0,0408	0,0230	0,0127	0,0003
Medida 3	0,0088	0,3805	1,749	0,0400	0,0227	16,37	1,866	10,00	0,0078	0,1428	0,4694	0,0177	0,0049	0,0409	0,0219	0,0128	0,0003
Medida 4	0,0106	0,3924	1,721	0,0442	0,0241	16,30	1,911	10,03	0,0187	0,1489	0,4676	0,0179	0,0053	0,0416	0,0240	0,0138	0,0004
Medida 5	0,0087	0,3812	1,745	0,0409	0,0220	16,36	1,880	10,02	0,0082	0,1453	0,4705	0,0180	0,0050	0,0415	0,0235	0,0128	0,0003
Média	0,0099	0,3859	1,730	0,0416	0,0231	16,35	1,895	10,01	0,0159	0,1431	0,4635	0,0173	0,0051	0,0410	0,0227	0,0130	0,0003
Desvio-Padrão	0,0015	0,0058	0,018	0,0016	0,0017	0,04	0,028	0,02	0,0107	0,0045	0,0092	0,0007	0,0003	0,0005	0,0011	0,0005	0,0000
CP 6	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0090	0,3862	1,705	0,0400	0,0206	16,34	1,919	9,90	0,0062	0,1385	0,4404	0,0154	0,0047	0,0404	0,0218	0,0118	0,0003
Medida 2	0,0080	0,3769	1,732	0,0385	0,0191	16,39	1,878	9,90	0,0039	0,1424	0,4527	0,0162	0,0047	0,0402	0,0241	0,0119	0,0003
Medida 3	0,0084	0,3757	1,746	0,0387	0,0194	16,39	1,883	9,92	0,0035	0,1437	0,4588	0,0173	0,0047	0,0407	0,0230	0,0120	0,0002
Medida 4	0,0080	0,3778	1,748	0,0372	0,0180	16,33	1,885	9,89	0,0033	0,1419	0,4566	0,0165	0,0048	0,0412	0,0225	0,0116	0,0002
Medida 5	0,0127	0,3885	1,721	0,0384	0,0192	16,34	1,899	9,89	0,0036	0,1358	0,4466	0,0172	0,0048	0,0403	0,0224	0,0110	0,0002
Média	0,0092	0,3810	1,730	0,0386	0,0193	16,36	1,893	9,90	0,0041	0,1405	0,4510	0,0165	0,0047	0,0406	0,0228	0,0117	0,0002
Desvio-Padrão	0,0020	0,0059	0,018	0,0010	0,0009	0,03	0,017	0,01	0,0012	0,0032	0,0075	0,0008	0,0001	0,0004	0,0009	0,0004	0,0001
CP 7	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0128	0,3938	1,747	0,0407	0,0216	16,42	1,965	9,95	0,0101	0,1426	0,4449	0,0162	0,0049	0,0399	0,0224	0,0126	0,0003
Medida 2	0,0095	0,3844	1,778	0,0393	0,0206	16,52	1,923	9,90	0,0052	0,1444	0,4538	0,0168	0,0047	0,0399	0,0220	0,0125	0,0003
Medida 3	0,0081	0,3867	1,781	0,0384	0,0190	16,50	1,921	9,95	0,0040	0,1429	0,4574	0,0166	0,0048	0,0397	0,0218	0,0121	0,0003
Medida 4	0,0099	0,3926	1,755	0,0398	0,0229	16,40	1,978	9,90	0,0115	0,1423	0,4434	0,0164	0,0049	0,0402	0,0210	0,0120	0,0003
Medida 5	0,0084	0,3830	1,778	0,0377	0,0194	16,49	1,927	9,92	0,0054	0,1431	0,4531	0,0166	0,0048	0,0399	0,0215	0,0115	0,0002
Média	0,0097	0,3881	1,768	0,0392	0,0207	16,47	1,943	9,92	0,0072	0,1431	0,4505	0,0165	0,0048	0,0399	0,0217	0,0121	0,0003
Desvio-Padrão	0,0019	0,049	0,016	0,0012	0,0016	0,05	0,027	0,03	0,0033	0,0008	0,0061	0,0002	0,0001	0,0002	0,0005	0,0004	0,0000
CP 8	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0199	0,3944	1,755	0,0410	0,0221	16,42	1,960	9,97	0,0197	0,1415	0,4477	0,0173	0,0051	0,0405	0,0210	0,0121	0,0003
Medida 2	0,0119	0,3876	1,779	0,0389	0,0197	16,50	1,905	9,95	0,0082	0,1437	0,4602	0,0170	0,0049	0,0402	0,0214	0,0119	0,0002
Medida 3	0,0100	0,3825	1,793	0,0383	0,0205	16,49	1,906	9,93	0,0054	0,1428	0,4541	0,0169	0,0048	0,0410	0,0212	0,0118	0,0002
Medida 4	0,0096	0,3805	1,806	0,0385	0,0193	16,49	1,912	9,98	0,0043	0,1457	0,4662	0,0176	0,0048	0,0410	0,0211	0,0117	0,0002
Medida 5	0,0091	0,3801	1,807	0,0378	0,0194	16,52	1,913	9,95	0,0037	0,1449	0,4667	0,0180	0,0049	0,0410	0,0220	0,0113	0,0001
Média	0,0121	0,3850	1,788	0,0389	0,0202	16,48	1,919	9,96	0,0083	0,1437	0,4590	0,0174	0,0049	0,0407	0,0213	0,0118	0,0002
Desvio-Padrão	0,0045	0,0060	0,022	0,0012	0,0012	0,04	0,023	0,02	0,0066	0,0017	0,0081	0,0005	0,0001	0,0004	0,0004	0,0003	0,0001
CP 9	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0166	0,3911	1,777	0,0391	0,0198	16,47	1,925	9,91	0,0173	0,1395	0,4600	0,0163	0,0051	0,0398	0,0223	0,0121	0,0002
Medida 2	0,0124	0,3864	1,791	0,0386	0,0193	16,51	1,902	9,96	0,0090	0,1419	0,4610	0,0165	0,0048	0,0397	0,0222	0,0121	0,0002

Medida 3	0,0106	0,3815	1,801	0,0385	0,0195	16,48	1,912	9,94	0,0062	0,1421	0,4624	0,0170	0,0048	0,0400	0,0211	0,0118	0,0001
Medida 4	0,0101	0,3807	1,797	0,0371	0,0187	16,53	1,918	9,98	0,0049	0,1426	0,4556	0,0173	0,0047	0,0404	0,0215	0,0113	0,0001
Medida 5	0,0100	0,3820	1,805	0,0369	0,0179	16,48	1,905	9,93	0,0042	0,1426	0,4589	0,0171	0,0047	0,0405	0,0205	0,0111	0,0001
Média	0,0119	0,3843	1,794	0,0380	0,0190	16,49	1,912	9,94	0,0083	0,1417	0,4596	0,0168	0,0048	0,0401	0,0215	0,0117	0,0001
Desvio-Padrão	0,0028	0,0044	0,011	0,0010	0,0008	0,03	0,009	0,03	0,0053	0,0013	0,0026	0,0004	0,0002	0,0004	0,0008	0,0005	0,0001
CP 10	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0118	0,3838	1,779	0,0382	0,0189	16,45	1,908	9,88	0,0107	0,1397	0,4472	0,0165	0,0050	0,0395	0,0213	0,0112	0,0001
Medida 2	0,0104	0,3812	1,797	0,0376	0,0199	16,50	1,892	9,92	0,0065	0,1411	0,4550	0,0159	0,0049	0,0398	0,0216	0,0111	0,0001
Medida 3	0,0097	0,3791	1,807	0,0374	0,0192	16,47	1,895	9,95	0,0049	0,1440	0,4586	0,0177	0,0048	0,0406	0,0222	0,0110	0,0001
Medida 4	0,0092	0,3798	1,804	0,0369	0,0188	16,49	1,900	9,99	0,0043	0,1440	0,4636	0,0174	0,0048	0,0403	0,0212	0,0108	0,0001
Medida 5	0,0094	0,3812	1,811	0,0358	0,0195	16,49	1,905	10,00	0,0037	0,1438	0,4615	0,0176	0,0048	0,0409	0,0217	0,0102	0,0001
Média	0,0101	0,3810	1,800	0,0372	0,0193	16,48	1,900	9,95	0,0060	0,1425	0,4572	0,0170	0,0049	0,0402	0,0216	0,0109	0,0001
Desvio-Padrão	0,0011	0,0018	0,013	0,0009	0,0005	0,02	0,007	0,05	0,0028	0,0020	0,0064	0,0008	0,0001	0,0006	0,0004	0,0004	0,0000
CP 11	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0151	0,3853	1,763	0,0388	0,0190	16,50	1,902	9,91	0,0110	0,1394	0,4518	0,0164	0,0049	0,0394	0,0260	0,0114	0,0001
Medida 2	0,0119	0,3830	1,780	0,0377	0,0189	16,52	1,895	9,91	0,0062	0,1400	0,4538	0,0170	0,0048	0,0394	0,0216	0,0111	0,0001
Medida 3	0,0103	0,3787	1,784	0,0372	0,0187	16,52	1,891	9,91	0,0050	0,1425	0,4560	0,0167	0,0047	0,0399	0,0220	0,0108	0,0001
Medida 4	0,0098	0,3806	1,794	0,0372	0,0196	16,51	1,892	9,97	0,0043	0,1424	0,4618	0,0174	0,0047	0,0404	0,0208	0,0108	0,0001
Medida 5	0,0099	0,3793	1,811	0,0367	0,0195	16,45	1,899	9,89	0,0036	0,1426	0,4605	0,0178	0,0048	0,0409	0,0205	0,0104	0,0001
Média	0,0114	0,3814	1,786	0,0375	0,0191	16,50	1,896	9,92	0,0060	0,1414	0,4568	0,0171	0,0048	0,0400	0,0222	0,0109	0,0001
Desvio-Padrão	0,0022	0,0027	0,018	0,0008	0,0004	0,03	0,005	0,03	0,0029	0,0015	0,0043	0,0006	0,0001	0,0007	0,0022	0,0004	0,0000
CP 12	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0370	0,3967	1,709	0,0380	0,0218	16,26	1,971	9,89	0,0267	0,1389	0,4422	0,0165	0,0056	0,0412	0,0211	0,0105	0,0002
Medida 2	0,0257	0,4114	1,768	0,0421	0,0248	16,38	1,940	10,24	0,0117	0,1447	0,4964	0,0180	0,0051	0,0417	0,0224	0,0120	0,0003
Medida 3	0,0158	0,3861	1,754	0,0363	0,0197	16,40	1,886	10,03	0,0091	0,1441	0,4635	0,0173	0,0050	0,0410	0,0223	0,0105	0,0001
Medida 4	0,0125	0,3800	1,783	0,0376	0,0205	16,43	1,885	10,03	0,0065	0,1446	0,4710	0,0179	0,0051	0,0408	0,0222	0,0108	0,0001
Medida 5	0,0185	0,3868	1,781	0,0396	0,0216	16,38	1,907	10,07	0,0122	0,1471	0,4771	0,0179	0,0052	0,0413	0,0220	0,0114	0,0002
Média	0,0219	0,3922	1,759	0,0387	0,0217	16,37	1,918	10,05	0,0132	0,1439	0,4700	0,0175	0,0052	0,0412	0,0220	0,0110	0,0002
Desvio-Padrão	0,0097	0,0123	0,030	0,0022	0,0019	0,06	0,037	0,13	0,0079	0,0030	0,0198	0,0006	0,0002	0,0003	0,0005	0,0007	0,0001
CP 13	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0135	0,4015	1,723	0,0393	0,0201	16,50	1,959	9,89	0,0060	0,1459	0,4601	0,0150	0,0049	0,0399	0,0236	0,0127	0,0003
Medida 2	0,0097	0,3954	1,754	0,0419	0,0217	16,51	1,942	9,97	0,0040	0,1499	0,4712	0,0161	0,0049	0,0404	0,0228	0,0137	0,0004
Medida 3	0,0100	0,3891	1,762	0,0409	0,0225	16,47	1,926	9,97	0,0044	0,1489	0,4645	0,0175	0,0048	0,0408	0,0231	0,0128	0,0003
Medida 4	0,0102	0,3916	1,750	0,0396	0,0222	16,52	1,911	9,95	0,0045	0,1503	0,4710	0,0176	0,0049	0,0412	0,0240	0,0121	0,0003
Medida 5	0,0125	0,3987	1,774	0,0439	0,0290	16,42	1,934	10,15	0,0041	0,1512	0,4719	0,0178	0,0049	0,0412	0,0236	0,0138	0,0004
Média	0,0112	0,3953	1,753	0,0411	0,0231	16,48	1,934	9,99	0,0046	0,1492	0,4677	0,0168	0,0049	0,0407	0,0234	0,0130	0,0003

Desvio-Padrão	0,0017	0,0051	0,0019	0,0019	0,0034	0,04	0,018	0,10	0,0008	0,0020	0,0052	0,0012	0,0000	0,0006	0,0005	0,0007	0,0001
CP 14	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0229	0,4011	1,727	0,0398	0,0227	16,43	1,977	9,97	0,0168	0,1431	0,4585	0,0163	0,0052	0,0409	0,0222	0,0113	0,0002
Medida 2	0,0267	0,3992	1,742	0,0407	0,0325	16,38	1,950	10,05	0,0187	0,1477	0,4655	0,0175	0,0055	0,0410	0,0239	0,0116	0,0003
Medida 3	0,0135	0,3924	1,763	0,0412	0,0221	16,43	1,916	10,10	0,0065	0,1490	0,4723	0,0182	0,0050	0,0413	0,0246	0,0122	0,0003
Medida 4	0,0167	0,3951	1,752	0,0384	0,0211	16,41	1,917	10,03	0,0108	0,1492	0,4786	0,0182	0,0051	0,0414	0,0233	0,0111	0,0002
Medida 5	0,0107	0,3856	1,786	0,0371	0,0190	16,44	1,890	10,04	0,0055	0,1510	0,4767	0,0178	0,0050	0,0409	0,0236	0,0110	0,0001
Média	0,0181	0,3947	1,754	0,0394	0,0235	16,42	1,930	10,04	0,0117	0,1480	0,4703	0,0176	0,0052	0,0411	0,0235	0,0114	0,0002
Desvio-Padrão	0,0066	0,0061	0,022	0,0017	0,0052	0,02	0,034	0,05	0,0059	0,0030	0,0083	0,0008	0,0002	0,0002	0,0009	0,0005	0,0001
CP 15	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0219	0,4120	1,738	0,0389	0,0208	16,45	1,963	9,98	0,0090	0,1408	0,4602	0,0172	0,0048	0,0408	0,0213	0,0114	0,0002
Medida 2	0,0187	0,3971	1,742	0,0396	0,0201	16,46	1,952	9,99	0,0084	0,1419	0,4604	0,0166	0,0049	0,0405	0,0211	0,0115	0,0002
Medida 3	0,0149	0,3985	1,779	0,0409	0,0211	16,46	1,932	10,08	0,0057	0,1476	0,4740	0,0171	0,0049	0,0407	0,0222	0,0122	0,0002
Medida 4	0,0112	0,3889	1,769	0,0376	0,0193	16,51	1,911	10,06	0,0046	0,1494	0,4709	0,0172	0,0048	0,0409	0,0232	0,0110	0,0001
Medida 5	0,0156	0,4033	1,780	0,0432	0,0262	16,42	1,943	10,20	0,0062	0,1508	0,4866	0,0180	0,0048	0,0414	0,0223	0,0129	0,0003
Média	0,0165	0,0400	1,762	0,0400	0,0215	16,46	1,940	10,06	0,0068	0,1461	0,4704	0,0172	0,0048	0,0409	0,0220	0,0118	0,0002
Desvio-Padrão	0,0040	0,0085	0,020	0,0021	0,0027	0,03	0,020	0,09	0,0019	0,0045	0,0110	0,0005	0,0001	0,0003	0,0008	0,0008	0,0001
CP 16	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0382	0,3972	1,725	0,0408	0,0228	16,48	1,988	9,84	0,0239	0,1453	0,4522	0,0166	0,0051	0,0405	0,0235	0,0136	0,0004
Medida 2	0,0223	0,3892	1,765	0,0408	0,0218	16,52	1,932	9,99	0,0133	0,1477	0,4691	0,0158	0,0049	0,0401	0,0225	0,0138	0,0004
Medida 3	0,0182	0,3917	1,749	0,0408	0,0218	16,48	1,935	9,90	0,0116	0,1515	0,4742	0,0173	0,0050	0,0404	0,0229	0,0133	0,0005
Medida 4	0,0151	0,3825	1,760	0,0361	0,0193	16,47	1,897	9,89	0,0066	0,1395	0,4598	0,0166	0,0048	0,0404	0,0205	0,0104	0,0001
Medida 5	0,0248	0,4020	1,763	0,0400	0,0227	16,43	1,899	10,18	0,0134	0,1450	0,4972	0,0183	0,0051	0,0407	0,0220	0,0113	0,0002
Média	0,0237	0,3925	1,752	0,0397	0,0217	16,48	1,930	9,96	0,0138	0,1458	0,4705	0,0169	0,0050	0,0404	0,0223	0,0125	0,0003
Desvio-Padrão	0,0089	0,0075	0,017	0,0020	0,0014	0,03	0,037	0,13	0,0063	0,0044	0,0172	0,0009	0,0001	0,0002	0,0011	0,0015	0,0002
CP 17	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0108	0,4073	1,758	0,0388	0,0192	16,55	2,005	9,92	0,0032	0,1519	0,4696	0,0163	0,0046	0,0412	0,0230	0,0130	0,0004
Medida 2	0,0078	0,3973	1,783	0,0367	0,0187	16,57	1,958	9,94	0,0030	0,1525	0,4736	0,0161	0,0047	0,0406	0,0227	0,0122	0,0003
Medida 3	0,0073	0,3978	1,786	0,0363	0,0185	16,57	1,959	9,95	0,0029	0,1533	0,4775	0,0176	0,0047	0,0409	0,0235	0,0118	0,0002
Medida 4	0,0096	0,4091	1,782	0,0434	0,0240	16,52	1,982	10,14	0,0031	0,1590	0,4919	0,0179	0,0049	0,0414	0,0242	0,0145	0,0005
Medida 5	0,0129	0,4047	1,766	0,0376	0,0218	16,47	1,929	10,13	0,0034	0,1488	0,4783	0,0188	0,0050	0,0409	0,0231	0,0101	0,0001
Média	0,0097	0,4032	1,775	0,0386	0,0204	16,54	1,967	10,02	0,0031	0,1531	0,4782	0,0173	0,0048	0,0410	0,0233	0,0123	0,0003
Desvio-Padrão	0,0023	0,0054	0,012	0,0029	0,0024	0,04	0,029	0,11	0,0002	0,0037	0,0084	0,0011	0,0002	0,0003	0,0006	0,0006	0,0002
CP 18	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B

Medida 1	0,0181	0,4014	1,722	0,0389	0,0218	16,47	1,969	9,90	0,0187	0,1425	0,4572	0,0167	0,0055	0,0404	0,0227	0,0112	0,0002
Medida 2	0,0163	0,4011	1,759	0,0413	0,0239	16,40	1,960	10,05	0,0192	0,1475	0,4687	0,0168	0,0059	0,0409	0,0233	0,0125	0,0004
Medida 3	0,0168	0,3949	1,735	0,0397	0,0235	16,51	1,950	9,99	0,0160	0,1378	0,4677	0,0163	0,0052	0,0403	0,0218	0,0113	0,0002
Medida 4	0,0101	0,3894	1,758	0,0384	0,0196	16,50	1,896	10,02	0,0066	0,1470	0,4757	0,0166	0,0049	0,0405	0,0218	0,0119	0,0002
Medida 5	0,0123	0,3864	1,758	0,0410	0,0235	16,47	1,909	9,99	0,0109	0,1485	0,4715	0,0172	0,0051	0,0399	0,0226	0,0125	0,0004
Média	0,0147	0,3946	1,746	0,0399	0,0225	16,47	1,937	9,99	0,0143	0,1447	0,4682	0,0167	0,0053	0,0404	0,0224	0,0119	0,0003
Desvio-Padrão	0,0034	0,0068	0,017	0,0013	0,0018	0,04	0,032	0,06	0,0054	0,0045	0,0069	0,0003	0,0004	0,0004	0,0006	0,0006	0,0001
CP 19	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0161	0,4006	1,722	0,0428	0,0248	16,48	1,965	9,93	0,0251	0,1443	0,4696	0,0157	0,0055	0,0399	0,0210	0,0148	0,0006
Medida 2	0,0110	0,3996	1,737	0,0439	0,0236	16,50	1,935	10,00	0,0129	0,1507	0,4736	0,0167	0,0049	0,0396	0,0236	0,0153	0,0006
Medida 3	0,0126	0,4005	1,754	0,0430	0,0246	16,45	1,966	9,98	0,0130	0,1496	0,4692	0,0167	0,0053	0,0399	0,0231	0,0138	0,0005
Medida 4	0,0083	0,3983	1,764	0,0404	0,0204	16,54	1,912	9,97	0,0072	0,1530	0,4808	0,0168	0,0049	0,0404	0,0245	0,0141	0,0005
Medida 5	0,0112	0,4060	1,767	0,0453	0,0262	16,51	1,931	10,16	0,0143	0,1641	0,5020	0,0184	0,0051	0,0412	0,0268	0,0159	0,0007
Média	0,0118	0,4010	1,749	0,0431	0,0239	16,50	1,942	10,01	0,0145	0,1523	0,4790	0,0169	0,0051	0,0402	0,0238	0,0148	0,0006
Desvio-Padrão	0,0028	0,0029	0,019	0,0018	0,0022	0,03	0,023	0,09	0,0065	0,0073	0,0137	0,0010	0,0003	0,0006	0,0021	0,0009	0,0001
CP 20	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0258	0,4114	1,728	0,0425	0,0269	16,44	2,020	9,88	0,0230	0,1432	0,4524	0,0173	0,0053	0,0411	0,0210	0,0135	0,0006
Medida 2	0,0124	0,3976	1,760	0,0446	0,0260	16,44	1,949	10,11	0,0038	0,1538	0,4870	0,0170	0,0048	0,0406	0,0233	0,0156	0,0006
Medida 3	0,0159	0,4045	1,770	0,0426	0,0247	16,49	1,953	10,07	0,0052	0,1508	0,4820	0,0174	0,0049	0,0404	0,0223	0,0145	0,0005
Medida 4	0,0143	0,3978	1,763	0,0398	0,0219	16,51	1,916	10,01	0,0143	0,1557	0,4873	0,0178	0,0052	0,0406	0,0235	0,0126	0,0005
Medida 5	0,0104	0,3924	1,795	0,0389	0,0191	16,53	1,900	10,04	0,0041	0,1510	0,4826	0,0177	0,0049	0,0401	0,0223	0,0125	0,0003
Média	0,0158	0,4007	1,763	0,0417	0,0237	16,48	1,948	10,02	0,0101	0,1509	0,4783	0,0174	0,0050	0,0406	0,0225	0,0137	0,0005
Desvio-Padrão	0,0060	0,0073	0,024	0,0023	0,0032	0,04	0,046	0,09	0,0084	0,0048	0,0147	0,0003	0,0002	0,0004	0,0010	0,0013	0,0001
CP 21	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0411	0,4085	1,693	0,0372	0,0242	16,22	2,009	9,87	0,0448	0,1509	0,4590	0,0165	0,0061	0,0418	0,0252	0,0118	0,0007
Medida 2	0,0341	0,3941	1,719	0,0374	0,0213	16,33	1,975	9,91	0,0428	0,1428	0,4668	0,0162	0,0060	0,0410	0,0226	0,0117	0,0006
Medida 3	0,0550	0,4130	1,731	0,0364	0,0240	16,22	1,975	10,07	0,0603	0,1465	0,4800	0,0183	0,0066	0,0428	0,0237	0,0089	0,0007
Medida 4	0,0202	0,3844	1,734	0,0371	0,0203	16,36	1,905	9,93	0,0123	0,1436	0,4622	0,0173	0,0051	0,0411	0,0210	0,0106	0,0002
Medida 5	0,0217	0,3835	1,754	0,0360	0,0190	16,35	1,917	10,03	0,0170	0,1465	0,4689	0,0183	0,0052	0,0411	0,0235	0,0094	0,0002
Média	0,0344	0,3967	1,726	0,0368	0,0218	16,30	1,956	9,96	0,0354	0,1461	0,4674	0,0173	0,0058	0,0416	0,0232	0,0105	0,0005
Desvio-Padrão	0,0144	0,0136	0,022	0,0006	0,0023	0,07	0,044	0,08	0,0202	0,0032	0,0080	0,0010	0,0006	0,0008	0,0015	0,0013	0,0003
CP 22	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0184	0,3969	1,715	0,0399	0,0211	16,34	1,953	10,03	0,0036	0,1396	0,4594	0,0171	0,0048	0,0421	0,0213	0,0117	0,0002
Medida 2	0,0157	0,3931	1,734	0,0416	0,0226	16,38	1,940	10,12	0,0034	0,1444	0,4694	0,0168	0,0048	0,0417	0,0215	0,0121	0,0003
Medida 3	0,0107	0,3905	1,750	0,0390	0,0201	16,42	1,896	10,10	0,0032	0,1473	0,4817	0,0181	0,0049	0,0416	0,0230	0,0117	0,0002
Medida 4	0,0159	0,3882	1,730	0,0413	0,0245	16,37	1,937	10,10	0,0029	0,1446	0,4705	0,0178	0,0049	0,0417	0,0219	0,0119	0,0003

Medida 5	0,0140	0,3962	1,755	0,0430	0,0235	16,38	1,934	10,23	0,0030	0,1532	0,4955	0,0177	0,0049	0,0415	0,0247	0,0126	0,0003
Média	0,0149	0,3930	1,737	0,0410	0,0224	16,38	1,932	10,12	0,0032	0,1458	0,4753	0,0175	0,0049	0,0417	0,0225	0,0120	0,0003
Desvio-Padrão	0,0028	0,0037	0,016	0,0016	0,0018	0,03	0,021	0,07	0,0003	0,0050	0,0138	0,0005	0,0001	0,0002	0,0014	0,0004	0,0001
CP 23	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0130	0,3920	1,724	0,0372	0,0181	16,37	1,942	10,01	0,0033	0,1430	0,4623	0,0173	0,0049	0,0418	0,0229	0,0105	0,0001
Medida 2	0,0125	0,3919	1,736	0,0399	0,0217	16,38	1,934	10,01	0,0031	0,1432	0,4630	0,0174	0,0048	0,0414	0,0220	0,0114	0,0002
Medida 3	0,0108	0,3914	1,733	0,0395	0,0206	16,39	1,930	9,99	0,0031	0,1462	0,4664	0,0176	0,0049	0,0414	0,0224	0,0115	0,0002
Medida 4	0,0138	0,3937	1,744	0,0417	0,0228	16,37	1,946	10,09	0,0028	0,1479	0,4669	0,0175	0,0048	0,0422	0,0233	0,0120	0,0002
Medida 5	0,0118	0,3959	1,744	0,0401	0,0227	16,36	1,941	10,10	0,0033	0,1517	0,4742	0,0175	0,0050	0,0423	0,0246	0,0119	0,0003
Média	0,0124	0,3930	1,736	0,0397	0,0212	16,37	1,939	10,04	0,0031	0,1464	0,4666	0,0175	0,0049	0,0418	0,0230	0,0115	0,0002
Desvio-Padrão	0,0011	0,0018	0,008	0,0016	0,0019	0,01	0,006	0,05	0,0002	0,0036	0,0047	0,0001	0,0001	0,0004	0,0010	0,0006	0,0001
CP 24	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0152	0,3911	1,738	0,0422	0,0205	16,33	1,969	10,03	0,0045	0,1475	0,4636	0,0166	0,0047	0,0410	0,0223	0,0142	0,0005
Medida 2	0,0125	0,3879	1,741	0,0403	0,0202	16,40	1,939	9,93	0,0039	0,1491	0,4669	0,0172	0,0047	0,0408	0,0222	0,0135	0,0004
Medida 3	0,0119	0,3994	1,755	0,0411	0,0220	16,39	1,947	10,09	0,0031	0,1542	0,4818	0,0173	0,0048	0,0421	0,0243	0,0131	0,0004
Medida 4	0,0110	0,3955	1,759	0,0427	0,0222	16,41	1,948	10,11	0,0030	0,1529	0,4774	0,0180	0,0048	0,0415	0,0235	0,0138	0,0004
Medida 5	0,0103	0,3951	1,772	0,0415	0,0222	16,38	1,927	10,18	0,0029	0,1569	0,4903	0,0180	0,0049	0,0422	0,0245	0,0134	0,0004
Média	0,0122	0,03938	1,753	0,0416	0,0214	16,38	1,946	10,07	0,0035	0,1521	0,4760	0,0174	0,0048	0,0415	0,0234	0,0136	0,0004
Desvio-Padrão	0,0019	0,0044	0,014	0,0009	0,0010	0,03	0,015	0,09	0,0007	0,0038	0,0109	0,0006	0,0001	0,0006	0,0011	0,0004	0,0000
CP 25	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0335	0,3828	1,748	0,0402	0,0236	16,29	1,946	9,99	0,0029	0,1389	0,4465	0,0173	0,0049	0,0407	0,0204	0,0113	0,0002
Medida 2	0,0162	0,3785	1,767	0,0383	0,0204	16,41	1,919	10,02	0,0024	0,1403	0,4554	0,0172	0,0048	0,0408	0,0205	0,0111	0,0002
Medida 3	0,0284	0,3908	1,786	0,0363	0,0228	16,39	1,877	10,14	0,0034	0,1326	0,4850	0,0192	0,0050	0,0419	0,0174	0,0099	0,0001
Medida 4	0,0172	0,3702	1,752	0,0374	0,0191	16,43	1,878	9,94	0,0028	0,1398	0,4544	0,0171	0,0049	0,0407	0,0191	0,0106	0,0002
Medida 5	0,0131	0,3877	1,771	0,0441	0,0247	16,36	1,904	10,22	0,0026	0,1510	0,4819	0,0193	0,0050	0,0419	0,0224	0,0134	0,0004
Média	0,0217	0,3820	1,765	0,039	0,022	16,38	1,905	10,06	0,0028	0,1405	0,4646	0,0180	0,0049	0,0412	0,0200	0,0113	0,0002
Desvio-Padrão	0,0088	0,0081	0,015	0,003	0,002	0,05	0,029	0,11	0,0004	0,0066	0,0175	0,0011	0,0001	0,0006	0,0019	0,0013	0,0001
CP 26	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0119	0,4013	1,751	0,0392	0,0196	16,47	1,947	9,95	0,0037	0,1491	0,4728	0,0165	0,0047	0,0411	0,0234	0,0135	0,0004
Medida 2	0,0091	0,3996	1,765	0,0372	0,0180	16,48	1,949	9,92	0,0031	0,1503	0,4724	0,0167	0,0046	0,0411	0,0236	0,0125	0,0002
Medida 3	0,0081	0,3927	1,773	0,0364	0,0168	16,48	1,952	9,94	0,0027	0,1519	0,4715	0,0164	0,0047	0,0416	0,0233	0,0117	0,0001
Medida 4	0,0092	0,4028	1,771	0,0373	0,0179	16,52	1,932	9,97	0,0034	0,1554	0,4836	0,0177	0,0048	0,0419	0,0257	0,0122	0,0002
Medida 5	0,0080	0,3950	1,784	0,0354	0,0169	16,49	1,921	10,03	0,0032	0,1550	0,4863	0,0174	0,0049	0,0422	0,0249	0,0114	0,0001
Média	0,0093	0,3983	1,769	0,0371	0,0178	16,49	1,940	9,96	0,0032	0,1523	0,4773	0,0169	0,0047	0,0416	0,0242	0,0123	0,0002
Desvio-Padrão	0,0016	0,0043	0,012	0,0014	0,0011	0,02	0,013	0,04	0,0004	0,0028	0,0070	0,0006	0,0001	0,0005	0,0011	0,0008	0,0001

CP 27	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0079	0,4083	1,734	0,0383	0,0195	16,46	2,014	9,95	0,0030	0,1496	0,4654	0,0165	0,0046	0,0407	0,0229	0,0131	0,0004
Medida 2	0,0086	0,4006	1,755	0,0364	0,0186	16,49	1,988	9,95	0,0029	0,1517	0,4639	0,0167	0,0046	0,0408	0,0239	0,0122	0,0004
Medida 3	0,0087	0,4118	1,756	0,0380	0,0181	16,47	1,994	10,02	0,0031	0,1566	0,4788	0,0166	0,0046	0,0408	0,0256	0,0123	0,0003
Medida 4	0,0075	0,3999	1,783	0,0357	0,0173	16,50	1,976	10,05	0,0027	0,1583	0,4806	0,0166	0,0046	0,0414	0,0249	0,0113	0,0002
Medida 5	0,0152	0,4084	1,780	0,0369	0,0203	16,50	1,981	10,08	0,0034	0,1553	0,4909	0,0171	0,0051	0,0417	0,0247	0,0116	0,0003
Média	0,0096	0,4058	1,762	0,0371	0,0188	16,48	1,991	10,01	0,0030	0,1543	0,4759	0,0167	0,0047	0,0411	0,0244	0,0121	0,0003
Desvio-Padrão	0,0032	0,0053	0,020	0,0011	0,0012	0,02	0,015	0,06	0,0003	0,0036	0,0113	0,0002	0,0002	0,0004	0,0010	0,0007	0,0001
CP 28	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0125	0,4078	1,732	0,0381	0,0201	16,48	2,068	9,94	0,0028	0,1441	0,4526	0,0148	0,0045	0,0404	0,0215	0,0115	0,0003
Medida 2	0,0076	0,3880	1,775	0,0392	0,0205	16,52	1,971	10,03	0,0024	0,1521	0,4661	0,0168	0,0046	0,0400	0,0221	0,0135	0,0005
Medida 3	0,0090	0,3604	1,796	0,0342	0,0186	16,42	1,959	10,08	0,0016	0,1277	0,4276	0,0177	0,0047	0,0408	0,0164	0,0097	0,0001
Medida 4	0,0130	0,4028	1,748	0,0367	0,0210	16,39	1,974	10,05	0,0031	0,1474	0,4609	0,0167	0,0048	0,0406	0,0225	0,0093	0,0001
Medida 5	0,0112	0,3998	1,753	0,0370	0,0211	16,39	1,975	10,11	0,0039	0,1483	0,4656	0,0179	0,0048	0,0413	0,0232	0,0092	0,0001
Média	0,0107	0,3918	1,761	0,0370	0,0203	16,44	1,989	10,04	0,0028	0,1439	0,4546	0,0168	0,0047	0,0406	0,0211	0,0106	0,0002
Desvio-Padrão	0,0023	0,0190	0,025	0,0019	0,0010	0,06	0,044	0,06	0,0009	0,0095	0,0160	0,0012	0,0001	0,0005	0,0027	0,0018	0,0002
CP 29	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0107	0,3997	1,751	0,0379	0,0193	16,45	2,002	9,99	0,0032	0,1492	0,4589	0,0170	0,0047	0,0414	0,0230	0,0118	0,0004
Medida 2	0,0087	0,4037	1,770	0,0367	0,0170	16,51	1,955	10,01	0,0031	0,1534	0,4792	0,0174	0,0047	0,0406	0,0242	0,0116	0,0004
Medida 3	0,0086	0,3860	1,790	0,0365	0,0186	16,50	1,957	9,98	0,0026	0,1458	0,4686	0,0174	0,0047	0,0404	0,0215	0,0112	0,0003
Medida 4	0,0093	0,3908	1,778	0,0371	0,0196	16,47	1,947	10,00	0,0029	0,1524	0,4710	0,0186	0,0048	0,0413	0,0242	0,0115	0,0004
Medida 5	0,0080	0,3973	1,769	0,0387	0,0193	16,54	1,950	10,02	0,0031	0,1544	0,4788	0,0175	0,0048	0,0413	0,0237	0,0121	0,0004
Média	0,0091	0,3955	1,772	0,037	0,0188	16,49	1,962	10,00	0,0030	0,1510	0,4713	0,0176	0,0047	0,0410	0,0233	0,0116	0,0004
Desvio-Padrão	0,0010	0,0071	0,014	0,001	0,0011	0,04	0,023	0,02	0,0002	0,0035	0,0084	0,0006	0,0001	0,0005	0,0011	0,0003	0,0000
CP 30	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0103	0,4012	1,739	0,0384	0,0195	16,54	2,002	9,90	0,0030	0,1510	0,4623	0,0160	0,0046	0,0407	0,0231	0,0120	0,0003
Medida 2	0,0084	0,4004	1,755	0,0383	0,0185	16,58	1,962	9,89	0,0031	0,1537	0,4710	0,0182	0,0047	0,0404	0,0230	0,0120	0,0003
Medida 3	0,0094	0,4006	1,773	0,0390	0,0200	16,53	1,960	10,07	0,0032	0,1548	0,4871	0,0173	0,0047	0,0407	0,0237	0,0119	0,0003
Medida 4	0,0090	0,3968	1,789	0,0393	0,0200	16,59	1,944	10,11	0,0029	0,1564	0,4847	0,0183	0,0048	0,0408	0,0233	0,0123	0,0003
Medida 5	0,0085	0,3992	1,771	0,0386	0,0213	16,58	1,937	10,02	0,0033	0,1543	0,4880	0,0186	0,0048	0,0411	0,0236	0,0118	0,0003
Média	0,0091	0,3996	1,765	0,0387	0,0199	16,56	1,961	10,00	0,0031	0,1540	0,4786	0,0177	0,0047	0,0407	0,0233	0,0120	0,0003
Desvio-Padrão	0,0008	0,0017	0,019	0,0004	0,0010	0,03	0,025	0,10	0,0002	0,0020	0,0114	0,0011	0,0001	0,0003	0,0003	0,0002	0,0000
CP 31	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0108	0,4073	1,758	0,0388	0,0192	16,55	2,005	9,92	0,0032	0,1519	0,4696	0,0163	0,0046	0,0412	0,0230	0,0130	0,0004
Medida 2	0,0078	0,3973	1,783	0,0367	0,0187	16,57	1,958	9,94	0,0030	0,1525	0,4736	0,0161	0,0047	0,0406	0,0227	0,0122	0,0003

Medida 3	0,0073	0,3978	1,786	0,0363	0,0185	16,57	1,959	9,95	0,0029	0,1533	0,4775	0,0176	0,0047	0,0409	0,0235	0,0118	0,0002
Medida 4	0,0096	0,4091	1,782	0,0434	0,0240	16,52	1,982	10,14	0,0031	0,1590	0,4919	0,0179	0,0049	0,0414	0,0242	0,0145	0,0005
Medida 5	0,0129	0,4047	1,766	0,0376	0,0218	16,47	1,929	10,13	0,0034	0,1488	0,4783	0,0188	0,0050	0,0409	0,0231	0,0101	0,0001
Média	0,0097	0,4032	1,775	0,0386	0,0204	16,54	1,967	10,02	0,0031	0,1531	0,4782	0,0173	0,0048	0,0410	0,0233	0,0123	0,0003
Desvio-Padrão	0,0023	0,0054	0,012	0,0029	0,0024	0,04	0,029	0,11	0,0002	0,0037	0,0084	0,0011	0,0002	0,0003	0,0006	0,0016	0,0002
CP 32	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0103	0,4035	1,760	0,0412	0,0224	16,50	1,997	10,02	0,0028	0,1495	0,4634	0,0171	0,0046	0,0401	0,0227	0,0132	0,0004
Medida 2	0,0079	0,3991	1,784	0,0396	0,0204	16,55	1,967	10,08	0,0027	0,1533	0,4798	0,0176	0,0047	0,0409	0,0226	0,0130	0,0003
Medida 3	0,0082	0,3991	1,798	0,0384	0,0189	16,48	1,954	10,08	0,0027	0,1533	0,4824	0,0182	0,0048	0,0412	0,0223	0,0121	0,0003
Medida 4	0,0101	0,3991	1,768	0,0401	0,0230	16,52	1,957	10,00	0,0031	0,1546	0,4785	0,0179	0,0048	0,0409	0,0232	0,0127	0,0004
Medida 5	0,0083	0,4048	1,798	0,0402	0,0205	16,53	1,945	10,23	0,0031	0,1596	0,5060	0,0188	0,0049	0,0417	0,0248	0,0126	0,0003
Média	0,0090	0,4011	1,782	0,0399	0,0210	16,52	1,964	10,08	0,0029	0,1541	0,4820	0,0179	0,0048	0,0410	0,0231	0,0127	0,0003
Desvio-Padrão	0,0011	0,0028	0,017	0,0010	0,0017	0,03	0,020	0,09	0,0002	0,0036	0,0153	0,0006	0,0001	0,0006	0,0010	0,0004	0,0001
CP 33	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0198	0,4092	1,724	0,0409	0,0300	16,48	2,055	9,94	0,0032	0,1465	0,4520	0,0167	0,0047	0,0406	0,0215	0,0121	0,0004
Medida 2	0,0094	0,3949	1,770	0,0379	0,0197	16,62	1,963	9,98	0,0030	0,1503	0,4682	0,0170	0,0047	0,0397	0,0215	0,0120	0,0004
Medida 3	0,0084	0,3935	1,794	0,0352	0,0182	16,54	1,954	9,94	0,0028	0,1508	0,4693	0,0173	0,0047	0,0408	0,0213	0,0107	0,0001
Medida 4	0,0120	0,4074	1,761	0,0438	0,0287	16,46	2,010	10,17	0,0029	0,1529	0,4842	0,0183	0,0048	0,0414	0,0226	0,0133	0,0005
Medida 5	0,0115	0,3996	1,788	0,0422	0,0247	16,54	1,969	10,14	0,0028	0,1541	0,4915	0,0188	0,0048	0,0412	0,0224	0,0129	0,0004
Média	0,0122	0,4009	1,767	0,0400	0,0243	16,53	1,990	10,03	0,0029	0,1509	0,4730	0,0176	0,0047	0,0407	0,0219	0,0122	0,0004
Desvio-Padrão	0,0045	0,0071	0,028	0,0034	0,0053	0,06	0,042	0,11	0,0002	0,0029	0,0154	0,0009	0,0001	0,0007	0,0006	0,0010	0,0002
CP 34	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0111	0,3961	1,745	0,0379	0,0190	16,58	1,980	9,83	0,0031	0,1512	0,4647	0,0157	0,0047	0,0401	0,0221	0,0133	0,0005
Medida 2	0,0082	0,3893	1,769	0,0353	0,0170	16,58	1,939	9,85	0,0032	0,1508	0,4697	0,0175	0,0047	0,0400	0,0217	0,0126	0,0004
Medida 3	0,0108	0,4006	1,759	0,0370	0,0195	16,56	1,981	10,03	0,0029	0,1507	0,4751	0,0174	0,0047	0,0405	0,0218	0,0133	0,0004
Medida 4	0,0119	0,3920	1,768	0,0367	0,0191	16,55	1,962	9,95	0,0030	0,1505	0,4753	0,0175	0,0047	0,0406	0,0219	0,0121	0,0003
Medida 5	0,0105	0,3940	1,787	0,0381	0,0205	16,54	1,970	9,96	0,0026	0,1507	0,4744	0,0180	0,0048	0,0409	0,0220	0,0125	0,0003
Média	0,0105	0,3944	1,766	0,0370	0,0190	16,56	1,966	9,92	0,0030	0,1508	0,4718	0,0172	0,0047	0,0404	0,0219	0,0128	0,0004
Desvio-Padrão	0,0014	0,0043	0,015	0,0011	0,0013	0,02	0,017	0,08	0,0002	0,0003	0,0046	0,0009	0,0000	0,0004	0,0002	0,0005	0,0001
CP 35	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0130	0,4055	1,753	0,0400	0,0219	16,52	2,009	9,94	0,0032	0,1520	0,4657	0,0171	0,0047	0,0404	0,0235	0,0129	0,0004
Medida 2	0,0083	0,3938	1,782	0,0373	0,0176	16,58	1,961	9,93	0,0028	0,1529	0,4720	0,0175	0,0046	0,0400	0,0227	0,0122	0,0003
Medida 3	0,0090	0,3911	1,767	0,0375	0,0190	16,52	1,954	9,98	0,0028	0,1555	0,4761	0,0177	0,0048	0,0409	0,0227	0,0122	0,0004
Medida 4	0,0074	0,3887	1,783	0,0361	0,0175	16,57	1,938	9,88	0,0028	0,1554	0,4794	0,0175	0,0047	0,0408	0,0224	0,0121	0,0003
Medida 5	0,0103	0,3963	1,791	0,0413	0,0245	16,51	1,954	10,16	0,0030	0,1541	0,4967	0,0185	0,0048	0,0413	0,0225	0,0133	0,0004
Média	0,0096	0,3951	1,775	0,0384	0,0201	16,54	1,963	9,98	0,0029	0,1540	0,4780	0,0177	0,0047	0,0407	0,0228	0,0125	0,0004

Desvio- Padrão	0,0022	0,0065	0,015	0,0021	0,0030	0,03	0,027	0,11	0,0002	0,0015	0,0116	0,0005	0,0001	0,0005	0,0004	0,0005	0,0001
CP 36	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	B
Medida 1	0,0174	0,4088	1,770	0,0415	0,0237	16,53	2,028	10,02	0,0029	0,1484	0,4775	0,0168	0,0047	0,0405	0,0208	0,0144	0,0005
Medida 2	0,0098	0,3965	1,799	0,0387	0,0203	16,57	1,983	10,08	0,0026	0,1513	0,4764	0,0171	0,0047	0,0404	0,0210	0,0137	0,0004
Medida 3	0,0087	0,3905	1,811	0,0379	0,0190	16,56	1,978	10,06	0,0023	0,1510	0,4831	0,0178	0,0047	0,0407	0,0208	0,0130	0,0003
Medida 4	0,0143	0,3976	1,777	0,0392	0,0254	16,50	2,007	9,95	0,0031	0,1555	0,4785	0,0179	0,0049	0,0411	0,0227	0,0128	0,0004
Medida 5	0,0127	0,4052	1,761	0,0366	0,0229	16,48	2,016	9,97	0,0029	0,1519	0,4635	0,0172	0,0047	0,0413	0,0231	0,0110	0,0002
Média	0,0126	0,3997	1,784	0,0388	0,0223	16,53	2,002	10,02	0,0028	0,1516	0,4758	0,0174	0,0047	0,0408	0,0217	0,0130	0,0004
Desvio- Padrão	0,0035	0,0073	0,021	0,0018	0,0026	0,04	0,021	0,06	0,0003	0,0025	0,0073	0,0005	0,0001	0,0004	0,0011	0,0013	0,0001

**APÊNDICE B – RESULTADOS – MEDIDA DO TAMANHO DE GRÃO
[ADIMENSIONAL]**

Corpo de Prova	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9
Medida 1	5,0	5,5	4,5	5,0	4,5	4,5	5,0	4,5	5,0
Medida 2	5,5	5,0	4,5	5,0	5,0	5,5	4,5	5,5	5,0
Medida 3	4,5	4,5	6,0	5,0	4,5	4,5	5,0	5,5	5,5
Medida 4	4,5	5,5	4,5	5,5	4,5	5,0	4,5	5,0	4,0
Medida 5	5,0	5,0	4,5	6,0	4,0	5,5	5,5	5,0	5,0
Média (μ)	4,9	5,1	4,8	5,3	4,5	5,0	4,9	5,1	4,9
Desvio-Padrão (σ)	0,4	0,4	0,7	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,5
Corpo de Prova	CP 10	CP 11	CP 12	CP 13	CP 14	CP 15	CP 16	CP 17	CP 18
Medida 1	4,5	4,5	4,5	5,0	4,5	5,5	5,0	5,0	5,5
Medida 2	4,5	5,0	5,0	4,5	6,0	5,0	5,5	5,0	5,0
Medida 3	5,5	4,5	5,0	4,5	5,5	4,5	5,0	5,5	5,5
Medida 4	5,0	5,0	4,5	5,0	5,5	4,5	5,5	5,0	5,5
Medida 5	4,5	4,5	4,5	5,5	5,5	4,5	5,0	5,5	5,0
Média (μ)	4,8	4,7	4,7	4,9	5,4	4,8	5,2	5,2	5,3
Desvio-Padrão (σ)	0,4	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3
Corpo de Prova	CP 19	CP 20	CP 21	CP 22	CP 23	CP 24	CP 25	CP 26	CP 27
Medida 1	4,5	5,0	4,5	4,5	4,5	5,5	4,5	5,0	5,0
Medida 2	5,0	4,5	4,5	4,5	4,5	4,0	4,0	5,5	4,5
Medida 3	4,5	4,5	4,5	4,5	5,0	4,5	4,5	4,5	5,0
Medida 4	5,5	4,5	5,0	4,5	5,0	4,5	4,0	5,5	4,5
Medida 5	4,5	5,0	5,5	5,0	4,5	4,5	5,5	4,5	5,0
Média (μ)	4,8	4,7	4,8	4,6	4,7	4,6	4,5	5,0	4,8
Desvio-Padrão (σ)	0,4	0,3	0,4	0,2	0,3	0,5	0,6	0,5	0,3
Corpo de Prova	CP 28	CP 29	CP 30	CP 31	CP 32	CP 33	CP 34	CP 35	CP 36
Medida 1	5,0	4,5	5,5	4,5	4,0	4,5	5,0	4,5	5,5
Medida 2	4,5	5,0	5,0	4,5	5,0	5,0	5,5	5,0	5,5
Medida 3	4,5	4,5	5,0	4,0	4,5	5,5	5,5	5,5	5,0
Medida 4	4,5	5,5	5,0	4,5	4,5	5,5	4,5	5,5	5,0
Medida 5	5,5	4,5	4,5	4,5	4,5	5,0	5,0	5,5	5,0
Média (μ)	4,8	4,8	5,0	4,4	4,5	5,1	5,1	5,2	5,2
Desvio-Padrão (σ)	0,4	0,4	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3

APÊNDICE C – RESULTADOS – ENSAIO DE DUREZA BRINELL [HB]

Corpo de Prova	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9
Medida 1	143	138	143	131	143	143	143	150	131
Medida 2	143	164	148	143	143	135	143	148	135
Medida 3	143	138	131	143	143	131	143	143	148
Medida 4	148	143	143	148	143	135	135	150	143
Medida 5	148	138	131	148	150	135	135	148	148
Média (μ)	145,0	144,2	139,2	142,6	144,4	135,8	139,8	147,8	141,0
Desvio-Padrão (σ)	2,7	11,3	7,8	6,9	3,1	4,4	4,4	2,9	7,7
Corpo de Prova	CP 10	CP 11	CP 12	CP 13	CP 14	CP 15	CP 16	CP 17	CP 18
Medida 1	143	150	143	156	143	148	143	156	143
Medida 2	143	156	135	148	143	148	143	148	143
Medida 3	143	156	143	143	143	148	143	143	148
Medida 4	143	148	143	148	143	131	135	148	156
Medida 5	143	156	148	148	143	135	135	148	143
Média (μ)	143,0	153,2	142,4	148,6	143,0	142,0	139,8	148,6	146,6
Desvio-Padrão (σ)	0,0	3,9	4,7	4,7	0,0	8,3	4,4	4,7	5,7
Corpo de Prova	CP 19	CP 20	CP 21	CP 22	CP 23	CP 24	CP 25	CP 26	CP 27
Medida 1	143	148	135	156	148	148	156	156	148
Medida 2	135	143	135	148	143	143	148	148	149
Medida 3	143	135	135	148	148	148	148	148	148
Medida 4	148	143	143	148	143	135	143	143	150
Medida 5	148	156	135	156	148	143	143	148	148
Média (μ)	143,4	145,0	136,6	151,2	146,0	143,4	147,6	148,6	148,6
Desvio-Padrão (σ)	5,3	7,7	3,6	4,4	2,7	5,3	5,3	4,7	0,9
Corpo de Prova	CP 28	CP 29	CP 30	CP 31	CP 32	CP 33	CP 34	CP 35	CP 36
Medida 1	156	170	156	148	147	158	143	156	143
Medida 2	148	156	148	148	148	148	148	148	143
Medida 3	143	143	148	147	149	143	148	148	143
Medida 4	148	135	143	148	148	156	150	143	143
Medida 5	143	135	143	149	146	131	156	148	148
Média (μ)	147,6	147,8	147,6	148,0	147,6	147,2	149,0	148,6	144,0
Desvio-Padrão (σ)	5,3	15,1	5,3	0,7	1,1	10,9	4,7	4,7	2,2

APÊNDICE D – RESULTADOS DE RUGOSIDADE R_A [μM]

Corpo de Prova	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9
Medida 1	0,05	0,08	0,08	0,10	0,26	0,12	0,14	0,17	0,25
Medida 2	0,05	0,07	0,11	0,10	0,45	0,14	0,15	0,18	0,25
Medida 3	0,05	0,08	0,14	0,07	0,16	0,14	0,14	0,18	0,26
Medida 4	0,06	0,08	0,09	0,06	0,63	0,20	0,14	0,15	0,25
Medida 5	0,06	0,09	0,08	0,05	0,17	0,14	0,13	0,15	0,25
Média (μ)	0,054	0,080	0,100	0,076	0,334	0,148	0,140	0,166	0,252
Desvio-Padrão (σ)	0,005	0,007	0,025	0,023	0,202	0,030	0,007	0,015	0,004
Corpo de Prova	CP 10	CP 11	CP 12	CP 13	CP 14	CP 15	CP 16	CP 17	CP 18
Medida 1	0,25	0,25	0,33	0,14	0,10	0,23	0,07	0,40	0,25
Medida 2	0,28	0,26	0,33	0,18	0,07	0,17	0,08	0,20	0,22
Medida 3	0,29	0,25	0,33	0,15	0,06	0,28	0,07	0,20	0,14
Medida 4	0,30	0,28	0,35	0,09	0,08	0,25	0,08	0,33	0,30
Medida 5	0,30	0,27	0,25	0,08	0,07	0,23	0,08	0,12	0,16
Média (μ)	0,284	0,262	0,318	0,128	0,076	0,232	0,076	0,250	0,214
Desvio-Padrão (σ)	0,021	0,013	0,039	0,042	0,015	0,040	0,005	0,113	0,065
Corpo de Prova	CP 19	CP 20	CP 21	CP 22	CP 23	CP 24	CP 25	CP 26	CP 27
Medida 1	0,16	0,63	0,29	0,25	0,32	0,56	0,09	0,10	0,14
Medida 2	0,27	0,54	0,32	0,24	0,30	0,48	0,12	0,13	0,10
Medida 3	0,19	0,45	0,27	0,27	0,28	0,50	0,11	0,10	0,08
Medida 4	0,16	0,52	0,23	0,23	0,35	0,25	0,11	0,09	0,08
Medida 5	0,25	0,52	0,28	0,23	0,28	0,31	0,14	0,09	0,13
Média (μ)	0,206	0,532	0,278	0,244	0,306	0,420	0,114	0,102	0,106
Desvio-Padrão (σ)	0,051	0,065	0,033	0,017	0,030	0,133	0,018	0,016	0,028
Corpo de Prova	CP 28	CP 29	CP 30	CP 31	CP 32	CP 33	CP 34	CP 35	CP 36
Medida 1	0,17	0,15	0,16	0,23	0,23	0,31	0,31	0,41	0,28
Medida 2	0,10	0,15	0,39	0,24	0,26	0,36	0,26	0,43	0,31
Medida 3	0,08	0,16	0,34	0,25	0,38	0,26	0,28	0,30	0,28
Medida 4	0,13	0,15	0,16	0,17	0,19	0,27	0,39	0,30	0,30
Medida 5	0,11	0,17	0,18	0,68	0,23	0,30	0,45	0,33	0,26
Média (μ)	0,118	0,156	0,246	0,314	0,258	0,300	0,338	0,354	0,286
Desvio-Padrão (σ)	0,034	0,009	0,110	0,207	0,073	0,039	0,080	0,062	0,019

APÊNDICE E – RESULTADOS DE RUGOSIDADE R_z [μM]

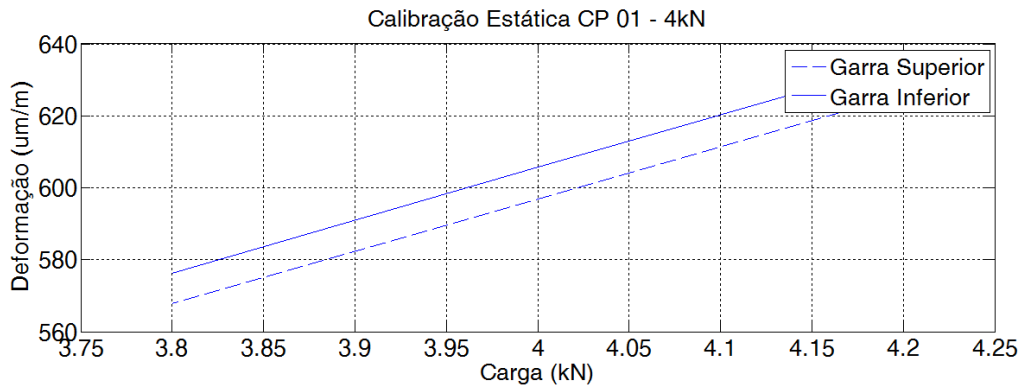
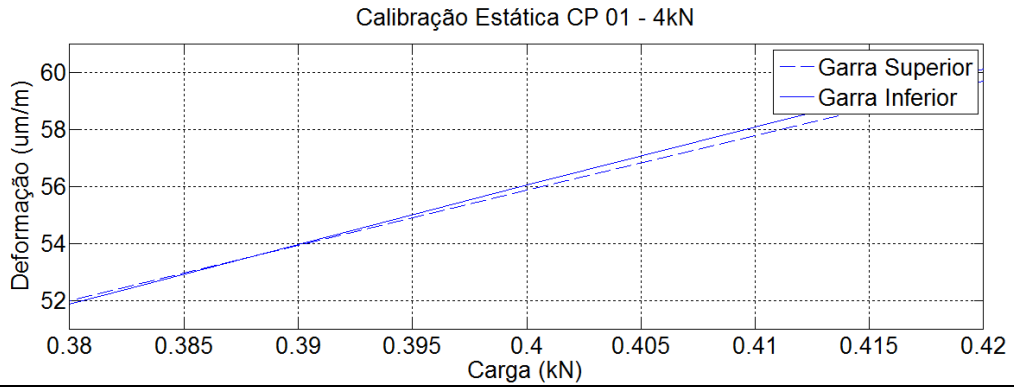
Corpo de Prova	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9
Medida 1	0,40	0,67	1,00	0,68	1,59	0,87	0,88	1,09	1,81
Medida 2	0,43	0,46	0,99	0,68	4,27	0,98	0,93	1,13	1,72
Medida 3	0,35	0,53	0,95	0,45	1,24	0,98	0,92	1,11	1,96
Medida 4	0,46	0,60	0,66	0,37	6,11	1,14	0,92	0,99	1,79
Medida 5	0,38	0,60	0,55	0,31	2,14	1,03	0,90	0,92	1,79
Média (μ)	0,404	0,572	0,830	0,498	3,070	1,000	0,910	1,048	1,814
Desvio-Padrão (σ)	0,043	0,080	0,210	0,173	2,067	0,098	0,020	0,090	0,088
Corpo de Prova	CP 10	CP 11	CP 12	CP 13	CP 14	CP 15	CP 16	CP 17	CP 18
Medida 1	1,89	1,85	2,34	1,00	0,53	1,20	0,48	2,07	1,68
Medida 2	2,09	1,77	2,26	0,99	0,39	1,01	0,75	1,16	1,38
Medida 3	2,15	1,78	2,13	0,95	0,58	1,34	0,44	1,16	1,02
Medida 4	2,08	1,94	2,30	0,66	0,46	1,23	0,58	1,57	1,88
Medida 5	2,05	1,91	1,74	0,55	0,53	1,18	0,59	0,92	0,97
Média (μ)	2,052	1,850	2,154	0,830	0,498	1,192	0,568	1,376	1,386
Desvio-Padrão (σ)	0,098	0,076	0,244	0,210	0,074	0,119	0,120	0,453	0,399
Corpo de Prova	CP 19	CP 20	CP 21	CP 22	CP 23	CP 24	CP 25	CP 26	CP 27
Medida 1	1,25	5,54	1,83	1,67	1,95	2,91	0,68	0,65	0,87
Medida 2	1,69	4,69	1,67	1,72	1,88	2,78	0,85	0,84	0,65
Medida 3	1,73	5,65	1,90	1,72	2,05	2,80	0,70	0,66	0,55
Medida 4	1,67	7,51	1,75	1,69	1,75	1,62	0,74	0,66	0,52
Medida 5	2,19	4,15	1,87	1,58	1,77	1,91	0,87	0,63	0,83
Média (μ)	1,706	5,508	1,804	1,676	1,880	2,404	0,768	0,688	0,684
Desvio-Padrão (σ)	0,333	1,279	0,094	0,058	0,125	0,594	0,087	0,086	0,160
Corpo de Prova	CP 28	CP 29	CP 30	CP 31	CP 32	CP 33	CP 34	CP 35	CP 36
Medida 1	0,87	1,11	1,21	1,59	1,33	1,81	1,88	2,59	2,25
Medida 2	0,63	1,14	2,71	1,52	1,48	2,45	2,12	2,65	2,22
Medida 3	0,56	1,14	3,62	2,69	2,08	1,79	2,11	1,94	2,28
Medida 4	0,76	1,09	1,23	1,18	1,38	1,86	4,18	1,94	2,13
Medida 5	0,67	1,40	1,29	7,20	1,53	1,89	3,06	2,22	1,81
Média (μ)	0,698	1,176	2,012	2,836	1,560	1,960	2,670	2,268	2,138
Desvio-Padrão (σ)	0,120	0,127	1,101	2,505	0,301	0,277	0,958	0,342	0,192

APÊNDICE F – RESULTADOS DE RUGOSIDADE R_Y [μM]

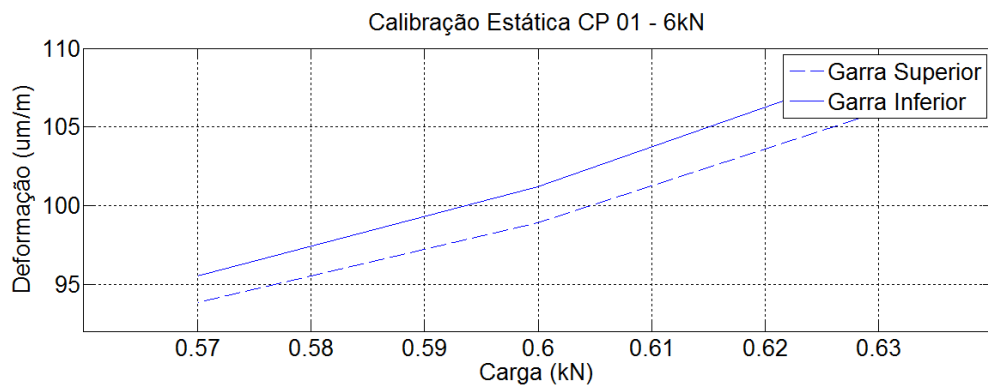
Corpo de Prova	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9
Medida 1	0,47	0,93	1,51	1,03	1,89	1,12	1,08	1,48	2,49
Medida 2	0,56	0,61	1,46	0,65	5,15	1,35	1,33	1,47	2,19
Medida 3	0,42	0,68	1,22	0,41	1,52	1,35	1,21	1,38	2,96
Medida 4	0,64	0,89	1,11	0,56	7,02	1,45	1,21	1,25	2,32
Medida 5	0,55	0,90	0,89	0,54	3,06	1,43	1,11	1,24	2,32
Média (μ)	0,528	0,802	1,238	0,638	3,728	1,340	1,188	1,364	2,456
Desvio-Padrão (σ)	0,085	0,146	0,255	0,235	2,322	0,131	0,099	0,115	0,301
Corpo de Prova	CP 10	CP 11	CP 12	CP 13	CP 14	CP 15	CP 16	CP 17	CP 18
Medida 1	2,49	2,62	3,03	1,51	1,74	1,86	0,65	2,50	2,24
Medida 2	2,87	2,32	2,89	1,46	0,73	1,41	1,18	1,47	1,88
Medida 3	2,93	2,35	2,79	1,22	0,53	1,84	0,63	1,45	1,41
Medida 4	2,67	2,55	3,00	1,11	0,81	1,61	0,81	1,88	2,45
Medida 5	2,86	2,70	2,14	0,89	0,75	1,75	0,85	1,25	1,24
Média (μ)	2,764	2,508	2,770	1,238	0,912	1,694	0,824	1,710	1,844
Desvio-Padrão (σ)	0,182	0,167	0,365	0,255	0,475	0,187	0,221	0,497	0,519
Corpo de Prova	CP 19	CP 20	CP 21	CP 22	CP 23	CP 24	CP 25	CP 26	CP 27
Medida 1	1,55	6,32	2,40	2,10	2,75	3,56	0,86	1,25	1,26
Medida 2	2,11	5,68	2,53	2,34	2,89	3,58	1,23	1,40	1,01
Medida 3	2,11	6,29	2,57	2,24	2,92	3,72	1,15	0,96	0,77
Medida 4	2,21	8,91	2,43	2,24	3,03	2,08	0,95	0,89	0,64
Medida 5	2,59	4,88	2,21	2,13	2,98	2,50	1,58	0,79	1,23
Média (μ)	2,114	6,416	2,428	2,210	2,914	3,088	1,154	1,058	0,982
Desvio-Padrão (σ)	0,372	1,512	0,140	0,096	0,106	0,746	0,86	1,25	1,26
Corpo de Prova	CP 28	CP 29	CP 30	CP 31	CP 32	CP 33	CP 34	CP 35	CP 36
Medida 1	1,27	1,39	1,60	1,79	1,66	2,41	2,40	3,65	3,17
Medida 2	1,00	1,41	6,56	1,77	2,01	3,33	2,89	3,50	3,01
Medida 3	0,88	1,39	5,28	3,46	2,66	2,49	3,37	2,76	3,32
Medida 4	1,27	1,34	1,59	1,50	1,73	2,56	6,38	2,76	2,79
Medida 5	1,01	1,88	1,67	8,05	2,05	2,71	4,11	3,22	2,40
Média (μ)	1,086	1,482	3,340	3,314	2,022	2,700	3,830	3,178	2,938
Desvio-Padrão (σ)	1,27	1,39	1,60	1,79	1,66	2,41	2,40	3,65	3,17

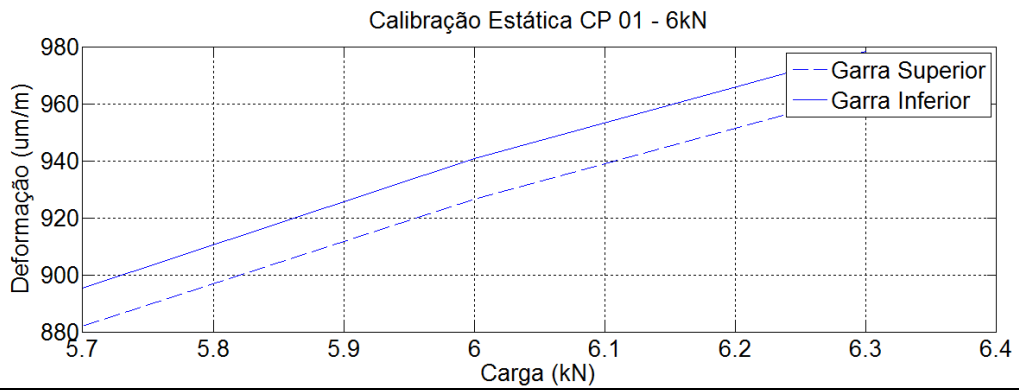
APÊNDICE G – RESULTADOS DEFORMAÇÃO – CALIBRAÇÃO ESTÁTICA

CP 01 - 4kN (Carga Mínima / Carga Máxima)

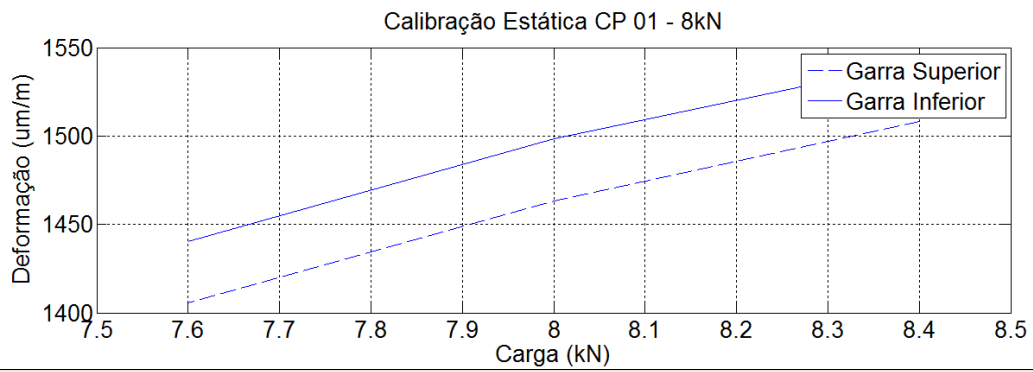
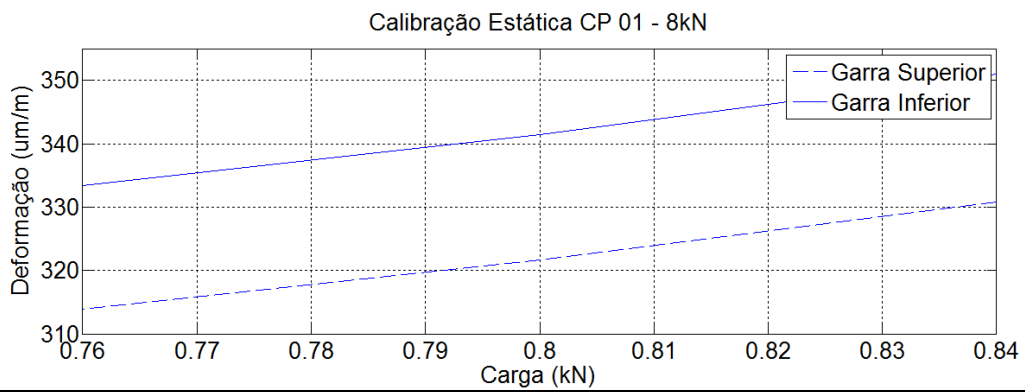


CP 01 - 6kN (Carga Mínima / Carga Máxima)

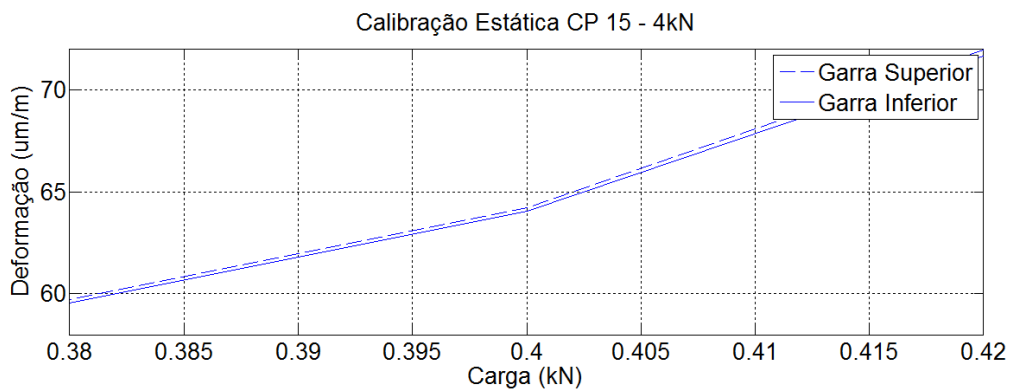


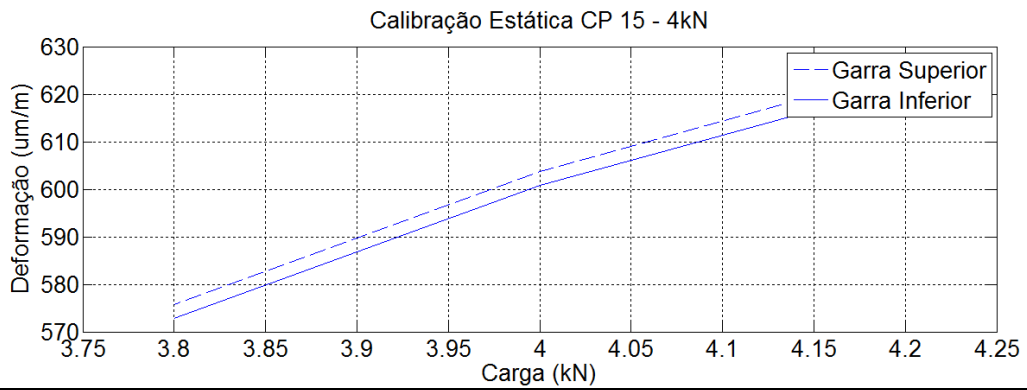


CP 01 - 8kN (Carga Mínima / Carga Máxima)

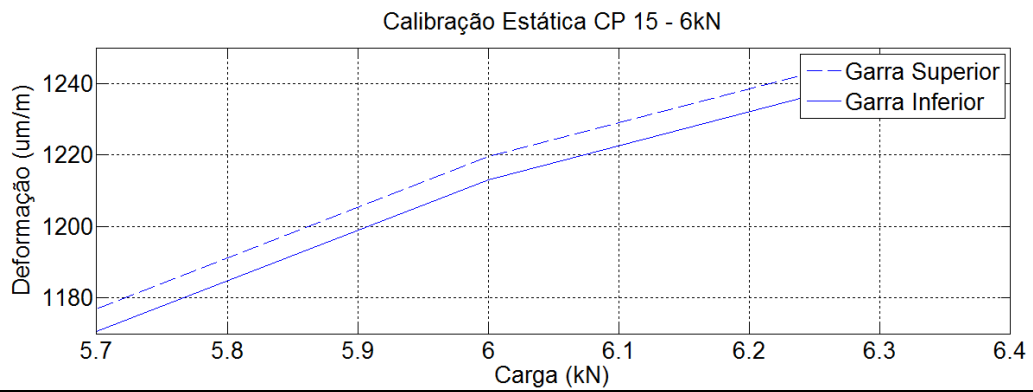
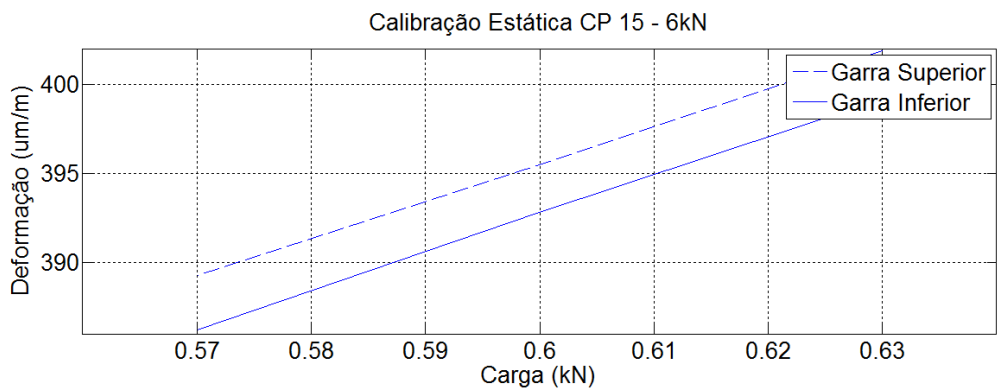


CP 15 - 4kN (Carga Mínima / Carga Máxima)

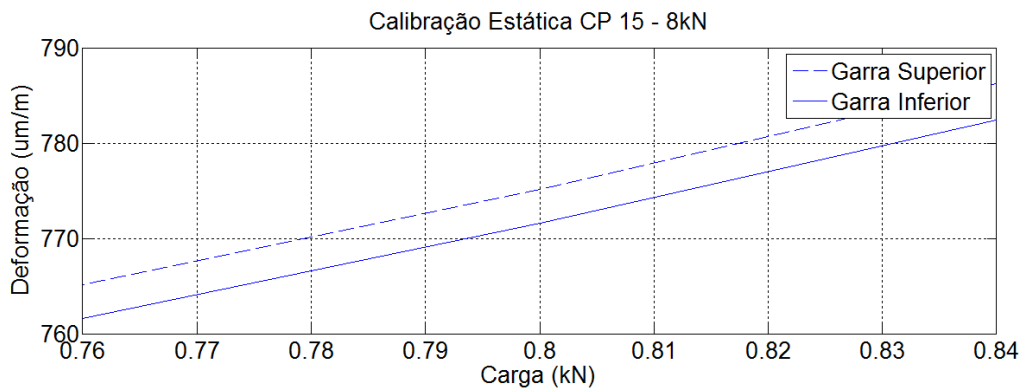


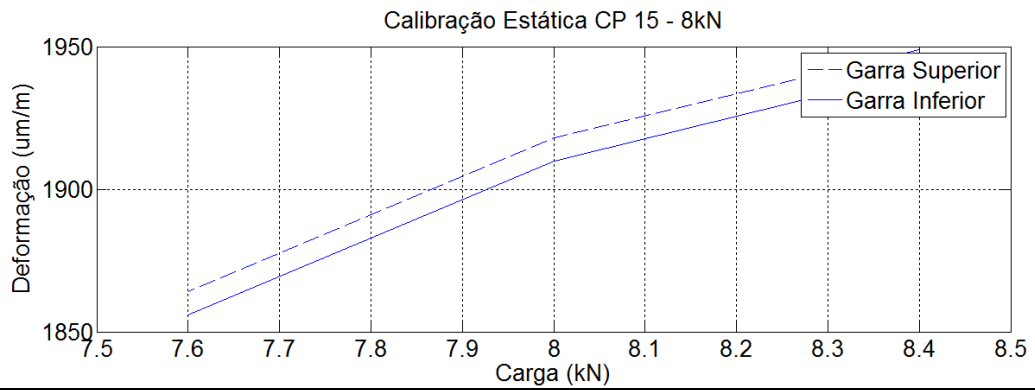


CP 15 - 6kN (Carga Mínima / Carga Máxima)

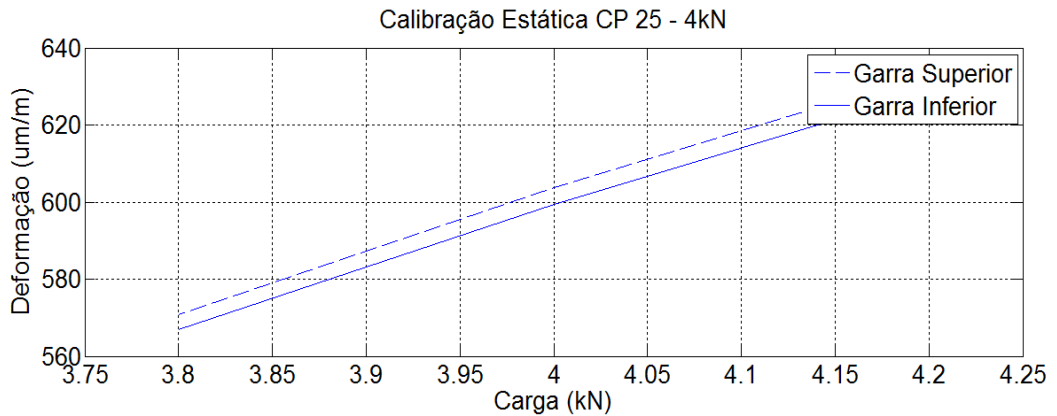
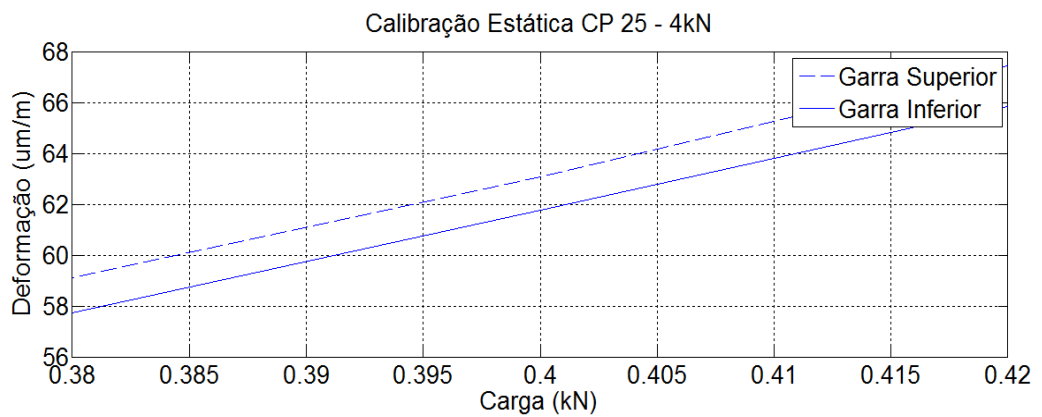


CP 15 - 8kN (Carga Mínima / Carga Máxima)

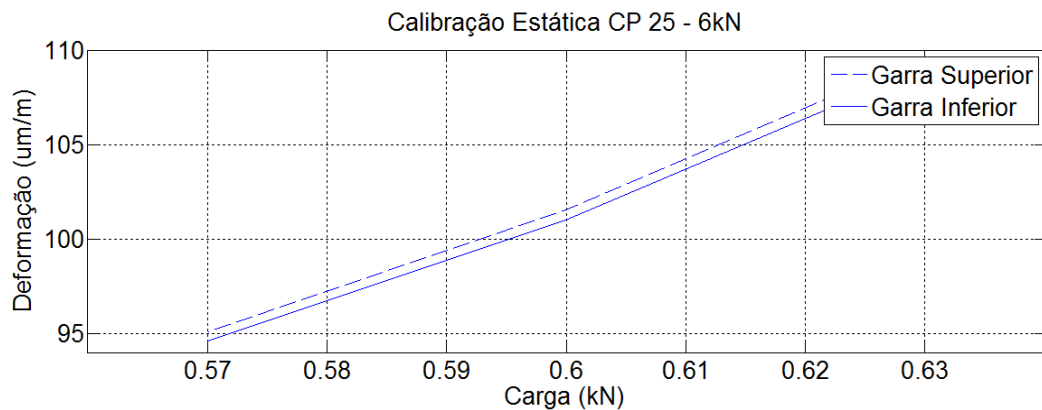


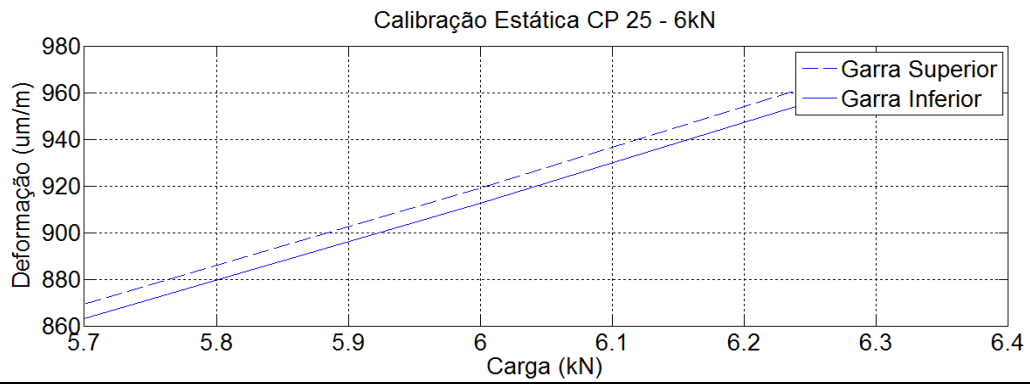


CP 25 - 4kN (Carga Mínima / Carga Máxima)



CP 25 - 6kN (Carga Mínima / Carga Máxima)





CP 25 - 8kN (Carga Mínima / Carga Máxima)

