

INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PIAUI



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

CAROL CHAVES MESQUITA E FERREIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DE FADIGA EM VERGALHÕES DE
8mm EM BARRAS ISOLADAS E TELAS SOLDADAS PARA APLICAÇÃO EM
CONCRETO ARMADO**

**TERESINA / PI
2017**

CAROL CHAVES MESQUITA E FERREIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DE FADIGA EM VERGALHÕES DE
8mm EM BARRAS ISOLADAS E TELAS SOLDADAS PARA APLICAÇÃO EM
CONCRETO ARMADO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Propriedades Mecânicas de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos

**TERESINA / PI
2017**

FICHA CATALOGRÁFICA

Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F383a Ferreira, Carol Chaves Mesquita e
Análise Experimental do Efeito de Fadiga em Vergalhões de 8mm em Barras
Isoladas e Telas Soldadas para Aplicação em Concreto Armado / Carol Chaves Mesquita
e Ferreira - 2017.
119 p. : il. color.

Trabalho de conclusão de curso (Mestrado) - Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, Mestrado em Engenharia de Materiais,
2017.

Orientador : Prof Dr. Hudson Chagas dos Santos.

1. fadiga. 2. CA-60. 3. vergalhões. 4. barras soldadas. I.Título.

CDD 620.1

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DE FADIGA EM VERGALHÕES EM BARRAS ISOLADAS E TELAS SOLDADAS PARA APLICAÇÃO EM CONCRETO ARMADO

ALUNO: CAROL CHAVES MESQUITA E FERREIRA

DATA: 10 de Julho de 2017

Este trabalho foi julgado adequado e apropriado para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí.

Assinatura no original

Prof. Drº. Hudson Chagas dos Santos
Coordenador PPG-EM/ IFPI- Campus Teresina Central

COMISSÃO EXAMINADORA

Assinatura no original

Prof. Drº. Hudson Chagas dos Santos
Instituto Federal do Piauí (IFPI)
Orientador

Assinatura no original

Profº. Drº. José Francisco dos Reis Sobrinho
Instituto Federal do Piauí (IFPI)
Avaliador Interno

Assinatura no original

Profª. Drº. Roberto Chust Carvalho
Universidade Federal de São Carlos (UFScar)
Avaliador Externo

Assinatura no original

Profª. Drª. Maria de Lourdes Teixeira Moreira
Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Avaliadora Externa

AGRADECIMENTOS

Agradeço a elaboração e finalização deste trabalho primeiramente a Deus, por sempre ser meu suporte e permitir que consiga atingir meus objetivos, com pessoas queridas ao meu lado, e com forças para superar cada obstáculo. Um muito obrigado ao meu orientador, Prof. Dr. Hudson Santos, que sempre me estimulou na pesquisa, como discente e como docente, proporcionando caminhos que facilitaram o desenvolvimento desta. Agradeço também ao Prof. Dr. Ayrton Brandim por permitir o acesso ao treinamento na Universidade Federal do Pará (UFPA), sendo este o pontapé inicial para a execução dos ensaios de fadiga aqui abordados. Igualmente elevo meus agradecimentos ao professor Dr. Eduardo Braga e ao Msc. Andrew Oliveira que executaram o referido treinamento na UFPA de forma solícita e prestativa.

Presto também grandes agradecimentos à Escola Politécnica Universidade de São Paulo (EPUSP), nas pessoas do Prof. Dr. Fernando Stucchi e do Prof. Dr. Pedro Wellington Teixeira, que permitiram uma melhor visão para o desenvolvimento dos mordentes desenvolvidos no Instituto Federal do Piauí (IFPI), no direcionamento da pesquisa e na obtenção de materiais de ensaios pelo Instituto Brasileiro de Telas Soldadas, através do Sr. João Batista Rodrigues. Iguais sentimentos de retribuição estimo ao Grupo FerroNorte, por meio dos senhores Jivago Monteiro e Edno Costa, que muito contribuíram com o fornecimento de materiais para o desenvolvimento da pesquisa.

Dedico e também agradeço este trabalho aos meus pais, Isabel e Afonso. E também, de forma especial, ao meu esposo Tarcysio Ferreira, que me acompanhou em cada viagem, jornada, busca de materiais, execução de ensaios e momentos de alegria e tensão, durante a minha pesquisa. Finalizo minha gratidão aos seguintes amigos: Prof. Ricardo Cardoso, do IFPI, que me acompanhou nos projetos e viabilizou a fabricação dos diversos mordentes aqui testados; aos alunos Iara e Júnior, do curso de Engenharia Mecânica do IFPI, que também auxiliaram na produção dos mordentes e na caracterização do material; ao colega de mestrado, Wendel Melo, que sempre me auxiliou no desenvolvimento dos ensaios da pesquisa; ao técnico do Laboratório de Materiais do IFPI, André; ao engenheiro Fagner, da Maloca, contato local do professor Pedro Wellington. Obrigado a todos que muito contribuíram para o sucesso desta pesquisa!

"A alegria pura é considerada, meus irmãos, quando se deparar com várias provações, sabendo que a provação da vossa fé produz perseverança. A perseverança deve terminar seu trabalho, para que sejais perfeitos e completos, não faltando nada."

(Tiago 1: 2-4)

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo comparativo do comportamento de vergalhões CA-60 utilizados em estruturas de concreto armado na construção civil. Os aços que são incorporados ao concreto, na Engenharia Estrutural, podem se apresentar de duas formas, durante sua montagem: em barras isoladas, fixados por meio de arame recozido; e em formato de tela, com seus encontros soldados para a sua consolidação. Determinados sistemas estruturais, como pontes e edifícios-garagem, são constantemente submetidos às ações de fadiga devido a presença de cargas móveis, e que podem levar seus elementos a romperem com solicitações bem abaixo do limite de resistência às ações estáticas, que geralmente norteiam o dimensionamento das estruturas ao Estado Limite Último (ELU) do material. Assim, é primordial a verificação da resistência do aço, utilizado em estruturas com essas características, para a garantia da segurança do usuário durante a vida útil destas obras. Esta pesquisa foi realizada com a análise experimental de corpos de prova de vergalhões CA-60, de forma isolada e com ligações soldadas, com a realização de ensaios de fadiga em barras não envolvidas por concreto de diâmetro 8 mm. Foi gerada a Curva de Wöhler com os resultados dos ensaios de 36 corpos de prova, após a realização de vários testes para adoção das variações adotadas, comparando-se o comportamento dos vergalhões de aço CA-60 com a variação do número de ciclos, gerando ao fim a análise de três níveis de flutuação de tensão, para cada um das duas formas de execução das barras. Estudos com este tipo de aço em relação a esta resistência às flutuações ainda são escassos. Destaca-se que o aço CA-60 é produzido por meio de tratamento a frio, com a compactação do grão de forma mecânica, resultando em uma maior resistência às solicitações e dureza, e uma menor resistência à agressividade do meio (que pode produzir o efeito de corrosão) e a ductilidade. Sendo assim, este trabalho irá contribuir para um aprimoramento das considerações normativas para o dimensionamento ao ELU de estruturas de concreto armado em aços CA-60.

Palavras-chave: fadiga, CA-60, vergalhões, barras soldadas

ABSTRACT

FERREIRA, C. C. M. e. **Experimental Analysis of the Fatigue Effect on Steel Rebar in Isolated Rebars and Steel Mesh, for Steels for application in reinforced concrete.** 2017. Dissertation (Master Degree) – Materials Engineering, Instituto Federal do Piauí, Teresina, 2017.

This research presents a comparative study of the behavior of CA-60 rebar used in reinforced concrete structures in civil construction. The steels that are incorporated in concrete in Structural Engineering can be presented in two formats, during their execution: in isolated rebars, fixed by means of wire with heat treatment; and in steel mesh, with their meetings welded for its consolidation. Certain structural systems, such as bridges and garage buildings, are constantly subjected to the fatigue actions generated by high loads, which can cause their elements to break with requests well below the limit of resistance to static actions, which are generally calculated to the last limit state of the material. Thus, it is essential to verify the strength of the steel, used in structures with these characteristics, to guarantee the safety of the user during the useful life of these constructions. This research was carried out with the experimental analysis of test specimens of CA-60 rebars, in an isolated form and with welded connections, with the realization of fatigue tests with bars in the air in rebars of diameter 8 mm. The Wöhler Curve was generated with the results of the tests of 36 test specimens, after several tests to the choice of the adopted variations, comparing the behavior of the steel bars CA-60 with the variation of the number of cycles, generating to the end the analysis of three levels of resistance fluctuations, for each one of two forms of execution of the bars. Studies with this type of steel in relation to this resistance to fluctuations are still scarce. It should be noted that CA-60 steel is produced by cold treatment, with mechanical compaction of the grain, resulting in a higher resistance to stress and hardness, and a lower resistance to aggression of the medium (which can generate corrosion) and ductility. Thus, this work will contribute to an improvement of the normative considerations for the last limit state design of reinforced concrete structures in CA-60 steels.

Keywords: fatigue, CA-60, steel rebar, steel mesh

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama S-N ou Curva de Wöhler (Resistência à fadiga versus vida esperada).....	22
Figura 2 – Tensões alternadas variantes no tempo.....	23
Figura 3 – Demonstração das regiões de origem e ruptura final em um metal	25
Figura 4 – Diferentes condições de amplitude	27
Figura 5 – Curva S-N segundo a NBR 6118	28
Figura 6 – Superfícies de fraturas para diversas condições de carregamentos....	29
Figura 7 – Processo de produção dos aços	31
Figura 8 – Esquema de laminação a quente	32
Figura 9 – Processo de trefilação.....	33
Figura 10 – Demonstração da penetração do durômetro	38
Figura 11 – Propriedades mecânicas através do diagrama tensão-deformação ..	40
Figura 12 – Diagrama tensão-deformação para aço CA-60	41
Figura 13 – Ilustração da tenacidade nos diagramas tensão-deformação.....	42
Figura 14 – Ilustração da resiliência nos diagramas tensão-deformação	42
Figura 15 – Diagrama tensão-deformação comparativo entre os aços CA-25, CA-50 e CA-60.....	43
Figura 16 – Determinação do limite Johnson	44
Figura 17 – Limites de um material	45
Figura 18 – Limites de um material	45
Figura 19 – Esquema das variações de tensão.....	47
Figura 20 – Formato da Curva de Wöhler esperado por BUELTA (2001).....	49
Figura 21 – Formato da Curva de Wöhler encontrado por BUELTA (2001).....	50
Figura 22 – Curvas de Wöhler para barras isoladas – CA-50.....	52
Figura 23 – Curvas de Wöhler para telas soldadas – CA-50	53
Figura 24 – Curvas de Wöhler para barras isoladas e telas soldadas – CA-50	53
Figura 25 – Curvas de Wöhler comparativa entre barras isoladas e NBR 6118 – CA-50.....	54
Figura 26 – Curvas de Wöhler comparativa entre telas soldadas e NBR 6118 – CA-50.....	54

Figura 27 – (a) Detalhe da garra da SHIMADZU com dois diâmetros internos para acoplamento de corpo de prova; (b) Garra acoplada na máquina com o corpo de prova padrão da máquina encaixado na mesma.....	57
Figura 28 – Detalhe das garras da SHIMADZU (medidas em centímetros).....	58
Figura 29 – Detalhe do primeiro mordente projetado	59
Figura 30 – Corte da peça em altura aproximada dos mordentes projetados.....	60
Figura 31 – (a) Fabricação do mordente no torno; (b) Aferição das dimensões atingidas no torno	60
Figura 32 – (a) Mordente 01 acoplado na garra; (b) Deslizamento da barra na realização do ensaio (mordente 01)	61
Figura 33 – Segundo mordente projetado	62
Figura 34 – Matriz do mordente 02 em processo de adaptação pelo torno	62
Figura 35 – (a) Semi-cana de alumínio com ranhuras internas ; (b) – Cunha interna ao mordente, o alumínio e o vergalhão	63
Figura 36 – Mordentes tipo 02 realizando a fixação do vergalhão na máquina	64
Figura 37 – Esquema do terceiro mordente projetado.....	65
Figura 38 – Vista do mordente fabricado (Fixador cônico e cunha com semi-canais de alumínio)	65
Figura 39 – Ruptura da barra fora do mordente	66
Figura 40 – Vista das nervuras dos aços CA-60 (Aço da esquerda: Fabricante B; aço da direita: Fabricante A)	67
Figura 41 – Balança de precisão.....	68
Figura 42 – Durômetro ‘Newage’.....	69
Figura 43 – Espectômetro de Raio-X	71
Figura 44 – Processo de embutimento da peça: (a) materiais utilizados; (b) peça embutida	72
Figura 45 – Amostra no Microscópio Óptico.....	73
Figura 46 – Microscópio Eletrônico de Varredura.....	73
Figura 47 – Máquina de ensaio de tração	74
Figura 48 – Máquina de ensaio de tração	75
Figura 49 – Servo-pulser - IFPI	76
Figura 50 – Esquema Geral.	77
Figura 51– Códigos descritivos da máquina.....	78
Figura 52– Amplitude versus frequência QF-10B (Máquina do IFPI).....	79

Figura 53 – (a) Ensaio de dureza realizados no Fabricante A; (b) – Ensaio de dureza realizados no Fabricante B	81
Figura 54 – (a) Seção Transversal (10x); (b) – Seção Transversal (40x)	83
Figura 55 – (a) Seção Longitudinal (10x); (b) – Seção Longitudinal (40x)	84
Figura 56 – (a) Solda (10x); (b) – Solda (40x)	84
Figura 57 – Região da Solda (União entre as duas barras) – MEV – (x 700)	85
Figura 58 – Seção Longitudinal – MEV – (x 1000)	86
Figura 59 – Seção Transversal – MEV – (x 1000)	86
Figura 60 – Medidor analógico de alongamento.....	87
Figura 61 – Disparidades na medição analógica de tração – Fabricante A – Três amostras	88
Figura 62 – Disparidades na medição analógica de tração – Fabricante B – Três amostras	88
Figura 63 – Amostra 1 – Ensaio de Tração – Fabricante A (Barra)	89
Figura 64 – Amostra 2 – Ensaio de Tração – Fabricante A (Barra)	90
Figura 65 – Amostra 3 – Ensaio de Tração – Fabricante A (Barra)	90
Figura 66 – Amostra 1 – Ensaio de Tração – Fabricante B (Barra)	91
Figura 67 – Amostra 2 – Ensaio de Tração – Fabricante B (Barra)	92
Figura 68 – Amostra 3 – Ensaio de Tração – Fabricante B (Barra)	92
Figura 69 – Estricção que gerou a ruptura – Ensaio de Tração.....	93
Figura 70 – Amostra 1 – Ensaio de Tração – Fabricante A (Tela)	95
Figura 71 – Amostra 2 – Ensaio de Tração – Fabricante A (Tela)	96
Figura 72 – Amostra 3 – Ensaio de Tração – Fabricante A (Tela)	96
Figura 73 – Amostra 1 – Ensaio de Tração – Fabricante B (Tela)	97
Figura 74 – Amostra 2 – Ensaio de Tração – Fabricante B (Tela)	98
Figura 75 – Amostra 3 – Ensaio de Tração – Fabricante B (Tela)	98
Figura 76 – (a) Estricção que gerou a ruptura – Tela Fabricante A; (b) – Estricção que gerou a ruptura – Tela Fabricante B.....	99
Figura 77 – Gráfico da máquina de fadiga	102
Figura 78 – Curva de Wöhler CA-60 (Barras) – Fabricante B.....	111
Figura 79 – Curva de Wöhler CA-60 (Barras) – Fabricante B – Comparação com a NBR 6118 (2014) Curva do aço CA-50	112
Figura 80 – Curva de Wöhler CA-60 (Telas) – Fabricante B	112

Figura 81 – Curva de Wöhler CA-60 (Telas) – Fabricante B – Comparação com a	
NBR 6118 (2014) Curva do aço CA-50	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas	34
Tabela 2 – Elementos mais comuns dos aços comercializáveis para estruturas de concreto armado	39
Tabela 3 – Variação da tensão de fadiga para aços CA-50 dentro do concreto	47
Tabela 4 – Valores de K.....	48
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de fadiga de BUELTA (2001)	50
Tabela 6 – Resultados para as barras isoladas CA-50 da pesquisa de Dantas (2010)	51
Tabela 7 – Resultados para as telas soldadas CA-50 da pesquisa de Dantas (2010)	52
Tabela 8 – Diferentes escalas de dureza	70
Tabela 9 – Valores dos pesos e massas médias das amostras	81
Tabela 10 – Média da dureza Rockwell (HRA) – Fabricante A.....	82
Tabela 11 – Média da dureza Rockwell (HRA) – Fabricante B.....	82
Tabela 12 – Análise de FRX– Fabricante A	82
Tabela 13 – Análise de FRX– Fabricante B	83
Tabela 14 – Tensões de escoamento – Ensaio de Tração - Fabricante A (Barras) .	91
Tabela 15 – Tensões de escoamento – Ensaio de Tração - Fabricante B.....	93
Tabela 16 – Limite de resistência – Ensaio de Tração - Fabricante A (Barra)	94
Tabela 17 – Limite de resistência – Ensaio de Tração - Fabricante B (Barra)	94
Tabela 18 – Limite de ruptura – Ensaio de Tração - Fabricante A (Barra).....	94
Tabela 19 – Limite de ruptura – Ensaio de Tração - Fabricante B (Barra).....	94
Tabela 20 – Tensões de escoamento – Ensaio de Tração - Fabricante A (Telas)...	95
Tabela 21 – Tensões de escoamento – Ensaio de Tração - Fabricante B (Telas)...	97
Tabela 22 – Limite de resistência – Ensaio de Tração - Fabricante A (Tela).....	99
Tabela 23 – Limite de resistência – Ensaio de Tração - Fabricante B (Tela).....	100
Tabela 24 – Limite de ruptura – Ensaio de Tração - Fabricante A (Tela)	100
Tabela 25 – Limite de ruptura – Ensaio de Tração - Fabricante B (Tela)	100
Tabela 26 – Ensaio de fadiga – Testes de variações - Fabricante B	101
Tabela 27 – Variações adotadas e suas respectivas frequências	103
Tabela 28 – Ensaio de fadiga das Barras – Testes de variações - Fabricante B ...	104
Tabela 29 – Ensaio de fadiga das Telas – Testes de variações - Fabricante B.....	104
Tabela 30 – Valores das massas médias das amostras.....	105

Tabela 31 – Resultados para a variação de 320,81 MPa (Barras)	108
Tabela 32 – Resultados para a variação de 180,16 MPa (Barras)	109
Tabela 33 – Resultados para a variação de 320,81 MPa (Telas)	109
Tabela 34 – Resultados para a variação de 180,16 MPa (Telas)	109
Tabela 35 – Resultados para a variação de 148 MPa (Telas)	110
Tabela 36 – Valores de N_k para os 3 grupos de barras e os 3 de telas	110
Tabela 37 – Valores de $K.10^{27}$ (Barras e Telas)	111

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Composição Química Nominal ABNT	34
Quadro 2 – Características dos aços CA-60	36
Quadro 3 – Durezas Brinell	37
Quadro 4 – Velocidade de tensionamento	41
Quadro 5 – Características dos ensaios de BUELTA (2001)	49
Quadro 6 – Escalas de dureza Rockwell	70
Quadro 7 – Conversão de Escalas de dureza Rockwell	106

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	18
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo Geral.....	20
1.2.2 Objetivos Específicos	20
1.3 Estruturação do Trabalho	21
2 A INFLUÊNCIA DA FADIGA EM VERGALHÕES DE AÇO CA-60	22
2.1 Histórico	22
2.2 Falhas por Fadiga.....	24
2.3 O aço CA-60.....	30
2.4 Ensaios a Serem Realizados com o Vergalhão CA-60	36
2.4.1 Verificação da Massa Nominal	36
2.4.2 Ensaio de Dureza do Aço	37
2.4.3 Ensaio de Fluorescência de Raios-X (FR-X)	39
2.4.4 Ensaio de Tração	39
2.4.5 Caracterização do Metal	46
2.4.6 Ensaio de Fadiga.....	46
3 VIABILIZAÇÃO DA ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS ENSAIOS DE FADIGA ..	56
3.1 Primeiro Tipo (Mordente 01)	59
3.2 Segundo Tipo (Mordente 02)	61
3.3 Terceiro Tipo (Mordente 03)	64
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL DOS ENSAIOS.....	68
4.1 Verificação da Massa Nominal	68
4.2 Ensaio de Dureza	69
4.3 Ensaio de Fluorescência de Raios-X	71
4.4 Análise Microestrutural do Aço	72
4.5 Ensaios de Tração dos Vergalhões	74
4.6 Ensaios de Fadiga Dos Vergalhões.....	75
5 RESULTADOS ENCONTRADOS	81
5.1 Verificação da Massa Nominal	81
5.2 Ensaios de Dureza	81
5.3 Ensaios de Fluorescência de Raios-X	82

5.4	Análise Microestrutural	83
5.5	Ensaio Estático de Resistência à Tração	87
5.5.1	Ensaio Estático para Barras	89
5.5.2	Ensaio Estático para Telas	95
5.6	Ensaio de Fadiga DOS Vergalhões	100
6	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	105
6.1	Verificação da Massa Nominal	105
6.2	Ensaio de Dureza	105
6.3	Ensaio de Fluorescência de Raios-X	106
6.4	Ensaio Estático de Resistência à Tração	107
6.5	Ensaio de Fadiga DOS Vergalhões	108
7	CONCLUSÕES	114
	REFERÊNCIAS	116

1 INTRODUÇÃO

A análise da eficiência do comportamento das estruturas de concreto armado vem constantemente sendo estudada e adaptada através das normatizações brasileiras e internacionais com o objetivo de se projetar elementos cada vez mais eficientes e com o desempenho mais próximo do real. Estudos experimentais com os materiais vêm contribuindo com um conhecimento cada vez maior dos materiais envolvidos para a melhoria do dimensionamento estrutural. A modernização dos materiais utilizados na indústria da construção civil, juntamente com a melhoria das técnicas construtivas, permitem a execução de grandes obras em todo o mundo.

Além da evolução dos materiais e das técnicas de construção, os engenheiros que dimensionam estruturas se utilizam do auxílio de programas computacionais cada vez mais precisos e sofisticados, que são capazes de reproduzir o comportamento dos elementos tanto em relação à resistência, e seu estado limite último, como em relação às características como deformações e fissuras, que são características do estado limite de serviço.

Elementos estruturais, dependendo de seu posicionamento no sistema, devem absorver os mais diversos esforços que surgem de acordo com as tipologias de cargas aplicadas. O efeito de fadiga representa o resultado de uma dessas tipologias, já que surge devido à presença de cargas móveis sobre um elemento, afetando o comportamento estrutural. A fadiga apresenta uma maior relação com a vida útil de uma estrutura, já que a variação da aplicação de cargas pode, ao longo do tempo, influenciar em uma redução de resistência a este esforço, gerando a formação de fissuras que quando propagadas podem levar a estrutura ao colapso.

Lloyd, Lott e Kerler (2007) definem fadiga como:

"Fadiga é um processo de mudança estrutural progressiva permanente ocorrendo em um material que é submetido a condições que produzem tensões flutuantes no tempo; as mudanças estruturais podem culminar em fissuras ou fraturas completas após um número suficiente de flutuações"

Sob uma carga repetida, a resistência de uma amostra é reduzida e a resistência à ruptura pode ser inferior à capacidade estática. Se um grupo de amostras é submetido a esforços de flexão com cargas repetidas, a redução de resistência é proporcional ao logaritmo dos ciclos até a falha (LLOYD, LOTT e KERLER, 2007).

Dantas (2010) destaca que as pesquisas relacionadas com o efeito de fadiga têm ganhado maior importância, tanto no cenário nacional, quanto no internacional. A França, por exemplo, só passou a indicar a verificação de resistência à fadiga através do Eurocode 2, no ano de 2005, "Design of Concrete Structures", passando a ser uma exigência obrigatória apenas no ano de 2010, em uma atualização mais recente do Eurocode. No Brasil a consideração deste estado limite começou a ser abordada no ano de 1967, na EB3 - "Barras e fios destinados a armaduras de concreto armado", até se chegar às últimas adaptações na NBR 6118 (2014) - "Projeto de Estruturas de Concreto".

A NBR 6118 (2014) traz referências direcionadas ao aço CA-50, que é muito utilizado nas estruturas de concreto armado devido à sua comercialização em bitolas de diâmetros maiores. O aço CA-60 não possui uma abordagem própria normativa que caracterize seu comportamento em relação a este efeito de fadiga, aqui estudado.

A fadiga é um enfraquecimento da estrutura, que após a aplicação de cargas variáveis ao longo do tempo acaba por não resistir às solicitações atuantes. Para um breve histórico podem ser destacados alguns nomes de pesquisadores que se dedicaram à análise deste tipo de comportamento e ruptura. W. A. J. Albert, em 1829, foi o primeiro pesquisador a publicar sobre esforços cíclicos em materiais metálicos. Já J. V. Poncelet, no ano de 1839, introduz pela primeira vez o termo 'fadiga' a caracterização desse estado limite (MENEGETTI, 2007).

Wöhler, por volta de 1850 cria o primeiro sistema de investigação por meio de uma análise experimental de flexão por rotação através da Curva S-N (que relaciona a resistência e o número de ciclos para a variação das cargas atuantes). A pesquisa de Wöhler foi baseada na análise de eixos ferroviários que fraturavam após vários quilômetros em serviço. Ele descreveu que a ruptura por fadiga ocorria em situações de baixa tensão nominal em elementos com variações cíclicas de carregamentos. A Curva de Wöhler ainda hoje é a principal base para a análise do fenômeno cíclico de cargas (MENEGETTI, 2007).

Meneghetti (2007) ainda destaca que a deterioração progressiva de uma estrutura, que pode chegar a ser irreversível, acontece após a aplicação de um pequeno número de ciclos de atuação, com a aplicação de altos níveis de tensão. Ainda há casos em que o nível de tensão não é elevado, mas a ruptura pode ocorrer a uma ciclagem maior de repetições. A primeira encontra-se relacionada a

construções sujeitas a sismos, por exemplo; já o segundo, a estrutura com fluxo de veículos.

A geração de Curvas S-N com um grau de confiabilidade alto deriva de numerosos testes de fadiga, devido à grande dispersão dos resultados que normalmente são encontrados. Observa-se, assim, a dificuldade presente na realização de análises experimentais relacionadas com este fenômeno.

A norma do Instituto de Concreto Americano (ACI), ACI 215 (1997) afirma que vergalhões submetidos à fadiga apresentam diferentes comportamentos de acordo com diversas características, como: dobras, diâmetro, emendas e tensões. O aumento do diâmetro acaba por reduzir a resistência à fadiga do aço, devido ao efeito da tensão em relação à área atuante, e a probabilidade do aumento de defeitos nas peças (diferença observada com maior intensidade na realização de ensaios axiais).

O efeito de ruptura por fadiga é um Estado Limite Último (ELU) que depende da flutuação das cargas do uso em serviço de uma estrutura de concreto armado. Em relação aos aços, normalmente ele ocorre em resistências inferiores ao limite de escoamento dos mesmos. Assim, se uma estrutura está submetida à atuação de cargas móveis, ela pode apresentar ruptura caso tenha sido verificada e dimensionada levando-se em consideração apenas as cargas estáticas. Caixeta (2010) descreve que o projeto que possua elementos que estão sujeitos a esta flutuação exige um dimensionamento específico que inclua as possíveis variações de solicitações até a verificação da segurança dos materiais aço e concreto.

Fehlmann e Vogel (2009) destacam que a cada ano há um aumento considerável no tráfego, na frequência e peso dos veículos alertando para a aferição do comportamento de fadiga em obras que recebem esse tipo de carregamento.

Observa-se que estudos experimentais relacionados com o tema são válidos para um melhor conhecimento dos materiais submetidos a este fenômeno que possui incidência significativa em flutuações de tensões, tanto em máquinas como em estruturas.

1.1 JUSTIFICATIVA

As estruturas de concreto armado são compostas de concreto e aço. O concreto é um material que possui grande resistência à compressão, apresentando um ótimo desempenho quando há a atuação deste tipo de esforço. O aço é adicionado

a esta tipologia de material construtivo exatamente para contribuir com a melhoria à resistência à tração. A já citada NBR 6118 (2014) é a norma brasileira que descreve os processos de dimensionamento e verificação dos elementos em concreto armado. Ela traz, em relação à fadiga, critérios para a avaliação de danos gerados na estrutura por ações cíclicas nas armaduras, tanto de flexão quanto de cisalhamento, bem como a fadiga do concreto. A NBR 6118 (2014) se baseia em um limite de 2.000.000 ciclos e para a verificação da fadiga os esforços solicitantes podem ser calculados para regime elástico. Ela traz na sua Tabela 23.2, que virá apresentada no Capítulo 2 deste trabalho, os parâmetros para a curva S-N para os aços dentro do concreto em relação ao aço CA-50. O aço CA-50, possui uma resistência ao escoamento para cargas estáticas de 500 MPa, segundo a NBR 7480(2007) - "Aço destinado a armaduras de concreto armado", e é fabricado a altas temperaturas.

O presente trabalho realiza análises experimentais em aço CA-60, para que se possa obter resultados comparativos em relação às indicações normativas relacionadas com o aço CA-50, dentre outras verificações. Em um primeiro momento sabe-se que a resistência ao escoamento normativa dos aços CA-60 é de 600 MPa, maior que a dos aços CA-50. Porém, o aço que foi estudado possui procedimentos de fabricação diferentes, com sua produção a frio (após a obtenção do tarugo), o que pode acarretar em diferentes níveis de resistência às cargas variáveis e uma menor ductilidade.

No Brasil, poucos estudos foram realizados com a análise de barras ao ar em ensaios axiais de vergalhões para concreto armado. Pesquisadores da USP como Buelta (2001), Dantas (2010), Caixeta (2010), Cavalcanti (2010) e Stucchi *et. al* (2011) realizaram análises experimentais com o aço CA-50 em bitolas de 10 mm e 12.5 mm de diâmetro, e com parâmetros já descritos em normas internacionais. Já o aço CA-60 não apresenta referências normativas nacionais ou internacionais que direcionem a escolha das flutuações adequadas de acordo com as ciclagens a serem ensaiadas. Assim, esta aferição foi realizada através de vários testes de ruptura à fadiga.

A escolha da bitola de 8 mm para o CA-60 aqui ensaiado permite uma comparação mais direta com os estudos nacionais já realizados devido à proporção área e resistência entre os vergalhões.

Além disso, serão comparados os resultados da análise entre vergalhões isolados e barras soldadas em formato de tela. Executivamente as lajes de concreto armado recebem a montagem de suas armações internas em relação aos seus dois

vãos: para a concretagem a fixação dessas barras pode ser realizada através de arames recozidos, o que caracteriza as barras como isoladas; ou essa fixação pode ser realizada por meio de soldas a cada cruzamento de vergalhões, com telas pré-fabricadas com solda por eletrofusão. Houve, ainda, a viabilidade da verificação da influência da presença da solda na ligação entre vergalhões, em relação à resistência final correspondente às ações cíclicas do material.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em estudar o comportamento mecânico de barras isoladas e telas soldadas de aço de denominação comercial CA-60, com diâmetro de 8 mm, um aço de uso bastante frequente na indústria da construção civil, sobretudo em lajes de concreto armado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Verificar a resistência à tração através de carga axial estática dos corpos de prova em barras isoladas e em telas de aço CA-60 de diâmetro 8mm, com a definição das tensões de escoamento, resistência e ruptura;
- Determinar a resistência à fadiga através de ensaios cíclicos de tração para as duas tipologias de amostras propostas, considerando três níveis de flutuação para a previsão das variações de tensão atuantes, de acordo com os seguintes números de ciclos iniciais: 10^5 , 1×10^6 e 2×10^6 ;
- Comparar os resultados das Curvas de Wöhler das barras isoladas e telas soldadas, e calcular o coeficiente 'K' para o aço CA-60, aqui estudado, que define o desenho das curvas geradas;
- Realizar a caracterização metalográfica da estrutura do material para a análise da microestrutura dos vergalhões estudados através de microscopia óptica e eletrônica de varredura.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho será dividido nos seguintes capítulos, de forma a sintetizar a estrutura da pesquisa e descrever os pontos que foram trabalhados:

No Capítulo 1 é realizada uma introdução sobre as características gerais que guiaram a elaboração do trabalho e um breve histórico sobre o estado limite da fadiga. Além disso são apresentados os objetivos e a justificativa para a motivação do tema.

No Capítulo 2 são apresentadas as referências bibliográficas e normativas a respeito da fadiga no aço utilizado na execução de estruturas de concreto armado. São descritas as diretrizes para a consideração e dimensionamento com base nos efeitos da fadiga, e dos outros ensaios de caracterização realizados.

O Capítulo 3 aborda o desenvolvimento e produção dos mordentes necessários para a viabilização da execução dos ensaios de resistência à fadiga aqui realizados, destacando as dificuldades encontradas em cada tipologia desenvolvida, e as justificativas para a adoção do mordente utilizado.

Já o Capítulo 4 aborda a metodologia utilizada para a realização dos ensaios, com o destaque para o planejamento, uso de corpos de prova e execução dos ensaios para a caracterização das amostras e a definição das resistências estáticas e dinâmicas. No caso dos ensaios dinâmicos, a metodologia utilizada foi experimental que apresenta a base para os parâmetros utilizados para viabilizar a geração das Curvas de Wöhler do aço em questão. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia de Materiais do IFPI.

O Capítulo 5 abrange as descrições dos resultados obtidos em cada ensaio realizado e abordado na metodologia.

O Capítulo 6 traz as análises comparativas entre as barras isoladas e as telas soldadas, de acordo com todos os resultados obtidos pelas análises experimentais.

Por fim, o Capítulo 7 traz os comentários a respeito dos resultados obtidos, com as conclusões em relação às comparações realizadas. Há também sugestões de temas para trabalhos futuros, relacionadas com um aprofundamento do tema em questão.

Após a estrutura de capítulos descrita há a bibliografia pesquisada.

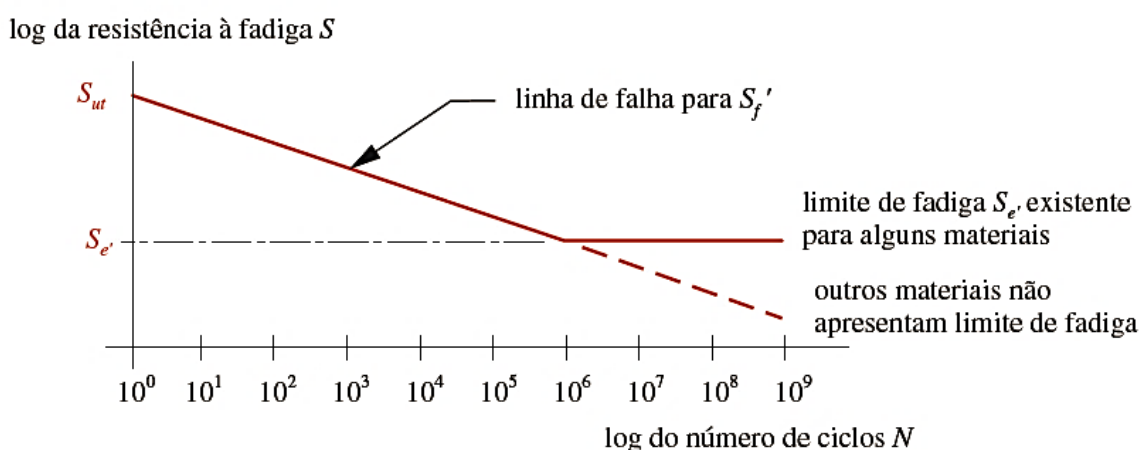
2 A INFLUÊNCIA DA FADIGA EM VERGALHÕES DE AÇO CA-60

2.1 HISTÓRICO

A observação do fenômeno de fadiga ocorreu primeiramente em torno de 1800, quando os eixos de um vagão de ferrovia falham após um tempo em serviço, com fraturas frágeis e abruptas. Com base nestes fatos ocorridos, em 1843, Rankine publicou um estudo sobre o tema afirmando que essas rupturas ocorriam devido à 'cristalização' do material devido às tensões cíclicas. Na época os eixos foram projetados utilizando-se o conhecimento que se tinha, relacionado com o dimensionamento e a resistência à ruptura para as cargas estáticas atuantes. Wöhler passou então, a realizar testes em laboratório dos eixos até a ocorrência do que ele chamava de 'falha por fadiga', através de um carregamento alternado, analisando o limite de resistência à fadiga devido às tensões flutuantes. Assim, foi criado o diagrama chamado S-N ou Curva de Wöhler, para a descrição do comportamento desses materiais. (NORTON, 2013)

Na Figura 1 pode-se observar o Diagrama S-N ou a chamada Curva de Wöhler que traz a relação entre a resistência à fadiga e o número de ciclos necessários para a diminuição da resistência até a ruptura do material.

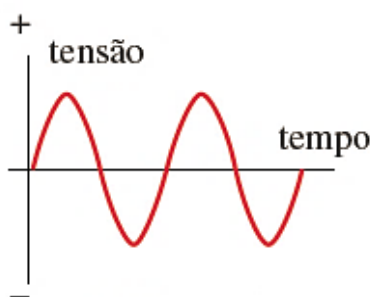
Figura 1 – Diagrama S-N ou Curva de Wöhler (Resistência à fadiga versus vida esperada)



Fonte: Norton (2013)

A Figura 2 demonstra a forma como é representada a alternância de tensões ou cargas em um material ao longo do tempo que permite ao fim dos ensaios se chegar à Curva de Wöhler mostrada anteriormente.

Figura 2 – Tensões alternadas variantes no tempo



Fonte: Norton (2013)

Norton (2013) ainda destaca que o termo fadiga foi sugerido por Poncelet, em 1839, com o intuito de descrever que o material submetido a certas condições ficava fragilizado ou apresentava 'cansaço'. Porém, Wöhler, nos seus estudos, destacou ainda que os pedaços dos eixos quebrados, que ele ensaiava no laboratório submetidos às cargas cíclicas, ainda continuavam resistentes e com ductilidade em relação aos ensaios de tração, assim como o material de origem. O termo 'fadiga' se perpetuou e ainda hoje é relacionado com a aplicação das cargas alternadas em um material.

O americano O. H. Basquin, no ano de 1910, representou a Curva de Wöhler através de uma fórmula logarítmica, onde C e K são constantes, n representa o número de ciclos e σ_a a tensão correspondente :

$$\sigma_a = C \cdot K^n \quad (1)$$

Caixeta (2010) relata que Palmgren, em 1924, sugeriu para a análise de fadiga um modelo linear. Já Miner, em 1945 apresentou uma equação linear, hoje conhecida como Palmgren-Miner, relacionando o número de ciclos solicitantes para uma tensão em relação ao número de ciclos admissíveis para essa mesma intensidade. Após a 2ª Guerra Mundial os estudos de fadiga se intensificaram nas áreas de máquinas e aeronaves.

A segurança em relação ao estado limite de fadiga vem sendo abordada em normas como a NBR 6118 (2014), ACI 215 (1997) e o CEB-FIP Model Code 1990 (1993) em modelos estimados e de acordo com algumas especificidades e parâmetros. O estudo de fadiga acaba por ainda necessitar de análises mais aprofundadas para proporcionar o aprimoramento dos procedimentos relacionados com a questão aqui abordada.

A ACI 215 (1997) – “Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading” destaca que em investigações experimentais de barras trefiladas a frio, como as barras CA-60 aqui estudadas, verificou-se que as barras ensaiadas ao ar apresentavam características de resistência menores que as barras envolvidas por concreto. Variáveis que podem influenciar a resistência à fadiga de vergalhões podem ser: tamanho e diâmetro da barra, resistência à tração e escoamento, dobras e soldagem. Destaca-se ainda, que em estudos realizados, há uma maior probabilidade de resistência à fadiga em barras de diâmetros menores.

Olsson e Petterson (2010) frisam que há dois tipos de fadiga: a fadiga a baixas ciclagens e a que acontece em altos ciclos. A fadiga em baixa ciclagem ocorre com a aplicação de carga em altos níveis de deformações para um relativo baixo número de ciclos, enquanto a fadiga de alta ciclagem corresponde a um grande número de ciclos a baixas variações de deformações. As barras de estruturas de concreto armado possuem a característica de um limite de resistência para a fadiga que deve ser considerado no dimensionamento de determinadas estruturas. Hawileh *et. al.* (2016) também vem estudando os efeitos de fadiga relacionando sua pesquisa com atuações sísmicas.

As variações de tensão, diâmetro das barras e a geometria da superfície têm efeitos significativos na resistência à fadiga das barras. A área da nervura da fadiga não tem efeito no desempenho da fadiga (NYAMU, 2016).

2.2 FALHAS POR FADIGA

Uma micro trinca inicial é o que marca o início da ruptura a fadiga em materiais. Essa trinca inicia normalmente através de uma região de concentração de tensões, descontinuidades que podem ter surgido no processo de fabricação do material. A trinca se propaga durante a variação de cargas e através das ciclagens, mas a ruptura ocorre de forma frágil, de forma repentina. A força de ruptura à fadiga

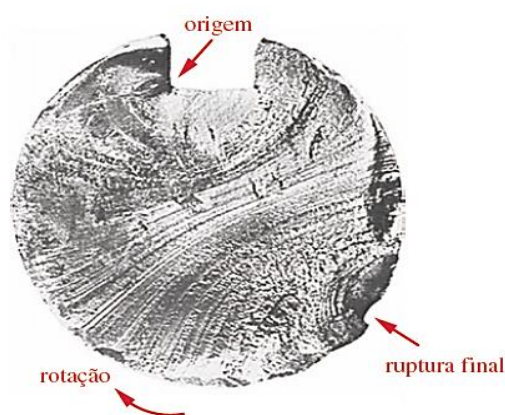
depende de vários fatores relacionados com a barra analisada: composição química, microestrutura, geometria das deformações etc (AL-SARAJ, 2007).

Norton (2013) afirma que quando há a alternância de cargas podem ocorrer escoamentos locais mesmo quando a tensão da seção esteja bem abaixo do escoamento geral do aço. Com isso, surgem bandas de deslizamentos nos contornos de cristais, podendo gerar trincas microscópicas. Após este início de trinca há o aumento da mesma através de tensões de tração internas. Este processo vai se intensificando até chegar a uma abertura macroscópica. Em um determinado ponto e momento ocorre a ruptura instantânea do material.

Krasnowski (2015) descreve que uma das tipologias de teste de fadiga é o teste axial, que será o foco deste trabalho, já que os ensaios serão realizados em uma máquina com este objetivo. É um tipo de ensaio que acaba por representar baixos custos, e foca principalmente na determinação do comprimento entre as garras, variação de cargas aplicadas e frequência.

Na Figura 3, observa-se a aparência de 'marcas de praia', com a alternância de trechos com aparência polida em comparação com outros de aspecto áspero.

Figura 3 – Demonstração das regiões de origem e ruptura final em um metal



Fonte: Norton (2013)

A origem de uma ruptura por fadiga ocorre por uma falha pontual que se propaga devido às características do material. Geralmente essa origem ocorre em um ponto de concentração de tensões, onde ocorre a nucleação da fissura do material microscopicamente. Essa falha se propaga de forma estável perpendicularmente ao plano de tensão com a redução da rigidez do aço, podendo já ser vista a olho nu, até

ocorrer a ruptura final de forma brusca, devido à instabilidade atingida pela abertura causada na região.

Quanto maior a flutuação geralmente se atinge um menor número de ciclos em um ensaio de ruptura à fadiga. Dantas (2010) destaca que há diversas variáveis que envolvem um ensaio desta natureza, o que pode gerar dispersão dos resultados: condições do corpo-de-prova, retinidade em relação ao equipamento, tensão média, frequência dos testes, defeitos do material, entre outros fatores.

A variação da tensão é definida pela diferença entre os valores máximos e mínimos, como mostra a equação 2 a seguir:

$$\Delta\sigma = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad (2)$$

Com os valores das tensões máximas e mínimas pode-se obter a tensão média.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (3)$$

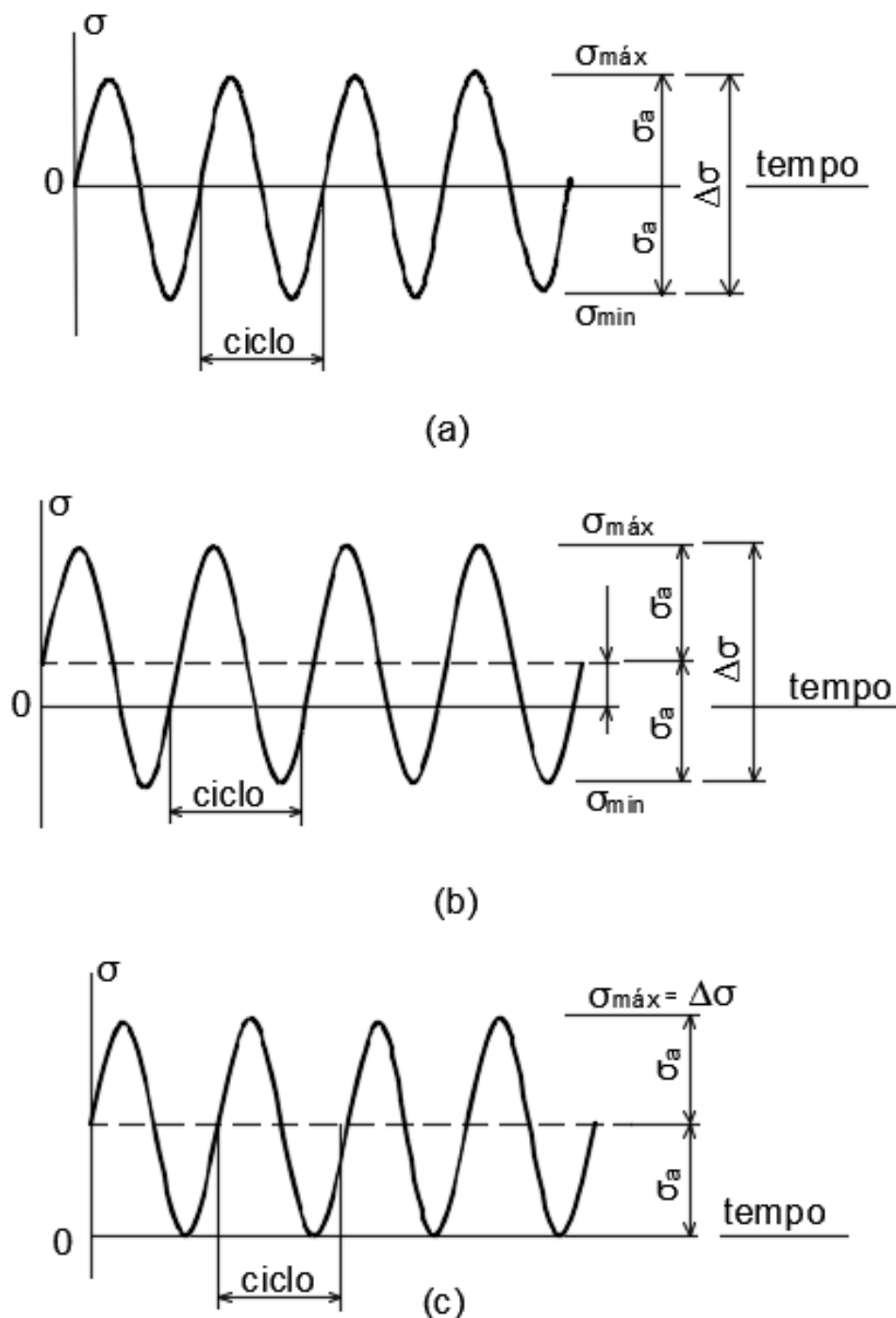
Por fim pode-se também, através destes valores de tensões se chegar a amplitude que corresponde à metade da variação da tensão.

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (4)$$

Os sinais das tensões alternadas e variação são sempre positivos, e as tensões de tração são consideradas, assim, positivas, com a tensão máxima sempre maior que a tensão mínima.

Na Figura 4 observam-se os possíveis carregamentos cíclicos ao longo do tempo, com a amplitude constante. No caso (a) as tensões atuantes são completamente reversas, sendo que a tensão média é igual a zero; no caso (b) há a atuação da tensão média diferente de zero; já no caso (c) o valor de zero é característico da tensão mínima, sendo que toda a amplitude apresenta característica positiva, e a tensão máxima é a própria variação geral de tensões atuantes.

Figura 4 – Diferentes condições de amplitude

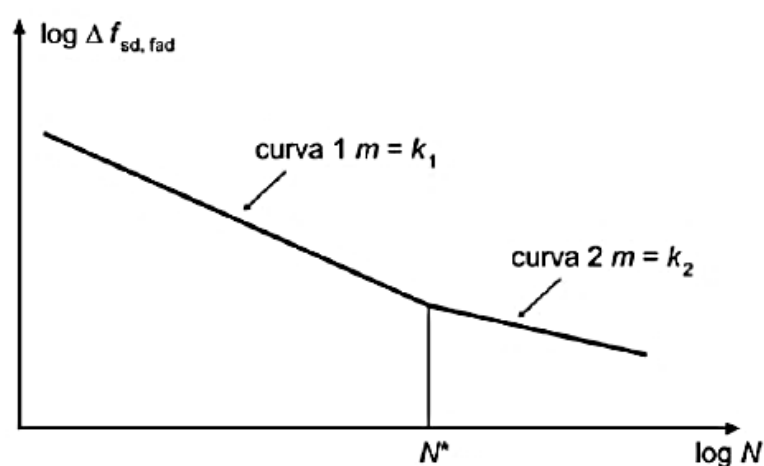


Fonte: Meneghetti (2007)

A NBR 6118 (2014) também traz o seguinte gráfico relacionando o número de ciclos com a variação de tensão aplicada, em escala log.log, para aços CA-50. Ela descreve o gráfico com a Curva de Wohler definida por dois coeficientes 'K' que

determinam a inclinação da curva. Observa-se uma mudança de 'K', em barras retas, dobradas ou estribos, em uma ciclagem de 1 milhão. O K1 definido para a primeira faixa de inclinação, segundo a norma brasileira, possui o valor 5. Já o K2 possui um valor de 9. Esta descrição pode ser observada na Figura 5, que servirá como base para as análises dos aços CA-60 aqui estudados, na busca dos coeficientes de inclinação 'K' e na definição característica da Curva de Wohler:

Figura 5 – Curva S-N segundo a NBR 6118



Fonte: NBR 6118 (2014)

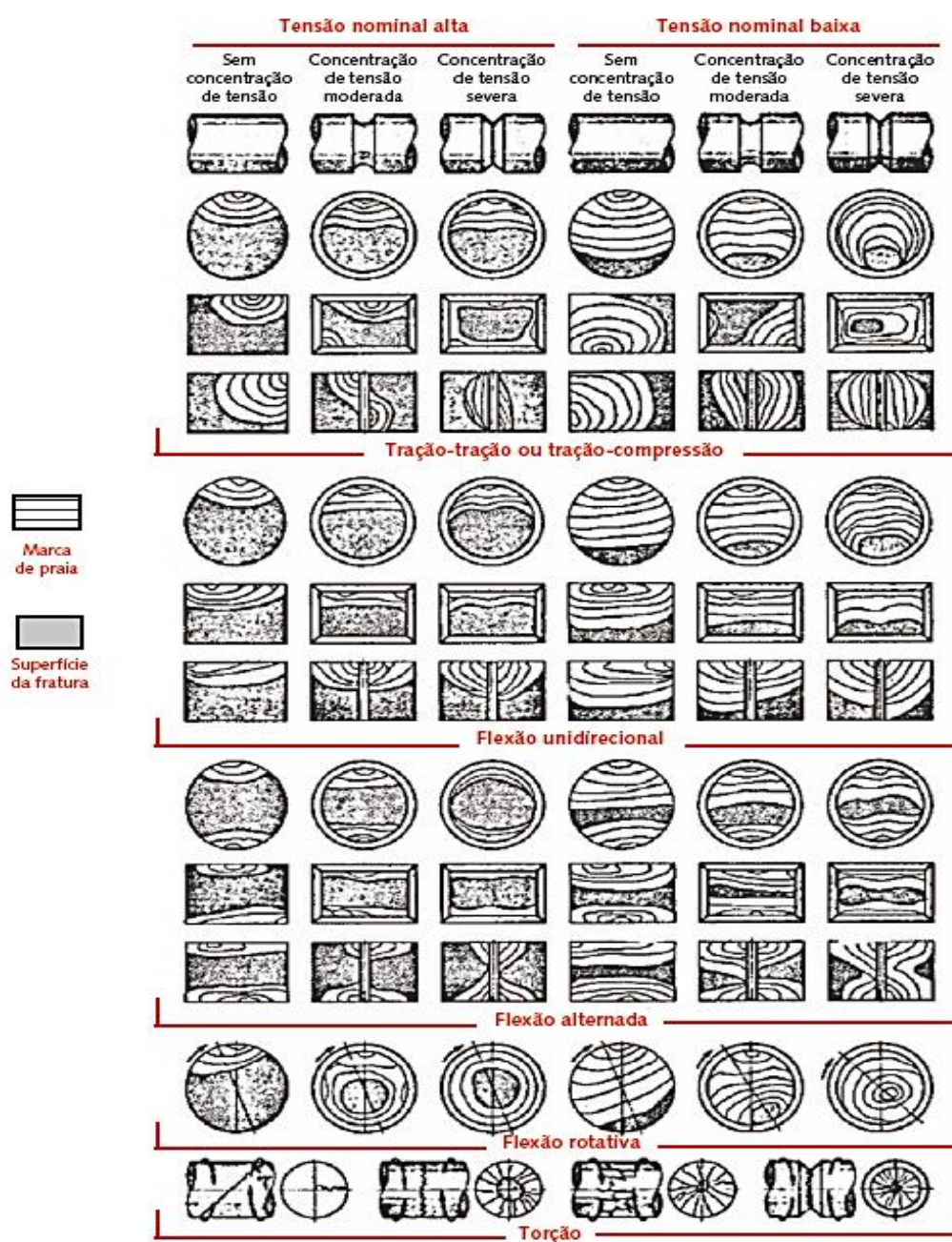
Já a Figura 6, que se encontra na página seguinte, apresenta esquemas de comportamentos relativos às fraturas de fadiga e relacionados com os tipos de cargas aplicadas. Dependendo do formato longitudinal do corpo de prova a propagação da trinca pode ocorrer de diversas formas. A tipologia do ensaio também gera rupturas com características diferenciadas, dependendo das condições de carregamento. As barras aqui ensaiadas possuem formato longitudinal reto, assim como é aplicada nas estruturas de concreto convencionais, ou seja, não houve a conformação por usinagem em um novo formato.

As 'marcas de praia' podem ser mais concentradas ou se apresentarem em uma maior superfície da seção transversal da peça, podem estar também em apenas uma lateral da seção ou em mais de uma região da mesma. As barras a serem ensaiadas inicialmente apresentam-se de forma retilínea, sem concentração de tensão inicial aparente. Já as telas apresentam regiões de pontos de soldas nos cruzamentos de barras, que são realizadas por eletrofusão. Esta solda não se

caracteriza por deposição de material, mas por uma pequena redução da seção das barras nessa união entre elas.

Os ensaios de fadiga podem ser realizados por flexão rotativa ou por tração. Para a análise dos vergalhões deste estudo será realizado o ensaio de tração através de uma máquina servo hidráulica. Aqui toda a seção transversal é solicitada.

Figura 6 – Superfícies de fraturas para diversas condições de carregamentos



Fonte: Norton (2013)

O aço CA-60, aqui estudado, por apresentar uma ductilidade menor que o aço CA-50, que já apresenta alguns estudos nacionais relacionados à fadiga, não apresenta as mesmas características para escoamento, tendendo a desenvolver as trincas de fadiga mais rapidamente. Norton (2013) destaca que o crescimento da trinca aqui mencionada ocorre através de tensões de tração, propagando-se em planos normais aos das tensões atuantes. Tensões de compressão tendem a proporcionar um comportamento contrário, fechar a trinca. Kopas *et. al* (2015) afirmam que a frequência recomendada para ensaios dinâmicos seria de 3 a 10 Hz, e que a resistência à fadiga aumenta com a diminuição da amplitude da tensão.

Ayyub, Chang e Al-Mutari (1994) destacam que um importante fator que causa uma considerável redução na resistência à fadiga seria uma concentração de tensões gerada por soldas nas intersecções entre barras, nos casos das telas soldadas. E que a vida em fadiga para soldas executadas à quente seria aproximadamente metade da resistência de soldas executadas a frio. As especificações correntes da ASTM (American Society for Testing and Materials) contém uma exigência quanto à resistência ao cisalhamento da solda entre os fios longitudinais e transversais. Esta força é inversamente proporcional à profundidade de penetração da solda. Apostolopoulos e Papadopoulos (2007) realizaram estudo que também relacionou uma diminuição na resistência de fadiga de acordo com o aumento de corrosão e perda de massa de barras para concreto armado.

Geralmente a falha por fadiga em estruturas de concreto armado é causada por fratura por fadiga das barras de aço. Além disso, a gama de tensões aplicada tem uma influência significativa na vida útil da barra de resistência à tração na peça (NAGESH e RAO, 2016). Os ensaios que envolvem a análise de fadiga requerem o estudo de métodos de atenuação da concentração de tensões nas garras das máquinas de ensaios devido à duração deste tipo de experimentação. O uso de materiais auxiliares, como o alumínio, para essa distribuição, vem sendo efetivo (MAROPOULOS *et. al.*, 2016).

2.3 O AÇO CA-60

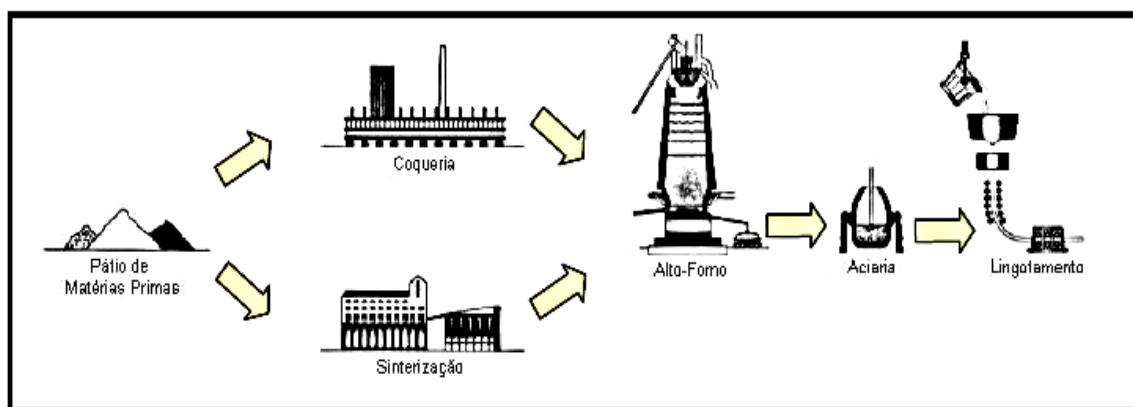
Almeida (2002) destaca que os aços de concreto armado são ligas de ferro com elementos como carbono, manganês, silício, cromo e impurezas não metálicas como combinações de enxofre e fósforo. A resistência do aço se eleva com o teor de

carbono, mas esse aumento gera a diminuição da ductilidade do material. Os aços mais utilizados na construção civil para o concreto armado são os vergalhões conhecidos comercialmente como aços CA-50 e CA-60. O primeiro costuma ser utilizado em bitolas maiores e o segundo em bitolas menores. A grande diferença entre os dois materiais é que o aço CA-50 é fabricado a quente e possui características de uma maior ductilidade que o aço CA-60. O CA-60 é fabricado a frio, e apesar de sua maior resistência acaba por ser menos dúctil. O CA-60 também é conhecido como fio, devido aos seus diâmetros menores, que são vendidos comercialmente.

Como o CA-60 é destinado às estruturas de concreto, ele deve apresentar um equilíbrio entre resistência e ductilidade, pois a segurança estrutural depende das possíveis deformações que o aço deve ter durante uma situação de ruína. Assim, os aços CA-60 são aços de baixo carbono. Na sua produção, os aços normalmente variam entre os chamados SAE (*Society of Automotive Engineers*) 1015, 1018 e 1022, com nomenclatura baseada na composição química do aço. Na nomenclatura em questão, o '10' significa que são aços carbonos simples; e os dois últimos valores, a porcentagem de carbono (o aço 1020 possui 0,20% de carbono em sua composição).

A fabricação desses aços se dá por uma matéria-prima básica que é a sucata, rigorosamente escolhida, normalmente constituída de retalhos de chapas metálicas, material de usinagem, latarias de carros, dentre outros materiais semelhantes. Este uso se dá por possuir materiais com características mecânicas melhores que os dos aços de minério de ferro. Outras matérias-primas também utilizadas são: ferro gusa, ferroligas, cal e oxigênio. Esse material passa pela aciaria (Figura 7) que transforma a matéria-prima em tarugos (fios-máquina) que servirão como base para a laminação, e sua proporção caracteriza o aço a ser produzido. (BELGO, s.d)

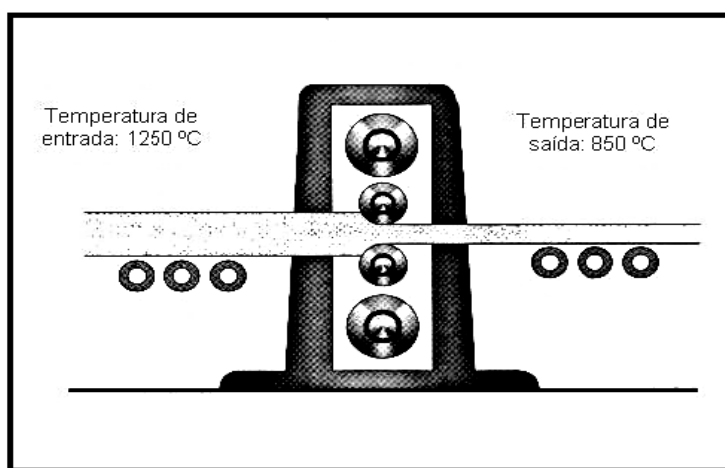
Figura 7 – Processo de produção dos aços



Fonte: Cascudo e Helene (2000)

A conformação mecânica, pode se dar por laminação a quente e trefilação, para a obtenção do perfil ou da bitola desejados. A laminação a quente dos aços CA-50 consiste em um reaquecimento das barras de 1000 °C a 1300 °C, com a atuação de um esforço de compressão lateral e posteriormente diametral, para promover a redução do diâmetro do fio-máquina. Os trens de laminação são divididos em três categorias: desbastadores, intermediários e acabadores. Cada um deles possui vários jogos de cilindros promovendo reduções paulatinas da seção transversal da barra. O último trem é o chamado acabador, com discos de laminação especiais que propiciam um melhor acabamento das barras, com a gravação dos nomes dos fabricantes e as nervuras (Figura 8) (CASCUDO e HELENE, 2000).

Figura 8 – Esquema de laminação a quente



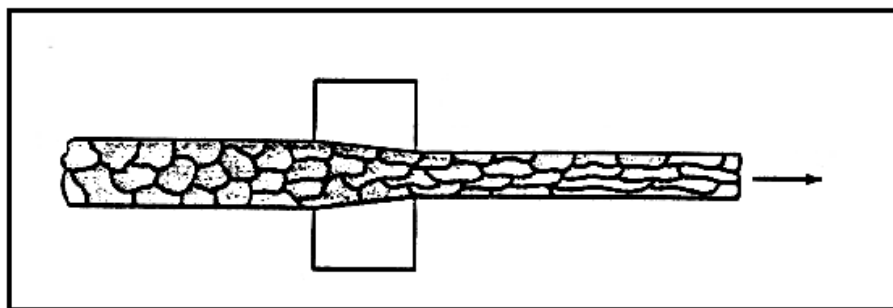
Fonte: Cascudo e Helene (2000)

Cascudo e Helene (2000) afirmam que no caso do aço CA-50 há um tratamento térmico de têmpera, com uma microestrutura martensítica, com carbono em ferro α (ferrita), com a presença de grandes tensões internas.

A NBR 7480 (2007) descreve as características dos aços para aplicação em concreto armado em relação às suas propriedades mecânicas. Os vergalhões comercializados em comprimentos nominais de 10 a 12 metros são as chamadas barras. Já os fios, geralmente são comercializados em rolos. Para o aço CA-60, o processo de produção é através da trefilação ou laminação a frio. Aqui, os fios de aço são forçados a passar através de várias fieiras, cujo diâmetro de entrada é maior que o de saída. Assim, é gerada uma deformação microestrutural, com o alongamento dos grãos paralelamente ao esforço aplicado. Na Figura 9 observa-se essa diferença na deformação dos grãos. Esta deformação acaba por gerar modificações diversas nas

propriedades do aço que foi trefilado. Este procedimento acaba por trazer uma melhoria as propriedades mecânicas do aço e uma consequente diminuição da ductilidade do mesmo.

Figura 9 – Processo de trefilação



Fonte: Cascudo e Helene (2000)

A diferença entre ferro gusa e aço é a presença de carbono na sua composição. O aço possui um teor de carbono inferior a 2,04% e o ferro gusa, entre 2,04% e 6,7%. Porém as armaduras de concreto armado costumam possuir um teor entre 0,08% e 0,5%. A taxa média para o CA-60 é de 0,2%. (BELGO, s.d.)

Cascudo e Helene (2000) destacam que o aço carbono possui uma estrutura cristalina com arranjos atômicos repetidos, nas três dimensões, de uma célula unitária, compondo um sistema cristalino. O ferro possui características alotrópicas: no estado de fusão apresenta-se de forma desordenada; com o resfriamento, de 1538 °C até 1394 °C adquire o formato cúbico (abaixo do ponto de fusão, cristaliza-se como um 'ccc' – ferro γ); entre 1394 °C e 912 °C transforma-se em 'cfc' – ferro δ ; em temperaturas inferiores (incluindo a temperatura ambiente) a estrutura volta a ser 'ccc' – ferro α .

O CA-60, em relação ao teor de carbono, é considerado aço doce e hipoeutetóide. Sua classificação em relação ao AISI/SAE é 1022. As fases constituintes do aço carbono CA-60 à temperatura ambiente, que foi estudado neste trabalho, correspondem a (VAN VLACK, 1970):

a) Ferrita ou ferro α : o fator de empacotamento é de 0,68. A estrutura 'ccc' possui espaços interatômicos pequenos e alongados, não acomodando com facilidade os átomos de carbono. O átomo de carbono se torna muito pequeno para a formação de uma solução sólida substitucional e muito grande para uma intersticial, gerando deformações. Apresenta-se de forma mole e dúctil.

b) Perlita: é bifásico, apresentando lamelas alternadas de cementita e ferrita (a partir da transformação da austenita).

Os vergalhões produzidos e vendidos no Brasil devem seguir os parâmetros definidos pela NBR 7480 (2007) para a garantia da qualidade do material produzido, descritos no Tabela 1, onde: 'LE' representa o limite de escoamento e 'LR' o limite de resistência.

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas

Propriedades Mecânicas CA-60				
LE Min (MPa)	LR MIN (MPa)	(LR/LE) MIN	Alongamento MIN (L₀ =10X) (%)	Dobramento 180° (Ø PINO)
600	660	1,05	5	5XØ

Fonte: NBR 7480 (2007) adaptada pelo utor

Hissanaga (2013) destaca que a composição química dos aços CA-60 pode ser caracterizada pelos elementos apresentados no Quadro 1, de alguns elementos químicos, além do ferro (Fe). Os aços podem apresentar pequenas variações e o destaque para alguns elementos principais, sendo que outros podem aparecer em proporções mínimas, em valores em partes por milhão.

Quadro 1 – Composição Química Nominal ABNT

Elementos Químicos	%
C	0,2
Si	0,134
Mn	0,40
S	0,020
P	0,021
Cu	0,19
Ni	0,07
Cr	0,07
Sn	0,017
Mo	0,02
Al	0,003
N	0,01
Ceq	0,1663

Fonte: HISSANAGA (2013) adaptada pelo Autor

A NBR 7480 (2007) descreve que os aços CA-60 podem ser lisos, entalhados ou nervurados, observando-se o coeficiente de conformação superficial mínimo. Apenas os aços com diâmetro a partir de 10 mm devem possuir entalhes ou nervuras.

O aço CA-60 após trefilado tende, em relação às suas propriedades, a aumentar sua dureza e resistência; e diminuir sua ductilidade e bitola. Sua matéria-prima é um fio-máquina obtido por laminação a frio. Após a redução da bitola para a que será comercializado, o produto passa por um sistema de roletes entalhadores para que sejam gravados os entalhes superficiais, conforme os aspectos normativos.

A NBR 6118 (2014) destaca ainda características relacionadas com a verificação à fadiga em armaduras. Os ensaios de barras ao ar devem ser realizados com flutuações de tensões máximas de 80% sobre a tensão de escoamento nominal e frequências de 5 Hz a 10 Hz. Para uma ciclagem de 2×10^6 ciclos, e um aço CA-50, a norma descreve, no caso de bitolas de 10 mm: para barras retas ou com dobras acima de 25 vezes o diâmetro, uma variação de 190 MPa; para barras retas ou com dobras menores que 25 vezes o diâmetro, uma variação de 105 MPa; para estribos, 85 MPa; e para barras com solda, 85 MPa. Não há referências para o aço CA-60.

Esta norma ainda destaca que a mínima resistência a ser considerada é a da barra reta, sendo que caso seja comprovado, por meio de ensaios, que o aço a ser utilizado possui uma resistência maior que a normativa, ela pode ser admitida nos cálculos de dimensionamento.

A NBR 7480 (2007) traz ainda considerações a respeito da massa linear. Para o diâmetro nominal de 8 mm, a massa nominal deve atingir 0,395 kg/m, área da seção de 50,3 mm² e perímetro de 25,1 mm, nos casos dos fios de aço CA-60. A densidade linear é obtida pela multiplicação da área da seção nominal por 7.850 kg/m³.

Os aços podem ser executados nas obras em sua forma isolada, com amarrações em arame recozido, ou através de telas soldadas, principalmente para o caso de elementos como lajes. Ayyub, Chang e Al-Mutairi (1994) abordam que o uso de telas soldadas em estruturas é um fator muito relevante para a produtividade na obra e o tempo de construção. Sua configuração acaba por reduzir erros de execução e facilita o controle de qualidade no campo.

2.4 ENSAIOS A SEREM REALIZADOS COM O VERGALHÃO CA-60

2.4.1 Verificação da Massa Nominal

O peso específico para os aços para concreto armado é de 7850 kg/m³. Com base nessa referência pode-se chegar aos valores de massa do aço a ser verificado, considerando-se o comprimento e o peso das amostras.

O quadro 2 a seguir traz as características das barras de aço CA-60 (fios) em relação às máximas variações permitidas para a massa nominal. Para todos os aços as variações permitidas para massas nominais giram em torno de seis por cento, para mais ou para menos. Os fios de aço CA-60 possuem diâmetros comerciais pequenos, com o diâmetro máximo apresentado, de 10 mm. Usualmente, nas estruturas de concreto armado com função estrutural, são utilizados os aços a partir de 5 mm de diâmetro. Os valores nominais das áreas e perímetros adotados se baseiam nas características de diâmetro e massas nominais.

Quadro 2 – Características dos aços CA-60

Diâmetro nominal ^a mm	Massa e tolerância por unidade de comprimento		Valores nominais	
Fios	Massa nominal ^b kg/m	Máxima variação permitida para massa nominal	Área da seção mm ²	Perímetro mm
2,4	0,036	± 6%	4,5	7,5
3,4	0,071	± 6%	9,1	10,7
3,8	0,089	± 6%	11,3	11,9
4,2	0,109	± 6%	13,9	13,2
4,6	0,130	± 6%	16,6	14,5
5,0	0,154	± 6%	19,6	15,7
5,5	0,187	± 6%	23,8	17,3
6,0	0,222	± 6%	28,3	18,8
6,4	0,253	± 6%	32,2	20,1
7,0	0,302	± 6%	38,5	22,0
8,0	0,395	± 6%	50,3	25,1
9,5	0,558	± 6%	70,9	29,8
10,0	0,617	± 6%	78,5	31,4
^a Outros diâmetros nominais podem ser fornecidos a pedido do comprador, mantendo-se as faixas de tolerância do diâmetro mais próximo.				
^b A densidade linear de massa (em quilogramas por metro) é obtida pelo produto da área da seção nominal em metros quadrados por 7 850 kg/m ³ .				

Fonte: NBR 7480 (2007)

2.4.2 Ensaio de Dureza do Aço

A análise de dureza de um material permite realizar especificações e caracterizações para pesquisas mecânicas e de metalurgia. A dureza permite a um material resistir a uma deformação plástica, e geralmente o ensaio é realizado por meio de penetração. A medida da dureza final encontrada é obtida através da impressão encontrada e da carga aplicada nas amostras.

Os objetivos do ensaio de dureza giram em torno: do conhecimento da resistência ao desgaste; controle de qualidade de tratamentos térmicos; pesquisa de novos materiais, dentre outros. Os ensaios são diversos: dureza Mohrs (por risco); dureza Shore (por choque ou ressalto); durezas Brinell, Meyer, Vickers e Rockwell (por penetração).

Mohrs é um método pouco usado para metais, pois normalmente os resultados são entre 4 e 8, e pequenas diferenças de dureza não são mostradas por este método. Shore é um ensaio dinâmico com um êmbolo de 2,5N, e depende de um equipamento portátil. A dureza por penetração confere uma deformação permanente na superfície por aplicação de uma carga, por penetrador, e são os ensaios mais utilizados atualmente. (RODRIGUES, s.d.)

Os ensaios de penetração, descritos por Rodrigues (s.d.) são:

a) Dureza Brinell: é simbolizada pela sigla 'HB', é definida por N/mm² ou kgf/mm². Consiste em penetrar lentamente uma esfera sob uma força de 3000 kgf. A carga é aplicada por 10 a 15 segundos no F_oF_o (ferro fundido) ou aço. Quanto menor a impressão, maior é a dureza do material. O Quadro 3 abaixo, traz os fatores de carga em função da faixa de dureza e do tipo de material.

Quadro 3 – Durezas Brinell

$\frac{F}{D^2}$	DUREZA	MATERIAIS
30	90 a 415 HB	Aços e ferros fundidos
10	30 a 140 HB	Cobre, alumínio e suas ligas mais duras
5	15 a 70 HB	Ligas antifricção, cobre, alumínio e suas ligas mais moles
2,5	até 30 HB	Chumbo, estanho, antimônio e metais-patente

Fonte: Rodrigues (s.d.)

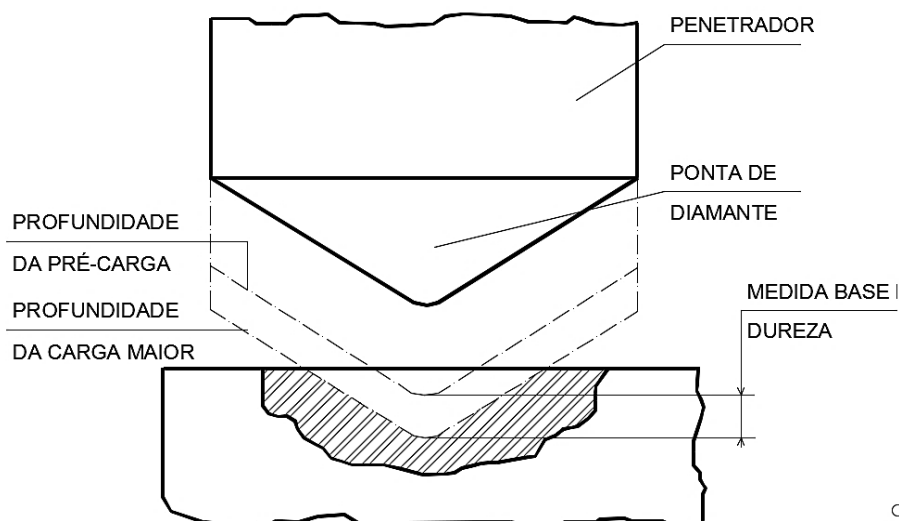
b) Dureza Meyer: é simbolizada pela sigla 'HM', e é definida por N/mm² ou kgf/mm². Apresenta uma aproximação melhor que o método Brinell. Utilizada para a

aferição da área da calota projetada no plano da superfície. É um método pouco utilizado em metais.

c) Dureza Rockwell: é simbolizada pela sigla 'HR', e é definida por N/mm^2 ou kgf/mm^2 . Apresenta uma aproximação melhor que o método Brinell. Rockwell, em 1922, desenvolveu uma análise que considerava um sistema pré-carga. É um processo de estudo rápido e fácil de se executar. O número da dureza é citado com o símbolo "HR" seguido da escala utilizada (A, B, C, D,...). (NM ISO 6508-1, 2008). Os penetradores a serem acoplados na máquina são em formato de diamante cônico ou em mini esferas. Usualmente, aproxima-se o penetrador da superfície do corpo de prova, aplica-se uma pré-carga (menor) e logo em seguida uma outra carga maior, até o ponteiro parar. Ao se realizar a retirada da carga faz-se a leitura do valor no mostrador. A pré-carga aplicada é de 10 kgf.

As vantagens trazidas por este ensaio englobam: rapidez, mínimo risco de erro humano, não há necessidade de polimentos nas amostras, equipamento simples, e a pré-carga elimina pequenas irregularidades. As desvantagens são: diversidade de escalas e esferas, o valor do 'HR' não possui correlação com a resistência a tração dos materiais. O valor apresentado no mostrador do equipamento é a própria dureza Rockwell que representa a profundidade alcançada pelo penetrador, diminuídas da recuperação elástica do material após a retirada da carga maior e a profundidade da pré-carga aplicada. A Figura 10 a seguir descreve a penetração realizada nos ensaios.

Figura 10 – Demonstração da penetração do durômetro



Fonte: Rodrigues (s.d.)

d) Dureza Vickers: é simbolizada pela sigla 'HV', e é definida por N/mm² ou kgf/mm². Consiste na endentação do material na forma de uma pirâmide reta de base quadrada. A carga é aplicada durante um tempo de 10 a 15 segundos. As diagonais de endentação são medidas com o auxílio do microscópio, para a geração de uma área média. Esta dureza é o quociente obtido dividindo a carga pela área de endentação. É uma tipologia de ensaio que também permite medir microdurezas, com menores cargas.

2.4.3 Ensaio de Fluorescência de Raios-X (FR-X)

A fluorescência de Raios-X permite a detecção dos elementos presentes no vergalhão. Os elementos que compõem a amostra são excitados por uma fonte primária de radiação, emitindo radiações com os comprimentos de onda característicos de cada tipo de elemento. As amostras para a realização dos ensaios podem ser maciças, líquidas ou em pó. A Tabela 2 abaixo descreve a proporção dos elementos entre os aços para concreto armado.

Tabela 2 – Elementos mais comuns dos aços comercializáveis para estruturas de concreto armado

ELEMENTOS DETERMINADOS (%)	AÇOS		
	CA-25	CA-50	CA-60
Ferro (Fe)	99,00	98,77	99,05
Carbono (C)	0,12	0,26	0,12
Manganês (Mn)	0,82	0,91	0,78
Fósforo (P)	0,02	0,03	0,02
Enxofre (S)	0,040	0,026	0,031

Fonte: HISSANAGA (2013)

Este tipo de ensaio não identifica elementos como o Carbono, devido à natureza dos comprimentos de onda utilizados.

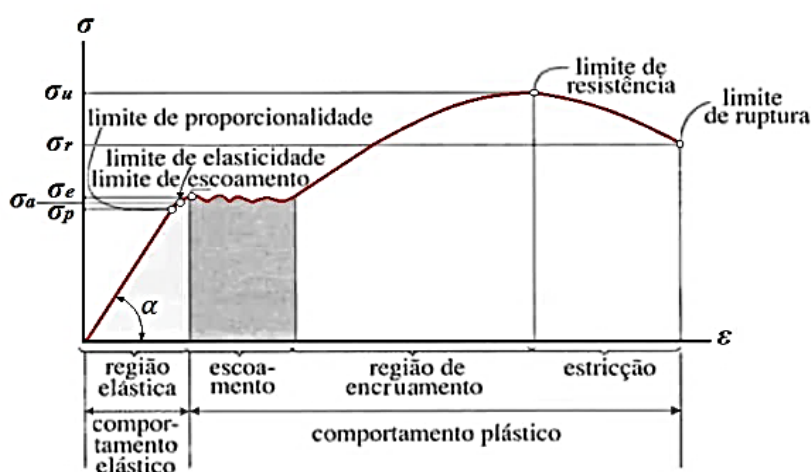
2.4.4 Ensaio de Tração

O ensaio de tração do vergalhão irá caracterizar a resistência à ruptura e a resistência ao escoamento do aço CA-60 e trazer outras informações complementares. Os corpos-de-prova são submetidos a um esforço axial com valor

crescente até sua ruptura. O gráfico *tensão x deformação* é gerado a partir dos resultados do ensaio, adotando-se algumas hipóteses: a tensão é calculada como sendo o quociente entre o valor da força aplicada num dado instante e a área inicial da seção, representando o eixo vertical do gráfico; a deformação é calculada com a relação entre a variação do comprimento e seu comprimento inicial e representa o eixo horizontal. O gráfico apresenta uma região elástica, que obedece a Lei de Hooke, e outra região plástica (Figura 11).

O ensaio de resistência à tração pode fornecer muitas informações sobre o aço estudado. Na Figura 11, a seguir, há a descrição dessas informações que são: limite de elasticidade, limite de proporcionalidade, limite de escoamento, limite de resistência, limite de ruptura, módulo de elasticidade, módulo de resiliência e módulo de tenacidade, que iremos ver de forma detalhada mais a frente. O patamar de escoamento não é definido de forma clara para todos os tipos de materiais. A região de encruamento uniforme surge após o aço sofrer a deformação do escoamento e o material ganhar resistência pela sua mudança de estado até o limite de resistência. Após este ponto, ocorre a chamada estricção, com a diminuição brusca da seção do corpo-de-prova, até a chegada no limite de ruptura..

Figura 11 – Propriedades mecânicas através do diagrama tensão-deformação



Fonte: HIBBELER (2004)

Para a realização do ensaio determinadas condições devem ser seguidas, de acordo com a NBR 6892 (2013) – Materiais Metálicos – ensaios de tração à temperatura ambiente. A velocidade do ensaio deve seguir as referências descritas no Quadro 4.

Quadro 4 – Velocidade de tensionamento

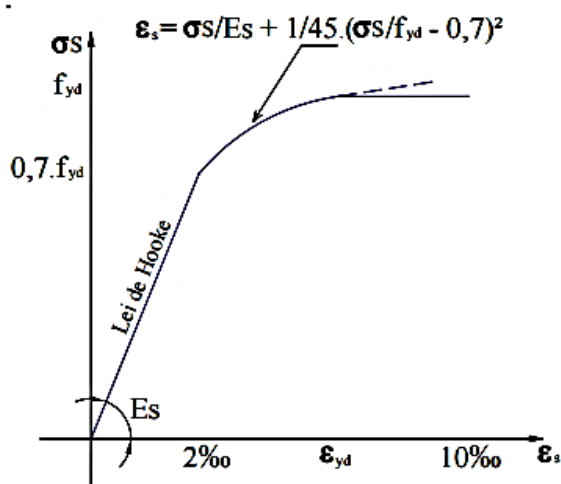
Módulo de elasticidade do material (E) (N/mm ²)	Velocidade de tensionamento (N/mm ² . s ⁻¹)	
	mín.	máx.
E < 150 000	2	10
E ≥ 150 000	6	30

Fonte: NBR 6152 (1992)

Como o aço possui um módulo de elasticidade entre 200.000 MPa e 210.000 MPa, a velocidade de tensionamento do ensaio deve ocorrer entre 6 N/mm².s⁻¹ e 30 N/mm². s⁻¹.

O aço CA-60 padrão, no seu gráfico tensão *versus* deformação, do ensaio de tração, possui um gráfico de patamar de escoamento não definido. Sartorti (2012) destaca que, de forma referencial, a resistência ao escoamento de cálculo do aço CA-60 é em média de 52,2 kN/cm² (f_{yd}), e a característica é de 60 kN/cm² (f_{yk}); a deformação específica última é de 10‰; a deformação específica de início de escoamento é de aproximadamente 4,49‰ (ϵ_{yd}) (Figura 12)

Figura 12 – Diagrama tensão-deformação para aço CA-60

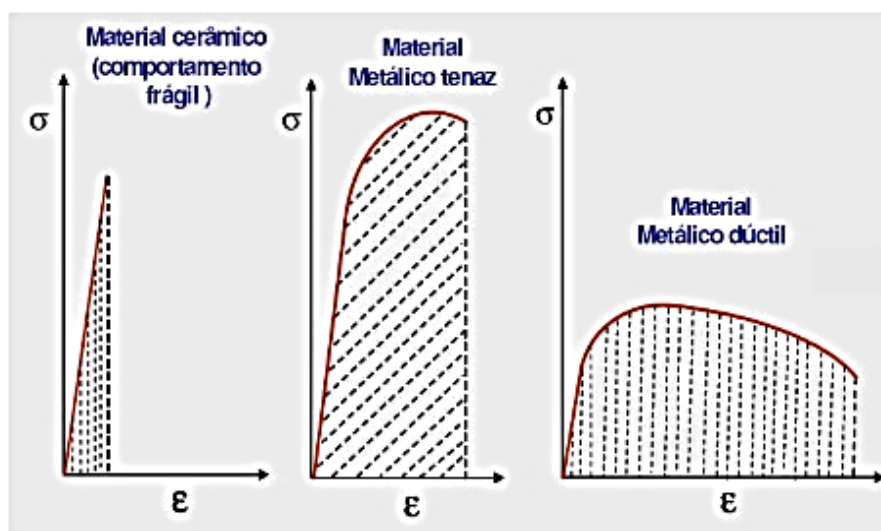


Fonte: Fusco (1981)

O diagrama tensão-deformação também permite obter outras informações complementares relativas aos aços ensaiados. O módulo de elasticidade representa

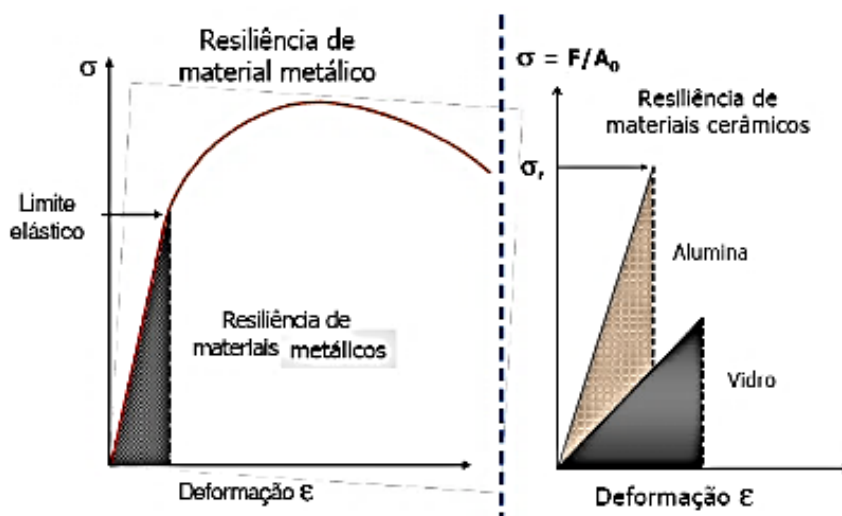
a relação entre a tensão e a deformação elástica resultantes. A tenacidade significa a capacidade que o material possui de absorver a energia mecânica até se chegar a ruptura; ela pode ser obtida por meio da área sob a curva total do diagrama tensão deformação, como pode-se observar na Figura 13. Por fim, a resiliência, representa a capacidade de absorção de energia de um material na deformação elástica, ou seja, a área abaixo do trecho linear do gráfico, e que permite o descarregamento dos esforços sem afetar a natureza do material, como pode-se observar na Figura 14.

Figura 13 – Ilustração da tenacidade nos diagramas tensão-deformação



Fonte: Gobbi (2013)

Figura 14 – Ilustração da resiliência nos diagramas tensão-deformação

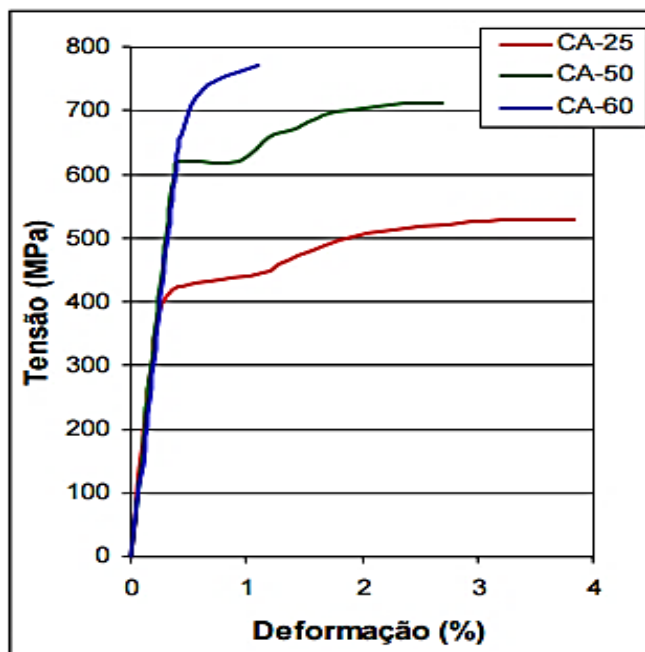


Fonte: Gobbi (2013)

De forma comparativa, observa-se que dos aços utilizados na construção civil, para concreto armado, o aço CA-60 é o que apresenta maior resistência, porém sua

ductilidade em comparação aos aços CA-50 e CA-25 é bem menor. Além disso, o aço CA-60 apresenta características de maior fragilidade na ruptura. A Figura 15 representa essa comparação entre o comportamento dos aços para concreto.

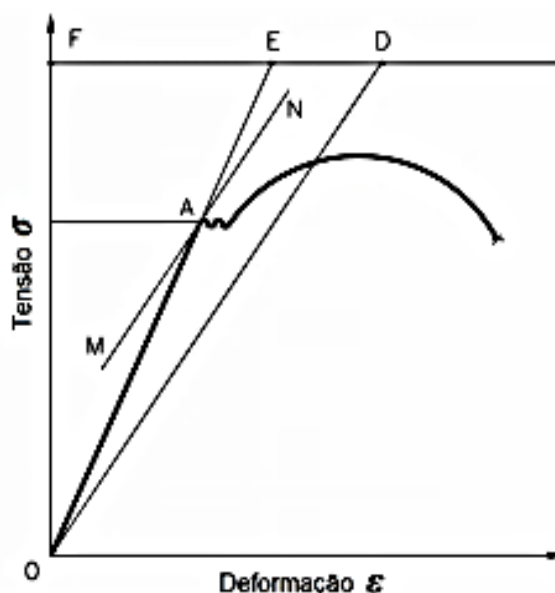
Figura 15 – Diagrama tensão-deformação comparativo entre os aços CA-25, CA-50 e CA-60



Fonte: Gobbi (2013)

Souza (1982) destaca, sobre as propriedades mecânicas, que o limite de proporcionalidade (σ_p) é a tensão acima da qual a Lei de Hooke não é mais obedecida. Já o limite de elasticidade (σ_a) é a máxima tensão suportável com características elásticas. Na prática, os dois limites são iguais. Destaca que, em 1939, Johnson determinou um método de definição desses limites, chamando o ponto demarcado de limite elástico aparente ou limite de Johnson. É o ponto onde a inclinação da tangente à curva é 50% menor que a tensão inicial. Para sua determinação traça-se uma reta na horizontal 'FD' fora da curva, onde 'FD' é 1,5 vezes a distância 'FE' (o ponto E é a projeção da reta inicial). O ponto "A", determinado por Johnson, é o ponto de tangência à curva da reta 'MN', paralela à 'OD'. Este ponto de tangência é o último que cruza com a curva do diagrama, conforme a Figura 16.

Figura 16 – Determinação do limite Johnson



Fonte: SOUZA (1982)

O limite de escoamento (σ_e) representa o ponto onde há um grande aumento na deformação, com pequena variação da tensão. Assim, ele também possui valor igualmente próximo dos limites de proporcionalidade e elasticidade. Outra maneira de realizar a estimativa da tensão de escoamento para aços com patamar não definido seria através do traçado de uma reta paralela à linear, do gráfico tensão-deformação, através de uma deformação padrão, que seria de 0,2%. Este fato ocorre em aços que possuem patamar de escoamento não definido, como é o caso do CA-60 aqui estudado.

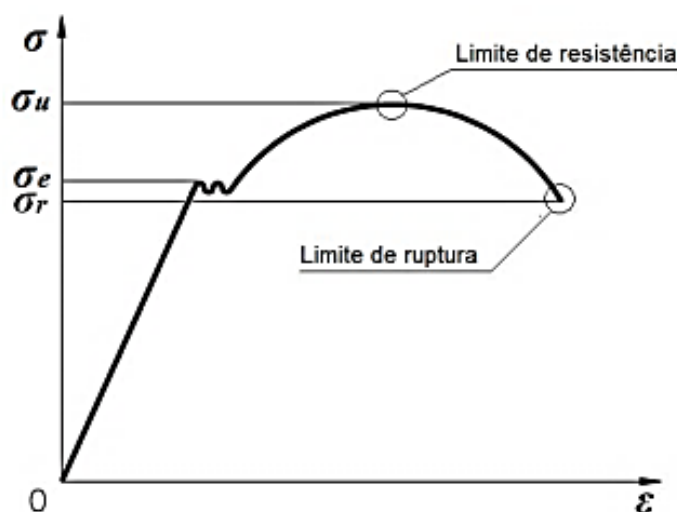
O módulo de elasticidade é a tangente da reta da zona elástica, ou o quociente da tensão pela deformação ou alongamento específico da região linear do gráfico tensão-deformação. Assim, o módulo de elasticidade (E) é a relação entre a tensão (σ) presente no trecho linear e a deformação do aço (ϵ). Respectivamente a tensão é a relação entre a força aplicada (P) e a área da seção (S_0); já a deformação é a relação entre a variação de comprimento (Δl) e o comprimento inicial da barra analisada (l_0).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{P \cdot l_0}{S_0 \cdot \Delta l} \quad (5)$$

O limite de resistência (σ_u) é o ponto da máxima carga atingida durante o ensaio. Já o limite de ruptura (σ_r) é a última tensão suportada pelo material antes da

fratura, ocorrendo uma diminuição da tensão devido a diminuição da área do corpo de prova, após a estrição (Figura 17).

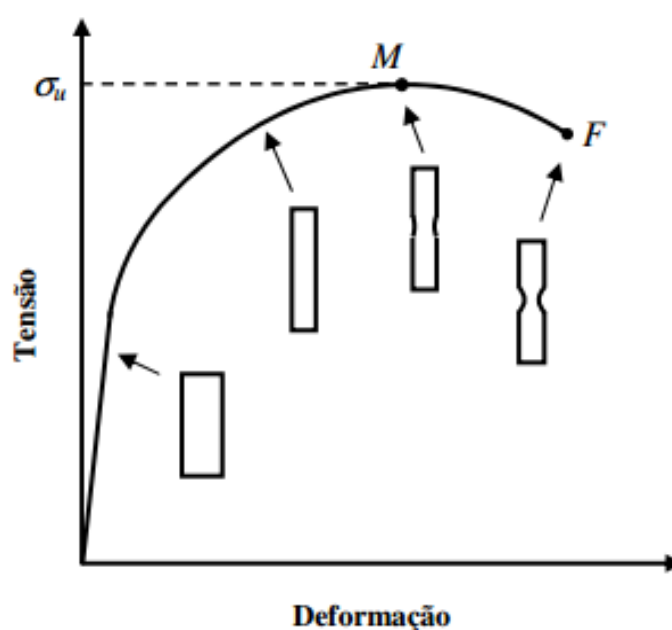
Figura 17 – Limites de um material



Fonte: GARCIA, SPIM e SANTOS (2000)

Callister (2016) apresenta o perfil de comportamento do corpo-de-prova frente às solicitações do ensaio de tração. Após o limite de resistência a tensão diminui até a ocorrência da fratura do material, exatamente pela redução da seção resistente do material. A estrição é a característica dessa diminuição que leva à ruptura. Na Figura 18, pode-se visualizar o comportamento de alongamento do material no ensaio de tração, e o ponto onde surge a estrição.

Figura 18 – Limites de um material



Fonte: CALLISTER (2016)

2.4.5 Caracterização do Metal

Para a revelação da microestrutura do metal é necessária a realização de um processo de tratamento das amostras. Primeiro, realiza-se o embutimento das amostras, com o auxílio do líquido autopolimerizante, permitindo um melhor manuseio para a execução do lixamento. O processo de lixamento ocorre através do contato da amostra com lixas de diferentes granulações (lixas para metal: 180, 220, 320, 400, 600 e 1200), e com o auxílio de uma politriz. Após o lixamento, ocorre a execução do polimento, que permite uma melhoria final do acabamento, com o auxílio da alumina como agente polidor. Por fim as amostras são atacadas quimicamente com Nital 2%, para que seja permitida a revelação da microestrutura. Essa caracterização microestrutural pode ser realizada por meio do Microscópio Óptico e do Microscópio de Varredura.

O Nital pode ser empregado nos produtos siderúrgicos comuns, não ataca a cementita e nem a ferrita, apenas delineando seus contornos, e colore a perlita, em tom mais escuro. Após o ataque a peça é lavada com álcool, passa-se o algodão umedecido com o álcool, submetendo-se, posteriormente, a amostra a um jato de ar quente.

2.4.6 Ensaio de Fadiga

Não há uma norma brasileira que guie ensaios de fadiga em barras ao ar para vergalhões de concreto armado. Pesquisas realizadas no Brasil foram elaboradas por pesquisadores da USP em relação à resistência à fadiga do aço CA-50, que se apresenta com uma menor resistência e maior ductilidade que o aço CA-60.

Devido à falta de pesquisas e normas, a grande dificuldade inicial para a realização dos ensaios de fadiga é a determinação da variação correta para as ciclagens a serem analisadas.

A NBR 6118 (2014) recomenda valores de variação da tensão para um parâmetro de 2.000.000 ciclos. Porém sua referência é determinada para aços CA-50, envolvidos por concreto armado (Tabela 3).

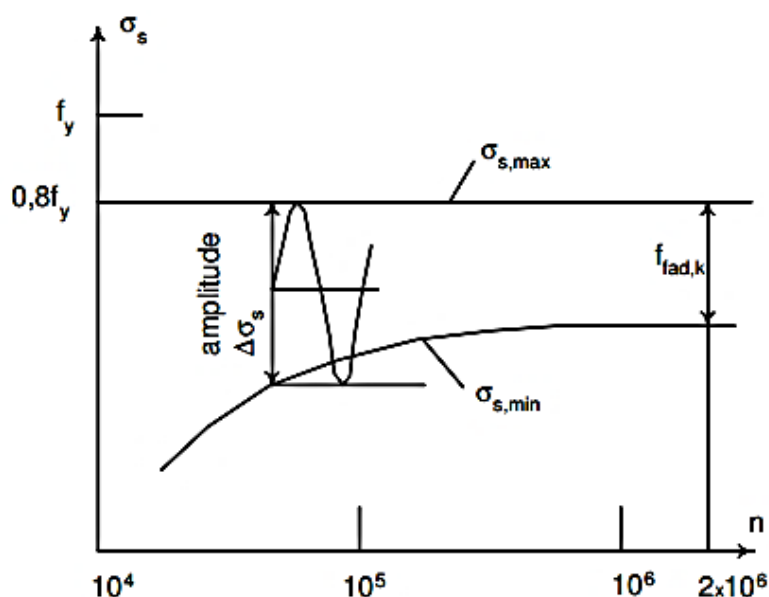
Tabela 3 – Variação da tensão de fadiga para aços CA-50 dentro do concreto

$\Delta f_{sd,fad}$ (MPa) para armadura passiva, aço CA-50								
Φ (mm)	10	12,5	16	20	22	25	32	40
Barras retas ou dobradas com $D \geq 25\Phi$	190	190	190	185	180	175	165	150
Dobradas com $D < 25\Phi$	105	105	105	100	95	90	90	8
Estribos	85	85	85	-	-	-	-	-
Ambiente marinho Classe IV	65	65	65	65	65	65	65	65
Barras soldadas	85	85	85	85	85	85	85	85

Fonte: NBR 6118:2014 adaptada pelo Autor

Para a elaboração da Curva de Wöhler foram tomadas como base as resistências que definiram a amplitude de variação. Com base nas pesquisas realizadas por Dantas (2010) e no projeto de norma Mercosul 02:00-020-10 (1996), a definição do valor de tensão máxima foi fixado em 80% da resistência característica de escoamento do aço no ensaio estático (Figura 19).

Figura 19 – Esquema das variações de tensão



Fonte: Dantas (2010)

A recomendação da frequência adotada para ensaios de barra ao ar é de até 10 Hz. Buelta (2001) destaca que a frequência natural de vibração do aço é muito superior aos 10 Hz, justificando a utilização deste limite máximo para frequência.

Para o cálculo de variação de tensão do aço CA-50, Dantas (2010) utilizou como referência valores de 'K' presentes no "*Bulletin D'Information N.188-Fatigue of Concrete Structures - State of Art Report*", que traz a seguinte formulação, que

depende da variação da tensão ($\Delta\sigma$) considerando a aplicação em uma curva logarítmica, número de ciclos adotados (N) e a constante (K) que depende de fatores como o diâmetro da barra e do tipo de carregamento:

$$\Delta\sigma^9 \times N = K \quad (6)$$

A Tabela 4 traz esses valores de 'K' de acordo com os ensaios axiais a se realizarem com as barras, dependendo do diâmetro dos vergalhões a serem ensaiados. Observa-se que ela é definida para barras com características aproximadas às dos aços CA-50, como demonstrado por Dantas (2010) em seu estudo.

Tabela 4 – Valores de K

		K x 10²⁷	
Diâmetro da barra (mm)	Tipo de Carregamento	Real	Projeto
6 a 16	Axial - barra ao ar	11,2	0,75
	Barra dentro do concreto	60,6	3,09
20 a 50	Axial - barra ao ar	0,81	0,07
	Barra dentro do concreto	6,38	0,31

Fonte: Bulletin D'Information N 188 (1991) adaptado pelo Autor

2.4.6.1 A investigação experimental com aço CA-50

a) Estudos desenvolvidos por Buelta (2001):

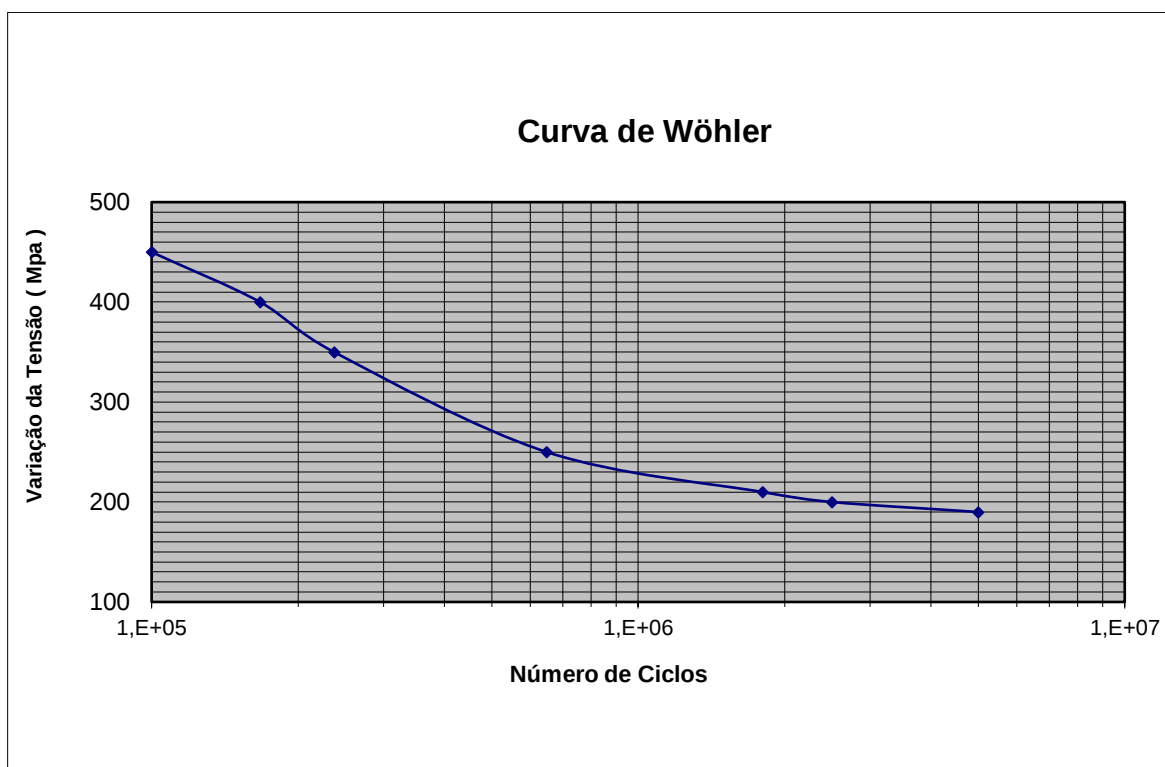
Pesquisas com barras de aço CA-50 de diâmetro 12.5 mm foram desenvolvidas por Buelta (2001). O autor inicialmente previu a realização de sete ensaios com as barras ao ar. As variações adotadas foram escolhidas com a previsão de 4 ensaios com ruptura menor que 2 milhões de ciclos, e 3 ensaios com ruptura acima deste valor. Destes últimos três ensaios, dois seriam realizados para uma ruptura em torno de 2 milhões e um para uma proximidade aos 5 milhões de ciclos. A pequena quantidade de ensaios limitou as conclusões devido à baixa representatividade estatística de cada ponto da Curva de Wöhler (Quadro 5). O formato da Curva de Wöhler esperado por Buelta (2011) encontra-se na Figura 20.

Quadro 5 – Características dos ensaios de BUELTA (2001)

Número de Pontos da Curva de Wohler	Número de Corpos de Prova por Ponto	Nº de Ensaios	Número de Ciclos até a Ruptura Esperado em cada Ensaio
4	1	4	Média de 1,0 milhão para os 4 ensaios.
2	1	2	2,0 milhões
1	1	1	5,0 milhões
	Total	7	13,0 milhões

Fonte: Buelta (2001)

Figura 20 – Formato da Curva de Wöhler esperado por BUELTA (2001)



Fonte: Buelta (2001)

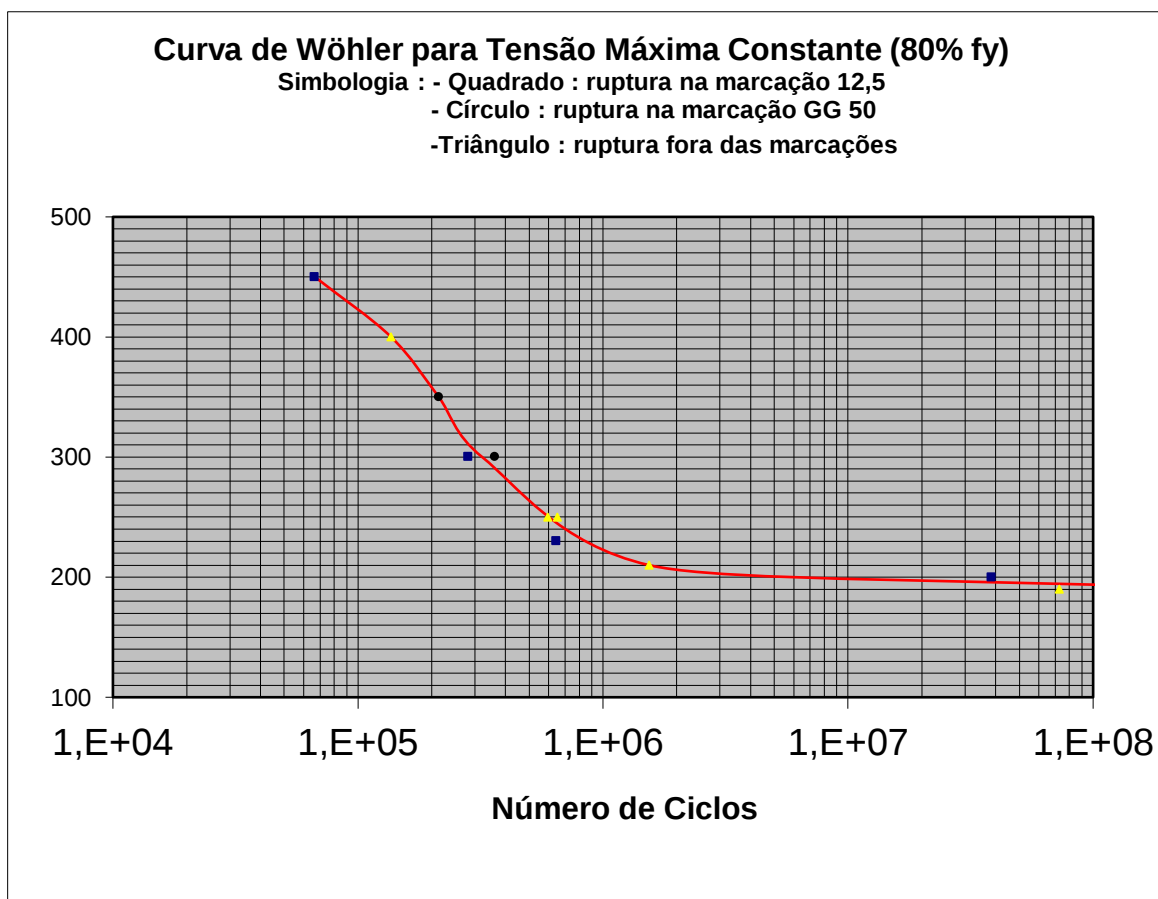
Os resultados e ruptura encontrados para estes ensaios, com as respectivas variações adotadas por Buelta (2001) encontram-se na Tabela 5, a seguir. No desenvolver dos ensaios, observou-se que apenas 7 ensaios não eram suficientes para o desenho da Curva de Wöhler, e, então, foram realizados 12 ensaios (Figura 21).

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de fadiga de BUELTA (2001)

Corpo de Prova.	Variação de Tensão (MPa)	Número de Ciclos até a Ruptura
4	450	66.684
1	400	136.489
2	350	213.596
5	300	281.259
7	300	361.362
3	250	594.181
9	250	649.870
10	230	644.728
11	210	1.543.133
8	200	38.580.000
12	190	72.932.000
6	170	Infinito

Fonte: Buelta (2001)

Figura 21 – Formato da Curva de Wöhler encontrado por BUELTA (2001)



Fonte: Buelta (2001)

Da Curva de Wöhler obtida por Buelta (2001) ele chegou às seguintes conclusões: a amplitude para a ruptura de 2 milhões de ciclos é de 205 MPa; para 5 milhões de ciclos é de 200 MPa; para 195 MPa, o número de ciclos até a ruptura pode ser considerado infinito.

b) Estudos desenvolvidos por Dantas (2010)

Como citado anteriormente, Dantas (2010) realizou uma pesquisa com ensaios de barras ao ar e telas soldadas de aços CA-50, para a definição da Curva de Wöhler, em análise comparativa com a norma brasileira. Com o uso das variações sugeridas pelo "*Bulletin D'Information N.188-Fatigue of Concrete Structures - State of Art Report*" ele realizou os ensaios para aferir a definição das médias das ciclagens obtidas.

Na sua investigação experimental, foram encontradas as flutuações de tensões relacionadas com as ciclagens. No seu estudo as previsões de rupturas seriam para as ciclagens de 100 mil, 1 milhão e 4 milhões. Nos ensaios das barras a variação de tensões para a previsão de 4 milhões não encontrou resultados definitivos com as amostras ensaiadas, já que a maioria dos corpos de prova não romperam antes dos 6 milhões de ciclos. As Tabelas 6 e 7 demonstram os resultados para barras e telas da pesquisa de Dantas (2010).

Tabela 6 – Resultados para as barras isoladas CA-50 da pesquisa de Dantas (2010)

<i>Grupo 1</i>		<i>Grupo 2</i>		<i>Grupo 3</i>	
$\Delta\sigma = 364\text{MPa}$		$\Delta\sigma = 250\text{MPa}$		$\Delta\sigma = 198\text{MPa}$	
CP	N	CP	N	CP	N
1	245180	7	940029	13	2220652
2	195600	8	823040	14	1351284
3	213600	9	665009	15	6000000 s/rup.
4	276750	10	744114	16	6000000 s/rup.
5	233100	11	656000	17	6000000 s/rup.
6	288100	12	638876	18	6000000 s/rup.

Fonte: Dantas (2010)

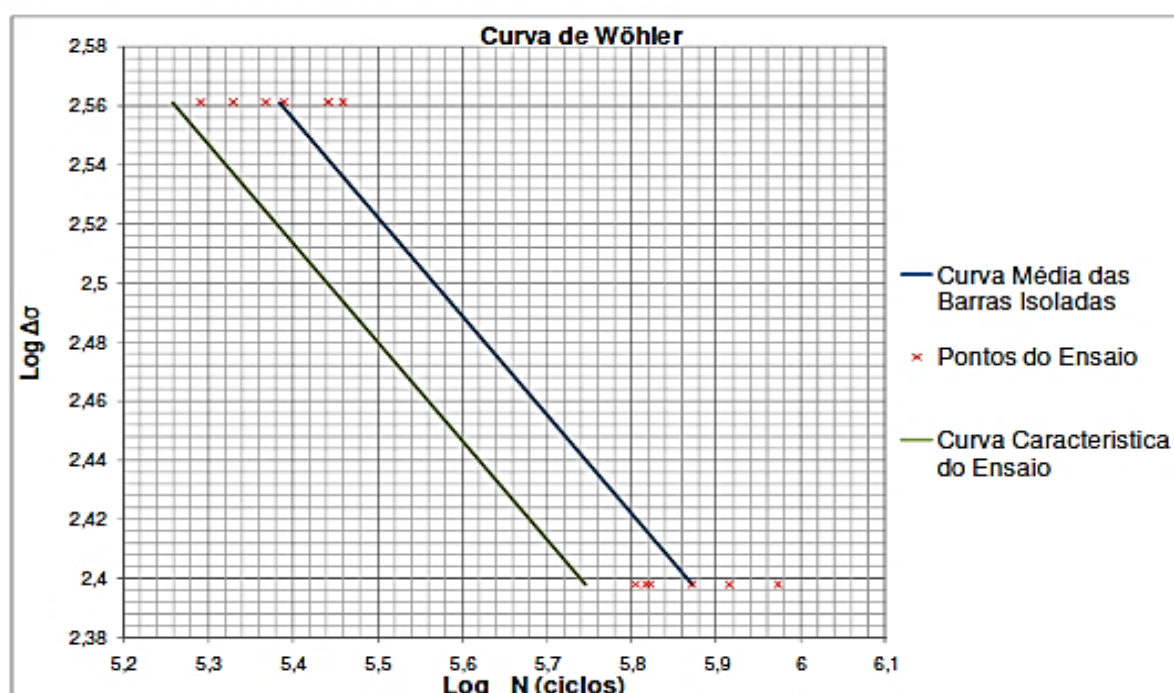
Tabela 7 – Resultados para as telas soldadas CA-50 da pesquisa de Dantas (2010)

<i>Grupo 4</i>		<i>Grupo 5</i>		<i>Grupo 6</i>	
$\Delta\sigma = 364\text{MPa}$		$\Delta\sigma = 250\text{MPa}$		$\Delta\sigma = 198\text{MPa}$	
CP	N	CP	N	CP	N
19	108508	25	215064	31	369684
20	113681	26	124708	32	419658
21	95182	27	346370	33	227930
22	77820	28	188782	34	353794
23	85513	29	139350	35	351362
24	77361	30	191052	36	310800

Fonte: Dantas (2010)

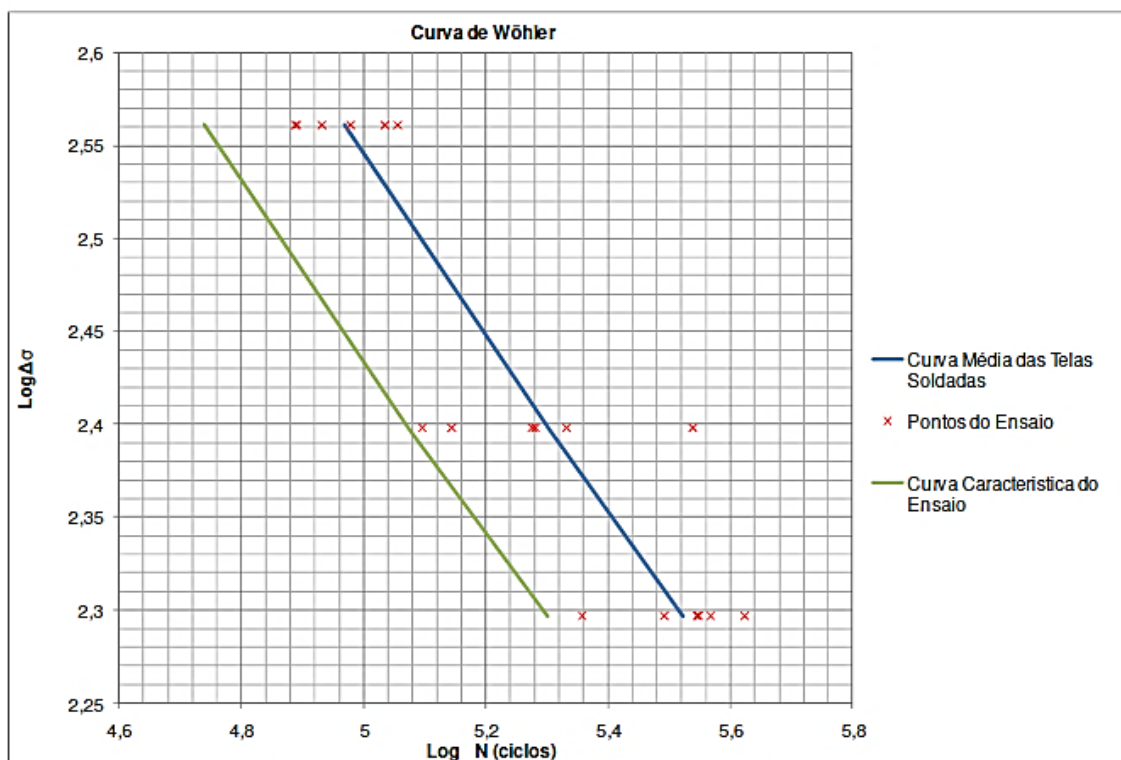
Através dos resultados das rupturas, Dantas (2010) identificou que a ruptura das telas de aço CA-50 ocorria com ciclagens bem abaixo das encontradas nas barras. Através dos resultados foram realizadas análises de distribuição normal e o cálculo dos valores característicos de cada flutuação considerando a média dos ciclos e o coeficiente de variação. Com isso, foram desenhados os formatos das Curvas de Wöhler, para os resultados médios e característicos das barras isoladas e telas soldadas (Figuras 22 e 23).

Figura 22 – Curvas de Wöhler para barras isoladas – CA-50



Fonte: Dantas (2010)

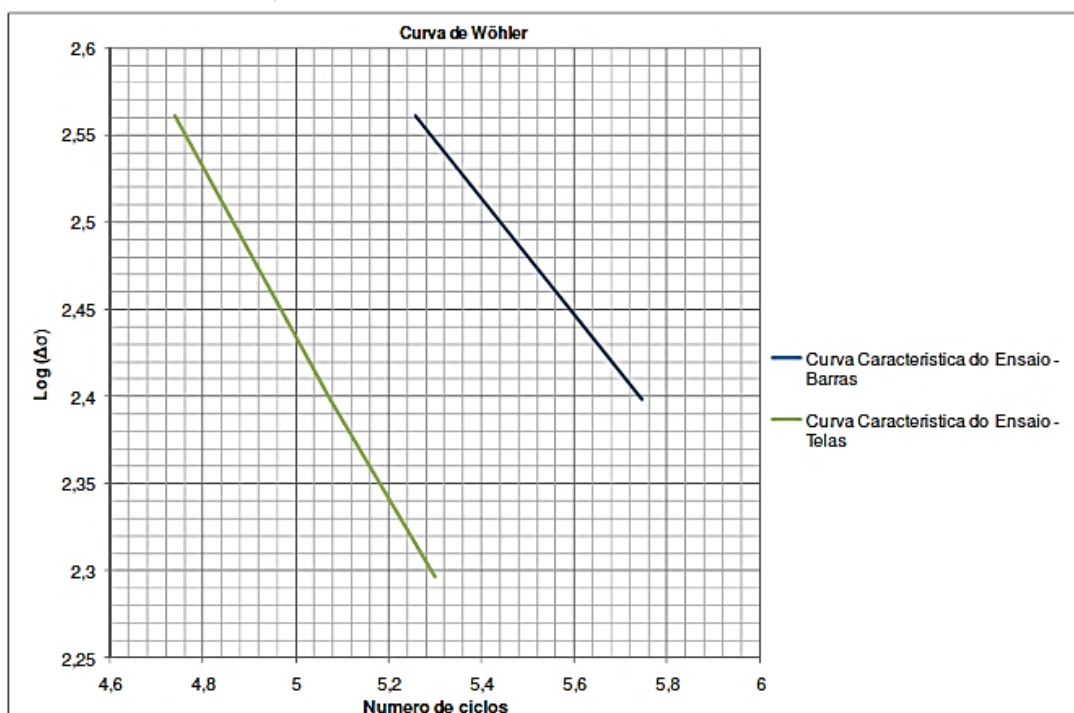
Figura 23 – Curvas de Wöhler para telas soldadas – CA-50



Fonte: Dantas (2010)

Na Figura 24 pode-se ver a comparação entre as Curvas de Wöhler características para barras e telas.

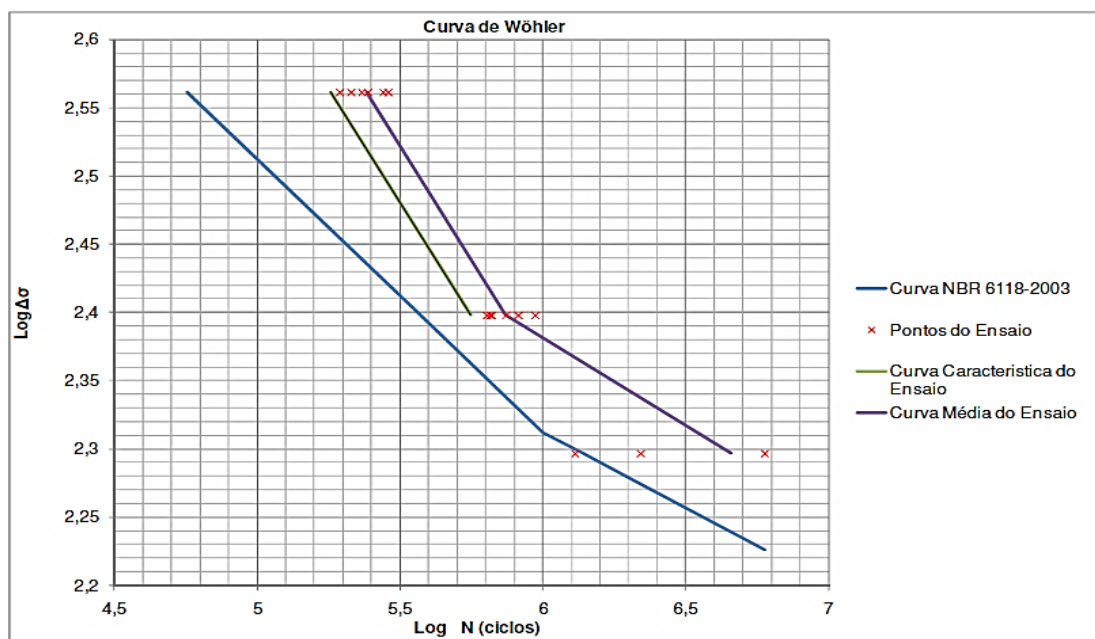
Figura 24 – Curvas de Wöhler para barras isoladas e telas soldadas – CA-50



Fonte: Dantas (2010)

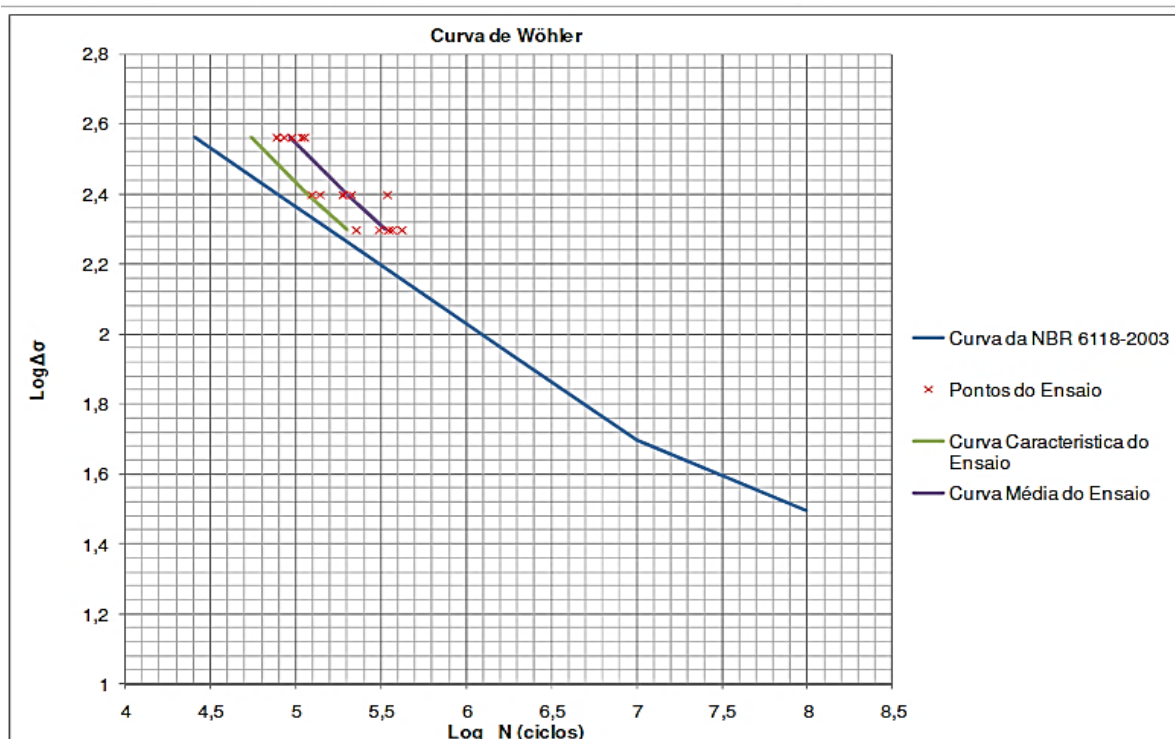
Por fim, nas figuras 25 e 26, apresentam-se as curvas comparativas com a NBR 6118, das barras e telas.

Figura 25 – Curvas de Wöhler comparativa entre barras isoladas e NBR 6118 – CA-50



Fonte: Dantas (2010)

Figura 26 – Curvas de Wöhler comparativa entre telas soldadas e NBR 6118 – CA-50



Fonte: Dantas (2010)

Dantas (2010) destaca que ao apresentar os resultados das curvas médias e características, a análise de curvas médias acaba representando um desempenho mais próximo das barras envolvidas com o concreto, já que as barras em conjunto no interior do concreto se comportam melhor do que as barras isoladas como no ensaio ao ar.

Ele chega à conclusão que: com base nos valores de variação de referência que foram utilizados do CEB-FIP Model Code 1990 (1991) o comportamento dos aços brasileiros se mostrou melhor que os dos europeus. A norma brasileira (NBR 6118:2014) apresenta-se com valores a favor da segurança em relação aos resultados encontrados. E o processo de soldagem acabou por gerar uma concentração de tensões que acelerou as rupturas por fadiga, mas seus resultados ainda se encontram acima da previsão da norma.

3 VIABILIZAÇÃO DA ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS ENSAIOS DE FADIGA

Para a viabilização do uso da máquina do IFPI na realização de ensaios com vergalhões houve a necessidade da fabricação de um dispositivo para adequação da máquina de ensaios mecânicos de fadiga ao diâmetro requerido de vergalhões CA-60. O mordente desenvolvido para este trabalho foi projetado utilizando o software SolidWorks. Foram fabricados três dispositivos de acoplamento, obtendo-se sucesso total no terceiro protótipo, que garantiu a estabilidade do corpo de prova, possuindo a resistência suficiente para a realização do ensaio.

O Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI) possui dentre os seus diversos equipamentos, uma máquina destinada à realização de ensaios dinâmicos e estáticos. A NBR 6118 (ABNT, 2014) descreve ciclagem e referências de resistência à fadiga para aços CA-50. Porém não contempla informações mais específicas em relação ao aço CA-60, e não diferencia as resistências em relação à presença de soldas em vergalhões. Já a NBR 7478 (ABNT, 1982) determina características para ensaios para barras envolvidas por concreto, e não foca em ensaios que analisem as características destes vergalhões isolados ou "ao ar".

A referida máquina, uma SHIMADZU Servo Pulser, Modelo EHF-EV200K1-010-0A, permite a execução de testes relacionados à resistência dinâmica de barras ao ar, porém sua estrutura de acoplamento é adequada para peças de diâmetro 35mm, e com dimensões de corpo de prova que devam se acoplar aos apoios da máquina. Assim, foi desenvolvido um planejamento para promover a fabricação de um mordente que permitisse o correto acoplamento dos vergalhões de pequeno diâmetro a serem estudados à máquina de ensaio. Esta fabricação permitiu a realização da análise de fadiga desta tipologia de barra, que é aplicada nas construções em estruturas que recebem esforços dinâmicos, como lajes de pontes e outras obras afins, já que as análises semelhantes no Brasil ainda são restritas em relação à uma análise comparativa da influência do uso de telas soldadas ou barras isoladas, em aço CA-60. O aço CA-60 e suas características de fabricação são descritas pela NBR 7480 (2007).

As análises iniciais foram baseadas na pesquisa de Dantas (2010). Porém, como a máquina de realização do ensaio não permitia o acoplamento das barras, novas tipologias de mordentes adaptadas para a máquina do IFPI em questão foram necessárias. Dantas (2010) utilizou para seus ensaios mordentes desenvolvidos para uma máquina DARTEC de ensaios dinâmicos através dos estudos de BUELTA (2001).

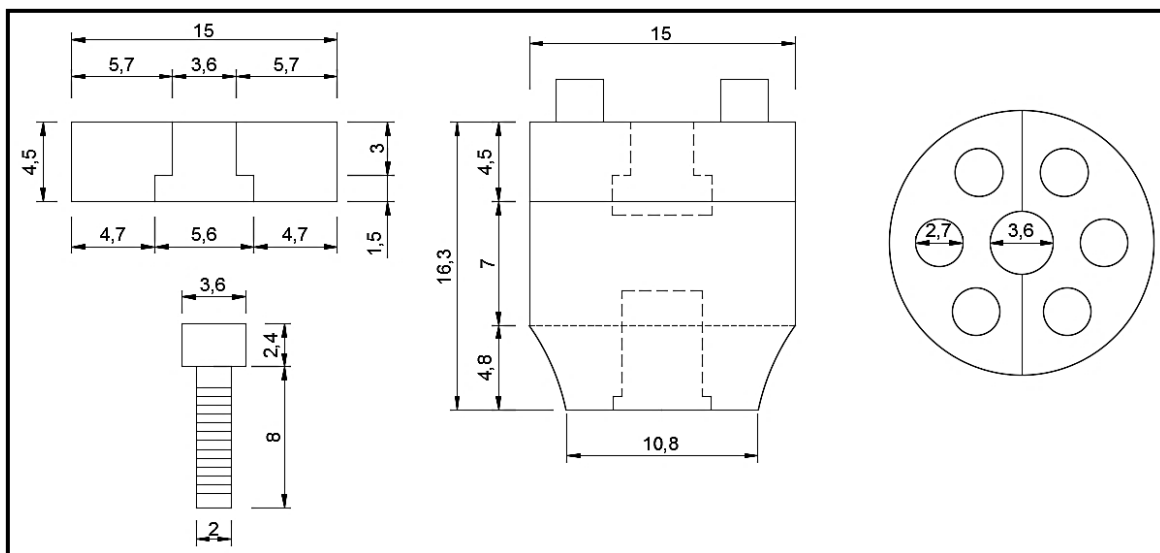
A máquina da SHIMADZU, possui garras para corpos de prova com a seguinte característica apresentada na Figura 27, tanto na parte inferior, quanto na superior. Observa-se que ela possui dois diâmetros internos que permitem o acoplamento de um corpo de prova mais robusto que os vergalhões utilizados em estruturas de concreto. Na Figura 28 há a descrição das dimensões destas garras da máquina que serviram como base para o projeto dos mordentes de adaptação para as barras isoladas de 8mm, em aço CA-60, que seriam ensaiadas.

Figura 27 – (a) Detalhe da garra da SHIMADZU com dois diâmetros internos para acoplamento de corpo de prova; (b) Garra acoplada na máquina com o corpo de prova padrão da máquina encaixado na mesma



Fonte: Autor (2016)

Figura 28 – Detalhe das garras da SHIMADZU (medidas em centímetros)



Fonte: Autor (2016)

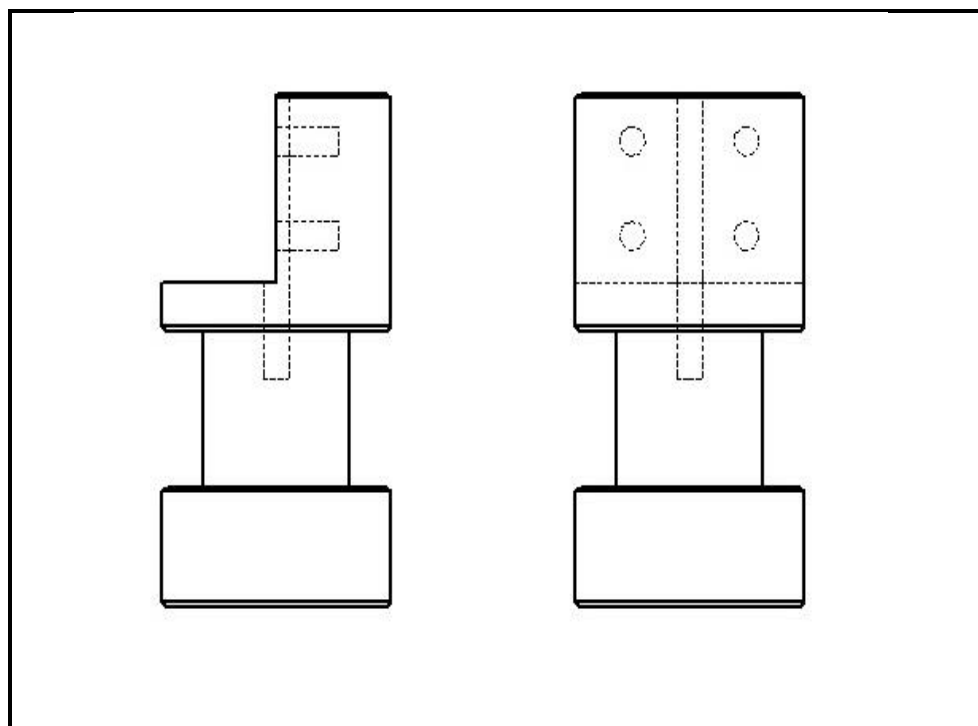
Foram projetados, assim, três tipos de mordentes: o primeiro possuía dimensões mais reduzidas e um comprimento de contato do mordente de 40mm, que fixava o vergalhão apenas com o rosqueamento de 4 parafusos M8. O segundo apresentou um mordente com dimensões mais robustas, com a inserção de uma cunha interna, duas semi canas de tubos de alumínio entre o vergalhão e o rosqueamento adicional de 4 parafusos M8, fato que aumentou a capacidade de atrito e fixação com o vergalhão a ser ensaiado. Já o terceiro possuía um sistema de acoplamento para encaixe de cunha/caixa cônica dos apoios dos vergalhões, que permitia uma maior mobilidade de aperto com a diminuição da concentração de tensões, permitindo uma melhoria de comportamento do corpo-de-prova durante o ensaio. Dos três tipos o último atingiu maior sucesso por não apresentar concentração de tensões no mordente, e não permitir escorregamento nas barras a serem ensaiadas.

A matriz escolhida para a produção destes mordentes foi o aço SAE 1045. O referido aço foi escolhido, por ser classificado como médio teor de carbono, com propriedades que destacam a boa resistência mecânica e tenacidade, bem como a soldabilidade e a usinabilidade. Os mordentes propostos foram moldados através do torno mecânico e finalizados na fresadora, no Laboratório de Mecânica do IFPI.

3.1 PRIMEIRO TIPO (MORDENTE 01)

O primeiro mordente projetado teve como base as dimensões do mordente a o diâmetro do vergalhão a ser ensaiado. Na Figura 29 pode-se observar sua configuração.

Figura 29 – Detalhe do primeiro mordente projetado



Fonte: Autor (2017)

Com a utilização de uma barra de aço SAE 1045, de diâmetro inicial de 60mm, a produção da peça foi iniciada pelo corte de duas matrizes para os mordentes superior e inferior, como observa-se na Figura 30.

Posteriormente, o tarugo foi faceado no torno mecânico até se atingir o aspecto e o diâmetro necessários para o correto encaixe na garra da máquina de ensaios de fadiga. A Figura 31 apresenta o processo de faceamento no torno, e a aferição do diâmetro da peça na garra a ser encaixada. Por fim, os cortes, acabamentos e inserção das roscas para os parafusos de fixação, foram finalizados na fresadora.

Figura 30 – Corte da peça em altura aproximada dos mordentes projetados



Fonte: Autor (2017)

Figura 31 – (a) Fabricação do mordente no torno; (b) Aferição das dimensões atingidas no torno



Fonte: Autor (2017)

Na Figura 32 pode-se observar os mordentes do primeiro tipo. Os mesmos foram acoplados no vergalhão a ser ensaiado e encaixados nas garras da máquina

de ensaios dinâmicos. Logo no início da execução do ensaio, houve o deslizamento do vergalhão o que não permitiu a realização do estudo de fadiga.

Figura 32 – (a) Mordente 01 acoplado na garra; (b) Deslizamento da barra na realização do ensaio (mordente 01)



Fonte: Autor (2017)

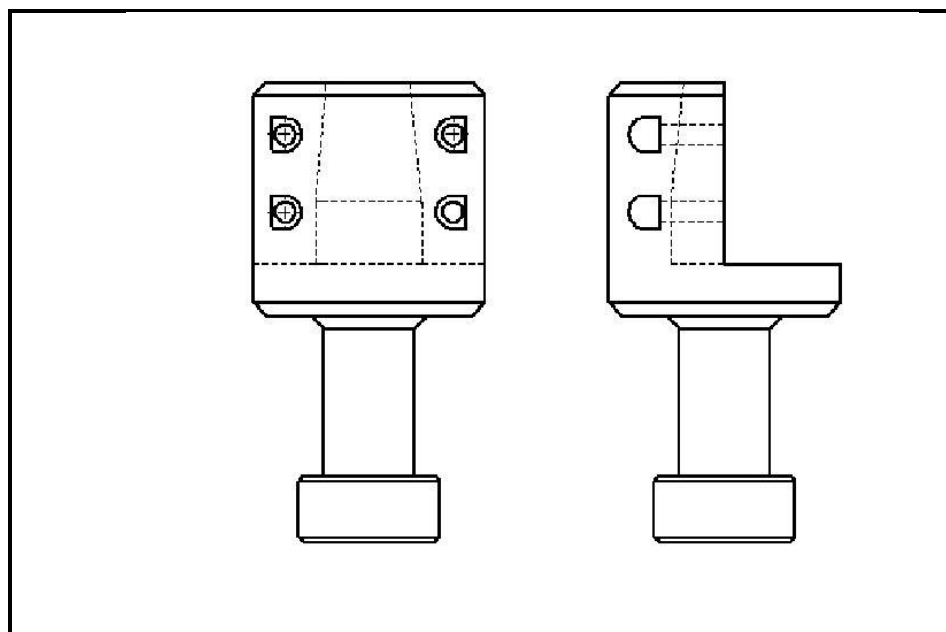
3.2 SEGUNDO TIPO (MORDENTE 02)

Para o segundo tipo de mordente projetado, um fator a ser evitado era o escorregamento que ocorreu com o Mordente 01. Assim, foi projetada uma nova estrutura com maiores dimensões que permitisse um maior atrito sem que o mesmo afetasse as características do vergalhão a ser fixado. Para uma melhor distribuição dos esforços de ligação entre o apoio e o corpo de prova, inseriu-se entre a cunha interna e o vergalhão uma semi cana de alumínio com ranhuras internas que permitiam uma melhor conformação para a barra isolada a ser ensaiada (Figura 33).

Assim, da mesma forma que o primeiro mordente, o mordente 02 foi cortado a partir de uma peça de aço SAE 1045, agora com diâmetro inicial de aproximadamente 100 mm, e teve suas dimensões adaptadas através do torno mecânico (Figura 34). Posteriormente, a peça foi detalhada por meio de uma

fresadora para chegar às suas características finais de acoplamento. Internamente à peça projetada foi encaixada a cunha para permitir um maior aperto do vergalhão no novo mordente, e este por sua vez vinha envolvido por semi canas de alumínio com ranhuras no seu interior para garantir que não houvesse deslizamento. (Figura 35).

Figura 33 – Segundo mordente projetado



Fonte: Autor (2017)

Figura 34 – Matriz do mordente 02 em processo de adaptação pelo torno



Fonte: Autor (2017)

Figura 35 – (a) Semi-cana de alumínio com ranhuras internas ; (b) – Cunha interna ao mordente, o alumínio e o vergalhão



Fonte: Autor (2017)

A Figura 36 permite a observação dos mordentes de tipo 02 presos às garras da máquina, com o corpo de prova fixado. Com esta configuração procedeu-se à realização do ensaio de fadiga no material e observou-se que não houve deslizamento. Como o ensaio ocorreria com telas soldadas e com barras isoladas passou-se a realizar os ensaios dinâmicos com as duas tipologias. Com o uso das telas soldadas o mordente 02 projetado comportou-se da forma esperada, sem escorregamentos ou ruptura na sua base do apoio, sendo que essa ruptura da tela ocorria exatamente no local de aplicação dos pontos de solda. Porém, para os casos das barras isoladas, este mordente não atendeu aos requisitos esperados já que havia ruptura da barra dentro do próprio mordente, o que descaracterizaria o ensaio de fadiga.

Assim foi necessária a continuação do estudo de adaptação para se produzir um mordente com capacidade de fixação sem concentração de tensões, que permitisse a evolução dos ensaios de forma mais real.

Figura 36 – Mordentes tipo 02 realizando a fixação do vergalhão na máquina



Fonte: Autor (2017)

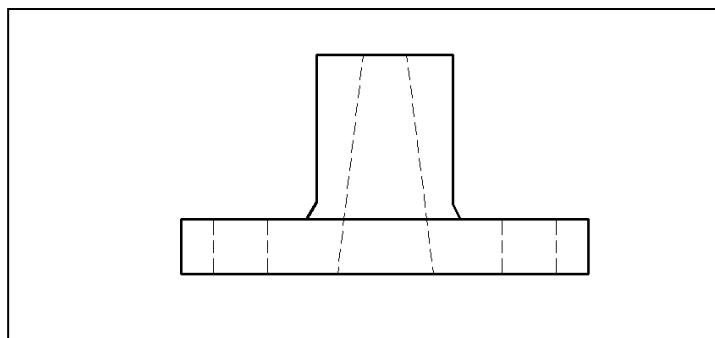
3.3 TERCEIRO TIPO (MORDENTE 03)

Para o terceiro tipo de mordente projetado o objetivo era diminuir a concentração de tensões no mordente, que havia ocorrido no segundo tipo de mordente. O fato de as barras possuírem uma resistência maior à fadiga do que as telas, acabou por gerar resultados de ruptura no mordente, enquanto as telas rompiam nas soldas.

Neste terceiro projeto optou-se por moldar uma estrutura de acoplamento que tivesse a característica cônica, mas que essa conicidade funcionasse de forma a ajudar no aperto da fixação com uma melhor distribuição de tensões. A semi-cana de alumínio também continuou a ser inserida entre a cunha e o vergalhão, com o intuito de ajudar na diminuição da concentração de tensões.

O esquema do terceiro mordente projetado encontra-se na Figura 37. Já a Figura 38 mostra o mordente já fabricado.

Figura 37 – Esquema do terceiro mordente projetado



Fonte: Autor (2017)

Figura 38 – Vista do mordente fabricado (Fixador cônico e cunha com semi-canais de alumínio)



Fonte: Autor (2017)

Durante os testes observou-se que este formato permitiu a ruptura das barras fora do mordente (Figura 39), mas este fato ocorria sempre quando havia a utilização de uma nova dupla de semi-canais para cada ensaio. O aproveitamento de alumínios em novos ensaios acabava por gerar, com a reutilização, uma concentração de tensões e uma ruptura do alumínio.

Figura 39 – Ruptura da barra fora do mordente



Fonte: Autor (2017)

Outro fato que se notou foi a dificuldade de evitar escorregamento da barra no início do ensaio, devido às características de aderência dos vergalhões. A NBR 7480 (2007) relacionada com a fabricação de vergalhões para concreto armado destaca que fios de aço CA-60 de diâmetros inferiores a 10mm não necessitam de nervuras ou entalhes. Como os vergalhões que foram ensaiados são de diâmetro 8mm, alguns fabricantes possuem barras com nervuras menores, enquanto outros apresentam esse material com uma melhor aderência.

Com este terceiro mordente, já que sua configuração objetiva a diminuição da concentração de tensões, foi realizado o teste para início dos ensaios com barras de dois fabricantes (Fabricante A e Fabricante B). As barras do Fabricante A possuíam nervuras bem mais reduzidas (mas dentro das referências normativas), o que impedia o início dos ensaios de fadiga, devido ao escorregamento do vergalhão. Já as barras do Fabricante B apresentavam nervuras bem mais protuberantes, o que viabilizou a execução do ensaio e da ruptura fora do mordente, deste ensaio no IFPI, somente para este fabricante (Figura 40).

Figura 40 – Vista das nervuras dos aços CA-60 (Aço da esquerda: Fabricante B; aço da direita: Fabricante A)



Fonte: Autor (2017)

O Fabricante A é de fabricação nacional e, apesar da não possibilidade da execução do ensaio de fadiga nas barras do mesmo devido ao baixo atrito entre o mordente produzido e o vergalhão, foram realizados os outros ensaios complementares a título de base para os resultados encontrados ao longo deste trabalho.

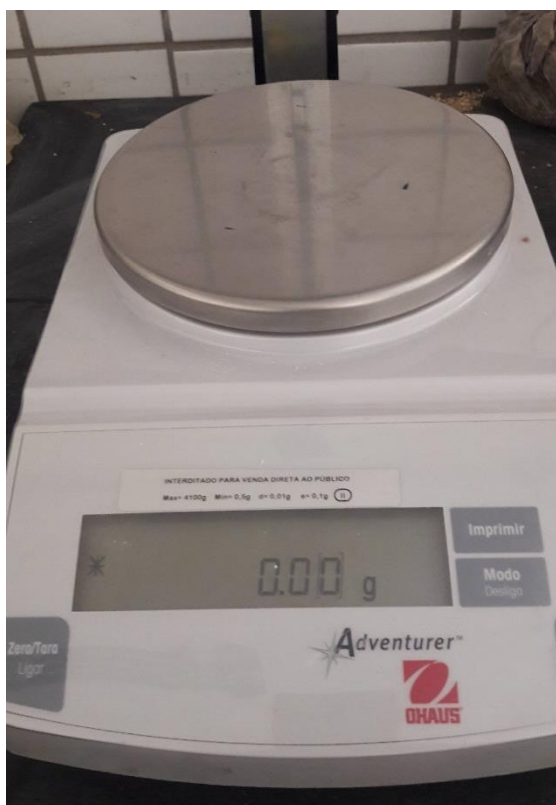
O Fabricante B é de produção local, e de acordo com suas características de aderência, todos os ensaios de fadiga deste estudo foram realizados com seus vergalhões.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL DOS ENSAIOS

4.1 VERIFICAÇÃO DA MASSA NOMINAL

A verificação da massa nominal foi calculada utilizando-se a medição através de uma balança de precisão digital da “Ohaus” de graduação 0,01 gramas e erro de 0,1 gramas, com capacidade entre 0,5 gramas a 4100 gramas. Os aços dos dois fabricantes, A e B, foram pesados na balança, e medidos seus comprimentos por meio de um paquímetro digital. A balança encontra-se na Figura 41.

Figura 41 – Balança de precisão



Fonte: Autor (2017)

Com a média dos comprimentos encontrados aferiram-se as áreas encontradas para a comparação com as variações recomendadas pela NBR 7480: 2007 - Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação. Foram encontrados a massa e comprimento médios das barras a serem ensaiadas, e calculadas as áreas médias das barras de cada fabricante através da seguinte formulação:

$$\text{Área da seção da barra} = \frac{\text{Massa média}}{(\text{Comprimento Médio} \times \text{Peso Específico})} \quad (7)$$

O peso específico do aço é de 7850 kg/m³.

4.2 ENSAIO DE DUREZA

A máquina utilizada neste trabalho, presente no Laboratório de Materiais do IFPI, é o durômetro 'Newage', apresentada na Figura 42. O equipamento possui um mostrador digital.

Figura 42 – Durômetro 'Newage'



Fonte: Autor (2017)

A referida máquina traz a seguinte tabela como referência inicial para os ensaios a se realizar (Tabela 8):

Tabela 8 – Diferentes escalas de dureza

Escala Rockwell	kg	Penetrador
A	60	Diamante
B	100	Bola de 1/16"
C	150	Diamante
D	100	Diamante
E	100	Bola de 1/8"
F	60	Bola de 1/16"
G	150	Bola de 1/16"
K	150	Bola de 1/8"

Fonte: Durômetro 'Newage' do Laboratório de Materiais do IFPI (2017)

O ensaio de dureza Rockwell do Laboratório do IFPI, foi realizado por meio da Escala "A", descrita no Quadro 6.

Quadro 6 – Escalas de dureza Rockwell

Escala	Cor da escala	Carga maior	Penetrador	Faixa de utilização
A	Preta	60	Diamante cone 120°	20 a 80 HRA
C	Preta	150	Diamante cone 120°	20 a 70 HRC
D	Preta	100	Diamante cone 120°	40 a 77 HRD
B	Vermelha	100	Esfera aço 1,5875 mm	20 a 100 HRB
E	Vermelha	100	Esfera aço 3,175 mm	70 a 100 HRB
F	Vermelha	60	Esfera aço 1,5875 mm	60 a 100 HRF
G	Vermelha	150	Esfera aço 1,5875 mm	30 a 94 HRG
H	Vermelha	60	Esfera aço 3,175 mm	80 a 100 HRH
K	Vermelha	150	Esfera aço 3,175 mm	40 a 100 HRK

Fonte: Bertoldi (2014)

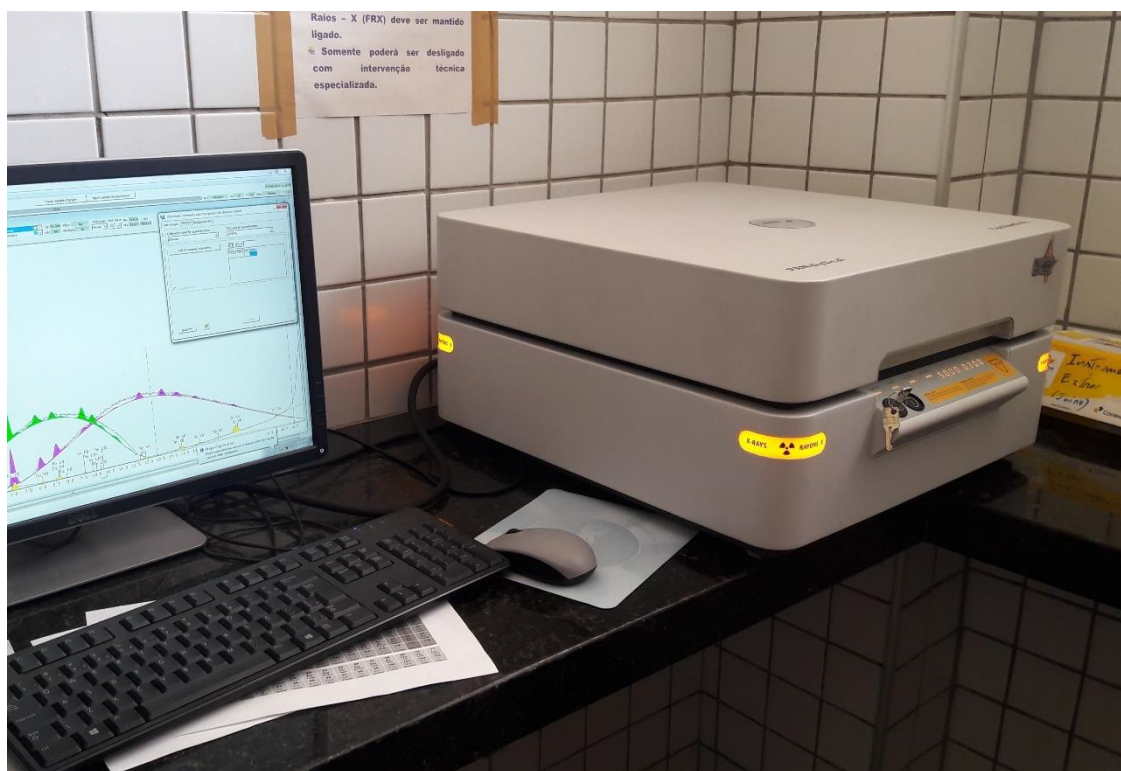
Os vergalhões de ambos os fabricantes receberam o embutimento, com o auxílio de um líquido autopolimerizante, permitindo um melhor manuseio para a execução do lixamento. Este lixamento era necessário para oferecer uma superfície plana às amostras, que permitisse melhor aferição da penetração.

O aço base para o vergalhão CA-60 é o 1022. Assim, para a Escala 'A' utilizou-se o cônico de diamante, com 120° de conicidade. Foram realizados três ensaios em cada uma das duas amostras retiradas de vergalhões dos dois fabricantes analisados. Na análise de resultados foi aferida a dureza para as outras escalas através de correlação.

4.3 ENSAIO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

Através da análise dos comprimentos de onda e das intensidades das radiações emitidas pelos elementos foi possível obter os elementos mais presentes nas amostras dos dois fabricantes. No Laboratório de Materiais do IFPI através da fluorescência dos raios-X, foi possível verificar a quantificação dos principais elementos em cada amostra (Figura 43). A análise é realizada através de scanneamento das amostras

Figura 43 – Espectômetro de Raio-X



Fonte: Autor (2017)

4.4 ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO AÇO

Foi realizada a caracterização do material para posterior análise nos Microscópios Óptico e Eletrônico de Varredura. A peça com a disposição das seções transversal, longitudinal e de solda foi cortada previamente, e submetida ao embutimento para uma melhor trabalhabilidade no processo de preparo (Figura 44).

Figura 44 – Processo de embutimento da peça: (a) materiais utilizados; (b) peça embutida



Fonte: Autor (2017)

Com o auxílio de uma politriz foi utilizada a graduação de lixas para o tratamento da superfície (180, 220, 320, 400, 600 e 1200). E posteriormente foi realizado o polimento, com o auxílio de alumina de 1 μm . Por fim executou-se o ataque com Nital 2% durante 15 segundos.

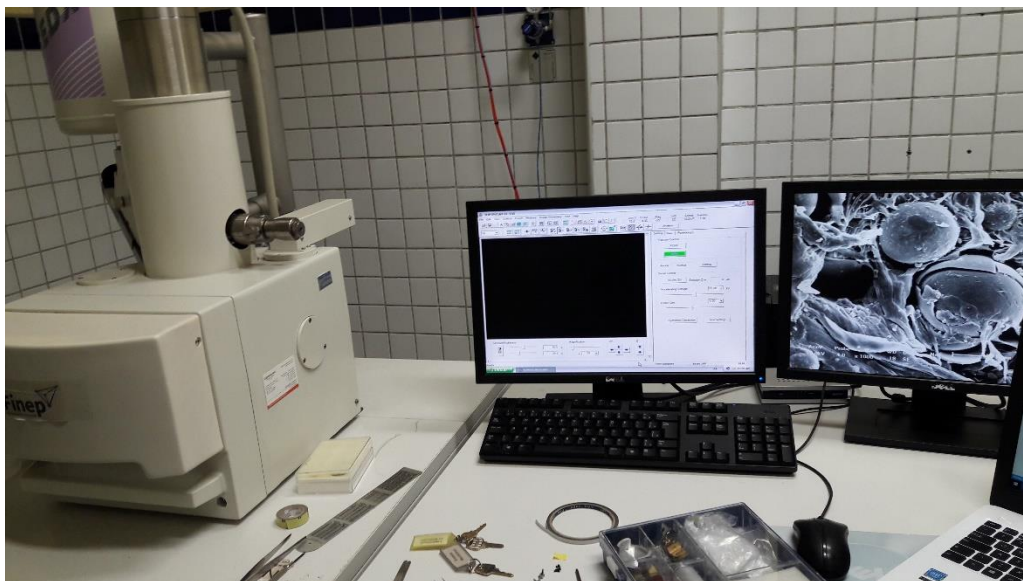
Nas figuras 45 e 46, pode-se visualizar os dois microscópios utilizados nas análises da peça. No Microscópio óptico foram utilizadas as aproximações de 10 vezes e 40 vezes, nas três regiões estudadas. Já no Microscópio Eletrônico de Varredura, os registros foram feitos em aproximação de 700 vezes.

Figura 45 – Amostra no Microscópio Óptico



Fonte: Autor (2017)

Figura 46 – Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Autor (2017)

4.5 ENSAIOS DE TRAÇÃO DOS VERGALHÕES

A máquina universal do Laboratório de Materiais do IFPI encontra-se apresentada na seguinte Figura 47. Ela é da marca Shimadzu, Autograph AG-X, com capacidade máxima de 250 kN.

Figura 47 – Máquina de ensaio de tração



Fonte: Autor (2017)

A máquina de ensaio de tração já possui mordentes para a fixação automática dos vergalhões a serem ensaiados (Figura 48).

Figura 48 – Máquina de ensaio de tração



Fonte: Autor (2017)

4.6 ENSAIOS DE FADIGA DOS VERGALHÕES

O Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI) possui dentre os seus diversos equipamentos, uma máquina destinada à realização de ensaios dinâmicos e estáticos. A referida máquina permitiu a execução de testes relacionados à resistência à fadiga de barras ao ar, com o objetivo de aferir uma análise comparativa de barras em aço CA-60, considerando-as de forma isolada, ou unidas por solda, para a aplicação em estruturas de concreto. A máquina citada é uma SHIMADZU Servo Pulser, Modelo EHF-EV200K1-010-0A.

A máquina permite o desenvolvimento de ensaios dinâmicos e estáticos com a análise de resultados que se referem à segurança relacionada à vida útil do material ensaiado. Essa análise possui grande importância para permitir o desenvolvimento de produtos e um controle de qualidade mais elaborado, com alta precisão. A SHIMADZU opera hidraulicamente, com grande eficiência e ocupando um espaço compacto no Laboratório do IFPI. É recomendada para uma grande faixa de aplicações de ensaios de fadiga e testes para a análise da resistência à fratura, contemplando estruturas com grande rigidez.

As características gerais da máquina de ensaio Servo-Pulser ou Servo-Hidráulica são: opera hidraulicamente para gerar ensaios que apliquem grandes forças em um design compacto; possui uma válvula de alta performance que permite rápidas variações de ensaios com força e velocidade; a máquina foi construída com materiais resistentes que previnem o surgimento de flambagem nos materiais de ensaio; há diversas funções de segurança com alarme nas operações de ensaio; e permite variedade de aplicações de testes. Na figura 49 observa-se o esquema geral da máquina e sua montagem inicial com apoios que permitem ensaios de fratura. Porém, como o objetivo deste trabalho é a análise do comportamento à fadiga dos materiais, os mordentes da máquina adquirida pelo IFPI não permitem a fixação dos vergalhões aqui estudados, sendo necessária a produção de mordentes específicos, já descritos anteriormente, para esta pesquisa.

Figura 49 – Servo-pulser - IFPI



Fonte: Autor (2017)

A configuração básica de máquinas servo-hidráulicas compreende:

- a) O equipamento principal – que permite a montagem do mecanismo de carregamento;

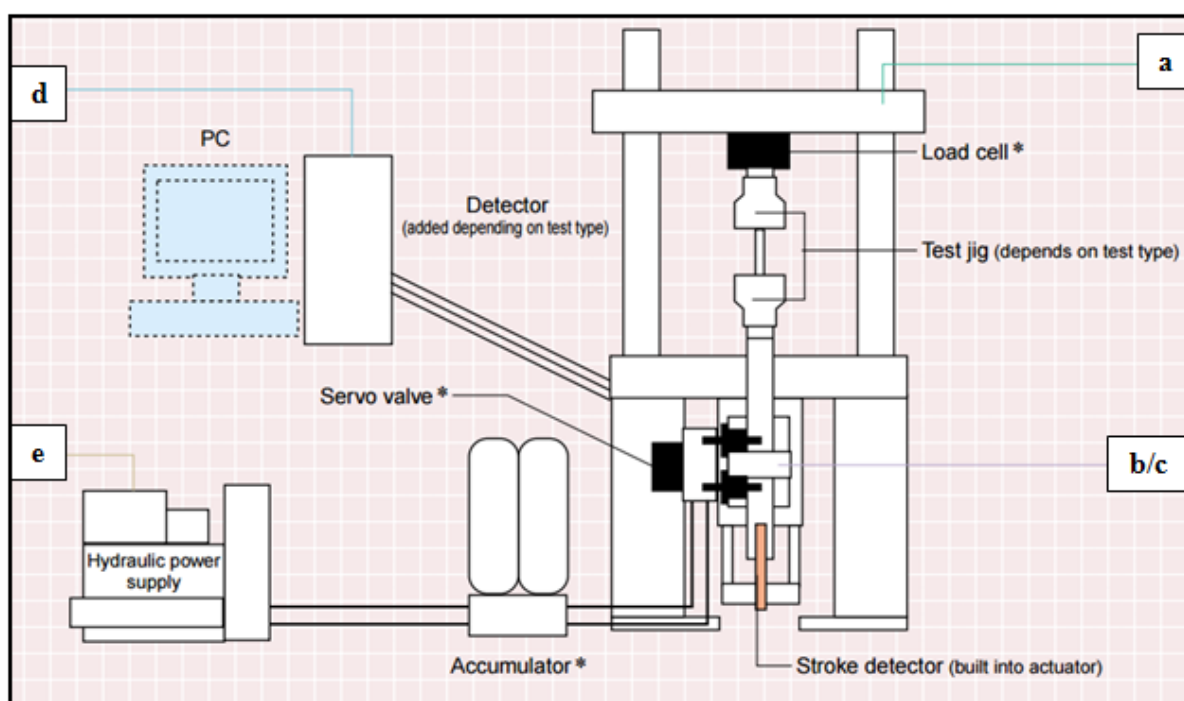
b) Controlador – que apresenta o resultado dos sinais de medição; no caso da máquina de ensaio do IFPI ela utiliza o Controlador 4830 (Tipo V);

c) e d) Atuadores – fornecem a carga para a máquina de ensaio – a máxima força de teste da EHF-E possui um limite de 200 kN para ensaio dinâmico e 240 kN para estático;

e) Fornecimento de energia hidráulica – para se atingir as forças necessárias aos ensaios.

O esquema geral da Figura 50 permite a visualização das configurações descritas anteriormente, com suas respectivas localizações no equipamento.

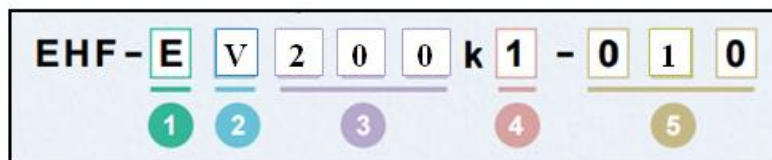
Figura 50 – Esquema Geral.



Fonte: Servo Pulser General Catalogue (s/d)

A referência do modelo da SHIMADZU EHF-E do Laboratório de Ensaios Mecânicos do IFPI descreve as suas características específicas para a realização dos ensaios. O modelo possui a descrição: EHF-EV200 K1-010-0A. A combinação apresentada possui códigos que descrevem as funções da máquina (Figura 51).

Figura 51– Códigos descritivos da máquina.



Fonte: Servo Pulser General Cataloguer (s/d) (Adaptado pelo autor)

Na figura 51, verificam-se os códigos de referência do modelo que significam:

- E: Esta tipologia de máquina testa corpos de prova pequenos, com força de até 200kN em ensaios dinâmicos;
- V: Representa o Controlador 4830 – compacto e que possui tela LCD e painel de toque – gera uma variedade de ondas e apresenta o controle das medições do ensaio;
- 200: é a força máxima aplicada, em kN, para ensaios dinâmicos; os ensaios estáticos apresentam a máxima força de 240 kN;
- 1: a precisão da máquina é de 25 mm;
- 010: está ligada a descrição QF-10B, representando a frequência e amplitude permitidas.

As características das curvas de amplitude representam graficamente os testes realizados. Para a máquina em análise, estas características são determinadas a partir da capacidade do atuador, da potência hidráulica, da vazão nominal e das características de frequência da válvula. Para selecionar o sistema ideal, deve-se confirmar as características de amplitude em conformidade com as condições de ensaio. A frequência pode ser limitada pelas características do corpo de prova a ser ensaiado.

As características de amplitude são calculadas usando as características típicas da válvula servo. Diferenças de até 10% podem ser encontradas ao longo do eixo de frequência. Para a máquina EHF-E, dependendo da carga máxima e da relação frequência/amplitude se chega à relação gráfica a seguir. Essa relação representa a velocidade máxima permitida para a máquina de acordo com sua capacidade geral. Essa velocidade depende também da carga a ser aplicada. Caso a máquina em questão seja utilizada em sua máxima carga de 200 kN, conseguir-se-ia uma

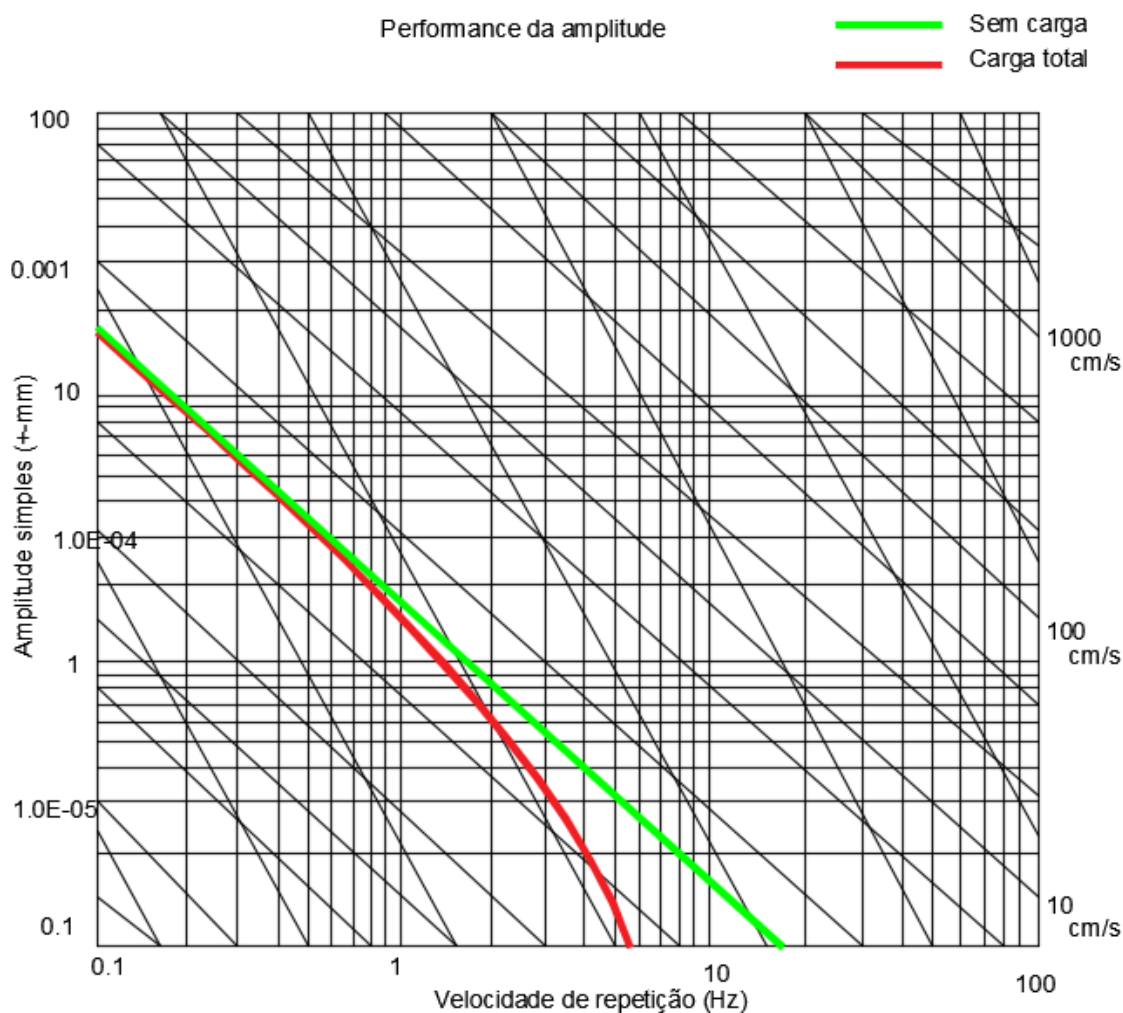
velocidade máxima de ensaio abaixo de 1cm/s, não se chegando a 10Hz, que poderia ser a máxima frequência aplicada para vergalhões, como já citado no Capítulo 2.

A amplitude simples, definida pelo alongamento máximo que a peça teria ao longo do ensaio, foi calculada pela seguinte fórmula, que considera a variação de tensão ($\Delta\sigma$), o comprimento inicial da peça (L_o), e suas relações com o módulo de elasticidade do material (E):

$$Amplitude = \frac{\Delta\sigma \cdot L_o}{E} \quad (8)$$

O gráfico a seguir (Figura 52) apresenta a relação amplitude versus frequência, para uma unidade de onda senoidal na carga nominal.

Figura 52– Amplitude versus frequência QF-10B (Máquina do IFPI)



Fonte: Adaptado do Servo Pulser Manual (s/d)

Considerando que o aço CA-60 possui o limite de escoamento padrão de $600\text{MPa} = 60\text{ kN/cm}^2$. A tensão máxima para a análise da fadiga é de 80% da tensão de escoamento, o que corresponderia a um valor de 48 kN/cm^2 ou 480 MPa . Para um aço de 8 mm, de vergalhão CA-60, a carga máxima a ser aplicada é de aproximadamente: $A_s=50,265\text{ mm}^2$; $P_{\max}=50,265 \times 480 = 24127\text{ N}$ ou $24,13\text{ kN}$.

Pelos gráficos da relação amplitude versus frequência observa-se que a máquina possui resistência máxima bem além dos resultados encontrados para os vergalhões a serem analisados, e que poderemos trabalhar com algumas possibilidades de frequências de acordo com a necessidade de análise.

Um frequência recomendada para ensaios de barras ao ar é de 10 Hz, limite máximo descrito pela norma Mercosul (1996), e por meio do fato destacado por Buelta (2002), que afirma que a frequência natural de vibração longitudinal do trecho de barra que forma o corpo-de-prova é muito superior a 10 Hz. A norma nacional NBR 7478:1982 não traz referências de frequências para barras ao ar. Indica apenas uma média de frequência de 4 Hz a 6 Hz para barras embebidas em concreto, que representam corpos mais pesados.

Para a análise da máxima frequência a se utilizar verificou-se pelos cálculos que as amplitudes máximas em milímetros permitiriam frequências mais baixas que 10 Hz devido às características da máquina, até para a carga máxima de 80% do escoamento do aço, que gira em torno de $24,13\text{ kN}$, que representa pouco mais de 10% da capacidade da máquina de fadiga.

A válvula servo é o grande cerne do sistema de testes hidráulicos. Pequenos sinais elétricos controlam a taxa de fluxo do fluido hidráulico de alta pressão sobre uma ampla gama de velocidades. Possui longa vida útil e é capaz de resistir a testes de fadiga de longo prazo. Neste modelo a válvula é a 76-004, taxa de fluxo nominal de 38 L/min , faixa de pressão de alimentação de 1.4 a 21 MPa . As células de carga usadas na servo-hidráulica são ideais para testes de fadiga devido à sua resistência à tração, compressão e cargas de flexão. Possuem baixa deformação sob carga e uma frequência natural alta. Todos os tipos permitem testes de até 10^9 ciclos. (SERVO PULSER MANUAL, s/d). O detector que é instalado dentro do atuador controla o deslocamento do pistão durante os testes e o atuador durante a montagem ou remoção dos corpos de prova.

5 RESULTADOS ENCONTRADOS

5.1 VERIFICAÇÃO DA MASSA NOMINAL

A Tabela 9 traz o cálculo das dez amostras estudadas, segundo a fórmula descrita no Capítulo 4.

Tabela 9 – Valores dos pesos e massas médias das amostras

Fabricante	Massa Média das Amostras (g)	Comprimento Médio das Amostras (mm)	Área Média das Amostras (mm ²)	Massa Média das Amostras (kg/m)
A	114,85	301,85	48,47	0,380
B	114,47	303,23	48,09	0,378

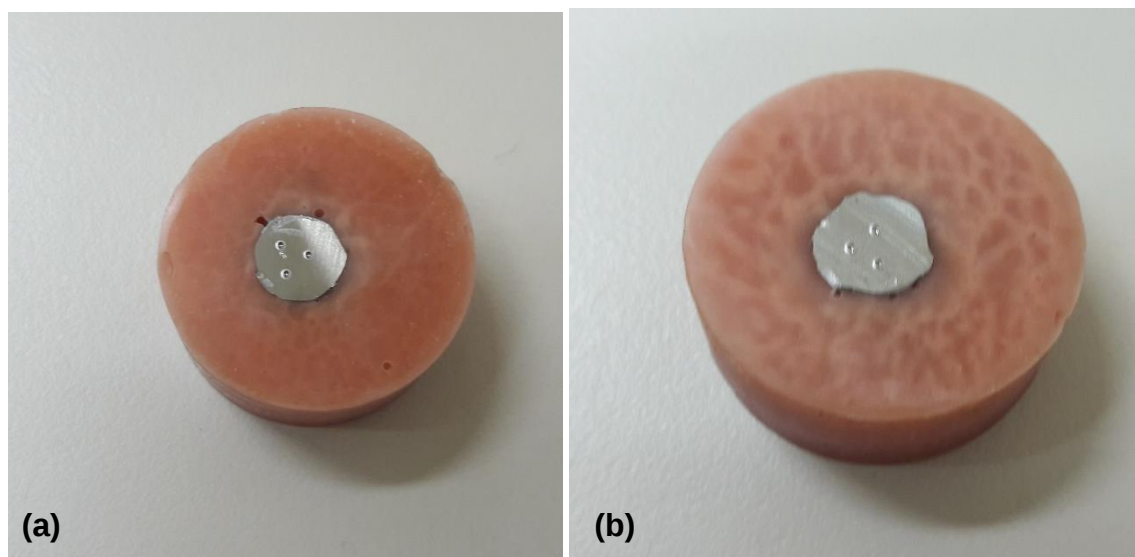
* Peso específico = 7850 kg/m³

Fonte: Autor (2017)

5.2 ENSAIOS DE DUREZA

Na figura 53, observam-se as perfurações realizadas nas duas amostras (sendo que a amostra (a) é do Fabricante A, e a amostra (b), do Fabricante B.

Figura 53 – (a) Ensaio de dureza realizados no Fabricante A; (b) – Ensaio de dureza realizados no Fabricante B



Fonte: Autor (2017)

As durezas encontradas estão representadas nas Tabelas 10 e 11. Para o Fabricante A, a média das durezas aferidas gerou um valor de 62,4 HRA. Para o Fabricante B, a média das durezas gerou um valor de 67,6 HRA.

Tabela 10 – Média da dureza Rockwell (HRA) – Fabricante A

Fabricante A	Dureza (HRA)
1	63,9
2	61,3
3	62,1
Média	62,4

Fonte: Autor (2017)

Tabela 11 – Média da dureza Rockwell (HRA) – Fabricante B

Fabricante B	Dureza (HRA)
1	75,7
2	65,6
3	61,4
Média	67,6

Fonte: Autor (2017)

5.3 ENSAIOS DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

No Laboratório de Materiais do IFPI através da fluorescência dos raios-X, foi possível verificar a quantificação dos principais elementos em cada amostra. Destaca-se que outros elementos em quantidades mínimas, em partes por milhão, foram identificados, mas não foram apresentados nas tabelas a seguir devido à pequena proporção (Tabelas 12 e 13).

Tabela 12 – Análise de FRX– Fabricante A

Elementos	%
Si	1,258
Mn	0,664
Fe	98,078

Fonte: Autor (2017)

Tabela 13 – Análise de FRX– Fabricante B

Elementos	%
Si	1,047
Mn	0,634
Fe	96,257
Al	1,086
Ag	0,206
La	0,134
Eu	0,441

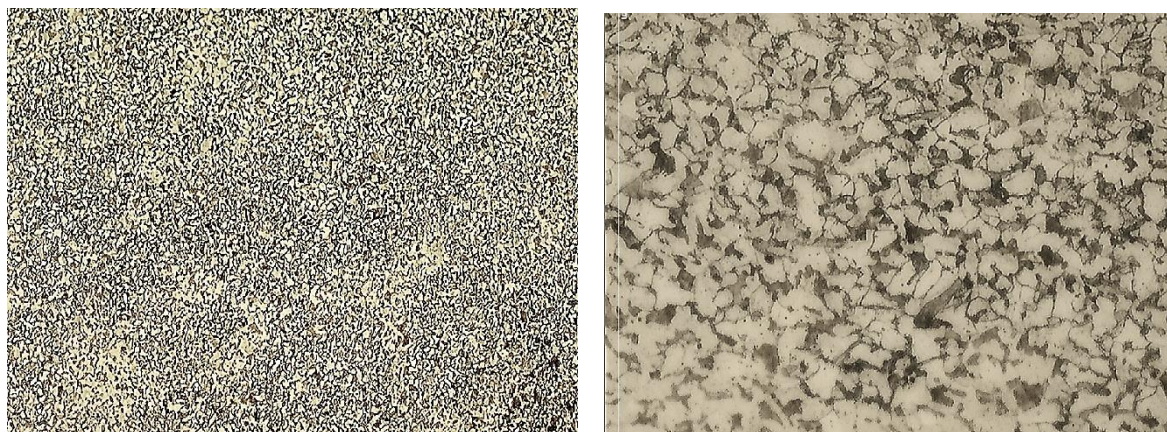
Fonte: Autor (2017)

5.4 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

As imagens produzidas no Microscópio Óptico encontram-se descritas nas Figuras 54, 55 e 56.

A Figura 54 mostra um trecho ampliado da seção transversal. A seção transversal apresenta um aspecto mais homogêneo que a seção longitudinal, com os grãos de ferrita e perlita em formato mais uniforme. O destaque para os grãos ferríticos claros e a perlite em tonalidade mais escurecida.

Figura 54 – (a) Seção Transversal (10x); (b) – Seção Transversal (40x)

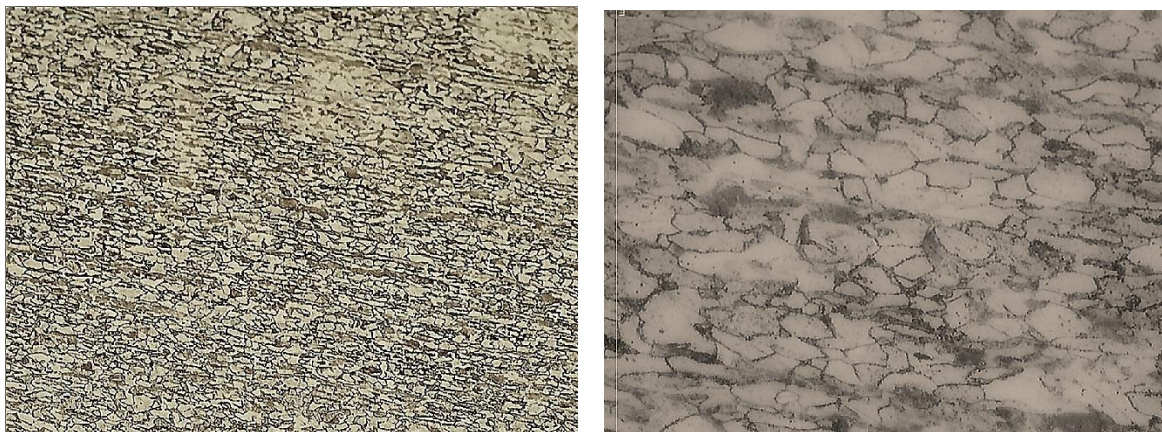


Fonte: Autor (2017)

Na Figura 55 observa-se a seção longitudinal do aço CA-60 ensaiado, com a característica de uma textura fibrosa que a peça adquiriu através da trefilação. Há grãos de ferrita e perlita com formato alongado, sendo que a ferrita apresenta coloração mais clara. Os grãos apresentam um aspecto mais alongado devido ao processo de produção do aço CA-60, que passa pela deformação a frio e

alongamento do material. Quanto mais laminada a peça, mais fina e homogênea se torna a textura.

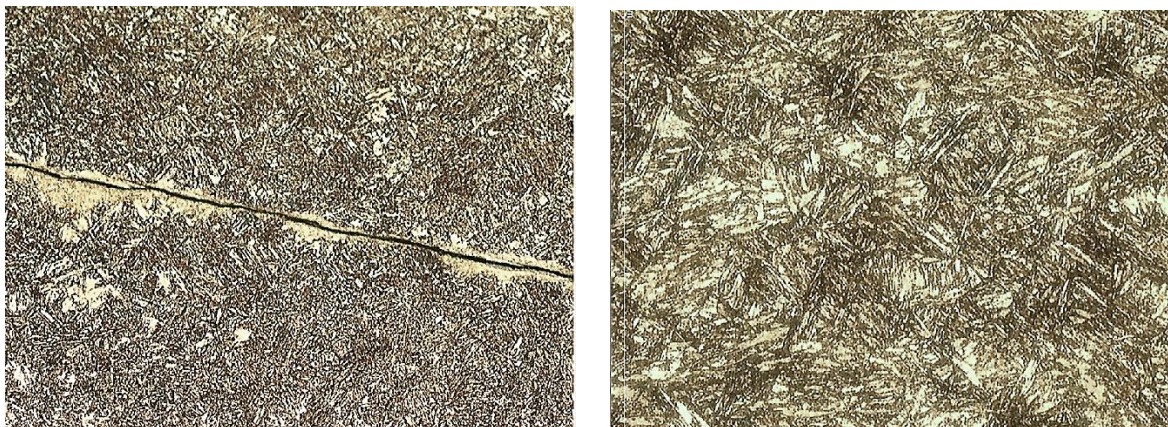
Figura 55 – (a) Seção Longitudinal (10x); (b) – Seção Longitudinal (40x)



Fonte: Autor (2017)

A Figura 56 é a região de solda, das telas, com grãos em formato mais pontiagudo devido ao aquecimento durante a execução da solda. Houve uma mudança microestrutural da região devido ao processo de aquecimento e junção das duas peças, com o aumento de grãos perlíticos, e grãos agulhados ao redor dos mesmos de cor clara (ferrita). A junta soldada apresenta uma microestrutura com clarificação diferenciada, e essas características urgem devido ao resfriamento muito rápido.

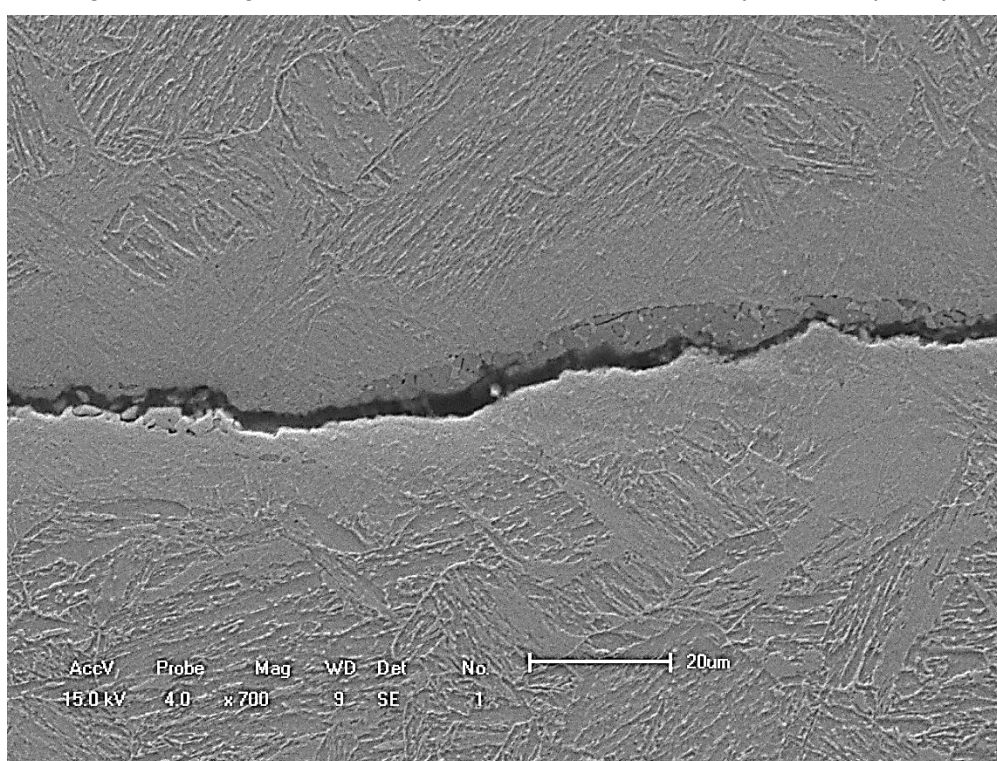
Figura 56 – (a) Solda (10x); (b) – Solda (40x)



Fonte: Autor (2017)

As imagens produzidas no Microscópio Eletrônico de Varredura também foram capturadas para as três regiões citadas. Também são visualizados na Figura 57, grãos com aspecto pontiagudo, na região de aplicação de solda. De forma clara pode-se visualizar a junta entre as duas barras que formam as telas. Apesar de uma estar na direção transversal e a outra, na longitudinal, na região que foi aquecida os grãos apresentam uma uniformidade microestrutural, com o desenho em formato mais agulhado.

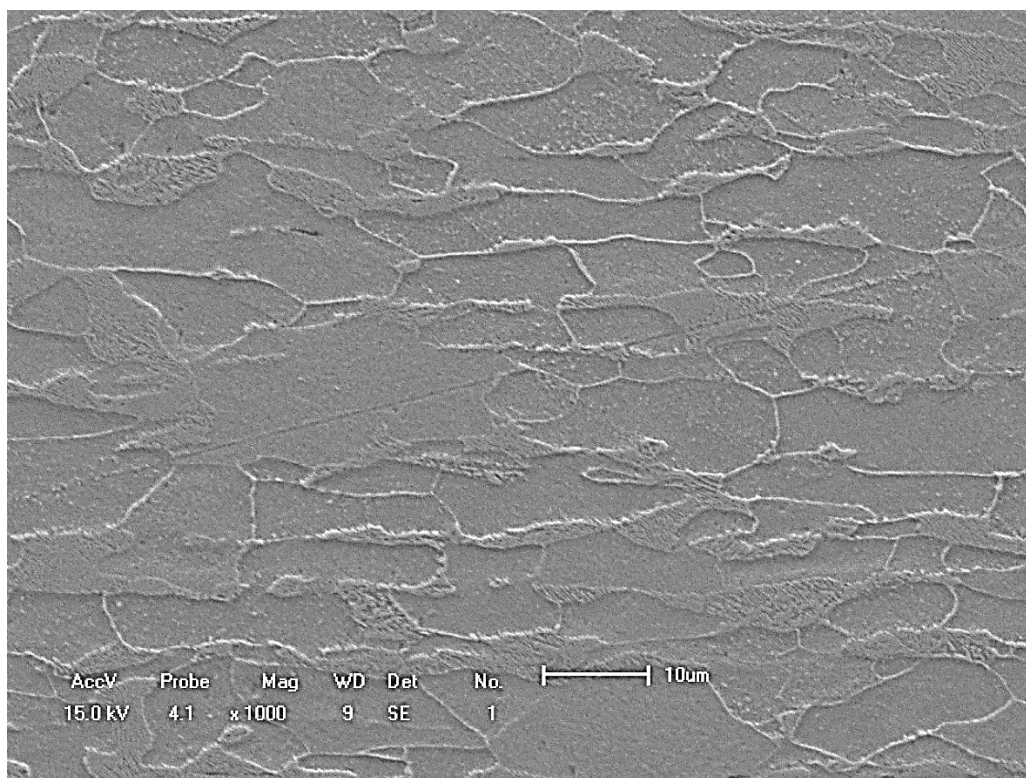
Figura 57 – Região da Solda (União entre as duas barras) – MEV – (x 700)



Fonte: Autor (2017)

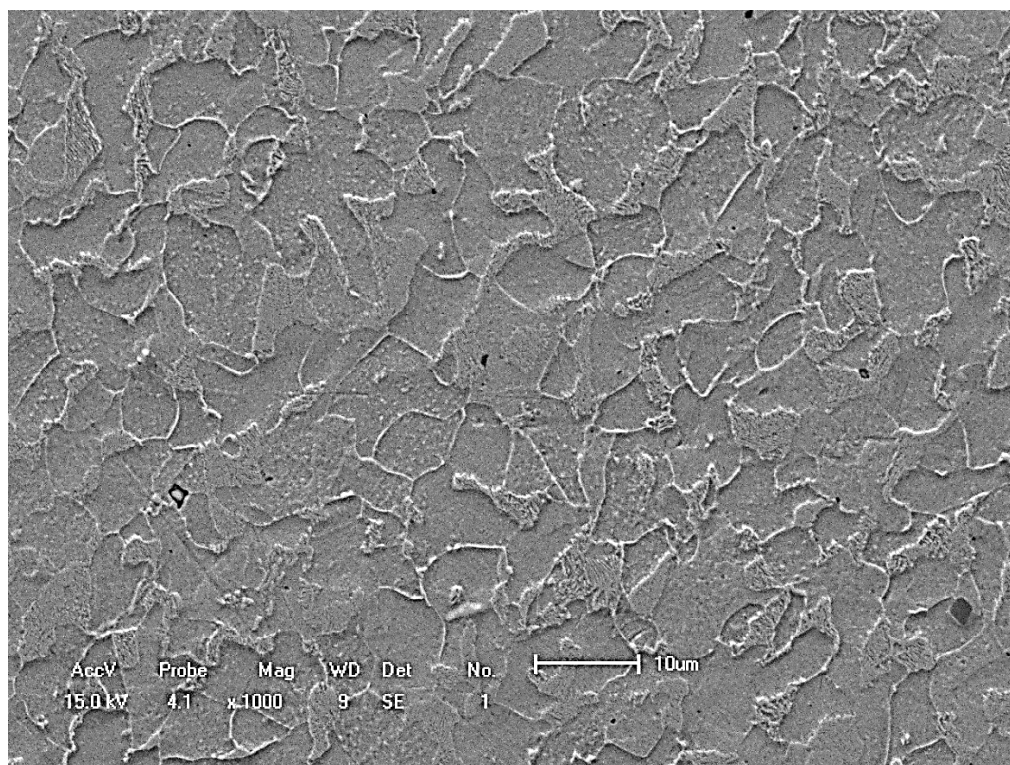
Já na Figura 58, a região longitudinal apresenta grãos mais alongados devido à trefilação, como também observou-se no microscópio óptico. E na Figura 59, a seção transversal com os grãos mais uniformizados, e sem alongamentos maiores.

Figura 58 – Seção Longitudinal – MEV – (x 1000)



Fonte: Autor (2017)

Figura 59 – Seção Transversal – MEV – (x 1000)



Fonte: Autor (2017)

5.5 ENSAIOS ESTÁTICOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Inicialmente, para uma aferição mais precisa de cada ponto de alongamento, frente à tensão aplicada, foi conjecturada a utilização de um medidor de alongamento analógico (Figura 60).

Figura 60 – Medidor analógico de alongamento



Fonte: Autor (2017)

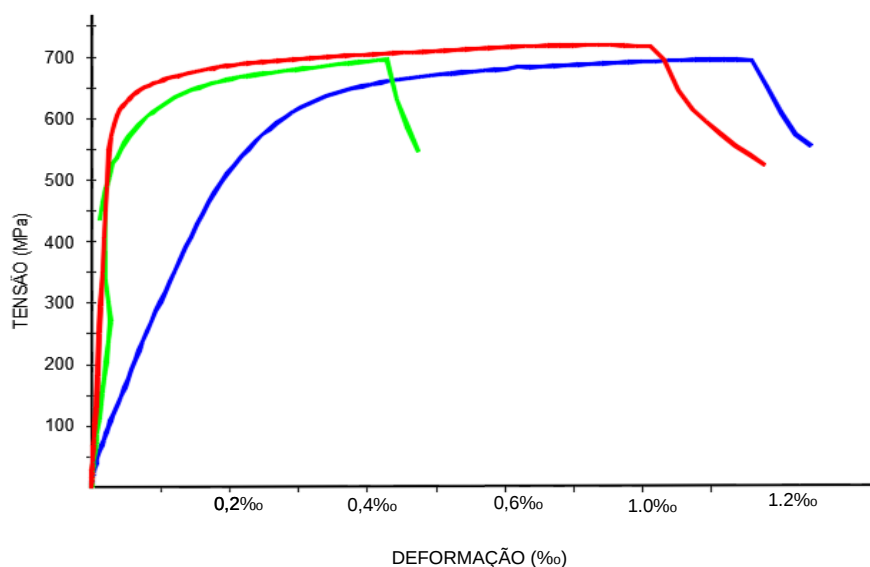
Porém, observou-se que os resultados destes medidores acabaram por apresentar disparidades entre si, e entre o resultado da máquina. O motivo das diferenças encontradas foi atribuído ao pequeno comprimento que a estrutura de suporte do relógio apresentava, e em alguns ensaios a estrição se apresentava de uma forma não centralizada. Em outros casos o relógio regredia no meio do ensaio, indicando essa zona de estrição fora da zona de medição do relógio.

Assim, o relógio com suporte ideal deveria possuir um comprimento igual ao inicial entre garras, o que não era o caso do medidor disponível. Nas figuras 61 e 62 podem ser visualizados os resultados entre medições de forma bem diferenciada, com padrões de módulos de elasticidade e escoamentos bem diferentes. A primeira figura (Figura 61) mostra os resultados encontrados com esta

medição para o Fabricante A, e a figura 62 para o Fabricante B, com diferenças semelhantes, indicando o erro de leitura. As barras ensaiadas possuíam comprimento total de 30cm, e eram realizadas as medições do comprimento entre garras na hora da execução de cada ensaio.

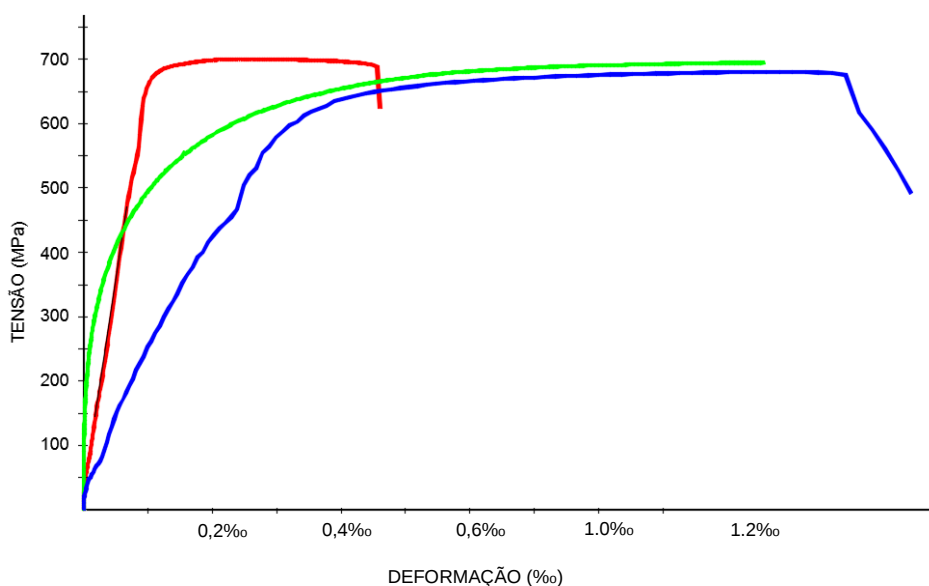
Assim, optou-se por adotar o gráfico gerado pela máquina, com a escala emitida pela mesma. Abaixo, os gráficos apresentam o resultado das 3 amostras ensaiadas.

Figura 61 – Disparidades na medição analógica de tração – Fabricante A – Três amostras



Fonte: Autor (2017)

Figura 62 – Disparidades na medição analógica de tração – Fabricante B – Três amostras



Fonte: Autor (2017)

Os ensaios de ruptura à tração foram realizados com a máquina universal para ensaios estáticos com características próprias para o acoplamento de vergalhões, do Laboratório de Materiais do IFPI.

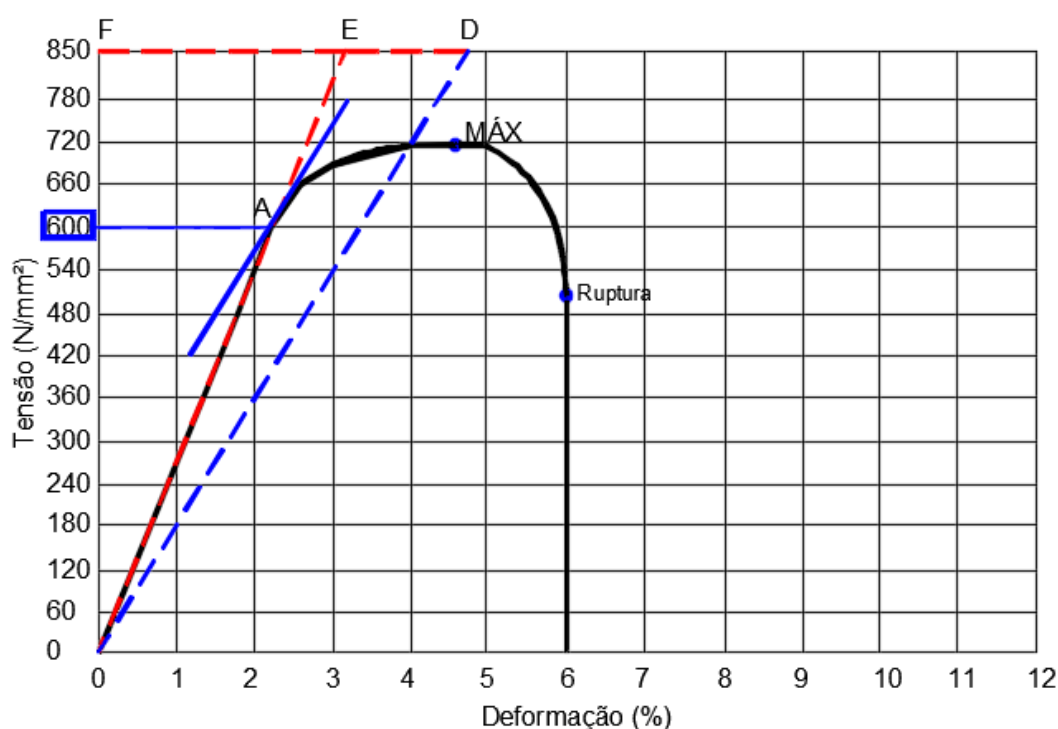
Os resultados dos gráficos de tensão versus deformação para as barras dos dois fabricantes encontram-se apresentados a seguir. Eles foram produzidos através da leitura de tensão e deformação da máquina. A velocidade utilizada foi de 1.2 mm/min de acordo com as indicações normativas, Capítulo 2.

Os gráficos foram gerados pela máquina de ensaio estático, e foram analisados seguindo o Método de Johnson, descrito no Capítulo 2, utilizando-se das projeções da reta da região elástica dos gráficos até se chegar ao valor final estimado de resistência a escoamento a se adotar.

5.5.1 Ensaios Estáticos para Barras

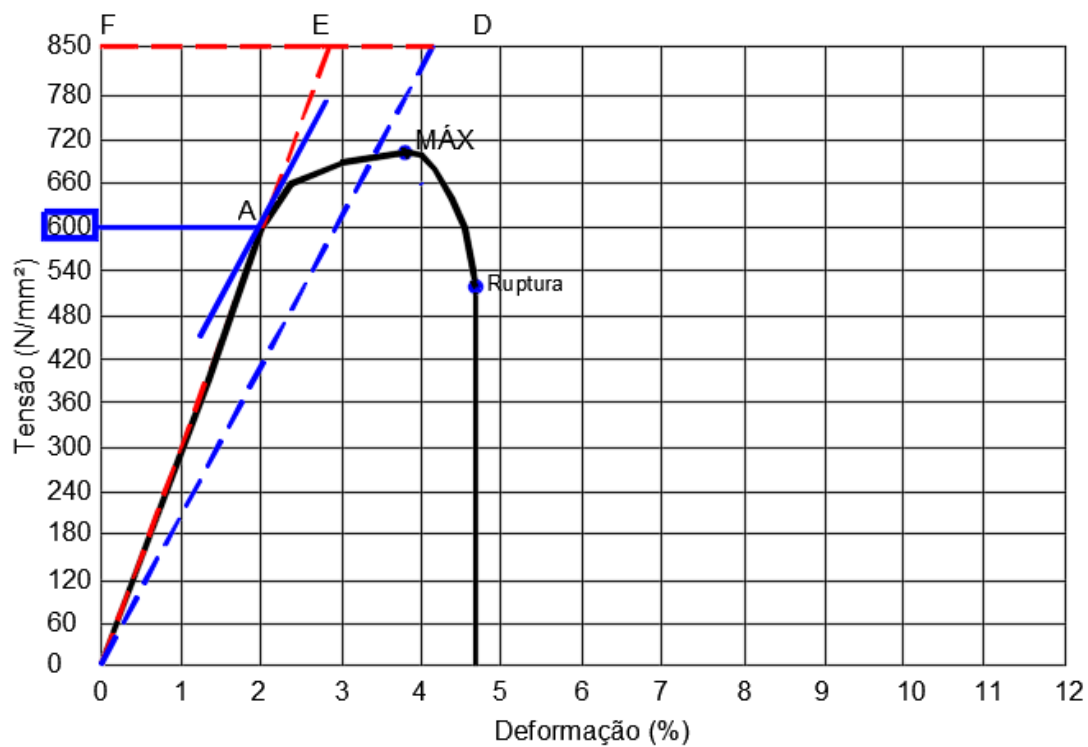
Para o Fabricante A foram realizados 3 ensaios com as amostras, como pode-se observar nos diagramas *tensão x deformação* das figuras 63 a 65.

Figura 63 – Amostra 1 – Ensaio de Tração – Fabricante A (Barra)



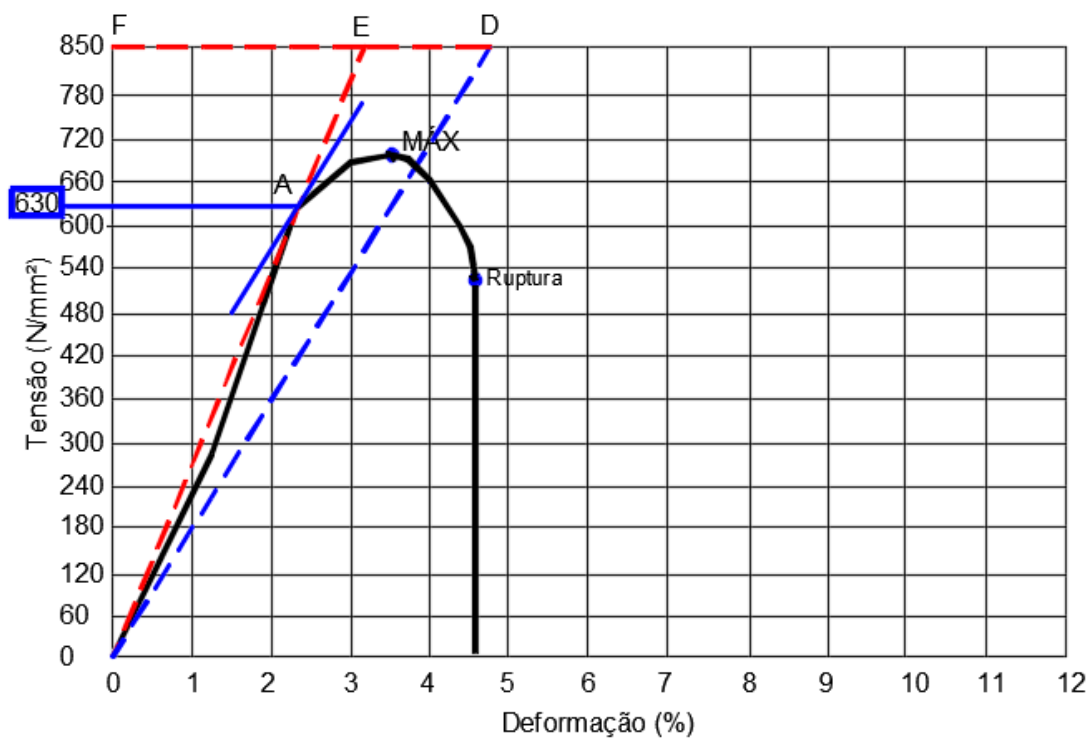
Fonte: Autor (2017)

Figura 64 – Amostra 2 – Ensaio de Tração – Fabricante A (Barra)



Fonte: Autor (2017)

Figura 65 – Amostra 3 – Ensaio de Tração – Fabricante A (Barra)



Fonte: Autor (2017)

A Tabela 14 mostra os resultados para as tensões de escoamento dos vergalhões 8 mm CA-60, seguindo as análises recomendadas, com base no método de Johnson.

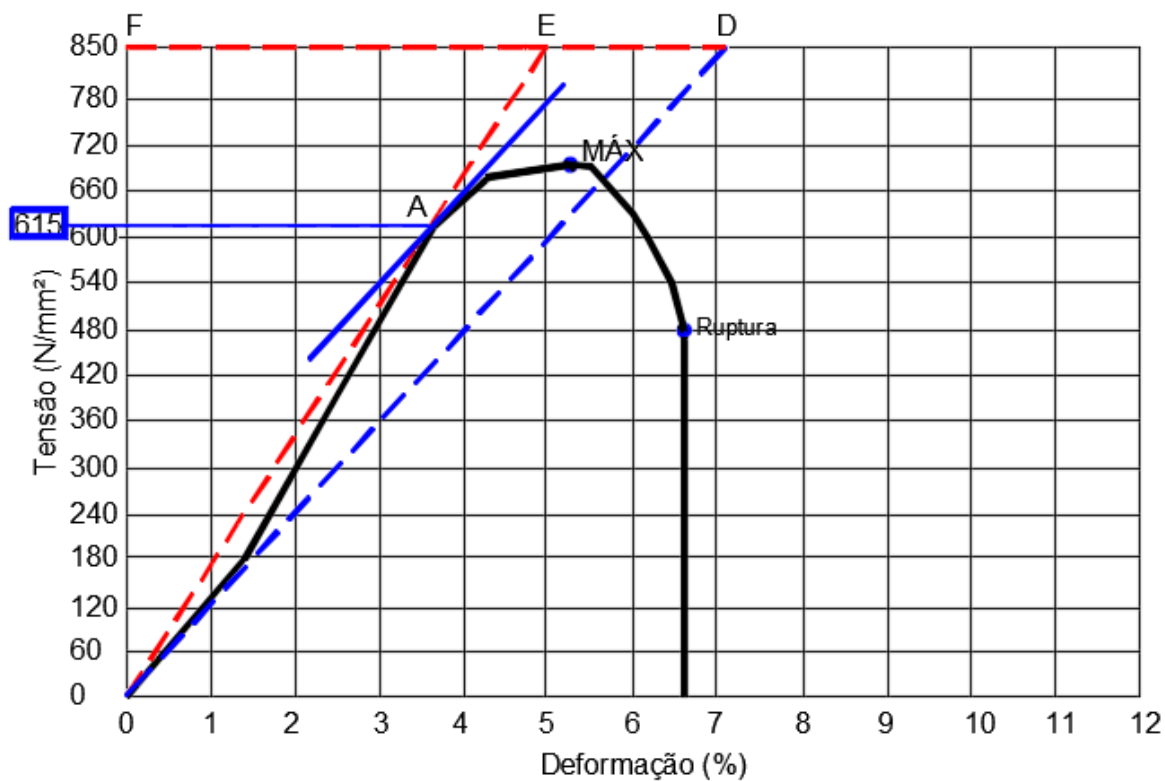
Tabela 14 – Tensões de escoamento – Ensaio de Tração - Fabricante A (Barras)

Amostras Fabricante A	Tensão de escoamento (MPa)
1	600.00
2	600.00
3	630.00
Média	610.00

Fonte: Autor (2017)

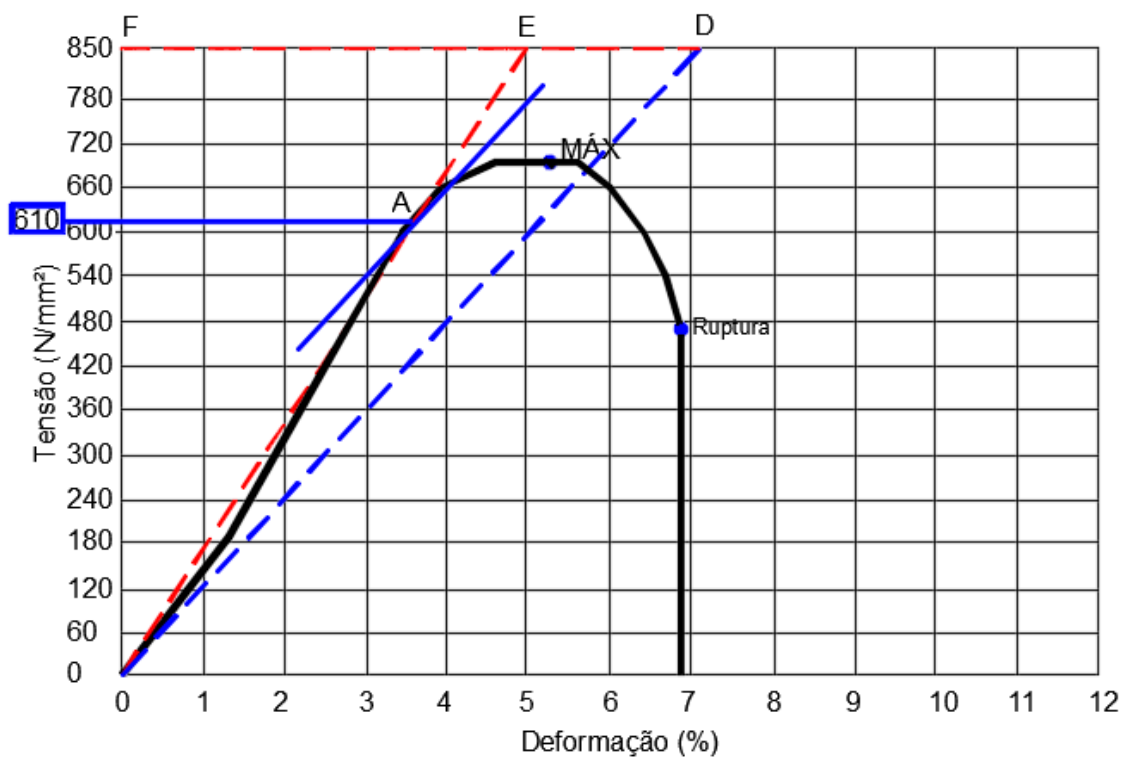
Para o Fabricante B também foram realizados 3 ensaios com os vergalhões, apresentados a seguir (Figuras 66 a 68). Observa-se que os resultados encontrados são semelhantes:

Figura 66 – Amostra 1 – Ensaio de Tração – Fabricante B (Barra)



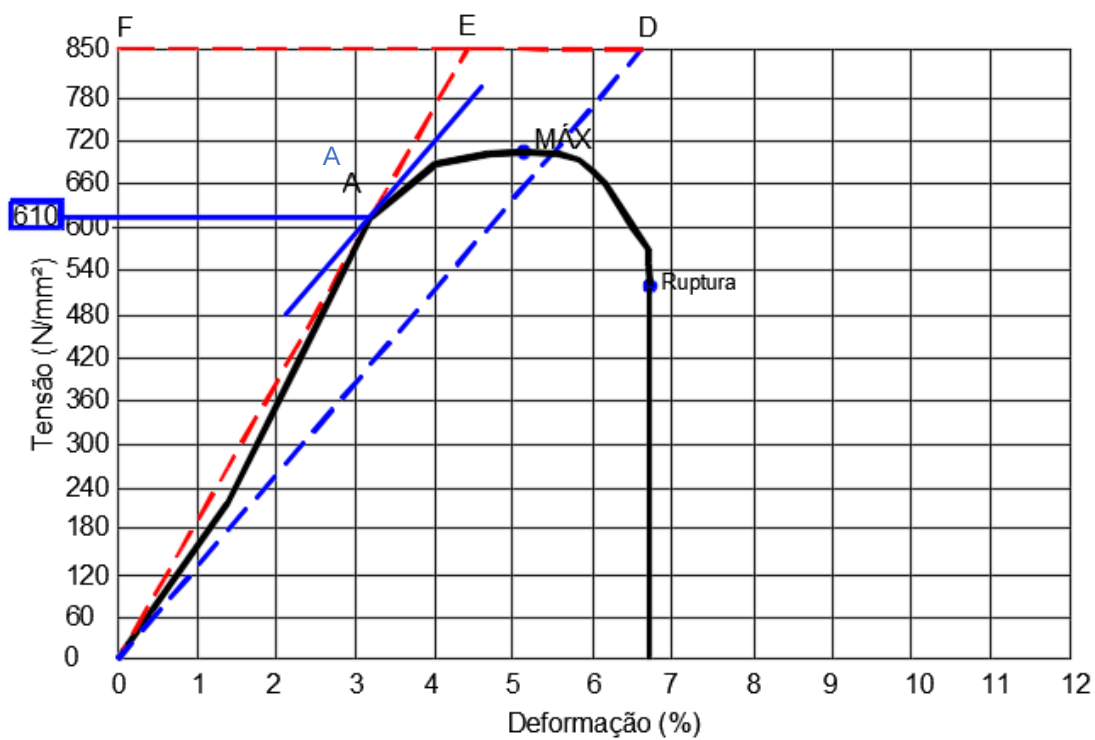
Fonte: Autor (2017)

Figura 67 – Amostra 2 – Ensaio de Tração – Fabricante B (Barra)



Fonte: Autor (2017)

Figura 68 – Amostra 3 – Ensaio de Tração – Fabricante B (Barra)



Fonte: Autor (2017)

A Tabela 15 mostra os resultados para as tensões de escoamento dos vergalhões 8 mm CA-60, para o Fabricante B seguindo as análises recomendadas, com base no método de Johnson.

Tabela 15 – Tensões de escoamento – Ensaio de Tração - Fabricante B

Amostras Fabricante B	Tensão de escoamento (MPa)
1	615.00
2	610.00
3	610.00
Média	611.70

Fonte: Autor (2017)

Na Figura 69 observa-se a zona de estricção da barra que caracteriza o início da ruptura a tração. A zona de estricção representa a transição entre a tensão de resistência e a de ruptura do aço. É uma característica de ruptura de amostras desta tipologia de ensaio.

Figura 69 – Estricção que gerou a ruptura – Ensaio de Tração



Fonte: Autor (2017)

Os limites de resistência e de ruptura estão demarcados nos gráficos anteriores, respectivamente como 'MÁX' e 'Ruptura'. O limite de resistência se caracteriza como a máxima carga atingida durante o ensaio, e o limite de ruptura como a última tensão suportada pelo material antes da fratura. Nas tabelas abaixo encontram-se os valores aproximados destes limites (Tabelas 16 a 19).

Tabela 16 – Limite de resistência – Ensaio de Tração - Fabricante A (Barra)

Amostras Fabricante A	Limite de Resistência (MPa)
1	719.00
2	696.00
3	696.00
Média	703.67

Fonte: Autor (2017)

Tabela 17 – Limite de resistência – Ensaio de Tração - Fabricante B (Barra)

Amostras Fabricante B	Limite de Resistência (MPa)
1	695.00
2	695.00
3	700.00
Média	696.67

Fonte: Autor (2017)

Tabela 18 – Limite de ruptura – Ensaio de Tração - Fabricante A (Barra)

Amostras Fabricante A	Limite de Ruptura (MPa)
1	508.00
2	513.00
3	524.00
Média	515.00

Fonte: Autor (2017)

Tabela 19 – Limite de ruptura – Ensaio de Tração - Fabricante B (Barra)

Amostras Fabricante B	Limite de Ruptura (MPa)
1	474.00
2	464.00
3	513.00
Média	483.67

Fonte: Autor (2017)

5.5.2 Ensaio Estáticos para Telas

Para o Fabricante A também foram realizados 3 ensaios com as amostras das telas soldadas. A Tabela 20 mostra os resultados para as tensões de escoamento das telas de 8mm CA-60, seguindo as análises recomendadas, com base no método de Johnson.

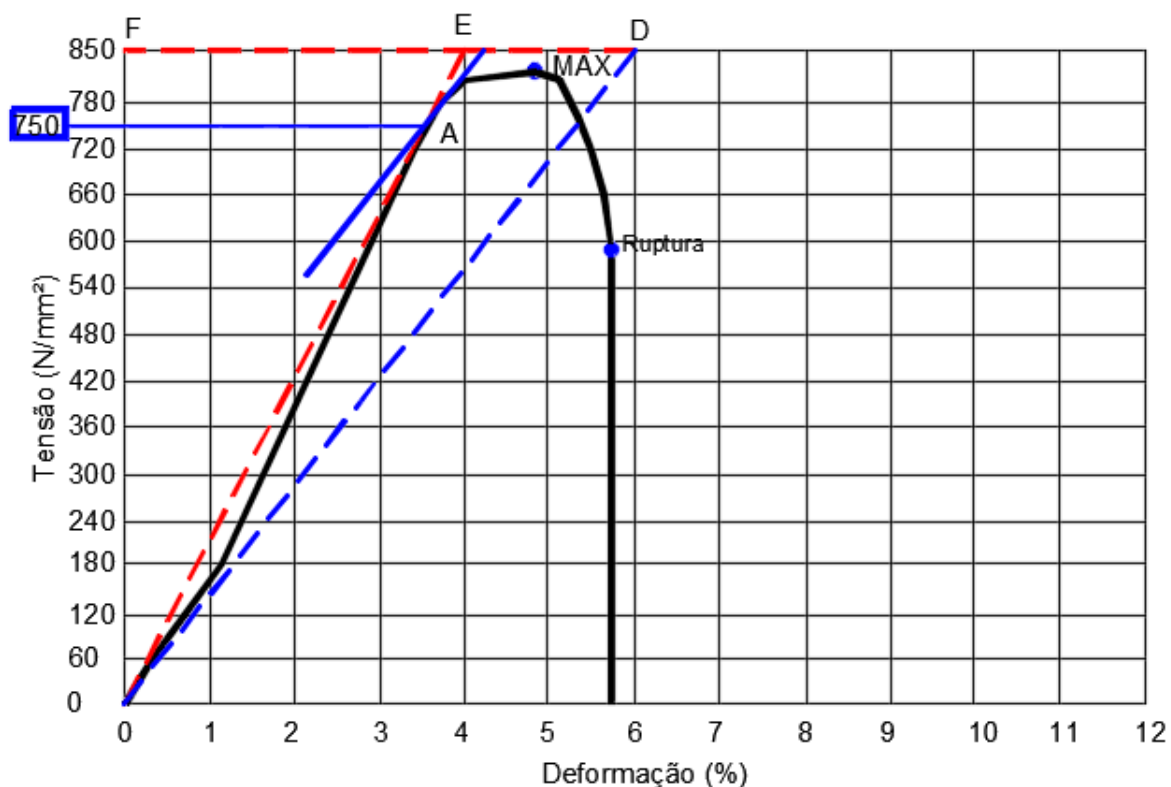
Tabela 20 – Tensões de escoamento – Ensaio de Tração - Fabricante A (Telas)

Amostras Fabricante A	Tensão de escoamento (MPa)
1	750.00
2	720.00
3	750.00
Média	740.00

Fonte: Autor (2017)

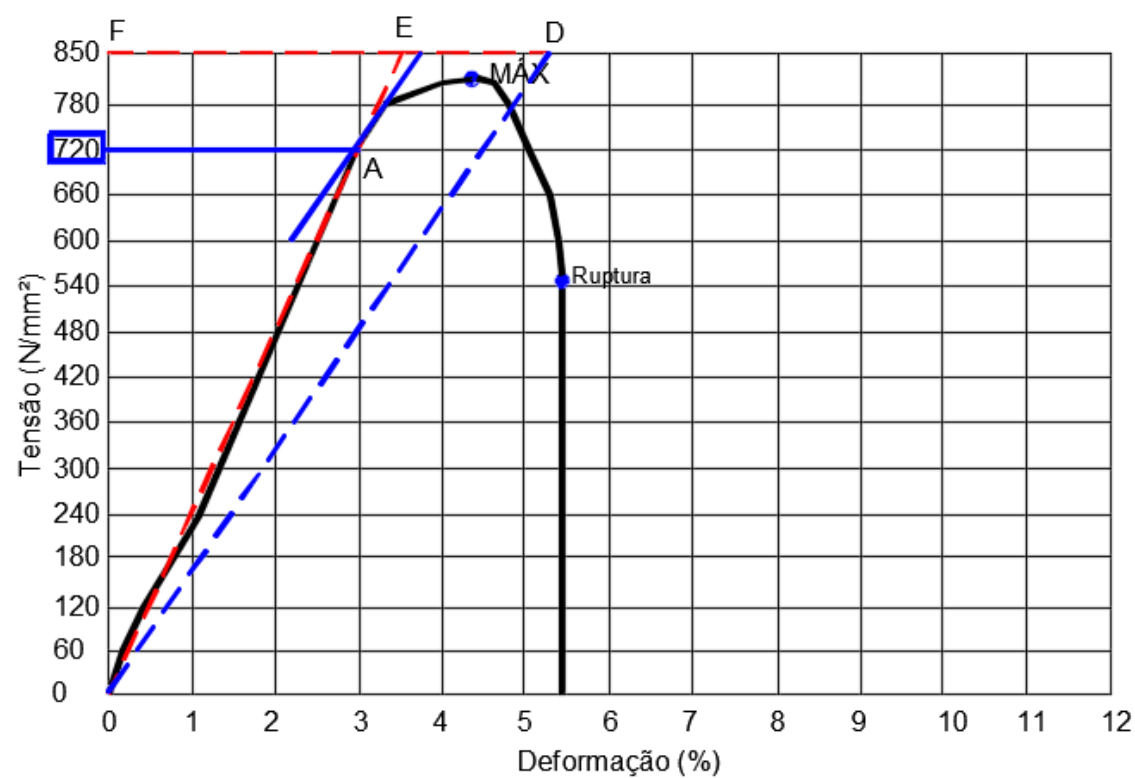
Nas Figuras 70 a 72 encontram-se as análises da tensão de escoamento para as telas do Fabricante A.

Figura 70 – Amostra 1 – Ensaio de Tração – Fabricante A (Tela)



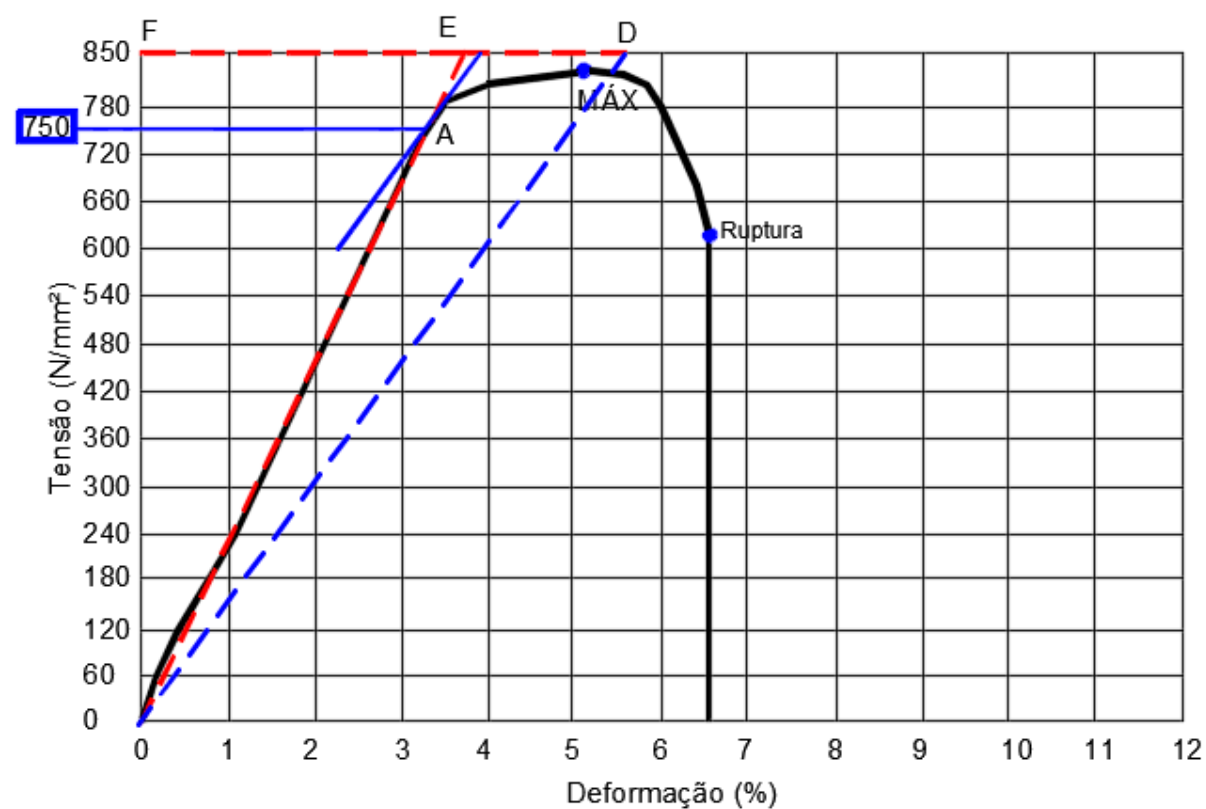
Fonte: Autor (2017)

Figura 71 – Amostra 2 – Ensaio de Tração – Fabricante A (Tela)



Fonte: Autor (2017)

Figura 72 – Amostra 3 – Ensaio de Tração – Fabricante A (Tela)



Fonte: Autor (2017)

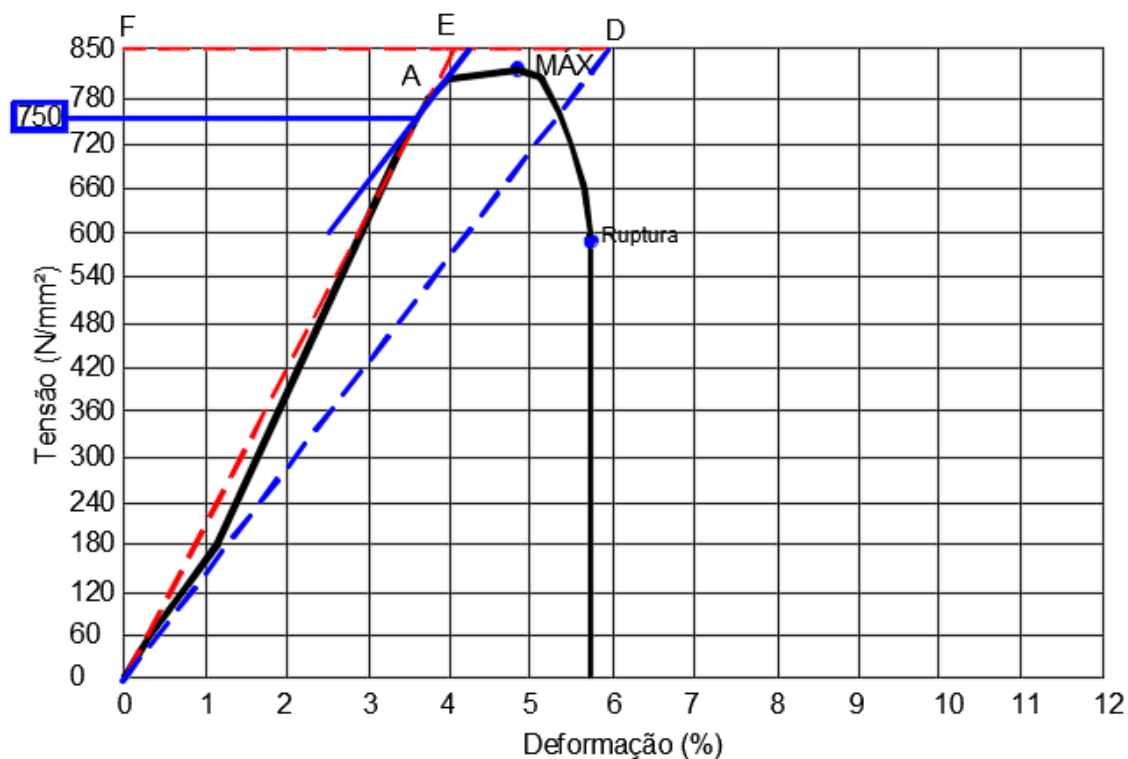
Para o Fabricante B também foram realizados 3 ensaios com as telas soldadas, apresentados a seguir (Figuras 73 a 75). A Tabela 21 mostra os resultados para as tensões de escoamento dos vergalhões 8mm CA-60, para o Fabricante B seguindo as análises recomendadas, com base no método de Johnson.

Tabela 21 – Tensões de escoamento – Ensaio de Tração - Fabricante B (Telas)

Amostras Fabricante B	Tensão de escoamento (MPa)
1	750.00
2	660.00
3	660.00
Média	690.00

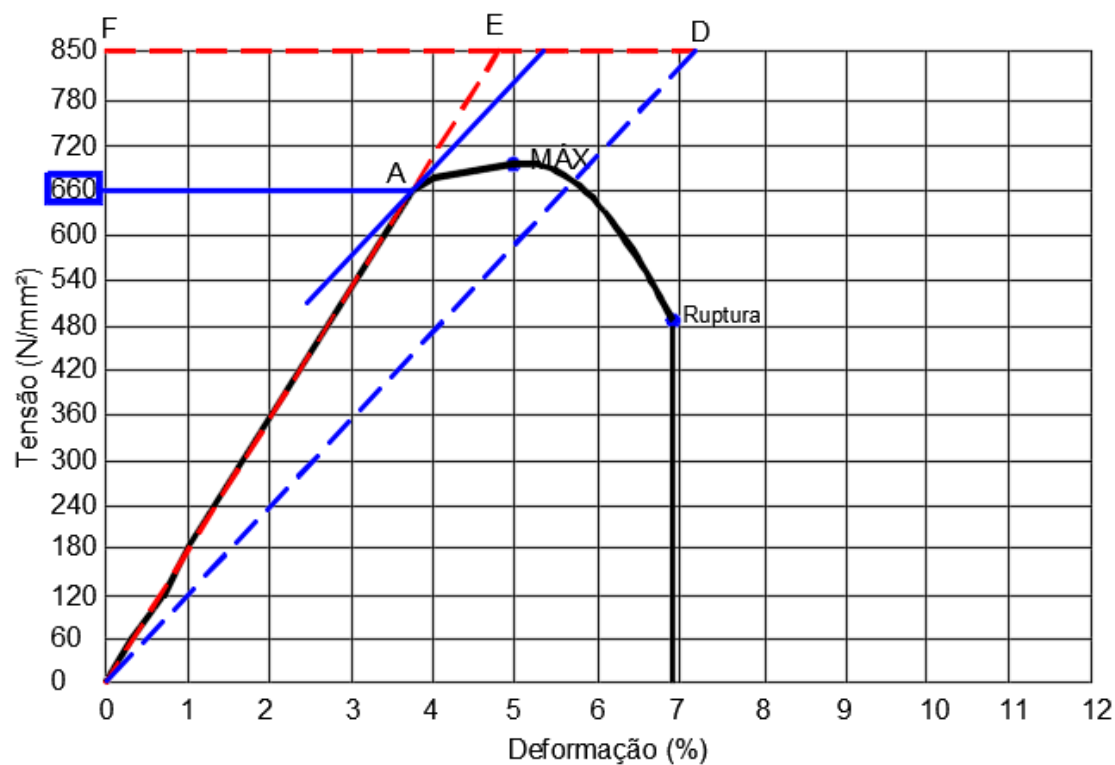
Fonte: Autor (2017)

Figura 73 – Amostra 1 – Ensaio de Tração – Fabricante B (Tela)



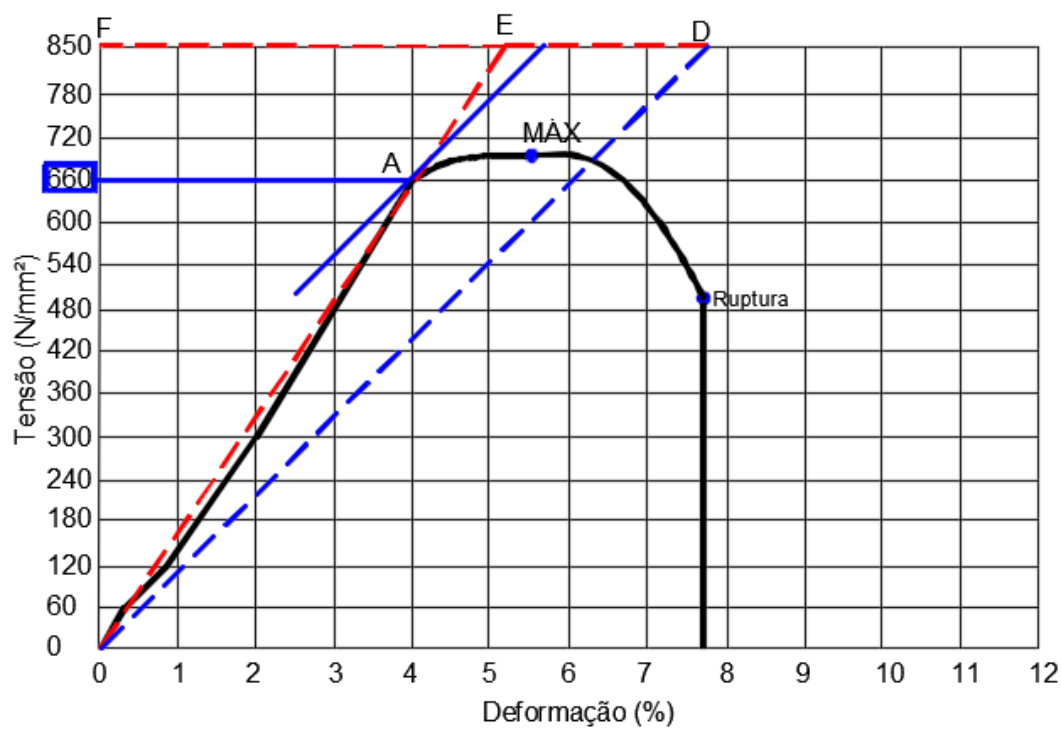
Fonte: Autor (2017)

Figura 74 – Amostra 2 – Ensaio de Tração – Fabricante B (Tela)



Fonte: Autor (2017)

Figura 75 – Amostra 3 – Ensaio de Tração – Fabricante B (Tela)



Fonte: Autor (2017)

Na Figura 76 observa-se a zona de estrição das telas que caracteriza o início da ruptura a tração. Observa-se que as telas cedidas do Fabricante A apresentavam um processo de início de oxidação externa.

Figura 76 – (a) Estricção que gerou a ruptura – Tela Fabricante A; (b) – Estricção que gerou a ruptura – Tela Fabricante B



Fonte: Autor (2017)

Nas tabelas abaixo encontram-se os valores aproximados dos limites de resistência e ruptura das telas (Tabelas 22 a 25):

Tabela 22 – Limite de resistência – Ensaio de Tração - Fabricante A (Tela)

Amostras Fabricante A	Limite de Resistência (MPa)
1	818.00
2	804.00
3	804.00
Média	808.67

Fonte: Autor (2017)

Tabela 23 – Limite de resistência – Ensaio de Tração - Fabricante B (Tela)

Amostras Fabricante B	Limite de Resistência (MPa)
1	820.00
2	700.00
3	695.00
Média	738.33

Fonte: Autor (2017)

Tabela 24 – Limite de ruptura – Ensaio de Tração - Fabricante A (Tela)

Amostras Fabricante A	Limite de Ruptura (MPa)
1	587.00
2	540.00
3	600.00
Média	575.67

Fonte: Autor (2017)

Tabela 25 – Limite de ruptura – Ensaio de Tração - Fabricante B (Tela)

Amostras Fabricante B	Limite de Ruptura (MPa)
1	590.00
2	490.00
3	500.00
Média	526.67

Fonte: Autor (2017)

5.6 ENSAIOS DE FADIGA DOS VERGALHÕES

Para o cálculo de variação de tensão do aço CA-60 foram realizados testes que serviram como base para a definição de um 'K' constante para três níveis de ciclagem: 10^5 , 1×10^6 e 2×10^6 , para que pudesse ser definida a Curva de Wöhler para este tipo de material de vergalhões isolados de 8mm de diâmetro. Posteriormente, com os 'K's definidos para as barras, foram realizados ensaios de fadiga com os mesmos 'K's para telas soldadas com os mesmos diâmetros das barras, com soldas a cada 10 cm de distância, para a definição do traçado de Curvas de Wöhler para telas com essas características.

Os ensaios de ruptura à fadiga foram realizados com a análise inicial de previsão das variações mais próximas às ciclagens iniciais propostas, com a

execução de ensaios teste que permitiram uma análise inicial de comportamento das barras de 8 mm, de aço CA-60. Com as variações descritas na tabela abaixo (Tabela 26) foi possível prever variações mais próximas das ciclagens sugeridas.

Tabela 26 – Ensaio de fadiga – Testes de variações - Fabricante B

Amostras Testes	Variação (MPa)	Ciclagem de ruptura	Duração (h)
1	122	2939670	136.09
2	170.8	507856	23.51
3	223.5	477655	22.11
4	233.5	425523	19.70
5	241	266543	12.33
6	298.3	174647	8.08
7	389.5	99480	4.60
8	390	83305	3.85
9	407	87323	4.04
TOTAL DE HORAS SEQUENCIAIS			234.31

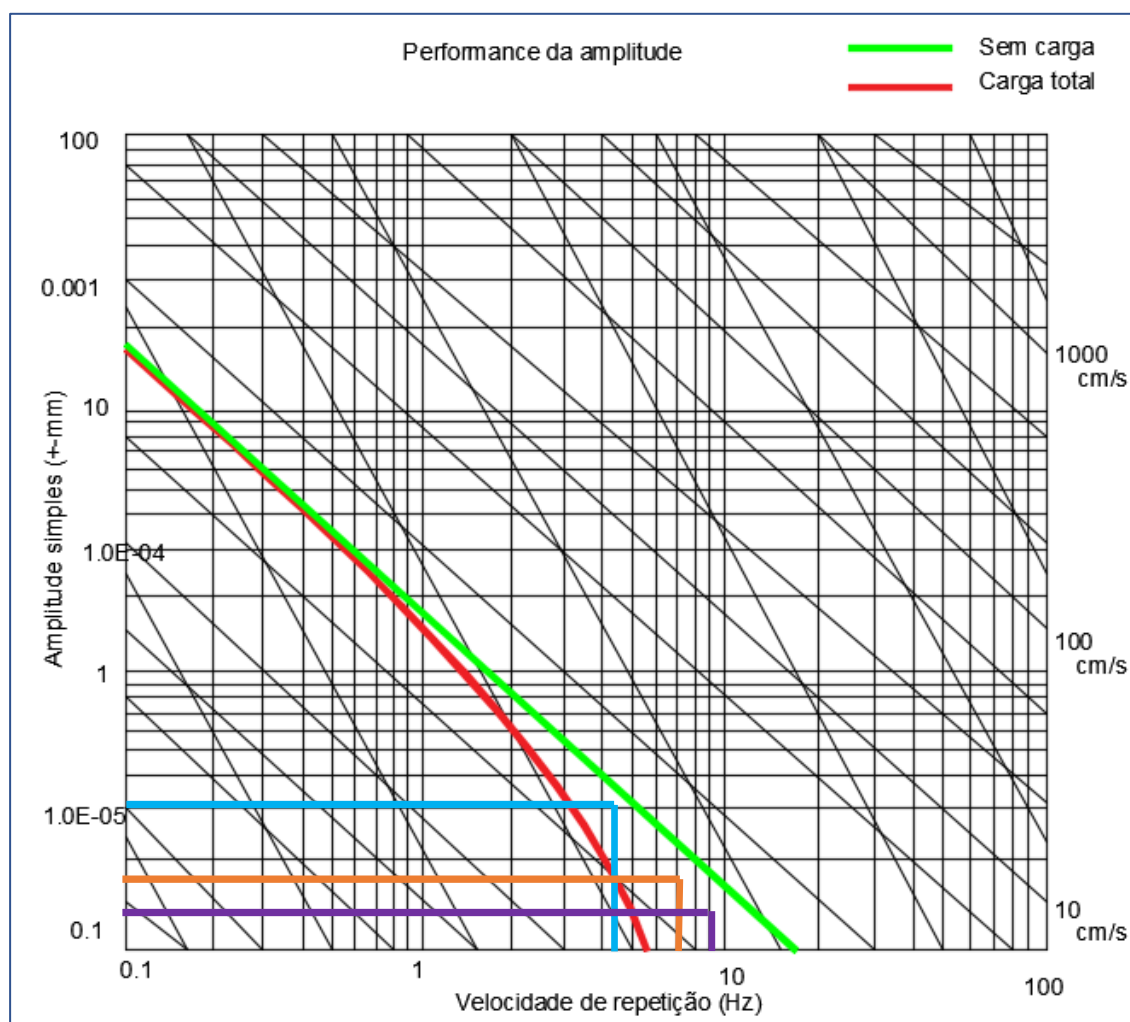
Fonte: Autor (2017)

Destaca-se que os ensaios de fadiga foram realizados apenas para o Fabricante B devido à maior presença de nervuras, o que viabilizou o não escorregamento das amostras para o terceiro mordente desenvolvido.

Os testes descritos foram necessários por não haver nenhuma referência normativa exclusiva para variações (e coeficientes 'K') recomendados para o aço CA-60. Os coeficientes utilizados por Dantas (2010) em sua pesquisa, baseados nas recomendações do "*Bulletin D'Information N 188*", eram destinados a aços com características semelhantes às do aço CA-50. Devido à ductilidade do aço CA-60 ser menor, apesar de sua maior resistência, observa-se que as variações adotadas, encontram patamares bem diferentes de ruptura à fadiga.

Foram, assim, adotadas 3 variações para se estimar rupturas próximas às ciclagens propostas. Em relação à máquina de fadiga do IFPI, analisaram-se as frequências máximas permitidas para a utilização em cada ensaio. Os corpos de prova utilizados possuíam comprimento de 30 cm, e a distância entre garras de 20 cm, permitindo a possibilidade de encontrar frequências um pouco maiores para a adoção, já que o comprimento inicial não era tão extenso.

Figura 77 – Gráfico da máquina de fadiga



Fonte: Autor (2017)

No gráfico da Figura 77, acima observa-se que em **azul** encontra-se demarcada a amplitude e a frequência para a variação de 320,81 MPa (para ciclos de 100.000), em **laranja** para a variação de 180,16 MPa (para 1.000.000 de ciclos), e em **roxo** para 148 MPa (para 2.000.000 de ciclos). Na Tabela 27, encontram-se os cálculos realizados do alongamento característico da amplitude da máquina, apresentado no Capítulo 3, e as frequências adotadas. Essa duração dos ensaios é apenas uma previsão inicial pois na realidade, a ruptura pode ocorrer antes ou depois do tempo previsto.

Tabela 27 – Variações adotadas e suas respectivas frequências

	$\Delta\sigma$ (MPa)	F _{máx} (kN)	F _{min} (kN)	ΔF (kN)	Along. (mm)	Hz	Hora- 1cp	Total (h)
BARRA	320.81	24.13	8.00	16.13	0.3055	4.5	6.17	37.04
	180.16	24.13	15.07	9.06	0.1716	7	39.68	238.10
	148	24.13	16.69	7.44	0.1410	9	61.73	370.37
	$\Delta\sigma$ (MPa)	F _{máx} (kN)	F _{min} (kN)	ΔF (kN)	Along. (mm)	Hz	Hora- 1cp	Total (h)
TELA	320.81	24.13	8.00	16.13	0.3055	4.5	6.17284	37.04
	180.16	24.13	15.07	9.06	0.1716	7	39.6825	238.10
	148	24.13	16.69	7.44	0.1410	9	61.7284	370.37

Fonte: Autor (2017)

Para as previsões em cima das ciclagens previstas inicialmente, e as frequências permitidas, há um tempo total de execução de ensaios de 1291,01 horas, se consideradas ininterruptas. E de aproximadamente 54 dias. Porém, sabe-se que a troca dos corpos-de-prova não possui esta eficiência de não interrupção, devido à necessidade sempre da presença de um técnico para o auxílio na montagem e desmontagem das amostras, devido ao peso do material. Além disso, havia ao longo dos ensaios, mesmo após a definição dos mordentes, intercorrências decorrentes de: falta de energia, atraso na cessão das amostras pelos fabricantes, manutenções.

Na Tabela 28 encontram-se as variações adotadas como padrão, já citadas anteriormente, para a definição dos três pontos da ciclagem que permitirão o desenho da Curva de Wöhler, e os seus respectivos resultados de ruptura. A variação para a previsão de ruptura de fadiga de 2 milhões de ciclos se encontra com características indeterminadas, já que se observa uma diferença muito grande e sem seguir os padrões de proximidade das outras variações adotadas, entre os resultados encontrados. Esta tabela apresenta os resultados de ruptura para as barras.

Na Tabela 29 há o registro dos ensaios de fadiga das telas soldadas.

Tabela 28 – Ensaio de fadiga das Barras – Testes de variações - Fabricante B

BARRAS					
$\Delta\sigma = 320,81 \text{ MPa}$		$\Delta\sigma = 180,16 \text{ MPa}$		$\Delta\sigma = 148 \text{ MPa}$	
CP	N (ciclos)	CP	N (ciclos)	CP	N (ciclos)
1	95847	7	1297126	13	932901
2	102168	8	607749	14	1111441
3	94759	9	766180	15	2097120
4	171827	10	1098265	16	932901
5	200159	11	2157002	17	5000000 (pausado)
6	173820	12	611599	18	5000000 (pausado)

Fonte: Autor (2017)

Tabela 29 – Ensaio de fadiga das Telas – Testes de variações - Fabricante B

TELAS					
$\Delta\sigma = 320,81 \text{ MPa}$		$\Delta\sigma = 180,16 \text{ MPa}$		$\Delta\sigma = 148 \text{ MPa}$	
CP	N (ciclos)	CP	N (ciclos)	CP	N (ciclos)
1	109053	7	425713	13	887546
2	172460	8	437801	14	1339289
3	157350	9	395558	15	813647
4	58711	10	356535	16	1160198
5	170375	11	391709	17	770996
6	142817	12	458111	18	1262725

Fonte: Autor (2017)

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 VERIFICAÇÃO DA MASSA NOMINAL

O Quadro 2, já apresentado, traz as características das barras em relação às máximas variações para a massa nominal.

Analisando-se as variações descritas da NBR 7480 (2007), para barras de diâmetro 8mm, as mesmas devem estar contidas no intervalo de 6% para mais ou para menos. Conferindo-se os resultados encontrados para a massa nominal das amostras, tem-se a Tabela 30 a seguir, com a descrição das variações normativas previstas frente à massa nominal padrão:

Tabela 30 – Valores das massas médias das amostras

Variação normativa	Massa Nominal normativa - aço de 8mm (kg/m)	Variação normativa da massa (kg/m)
+6%	0,395	0,419
-6%		0,371

Fonte: Autor (2017)

As massas encontradas para cada fabricante encontram-se dentro da variação permitida pela norma da ABNT, já que as médias das massas nominais calculadas foram de 0,38 kg/m e 0,378 kg/m, ambas entre 0,419 kg/m e 0,371 kg/m, dentro do intervalo de variação permitido.

6.2 ENSAIOS DE DUREZA

Os resultados encontrados para os Fabricantes A e B, foram de 62,4 HRA e 67,6 HRA respectivamente, e chegam a ser semelhantes entre si. A diferença entre os elementos químicos na composição dos respectivos aços determina características diferenciadas nos resultados. A presença de uma menor quantidade de ferro e maior de outros elementos caracterizou uma maior dureza no Fabricante B. A dureza Rockwell A é recomendada para a análise por esta pesquisa tratar da análise das características do aço CA-60, um aço encruado a frio. Os resultados

estão no intervalo recomendado pelas indicações do Capítulo 4, entre 20 HRA e 80 HRA.

No quadro a seguir, também se observa a correlação de conversão entre outras durezas Rockwell, como referência. Em verde encontra-se demarcada a correlação média para o resultado encontrado para o Fabricante B, e em vermelho, a correlação média entre escalas para o Fabricante A.

No caso do Fabricante A, o seu resultado de 62,4 HRA, leva a valores de 24 HRC, 247 HB, 260 HV. Já para o Fabricante B de resultado 67,6 as correlações levam a resultados de aproximadamente 34,5 HRC, 324 HB e 340 HV (Quadro 8).

Quadro 7 – Conversão de Escalas de dureza Rockwell

Dureza Rockwell "C"	Dureza Brinell	Dureza Vickers	Dureza Rockwell "A"
HRC	HB	HV	HRA
41	381	402	70,9
40	371	392	70,4
39	362	382	69,9
38	353	372	69,4
37	344	363	68,9
36	336	354	68,4
35	327	345	67,9
34	319	336	67,4
33	311	327	66,8
32	301	318	66,3
31	294	310	65,8
30	286	302	65,3
29	279	294	64,7
28	271	286	64,3
27	264	279	63,8
26	258	272	63,3
25	253	266	62,8
24	247	260	62,4
23	243	254	62,0

Fonte: ASTM E 40 (1972)

6.3 ENSAIOS DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

Observa-se que as proporções entre os elementos são semelhantes. A amostra do Fabricante B (96,257%) acabou por apresentar uma porcentagem de ferro um pouco menor que a do Fabricante A (98,078%), mas também apresentou destaque para outros elementos complementares como o alumínio (Al), Prata (Ag), Lantânio (La) e Európio (Eu). Os elementos comuns entre os dois fabricantes são o ferro (Fe), Manganês (Mn) e Silício (Si).

A presença do Manganês em maior quantidade do que a definida para o aço CA-50 pela NBR 8965 (1985), se deve à característica da não definição do patamar de escoamento. Não há uma norma com exigências específicas para taxas máximas de composições químicas para os aços CA-60, mas as proporções encontradas encontram-se dentro do esperado pelas descrições dos fabricantes estudados.

As porcentagens de carbono (C) não podem ser encontradas neste tipo de análise devido aos comprimentos de onda permitidos para a leitura nesta tipologia de ensaio.

6.4 ENSAIOS ESTÁTICOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Para as barras, observa-se que as tensões encontradas se apresentam com valores bem acima do mínimo recomendado, e que a norma (NBR 7480) encontra-se a favor da segurança, já que considera este limite para no mínimo 600 MPa. Para o Fabricante A, a média das resistências ao escoamento é de 610 MPa; e para o Fabricante B, a média é de 611 MPa. Quanto maior a resistência, menor a ductilidade.

Como descrito anteriormente nas pesquisas bibliográficas do Capítulo 2, os limites de proporcionalidade e de elasticidade possuem resultados muito próximos ao do limite de escoamento, quando se desprezam as tensões residuais, sendo todos definidos como as marcações anteriores dos gráficos, através do Método de Johnson, ou limite elástico aparente.

Os limites de resistência médios dos dois fabricantes, para barras, são de 703,67 MPa e 696,67 MPa, respectivamente, com valores bem próximos. A NBR 7480 (2007) define que o limite mínimo de resistência deve ser de 660 MPa. Os dois fabricantes atendem à indicação mínima. Além disso, a mesma norma descreve que a mínima relação entre o limite de resistência e de escoamento para o aço CA-60 é de 1,05, de acordo com a Tabela 1 do Capítulo 2. Assim, para o Fabricante A esta relação resulta em um valor de 1,15 e para o Fabricante B esta relação é de 1,14, ambos acima do limite mínimo da NBR 7480 (2007). Os limites de ruptura médios dos dois fabricantes são de 515 MPa e 483,67 MPa, respectivamente.

Para as telas, as tensões de escoamento encontradas também se apresentam com valores acima do mínimo recomendado. Para o Fabricante A, a média das resistências ao escoamento é de 740 MPa; e para o Fabricante B, a média é de 690 MPa (que apresentaram maior dureza). Os resultados para os dois fabricantes apresentaram melhor desempenho do que para barras.

Os limites de resistência médios dos dois fabricantes, para telas, são de 808,67 MPa e 738,33 MPa. As telas apresentaram esse limite maior que o das barras, e também obedecem ao mínimo da recomendação normativa. Para o Fabricante A, a relação entre o limite de resistência e o de escoamento resultou em um valor de 1,09 e para o Fabricante B esta relação é de 1,07, ambos acima do limite mínimo da NBR 7480 (2007). Os limites de ruptura médios dos dois fabricantes são de 575,67 MPa e 526,67 MPa, respectivamente.

6.5 ENSAIOS DE FADIGA DOS VERGALHÕES

Para a análise dos dados em relação à cada tensão de variação adotada, foram calculadas as médias dos ciclos (N_m) e os desvios padrões (S), além da dispersão dos dados encontrados, através da relação entre a ciclagem média e as ciclagens de ruptura, com o respectivo desvio padrão. As Tabelas 31 a 32 trazem essas análises para as barras. Já as Tabelas 33 a 35 descrevem as análises para as telas.

Tabela 31 – Resultados para a variação de 320,81 MPa (Barras)

CP	N	Média (N_m)	Desvio Padrão	$n=N/N_m$	DESVIO PADRÃO n
1	95847	139763.33	47335.01	0.68578072	0.34
2	102168			0.73100718	
3	94759			0.67799614	
4	171827			1.22941401	
5	200159			1.43212812	
6	173820			1.24367383	

Fonte: Autor (2017)

Tabela 32 – Resultados para a variação de 180,16 MPa (Barras)

CP	N	Média (Nm)	Desvio Padrão	n=N/N _m	DESVIO PADRÃO n
7	1297126	1089653.5	591228.38	1.19040227	0.54
8	607749			0.55774519	
9	766180			0.70314095	
10	1098265			1.00790297	
11	2157002			1.97953019	
12	611599			0.56127842	

Fonte: Autor (2017)

Para o terceiro grupo de rupturas que corresponderia à previsão de 2 milhões de ciclos, não foi possível realizar a análise do desvio padrão devido à disparidade dos resultados, já que dois ensaios tiveram que ser pausados a 5 milhões de ciclos por não haver ruptura das barras, e outros geraram valores menores de 1 milhão de ciclos.

A média para os desvios padrão encontrados para os dois grupos analisados foi de 0.44.

Tabela 33 – Resultados para a variação de 320,81 MPa (Telas)

CP	N	Média (Nm)	Desvio Padrão	n=N/N _m	DESVIO PADRÃO n
1	109053	135127.67	44064.57	0.807037	0.33
2	172460			1.276274	
3	157350			1.164454	
4	58711			0.434485	
5	170375			1.260844	
6	142817			1.056904	

Fonte: Autor (2017)

Tabela 34 – Resultados para a variação de 180,16 MPa (Telas)

CP	N	Média (Nm)	Desvio Padrão	n=N/N _m	DESVIO PADRÃO n
7	425713	410904.50	36691.12	1.036038	0.09
8	437801			1.065456	
9	395558			0.962652	
10	356535			0.867683	
11	391709			0.953284	
12	458111			1.114884	

Fonte: Autor (2017)

Tabela 35 – Resultados para a variação de 148 MPa (Telas)

CP	N	Média (N _m)	Desvio Padrão	n=N/N _m	DESVIO PADRÃO n
13	887546	1039066.83	245138.21	0.854176	0.24
14	1339289			1.288934	
15	813647			0.783055	
16	1160198			1.116576	
17	770996			0.742008	
18	1262725			1.215249	

Fonte: Autor (2017)

A média para os desvios padrão encontrados para os três grupos ensaiados foi de 0.22.

Pelos resultados encontrados, a variabilidade entre as flutuações encontradas para ensaios de fadiga no caso de vergalhões de aço CA-60 é alta tanto para barras quanto para telas, mas apresenta-se em maior intensidade para barras.

Para a determinação da Curva de Wöhler foi utilizada a seguinte equação de distribuição normal para se obter o valor característico das ciclagens (N_k), com 95% de confiança, que considera a ciclagem média (N_m) e o coeficiente de variação:

$$N_K = N_m - 1,64 \times cv \times N_m \quad (9)$$

Como as variações apresentaram um desvio padrão muito alto, o resultado obtido para o N_k foi muito baixo, para poder gerar a segurança dos 95% (Tabela 36)

Tabela 36 – Valores de N_k para os 3 grupos de barras e os 3 de telas

Grupos	N _m	Cv	N _k
1	139763.33	0.34	61831.30
2	1089653.50	0.54	124656.40
3	-	-	-
4	135127.67	0.33	61996.57
5	410904.50	0.09	350255.00
6	1039066.83	0.24	630090.13

Fonte: Autor (2017)

Em relação aos coeficientes 'K' encontrados para as variações adotadas e as médias de ciclagens encontradas, eles seriam os valores descritos na Tabela 37:

Tabela 37 – Valores de $K \cdot 10^{27}$ (Barras e Telas)

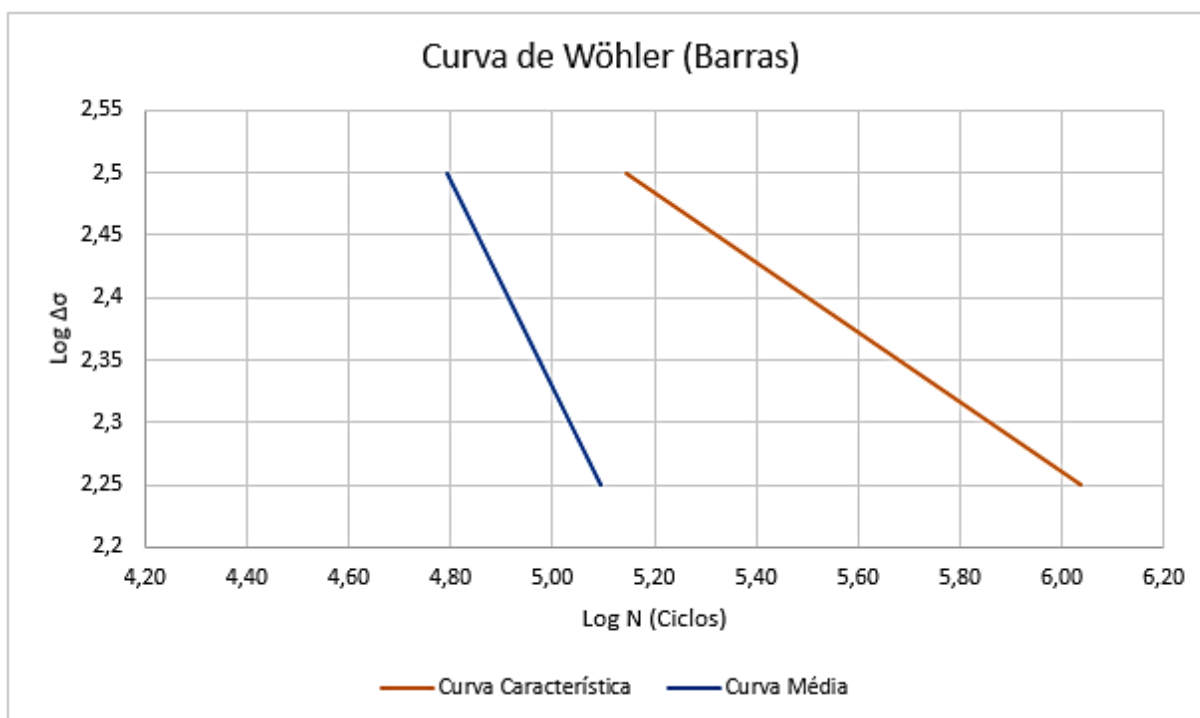
Variação	K (Barras)	K (Telas)
320.81 MPa	5.030	4.864
180.60 MPa	0.220	0.082
148 MPa	-	0.035

Fonte: Autor (2017)

Observa-se que se adotando a fórmula do CEB-FIP Model Code 1990 (1991), que indica para os aços CA-50 um 'K' no valor de 11.2, para os aços CA-60 eles representam valores bem menores. Isso se dá pela menor ductilidade que os mesmos apresentam.

Na Figura 78 há o desenho da Curva de Wöhler para as barras, com a comparação entre os resultados das Curvas Média e Característica.

Figura 78 – Curva de Wöhler CA-60 (Barras) – Fabricante B

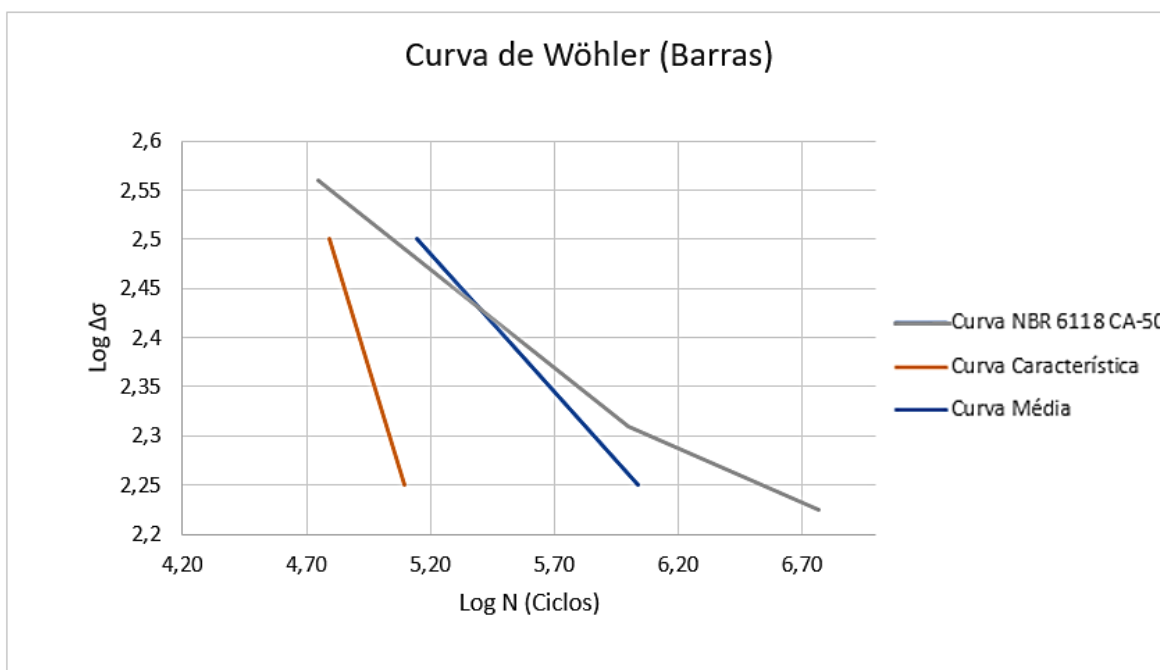


Fonte: Autor (2017)

Na Figura 79 há a comparação com a Curva de Wöhler trazida pela NBR 6118 (2014) para o Fabricante B. Observa-se que os resultados encontrados, principalmente para a ciclagem característica, são piores do que os valores

normativos, o que leva à importância da consideração do comportamento deste tipo de aço, que as indicações normativas não levam em consideração.

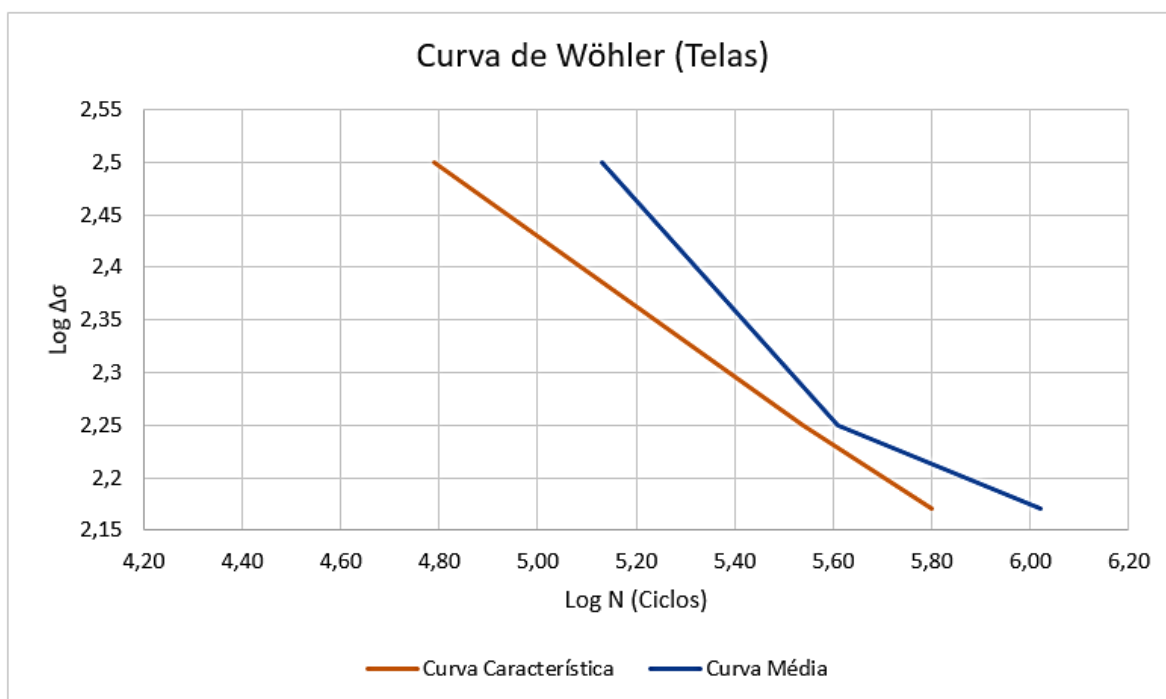
Figura 79 – Curva de Wöhler CA-60 (Barras) – Fabricante B – Comparação com a NBR 6118
(2014) Curva do aço CA-50



Fonte: Autor (2017)

Na Figura 80 tem-se a Curva de Wöhler para as telas.

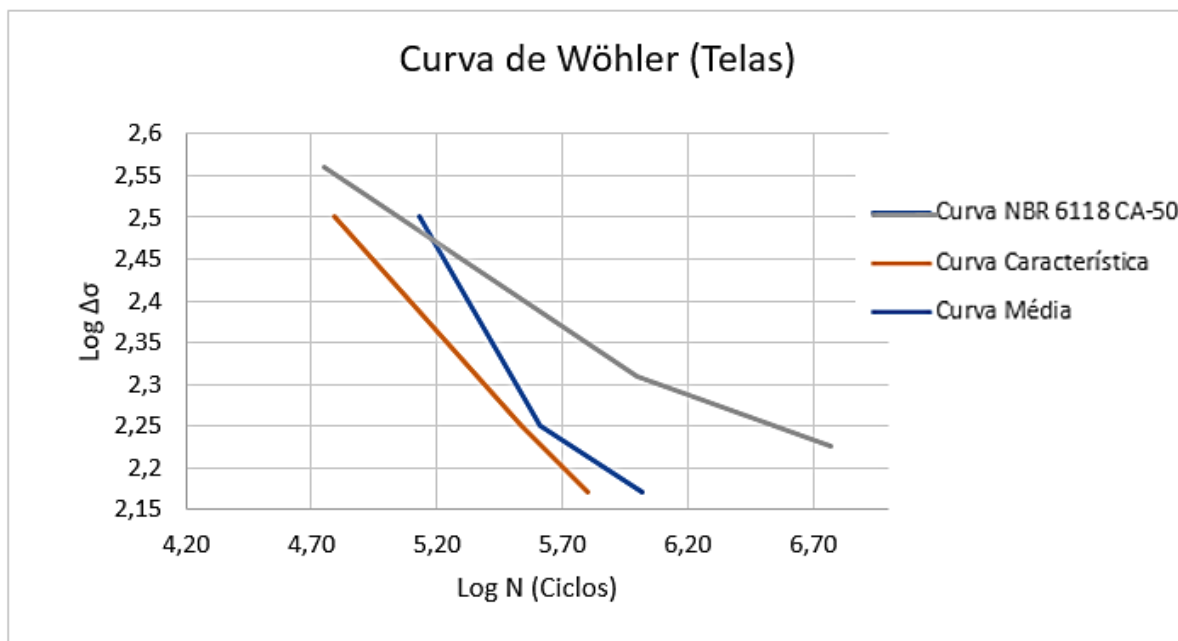
Figura 80 – Curva de Wöhler CA-60 (Telas) – Fabricante B



Fonte: Autor (2017)

As telas apresentam desvio padrão mais reduzido que as barras. Na Figura 81 há a comparação com a Curva de Wöhler trazida pela NBR 6118 (2014). Em relação aos valores normativos seus resultados ainda se encontram mais abaixo que as exigências limites.

Figura 81 – Curva de Wöhler CA-60 (Telas) – Fabricante B – Comparação com a NBR 6118 (2014) Curva do aço CA-50



Fonte: Autor (2017)

7 CONCLUSÕES

Os aços dos dois fabricantes analisados apresentam-se dentro das indicações normativas de massa nominal, com diferenças desprezíveis entre eles. Possuem durezas semelhantes, porém o Fabricante A apresenta uma dureza final menor que a do Fabricante B.

Para os ensaios estáticos realizados, conseguiu-se obter uma relação entre o limite de resistência e o limite de escoamento maior para o Fabricante A, indicando sua maior ductilidade frente aos resultados do Fabricante B, porém, todos atendem à relação mínima que a NBR 7480 (2007) define. Em relação às telas o comportamento foi semelhante, com o destaque que os aços de ambos os fabricantes apresentaram valores de resistência, escoamento e ruptura maiores que as barras, o que gera uma menor ductilidade do material.

O desenvolvimento de mordentes de adaptação para a máquina de ensaios de fadiga foi necessário para viabilizar o acoplamento dos vergalhões de 8mm. Com isso, foram desenvolvidos 3 tipos de mordentes, obtendo-se sucesso no terceiro, e somente para ensaios a se realizarem com o Fabricante B. O vergalhão do Fabricante A não possuía nervuras que fornecessem um melhor atrito para a fixação e acabava por escorregar na execução dos ensaios. Esse projeto de um acoplamento adaptado permitiu uma viabilização dos ensaios e demandou pesquisas relacionadas com sua produção, e apesar de um maior dispêndio de tempo para o início dos ensaios dinâmicos, gerou informações importantes para complementar esta pesquisa. Todo o seu processo de projeto e produção foi descrito neste trabalho.

O estudo da microestrutura dos vergalhões demonstrou o aspecto das regiões transversal, longitudinal e de solda, destacando os processos de fabricação que modificam a estrutura dos grãos de acordo com essas seções.

Os resultados dos ensaios dinâmicos indicaram, um desvio padrão muito alto para barras, maior que os encontrados por Dantas (2010) em seus ensaios com o mesmo número de amostras para os aços CA-50, em relação às barras. Para as telas, porém esse desvio padrão diminui consideravelmente, principalmente na variação intermediária.

Quando se compara o comportamento de resistência à fadiga entre barras isoladas e telas soldadas, no caso do CA-60 esses resultados de ruptura são bem mais próximos nos grupos da maior variação (quando a ruptura ocorre com um menor número de ciclos). Porém, para as variações intermediária e menor, obtém-se uma diferença bem maior para os resultados estimados, indicando-se que as telas, assim como no aço CA-50, também se apresentam de forma mais frágil em relação a ensaios dinâmicos.

Os valores de 'K' encontrados são bem inferiores aos CEB-FIP Model Code 1990 (1991). Com base nas variações adotadas e nas ciclagens de ruptura encontradas foi possível traçar a Curva de Wöhler para as barras. A grande variação gerou uma redução muito grande nos resultados das ciclagens características, considerando um fator de segurança para 95% dos resultados. Assim, ao se realizar a comparação entre os resultados das Curvas Médias e Características das barras, com a NBR 6118 (2014) que traz a curva para o aço CA-50 observam-se resultados inferiores às diretrizes normativas, gerando a necessidade de uma especial atenção ao comportamento destes aços nas estruturas que sofrem cargas dinâmicas. Dos fabricantes analisados, o Fabricante A possui a comercialização tanto das barras isoladas, como das telas soldadas para estruturas em geral. O Fabricante B comercializa hoje apenas as barras isoladas, e não vende telas com essa configuração. As telas utilizadas neste trabalho foram produzidas especialmente para esta pesquisa.

Portanto, destaca-se que ainda há a necessidade de uma pesquisa mais ampla deste aço em configurações de estruturas dinâmicas para se aferir a real necessidade do direcionamento dos cálculos e considerações no dimensionamento de estruturas desta natureza, já que os aços nacionais apresentam características diferenciadas dos aços estudados pelas normas internacionais. Como sugestão de trabalhos futuros indica-se: desenvolvimento de mordentes que permitam ensaios dinâmicos de outras bitolas comerciais, tanto para aços CA-50 quanto para aços CA-60; a realização de um maior número de ensaios para as ciclagens aqui propostas, e para ciclagens maiores para se aferir essa variabilidade do comportamento dos aços CA-60 de forma mais real; a verificação do comportamento destes aços, nas duas tipologias trazidas neste estudo, em lajes maciças.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. C. **Aços para concreto armado**. Notas de aula da disciplina – Universidade Estadual de Campinas. 2002.

AL-SARAJ, W. K. A. **Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened With GFRP Sheets**. Al-Mustansiriya University. Baghdah, 2007.

AYYUB, B. M.; CHANG, P. C.; AL-MUTAIRI, N. A. **Welded Wire Fabric for Bridges**. Journal of Structural Engineerig. 1994.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 215R-2**: Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loads. Michigan, 1997.

APOSTOLOPOULOS, C. A.; PAPADOPOULOS, M. P. **Tensile and low cycle fatigue behavior of corroded reinforcing steel bars S400**. Construction and Building Materials. London: Elsevier Science. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – procedimento. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6152**: Materiais Metálicos – determinação das propriedades mecânicas à tração – método de ensaio. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6892**: Materiais Metálicos – ensaio à tração em temperatura ambiente. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - especificação. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8965**: Barras de aço CA 42 S com características de soldabilidade destinadas a armaduras para concreto armado. 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM ISO 6508-1**: Materiais metálicos – Ensaio de dureza Rockwell – Parte 1: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T). 2009.

BELGO. **Processo de fabricação Belgo 50 e Belgo 60**. s.d.

BUELTA, M. A. B. **Ensaio de fadiga em barras de aço CA-50 de ½ polegada para concreto armado**. São Paulo: EPUSP/LEM, 2001. (Relatório Técnico nº 01/026).

CAIXETA, E. C. **Investigação experimental da fadiga em lajes de pontes com ou sem pré-lajes**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de

São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. São Paulo, 2010.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CASCUDO, O.; HELENE, P. R. L. **Produção e obtenção de barras e fios de aço para concreto armado**. São Paulo: EPUSP, 2000.

CAVALCANTI, P. de S. P. **Investigação experimental da fadiga ao cisalhamento em lajes de pontes com pré-lajes**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. São Paulo, 2010.

COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON. **Bulletin 188: Fatigue of concrete structures: state of art report**. Lausanne, 1991.

COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON. **CEB-FIP Model Code 1990**. London: Thomas Telford, 1993.

DANTAS, J. P. R. **Investigação experimental da fadiga em lajes de pontes armadas com barras ou telas soldadas**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. São Paulo, 2010.

FEHLMANN, P.; VOGEL, T. **Experimental Investigations on the Fatigue Behavior of Concrete Bridges**. International Association for Bridge and Structural Engineering Reports, Vol. 96. Bangkok, 2009.

FUSCO, P. B. **Estruturas de concreto: solicitações normais**. Rio de Janeiro: LTC editora, 1981.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. dos. **Ensaaios dos Materiais**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC editora, 2000.

GOBBI, M. C. **Materiais de Construção Mecânica – Seleção, Uso e Solução – Parte 4**. 2013. Disponível em: <http://carroceria.blogspot.com.br/2013_05_19_archive.html> Acesso em: 01 mar 2017.

HAWILEH, R. A.; TABATABAI, H.; ABU-OBEIDAH, A.; BALLONI, J.; RAHMAN, A. **Evaluation of the Low-Cycle Fatigue Life in Seven Steel Bars Types**. Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE. 2016.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 5ª ed. São Paulo: Editora Pearson Prentice Hall, 2004.

HISSANAGA, B. M. M. S. **Variáveis do processo termomecânico que influenciam na relação elástica do vergalhão CA-60.** Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2013.

INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACION – (IRAM). **Aços para armaduras de concreto armado:** parte 10: ensaio de fadiga em barras – projeto de norma Mercosul 02:00-020-10. Buenos Aires, 1996.

KOPAS, P., JAKUBOVICOVÁ, L., VASKO, M., HANDRIK, M. **Fatigue resistance of reinforcing steel bars.** The 20th International Conference: Machine Modeling and Simulations. Slovakia, 2015.

KRASNOWSKI, K. **Concrete-reinforcing Steel Bars – Applications and Fatigue Test.** Biuletyn Instytutu Spawalnictwa. 2015

LOYD J. P.; LOTT J. L.; KESLER C. E. **Fatigue of concrete.** Engineering Experiment Station – Bulletin 499. University of Illinois – College of Engineering. Illinois, 2007.

MAROPOULOS, S.; FASNAKIS, D.; VOULGARAKI, C.; PAPANIKOLAOU, S.; MAROPOULOS, A.; ANTONATOS, A. **Fatigue testing of reinforced-concrete steel bars.** Materials Science and Engineering. 2016.

MENEGHETTI, L. C.. **Análise do comportamento à fadiga de vigas de concreto armado reforçadas com PRF de vidro, carbono e aramida.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2007.

NAGESH, H. E.; RAO, G. A. **Fatigue behavior of lightly reinforced concrete beams in flexure due to overload.** 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. 2016.

NYAMU, M. D. **Fatigue in High Strength Reinforcement Bars: An Overview.** Innovative Systems Design and Engineering. 2016.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas – uma abordagem integrada.** 4^a ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLSSON, K.; PETTERSSON, J. **Fatigue Assessment Methods for Reinforced Concrete Bridges in Eurocode.** Thesis (Master) – Chalmers University of Technology. Sweden, 2010.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Ensaio Mecânicos de Materiais:** Ensaio de dureza. Notas de aula. IFSP. s.d.

SARTORI, A. L. **Revisão dos conceitos relacionados à utilização conjunta de aços das categorias CA-50 e CA-60 em peças submetidas à flexão simples por meio e estudo de caso.** Revista Interciência e Sociedade. Volume 1. São Paulo, 2012.

SENAI. **Ensaio Mecânico de Materiais**: Ensaio de dureza. Notas de aula. IFSP. s.d.

SERVO PULSER MANUAL. **Instruction Manual**: Shimadzu Servo Pulser – Model EHF-EV200K1-010-0A. s.d.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânico de materiais metálicos**. Fundamentos teóricos e práticos. 5ª ed. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda., 1982.

STUCCHI, F. R.; CAVALCANTI, P. S. P.; DANTAS, J. P. R.; CAIXETA, E. C. **Fatigue experimental research on reinforced concrete slabs**. *fib* Symposium Prague 2011. 2011.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de Ciência e Tecnologia de Materiais**. 4ª ed. Rio de Janeiro, 1970.

ZIEDAS, S.; TATINI, I. (Org.). **Soldagem** – Coleção Tecnologia SENAI. São Paulo, 1997.