



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DE FADIGA EM VERGALHÕES DE 7 mm
DE AÇO CA-60 EM BARRAS ISOLADAS E TELAS SOLDADAS PARA
APLICAÇÃO EM CONCRETO ARMADO**

CARLOS HENRIQUE LEAL VIANA

Orientador: Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos

TERESINA

2021

CARLOS HENRIQUE LEAL VIANA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DE FADIGA EM VERGALHÕES DE 7 mm
DE AÇO CA-60 EM BARRAS ISOLADAS E TELAS SOLDADAS PARA
APLICAÇÃO EM CONCRETO ARMADO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processamento e Caracterização de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos

TERESINA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Viana, Carlos Henrique Leal

V614a Análise experimental do efeito de fadiga em vergalhões de 7 mm de aço
CA-60 em barras isoladas e telas soldadas para aplicação em concreto armado
/ Carlos Henrique Leal Viana. - 2021.
81 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal do
Piauí, Campus Teresina Central, 2021.

Orientador : Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos.

1. Aço - Fadiga. 2. Aço CA-60. 3. Vergalhões. 4. Telas soldadas. I.Título.

CDD - 620.1

Elaborado por Sindya Santos Melo CRB 3/1085

CARLOS HENRIQUE LEAL VIANA

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO DE FADIGA EM VERGALHÕES DE 7 mm
DE AÇO CA-60 EM BARRAS ISOLADAS E TELAS SOLDADAS PARA
APLICAÇÃO EM CONCRETO ARMADO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do
Instituto Federal do Piauí, como parte integrante
dos requisitos para a obtenção do título de Mestre
em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 01/07/2021.

BANCA EXAMINADORA

ASSINATURA NO ORIGINAL

Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI
Orientador

ASSINATURA NO ORIGINAL

Prof. Dr. José Francisco dos Reis Sobrinho
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI
Avaliador Interno

ASSINATURA NO ORIGINAL

Prof. Dr. Eduardo Martins Fontes do Rêgo
Universidade Federal do Piauí - UFPI
Avaliador Externo

À minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por todas as bênçãos derramadas sobre mim.

Aos meus pais, Cândido Viana e Maria Iramar, pelo amor, carinho e apoio em toda a minha vida e formação. Com certeza, as pessoas importantes em minhas conquistas até então.

Ao meu irmão, Ytalo Crisanto, por sempre estar ao meu lado.

Aos meus familiares, pelo incentivo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos, pela disponibilidade em desenvolver este trabalho junto comigo. Principalmente, pela paciência, atenção e oportunidade, além de todo conhecimento compartilhado.

A todos os meus professores, pelo conhecimento e incentivo. Em especial, ao Prof. Dr. Ayrton Brandim e ao Prof. Dr. Reis Sobrinho.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI).

À Coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, nas pessoas do Prof. Dr. Gilvan Moreira e do Francílio Oliveira.

Aos técnicos André Felipe, Henrique Miller e Stênio Silva.

À Profa. Me. Carol Ferreira e ao Eng. Richard Cuevas, pela enorme contribuição para a pesquisa.

Ao Prof. Dr. Eduardo Martins, da Universidade Federal do Piauí (UFPI), pelas sugestões e colaboração neste trabalho.

À Universidade Federal do Piauí (UFPI), nas pessoas do Prof. Dr. Rômulo Magalhães, do Prof. Dr. Wênio Borges e do técnico Miqueias Sousa.

Ao Eng. Edno Costa e ao Sr. Lênin Marx, além do Eng. Cristiano Gadelha, que contribuíram com o fornecimento de materiais.

Aos meus amigos de turma Janiel Fontineles, João Paulo, Pablo Juan e Vanessa Ribeiro.

Aos alunos Florêncio e Jaime do curso de Engenharia Mecânica do IFPI.

A todos os meus amigos, por todo incentivo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida e pelo incentivo à pesquisa científica.

“Nunca desista de seus sonhos e nunca deixe de acreditar em si mesmo, porque
Deus sempre vai acreditar em você.”

Brais Antonio Oss

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre barras isoladas e telas soldadas de vergalhões de aço CA-60 utilizados em estruturas de concreto armado em relação ao comportamento à fadiga. Em estruturas de concreto armado submetidas a cargas móveis, o efeito da fadiga é relevante e pode provocar colapso do elemento estrutural. Portanto, é de suma importância a verificação da resistência à fadiga do aço para a garantia da segurança da estrutura durante a sua vida útil. Foi realizada uma análise experimental de corpos de prova de vergalhões de aço CA-60, de diâmetro 7 mm, de forma isolada e tela soldada, submetidos a ensaios de fadiga ao ar. A partir dos resultados obtidos nos ensaios, foram geradas as Curvas de Wöhler relacionando três níveis de flutuação de tensão e o número de ciclos de ruptura, para cada uma das duas formas de execução das barras. Além disso, foi verificada a massa nominal e realizados ensaios de dureza, fluorescência de raios X e tração, bem como realizada a análise microestrutural do material. Um dos principais motivos que levaram ao desenvolvimento desta pesquisa de caráter experimental foi a falta de uma normatização que pudesse prescrever o comportamento de barras de aço e telas soldadas de aço CA-60 submetidas a ações cíclicas. Ressalta-se que esse tipo de aço é produzido através de tratamento a frio, com a compactação dos grãos de forma mecânica, resultando em uma maior dureza e resistência às solicitações, e uma menor ductilidade e resistência à agressividade do meio. No caso das barras em formato de tela, o processo de soldagem por pontos teve influência na microestrutura e a resistência à fadiga foi alterada. Portanto, este trabalho contribuirá para um aperfeiçoamento das exposições normativas para o dimensionamento e verificação da fadiga em estruturas de concreto armado.

Palavras-chave: Aço - Fadiga. Aço CA-60. Vergalhões. Telas soldadas.

ABSTRACT

This paper presents a comparative study between isolated bars and welded mesh of CA-60 steel rebar used in reinforced concrete structures in relation to fatigue behavior. In reinforced concrete structures subjected to mobile loads, the fatigue effect is relevant and can cause the structural element to collapse. Therefore, it is of utmost importance to check the fatigue resistance of the steel to guarantee the safety of the structure during its lifespan. An experimental analysis of specimens of CA-60 steel rebar, 7 mm diameter, in an isolated form and with a welded mesh, was submitted to air fatigue tests. From the results obtained in the tests, Wöhler curves were generated, relating three levels of tension fluctuation and the number of rupture cycles, for each of the two forms of execution of the bars. In addition, the nominal mass was checked and hardness, X-ray fluorescence and tensile tests were carried out, as well as the microstructural analysis of the material. One of the main reasons that led to the development of this experimental research was the lack of a standardization that could prescribe the behavior of steel bars and welded mesh of CA-60 steel subjected to cyclical actions. It is noteworthy that this type of steel is produced through cold treatment, with the compression of the grains mechanically, resulting in greater hardness and resistance to requests, and less ductility and resistance to the aggressiveness of the environment. In the case of screen-shaped bars, the spot welding process had an influence on the microstructure and the resistance to fatigue was changed. Therefore, this work will contribute to an improvement of the normative statements for the dimensioning and verification of fatigue in reinforced concrete structures.

Keywords: Steel - Fatigue. CA-60 steel. Steel rebar. Steel mesh.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de abertura de fissuras até a ruptura por fadiga.....	26
Figura 2 – Curvas de resistência à fadiga (curvas S-N) para o aço CA-50	27
Figura 3 – Esquema de trefilação.....	29
Figura 4 – Influência do encruamento sobre as curvas tensão-deformação	29
Figura 5 – Representação esquemática do processo de soldagem por pontos	31
Figura 6 – Mordente composto por fixador cônico e cunha com semi-canais de alumínio	33
Figura 7 – Curva de Wöhler CA-60 (Barras) de Ferreira (2017).....	36
Figura 8 – Curva de Wöhler CA-60 (Telas) de Ferreira (2017)	36
Figura 9 – Fluxograma da pesquisa	37
Figura 10 – Fluxograma dos ensaios de fadiga.....	38
Figura 11 – Vergalhão de aço CA-60 com diâmetro nominal de 7 mm e 30 cm de comprimento.....	39
Figura 12 – Vergalhão de aço CA-60 com diâmetro nominal de 7 mm e 30 cm de comprimento retirado de uma tela soldada com espaçamento de 10 cm entre barras	40
Figura 13 – Balança de precisão digital modelo Ohaus	41
Figura 14 – Paquímetro digital	41
Figura 15 – Durômetro modelo Newage	43
Figura 16 – Espectrômetro modelo Panalytical Epsilon 3 XL	45
Figura 17 – Máquina modelo EMIC DL20000	46
Figura 18 – Máquina Shimadzu Servo Pulser modelo EHF-EV200K1-010-0A	47
Figura 19 – Gráfico amplitude-frequência	49
Figura 20 – Microscópio óptico modelo Olympus CX31.....	52
Figura 21 – Ensaios-teste de fadiga.....	57
Figura 22 – Ensaios de fadiga das barras isoladas.....	59
Figura 23 – Ensaios de fadiga das telas soldadas	60
Figura 24 – Vergalhão de aço CA-60 em formato de barra isolada após ensaio de fadiga	61
Figura 25 – Vergalhões de aço CA-60 em formato de tela soldada após ensaio de fadiga. (a) Ponto A (solda de cima) de ruptura; (b) Ponto B (solda de baixo) de ruptura	62

Figura 26 – Microestrutura da seção transversal de amostra de aço CA-60. (a) Ampliação de 10 vezes; (b) Ampliação de 40 vezes	63
Figura 27 – Microestrutura da seção longitudinal de amostra de aço CA-60. (a) Ampliação de 10 vezes; (b) Ampliação de 40 vezes	64
Figura 28 – Microestrutura da região de solda de amostra de tela de aço CA-60. (a) Ampliação de 10 vezes; (b) Ampliação de 40 vezes	64
Figura 29 – Curva de Wöhler para barras isoladas de aço CA-60 com 7 mm de diâmetro	72
Figura 30 – Comparativo entre a Curva de Wöhler para barras isoladas de 7 mm e a Curva de Wöhler elaborada por Ferreira (2017) para barras isoladas de 8 mm	73
Figura 31 – Curva de Wöhler para telas soldadas de aço CA-60 com 7 mm de diâmetro	73
Figura 32 – Comparativo entre a Curva de Wöhler para telas soldadas de 7 mm e a Curva de Wöhler elaborada por Ferreira (2017) para telas soldadas de 8 mm.....	74
Figura 33 – Comparativo entre as Curvas de Wöhler das barras isoladas e das telas soldadas.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos da curva S-N	27
Tabela 2 – Propriedades mecânicas exigíveis de fios de aço destinados a armaduras de concreto armado (valores mínimos de tração)	30
Tabela 3 – Parâmetros para as curvas S-N (Wöhler) para os aços dentro do concreto	32
Tabela 4 – Ensaio de fadiga das barras isoladas de Ferreira (2017)	34
Tabela 5 – Ensaio de fadiga das telas soldadas de Ferreira (2017)	35
Tabela 6 – Escalas de dureza Rockwell	44
Tabela 7 – Valores da massa, comprimento, área da seção transversal, diâmetro nominal e massa nominal das amostras	53
Tabela 8 – Dureza Rockwell para as amostras	54
Tabela 9 – Elementos químicos e suas respectivas porcentagens	54
Tabela 10 – Ensaio de tração das barras isoladas	55
Tabela 11 – Ensaio de tração das telas soldadas	56
Tabela 12 – Ensaio-teste de fadiga	57
Tabela 13 – Parâmetros de ensaio de fadiga para as barras isoladas e telas soldadas	58
Tabela 14 – Ensaio de fadiga das barras isoladas	59
Tabela 15 – Ensaio de fadiga das telas soldadas	60
Tabela 16 – Local de ruptura das telas soldadas após ensaio de fadiga	61
Tabela 17 – Resultados obtidos para a variação de tensão $\Delta\sigma=449,7$ MPa (barras isoladas)	68
Tabela 18 – Resultados obtidos para a variação de tensão $\Delta\sigma=273,2$ MPa (barras isoladas)	68
Tabela 19 – Resultados obtidos para a variação de tensão $\Delta\sigma=220,1$ MPa (barras isoladas)	68
Tabela 20 – Resultados obtidos para a variação de tensão $\Delta\sigma=449,7$ MPa (telas soldadas)	69
Tabela 21 – Resultados obtidos para a variação de tensão $\Delta\sigma=273,2$ MPa (telas soldadas)	69

Tabela 22 – Resultados obtidos para a variação de tensão $\Delta\sigma=220,1$ MPa (telas soldadas).....	70
Tabela 23 – Valores de N_m , c_v e N_k para os ensaios realizados com barras isoladas	71
Tabela 24 – Valores de N_m , c_v e N_k para os ensaios realizados com telas soldadas	71
Tabela 25 – Valores de k para as barras isoladas e telas soldadas.....	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características dos fios	42
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASM	<i>American Society for Metals</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CEB	<i>Comite Euro-Internacional Du Beton</i>
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
ISO	<i>International Standard Organization</i>
MERCOSUL	Mercado Comum do Sul
NBR	Norma Brasileira
PPGEM	Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais
RSW	<i>Resistance Spot Welding</i>
UFPI	Universidade Federal do Piauí

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Constante da equação de Basquin
A_l	Alongamento característico da amplitude da máquina de fadiga
A_s	Área da seção transversal da amostra
B	Constante da equação de Basquin
CP	Corpo de prova
cv	Coeficiente de variação
D	Diâmetro dos pinos de dobramento das barras de aço
E	Módulo de elasticidade
f_{st}	Limite de resistência
f_y	Limite de escoamento
f_{yk}	Resistência característica de escoamento
HR	Dureza Rockwell
HRA	Dureza Rockwell para a escala “A”
k	Coeficiente de inclinação da Curva de Wöhler
k_1	Inclinação da curva 1 da função de resistência à fadiga
k_2	Inclinação da curva 2 da função de resistência à fadiga
l	Comprimento da amostra
l_0	Comprimento inicial da amostra
m	Constante que representa a inclinação da curva da função de resistência à fadiga
m_n	Massa nominal da amostra
m_s	Massa da amostra
N	Número de ciclos
N_k	Valor característico das ciclagens

N_m	Média do número de ciclagens
n	Parâmetro adimensional
S	Tensão
S_F	Resistência à fadiga
T_1	Tipo de curva S-N para barras retas e soldadas de armadura passiva de aço CA-50, e armadura ativa de pré-tração, fio ou cordoalha reta e cabos retos
T_2	Tipo de curva S-N para armadura ativa de pós-tração e cabos curvos
T_3	Tipo de curva S-N para conectores mecânicos e ancoragens
T_4	Tipo de curva S-N para armadura passiva em ambiente marinho e barras soldadas
$\Delta f_{sd,fad}$	Variação da tensão resistente de fadiga
$\Delta f_{sd,fad,min}$	Variação da tensão resistente mínima de fadiga
$\Delta \sigma$	Variação de tensão de fadiga
ε	Deformação
γ	Massa específica do aço
ϕ	Diâmetro nominal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVA.....	19
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo Geral	21
1.2.2	Objetivos Específicos	21
1.3	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	HISTÓRICO DO ESTUDO DE FADIGA	23
2.2	FALHA POR FADIGA.....	24
2.3	AÇO CA-60.....	28
2.4	SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA.....	30
2.5	ENSAIO DE FADIGA	32
3	METODOLOGIA.....	37
3.1	MATERIAIS.....	38
3.2	MÉTODOS.....	40
3.2.1	Verificação da massa nominal.....	40
3.2.2	Ensaio de dureza	42
3.2.3	Ensaio de fluorescência de raios X.....	44
3.2.4	Ensaio de tração	45
3.2.5	Ensaio de fadiga	46
3.2.6	Análise microestrutural.....	50
4	RESULTADOS	53
4.1	VERIFICAÇÃO DA MASSA NOMINAL	53
4.2	ENSAIO DE DUREZA	53
4.3	ENSAIO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X	54
4.4	ENSAIO DE TRAÇÃO	55
4.5	ENSAIO DE FADIGA	56
4.6	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	62
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	65
5.1	VERIFICAÇÃO DA MASSA NOMINAL	65
5.2	ENSAIO DE DUREZA	65
5.3	ENSAIO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X	65
5.4	ENSAIO DE TRAÇÃO	66
5.5	ENSAIO DE FADIGA	67
5.6	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	75

6	CONCLUSÕES	76
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

A análise da eficiência do comportamento das estruturas de concreto armado é um tema de constante estudo e abrangência das normatizações brasileiras e internacionais. Os estudos experimentais dos materiais aplicados na construção civil vêm contribuindo para o melhor conhecimento das estruturas, bem como para melhores escolhas durante a fase de dimensionamento. A evolução dos estudos e aplicações dos materiais, juntamente com o desenvolvimento de novas técnicas construtivas, trazem benefícios para execução de diversos tipos de construção.

Dentre os materiais aplicados na construção civil, tem-se o aço CA-60 que é capaz de resistir a diversos tipos de esforços dependendo da função estrutural para a qual será submetido. Para entender melhor o comportamento desse tipo de aço que compõe as estruturas, mostra-se necessário cada vez mais estudos para compreensão dos esforços atuantes e seus respectivos efeitos. Diante disso, ressalta-se o efeito da fadiga que ocorre em estruturas submetidas a carregamentos móveis, a exemplo das pontes.

Antunes (2017) explica que a fadiga se trata de mudanças progressivas de degradação nas propriedades que ocorrem em um material devido a aplicação de carregamentos cíclicos, especialmente àquelas mudanças que levam à formação de uma trinca ou resultam na falha de um elemento. Antunes (2017) também diz que esse processo é altamente influenciado pelas condições superficiais, de modo que a nucleação da trinca de fadiga será preferencialmente na superfície da estrutura. Já para Yang *et al.* (2005), o dano por fadiga está intimamente relacionado à deformação plástica e à dissipação de calor.

Van Vlack (1970) menciona que a tensão que um material pode suportar ciclicamente é muito menor que a suportável em condições estáticas. Em estruturas submetidas a carregamentos móveis este fenômeno é mais evidenciado, necessitando assim de cuidados na concepção da estrutura.

Ainda não há prescrição normativa brasileira no que diz respeito ao comportamento à fadiga do aço CA-60, visto que a ABNT NBR 6118 (2014) se limita a tratar de recomendações e métodos de cálculo para o aço CA-50. Apesar disso, Ferreira (2017) iniciou a caracterização do comportamento desse aço mediante as ações cíclicas.

Em face disso, destaca-se a importância de estudos experimentais que

venham a contribuir para o tema, com o intuito de conhecer o fenômeno da fadiga em vergalhões de aço CA-60.

1.1 JUSTIFICATIVA

O concreto armado é composto de concreto e aço. O concreto é um material heterogêneo que possui grande resistência à compressão e boa durabilidade, podendo conter aditivos químicos com a finalidade de melhorar ou modificar suas propriedades básicas. Já o aço é adicionado ao concreto com o objetivo de resistir às tensões de tração atuantes. A ABNT NBR 6118 (2014) é a norma brasileira que estabelece os requisitos básicos exigíveis para o projeto de estruturas de concreto armado. No que diz respeito à fadiga, esta norma aborda a verificação da fadiga das armaduras, tanto de flexão como de cisalhamento, a fadiga do concreto, seja à compressão ou à tração, bem como critérios para as verificações do Estado Limite Último (ELU) e do Estado Limite de Serviço (ELS) de fadiga.

A ABNT NBR 6118 (2014) não trata de ações de fadiga de alta intensidade capazes de provocar danos com menos de 20000 repetições, e sim de média e baixa intensidade e número de repetições até 2000000 ciclos. Para a verificação da fadiga, os esforços solicitantes podem ser calculados para regime elástico. Ressalta-se que, para a verificação da fadiga da armadura, a norma traz os parâmetros para a curva S-N relativo ao aço CA-50 dentro do concreto. Segundo a ABNT NBR 7480 (2007), esse aço possui uma resistência característica de escoamento mínima para cargas estáticas de 500 MPa.

O presente trabalho analisa experimentalmente o aço CA-60, para que se possa obter resultados que possam contribuir no que diz respeito às prescrições normativas relacionadas a esse tipo de aço, dentre outras verificações. Inicialmente, sabe-se que a resistência característica de escoamento normativa do aço CA-60 é de 600 MPa. Contudo, enquanto o aço CA-50 é obtido por processo de laminação a quente, o aço CA-60 é produzido por laminação a frio, o que pode acarretar diferentes níveis de resistência às cargas variáveis em virtude da organização dos grãos.

A segurança de estruturas de concreto armado, no que diz respeito a resistência à fadiga, tem sido objeto de estudo em vários países, visando aprimorar suas normas e práticas (CAVALCANTI, 2011). Para se conhecer o problema da fadiga para efeito de critérios de dimensionamento dessas estruturas, é necessário entender,

com toda a clareza possível, o comportamento à fadiga do aço CA-60 que ainda não possui recomendações normativas.

No Brasil, existem poucos trabalhos que abordam ensaios axiais de fadiga de vergalhões de aço CA-60 para concreto armado. Geralmente, são realizadas pesquisas referentes ao aço CA-50, em que se destacam os trabalhos de Buelta (2001), Dantas (2010), Caixeta (2010), Cavalcanti (2011) e Stucchi *et al.* (2011), que realizaram análises a partir de ensaios experimentais em bitolas de 10 mm e 12,5 mm de diâmetro, e com parâmetros já descritos em normas internacionais. Já para o aço CA-60 não há referências normativas nacionais ou internacionais que direcionem a escolha das variações de tensão adequadas de acordo com as ciclagens a serem ensaiadas.

Ferreira (2017), Ferreira *et al.* (2018a) e Ferreira *et al.* (2018b) foram os primeiros pesquisadores a estudarem o efeito da fadiga em barras isoladas e telas soldadas de vergalhões de aço CA-60. Esses estudos foram então desenvolvidos nos laboratórios do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais (PPGEM) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI). Pelo fato de não existir referências normativas, foram realizados ensaios-teste para a determinação das variações de tensão a serem utilizadas nos parâmetros de ensaios de vergalhões de aço CA-60 com 8 mm de diâmetro. Os valores adotados foram 320,81 MPa, 180,16 MPa e 148,00 MPa, que se demonstraram satisfatórios para as condições de ensaio e diâmetro escolhidos.

Ferreira (2017), Ferreira *et al.* (2018a) e Ferreira *et al.* (2018b) concluem em seus estudos que, quando se compara o comportamento de resistência à fadiga entre barras isoladas e telas soldadas em aço CA-60, os resultados de ruptura são bem mais próximos nos vergalhões ensaiados com a variação de tensão de 320,81 MPa, pois nesse elevado nível de tensão houve menor dispersão nos resultados em virtude da proximidade com a tensão de ruptura. Porém, para as variações de tensão de 180,16 MPa e 148,00 MPa, obtém-se uma diferença bem maior para os resultados estimados, indicando que as telas se apresentam de forma mais frágil em relação a ensaios dinâmicos.

Deste modo, a escolha das variações de tensão foi realizada através de vários testes de ruptura à fadiga para se conhecer o comportamento do aço diante das condições de ensaio. Assim, optou-se por dar continuidade a esse primeiro estudo, sendo agora aplicado à bitola de 7 mm.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em estudar o comportamento à fadiga de barras isoladas e telas soldadas de aço CA-60 com diâmetro de 7 mm.

1.2.2 Objetivos Específicos

- 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: $1 \cdot 10^5$, $1 \cdot 10^6$ e $2 \cdot 10^6$;
- Verificar os valores de massa nominal de amostras de aço CA-60;
- Apresentar os valores de dureza para as amostras estudadas;
- Apresentar os principais elementos químicos e suas respectivas porcentagens para o aço CA-60;
- 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 7 mm, com a definição das tensões de escoamento, resistência e ruptura;
- Determinar os coeficientes k que definem as Curvas de Wöhler;
- Comparar os resultados das Curvas de Wöhler das barras isoladas e telas soldadas;
- Comparar os resultados de resistência à fadiga entre o diâmetro de barra estudado e a bitola de 8 mm;
- Caracterizar a estrutura do material para a análise da microestrutura dos vergalhões estudados através de microscopia óptica.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido nos seguintes capítulos:

No Capítulo 1, Introdução, consta uma abordagem geral sobre as temáticas que nortearam a elaboração do trabalho, acrescido da justificativa e dos objetivos da

pesquisa.

No Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico, composto por um breve histórico do estudo de fadiga, a descrição do processo de falha por fadiga, as características do aço CA-60, a descrição do processo de soldagem de telas e os parâmetros do ensaio de fadiga, bem como as pesquisas já realizadas.

Já o Capítulo 3 aborda a metodologia utilizada para a realização da pesquisa, composta da apresentação do material em estudo e da descrição dos métodos de ensaio. Destaca-se que, para a realização dos ensaios de fadiga, foi necessária uma investigação experimental prévia.

O Capítulo 4 abrange os resultados obtidos em cada ensaio realizado de acordo com a metodologia proposta.

O Capítulo 5 traz as análises comparativas entre as barras isoladas e as telas soldadas, de acordo com todos os resultados obtidos pelas análises experimentais.

Encerrando o texto da pesquisa, o Capítulo 6 apresenta os comentários em relação aos resultados encontrados e as conclusões em relação às comparações realizadas. Este capítulo também traz sugestões de temas para trabalhos futuros.

Após os capítulos descritos acima, constam as referências bibliográficas consultadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para este trabalho, fez-se necessária uma fundamentação teórica que serviu como base para o desenvolvimento da pesquisa. Deste modo, foi de suma importância um levantamento histórico dos acontecimentos que contribuíram para o entendimento do efeito da fadiga, o estudo do processo de falha por fadiga, o conhecimento do material a ser estudado, o entendimento do processo de soldagem empregado para obtenção de telas e as condições dos ensaios de fadiga.

2.1 HISTÓRICO DO ESTUDO DE FADIGA

Os primeiros registros sobre o fenômeno da fadiga foram escritos por volta de 1829, pelo engenheiro alemão W. A. J. Albert, que fez alguns testes em correntes de aço usadas em mineradoras. Em 1839, o termo fadiga foi usado pela primeira vez num livro de mecânica escrito por J. V. Poncelet, na França (SILVA, 2019).

Os estudos de fadiga se intensificaram após um acidente na ferrovia próxima a Versalhes, em 1842 (CAVALCANTI, 2011). Em 1843, um engenheiro ferroviário britânico chamado W. J. M. Rankine, percebeu características de ruptura por fadiga e notou o perigo das concentrações das tensões nos componentes das máquinas (CAIXETA, 2010).

Em 1871, o engenheiro August Wöhler publicou os resultados do seu trabalho e concluiu que os responsáveis por uma falha por fadiga estão relacionados com a variação de tensão e o número de ciclos (DANTAS, 2010). Uma das contribuições de Wöhler foi identificar que a resistência à fadiga do material poderia ser medida sob cargas simples em pequenos corpos de provas padronizados (RÊGO, 2017).

Wöhler descobriu que a resistência à fadiga S_F (N) decresce com a vida N (número de ciclos), e na maioria das vezes segue uma relação ajustável por uma parábola (RÊGO, 2017). Em 1910, a Curva de Wöhler, também chamada de Curva S-N, foi representada em forma logarítmica pelo americano O. H. Basquin que propôs a Equação (1) (CAIXETA, 2010):

$$N \cdot (S_F)^B = A \quad (1)$$

onde B e A são ajustados aos dados experimentais.

Após muitos anos de estudo, as falhas por fadiga continuam sendo um problema em projetos de engenharia (DANTAS, 2010). Em relação à avaliação da segurança à fadiga em estruturas de concreto armado, verifica-se que as normas de projeto CEB-FIP Model Code 1990 (1993), ABNT NBR 6118 (2014) e as recomendações do ACI 215 (1997), por exemplo, incorporam alguns procedimentos simplificados de verificação.

O estudo do comportamento mecânico dos materiais à fadiga é essencial para o aprimoramento destes critérios e desenvolvimento de métodos analíticos mais avançados para a análise da fadiga e estimativas de falha. Além de servir para prevenir falhas, informações sobre a tendência e rapidez de acúmulo de danos e perda de desempenho estrutural ao longo dos ciclos de carga são fundamentais para o gerenciamento das atividades de prevenção e manutenção (MENEGETTI, 2007).

2.2 FALHA POR FADIGA

A fadiga é um processo de falha mecânica originada primariamente por carregamentos cíclicos, cuja principal característica é gerar e/ou propagar lentamente uma trinca, até a eventual fratura de peça (CASTRO; MEGGIOLARO, 2009). A fadiga resulta em mudança estrutural permanente, localizada e progressiva, e ocorre em materiais sujeitos a tensões flutuantes, podendo causar fraturas após um número suficiente de flutuações (ASM, 2002).

A diminuição na carga máxima possível, sob aplicação cíclica da carga, é diretamente atribuída ao fato de o material não ser um sólido idealmente homogêneo. Em cada meio ciclo, produz-se pequenas deformações que não são totalmente reversíveis. Van Vlack (1970) enumera as seguintes etapas que indicam a ruptura por fadiga:

- Tensionamento cíclico causa deformações a frio e escorregamento localizados;
- Gradual redução de ductilidade nas regiões encruadas resulta na formação de fissuras microscópicas;
- Efeito de entalhe das fissuras concentra tensões até que ocorra a ruptura completa.

A iniciação típica das trincas por fadiga envolve a movimentação cíclica de discordâncias que tende a agrupá-las lentamente em células e a formar bandas de

deslizamento persistentes na superfície da peça (ANTUNES, 2017). Essas bandas de deslizamento persistentes, à medida que vão crescendo, podem formar extrusões e intrusões superficiais e iniciar várias microtrincas no ponto crítico da estrutura (CASTRO; MEGGIOLARIO, 2009).

A ruptura por fadiga está relacionada com o fato de, ao invés de se ter um comportamento elástico ideal e reversível do material, ter-se deformação plástica não-uniforme. Essas deformações não-reversíveis se localizam ao longo das placas de escorregamento, nos contornos de grão e ao redor das irregularidades de superfície devidas a defeitos geométricos ou de composição (VAN VLACK, 1970).

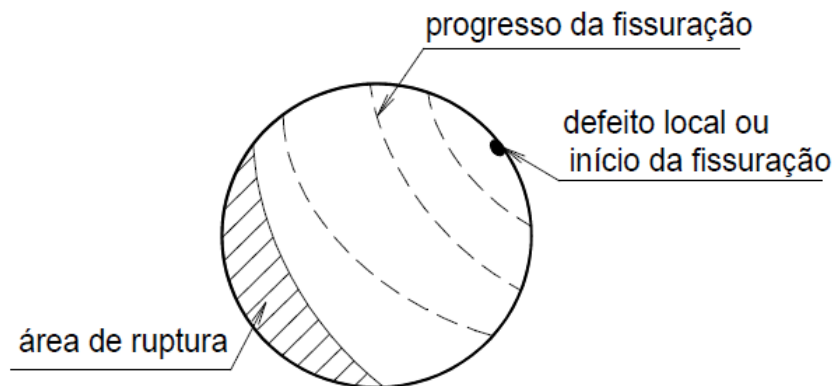
Inicialmente, uma trinca microscópica provocada por carregamento cíclico começa a se propagar ao longo do material. A trinca mais severa cria concentração de tensões maiores que a proporcionada pelo entalhe original. Desenvolve-se, assim, uma zona plástica na ponta da trinca, cada vez que uma tensão de tração a alonga, abrandando-se as tensões em suas pontas e reduzindo a concentração de tensão efetiva. Assim, o crescimento da trinca se deve a tensões de tração e a trinca propaga-se ao longo de planos normais aos de tensão máxima de tração (NORTON, 2013).

Portanto, a fadiga ocorre devido a esse processo de degradação progressiva na microestrutura cristalina do material sujeito a condições de solicitações de magnitude inferior à capacidade resistente do material (CAVALCANTI, 2011).

A ASM (2002) explica que a falha por fadiga tem um ou mais locais de iniciação, ou seja, uma região de trinca progressiva, uma região de propagação e uma zona final de fratura por sobrecarga rápida. A ASM (2002) também cita que as descontinuidades introduzidas durante o processamento ou fabricação (por exemplo, inclusões anormalmente grandes, descontinuidades de solda e trincas de retificação) ou serviço (por exemplo, corrosão e danos por impacto) podem resultar no início da trinca por fadiga sob circunstâncias em que um material sem defeito teria vida útil aceitável.

A Figura 1 identifica o modo de fratura por fadiga que se inicia por meio de um defeito local e, então, ocorre a propagação da fissura até uma área de ruptura.

Figura 1 – Processo de abertura de fissuras até a ruptura por fadiga



Fonte: Adaptado de CEB-FIP Model Code 1990 (1993).

Phillips (2016) alerta para os elementos que sofreram processo de soldagem, pois as regiões de solda são locais comuns de concentrações de tensão e, portanto, provável local de iniciação de trinca por fadiga.

Lippold (2015) também destaca que as soldas podem ser particularmente suscetíveis a esta forma de falha devido às mudanças na microestrutura e/ou efeitos de concentração de tensão que são associados às soldas, além da presença de defeitos de fabricação preexistentes que também influenciam o comportamento à fadiga de estruturas soldadas.

Norton (2013) cita dois modelos de falha por fadiga: o modelo tensão-número de ciclos (S-N) e o modelo deformação-número de ciclos (ϵ -N). Logo, vale destacar que este trabalho aborda o modelo tensão-número de ciclos (S-N) para o aço CA-60. Rêgo (2017) explica que no modelo S-N o nível de tensão média influencia no comportamento à fadiga do material ou componente estrutural.

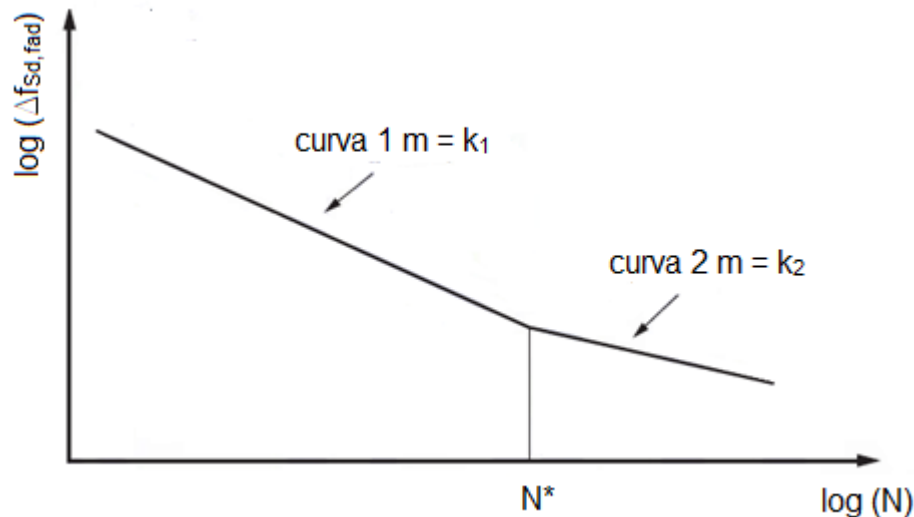
A ABNT NBR 6118 (2014) apresenta o gráfico da Figura 2 relacionando o número de ciclos com a variação de tensão aplicada, em escala logarítmica, para o aço CA-50. A função da resistência à fadiga para esse tipo de aço consiste em segmentos de reta da forma da Equação (2):

$$(\Delta f_{Sd,fad})^m \cdot N = \text{constante} \quad (2)$$

onde $\Delta f_{Sd,fad}$ é a variação da tensão resistente do aço, m é uma constante que

representa a inclinação da curva, podendo ser k_1 ou k_2 , e N o número de ciclos de ruptura.

Figura 2 – Curvas de resistência à fadiga (curvas S-N) para o aço CA-50



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118 (2014).

Esse gráfico com a Curva de Wöhler é definido por dois coeficientes, k_1 e k_2 , que determinam a inclinação da curva. A ABNT NBR 6118 (2014) destaca que os valores de inclinação dependem do tipo de barra e do número de ciclos de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Tipos da curva S-N

Tipo	N^*	k_1	k_2
T_1	10^6	5	9
T_2	10^6	3	7
T_3	10^6	3	5
T_4	10^7	3	5

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118 (2014).

Sendo que T_1 é o tipo de curva para barras retas e soldadas de armadura passiva de aço CA-50, e armadura ativa de pré-tração, fio ou cordoalha reta e cabos retos; T_2 para armadura ativa de pós-tração e cabos curvos; T_3 para conectores mecânicos e ancoragens; e T_4 para armadura passiva em ambiente marinho e barras soldadas.

Os critérios de medição da falha por fadiga estão relacionados a várias técnicas de ensaios experimentais, como o ensaio de flexão rotativa, o ensaio de fadiga sob torção e o ensaio de fadiga sob força axial, com o propósito de realizar a medição do comportamento dos materiais com relação a tensões e deformações que variam ao longo do tempo.

Para a análise dos vergalhões deste estudo, foi realizado o ensaio de fadiga sob força axial. Neste ensaio, um corpo de prova foi carregado ciclicamente em uma máquina de ensaios servo-hidráulica para obtenção dos coeficientes de inclinação k e, conseqüentemente, da Curva de Wöhler.

2.3 AÇO CA-60

Chiaverini (1988) define o aço como uma liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação. Ferreira (2017) explica que o teor de carbono presente na liga é um fator determinante nas características mecânicas do aço, pois, por exemplo, quanto maior a quantidade de carbono, maior será a resistência e menor será a ductilidade.

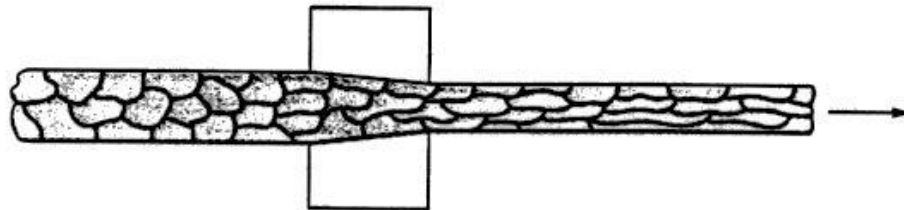
A ABNT NBR 7480 (2007) fixa as condições exigíveis na encomenda, fabricação e fornecimento de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado, com ou sem revestimento superficial. Segundo essa norma, as barras de aço CA-50 são providas de nervuras transversais oblíquas, possuem diâmetro nominal variando entre 6,3 mm e 40 mm, são produzidos por laminação a quente sem processo posterior de deformação mecânica e possuem tensão característica de escoamento mínima de 500 MPa. Já os elementos de aço CA-60, denominados de fios, podem ser lisos, entalhados ou nervurados, possuem diâmetro nominal variando de 2,4 mm à 10 mm, e são produzidos a partir de fio-máquina por trefilação ou laminação a frio.

O aço CA-60 é deformado a frio no processo conhecido como trefilação ou laminação a frio. Neste processo, os fios de aço são forçados a passar através de várias fieiras, cujo diâmetro de entrada é maior que o de saída (CASCUDO; HELENE, 2000). Portanto, o material sofre alterações em sua microestrutura, fenômeno este conhecido como encruamento de grãos.

A Figura 3 ilustra o processo de trefilação, destacando a redução de seção do

aço e a orientação preferencial dos grãos, segundo a direção paralela ao esforço de tração aplicado.

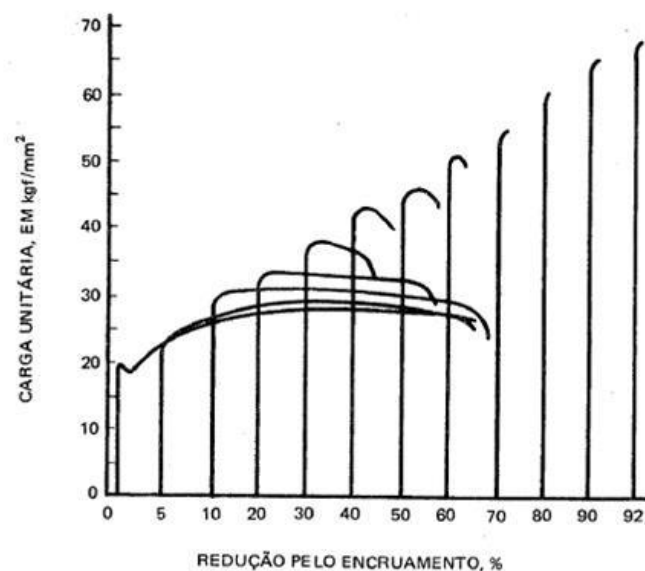
Figura 3 – Esquema de trefilação



Fonte: Shackelford (1996).

Hissanaga (2013) explica que a deformação a frio provoca o encruamento dos grãos e, como consequência, aumenta o limite de resistência. Esse processo prejudica as propriedades relacionadas com a ductilidade e tenacidade. Esse efeito é mais acentuado quanto mais intensa for a deformação produzida de acordo com a Figura 4.

Figura 4 – Influência do encruamento sobre as curvas tensão-deformação



Fonte: Chiaverini (1986).

Os aços estruturais para construção civil possuem teores de carbono da ordem de 0,18% a 0,25%. No caso do CA-60, a taxa média é de 0,2% (BELGO, 2010).

A ABNT NBR 7480 (2007) apresenta as características dos fios em aço CA-60 para o diâmetro nominal de 7 mm, cuja massa nominal deve ser de 0,302 kg/m, com uma variação máxima permitida de 6%, a área da seção de 38,5 mm² e perímetro de 22 mm. A densidade linear, em quilograma por metro, é obtida pelo produto da área da seção nominal, em metro quadrado, por 7850 kg/m³.

A ABNT NBR 7480 (2007) também preconiza os valores mínimos de resistência característica de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento após ruptura apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas exigíveis de fios de aço destinados a armaduras de concreto armado (valores mínimos de tração)

Categoria	Resistência característica de escoamento (f_{yk}) (MPa)	Limite de resistência (f_{st}) (MPa)	Razão entre o limite de resistência (f_{st}) e o limite de escoamento (f_y)	Alongamento após ruptura em 10 ϕ (%)
CA-60	600	660	1,05	5

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7480 (2007).

2.4 SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA

As barras de aço CA-60 podem ser empregadas em estruturas de concreto armado tanto de forma isolada, ou seja, em formato de fio, quanto na forma de tela. A difusão do uso de telas soldadas na construção civil fez-se pela necessidade de estruturas pré-moldadas exigirem cada vez menos tempo para execução, onde esse tipo de configuração de barra passa por um processo automatizado de soldagem que permite a união de peças com maior produtividade.

Dentre a vasta aplicação de telas soldadas na construção civil, pode-se mencionar as estruturas de obra de arte especial, como pontes e túneis, além de pavimentos rígidos de concreto armado. Logo, o cuidado a se empregar telas soldadas faz-se importante, nestes casos, devido à ação cíclica de carregamentos móveis que irão provocar esforços de fadiga neste tipo de elemento. Por isso, o processo de soldagem empregado deve garantir a qualidade do produto final.

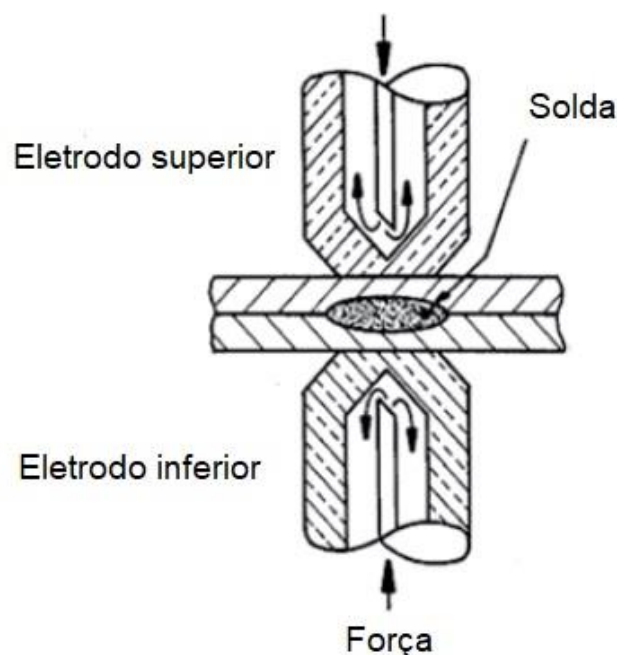
O processo de soldagem utilizado para a união de barras e formação de telas soldadas de aço CA-60 é a soldagem por resistência. Marques, Modenesi e

Bracarense (2009) definem este tipo de processo como um grupo no qual a união de peças metálicas é produzida em superfícies sobrepostas ou em contato topo a topo, pelo calor gerado na junta através de resistência à passagem de uma corrente elétrica (efeito Joule) e pela aplicação de pressão, podendo ocorrer uma certa quantidade de fusão na interface.

Dentre os processos de soldagem por resistência, a soldagem por pontos, do inglês *Resistance Spot Welding* (RSW), é utilizada para fundir barras de aço CA-60. Na soldagem por pontos, a solda é obtida na região das peças colocadas entre um par de eletrodos, e várias soldas podem ser obtidas simultaneamente pela utilização de múltiplos pares de eletrodos (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

A Figura 5 apresenta um detalhe esquemático do processo de soldagem por pontos. A união de duas peças é proporcionada pela resistência elétrica e pela aplicação de uma força para fusão do material.

Figura 5 – Representação esquemática do processo de soldagem por pontos



Fonte: Phillips (2016).

Phillips (2016) explica que este é o mais comum dos processos de soldagem por resistência, pois sua combinação de velocidades de soldagem extremamente rápidas e eletrodos de auto-fixação o tornam um processo ideal para ambientes de alta produção.

A passagem da corrente elétrica provoca aquecimento e, em alguns casos, uma certa quantidade de fusão das peças a serem unidas. A aplicação de pressão garante a continuidade do circuito elétrico e permite a obtenção de soldas com baixo nível de contaminação, seja pela proteção física da região de solda ou pela expulsão do material contaminado para fora da junta. O resfriamento da junta se dá sobre pressão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

2.5 ENSAIO DE FADIGA

Dentre os parâmetros necessários para o ensaio de fadiga, destaca-se a determinação da variação de tensão a ser aplicada no material para cada número de ciclos a serem previstos.

A ABNT NBR 6118 (2014) recomenda valores de variação de tensão para 2000000 ciclos. Porém, esses parâmetros são previstos para barras de aço CA-50 com diâmetro de 10 a 40 mm dentro do concreto, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros para as curvas S-N (Wöhler) para os aços dentro do concreto

Valores de $\Delta f_{sd,fad,min}$ para $2 \cdot 10^6$ ciclos (MPa)								
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
Barras retas ou dobradas com $D < 25\phi$	105	105	105	105	100	95	90	85
Estribos	85	85	85	-	-	-	-	-
Ambiente marinho	65	65	65	65	65	65	65	65
Barras soldadas	85	85	85	85	85	85	85	85

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118 (2014).

Como não há referências normativas, Ferreira (2017), Ferreira *et al.* (2018a) e Ferreira *et al.* (2018b) realizaram ensaios-teste para a determinação das variações de tensão a serem utilizadas nos ensaios. Os valores escolhidos foram 320,81 MPa, 180,16 MPa e 148,00 MPa para barras isoladas e telas soldadas de aço CA-60 de 8 mm diâmetro, para a análise inicial de previsão das variações mais próximas às ciclagens iniciais propostas de $1 \cdot 10^5$, $1 \cdot 10^6$ e $2 \cdot 10^6$ ciclos. Foi definido o valor de referência de $1 \cdot 10^6$, pois se trata do ponto de mudança de inclinação da curva S-N do

tipo T₁ para barras retas e soldadas de armadura passiva, como apresentado na ABNT NBR 6118 (2014). Assim, os demais pontos para $1 \cdot 10^5$ e $2 \cdot 10^6$ de ciclos formariam a curva de acordo com os ensaios realizados.

Para a viabilização dos estudos de fadiga de Ferreira (2017), Ferreira *et al.* (2018a) e Ferreira *et al.* (2018b), houve a necessidade da fabricação de um dispositivo para adequação da máquina de ensaios mecânicos de fadiga ao diâmetro requerido de vergalhões CA-60. 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 mordente desenvolvido por Ferreira (2017), Ferreira *et al.* (2018a) e Ferreira *et al.* (2018b) consistiu em 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. Foi utilizada uma semi-cana de alumínio entre a cunha e o vergalhão, com o intuito de ajudar na diminuição da concentração de tensões.

A Figura 6 mostra o mordente desenvolvido por Ferreira (2017), Ferreira *et al.* (2018a) e Ferreira *et al.* (2018b), com comprimento entre garras de 20 cm. O projeto deste mordente está apresentado no trabalho de Ferreira *et al.* (2017).

Figura 6 – Mordente composto por fixador cônico e cunha com semi-canas de alumínio



Fonte: Ferreira (2017).

Na sua investigação experimental, as flutuações de tensões foram previamente definidas e relacionadas com as ciclagens propostas. No seu estudo, as previsões de rupturas foram para as ciclagens de $1 \cdot 10^5$, $1 \cdot 10^6$ e $2 \cdot 10^6$ de ciclos. Nos ensaios das barras isoladas, a variação de tensões para a previsão de $2 \cdot 10^6$ de ciclos não encontrou resultados definitivos com as amostras ensaiadas, já que uma parte dos corpos de prova não rompeu antes de $5 \cdot 10^6$ de ciclos.

A Tabela 4 e a Tabela 5 demonstram os resultados para barras isoladas e telas da pesquisa de Ferreira (2017), Ferreira *et al.* (2018a) e Ferreira *et al.* (2018b). Para cada uma das variações de tensão definidas nos ensaios-teste, foram ensaiados seis corpos de prova, tanto para as barras isoladas quanto para as telas soldadas. Destaca-se que a previsão de ciclos de ruptura em barras isoladas sem solda para a variação de tensão de 320,81 MPa era de $1 \cdot 10^5$ de ciclos, para variação de tensão de 180,16 MPa era de $1 \cdot 10^6$ de ciclos e para variação de tensão de 148,00 MPa era de $2 \cdot 10^6$ de ciclos.

Tabela 4 – Ensaio de fadiga das barras isoladas de Ferreira (2017)

Barras					
$\Delta\sigma=320,81$ MPa		$\Delta\sigma=180,16$ MPa		$\Delta\sigma=148,00$ 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: Ferreira (2017).

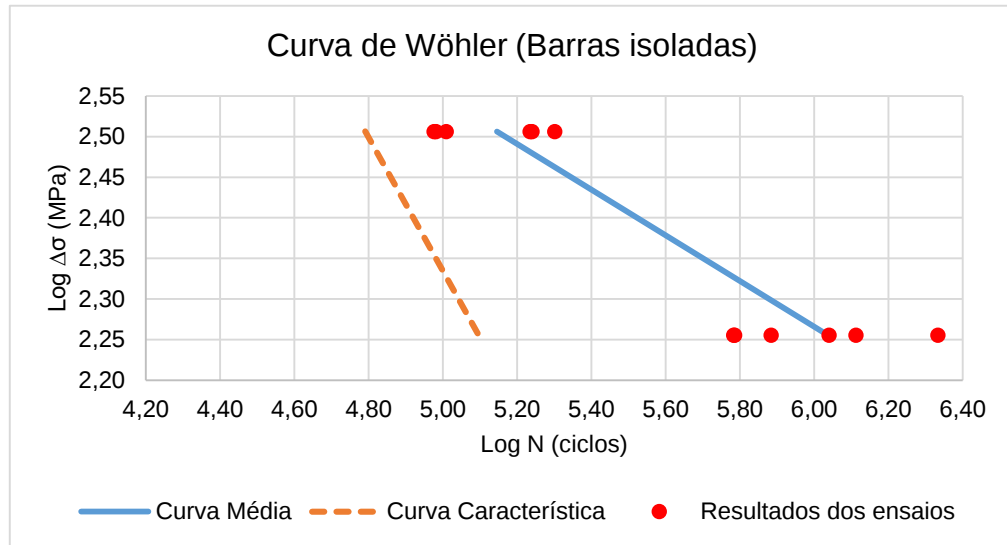
Tabela 5 – Ensaio de fadiga das telas soldadas de Ferreira (2017)

Telas					
$\Delta\sigma=320,81$ MPa		$\Delta\sigma=180,16$ MPa		$\Delta\sigma=148,00$ 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: Ferreira (2017).

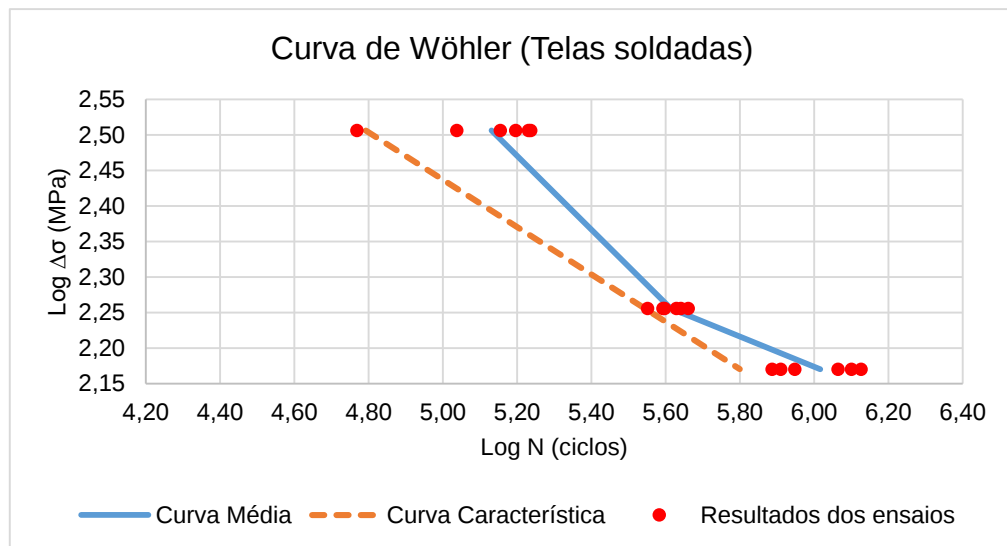
Através dos resultados obtidos por Ferreira (2017), Ferreira *et al.* (2018a) e Ferreira *et al.* (2018b), foram realizadas análises de distribuição normal e o cálculo dos valores característicos de cada flutuação considerando a média dos ciclos e o coeficiente de variação. Com isso, foram traçadas as Curvas de Wöhler para os resultados médios e característicos das barras isoladas e telas soldadas.

A Figura 7 apresenta a Curva de Wöhler elaborada por Ferreira (2017), onde mostram-se as curvas média e característica em escala logarítmica para as barras isoladas de 8 mm de diâmetro. Vale ressaltar que os resultados de número de ciclos para a variação de tensão de 148,00 MPa não foram representados graficamente, visto que dois corpos de prova não romperam até 5000000 de ciclos.

Figura 7 – Curva de Wöhler CA-60 (Barras) de Ferreira (2017)

Fonte: Adaptado de Ferreira (2017).

A Figura 8 apresenta a Curva de Wöhler elaborada por Ferreira (2017), referente às curvas média e característica em escala logarítmica para as telas soldadas de 8 mm de diâmetro.

Figura 8 – Curva de Wöhler CA-60 (Telas) de Ferreira (2017)

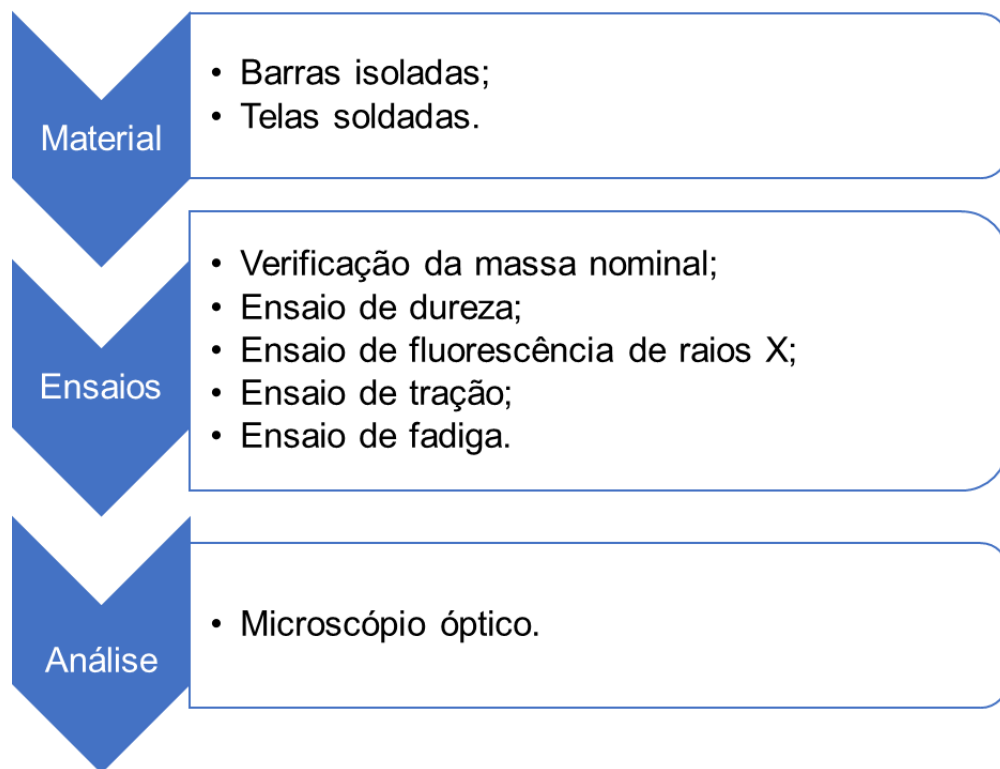
Fonte: Adaptado de Ferreira (2017).

3 METODOLOGIA

A metodologia proposta para este trabalho consiste no estudo da fadiga em vergalhões de aço CA-60 através de ensaios de fadiga por força axial.

Para alcançar os objetivos deste trabalho, obteve-se o material numa indústria metalúrgica e realizaram-se análises de verificação da massa nominal e ensaios de dureza, fluorescência de raios X, tração e fadiga, bem como a caracterização microestrutural. A Figura 9 apresenta de forma resumida o fluxograma da pesquisa proposta.

Figura 9 – Fluxograma da pesquisa



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Os ensaios de fadiga, assim como a verificação da massa nominal, ensaios de dureza, ensaio de fluorescência de raios X e análise microestrutural, foram realizados nos laboratórios do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais (PPGEM) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI). Já os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Federal do Piauí (UFPI).

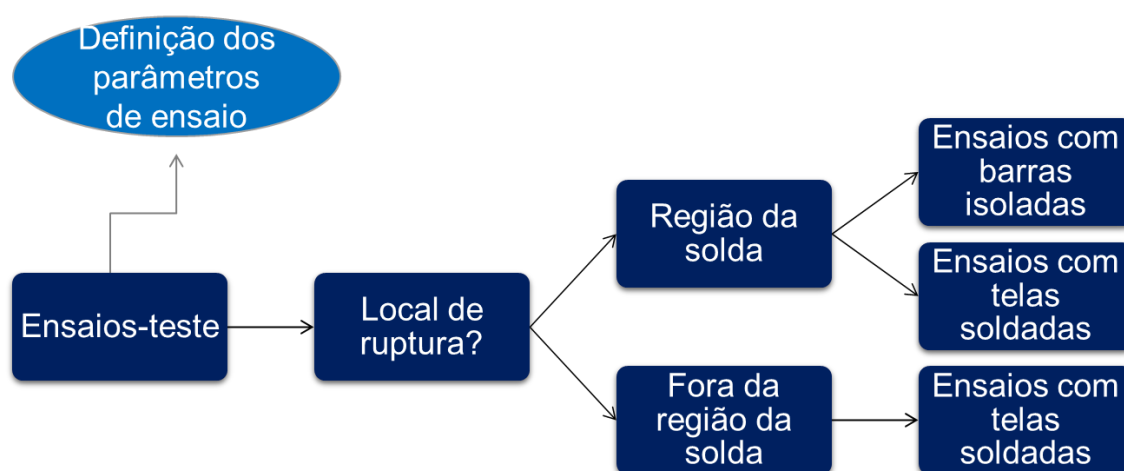
A diferença entre as barras isoladas e as telas é a presença de solda na

ligação entre vergalhões que compõem as telas. De tal modo, propõe-se analisar a influência da solda na ligação entre vergalhões em relação a resistência à fadiga, visto que a região soldada pode indicar um possível local de inicialização de trinca.

A Figura 10 apresenta o fluxograma dos ensaios de fadiga que foram realizados de acordo com o comportamento do material no que diz respeito ao local de ruptura, seja na região da solda ou fora dela.

Para a definição dos parâmetros de ensaio, foram realizados ensaios-teste. Como a ruptura dos corpos de prova ocorreu na região da solda, foram realizados ensaios tanto com barras isoladas quanto com telas soldadas.

Figura 10 – Fluxograma dos ensaios de fadiga



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Para entendimento da metodologia proposta, este capítulo descreve os materiais utilizados e os ensaios realizados na pesquisa.

3.1 MATERIAIS

Os vergalhões utilizados na realização deste trabalho foram do tipo aço CA-60, com resistência característica de escoamento mínima de 600 MPa e diâmetro nominal de 7 mm. As amostras foram produzidas em uma indústria metalúrgica situada na cidade de Teresina, capital do Piauí.

A Figura 11, a seguir, ilustra uma amostra de vergalhão CA-60 com diâmetro nominal de 7 mm e 30 cm de comprimento no formato de barra isolada utilizada nos

ensaios experimentais.

Figura 11 – Vergalhão de aço CA-60 com diâmetro nominal de 7 mm e 30 cm de comprimento



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Já a Figura 12, a seguir, exibe uma amostra de vergalhão CA-60 com diâmetro nominal de 7 mm e 30 cm de comprimento retirada de uma tela soldada com espaçamento de 10 cm entre barras utilizada nos ensaios experimentais.

Figura 12 – Vergalhão de aço CA-60 com diâmetro nominal de 7 mm e 30 cm de comprimento retirado de uma tela soldada com espaçamento de 10 cm entre barras



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Verificação da massa nominal

A verificação da massa nominal foi feita utilizando-se a medição através de uma balança de precisão digital modelo *Ohaus* de graduação 0,01 g e erro de 0,1 g, com capacidade entre 0,5 e 4100 g. Seis amostras de vergalhões foram pesadas na balança e medidos seus comprimentos por meio de um paquímetro digital.

A Figura 13 ilustra a balança de precisão digital que foi utilizada na verificação da massa das amostras.

Figura 13 – Balança de precisão digital modelo Ohaus



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

A Figura 14 ilustra o paquímetro digital que foi utilizado na verificação dimensional das amostras.

Figura 14 – Paquímetro digital



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Com a média dos comprimentos encontrados, foram calculadas as áreas e as massas por unidade de comprimento para a comparação com os valores recomendados pela ABNT NBR 7480 (2007), conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Características dos fios

Diâmetro nominal mm	Massa e tolerância por unidade de comprimento		Valores nominais	
Fios	Massa nominal kg/m	Máxima variação permitida para massa nominal	Área da seção mm ²	Perímetro mm
7,0	0,302	± 6%	38,5	22,0

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7480 (2007).

Para o cálculo da área da seção transversal de uma amostra, foi utilizada a Equação (3):

$$A_s = \frac{m_s}{l \cdot \gamma} \quad (3)$$

sendo que A_s é a área da seção transversal da amostra, m_s a massa, l o comprimento e γ a massa específica do aço. Logo, ressalta-se que a massa específica para os aços utilizados no concreto armado é de 7850 kg/m³.

Para o cálculo da massa nominal foi utilizada a Equação (4):

$$m_n = \frac{m_s}{l} \quad (4)$$

onde m_n é a massa nominal da amostra, m_s a massa e l o comprimento.

3.2.2 Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza foram realizados utilizando-se o durômetro modelo *Newage* com mostrador digital do Laboratório de Materiais do IFPI, conforme ilustra a Figura 15.

Figura 15 – Durômetro modelo Newage



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Dentre os principais ensaios de dureza, destacam-se: dureza Mohs (por risco); dureza Shore (por choque ou ressalto); durezas Brinell, Meyer, Rockwell, Knoop e Vickers (por penetração).

O método escolhido foi o ensaio de dureza Rockwell pelo fato de o material ser composto por uma liga metálica. Esse ensaio permitiu medir a resistência do material a uma deformação plástica localizada.

As normas consultadas para a realização dos ensaios foram a ASTM E18 (2019) e a ABNT NBR ISO 6508-1 (2019).

O número de dureza foi determinado pela diferença na profundidade de penetração resultante da aplicação de uma carga inicial menor seguida por uma carga principal maior. A carga menor é de 10 kgf, enquanto a maior pode ser de 60 kgf, 100 kgf ou 150 kgf, a qual depende da escala a ser escolhida e do tipo de penetrador. Os penetradores incluem esferas fabricadas em aço de elevada dureza, com diâmetros de 1/16, 1/8, 1/4 e 1/2 polegada, assim como cones de diamante, utilizados nos materiais de elevada dureza.

A Tabela 6 apresenta as escalas de dureza Rockwell da ASTM E18 (2019).

Tabela 6 – Escalas de dureza Rockwell

Escala	Penetrador	Força total de ensaio (kgf)	Cor da escala
B	Esfera (1,588 mm)	100	Vermelha
C	Diamante	150	Preta
A	Diamante	60	Preta
D	Diamante	100	Preta
E	Esfera (3,175 mm)	100	Vermelha
F	Esfera (1,588 mm)	60	Vermelha
G	Esfera (1,588 mm)	150	Vermelha
H	Esfera (3,175 mm)	60	Vermelha
K	Esfera (3,175 mm)	150	Vermelha
L	Esfera (6,350 mm)	60	Vermelha
M	Esfera (6,350 mm)	100	Vermelha
P	Esfera (6,350 mm)	150	Vermelha
R	Esfera (12,70 mm)	60	Vermelha
S	Esfera (12,70 mm)	100	Vermelha
V	Esfera (12,70 mm)	150	Vermelha

Fonte: Adaptado de ASTM E18 (2019).

Pelo fato de o aço CA-60 se tratar de uma liga ferro-carbono, utilizou-se a escala “A”, cujo penetrador é um diamante em formato cônico, com 120° de conicidade, aplicando-se uma carga inicial de 10 kgf e depois uma carga de 60 kgf durante 15 segundos, conforme a ASTM E18 (2019) e a ABNT NBR ISO 6508-1 (2019). Nesta escala, o valor de dureza está entre 20 HRA e 80 HRA.

Ao se especificar a dureza Rockwell, tanto o número de dureza como o símbolo da escala devem ser indicados. A escala é designada pelo símbolo HR seguida da identificação de escala apropriada.

No total, foram realizados seis ensaios de dureza para o aço CA-60.

3.2.3 Ensaio de fluorescência de raios X

A identificação dos principais elementos químicos presentes numa amostra de aço CA-60 foi feita através de ensaio de fluorescência de raios X, realizado no

equipamento modelo *Panalytical Epsilon 3 XL* do Laboratório de Materiais do IFPI, conforme mostra a Figura 16.

Figura 16 – Espectrômetro modelo *Panalytical Epsilon 3 XL*



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

3.2.4 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados com as amostras de vergalhões em aço CA-60, tanto as barras isoladas quanto as telas soldadas. Esses ensaios foram realizados na máquina modelo EMIC DL20000, com capacidade máxima de 200 kN, do Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Federal do Piauí (UFPI), conforme ilustrada na Figura 17.

Figura 17 – Máquina modelo EMIC DL20000



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Assim, foram realizados doze ensaios de tração, sendo seis para barras isoladas e seis para telas soldadas, para determinação da tensão de escoamento, limite de resistência e limite de ruptura.

Todos os ensaios seguiram as recomendações da norma ABNT NBR ISO 6892-1 (2018).

A velocidade do ensaio de tração depende da natureza do material. Para tanto, a ABNT NBR ISO 6892-1 (2018) preconiza que a velocidade de separação dos cabeçotes da máquina deve ser mantida o mais constante possível e estar dentro dos limites correspondentes à velocidade de tensionamento. Para materiais cujo módulo de elasticidade é maior ou igual a 150000 MPa, a velocidade de tensionamento mínima deve ser de $6 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e a máxima de $30 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. A ABNT NBR 6118 (2014) diz que o módulo de elasticidade do aço pode ser admitido igual a 210000 MPa, portanto os corpos de prova foram submetidos a essa condição de ensaio.

3.2.5 Ensaio de fadiga

A máquina *Shimadzu Servo Pulser* modelo EHF-EV200K1-010-0A do

Laboratório de Materiais do IFPI, ilustrada na Figura 18, é destinada à realização de ensaios dinâmicos e estáticos. Portanto, essa máquina é recomendada para uma grande faixa de aplicações de ensaios de fadiga, contemplando estruturas com grande rigidez.

Figura 18 – Máquina *Shimadzu Servo Pulser* modelo EHF-EV200K1-010-0A



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Dantas (2010) diz 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, variação de tensão, frequência dos testes, defeitos do material, entre outros fatores.

Para a realização dos ensaios, destaca-se que alguns parâmetros da máquina e características do material foram observados. Dentre eles estão: carga aplicada, velocidade, amplitude e frequência da máquina, bem como módulo de elasticidade e características geométricas do material.

Para se determinar a carga máxima a ser aplicada durante o ensaio, a ABNT NBR 6118 (2014) recomenda que a tensão máxima para a análise da fadiga seja de 80% da tensão de escoamento do aço. Como o material utilizado foi o CA-60, com tensão de escoamento de 600 MPa, resultou-se em um valor de 480 MPa. Logo, para

o diâmetro de 7 mm, tem-se que a carga máxima é igual a 18,47 kN. Como a carga máxima para ensaios dinâmicos permitida pela máquina é de 200 kN, o valor de tensão aplicado foi válido.

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: $1 \cdot 10^5$, $1 \cdot 10^6$ e $2 \cdot 10^6$. Os valores de k obtidos foram utilizados tanto para as barras isoladas quanto para as telas soldadas.

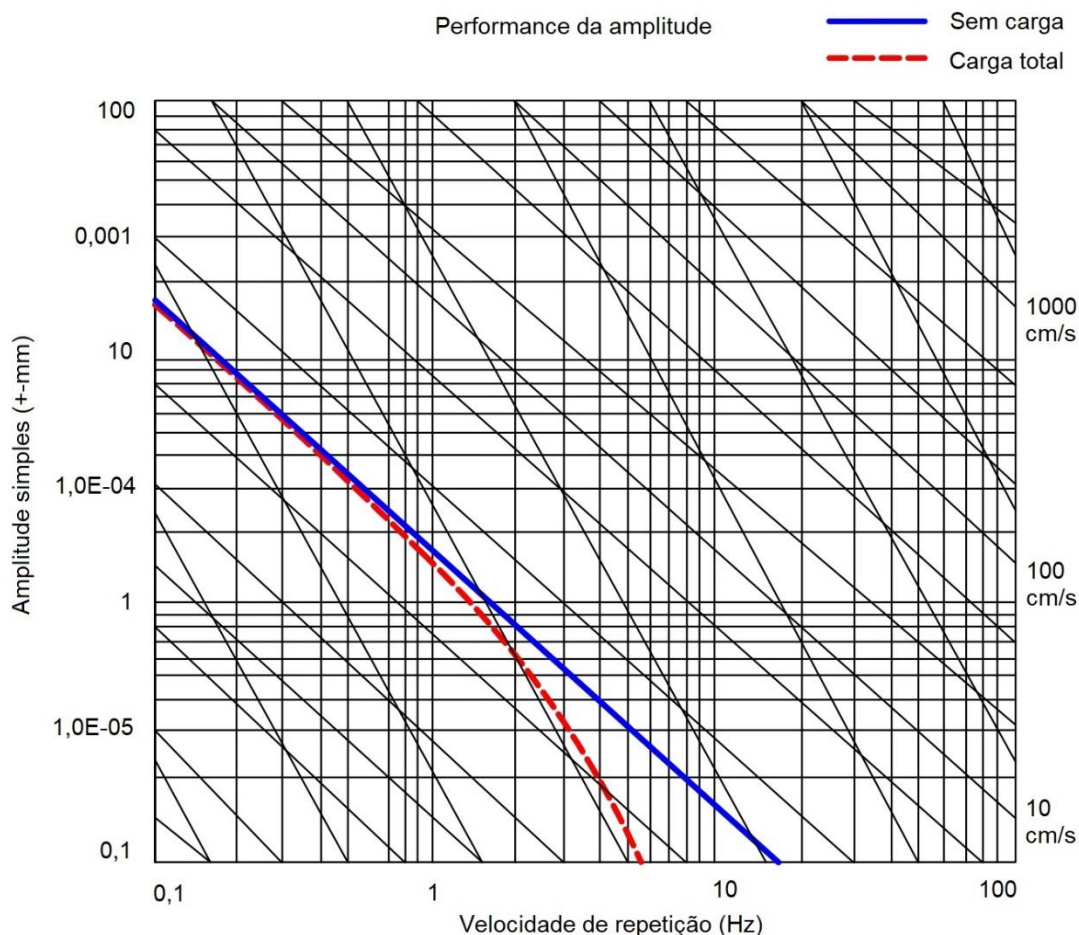
Inicialmente, foram definidos valores de variação de tensão para que, através de ensaios-teste, se possa obter o número de ciclos de ruptura para cada um desses valores iniciais. Deste modo, foram adotadas três variações de tensão para que rupturas próximas às ciclagens propostas pudessem ter sido estimadas.

Em seguida, foi definido o alongamento característico da amplitude da máquina para cada um dos três níveis de variação de tensão através da Equação (5):

$$A_l = \frac{\Delta\sigma \cdot l_0}{E} \quad (5)$$

sendo que A_l é o alongamento característico da amplitude da máquina, $\Delta\sigma$ a variação de tensão, l_0 o comprimento inicial da amostra e E o módulo de elasticidade do material.

A frequência de ensaio foi obtida a partir do valor de amplitude através do gráfico ilustrado na Figura 19 a seguir.

Figura 19 – Gráfico amplitude-frequência

Fonte: Adaptado de Servo Pulser Manual [20--?].

A ABNT NBR 7478 (1982) não prescreve valores de frequências para barras ensaiadas ao ar, apenas para embutidas em concreto armado. Os valores previstos nesta norma variam de 4 Hz a 6 Hz. Porém, o projeto de norma MERCOSUL 02:00-020-10 (1996) recomenda ensaios de barra ao ar realizados com frequência de 3 Hz a 10 Hz. Como afirma Buelta (2001), é possível mostrar que a frequência natural em vibração longitudinal da amostra é muito superior que 10 Hz, não havendo, assim, qualquer risco de amplificação dinâmica das forças aplicadas durante o ensaio.

Com os valores de variação de tensão, amplitude e frequência obtidos para cada um dos três níveis de ciclagem propostos, foram realizados ensaios de fadiga em corpos de prova tanto em formato de barra quanto de tela e obtendo-se, então, o número de ciclos de ruptura.

Os ensaios executados consistiam em seis conjuntos, com seis corpos de prova para cada nível de flutuação de tensão pré-fixada, sendo três conjuntos

utilizando barras isoladas de 7 mm de diâmetro nominal e três conjuntos com telas soldadas de 7 mm de diâmetro nominal a cada 10 cm na direção horizontal por 7 mm de diâmetro nominal a cada 10 cm na direção vertical, totalizando trinta e seis amostras de aço CA-60.

Após os ensaios realizados, foram determinados os valores médios de ciclos, os desvios-padrão e os coeficientes de variação para cada um dos conjuntos, tanto para as barras quanto para as telas.

Para a determinação da Curva de Wöhler, foi usada a Equação (6) de distribuição normal, no qual obteve-se o valor característico das ciclagens (N_k) com nível de confiança de 95%:

$$N_k = N_m - 1,64 \cdot cv \cdot N_m \quad (6)$$

sendo que N_m é a média do número de ciclagens e cv o coeficiente de variação.

Para se determinar o coeficiente k , foi utilizada a Equação (7) que define a inclinação entre dois pontos da curva:

$$k = \frac{\log(N_1) - \log(N_2)}{\log(\Delta\sigma_2) - \log(\Delta\sigma_1)} \quad (7)$$

onde $\Delta\sigma$ é a variação de tensão e N o número de ciclos.

Portanto, a Curva de Wöhler foi definida tanto para o número médio quanto para o número característico de ciclos determinados para as barras isoladas e telas soldadas, ambas de 7 mm de diâmetro nominal.

3.2.6 Análise microestrutural

A análise microestrutural foi realizada por meio de microscopia óptica, na qual foi observada a microestrutura das seções transversal e longitudinal das amostras, bem como na região da solda entre as barras, com a identificação de possíveis defeitos existentes que possam provocar a início do processo de ruptura por fadiga.

Para análise das amostras, foi realizado um tratamento prévio que consistiu em: corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico.

O primeiro passo foi o processo de corte que teve como finalidade a obtenção

de uma pequena amostra da barra. Os cortes foram realizados na transversal, longitudinal e na região de solda da amostra.

Em seguida, foi feito o embutimento que consistiu em circundar a amostra com um material adequado e formar um corpo único a fim de que este facilitasse o manuseio de peças pequenas e, por consequência, evitasse a danificação da lixa e o abaulamento da superfície, o que poderia dificultar a análise. No caso das amostras em estudo, foi realizado o embutimento a frio utilizando-se resinas sintéticas de polimerização rápida. Essa mistura foi vertida dentro de um molde plástico onde se encontra a amostra, polemizando-se após cerca de 30 minutos.

A etapa seguinte foi o lixamento. Nesse processo procurou-se eliminar as marcas deixadas pela ferramenta de corte na amostra, melhorando, assim, o acabamento superficial. Mediante o lixamento, conseguiu-se uma superfície plana, com rugosidade baixa e com a orientação desejada dos traços riscados. Esse procedimento foi necessário devido ao grau de perfeição que uma amostra metalográfica deve ter no acabamento, para que pudesse ter sido possível uma boa análise visual no microscópio.

O procedimento adotado foi a técnica de lixamento úmido, que consistiu em lixar a amostra sucessivamente, com lixas de granulometria cada vez menor, rotacionando 90° a peça a cada lixa subsequente, permanecendo na mesma até que desaparecessem todos os traços da lixa anterior. As lixas possuíam granulometria numerada de 180, 220, 320, 400, 600 e 1200, onde as de menor numeração possuíam maior rugosidade.

Após o lixamento, foi realizado o polimento que teve como finalidade a retirada de todas as marcas ainda existentes na amostra, melhorando, assim, o seu acabamento superficial. O polimento foi feito utilizando-se alumina de granulometria igual a 1 μm .

Por fim, foi realizado o ataque químico na amostra utilizando-se o reagente nital 2%, composto por ácido nítrico e álcool etílico, durante 13 segundos. Terminado o ataque, a amostra foi lavada imediatamente com álcool, que é um líquido de baixo ponto de ebulição. Em seguida, procedeu-se à secagem, passando-se primeiramente um chumaço de algodão umedecido com álcool e submetido depois a um jato de ar quente.

Com a realização do ataque pôde-se verificar a presença de fases distintas existentes na amostra, sendo o reconhecimento dessas fases fundamentais para o

entendimento das propriedades mecânicas do material.

Após as etapas de tratamento prévio das amostras, foi efetuada a análise microscópica que objetivou o isolamento e o estudo dos constituintes do material mediante suas interações numa escala ampliada.

A Figura 20 mostra o microscópio óptico modelo *Olympus CX31* do Laboratório de Materiais do IFPI que foi utilizado para análise microestrutural das amostras.

Figura 20 – Microscópio óptico modelo *Olympus CX31*



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

4 RESULTADOS

4.1 VERIFICAÇÃO DA MASSA NOMINAL

Após a aferição da massa e do comprimento de seis amostras utilizando-se balança de precisão e paquímetro digital, respectivamente, obtiveram-se os resultados referentes à área da seção transversal, diâmetro nominal e massa nominal apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores da massa, comprimento, área da seção transversal, diâmetro nominal e massa nominal das amostras

Amostra	Massa (g)	Comprimento (mm)	Área (mm ²)	Diâmetro nominal (mm)	Massa nominal (kg/m)
01	94,08	305,01	39,29	7,07	0,308
02	91,70	297,07	39,32	7,08	0,309
03	90,80	296,86	38,96	7,04	0,306
04	93,19	303,10	39,17	7,06	0,307
05	92,47	301,61	39,06	7,05	0,307
06	92,81	302,14	39,13	7,06	0,307
Média	92,51	300,97	39,16	7,06	0,307
Valor de referência	90,60	300,00	38,47	7,00	0,302
Desvio padrão	1,149	3,309	0,137	0,012	0,001
Coeficiente de variação	0,012	0,011	0,004	0,002	0,004

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

4.2 ENSAIO DE DUREZA

Os valores de dureza encontrados estão representados na Tabela 8.

Tabela 8 – Dureza Rockwell para as amostras

Amostra	Dureza (HRA)
01	61,10
02	59,40
03	62,70
04	57,70
05	60,50
06	62,70
Média	60,68
Desvio padrão	1,94
Coeficiente de variação	0,03

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

4.3 ENSAIO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

Após o ensaio de fluorescência de raios X de uma amostra de aço CA-60, identificou-se os elementos químicos e suas respectivas porcentagens conforme apresentado na Tabela 9. Destaca-se que o equipamento não detecta o carbono, por se tratar de um elemento químico leve, ou seja, possui peso atômico baixo, e que os demais elementos em partes por milhão não foram representados.

Tabela 9 – Elementos químicos e suas respectivas porcentagens

Elemento químico	Porcentagem (%)
Na	0,101
Al	0,319
Si	1,023
Cl	0,141
Ca	0,308
Cr	0,414
Mn	0,608
Fe	96,964
Pb	0,122

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

A partir dos ensaios de tração de doze corpos de prova de vergalhão CA-60, sendo seis barras isoladas e seis telas soldadas, pôde-se verificar os valores de tensão de escoamento, tensão máxima e tensão de ruptura.

A Tabela 10, a seguir, apresenta os resultados dos ensaios de tração para as barras isoladas.

Tabela 10 – Ensaios de tração das barras isoladas

Corpo de prova	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
01	673,71	800,79	536,40
02	639,48	800,97	528,23
03	619,79	782,27	525,87
04	654,91	774,82	537,13
05	656,21	794,62	540,76
06	655,12	793,52	539,55
Média	649,87	791,17	534,66
Valor de referência	600,00	660,00	-
Desvio padrão	18,30	10,51	6,15
Coeficiente de variação	0,03	0,01	0,01

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

A partir dos resultados obtidos, tem-se que a razão entre a tensão máxima média dos corpos de prova e a tensão de escoamento média foi de 1,22.

Já a Tabela 11, a seguir, apresenta os resultados dos ensaios de tração para as telas soldadas.

Tabela 11 – Ensaios de tração das telas soldadas

Corpo de prova	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
01	686,28	730,52	494,46
02	691,91	739,60	439,07
03	695,73	738,51	453,42
04	698,21	739,41	454,87
05	694,78	739,60	484,29
06	702,57	736,51	483,20
Média	694,91	737,36	468,22
Valor de referência	600,00	660,00	-
Desvio padrão	5,54	3,55	21,99
Coeficiente de variação	0,01	0,01	0,05

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

A partir dos resultados obtidos, tem-se que a razão entre a tensão máxima média dos corpos de prova e a tensão de escoamento média foi de 1,06.

4.5 ENSAIO DE FADIGA

Os ensaios-teste foram realizados para conhecer o comportamento dos vergalhões de aço CA-60 no formato de barra isolada e, então, prever as variações de tensão que venham a provocar a ruptura dos corpos de prova mais próximas de $1 \cdot 10^5$, $1 \cdot 10^6$ e $2 \cdot 10^6$ de ciclos.

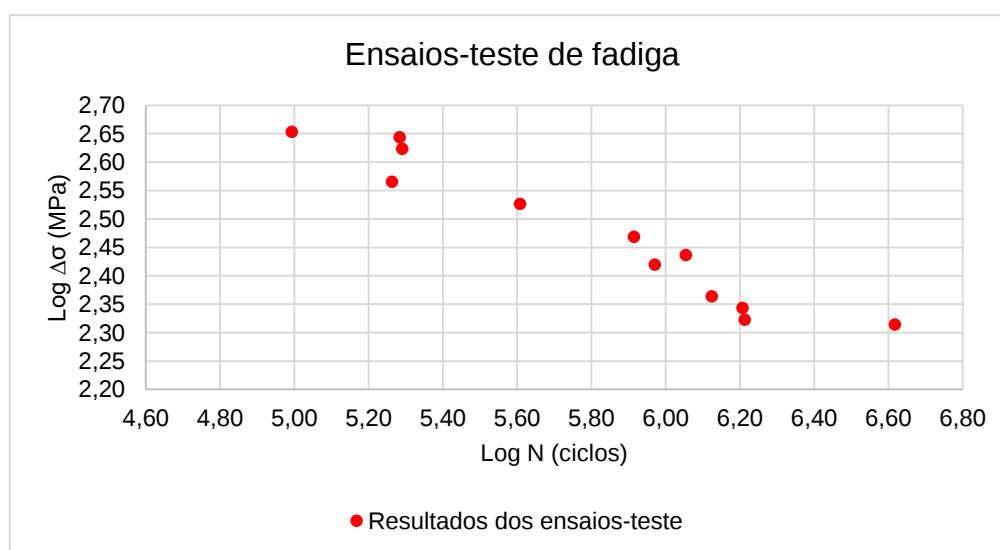
Na Tabela 12 são apresentados os resultados dos ensaios-teste de fadiga de barras isoladas, considerando as variações de tensão, tensão máxima, tensões mínimas e ciclos de ruptura dos corpos de prova.

Tabela 12 – Ensaios-teste de fadiga

Amostra	Variação de tensão (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tensão mínima (MPa)	Ciclos de ruptura
01	206,0	480,0	274,0	4151031
02	210,0	480,0	270,0	1635540
03	220,5	480,0	259,5	1612681
04	231,0	480,0	249,0	1332825
05	262,5	480,0	217,5	936909
06	273,0	480,0	207,0	1135164
07	294,0	480,0	186,0	824067
08	336,0	480,0	144,0	406197
09	367,5	480,0	112,5	183345
10	420,0	480,0	60,0	195498
11	440,0	480,0	40,0	192520
12	450,0	480,0	30,0	98616

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

A Figura 21, a seguir, ilustra graficamente, em escala logarítmica, os resultados dos ensaios-teste de fadiga. O eixo horizontal representa o número de ciclos de ruptura e o eixo vertical corresponde à variação de tensão em megapascal, ambos em escala logarítmica.

Figura 21 – Ensaios-teste de fadiga

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Para definir os parâmetros necessários dos ensaios seguintes, adotou-se três variações de tensão para se estimar a ruptura das barras próximas às três ciclagens propostas, a partir da análise estatística de regressão dos dados da Tabela 12. Assim, para $1 \cdot 10^5$ de ciclos, tem-se uma variação de tensão de 449,7 MPa; para $1 \cdot 10^6$ de ciclos, tem-se 273,2 MPa e, para $2 \cdot 10^6$ de ciclos, adotou-se 220,1 MPa.

O alongamento característico da amplitude da máquina para cada um dos três níveis de variação de tensão foi obtido através da Equação (5), apresentada no Capítulo 3. Assim, considerando que os corpos de prova possuíam 30 cm de comprimento, sendo que para o cálculo foi considerado 20 cm entre as garras, e que o módulo de elasticidade do aço é de 210000 MPa, os valores de alongamento são 0,428, 0,260 e 0,210 mm para os valores de variação de tensão de 449,7, 273,2 e 220,1 MPa, respectivamente.

De posse dos valores de alongamento, pôde-se obter as frequências de cada ensaio através do gráfico ilustrado na Figura 19 do Capítulo 3, obedecendo os limites da máquina e das normas. Dessa forma, tem-se que a frequência adotada para os ensaios com variação de tensão de 449,7 MPa foi de 4 Hz, para 273,2 MPa o valor foi de 6 Hz e para 220,1 MPa utilizou-se 7,5 Hz.

A Tabela 13 apresenta resumidamente os parâmetros utilizados nos ensaios de fadiga. As mesmas condições de ensaio foram aplicadas tanto para as barras isoladas quanto para as telas soldadas, sendo seis corpos de prova para cada uma das três variações de tensão adotadas, totalizando trinta e seis ensaios.

Tabela 13 – Parâmetros de ensaio de fadiga para as barras isoladas e telas soldadas

Variação de tensão (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tensão mínima (MPa)	Alongamento (mm)	Frequência (Hz)
449,7	480,0	30,3	0,428	4,0
273,2	480,0	206,8	0,260	6,0
220,1	480,0	259,9	0,210	7,5

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

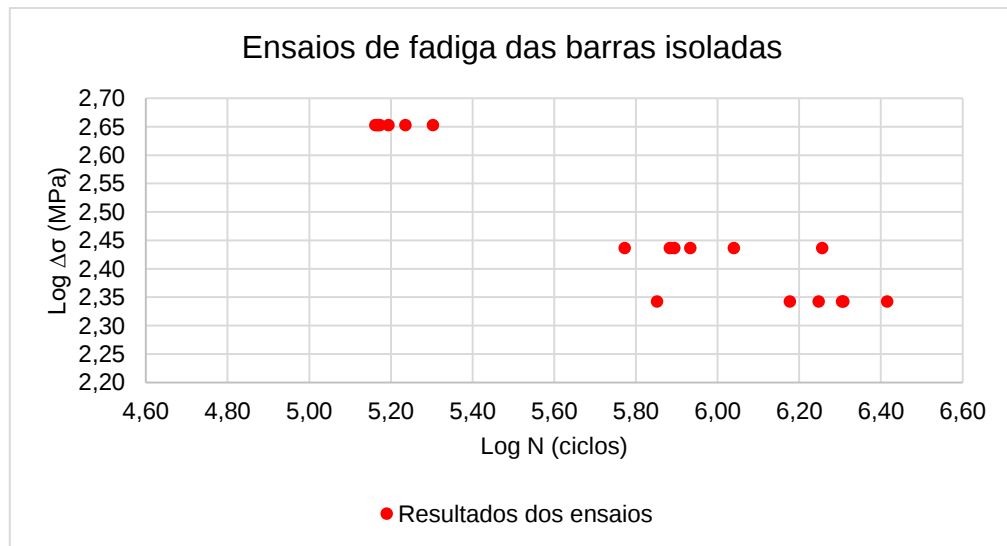
Após a definição desses critérios, realizou-se os ensaios de fadiga propostos. A Tabela 14 apresenta os resultados dos ensaios de fadiga realizados nas barras isoladas de aço CA-60 com diâmetro de 7 mm.

Tabela 14 – Ensaio de fadiga das barras isoladas

Barras					
$\Delta\sigma=449,7$ MPa		$\Delta\sigma=273,2$ MPa		$\Delta\sigma=220,1$ MPa	
CP	N (ciclos)	CP	N (ciclos)	CP	N (ciclos)
1	147645	7	765870	13	711864
2	149253	8	593187	14	1504609
3	156538	9	785478	15	2034006
4	201336	10	1807791	16	2019693
5	172359	11	1097913	17	1772559
6	145347	12	859587	18	2604702

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

A Figura 22, a seguir, ilustra graficamente, em escala logarítmica, os resultados dos ensaios de fadiga das barras isoladas. O eixo horizontal representa o número de ciclos de ruptura e o eixo vertical corresponde à variação de tensão em megapascal, ambos em escala logarítmica.

Figura 22 – Ensaio de fadiga das barras isoladas

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

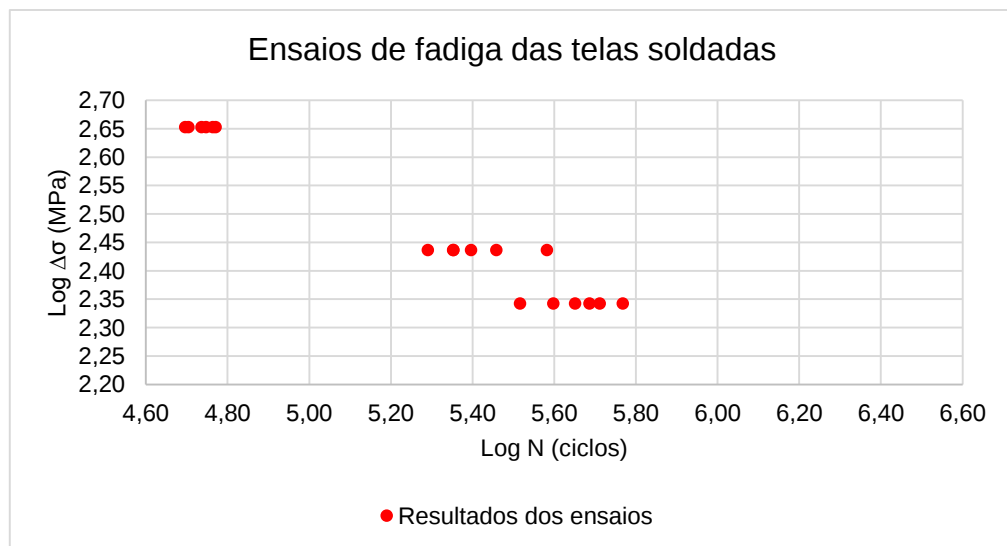
Já a Tabela 15 contempla os resultados das telas soldadas.

Tabela 15 – Ensaio de fadiga das telas soldadas

Telas					
$\Delta\sigma=449,7$ MPa		$\Delta\sigma=273,2$ MPa		$\Delta\sigma=220,1$ MPa	
CP	N (ciclos)	CP	N (ciclos)	CP	N (ciclos)
1	49779	7	225948	13	328905
2	54576	8	382725	14	586530
3	55932	9	195643	15	396573
4	59119	10	225558	16	486546
5	50655	11	249600	17	448662
6	58080	12	287820	18	515664

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Já a Figura 23, a seguir, ilustra graficamente, em escala logarítmica, os resultados dos ensaios de fadiga das barras isoladas. O eixo horizontal representa o número de ciclos de ruptura e o eixo vertical corresponde à variação de tensão em megapascal, ambos em escala logarítmica.

Figura 23 – Ensaios de fadiga das telas soldadas

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Com os ensaios de fadiga realizados, pôde-se verificar o local de ruptura dos corpos de prova. Assim, destaca-se que todos os vergalhões em formato de barra isolada apresentaram ruptura no centro do comprimento reto ou próximo a ele.

A Figura 24 ilustra o vergalhão de aço CA-60 em formato de barra isolada

após ruptura.

Figura 24 – Vergalhão de aço CA-60 em formato de barra isolada após ensaio de fadiga



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Já para as telas, o local de ruptura após os ensaios ocorreu sempre na região de solda, sendo 10 corpos de prova rompidos na região de solda denominada ponto A (solda de cima) e 8 corpos de prova rompidos na região de solda denominada ponto B (solda de baixo).

Tabela 16 – Local de ruptura das telas soldadas após ensaio de fadiga

$\Delta\sigma=449,7$ MPa		$\Delta\sigma=273,2$ MPa		$\Delta\sigma=220,1$ MPa	
CP	Local de ruptura	CP	Local de ruptura	CP	Local de ruptura
1	Ponto A	7	Ponto A	13	Ponto A
2	Ponto B	8	Ponto B	14	Ponto A
3	Ponto A	9	Ponto A	15	Ponto B
4	Ponto A	10	Ponto A	16	Ponto B
5	Ponto A	11	Ponto B	17	Ponto B
6	Ponto B	12	Ponto A	18	Ponto B

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

A Figura 25 ilustra os vergalhões de aço CA-60 em formato de tela contendo a identificação dos locais de ruptura na região de solda provocados pelo ensaio de fadiga.

Figura 25 – Vergalhões de aço CA-60 em formato de tela soldada após ensaio de fadiga. (a) Ponto A (solda de cima) de ruptura; (b) Ponto B (solda de baixo) de ruptura



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

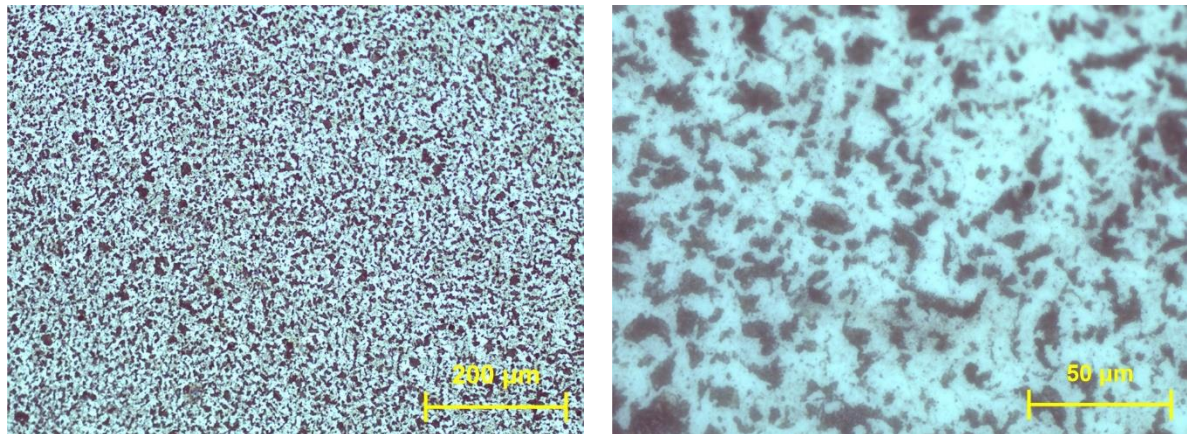
4.6 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Após o tratamento prévio composto por corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico, as amostras de vergalhões de aço CA-60 foram analisadas no microscópio óptico.

As imagens produzidas estão mostradas nas Figuras 26, 27 e 28, a partir das quais pode-se visualizar a microestrutura dos grãos para a seção transversal, longitudinal e região da solda de cada uma das amostras, respectivamente.

A Figura 26, a seguir, ilustra um trecho da seção transversal da amostra. Com a ação do reagente químico, percebe-se duas fases: perlita e ferrita. Nota-se a presença de grãos equiaxiais, em que os mais escuros são constituídos de perlita, enquanto os claros são da fase ferrita que não foi atacada.

Figura 26 – Microestrutura da seção transversal de amostra de aço CA-60. (a) Ampliação de 10 vezes; (b) Ampliação de 40 vezes



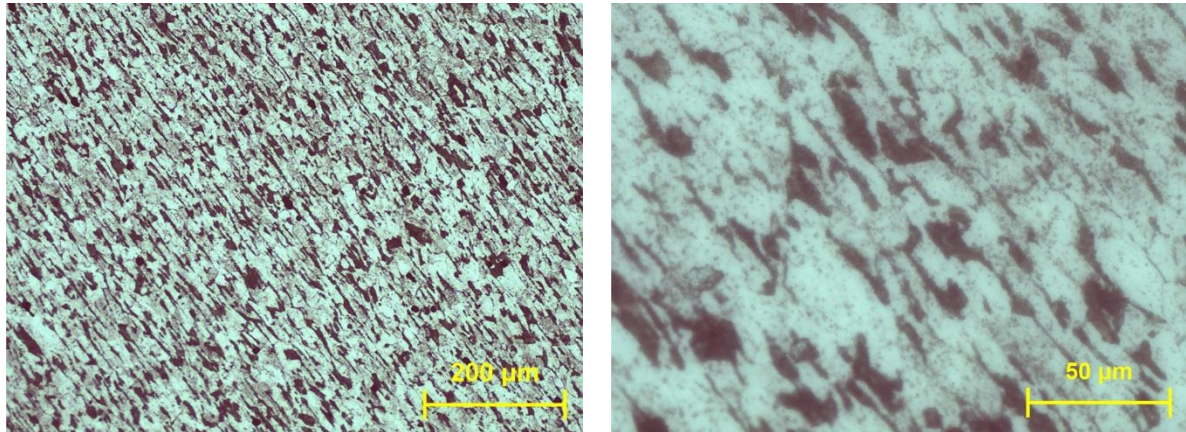
Fonte: Dados da pesquisa (2021).

A ferrita trata-se de uma solução sólida de carbono no ferro alfa e origina-se na zona crítica, durante o processo de esfriamento do material, por transformação alotrópica do ferro gama, tornando-se estável a temperatura ambiente. Nesse estado, a ferrita contém pequenas quantidades de impurezas, conforme demonstrado no ensaio de fluorescência de raios X, além de uma pequena porção de carbono. Com o ataque, percebe-se que os grãos se apresentaram de coloração branca com contornos pretos.

Já a perlita, característica de ligas ferro-carbono resfriadas abaixo de 723°C, é composta por lamelas moles de ferrita e lamelas duras de cementita, e apresentada com coloração escura. Por se tratar de um aço com baixo teor de carbono, a perlita se localiza nos contornos grãos de ferrita. Na imagem capturada, observa-se um aspecto homogêneo com grãos em formato uniforme.

Na Figura 27 pode-se observar um trecho ampliado da seção longitudinal da amostra. A textura apresenta-se de forma fibrosa devido ao processo de trefilação ao qual o aço é submetido. Tanto a ferrita quanto a perlita apresentam-se com aspecto mais alongado.

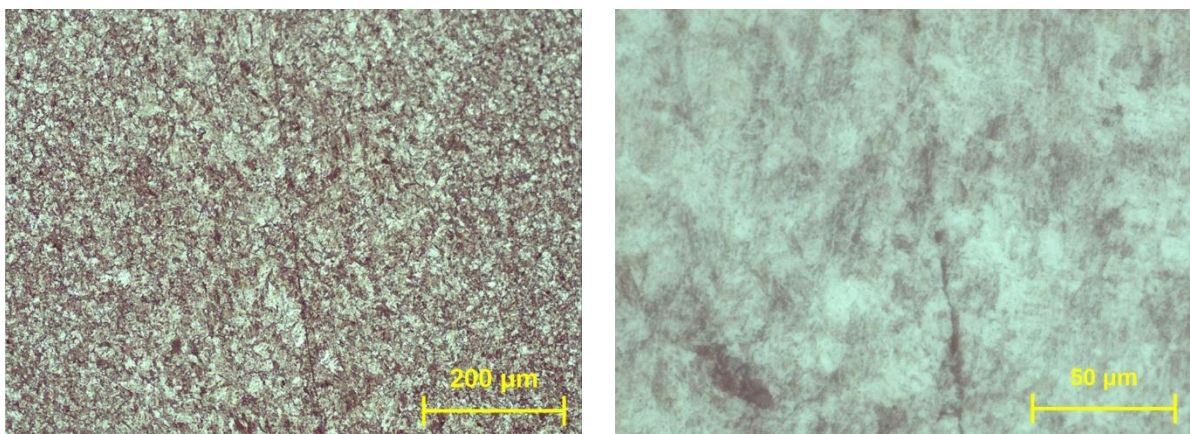
Figura 27 – Microestrutura da seção longitudinal de amostra de aço CA-60. (a) Ampliação de 10 vezes; (b) Ampliação de 40 vezes



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

A Figura 28 mostra a microestrutura na região de solda de uma amostra de tela soldada. Pode-se perceber que houve uma mudança na microestrutura dos grãos quando comparada à amostra seccionada de uma barra isolada. Verificou-se um aumento dos grãos perlíticos em relação aos de ferrita na região soldada. Esta alteração se deve ao processo de aquecimento e junção das barras durante o processo de soldagem, logo essas características puderam ser observadas após o resfriamento do material.

Figura 28 – Microestrutura da região de solda de amostra de tela de aço CA-60. (a) Ampliação de 10 vezes; (b) Ampliação de 40 vezes



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 VERIFICAÇÃO DA MASSA NOMINAL

Com os dados obtidos para as seis amostras, tem-se que a massa nominal média foi de 0,307 kg/m. Logo, vale ressaltar que a ABNT NBR 7480 (2007) indica que o vergalhão de aço CA-60 de 7 mm de diâmetro tenha massa nominal média de 0,302 kg/m considerando-se uma variação máxima de 6%. Assim, tem-se que o valor médio é 1,7% maior que o recomendado pela norma; portanto, conclui-se que a massa nominal média calculada das amostras está dentro da variação permitida.

Em relação à variabilidade dos valores aferidos das amostras, tem-se que o coeficiente de variação para a massa, comprimento, área da seção transversal, diâmetro nominal e massa nominal foi próximo de zero, indicando pouca variação.

5.2 ENSAIO DE DUREZA

Após os ensaios de dureza realizados em seis amostras de aço CA-60, verificou-se que o valor médio encontrado foi de 60,68 HRA. Assim, tem-se que o valor médio encontrado está dentro dos limites recomendados pelas normas ASTM E18 (2019) e ABNT NBR ISO 6508-1 (2019), que é entre 20 HRA e 80 HRA. É importante destacar que a ABNT NBR 7480 (2007) não traz referências no que diz respeito à propriedade mecânica de dureza do aço CA-60.

No que diz respeito à variabilidade dos ensaios, mostrou-se que o coeficiente de variação foi de 0,03, ou seja, próximo de zero e com pouca variação entre os resultados obtidos.

Em relação ao estudo de Ferreira (2017), que ensaiou amostras de dois fabricantes diferentes, obteve-se os valores de 62,4 HRA e 67,6 HRA. Portanto, tem-se que o valor médio de dureza das amostras em estudo é 2,8% menor do que o primeiro fabricante e 11,4% menor que o segundo.

5.3 ENSAIO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

A partir do ensaio de fluorescência de raios X, verificou-se os seguintes elementos químicos: Sódio (Na), Alumínio (Al), Silício (Si), Cloro (Cl), Cálcio (Ca),

Cromo (Cr), Manganês (Mn), Ferro (Fe), Chumbo (Pb). Destaca-se que o elemento químico Carbono (C) não foi detectado nesse ensaio devido aos comprimentos de onda permitidos para a leitura.

O elemento químico Ferro (Fe) foi o que apresentou maior porcentagem, igual a 96,964%, na composição do aço CA-60. O Silício (Si) apresentou-se como elemento que compõe o aço em 1,023%, já os demais elementos químicos apresentaram proporções menores que 1%. Tudo isso se deve ao fato de o material em estudo ser um aço de baixo carbono, caracterizado por elevada porcentagem em ferro, baixa porcentagem em carbono, em torno de 0,2% em média, e possuir elementos de liga.

Apesar do silício possuir proporção mais significativa do que os demais elementos de proporção menor que 1%, destaca-se que esse elemento químico constitui uma impureza normal e que não exerce influência acentuada nas propriedades mecânicas.

Não há referências normativas que especifiquem as taxas máximas dos elementos químicos presentes no aço CA-60.

5.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

Com os resultados obtidos a partir dos ensaios de tração dos vergalhões de aço CA-60 no formato de barra isolada, tem-se que a média dos valores de tensão de escoamento é de 649,87 MPa, a média dos valores de tensão máxima é de 791,17 MPa e a média da tensão de ruptura é de 534,66 MPa. Já para os vergalhões no formato de tela, a média dos valores de tensão de escoamento é de 694,91 MPa, a média dos valores de tensão máxima é de 737,36 MPa e a média da tensão de ruptura é de 468,22 MPa.

Em relação à variabilidade dos ensaios de tração com barras isoladas, os valores de coeficiente de variação foram 0,03, 0,01 e 0,01 para a tensão de escoamento, tensão máxima e tensão de ruptura, respectivamente. Já para as telas soldadas, os valores foram 0,01, 0,01 e 0,05 para a tensão de escoamento, tensão máxima e tensão de ruptura, respectivamente. Logo, a maior variação ocorreu entre os resultados de tensão de ruptura das telas soldadas. Apesar disso, todos os coeficientes de variação foram próximos de zero, indicando pouca variabilidade entre os ensaios realizados.

Ao comparar os resultados de cada tipo de formato de barra, verifica-se que

as telas soldadas apresentaram maior valor médio de tensão de escoamento do que as barras isoladas, em torno de 6,9%. Já para a tensão máxima e a tensão de ruptura, as barras isoladas apresentaram maiores valores médios do que as telas soldadas, em torno de 6,8% e 12,4%, respectivamente.

No que diz respeito à normatização das propriedades mecânicas para fios de aço destinados a armaduras de concreto armado, a ABNT NBR 7480 (2007) preconiza que a tensão característica de escoamento mínima para o aço CA-60 é de 600 MPa, logo todos os resultados de ensaios de tração demonstraram que os corpos de prova atendem aos requisitos normativos. Esta norma também recomenda que o valor mínimo da tensão máxima de tração desse tipo de aço deve ser 660 MPa. Como todos os valores de tensão máxima de tração para ambos os formatos de barra foram maiores que 660 MPa, tem-se que os corpos de prova ensaiados estão de acordo com as exigências normativas.

A ABNT NBR 7480 (2007) recomenda que a razão entre a tensão máxima e a tensão de escoamento dos ensaios de tração deve ser no mínimo igual a 1,05. Com os valores médios dos ensaios, tem-se que essa razão foi de 1,22 para as barras isoladas e 1,06 para as telas soldadas. Assim, os resultados obtidos atendem as disposições normativas da ABNT NBR 7480 (2007).

5.5 ENSAIO DE FADIGA

Para que fosse possível analisar os resultados obtidos através dos ensaios de fadiga, foram calculados, para cada grupo de variação de tensão tanto para as barras isoladas quanto para as telas soldadas, a média do número de ciclos de ruptura (N_m) e o desvio padrão. Com o intuito de avaliar a variabilidade dos resultados obtidos, utilizou-se um parâmetro adimensional (n), que se trata da razão entre o número de ciclos de ruptura e a média obtida dos ensaios e mede a dispersão dos dados, e o respectivo desvio padrão, caracterizado pelo coeficiente de variação (cv).

As Tabelas 17, 18 e 19 apresentam os resultados obtidos para as variações de tensão de 449,7, 273,2 e 220,1 MPa, respectivamente, referente às barras isoladas.

Tabela 17 – Resultados obtidos para a variação de tensão $\Delta\sigma=449,7$ MPa (barras isoladas)

CP	N	Média (N _m)	Desvio padrão de N	n=N/N _m	Coeficiente de variação (cv)
1	147645	162079,67	21588,42	0,91	0,13
2	149253			0,92	
3	156538			0,97	
4	201336			1,24	
5	172359			1,06	
6	145347			0,90	

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Tabela 18 – Resultados obtidos para a variação de tensão $\Delta\sigma=273,2$ MPa (barras isoladas)

CP	N	Média (N _m)	Desvio padrão de N	n=N/N _m	Coeficiente de variação (cv)
7	765870	984971,00	435156,80	0,78	0,44
8	593187			0,60	
9	785478			0,80	
10	1807791			1,84	
11	1097913			1,11	
12	859587			0,87	

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Tabela 19 – Resultados obtidos para a variação de tensão $\Delta\sigma=220,1$ MPa (barras isoladas)

CP	N	Média (N _m)	Desvio padrão de N	n=N/N _m	Coeficiente de variação (cv)
13	711864	1774572,17	635411,44	0,40	0,36
14	1504609			0,85	
15	2034006			1,15	
16	2019693			1,14	
17	1772559			1,00	
18	2604702			1,47	

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

A partir desses resultados, tem-se que a média dos coeficientes de variação para os três grupos de ensaios com barras isoladas é de 0,31.

Já as Tabelas 20, 21 e 22 exibem os resultados obtidos para as variações de tensão de 449,7, 273,2 e 220,1 MPa, respectivamente, relativos às telas soldadas.

Tabela 20 – Resultados obtidos para a variação de tensão $\Delta\sigma=449,7$ MPa (telas soldadas)

CP	N	Média (N_m)	Desvio padrão de N	$n=N/N_m$	Coeficiente de variação (cv)
1	49779	54690,17	3822,64	0,91	0,07
2	54576			1,00	
3	55932			1,02	
4	59119			1,08	
5	50655			0,93	
6	58080			1,06	

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Tabela 21 – Resultados obtidos para a variação de tensão $\Delta\sigma=273,2$ MPa (telas soldadas)

CP	N	Média (N_m)	Desvio padrão de N	$n=N/N_m$	Coeficiente de variação (cv)
7	225948	261216,67	66966,09	0,86	0,26
8	382725			1,47	
9	195643			0,75	
10	225558			0,86	
11	249600			0,96	
12	287820			1,10	

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Tabela 22 – Resultados obtidos para a variação de tensão $\Delta\sigma=220,1$ MPa (telas soldadas)

CP	N	Média (N_m)	Desvio padrão de N	$n=N/N_m$	Coeficiente de variação (cv)
13	328905	460480,00	90718,31	0,71	0,20
14	586530			1,27	
15	396573			0,86	
16	486546			1,06	
17	448662			0,97	
18	515664			1,12	

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Com os resultados obtidos, tem-se que a média dos coeficientes de variação para os três grupos de ensaios com telas soldadas é de 0,18. Portanto, a variabilidade dos ensaios foi menor nas telas soldadas.

De acordo com os valores encontrados para os dois tipos de corpo de prova, nota-se que a variabilidade dos conjuntos de telas soldadas diminuiu em relação aos conjuntos de barras isoladas. Também pôde-se perceber que os desvios-padrão para as variações de tensão de 273,2 MPa e 220,1 MPa foram semelhantes entre si, tanto para as barras isoladas quanto para as telas soldadas. Além disso, verificou-se que a variabilidade foi menor para os grupos de ensaio cuja variação de tensão é de 449,7 MPa, e que foi semelhante ao se comparar as barras isoladas com as telas soldadas.

Para se determinar os três pontos da Curva de Wöhler, tanto para as barras isoladas quanto para as telas soldadas, foi utilizada a Equação (6) apresentada no Capítulo 3 para a obtenção do valor característico do número de ciclos de ruptura N_k , com 95% de confiança, de cada flutuação de tensão. Esse valor característico depende da média do número de ciclagens N_m e do coeficiente de variação cv, que corresponde ao desvio padrão do número adimensional n.

A Tabela 23 apresenta o valor de N_m e cv apresentados anteriormente, bem como o valor de N_k calculado através da Equação (6), para cada grupo de ensaio realizado com barras isoladas.

Tabela 23 – Valores de N_m , cv e N_k para os ensaios realizados com barras isoladas

Variação de tensão (MPa)	N_m	cv	N_k
449,7	162079,67	0,13	127524,28
273,2	984971,00	0,44	274215,93
220,1	1774572,17	0,36	726864,76

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Já a Tabela 24 apresenta o valor de N_m e cv demonstrados anteriormente, assim como o valor de N_k obtido através da Equação (6), para cada grupo de ensaio realizado com telas soldadas.

Tabela 24 – Valores de N_m , cv e N_k para os ensaios realizados com telas soldadas

Variação de tensão (MPa)	N_m	cv	N_k
449,7	54690,17	0,07	48411,74
273,2	261215,67	0,26	149833,31
220,1	460480,00	0,20	309442,56

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Para a obtenção do coeficiente k , utilizou-se a Equação (7), citada no Capítulo 3. Os resultados estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Valores de k para as barras isoladas e telas soldadas

Formato de barra	k_1	k_2
Isolada	1,54	4,51
Soldada	2,27	3,36

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

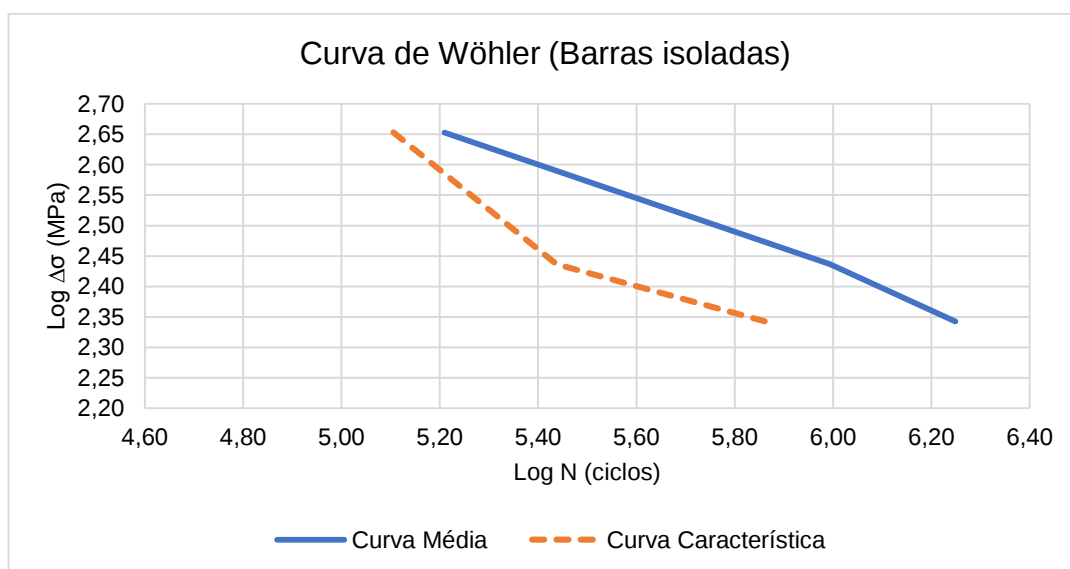
A norma ABNT NBR 6118 (2014) indica o valor de 5 para o coeficiente k_1 e 9 para o coeficiente k_2 para vergalhões de aço CA-50. Com os resultados alcançados nos ensaios com o aço CA-60, percebe-se que, tanto para as barras isoladas quanto para as telas soldadas, os valores de k foram menores do que apresentados para o

aço CA-50. Isso se dá pela menor ductilidade apresentada pelo aço CA-60 em relação ao CA-50.

Com os resultados obtidos de número médio de ciclos e número característico de ciclos de ruptura, a partir dos ensaios de fadiga ao ar com variações de tensão definidas, tanto para as barras isoladas quanto para as telas soldadas, pôde-se construir a Curva de Wöhler para essas tipologias de vergalhões.

A Figura 29, a seguir, mostra a Curva de Wöhler obtida a partir dos resultados dos ensaios com barras isoladas, tanto para a curva média quanto a curva característica.

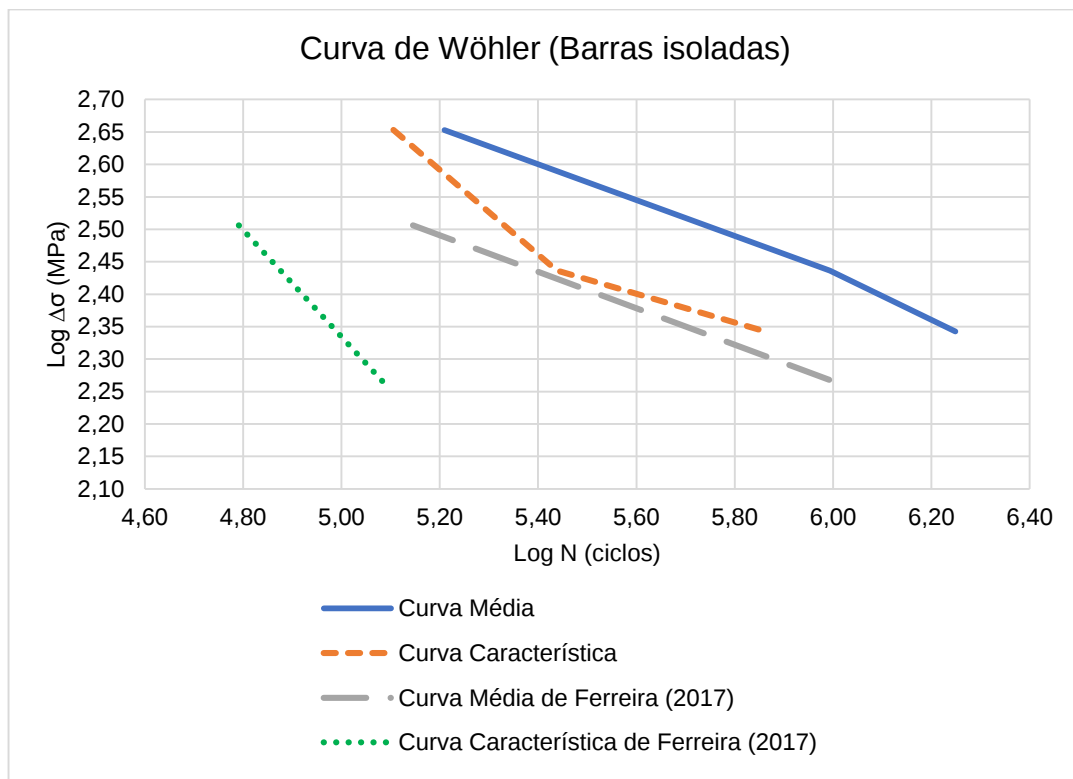
Figura 29 – Curva de Wöhler para barras isoladas de aço CA-60 com 7 mm de diâmetro



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Na Figura 30, a seguir, está apresentado um comparativo entre as Curvas de Wöhler alcançadas neste trabalho e as Curvas de Wöhler obtidas por Ferreira (2017), que utilizou barras isoladas de 8 mm de diâmetro em seus ensaios. A partir desta comparação, pode-se notar que as barras isoladas de 7 mm foram mais resistentes que as barras de 8 mm ensaiadas por Ferreira (2017), mesmo utilizando-se valores de variação de tensão superiores. Esse fato também pode ser verificado na Tabela 3 que apresenta os valores de variação de tensão de fadiga mínimos para barras de aço CA-50 com diâmetro superior a 10 mm, pois, à medida que se utiliza diâmetros maiores, as flutuações de tensões devem ser menores.

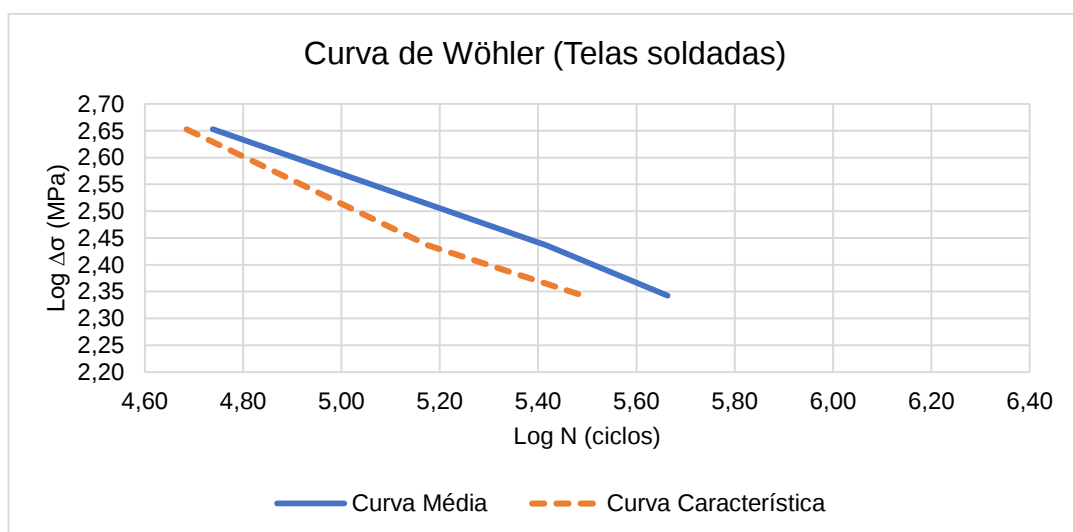
Figura 30 – Comparativo entre a Curva de Wöhler para barras isoladas de 7 mm e a Curva de Wöhler elaborada por Ferreira (2017) para barras isoladas de 8 mm



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Já a Figura 31 apresenta a Curva de Wöhler obtida a partir dos resultados dos ensaios com telas soldadas, tanto para a curva média quanto a curva característica.

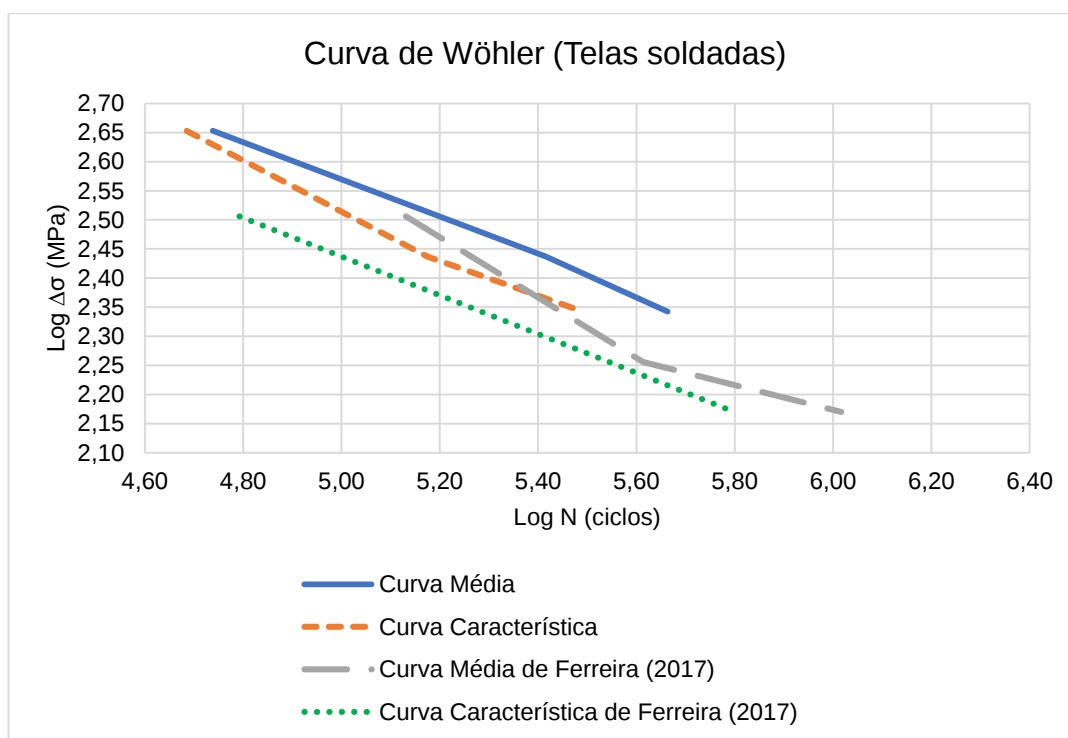
Figura 31 – Curva de Wöhler para telas soldadas de aço CA-60 com 7 mm de diâmetro



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Na Figura 32 está reproduzido um comparativo entre as Curvas de Wöhler contraídas neste trabalho e as Curvas de Wöhler obtidas por Ferreira (2017), que utilizou telas soldadas de 8 mm de diâmetro em seus ensaios. Neste comparativo, verificou-se que as telas ensaiadas tiveram um comportamento menos resistente à fadiga do que as telas com 8 mm de diâmetro, visto que a ruptura das barras ocorreu com menos ciclos de carregamento. Porém, ao se analisar o comportamento entre as curvas de cada trabalho, verifica-se que a diferença foi menos significativa nas telas soldadas quando comparadas às barras isoladas.

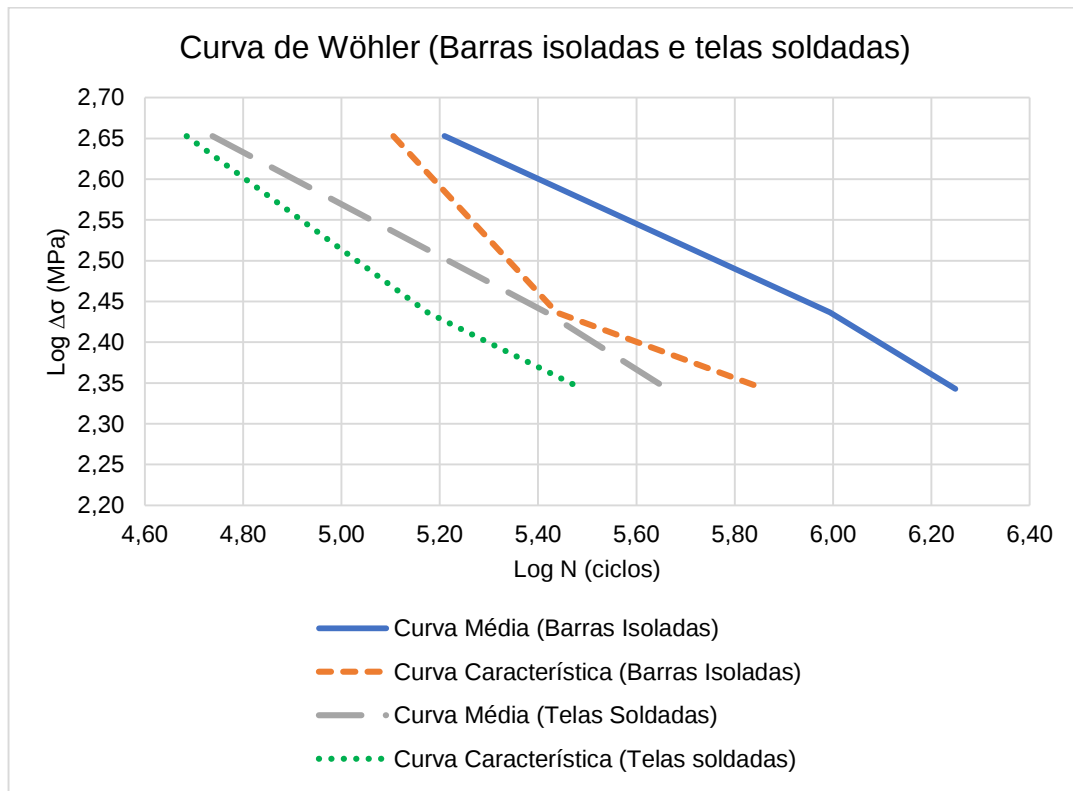
Figura 32 – Comparativo entre a Curva de Wöhler para telas soldadas de 7 mm e a Curva de Wöhler elaborada por Ferreira (2017) para telas soldadas de 8 mm



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Também, elaborou-se um comparativo entre as Curvas de Wöhler das duas tipologias de barras. Pode-se visualizar essa comparação através da Figura 33. Verifica-se que as barras isoladas foram mais resistentes à fadiga do que as telas soldadas.

Figura 33 – Comparativo entre as Curvas de Wöhler das barras isoladas e das telas soldadas



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

5.6 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A partir das imagens capturadas no microscópio óptico da seção transversal, longitudinal e região de solda de amostras de vergalhões de aço CA-60, pôde-se visualizar as fases que constituem esse material. Assim, identificou-se as fases de ferrita e perlita, bem como a organização destas no material em estudo.

O fato do aço CA-60 ser formado a frio faz com que os grãos tomassem um formato alongado na seção longitudinal quando comparado à seção transversal. Já na região de solda, o processo aquecimento para união de duas barras para formação de tela fez com que houvesse alteração no formato e na organização dos grãos. Também, isso causou o aumento do número de discordâncias e de defeitos cristalinos, além de concentração de tensões, que reduz a resistência à fadiga do material.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho tratou de um estudo experimental do efeito de fadiga tanto em barras isoladas quanto em barras soldadas de aço CA-60 de 7 mm de diâmetro, buscando-se entender o comportamento deste tipo aço bem como traçar as Curvas de Wöhler. Além disso, realizou-se a verificação da massa nominal e ensaios de dureza, fluorescência de raios X e tração, assim como a caracterização metalográfica, com o intuito de apresentar as características do material, as propriedades mecânicas e a microestrutura.

A partir da aferição da massa nominal das amostras ensaiadas, conclui-se que essas apresentaram valores dentro dos limites permitidos pela ABNT NBR 7480 (2007).

Em relação aos ensaios de dureza, pôde-se demonstrar que os valores encontrados foram menores em relação aos encontrados por Ferreira (2017). Logo, destaca-se que não há referências normativas para essa propriedade mecânica do aço CA-60.

Após o ensaio de fluorescência de raios X, conclui-se que os elementos químicos presentes numa amostra de aço CA-60 apresentaram valores esperados por se tratar de um aço carbono de baixa liga, apesar de não existir norma que preconize as taxas mínimas ou máximas para cada um dos elementos encontrados.

No que diz respeito aos ensaios de tração realizados tanto em barras isoladas quanto em barras soldadas, percebeu-se que os valores médios de tensão de escoamento e tensão máxima estão dentro das recomendações normativas da ABNT NBR 7480 (2007). Ressalta-se, também, que apesar das barras isoladas apresentarem resultados inferiores de tensão de escoamento e superiores de tensão máxima e tensão de ruptura quando comparadas às barras soldadas, a razão entre o limite de resistência e o limite de escoamento para ambas tipologias de barra foi maior que 1,05, ou seja, dentro das disposições normativas.

Após a realização de ensaios-teste de fadiga para entendimento do comportamento do aço CA-60 e definição dos parâmetros necessários, pôde-se executar todos os ensaios propostos. Ao se comparar o local de ruptura das barras, notou-se que a solda foi uma região de início de trinca nos corpos de prova, visto que todas as barras se romperam nesse ponto de concentração de tensões.

Já em relação à variabilidade dos ensaios, conclui-se que a média dos

desvios-padrão para os três grupos de ensaios com barras isoladas foi maior do que os grupos de ensaios com telas soldadas. Portanto, este fato comprova o quanto a região soldada pode se comportar como uma zona de fragilidade, a qual demonstrou uma tendência de ruptura comum a todos os ensaios.

Com a obtenção do valor característico do número de ciclos de ruptura para cada um dos grupos, tanto de barras isoladas quanto de telas soldadas, representando 95% de confiança, determinou-se os coeficientes k . Com os resultados obtidos, conclui-se que, tanto para as barras isoladas quanto para as telas soldadas, os valores de k foram menores quando comparados ao aço CA-50. Isso indica um comportamento menos resistente à fadiga, em virtude da inclinação das curvas, em situações de variações de tensão que venham a provocar rupturas próximas a $1 \cdot 10^5$, $1 \cdot 10^6$ e $2 \cdot 10^6$ ciclos, pois o aço CA-60 é menos dúctil em relação ao aço CA-50.

No que diz respeito às Curvas de Wöhler traçadas, tanto para as barras isoladas quanto para as telas soldadas com diâmetro nominal de 7 mm, conclui-se que essas demonstraram um comportamento mais resistente quando comparado aos ensaios com vergalhões de 8 mm de Ferreira (2017), e que as curvas elaboradas para as telas apresentaram diferença menos significativa em relação às barras isoladas.

A partir da comparação entre as Curvas de Wöhler, tanto para a curva média quanto para a curva característica, de barras isoladas e telas soldadas, pode-se concluir que a região soldada em telas teve influência significativa na resistência à fadiga, provocando ruptura com números de ciclos bem inferiores aos observados em barras isoladas. Portanto, a análise de fadiga nessas tipologias de barras merece atenção especial em face dos resultados apresentados.

Em relação à análise microestrutural, conclui-se que as fases constituintes do material sofrem alteração devido tanto ao processo de trefilação quanto ao processo de soldagem. O aquecimento dos grãos e o resfriamento durante a união de duas barras provoca concentração de tensões, causando redução na resistência à fadiga.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação dos estudos para outras bitolas de aço CA-60 e ensaios com barras imersas em lajes maciças.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E18**: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken, 2019. 39 p.

ANTUNES, A. M. B. S. **Estudo do comportamento em fadiga de alto ciclo das ligas de alumínio AA6351 e AA7050 para aplicação aeronáutica**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Materiais. São Paulo, 2017.

ASM International handbook. **Failure analysis and prevention**. The Materials Information Company, 2002. V. 11.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. 3. ed. Rio de Janeiro, 2014. 256 p.

_____. **NBR 7478**: método de ensaio de fadiga de barras de aço para concreto armado. Rio de Janeiro, 1982. 6 p.

_____. **NBR 7480**: aço destinado a armaduras de concreto armado: especificação. Rio de Janeiro, 2007. 17 p.

_____. **NBR ISO 6508-1**: Materiais metálicos – Ensaio de dureza Rockwell – Parte 1: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019. 33 p.

_____. **NBR ISO 6892-1**: Materiais metálicos – Ensaio de Tração – Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2018. 70 p.

BELGO. **Processo de fabricação Belgo 50 e Belgo 60**. 2010.

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

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 215R-74**: Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading. Michigan, 1997.

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.

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

CASTRO, J. T. P.; MEGGLIOLARO, M. A. **Fadiga: técnica e práticas de dimensionamento estrutural sob cargas reais de serviço**, v.1-2, CreateSpace, 2009.

CAVALCANTI, P. 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, 2011.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferro Fundidos**. 6 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1988.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica- Estrutura e propriedades das ligas metálica**, 2ª ed. v.1. Editora McGraw-Hill, São Paulo, 1986. 266p.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **CEB-FIP MODEL CODE 1990**: design code: Bulletin d' information nº 213/214. 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.

FERREIRA, C. C. M. **Análise experimental do efeito de fadiga em vergalhões de 8mm em barras isoladas e telas soldadas para aplicação em concreto armado**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí. Teresina, 2017.

FERREIRA, C. C. M.; SANTOS, H. C.; SOARES, R. C.; DEUS, I. M. B.; SOUSA JUNIOR, G. L. Desenvolvimento de garras de apoio para acoplamento de vergalhões 8mm CA-60 em máquina servo hidráulica de ensaio de fadiga. In: Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, 14., 2017, Rio de Janeiro. **Anais da 14ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos**. Rio de Janeiro: COTEQ, 2017.

FERREIRA, C. C. M.; CUEVAS, R.; STUCCHI, F. R.; SANTOS, H. C. Investigação experimental do comportamento à fadiga de lajes de concreto armado com aço CA-60. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 60., 2018a, Foz do Iguaçu. **Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto**. Foz do Iguaçu: IBRACON, 2018a.

FERREIRA, C. C. M.; SANTOS, H. C.; CUEVAS, R.; STUCCHI, F. R. Experimental Investigation to Determine the Wöhler's Curve in CA-60 Steel 8mm Bars for Application in Slabs. **International Journal of Materials Engineering**, Rosemead, v. 2, n. 8, p.17-22, 2018b. Disponível em: <<http://article.sapub.org/10.5923.j.ijme.20180802.01.html>>. Acesso em: 27 ago. 2019.

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

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

LIPPOLD, J. C. **Welding metallurgy and weldability**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem**: fundamentos e tecnologia. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009. 363 p.

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

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

PHILLIPS, D. H. **Welding Engineering**: an introduction. Chichester: John Wiley & Sons, 2016.

RÊGO, E. M. F. **Mecânica da fratura baseada em deformação aplicada em fadiga por fretting**. 2017. 142 f. Tese (Doutorado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

SERVO PULSER MANUAL. **Instruction Manual**: Shimadzu Servo Pulser – Model EHF-EV200K1-010-0A. [20--?].

SHACKELFORD, J. F. **Introduction to materials science for engineers**. 4.ed. New Jersey, USA, Prentice - Hall / Simon & Schuster/A, 1996.

SILVA, J. E. M. **Comportamento do esforço cortante à fadiga em vigas de concreto armado**. 2019. 176 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

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.

YANG, B.; LIAW, P. K.; MORRISON, M.; LIU, C. T.; BUCHANAN, R. A.; HUANG, J. Y.; KUO, R. C.; HUANG, J. G.; FIELDEN, D. E. Temperature evolution during fatigue damage. **Intermetallics**, [s.l.], v. 13, n. 3-4, p.419-428, mar. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.intermet.2004.07.032>.

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