

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA – EE
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGMEC**

EDER HERMES BICHARRA

**ANÁLISE DOS ASPECTOS METALÚRGICOS DO AÇO ASTM SA – 516 Gr 60
UTILIZADO EM CALDEIRAS SUBMETIDO À FADIGA TÉRMICA**

RIO GRANDE – RS

2019

EDER HERMES BICHARRA

**ANÁLISE DOS ASPECTOS METALÚRGICOS DO AÇO ASTM SA – 516 Gr 60
UTILIZADO EM CALDEIRAS SUBMETIDO À FADIGA TÉRMICA**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Mecânica.

Orientador: Prof. Jorge Luís Braz de Medeiros, Dr.

RIO GRANDE – RS

2019

Ficha catalográfica

B583a Bicharra, Eder Hermes.

Análise dos aspectos metalúrgicos do aço ASTM SA – 516 Gr 60 utilizado em caldeiras submetido à fadiga térmica / Eder Hermes Bicharra. – 2019.

98 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2019.

Orientador: Dr. Jorge Luís Braz de Medeiros.

1. Caldeiras 2. ASTM SA – 516 Gr 60 3. Fadiga Térmica
4. Ensaio de Fadiga Térmica 5. Aspectos Metalúrgicos I. Medeiros, Jorge Luís Braz de II. Título.

CDU 621:669.1



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº 04/2019 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos doze dias do mês de março de dois mil e dezenove, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às quinze horas no Auditório do Prédio da Fabricação Mecânica, no Campus Carreiros desta Universidade, a que se submeteu o mestrando Edor Hermes Bicharra, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de Soldagem e Materiais do PPGMec, com o seguinte título: **ANÁLISE DOS ASPECTOS METALÚRGICOS DO AÇO ASTM SA – 516 Gr 60 UTILIZADO EM CALDEIRAS SUBMETIDO À FADIGA TÉRMICA**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Luciano Volcanoglo Biehl e Vinicius Martins, sob a presidência do Professor Jorge Luis Braz Medeiros. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Jorge Luis Braz Medeiros: Aprovado
2. Luciano Volcanoglo Biehl: Aprovado
3. Vinicius Martins: Aprovado

Foi concedido um prazo de 30 dias, para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. Jorge Luis Braz Medeiros
2. Luciano Volcanoglo Biehl
3. Vinicius Martins

Eder Hermes Bicharra: [Assinatura]

Dedico este trabalho aos meus pais, irmãos, madrinha e toda minha família, que sempre me apoiaram em todos os momentos da minha vida, a minha esposa Fernanda pelo incentivo, apoio, compreensão e paciência e a minha amada filha Mariana pelo carinho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida, pelas bênçãos derramadas sobre mim e pelas oportunidades por Ele colocado durante toda a minha vida;

Aos professores Luiz Carlos Vieira Guedes e Fabiano Farias de Oliveira do grupo UNIS–MG, pelas cartas de referências para início do programa;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPMEC) e a Universidade Federal do Rio Grande (FURG) por proporcionar a realização do curso de mestrado em Engenharia Mecânica;

Aos professores do PPMEC, pela paciência, conselhos, pelas conversas informais e pela dedicação ao passar seus conhecimentos tanto nos assuntos profissionais como pessoais;

Ao professor e orientador Dr. Jorge Luís Braz de Medeiros, pela confiança e orientação durante a realização do trabalho e pelos conhecimentos passados, agradeço também ao professor e coordenador do PPMEC Dr. Luciano Volcanoglo Biehl pelo apoio e incentivo.

Ao aluno de mestrado do Programa da Pós-Graduação em Computação (PPGComp/FURG) Átila Astor Weis, pela dedicação e parceria no desenvolvimento do equipamento do presente trabalho.

Aos técnicos do laboratório de usinagem da FURG Cristiano de Azevedo Celente e Bruno Soares Laner, por me auxiliarem na fabricação e projeto do equipamento desenvolvido no presente trabalho;

Aos Engenheiros, técnicos do laboratório de soldagem Thais Andrezza dos Passos e Daniel Souza pela disponibilidade no uso dos equipamentos do laboratório;

Ao Engenheiro, técnico do laboratório de metalografia Jorge Airton e a aluna Karina do curso de graduação em engenharia mecânica empresarial por me auxiliarem na preparação das amostras;

Ao Rudmar Krumreick e à Caroline Pires Ruas do CEME-SUL, por me auxiliarem na coleta de imagens no MEV;

Ao Instituto Federal Sul-Rio-Grandense (IFSUL), campus Pelotas pela disponibilidade do uso do equipamento para ensaio de tração, onde foi possível a realização do mesmo nas amostras;

Aos meus amigos e colegas de PPMEC, em especial Felipe Sette e Mauricio Diogo pela parceria durante o programa;

Ao amigo Marcelo Gautério Fonseca, pela ajuda no desenvolvimento do equipamento presente neste trabalho;

Aos meus pais e irmãos, que mesmo morando em outro estado, sempre estiveram apoiando e incentivando a conclusão deste trabalho;

À minha esposa e filha, pela paciência e incentivo durante esse período;

À CAPES / CNPq pelo auxílio financeiro através da bolsa de apoio a pesquisa.

À empresa Steammaster Industria de Caldeiras, pela colaborado com a doação do aço ASTM AS – 516 Gr 60, para a pesquisa.

“Demore o tempo que for para decidir o que
você quer da vida, e depois que decidir não
recue ante nenhum pretexto, porque o
mundo tentará te dissuadir”.

Friedrich Nietzsche

RESUMO

O aço ASTM SA – 516 é utilizado em caldeiras de vapor de baixa e média temperatura e pressão, aplicado em um componente de caldeiras denominado espelho. Este quando exposto a temperaturas elevadas, devido aos gases provenientes da queima do combustível pode apresentar degradação. Ao inspecionar este componente em uma periodicidade especificada por norma, podem ser detectadas falhas. Dentre os principais mecanismos de falhas encontradas nos materiais utilizados em caldeiras, podem ser citados fluência, corrosão, quando sujeitos à ação dos gases de combustão e / ou às condições de oxidação do vapor, fadiga térmica entre outros. Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da fadiga térmica no aço ASTM SA – 516 Gr 60 utilizado em caldeiras. Após caracterização do aço verificou que este atende as especificações exigidas por norma, apresentando uma microestrutura composta por Ferrita e Perlita. Um equipamento para a realização dos ensaios de fadiga térmica foi projetado e fabricado no presente trabalho. Os ensaios foram realizados em condições de transferência de calor, originando temperaturas entre 750 °C a 850 °C na superfície, a partir de chama oxidante produzida por gases oxigênio e acetileno. O arrefecimento foi realizado com água, sendo as amostras submetidas a inúmeros ciclos de aquecimento e resfriamento originando fadiga térmica. Após a realização dos ensaios cíclicos, as amostras foram caracterizadas com a utilização das técnicas de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), microsonda EDS, microdureza Vickers e análise macroestrutural. As microestruturas detectadas nas zonas afetadas pelo calor (ZAC) foram basicamente Ferrita, colônias de Perlita e Martensita não revenida, na região do substrato não se detectou anisotropia ou variações significativas. Quanto à análise do tamanho de grão austenítico, observou-se um refinamento apresentando tamanho de grão 12 ASTM, considerado como extrafino. Os valores mais elevados de microdureza ocorreram na superfície afetada diretamente pelo calor devido ao aquecimento em temperaturas intercrítica e de austenitização com posterior resfriamento por água. Quando comparando a média do tamanho das trincas encontrada nas amostras verificou-se um aumento de aproximadamente 310% entre a amostra submetida ao menor ciclo (250) em comparação a amostra submetido ao maior número de ciclo (750).

Palavras-Chaves: Caldeiras; ASTM SA – 516 Gr 60; Fadiga Térmica; Ensaio de Fadiga Térmica; Aspectos Metalúrgicos.

ABSTRACT

The ASTM SA – 516 steel is used in steam boilers of low and medium temperature and pressure, applied in a boiler component named tubesheet. Deterioration can show on this component when exposed to high temperatures due fuel gases burning. Failures are detected by inspections done in a frequency required by standard on this component. Among the main failure mechanisms found in materials used in boilers, creep, corrosion, when subjected to the action of the combustion gases and / or steam oxidation conditions, thermal fatigue and others can be mentioned. This work has as purpose to evaluate the effect of thermal fatigue in steel ASTM SA - 516 grade 60 used in boilers. After characterization of the steel checked that it heeds the specifications required by standard, showing a microstructure of Ferrite and Pearlite. To carry out the thermal fatigue tests on present work, an equipment was designed and manufactured. The tests were carried out in heat transfer conditions, causing temperatures between 750 °C to 850 °C on surface starting of oxidizing flame produced by oxygen and acetylene gases. The cooling was by water being the samples were submitted to several cycles of heating and cooling causing thermal fatigue. After the tests, the samples were characterized through of optical microscopy techniques, scanning electronic microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), Vickers hardness and macrostructure analyze. Ferrite, Pearlite colonies and no tempered Martensite were the microstructures detected on the heat affected zone (HAZ), on substrate's region was not detected anisotropy or significant variations. When analyzing austenitic grain size was observed a refinement showing 12 ASTM grain size considered extra fine. The higher microhardness values occurred at surface that has been affected by heat due to heating in intercritical and austenitization temperature and the cooling by water. When comparing the average crack size checked an increase of approximately 310% between the sample submitted to lower cycles (250) to confront with the sample submitted to higher cycles (750).

Keywords: *Boilers; ASTM SA – 516 grade 60; Thermal Fatigue; Thermal Fatigue Test; Metallurgical Aspects.*

LISTAS DE FIGURAS

Figura 01: Estrutura Metalográfica ASTM SA – 516.....	22
Figura 02: Superfície do Aço Após Exposição à Gases de Combustão da Caldeira.....	24
Figura 03: Microestrutura do Aço Exposta aos Gases de Combustão da Caldeira.....	25
Figura 04: Perda de Espessura (mm)	26
Figura 05: Metalografia Aço Baixa Liga Antes e Após Tratamento Térmico	28
Figura 06: Metalografia Aço Baixa Liga, Diferentes Tipos de Martensita	29
Figura 07: Ciclos do Tratamento Térmico para Obter as Morfologias da Martensita	29
Figura 08: Microestrutura de Diferentes Taxas de Resfriamento	31
Figura 09: Diagramas TTT e CCT	32
Figura 10: Curva CCT para o aço ASTM A 516 grau 60	33
Figura 11: Morfologia Macroscópica das Trincas na Superfície Submetida a Fadiga Térmica	35
Figura 12: Microestruturas da Ligas Ferrosas Submetidas a Fadiga Térmica	36
Figura 13: Evolução do Tamanho da Trinca x Número de Ciclos	37
Figura 14: Falhas Mostradas nas Microestruturas das Amostras Submetidas a Fadiga Térmica	38
Figura 15: Perfis de Microdureza Após Fadiga Térmica	39
Figura 16: Organograma da Metodologia do Projeto	40
Figura 17: Geometria e Dimensões dos Corpos de Prova	42
Figura 18: Geometria e Dimensões dos Corpos de Prova da Pesquisa	43
Figura 19: Corpo de Prova para Ensaio de Tração Simples	43
Figura 20: Desenho Esquemático da Localização dos Pontos na Amostra	45
Figura 21: Equipamentos de Fadiga Térmica.....	47
Figura 22: Suporte do Equipamento de Fadiga Térmica.....	48
Figura 23: Reservatório do Equipamento de Fadiga Térmica	49
Figura 24: Detalhe do Eixo do Equipamento de Fadiga Térmica	49
Figura 25: Mancal e Motor de Passo.....	50
Figura 26: Detalhe da Montagem do Conjunto Motriz	50
Figura 27: Detalhe da Mesa Giratória	51
Figura 28: Detalhe do Sistema de Aquecimento	51
Figura 29: Detalhe do Sistema de Resfriamento.....	52
Figura 30: Detalhe dos <i>Hardwares</i> da Automação.....	52

Figura 31: Visão Geral do Equipamento de Fadiga Térmica.....	53
Figura 32: Corpo de Prova e Montagem para Parâmetros.....	54
Figura 33: Detalhe dos Parâmetros.....	55
Figura 34: Detalhes do Ensaio de Fadiga Térmica	56
Figura 35: Fluxograma Macro do Funcionamento do Ensaio de FT.....	57
Figura 36: Detalhe das Amostras Retiradas dos CP Após FT.....	59
Figura 37: Estrutura Metalográfica ASTM SA – 516 Gr 60 Como Recebido	62
Figura 38: Perfil de Microdureza Vickers do Material Como Recebido	63
Figura 39: Contornos de Grãos Austeníticos ASTM SA – 516 Gr 60 CR.....	63
Figura 40: Gráfico Tensão x Deformação ASTM SA – 516 Gr 60	64
Figura 41: Corpo de Prova a Cada 50 Ciclos de Fadiga Térmica	65
Figura 42: Imagens Macros Corpo de Prova.....	66
Figura 43: Microestrutura da Amostra Submetida a 250 Ciclos - Seção	67
Figura 44: Microsonda – EDS Amostra 250 Ciclos.....	68
Figura 45: Microestrutura da Amostra Submetida a 250 Ciclos - Núcleo	68
Figura 46: Amostra a 250 Ciclos de Fadiga Térmica – Próximo a Superfície	69
Figura 47: Detalhe das Trincas Externas na Amostra a 250 Ciclos	70
Figura 48: Detalhe das Trincas Internas na Amostra a 250 Ciclos.....	70
Figura 49: Microsonda – EDS nas Trincas 250 Ciclos	71
Figura 50: Microestrutura da Amostra Submetida a 500 Ciclos - Seção	71
Figura 51: Microsonda – EDS Amostra 500 Ciclos.....	72
Figura 52: Microestrutura da Amostra Submetida a 500 Ciclos - Núcleo	72
Figura 53: Amostra a 500 Ciclos de Fadiga Térmica – Próximo a Superfície	73
Figura 54: Detalhe das Trincas Externas na Amostra a 500 Ciclos	74
Figura 55: Detalhe das Trincas Internas na Amostra a 500 Ciclos.....	74
Figura 56: Microsonda – EDS nas Trincas 500 Ciclos	75
Figura 57: Microsonda – EDS 500 Ciclos Ponta da Trinca.....	75
Figura 58: Microestrutura da Amostra Submetida a 750 Ciclos - Seção	76
Figura 59: Microsonda – EDS Amostra 750 Ciclos.....	77
Figura 60: Microestrutura da Amostra Submetida a 750 Ciclos - Núcleo	77
Figura 61: Amostra a 750 Ciclos de Fadiga Térmica – Próximo a Superfície	78
Figura 62: Detalhe das Trincas Externas na Amostra a 750 Ciclos	78
Figura 63: Detalhe das Trincas Internas na Amostra a 750 Ciclos.....	79
Figura 64: Microsonda – EDS nas Trincas 750 Ciclos	80

Figura 65: Imagens para Tamanho de Grão ASTM	80
Figura 66: Tamanho da Trinca (μm) x Número de Ciclos.....	81
Figura 67: Perfil de Microdureza Vickers do Material Submetido a 250 Ciclos	83
Figura 68: Perfil de Microdureza Vickers do Material Submetido a 500 Ciclos	84
Figura 69: Perfil de Microdureza Vickers do Material Submetido a 750 Ciclos	85
Figura 70: Comparativo do Perfil de Microdureza Vickers	86
Figura 71: Resistência a Tração (MPa) x Número de Ciclos.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Resistência a Tração Conforme Grau do aço SA – 516.....	21
Tabela 02: Composição Química do Aço ASTM SA – 516 Gr 60 (ASME).....	21
Tabela 03: Pressão e Temperatura do Vapor Saturado e Superaquecido.....	23
Tabela 04: Microdureza das Fases Contidas nas Duas Morfologias da Martensita..	30
Tabela 05: Composição Química do Aço ASTM SA – 516 Gr 60.....	41
Tabela 06: Medidas dos Espaçamentos na Amostra para Ensaio de Microdureza...	45
Tabela 07: Parâmetros de Tempo das Temperaturas para o Ensaio de FT	54
Tabela 08: Monitoramento da Temperatura no Ensaio de FT	58
Tabela 09: Resultado da Composição Química do aço ASTM SA – 516 Gr 60	61
Tabela 10: Microdureza Vickers no Material Como Recebido.....	62
Tabela 11: Resultados dos Ensaios de Tração	64
Tabela 12: Valores Médio do Tamanho das Trincas nas Amostras	81
Tabela 13: Microdureza Vickers nas Amostras Submetidas a 250 Ciclos.....	82
Tabela 14: Microdureza Vickers nas Amostras Submetidas a 500 Ciclos.....	83
Tabela 15: Microdureza Vickers nas Amostras Submetidas a 750 Ciclos.....	84
Tabela 16: Valores Médio de Microdureza Vickers nas Amostras	86

LISTAS DE ABREVIações E SIGLAS

Ø	Diâmetro
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCT	Transformação Resfriamento Contínuo
CP	Corpo de Prova
CR	Como Recebido
EDS	Microsonda de Energia Dispersiva
FT	Fadiga Térmica
Gr	Grau
h	horas
kV	Quilovolt
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
mm	milímetros
N	Newton
NR	Norma Regulamentadora
s	Segundos
TTT	Tempo Temperatura Transformação
V	volts
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVOS.....	20
2.1 Objetivo Geral	20
2.2 Objetivos Específicos.....	20
3 REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1 Características do Aço ASTM SA – 516 Gr 60 e Seu Uso em Caldeiras.....	21
3.2 Efeito do Uso Prolongado de Caldeiras nos Materiais Empregados	23
3.3 Importância dos Elementos para Inibir Falhas em Altas Temperaturas	26
3.4 Efeito da Temperatura nas Propriedades Mecânicas e Metalúrgicas dos Aços de Baixa Liga	28
3.5 Taxa de Resfriamento nos Aços Utilizados em Caldeiras.....	31
3.6 Efeito da Fadiga Térmica em Ligas Ferrosas	34
4 MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1 Preparação do Corpo de Prova.....	41
4.1.1 Corpo de Prova para Ensaio de Fadiga Térmica	41
4.1.2 Corpo de Prova para Ensaio de Tração Simples	43
4.2 Caracterização Inicial	44
4.2.1 Análise de Composição Química	44
4.2.2 Análise da Microestrutura.....	44
4.2.3 Ensaio de Microdureza.....	44
4.2.4 Tamanho de Grão Austenítico	46
4.2.5 Ensaio de Tração	46
4.3 Fabricação e Montagem do Equipamento para Ensaio	46
4.4 Ajustes dos Parâmetros para o Ensaio de Fadiga Térmica	53

4.5 Ensaio de Fadiga Térmica Oxiacetilenica	55
4.6 Ensaio Não Destrutivo - Análise Visual	58
4.7 Retirada das Amostras Após Ensaio de Fadiga Térmica para Análise.....	58
4.7.1 Microscopia Óptica	59
4.7.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) / EDS	60
4.7.3 Ensaio de Microdureza Vickers Após Fadiga Térmica	60
4.7.4 Análise das Trincas	60
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1 Caracterização Inicial do Aço ASTM SA – 516 Gr 60	61
5.2 Análise Visual dos Copos de Prova Submetido a Fadiga Térmica	65
5.3 Análise Microestrutural Após Ensaio de Fadiga Térmica	67
5.3.1 Análise das Amostras Submetidas a 250 Ciclos	67
5.3.2 Análise das Amostras Submetidas a 500 Ciclos	71
5.3.3 Análise das Amostras Submetidas a 750 Ciclos	76
5.4 Análise Tamanho de Grão Austenítico	80
5.5 Análise das Trincas	81
5.6 Análise Microdureza Vickers Após o Ensaio de Fadiga Térmica	82
5.6.1 Análise Microdureza Vickers 250 Ciclos.....	82
5.6.2 Análise Microdureza Vickers 500 Ciclos.....	83
5.6.3 Análise Microdureza Vickers 750 Ciclos.....	84
5.6.4 Comparação Microdureza Vickers - CR, 250, 500 e 750 Ciclos.....	85
6 CONCLUSÕES	88
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
REFERÊNCIAS.....	91
APÊNDICE 1 – DESENHO CONJUNTO EQUIPAMENTO DE FADIGA TÉRMICA.	95

APÊNDICE 2 – INTERFACE <i>SOFTWARE</i> ARDUINO	96
APÊNDICE 3 – RELATÓRIO DO ENSAIO DE FADIGA TÉRMICA.....	97
ANEXO A – CERTIFICADO DO AÇO ASTM SA-516 Gr 60	98

1 INTRODUÇÃO

Geradores de vapor, comumente denominadas caldeiras de vapor, podem ser classificadas conforme a posição do fluxo de gases, podendo ter configuração flamotubular ou fogotubular, que se caracterizam pela circulação dos gases de combustão pelo interior dos tubos do feixe tubular até a saída pela chaminé podendo ser esta compacta, com fornalhas cilíndricas internas, outra classificação, são as caldeiras aquatubulares que se caracterizam pela circulação externa dos tubos os gases de combustão, aquecendo à massa de água no interior dos tubos. Nas caldeiras flamotubulares o feixe tubular é ancorado em um componente denominado “espelho”.

De acordo com sua categoria, as caldeiras podem ser submetidas às inspeções periódicas de 12 meses para as categorias A e B; 15 meses para caldeiras de recuperação de qualquer categoria; 24 meses para caldeiras da categoria A, desde que aos 12 meses sejam testadas as pressões de abertura das válvulas de segurança (NR 13 seção 13.4.4.4, 2018). Nas inspeções é encontrada através de alguns ensaios não destrutivos, a presença de trincas, no material e ou em juntas soldadas. Em caldeiras flamotubulares compactas, as trincas normalmente são detectadas nos espelhos, este, em contato direto com temperaturas elevadas devido aos gases provenientes da queima do combustível.

Dentre os principais mecanismos de falhas encontradas nos materiais utilizados em caldeiras, pode citar a fluência, a corrosão quando sujeitos à ação dos gases de combustão e / ou às condições de oxidação do vapor, fadiga térmica e outros (VISWANATHAN, 2001; MASUYAMA, 2001 e ASM 2002). As ocorrências das trincas, foi a motivação para o estudo de uma possível causa para estas falhas, avaliando os aspectos metalúrgicos de um aço utilizado neste componente, o aço ASTM SA – 516, este, utilizado em caldeiras de baixa e média temperatura e pressão. Como dito, os mais diversos mecanismos de falhas podem ocorrer em caldeiras, porém o foco da pesquisa é o efeito da fadiga térmica no aço ASTM SA – 516 Gr 60.

Segundo Brandim (2009) “Fadiga térmica é por definição, um processo de aplicação repetitiva de ciclos térmicos, durante o qual tensões e deformações são resultantes exclusivamente da imposição de gradientes de temperatura sem a aplicação de cargas mecânicas.” Um equipamento para efetuar os ensaios de fadiga térmica foi projetado e fabricado no presente trabalho e o ensaio se deu em condições

extremas para acelerar o processo de falha, o aquecimento atingiu temperaturas entre 750 °C a 850 °C, auxiliado por chama oxiacetilenica e o resfriamento se deu por água.

As mais recentes pesquisas avaliando os efeitos da fadiga térmica foram feitas, porém para aços com alto teor de elementos de liga e para aplicações distintas a caldeiras, portanto o presente trabalho objetiva-se proporcionar uma abordagem tanto teórica quanto prática dos efeitos da fadiga térmica no aço ASTM SA – 516 Gr 60 utilizado em caldeiras, no que se diz respeito aos aspectos metalúrgicos deste material.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar o efeito da fadiga térmica sobre as propriedades metalúrgicas do aço ASTM SA – 516 Gr 60, este utilizado em caldeiras conforme exigência da norma ASME.

2.2 Objetivos Específicos

- Projetar e fabricar um equipamento para realizar o ensaio de fadiga térmica;
- Analisar não conformidades no substrato que possa influenciar o efeito de fadiga térmica;
- Verificar os aspectos metalúrgicos na região do aço submetido à fadiga térmica em diferentes ciclos e comparar os resultados;
- Analisar as propriedades mecânicas na região do aço submetido à fadiga térmica em diferentes ciclos;
- Verificar o surgimento de trincas após um determinado número de ciclos na condição de fadiga térmica;
- Após o surgimento da trinca, analisar a propagação correlacionando com o número de ciclos de fadiga térmica.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem por objetivo, analisar as contribuições teóricas que serão utilizadas para a estruturação deste estudo. As seções relacionam o ordenamento do capítulo, encadeando os assuntos selecionados de acordo com o eixo que rege a pesquisa.

3.1 Características do Aço ASTM SA – 516 Gr 60 e Seu Uso em Caldeiras

Um estudo com base em normas, artigos e livros, tem como objetivo mostrar as características do aço ASTM SA – 516 Gr 60, levantando também informações pertinentes para a aplicação deste aço em vasos de pressão e caldeiras.

Conforme *American Society of Mechanical Engineers ASME* Seção II Parte A (2004) essa especificação do aço é destinada principalmente a vasos de pressão soldados e são disponíveis em quatro graus diferentes de acordo sua resistência a tração com mostrado na Tabela 01.

Tabela 01: Resistência a Tração Conforme Grau do aço SA – 516

Grau EUA (S.I.)	Resistência a Tração ksi (MPa)
55 (380)	55-75 (380-515)
60 (415)	60-80 (415-550)
65 (450)	65-85 (450-585)
70 (485)	70-90 (485-620)

Fonte: Adaptada ASME, 2004

Uma característica do aço é composição química, a Tabela 02 mostra a composição química com os limites de porcentagem dos elementos exigidos pela norma, destaque para o teor de Manganês e Silício.

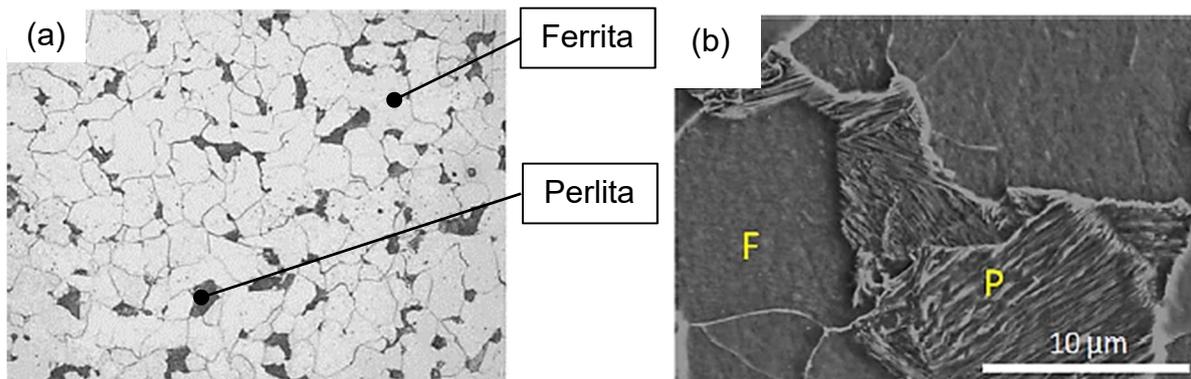
Tabela 02: Composição Química do Aço ASTM SA – 516 Gr 60 (ASME)

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Cu	Mo	Ceq
0,21 máx.	0,55 - 0,98	0,035 máx.	0,035 máx.	0,13 - 0,45	0,43 máx.	0,34 máx.	0,43 máx.	0,13 máx.	0,45 máx.

Fonte: Adaptada ASME, 2004

Outra característica relevante citada na ASME Seção II Parte A (2004) é a estrutura metalúrgica deste aço, que avalia o tamanho de grão austenítico. Se exigido um aço com grão refinado, este deverá usar Al como elemento para refino de grão e deve estar com tamanho de grão maior igual a número 5 ASTM. A Figura 01 mostra detalhes da estrutura metalúrgica do aço ASTM SA – 516.

Figura 01: Estrutura Metalográfica ASTM SA – 516



Fonte: (a) Adaptada Gong, 2010; (b) Adaptada Lim, 2016

Conforme a Figura 01 (a) observar-se uma estrutura típica de um aço baixo carbono, a microestrutura do aço mostrado consiste em grãos de Ferrita e Perlita com dimensões iguais em todas as direções da estrutura, a Figura 01 (b) mostra uma ampliação maior onde é possível observar as lamelas de Perlita (P) em uma matriz de Ferrita (F) (GONG *et al* 2010; LIM *et al* 2016). A microestrutura que contem Ferrita e Perlita com baixo teor de inclusões, são típicos para o aço de baixo carbono usado em caldeiras (DUARTE *et al* 2017).

A norma ASME (2004), na seção II parte A, mostra que o aço SA – 516 Gr 60 são utilizados em vasos de pressão e caldeiras para média e baixa temperatura de serviço. A NR 13, na seção 13.4.1.2 classifica as caldeiras em duas categorias de acordo com pressão: Categoria A são aquelas onde a pressão de operação é igual ou superior a 1960 kPa (19,98 kgf/cm²) e Categoria B são aquelas cuja pressão de operação seja superior a 60 kPa (0,61 kgf/cm²) e inferior a 1960 kPa (19,98 kgf/cm²). Para uma determinada temperatura de saturação há uma pressão de saturação e vice-versa, o termo “temperatura e pressão de saturação” indica a temperatura e pressão que ocorre uma mudança de fase do fluido utilizado (MORAN *et al*, 2013 p. 72). Considera-se as duas condições de vapor mais utilizados, o vapor saturado e o vapor superaquecido, para determinar a temperatura de serviço, exibido na Tabela 03.

Tabela 03: Pressão e Temperatura do Vapor Saturado e Superaquecido

Vapor saturado		Vapor superaquecido	
Pressão (kPa)	Temp. (°C)	Pressão (kPa)	Temp. (°C)
600	159	600	165
2000	212	2000	213

Fonte: Adaptada Moran, 2013

A Tabela 03 mostra a relação da temperatura de serviço do fluido para sua respectiva pressão, essa respeitando as especificações das categorias A e C, conforme NR 13. Conclui-se que o aço ASTM SA – 516 Gr 60 atende a norma ASME para aplicações em caldeiras e vaso de pressão de média e baixa temperatura de serviço, com base nas informações de pressão e temperatura, pode se afirmar que o emprego do aço se enquadra em caldeiras de categoria B e C.

3.2 Efeito do Uso Prolongado de Caldeiras nos Materiais Empregados

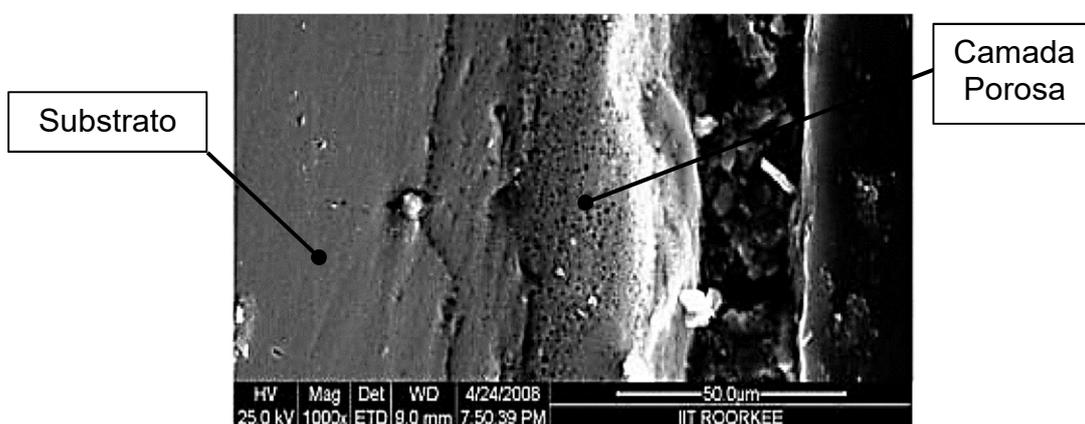
A NR 13, na seção 13.4.1.1 define que “caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia [...]”. “Essencialmente uma caldeira de vapor é constituída de um vaso fechado com tubos, no qual se introduz água, que pela aplicação externa de calor se transforma continuamente em vapor” (PERA, 1990 p.1-1). Dentre os diversos modelos, pode-se exemplificar as caldeiras flamotubulares compactas, essas carregam uma grande quantidade de água no interior de um invólucro ou casco, dentro do qual encontram-se também as fornalhas, feixe tubular ancorados a um espelho, este submerso na água contida no interior do casco (PERAGALLO, 1995 p.147).

As caldeiras após um determinado tempo de uso, este podendo ser contínuo ou intermitente, estão sujeitas a algumas variedades de falhas, envolvendo um ou mais mecanismos, dentre as principais causas nos materiais pode citar a fluência, a corrosão quando sujeitos à ação dos gases de combustão e / ou às condições de oxidação do vapor, fadiga térmica e outros (VISWANATHAN, 2001; MASUYAMA, 2001; ASM 2002). No caso das caldeiras, a degradação dos materiais é provocada pela combinação de solicitações mecânicas, alta temperatura e corrosão. Frequentemente encontraram-se fenômenos de fluência, fadiga térmica, corrosão e oxidação (CARDOSO, 2009).

A corrosão a alta temperatura em componentes de caldeiras a carvão, é dado como a principal causa de paralização em usinas geradoras de energia, onde a perda de material é devido ao ambiente corrosivo-erosivo causado pelos gases de combustão provenientes da queima do carvão e a taxa de corrosão aumenta à medida que a temperatura sobe (BALA *et al* 2013; MASUYAMA, 2001).

Após expor uma amostra do aço SA – 516 Gr 70 a um ambiente real de operação de caldeira onde a temperatura é de aproximadamente de 700 °C e os gases de combustão contém 16% CO₂ e 3% O₂ por volume, efetuado ensaios de 15 ciclos, onde cada ciclo consiste em 100h de exposição ao ambiente de operação da caldeira, seguido de 1h de resfriamento no ar, identificou a perda de espessura da amostra de 0,5 mm, com base nessa perda de espessura, a taxa de corrosão para o aço foi calculada, encontrado um valor de 2,92 mm / ano. A Figura 02 mostra seção da amostra depois de 1500h de exposição, onde a superfície apresentou uma camada porosa composta de Fe e O, esses como principais elementos (BALA *et al* 2013).

Figura 02: Superfície do Aço Após Exposição à Gases de Combustão da Caldeira



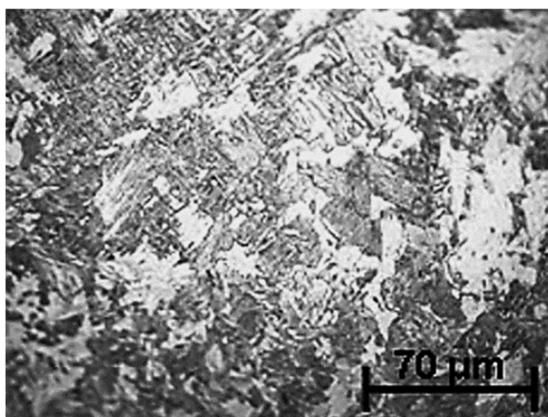
Fonte: Adaptada Bala, 2013

Fontenelle *et al* (2017) utilizaram um procedimento semelhante, porém com parâmetros diferentes, temperatura próxima a 550 °C e tempo de exposição de 74 h, 132 h e 314 h, submetidos a 9, 34 e 45 ciclos de aquecimento e resfriamento respectivamente e os gases contendo 35% CO₂ e 0,91% O₂, após o experimento avaliaram os efeitos causado no aço SA – 516 Gr 60, através da perda de massa das amostras, concluíram que a taxa de corrosão é de 1,5 a 2 mm / ano e apresentaram uma sutil redução de dureza na superfície exposta ao ensaio.

Uma análise de falhas feita em uma caldeira após dois anos de operação foi encontrado um vazamento em tubo curvado, esta parte retirada para análise, após uma série de procedimento tais como: exame visual; análise de composição química; análise microestrutural; dureza e tensões residuais, concluiu que o mecanismo de falha foi identificado por corrosão sob tensão, este, devido à combinação de tensões residuais e corrosão por pite. A corrosão causada pelo tratamento inadequado da água e a maioria das trincas originadas na seção curvada do tubo, estas, intimamente ligadas a presença de tensão residual do processo de conformação (DUARTE, 2017).

Após análise da microestrutura em amostras do tubo rompido da caldeira, observou que as mudanças microestruturais que ocorreram no material levaram à formação de uma microestrutura mista de Martensita e Bainita, essas fases formadas pela exposição do aço a altas temperaturas, devido aos gases de combustão, seguido de um resfriamento natural rápido, semelhante ao tratamento térmico de têmpera ou ciclo térmico de um procedimento de soldagem, favorecendo a propagação de trinca. Foi observado que incrustações, corrosão por pite na parede interna do tubo, juntamente com a mudança da microestrutura pode ser uma provável causa da ruptura do tubo ASTM A 192 – 02, como essas descontinuidades atuaram como elevadores de tensão, reduzindo assim a resistência do componente, de modo que a falha ocorreu por fadiga térmica (BARBOSA *et al* 2012). A Figura 03 mostra a microestrutura da amostra analisada.

Figura 03: Microestrutura do Aço Exposta aos Gases de Combustão da Caldeira



Fonte: Adaptada Barbosa, 2012

Onde está apresentou fases predominantemente compostas por Martensita, Bainita e Ferrita com precipitação de carbonetos nesta região que foi diretamente exposta aos gases de combustão (BARBOSA *et al* 2012).

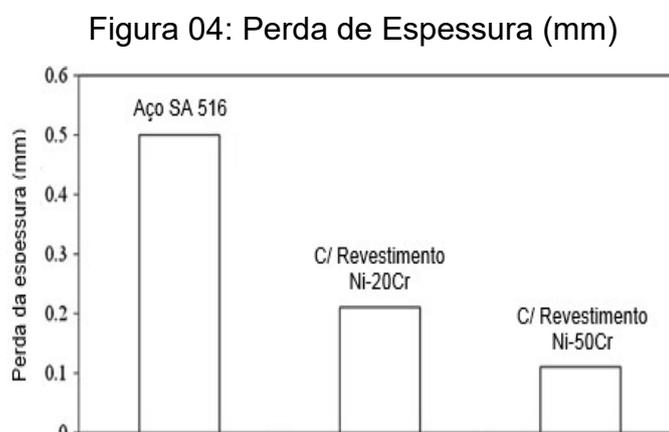
A fadiga térmica e a fluência são uma das principais causas de falhas em componentes da caldeira, por causa da grande tensão térmica que surge quando o equipamento inicia a operação e após seu uso é desligado e assim sucessivamente (MASUYAMA, 2001; KUMAR, 2016). Ao ser submetido a fadiga térmica, componentes pode sofrer deformações geométricas inaceitáveis, mudanças em suas propriedades e o surgimento de trincas, são as consequências do carregamento térmico e cíclico (SILVA, 2011). Segundo Cardoso (2009) “A fluência é o mecanismo de falha que tem maior influência na vida dos componentes que trabalham a alta temperatura e sobre pressão interna [...]”. O Principal fenômeno de degradação é a fluência, combinado com outros meios, tal como a oxidação do vapor (KUMAR, 2016).

Conforme visto, a combinação de vários mecanismos de falhas contribui para efeitos deletérios e até mesmo o colapso em alguns dos componentes de uma caldeira.

3.3 Importância dos Elementos para Inibir Falhas em Altas Temperaturas

Devido aos mecanismos de falhas encontradas nos materiais expostos a alta temperatura, equipamentos térmicos tendo como exemplo os rotores de turbinas; cadeiras de alta, média e baixa pressão; linhas de vapor de água de alta pressão; trocadores de calor, entre outros. Os materiais empregados nestes equipamentos podem ter elementos e fases microestruturais que retardam tais falhas.

Baseado nos dados de perda e espessura do aço ASTM SA – 516 Gr 70 ao ser exposto em ambientes termicamente corrosivos, foram estudadas o efeito do revestimento de ligas de Ni-20Cr e Ni-50Cr no aço expostas no mesmo ambiente, onde os resultados são exibidos na Figura 04 (BALA *et al* 2013).



Fonte: Adaptada Bala, 2013

A Figura 04 mostra graficamente o efeito do revestimento para a perda de espessura do material, os valores encontrados da perda de espessura do corpo de prova para aço com o revestimento de liga Ni-20Cr e liga Ni-50Cr foram 0.21 mm e 0.14 mm respectivamente, com base nessa perda de espessura as taxas de corrosão, com os revestimentos de Ni-20Cr e Ni-50Cr foram calculadas com 2.92 mm/ano, 1.23 mm/ano e 0.82 mm/ano, respectivamente. Conclui que o revestimento com os elementos de liga Ni-20Cr e Ni-50Cr, foram eficazes para resistência a corrosão no ambiente da caldeira a carvão, uma vez que estes foram bem-sucedidos para reduzir a perda de espessura (BALA *et al* 2013). Paredes de uma fornalha de caldeiras fabricadas com tubos de aços baixa ligas, algumas partes foram revestido com ligas, após três anos de exposição aos gases provenientes da queima do combustível, foram comparadas com tubos sem o revestimento e concluíram que o revestimento com a liga composta de cromo e alto teor de níquel reduziu a taxa de corrosão drasticamente (ALIPOUR *et al* 2014). Aumentando a o teor de cromo torna os materiais mais resistentes à corrosão (MASUYAMA, 2001).

Devido ao uso de algumas caldeiras serem de forma em que é posta em marcha e depois de operar, o equipamento é desligado, assim constantemente, os aços ferríticos devem ser empregados, compostos quimicamente com 2%Cr, 9%Cr e 12%Cr (MASUYAMA, 2001). O uso de aços austeníticos eram muito propícios a fadiga térmica, para minimizar tal mecanismo de falha, aços ferríticos contendo 9-12%Cr, foram desenvolvidos (VISWANATHAN, 2001). O desenvolvimento de aços martensíticos com 9-12% Cr é altamente desejável para faixa de temperatura com até 650°C e superior (ABE, 2008). Ao recobrirem a superfície da amostra do aço H13 com uma mistura de Ni e Cr, através de uma técnica de derretimento a laser da superfície e a mistura das ligas eram depositadas na poça de fusão. Após este procedimento as amostras foram submetidas ao ensaio de fadiga térmica e teve como resultado o aumento a resistência a propagação de trincas (TONG *et al* 2013; CONG *et al* 2014).

Segundo Cardoso (2009) “Resistência à fluência dos aços C - Mn é devido essencialmente ao teor de Mn que constitui um elemento endurecedor por precipitação sólida. A sua utilização está limitada a componentes da caldeira cujas temperaturas sejam inferiores a 500 °C [...]”. Os aços mais recentes apresentam resistência a ruptura por fluência operando nas condições de 140 MPa a 600 °C durante 100 000 h, esse aumento na resistência à fluência é obtido pela formação de liga de W para reduzir parte do Mo (MASUYAMA, 2001). Ligas a base de Fe para

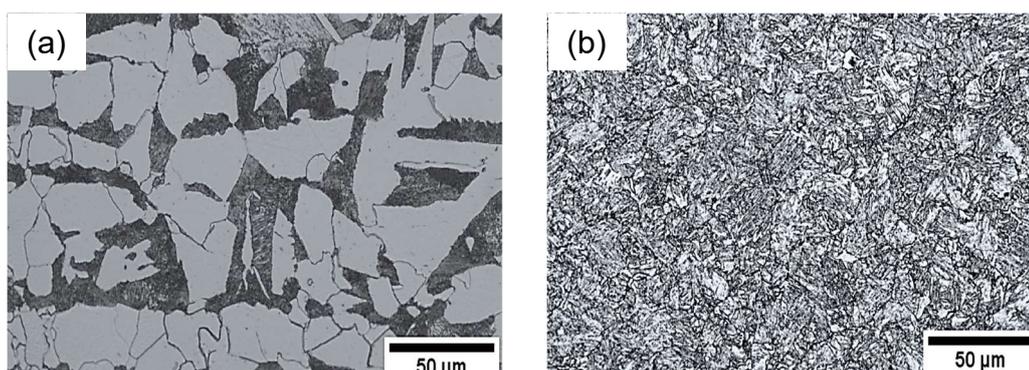
aplicação em altas temperaturas e pressão foram desenvolvidas e exposta a teste de fluência sob condição de 700 °C a 150 MPa. A adição de pequena quantidade de elementos reativos como W, Nb, Zr e Sc, foi realizada. A otimização da composição química permitiu a melhora da resistência à fluência, garantindo uma vida a ruptura sob fluência de 750 horas (HAMDANI, 2018).

Quando os aços são submetidos a altas temperaturas, estão sujeitos aos vários tipos de mecanismo de falha, como citado anteriormente, os elementos que sobressaíram para inibição destes, são as ligas de Ni-Cr. Em pesquisas mais recentes, outros elementos estão tendo resultados satisfatórios na aplicação em condições de altas temperaturas.

3.4 Efeito da Temperatura nas Propriedades Mecânicas e Metalúrgicas dos Aços de Baixa Liga

Aços estruturais exibem baixa resistência a alta temperatura devido à perda mais rápida de propriedades de resistência e rigidez e também devido ao rápido aumento das temperaturas resultantes da alta condutividade térmica (KONDUR *et al* 2015). As propriedades mecânicas e metalúrgicas sobre efeito das temperaturas, podem ser assimiladas aos processos de tratamento térmico, as vezes exigidos para melhora dessas, via modificação da microestrutura dos aços (LIU *et al* 2016; BARBOSA *et al* 2012). As propriedades mecânicas e metalúrgicas de uma solda em aço baixa liga, submetidas a tratamentos térmicos pós-soldagem nas temperaturas 920 °C e 600 °C, simulando o pós-aquecimento da montagem de uma tubulação em campo. Ao submeter as amostras nos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, observou o efeito da temperatura de 920 °C na microestrutura, exibido na Figura 05 (ARAÚJO *et al* 2015).

Figura 05: Metalografia Aço Baixa Liga Antes e Após Tratamento Térmico

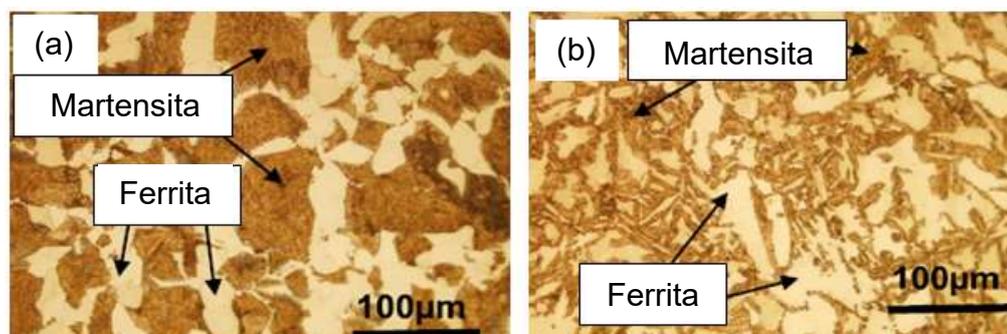


Fonte: Adaptada Araújo, 2015

A Figura 05 (a) mostra a microestrutura do metal como recebido, uma estrutura com grãos maiores, a Figura 05 (b) mostra a microestrutura após tratamento térmico, observa-se que os tratamentos térmicos aplicados promoveram significativo refino de grão na estrutura do aço, ambas imagens com aumento de 500x (ARAÚJO *et al* 2015).

Aquecendo um aço SA – 516 de microestrutura inicial composta de Ferrita / Perlita a temperatura de 1100 °C, seguido de dois ciclos de tratamento térmico de recozimento com a temperatura de 750 °C por 30 min, seguido de um resfriando em água até a temperatura ambiente, consegue-se uma microestrutura final composta de Ferrita / Martensita com duas morfologias de Martensita distinta, exibida na Figura 06 (SHAHZAD *et al* 2018).

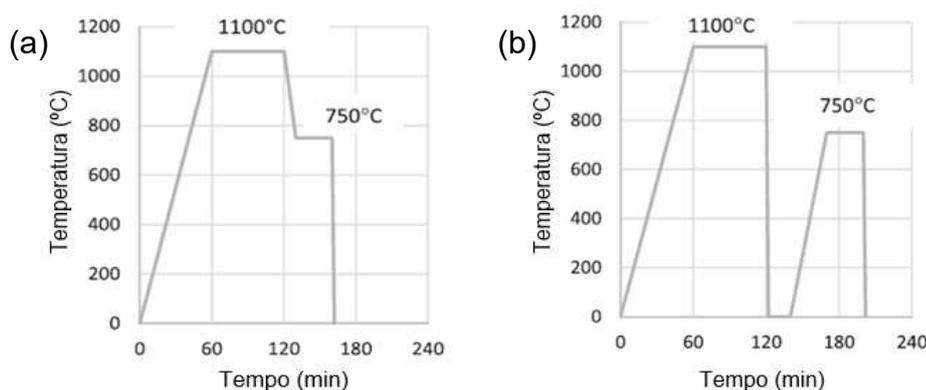
Figura 06: Metalografia Aço Baixa Liga, Diferentes Tipos de Martensita



Fonte: Adaptada Shahzad, 2018

A Figura 06 (a) mostra uma das morfologia consiste de ilhas de Martensita formando um aglomerado da estrutura circundado de Ferrita e na Figura 06 (b) mostra a outra morfologia, onde se vê fibras de Martensita incorporadas em uma matriz ferrítica, Tais morfologias foram encontradas com os ciclos de tratamento térmico de recozimento, mostrado na Figura 07 (SHAHZAD *et al* 2018).

Figura 07: Ciclos do Tratamento Térmico para Obter as Morfologias da Martensita



Fonte: Adaptada Shahzad, 2018

A Figura 07 (a) mostra o ciclo do tratamento térmico utilizado para obter a microestrutura de Martensita aglomerada, já a Figura 07 (b) mostra o ciclo utilizado para obter a microestrutura de Martensita em fibras. Quando a austenita é recozida, há nucleação de grãos de Ferrita nos contornos de grão da austenita que crescem por coalescência a austenita remanescente na têmpera forma a Martensita e ou ilhas de Martensita que são principalmente cercadas por Ferrita (SHAHZAD *et al* 2018; AHMAD *et al* 2012).

Após utilizar o procedimento de solda por fricção em aço SA – 516 Gr 70, foi avaliado algumas propriedades, sobre a microestrutura na zona afetada pelo calor (ZAC) foram observados grãos de Ferrita equiaxiais e pequenas colônias de Perlita, com grãos consideravelmente refinados, devido a transformação parcial da austenita dentro da região de temperatura intercristica, entre A1 e A3, o material esteve exposto a essa região por tempo insuficiente para transformação completa da austenita, conduzindo a formação de finas colônias de Perlita na Ferrita, durante o resfriamento (LIM *et al* 2016).

Shahzad *et al* (2018) avaliaram as propriedades mecânicas no aço SA – 516, após os procedimentos, os valores da microdureza nas duas morfologias de martensita encontrada em sua pesquisa é mostrado na Tabela 04.

Tabela 04: Microdureza das Fases Contidas nas Duas Morfologias da Martensita

Fases	Martensita
Martensita aglomerada	552 HV
Martensita em fibras	485 HV

Fonte: Adaptada Shahzad, 2018

A microdureza Vickers das ilhas de Martensita aglomerada é um pouco maior do que a Martensita em fibras, o mesmo, é o caso da fase de Ferrita em ambas as morfologias. Maiores valores de microdureza foram encontrados na ZAC, devido ao refino de grão e da mudança da microestrutura, conseqüentemente, melhorando a propriedade mecânica comparada ao do metal base (LIM *et al* 2016).

Ao verificar a influência da alta temperatura em aço baixa liga na resistência ao mecanismo de fluência. Um conjunto de testes de fluência foram realizados em vários níveis de tensão na faixa de 400 a 800 °C, que é a faixa de temperatura comumente encontrada em estruturas exposta a altas temperaturas, os resultados mostraram que

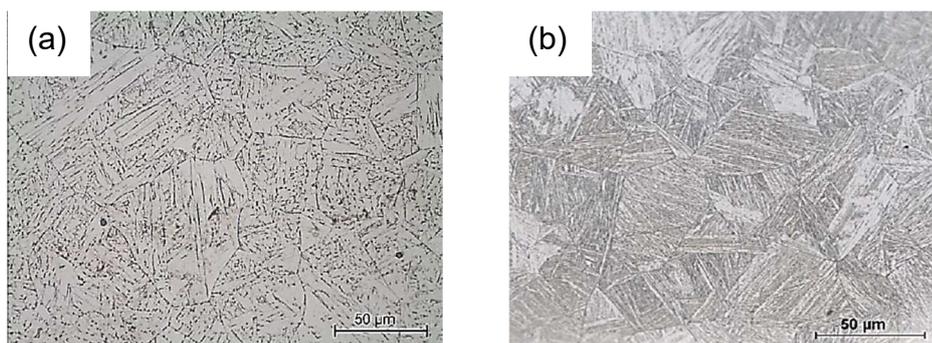
a temperatura influenciou diretamente a deformação por fluência para o aço ASTM A572, especialmente após 550 °C, conforme a temperatura aumenta o nível de tensão decresce, deformação podem aumentar rapidamente ao ultrapassar 800 °C mesmo para níveis baixos de tensão de cerca de 10 a 15% da tensão feito nas amostras em temperatura ambiente (KONDUR *et al* 2014).

3.5 Taxa de Resfriamento nos Aços Utilizados em Caldeiras

Como dito anteriormente o processo de fadiga térmica é semelhante aos processo de soldagem e tratamento térmico, essa analogia permite avaliar o efeito da taxa de resfriamento em alguns aços, especificamente aqueles aplicados em caldeiras e vasos de pressão. A literatura avaliou o efeito das diferentes taxas de resfriamento nas propriedades de diferentes aços utilizados em caldeiras de baixa, média e alta pressão. Através dos diagramas TTT - CCT é possível estimar a presença de uma dada fase e determinar a microestrutura, através do controle da velocidade de resfriamento (SANTOS, 2013). Com o auxílio do diagrama CCT foi possível avaliar a influência do teor de elementos de liga, alterando a porcentagem do carbono equivalente, nas transformações de fases no aço micro - ligados (ZHANG *et al* 2006).

Segundo Moojen (2014) “As diferenças nas taxas de resfriamento, bem como o tempo de permanência em altas temperaturas podem causar mudanças microestruturais significativas.” O resfriamento rápido tem influência nas propriedades mecânicas do aço ASTM SA - 516 Gr 70, verificou-se redução do tamanho de grão ferrítico, com possível formação de Bainita e aumento de dureza no aço (BARBOSA, 2007). O resfriamento rápido otimiza as propriedades mecânicas (KONG, 2015). Ao submeter um aço de microestrutura composta de Ferrita e Perlita a diferentes taxas de resfriamento, observou a microestrutura deste material mostrada na Figura 08.

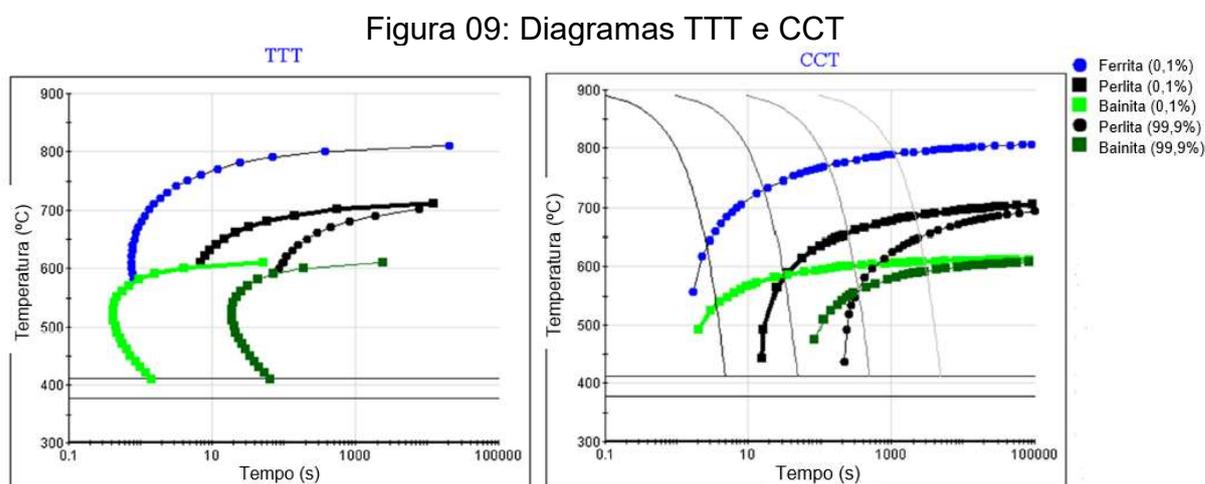
Figura 08: Microestrutura de Diferentes Taxas de Resfriamento



Fonte: Adaptada Santos, 2013

Para taxas de resfriamento entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ e $-400\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, nota-se que sua microestrutura foi alterada, a Figura 08 (a) mostra uma microestrutura constituída por Ferrita fina, começando a sugerir uma estrutura bainítica, e por Ferrita Widmanstätten, esta, com taxa de resfriamento de $-20\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, para taxa de $-400\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ em sua microestrutura revelam uma matriz martensítica, onde se podem observar as agulhas finas características desta estrutura, conforme Figura 08 (b), a Martensita muito provavelmente será auto - revenida, porque formou-se a temperaturas altas, possibilitando um revenido parcial na continuação do resfriamento (SANTOS, 2013).

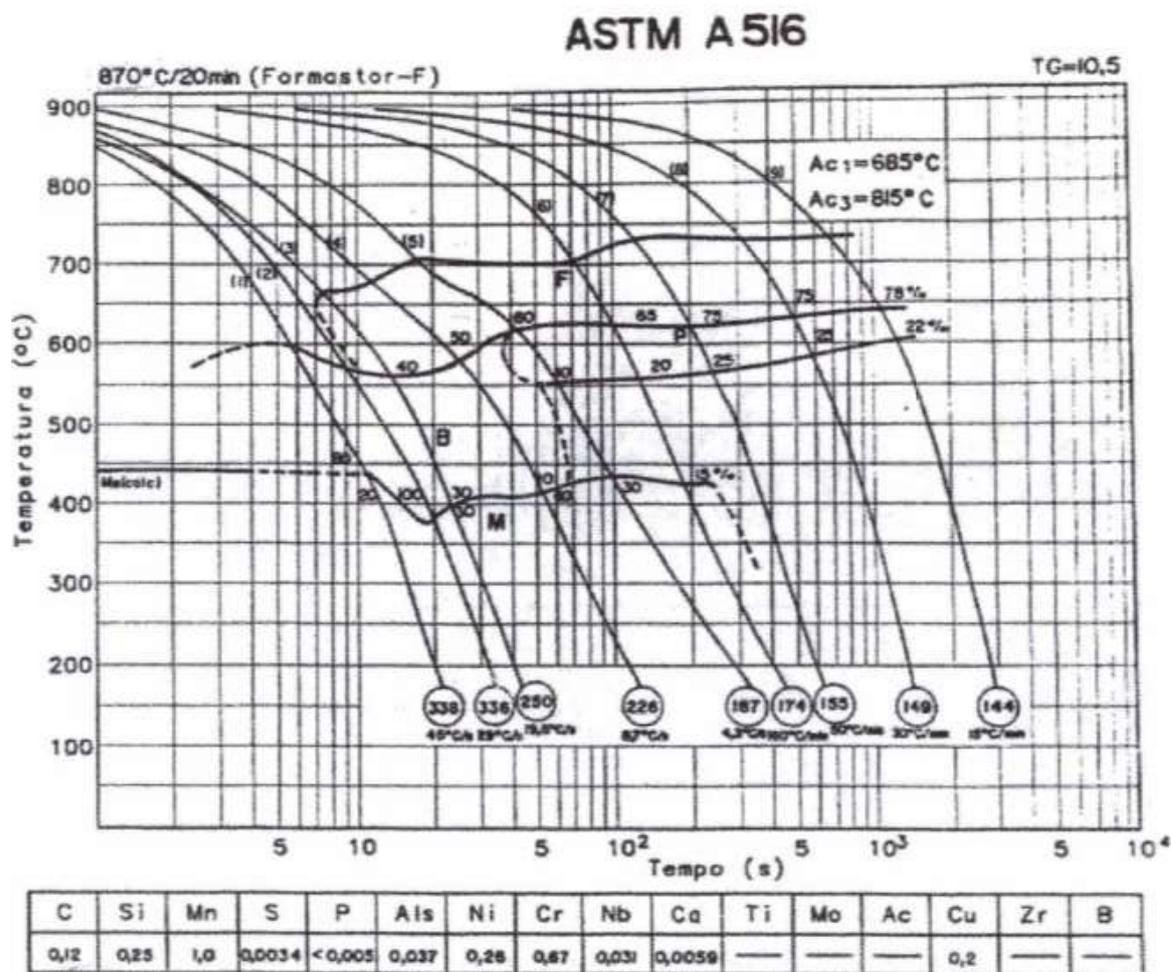
Para aços com baixo teor de elementos de liga, conseqüentemente seu carbono equivalente é menor, com a taxa de resfriamento menor, mais Ferrita e Bainita são formadas. Com o aumento de carbono equivalente, tem como causa o aumento do montante de Martensita na sua microestrutura, para uma alta taxa de resfriamento (ZHANG *et al* 2006). Na análise de falhas de um tubo rompido cuja Ferrita e Perlita compõe sua microestrutura, este, parte de uma caldeira, identificou as fases presentes nesta área do tubo composta de Bainita devido a rápida taxa de resfriamento, maior que $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, atribuída ao escape da mistura água / vapor na parte danificada, a identificação dessa fase teve o auxílio dos diagramas TTT e CCT, mostrado na Figura 09 (MUNDA, 2018).



A Figura 09 mostra os diagramas plotados, para checar a formação da Bainita para a composição de liga do tubo, composto de 0,24% C, 0,79% Mn e 0,21% Si (MUNDA, 2018).

A taxa de resfriamento rápido supõe que há formação de Bainita. Esta microestrutura é típica de aços que sofreram altas taxas de resfriamento a partir da temperatura de austenitização. Caracteriza-se por ser uma estrutura formada por cementita (Fe_3C) e Ferrita deformada (BARBOSA, 2007). A Figura 10 mostra a curva CCT para o aço ASTM SA – 516 Gr 60.

Figura 10: Curva CCT para o aço ASTM A 516 grau 60



Fonte: Adaptada Ribeiro, 2001

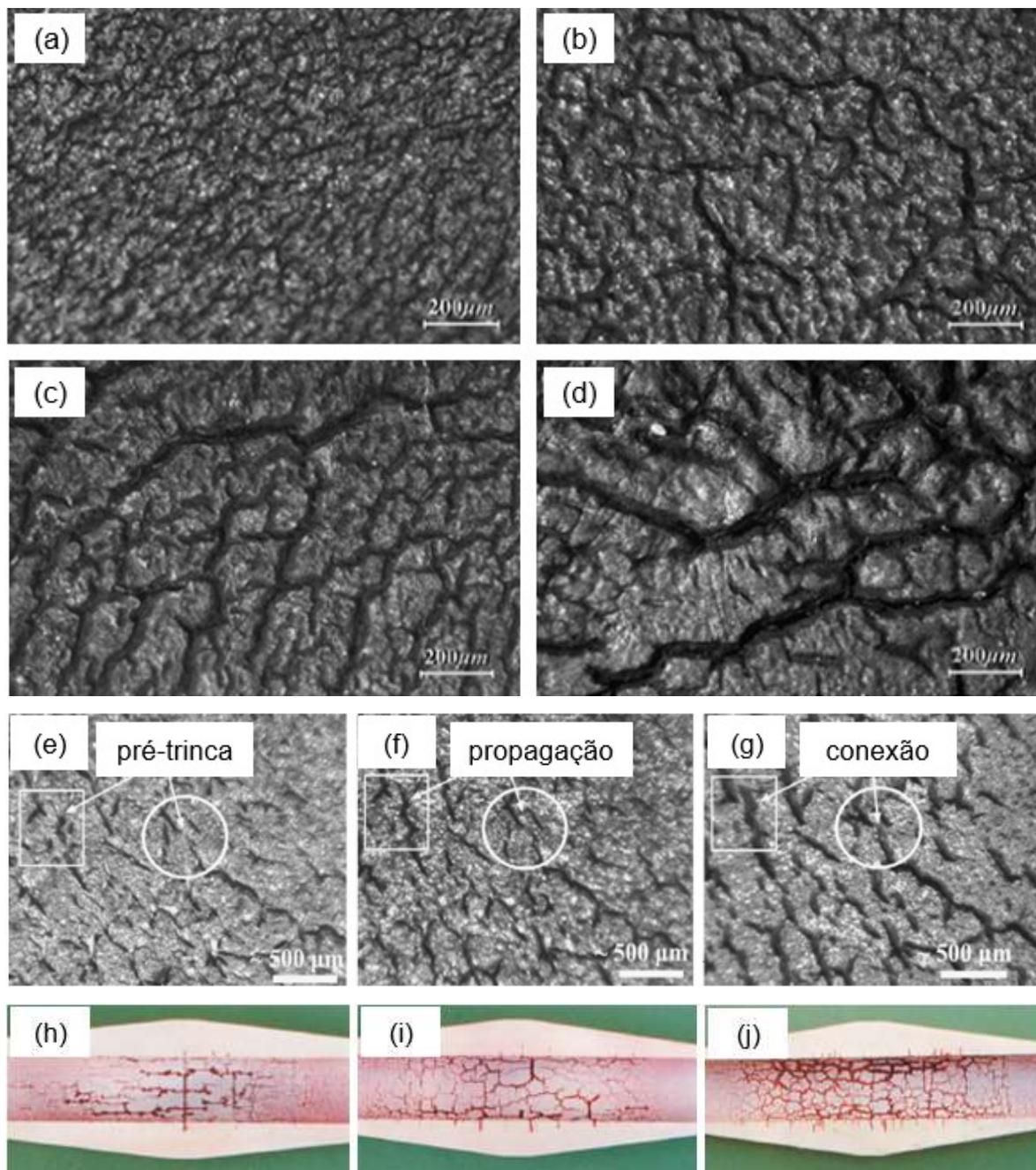
Ao observar o diagrama CCT dos aços ASTM A 516, onde ocorrem altas velocidades de resfriamento para variação de temperatura entre 800 °C e 500 °C em um tempo menor que 9,0 segundos, podem-se formar estruturas com dureza superior (RIBEIRO, 2001). A dureza aumenta de acordo que a taxa de resfriamento aumenta (ZHANG *et al* 2006). Onde ocorreu resfriamento rápido encontra-se valores de microdureza Vickers de 377 ± 60 HV na fase Bainita e na fase Ferrita, os valores é de 210 ± 10 HV (MUNDA, 2018). Para valores de resfriamento de -400 °C/s e -20 °C/s encontrou microdureza 302 ± 7 HV e 226 ± 5 HV, respectivamente (SANTOS, 2013).

3.6 Efeito da Fadiga Térmica em Ligas Ferrosas

Fadiga térmica é um dos principais mecanismos de falha em máquinas que operam em altas temperaturas (QAYYUM, 2017 e NILSSON, 2016). Durante o ciclo de aquecimento e resfriamento levam à fadiga térmica onde flutuações de tensões mecânicas e térmicas iniciam finas fissuras na superfície que crescem e acabam levando à falha (MELLOULI *et al* 2014). Os gradientes de temperaturas são responsáveis pela formação de severos campos de tensões conduzindo a falha após um número relativamente baixo de ciclos (CASATI *et al* 2018). Quando uma estrutura está sujeita à fadiga térmica, normalmente múltiplas trincas iniciam e se propagam, havendo interações entre trincas vizinhas, com união das trincas e/ou relaxamento da tensão na extremidade da trinca, podendo aumentar e/ou diminuir o início da trinca e/ou taxa de propagação (ASAYAMA *et al* 2009). Júnior (2006) em sua tese de doutorado relata que fadiga térmica é provocada por condições de carregamento ocasionado falhas, essas são originadas deste tipo de carregamento que submete o componente a oscilações cíclicas de temperatura e que podem originar trincas ou redes de trincas.

Avaliando os efeitos macros da fadiga térmica na superfície de ligas em diferentes aplicações, alguns autores avaliaram a morfologia das trincas sob diferentes ciclos de fadiga térmica. Após 100, 800, 1500, 2000, e 3000 ciclos térmicos com temperaturas de 20 °C a 700 °C a morfologias das trincas foram avaliadas na superfície de um corpo de prova do aço AISI H13 (LI *et al* 2018). Trincas por fadiga térmica foram encontradas excessivamente na superfície, indicando baixa resistência à fadiga térmica da amostra do aço AISI H13. Depois que as amostras foram expostas para os ciclos térmicos de 3000 a 5000 ciclos com temperatura de aquecimento e resfriamento de 750 °C e 25 °C respectivamente, tanto a iniciação quanto a propagação das trincas foram encontradas, e as trincas cresceram linearmente e rapidamente (CONG *et al* 2014). Corpos de prova de aços inoxidáveis de tubulação que transporta sódio, submetida a ciclos de fadiga térmica, devido a variação de temperatura do fluido no interior da tubulação de configuração cônica, as temperaturas quente e fria do sódio usada para ciclagem térmica no ensaio foi 600 °C e 300 °C respectivamente, com número de ciclagem de 700, 1300 e 2000 ciclos (ASAYAMA *et al* 2009). A Figura 11 ilustra macroscopicamente a evolução da trinca na superfície em diferentes ciclos de fadiga térmica.

Figura 11: Morfologia Macroscópica das Trincas na Superfície Submetida a Fadiga Térmica

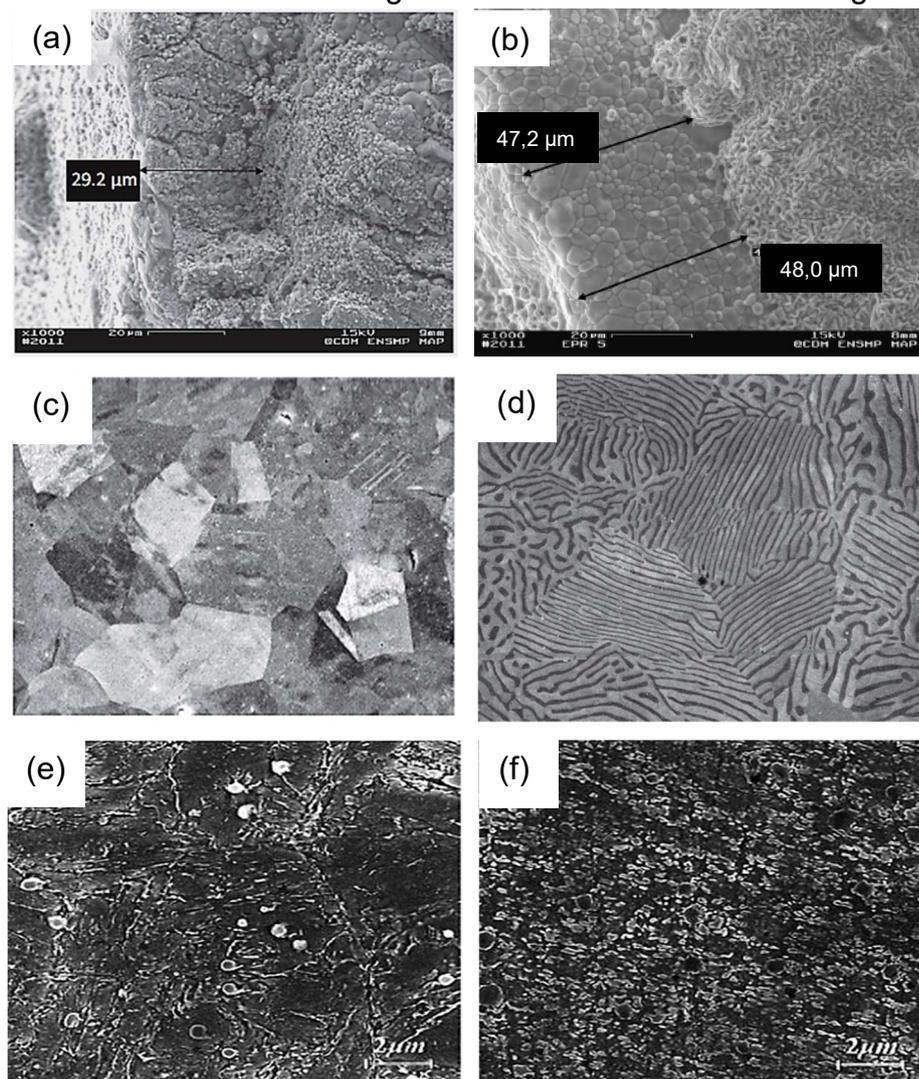


Fonte: Adaptada Li, 2018; Cong, 2014 e Asayama, 2009

A Figura 11 (a); (b); (c) e (d), mostra a superfície submetida a 800, 1500, 2000 e 3000 ciclos respectivamente (LI *et al* 2018). Já na Figura 11 (e) mostra pré-trincas na superfície do material, na Figura 11 (f) e (g), mostra a superfície submetida a 3000 e 5000 ciclos respectivamente (CONG *et al* 2014). A Figura 11 (h); (i) e (j), mostra a superfície interna do tubo submetida a 700, 1300, 2000 ciclos respectivamente (ASAYAMA *et al* 2009). Em todas pesquisas nota-se a interação entre trincas vizinhas.

A microestrutura do aço H13 após os ciclos de fadiga térmica, formaram uma fina camada de óxidos na superfície, não excedendo valores de 30 a 50 μm . A presença do Cr nesta liga contribuiu para a que a oxidação não fosse maior quando submetida a fadiga térmica (MELLOULI *et al* 2014). Uma liga de aço com alto teor de Mn onde a microestrutura inicial consiste de austenita e Perlita em grãos poligonais e equiaxiais, após os primeiros ciclos de fadiga térmica apresentou algumas ilhas de Perlita, conforme aumenta o número de ciclos colônias de Perlitas são formadas, após 75 ciclos sua microestrutura corresponde a uma estrutura perlítica (ROA *et al* 2016). A microestrutura martensítica de aço H13 é progressivamente envolvida por uma mistura de Ferritas e carbonetos conforme aumenta o número de ciclos de fadiga térmica, após 3000 ciclos a estrutura é completamente envolvida (LI *et al* 2018). A Figura 12 mostra o efeito da fadiga térmica nas microestruturas de ligas ferrosas.

Figura 12: Microestruturas da Ligas Ferrosas Submetidas a Fadiga Térmica

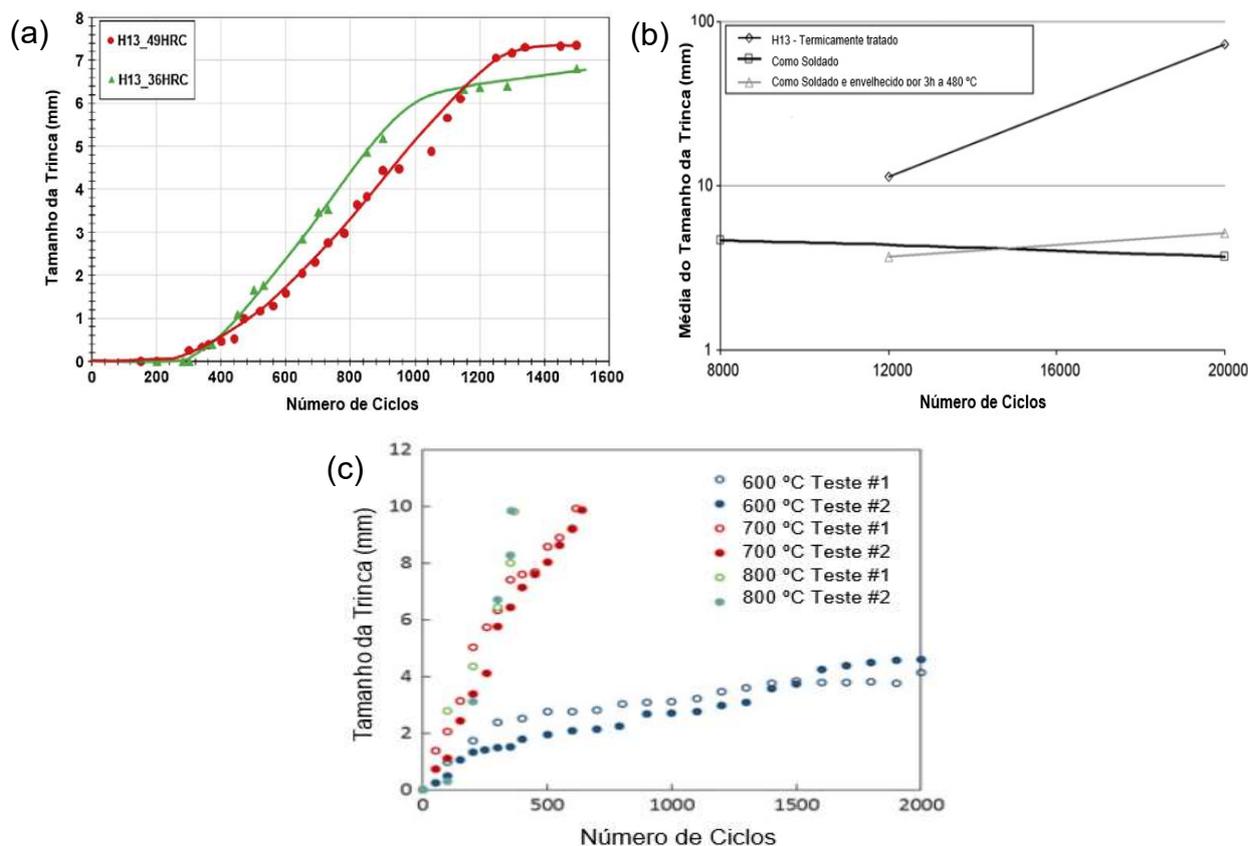


Fonte: Adaptada Mellouli, 2014; Roa, 2016 e Li, 2018

A Figura 12 (a) e (b) mostra as dimensões da camada de óxidos nos aços H13 (MELLOULI *et al* 2014). A Figura 12 (c) e (d) mostra a microestrutura do aço como recebido e após sofrer 75 ciclos de fadiga térmica, respectivamente, nota-se a predominância de Perlita (ROA *et al* 2016). Os primeiros carbonetos aparecem na microestrutura martensítica para 100 ciclos, após 3000 a microestrutura é modificada como mostra a Figura 12 (e) e (f) respectivamente (LI *et al* 2018).

Após as amostras serem submetidas a fadiga térmica a evolução das trincas foram observadas, onde se propagam conforme aumenta o número de ciclos (MELLOULI, 2014; JIA, 2015; LI, 2018; CASATI, 2018). O comprimento da trinca após ensaio de fadiga térmica em aços teve crescimentos rápidos conforme aumentava-se o ciclo, devido a descarbonetação da superfície (KLOBČAR *et al* 2008). A Figura 13 mostra graficamente a evolução das trincas em diferentes ciclos de fadiga térmica.

Figura 13: Evolução do Tamanho da Trinca x Número de Ciclos



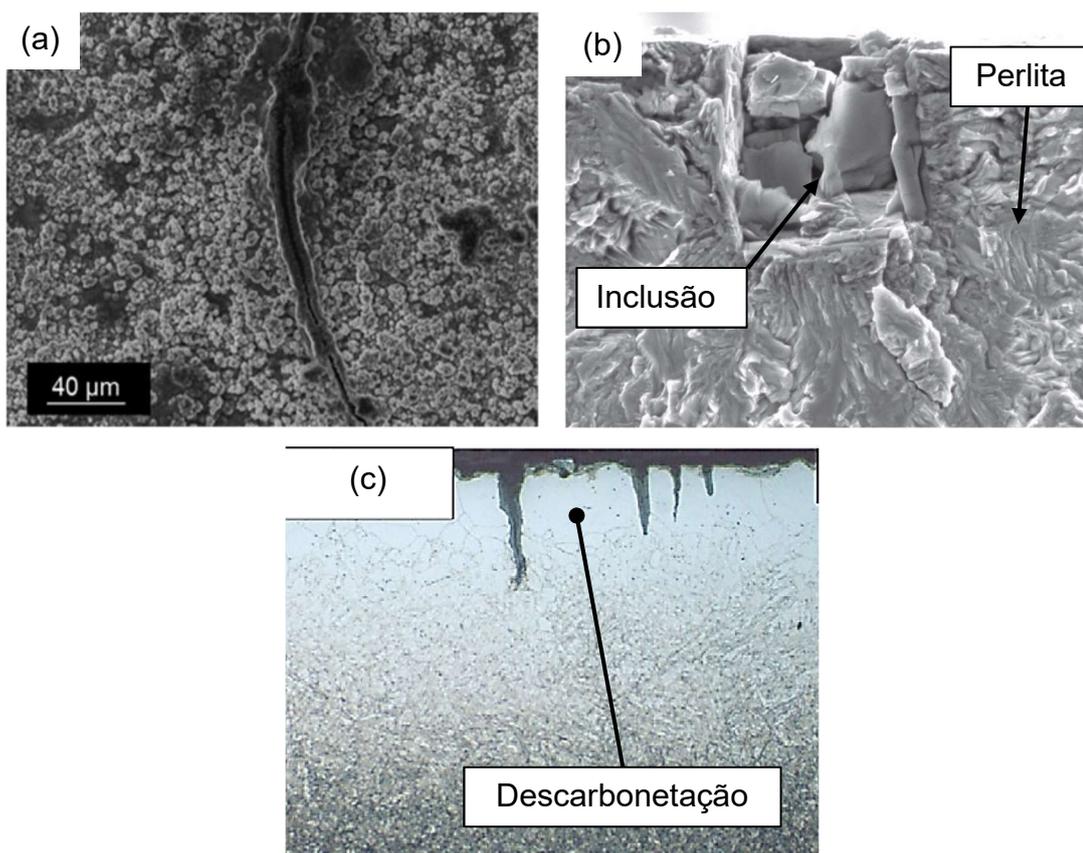
Fonte: Adaptada (a) Mellouli, 2014; (b) Klobčar, 2008 e (c) Casati, 2018

A Figura 13 (a) mostra a evolução da trinca em aços tratados termicamente em duas temperaturas distintas, identificado como H13-49 HRC e H13-36 HRC, estes avaliados após fadiga térmica (MELLOULI *et al* 2014), a Figura 13 (b) mostra o gráfico

plotado de evolução de trinca do aço tratado de três maneiras distintas submetidas a fadiga térmica (KLOBČAR *et al* 2008), a Figura 13 (c) mostra o desenvolvimento das trincas foram bem evoluídas em todas as temperaturas máximas investigadas (CASATI *et al* 2018).

Avaliando microscopicamente as falhas causadas por fadiga térmica, evidenciou-se uma propagação preferencial de trinca através dos flocos de grafite, para ferro fundido cinzento, mostrado na Figura 14 (a) (CASATI *et al* 2018). É importante ressaltar a presença de inclusões nas superfícies de fraturas (ROA *et al* 2016), a camada superficial da amostra e descarbonetada devido ao ensaio de fadiga térmica, região mostrada na Figura 14 (c) (KLOBČAR *et al* 2008).

Figura 14: Falhas Mostradas nas Microestruturas das Amostras Submetidas a Fadiga Térmica

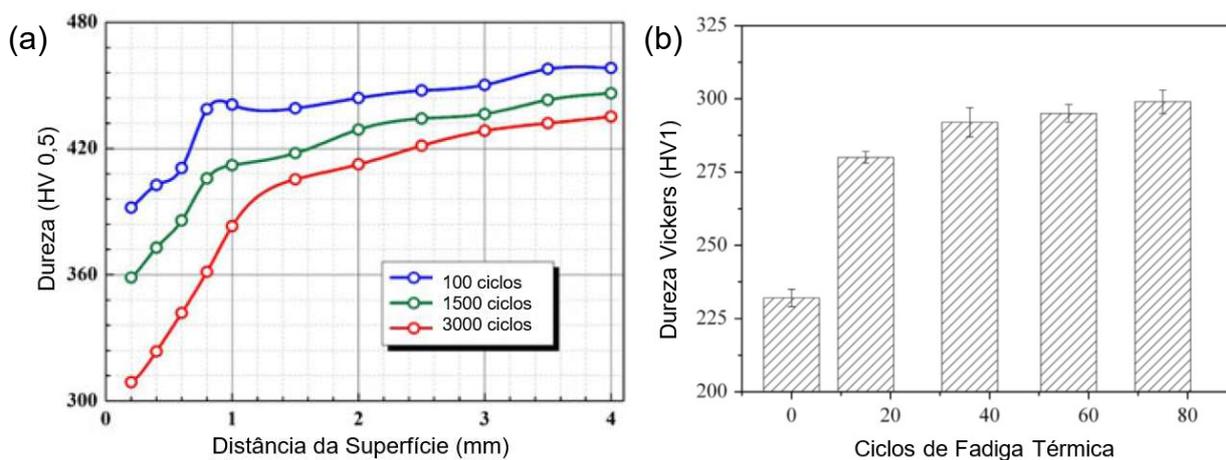


Fonte: Adaptada (a) Casati, 2018; (b) Roa, 2016 e (c) Klobčar, 2008

A Figura 14 (b) mostra em detalhe a inclusão, juntamente com as colônias de Perlita são as principais características microestruturais responsáveis pelo processo de falhas (ROA *et al* 2016).

Ao avaliar a microdureza em ligas ferrosas submetidas a fadiga térmica, onde um histograma foi plotado para um aço com alto teor de Mn (ROA *et al* 2016). Após vários ciclos de aquecimento e resfriamento a superfície da amostra sofreu um revenimento e mostra um fenômeno significativo de amolecimento. Comparando os perfis de dureza para diferentes ciclos de fadiga térmica no aço H13, um gráfico foi plotado (LI *et al* 2018). Gráficos exibidos na Figura 15.

Figura 15: Perfis de Microdureza Após Fadiga Térmica



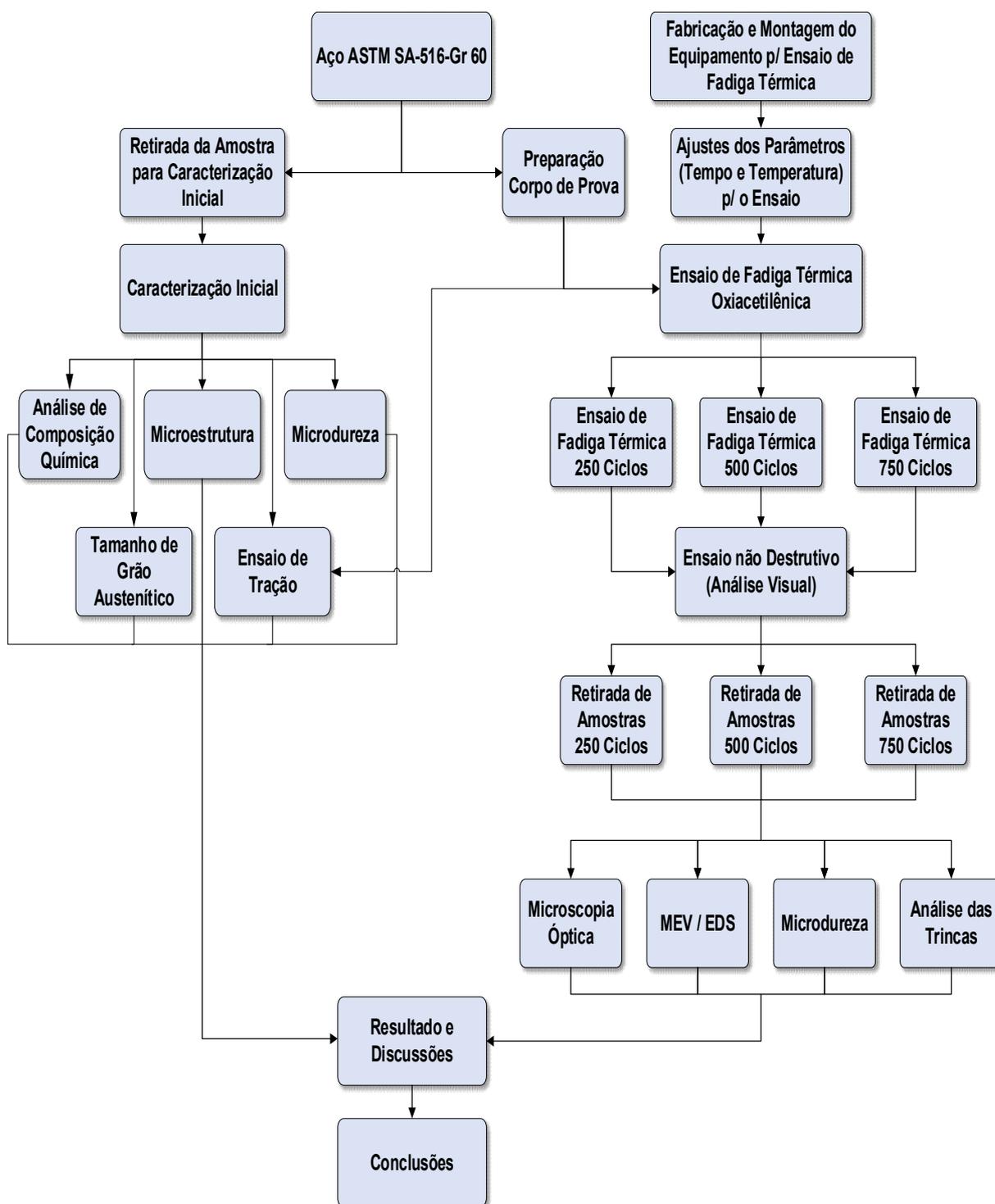
Fonte: Adaptada (a) Li, 2018 e (b) Roa, 2016

A Figura 15 (a) mostra claramente conforme à medida que o número de ciclos térmicos aumenta, a dureza da superfície da amostra diminui significativamente e a dureza no seu núcleo aumenta (LI *et al* 2018). Já a Figura 15 (b) mostra o acréscimo da microdureza Vickers conforme aumenta o ciclo de fadiga térmica (ROA *et al* 2016).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 16 apresenta o organograma da metodologia do projeto que direcionará a sequência dos trabalhos a serem executados durante a pesquisa.

Figura 16: Organograma da Metodologia do Projeto



Fonte: Próprio Autor

Para realização do trabalho foi utilizado o aço ASTM SA – 516 Gr 60, produzido pelas Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A. (USIMINAS), porém o material foi fornecido pela fabricante de caldeiras Steammaster Indústria de Caldeiras, situada na cidade de Varginha – MG, que utiliza este material para fabricação de vasos de pressão e caldeiras. Foram fornecidos em forma de barras chatas com dimensões de 6.3 mm x 50 mm x 250 mm com composição química mostrada na Tabela 05 e conforme certificado emitido pela fabricante do aço, ANEXO A.

Tabela 05: Composição Química do Aço ASTM SA – 516 Gr 60

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Al	Cu	Mo	Ceq
0,16	0,79	0,013	0,009	0,24	0,01	0,01	0,033	0,01	0,00	0,29

Fonte: Adaptada USIMINAS

A composição química do aço se encontra dentro dos valores de porcentagens nominais exigidos pela norma (ASME, 2004), conforme Tabela 02.

4.1 Preparação do Corpo de Prova

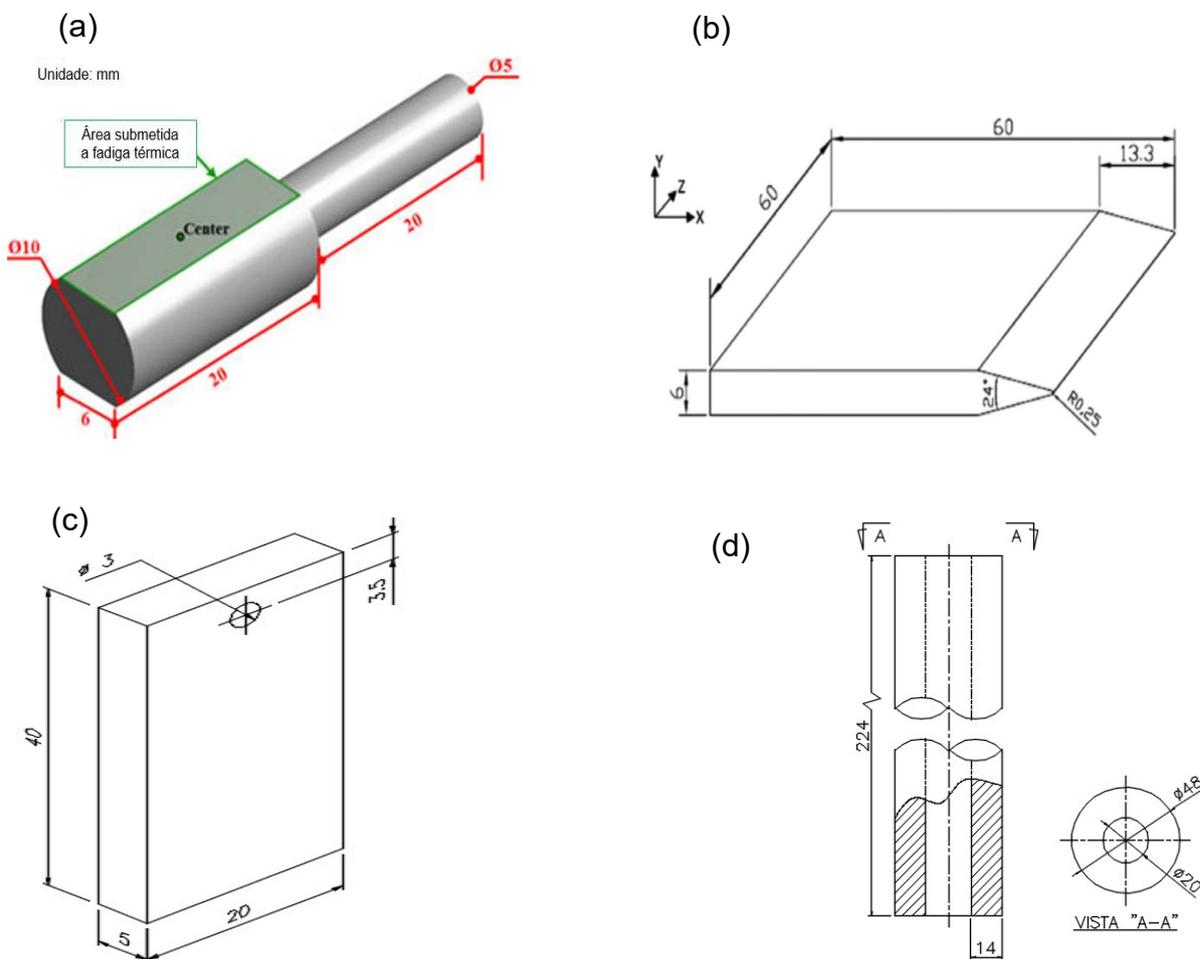
Para os ensaios de fadiga térmica houve a necessidade de desenvolver um corpo de prova que facilitava a agilidade e a eficiência do ensaio conforme recentes pesquisas, já para o ensaio de tração simples o corpo de prova foi teve como referência a norma NBR ISO 6892-1 (2013).

4.1.1 Corpo de Prova para Ensaio de Fadiga Térmica

O desenvolvimento do corpo de prova para o ensaio de fadiga térmica foi necessário um embasamento nas mais recentes pesquisas, onde os autores desenvolveram os corpos de prova conforme a necessidade do ensaio. Li *et al* (2018) utilizaram um corpo de prova para ensaio de fadiga térmica, cuja geometrias e dimensões é mostrado na Figura 17 (a). Um corpo de prova tipo cunha foi utilizado para investigar o efeito da fadiga térmica na ponta das pás de turbinas, como mostrado na Figura 17 (b) (QAYYUM, 2017 e MELLOULI, 2014). Outro tipo de corpo de prova foi utilizado para verificar a resistência a fadiga térmica de uma superfície preparada com revestimento a laser e com depósitos de ligas de Co e Fe, a geometria e dimensões do corpo de prova são mostrado na Figura 17 (c) (CONG *et al*, 2014). Para simular o efeito da fadiga térmica em tubulações utilizados em plantas de geração de

vapor foi utilizado um corpo de prova conforme geometria e dimensões, mostrado na Figura 17 (d) (NILSSON *et al*, 2016).

Figura 17: Geometria e Dimensões dos Corpos de Prova

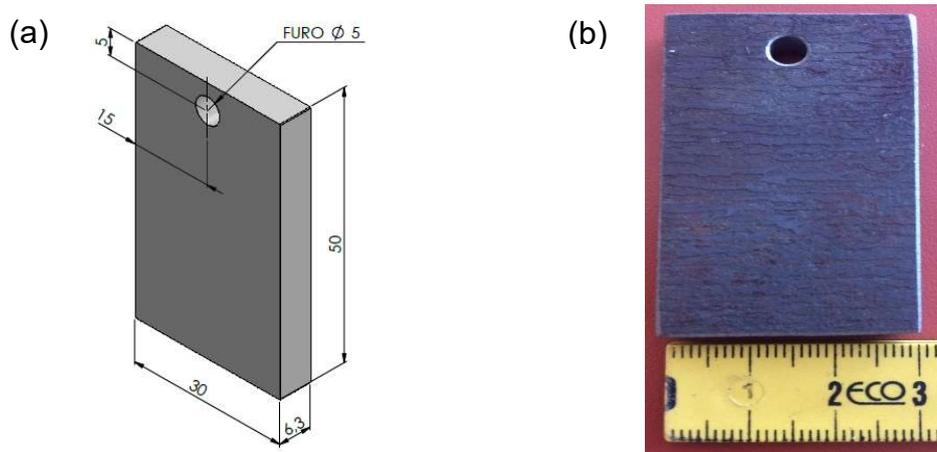


Fonte: (a) Adaptado Li, 2018; (b) Mellouli, 2014 e Qayyum, 2017; (c) Adaptado Cong 2014; (d) Adaptado Nilsson, 2016

A Figura 17 mostra as geometrias e dimensões em mm dos corpos de prova utilizado nas mais recentes pesquisas de materiais submetidos a fadiga térmica, de acordo com a necessidade da aplicação do material.

Para esta pesquisa o corpo de prova foi desenvolvido para atender às necessidades dos ensaios de fadiga térmica onde a superfície esteja exposta a tal condição, como o metal foi fornecido em barras chatas, se fez necessário o aproveitamento das dimensões. Entre os corpos de prova citado na literatura o que mais atendeu a necessidade da pesquisa foi o modelo utilizado por Cong *et al*, (2014), assim se desenvolveu um corpo de prova semelhante, mostrado na Figura 18.

Figura 18: Geometria e Dimensões dos Corpos de Prova da Pesquisa



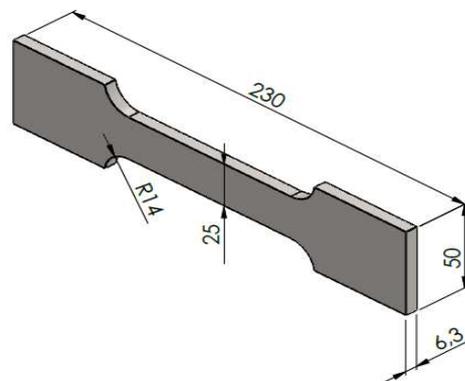
Fonte: Próprio Autor

A Figura 18 (a) mostra a geometria e dimensões em mm do corpo de prova esquemático e a Figura 18 (b) é o corpo de prova real, utilizado no presente trabalho, foram confeccionados 12 corpos de prova para o ensaio de fadiga térmica.

4.1.2 Corpo de Prova para Ensaio de Tração Simples

Como o ensaio de tração simples é um ensaio trivial e normalizado, as dimensões dos corpos de prova foram estabelecidas com base nas normas NBR ISO 6892-1 (2013), sendo um corpo de prova proporcional, aproveitando as dimensões do material como recebido, foram confeccionados três corpos de prova o ensaio conforme mostra Figura 19.

Figura 19: Corpo de Prova para Ensaio de Tração Simples



Fonte: Próprio Autor

A Figura 19 mostra um desenho esquemático da forma do corpo de prova com as respectivas dimensões em mm, que será utilizado para o ensaio de tração simples.

4.2 Caracterização Inicial

Um dos objetivos do trabalho é avaliar os aspectos metalúrgicos do aço submetido à fadiga térmica e comparar com uma amostra sem ser submetida a tal procedimento, para isso, foi retirada uma amostra do aço ASTM SA – 516 Gr 60 como recebido (CR) e realizado uma caracterização inicial deste material, que consiste em avaliar algumas propriedades como: composição química, microestrutura, microdureza Vickers e tamanho de grão austenítico, para caracterizar o metal pela resistência a tração, foi utilizado um corpo de prova conforme Figura 19.

4.2.1 Análise de Composição Química

Uma amostra foi retirada do material recebido, a superfície foi devidamente preparada com lixa ferro para que não houvesse irregularidades na superfície do aço, assim tornando a análise de composição química do aço ASTM SA – 516 Gr 60 mais eficiente e confiável, para a análise foi utilizando o espectrômetro de emissão ótica modelo Fondry-Master Pro, da marca Oxford Instruments.

4.2.2 Análise da Microestrutura

Após a análise de composição química foi utilizado a mesma amostra para efetuar a análise da microestrutura, foi retirado uma amostra, esta foi embutida a quente, sendo a seção transversal a face analisada, posteriormente efetuou-se o procedimento de lixa de granulometria aproximadas de 80, 120, 240, 320, 400, 500, 600 e 1000 grãos/cm² até a superfície da amostra estar adequada para o procedimento de polimento, utilizando como abrasivo a Alumina, após polir a amostra foi atacada quimicamente com reagente. Para análise da microestrutura a amostra foi atacada com Nital 3%, posteriormente obteve as imagens das microestruturas através de microscopia óptica, foi utilizado o microscópio óptico OLYMPUS GX 51S.

4.2.3 Ensaio de Microdureza

Uma amostra do material CR foi retirada e preparada para o ensaio de microdureza Vickers, o equipamento da marca Shimatzu, modelo HMV-2T, foi utilizado. O ensaio foi realizado com uma carga de 0,2 kg e com o tempo de 10 segundos para cada indentação. Nas seções transversal e longitudinal da amostra foi

efetuado 30 pontos, dividido em três colunas de 10 pontos, partindo da superfície da amostra até o núcleo, onde o primeiro ponto foi marcado a 0,15 mm da superfície e os demais pontos com espaçamento de 0,3 mm entre os mesmos até o núcleo, conforme Tabela 06.

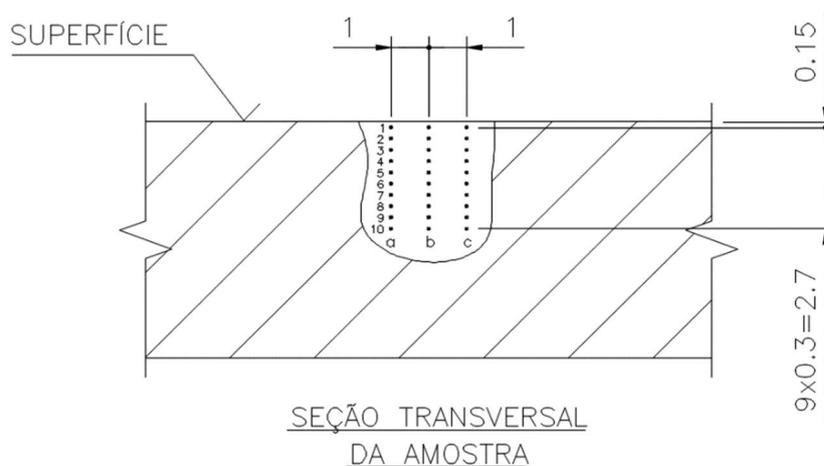
Tabela 06: Medidas dos Espaçamentos na Amostra para Ensaio de Microdureza

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pontos	(a)									
	(b)									
	(c)									
Medidas (mm)	0,15	0,45	0,75	1,05	1,35	1,65	1,95	2,25	2,55	2,85

Fonte: Próprio Autor

A Tabela 06 mostra de forma detalhada os pontos e as medidas do espaçamento utilizados para o ensaio de microdureza Vickers nas seções transversal e longitudinal. Um desenho para ilustrar como foram feitas as indentações é mostrado na Figura 20.

Figura 20: Desenho Esquemático da Localização dos Pontos na Amostra



Fonte: Próprio Autor

A Figura 20 mostra um desenho esquemático da seção transversal da amostra com os respectivos pontos e medidas em mm, onde foram efetuados o ensaio de microdureza, os mesmos critérios foram efetuados na seção longitudinal da amostra.

4.2.4 Tamanho de Grão Austenítico

Para análise de tamanho de grão austenítico, em uma amostra embutida foi efetuado mesmo procedimento de lixa e polimento utilizado para obtenção das propriedades citadas nos tópicos anteriores, porém, o ataque químico foi realizado com o reagente composto de água destilada, detergente neutro e ácido pícrico. A amostra preparada ficou submersa no reagente por uma hora. Dos diversos procedimentos utilizados para obtenção do tamanho de grão, o método utilizado neste trabalho foi o de contagem de grão, com o auxílio do com o *software Image J*, através da análise de imagens. Conforme a norma ASTM E112-13 (2014) pode-se determinar o tamanho de grão ASTM com o método do interceptos, onde são contados os números de intercessões dos contornos dos grãos com a linha traçada na imagem.

4.2.5 Ensaio de Tração

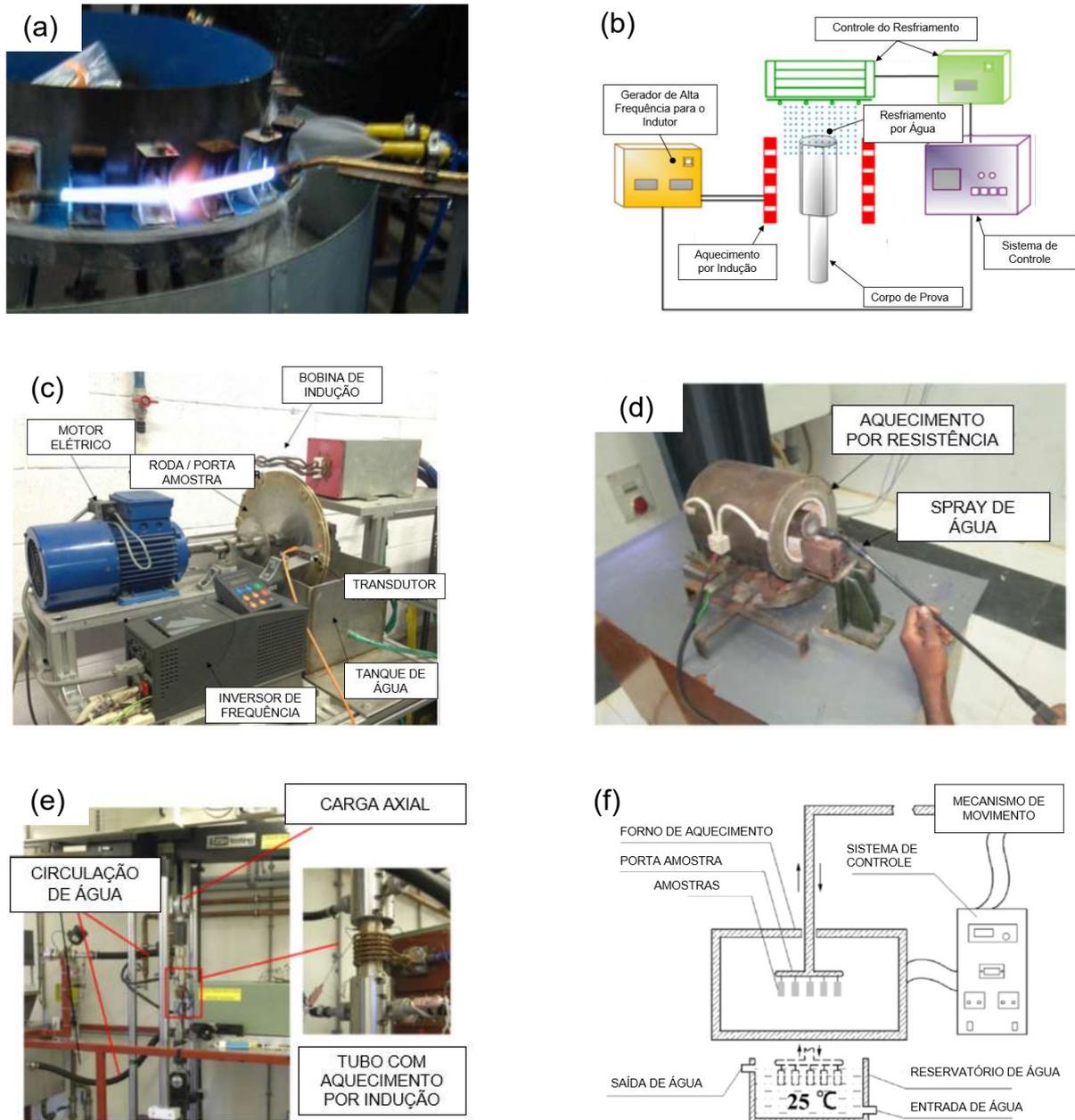
O ensaio de tração simples tem por finalidade caracterizar o material na resistência a tração, uma das propriedades que diferencia a especificação do aço estudado, assim, os resultados obtidos com a realização do ensaio, acresce dados relevantes para caracterização do aço estudado. O equipamento utilizado para os ensaios de tração simples é o da marca Instron, modelo Emic DL20000, de capacidade máxima de 200 kN, ensaio realizado no laboratório de ensaios mecânicos do curso de edificações no IFSUL campus Pelotas - RS.

4.3 Fabricação e Montagem do Equipamento para Ensaio

Para o desenvolvimento do projeto do equipamento para o ensaio de fadiga térmica foi necessária uma sustentação no estado da arte. Brandim *et al* (2009) desenvolveram um equipamento para realizar ensaios de fadiga térmica com o princípio de funcionamento que consiste em aquecimento por chama e resfriamento por água, mostrado na Figura 21 (a). Outros modelos de equipamentos foram encontrados nas pesquisas em artigos referentes a fadiga térmica, o aquecimento por indução e resfriamento por água foram utilizadas em pesquisas recentes, mostrado na Figura 21 (b) e (c) (LI *et al*, 2018; CASATI *et al*, 2018). Aquecimentos em fornos de resistência elétrica e resfriamento por água foram utilizados em outros trabalhos, mostrado na Figura 21 (d) e (e) (CONG *et al*, 2014; VETRISSELVAN *et al*, 2018). Nilson *et al* (2016) em seu ensaio de fadiga térmica aqueceu o corpo de prova externamente

por indução com circulação de água constante no interior do mesmo, além de aplicar uma carga axial, equipamento mostrado na Figura 21 (f).

Figura 21: Equipamentos de Fadiga Térmica



Fonte: (a) Brandim, 2009 (b) Adaptado Li, 2018; (c) Adaptado Casati 2018

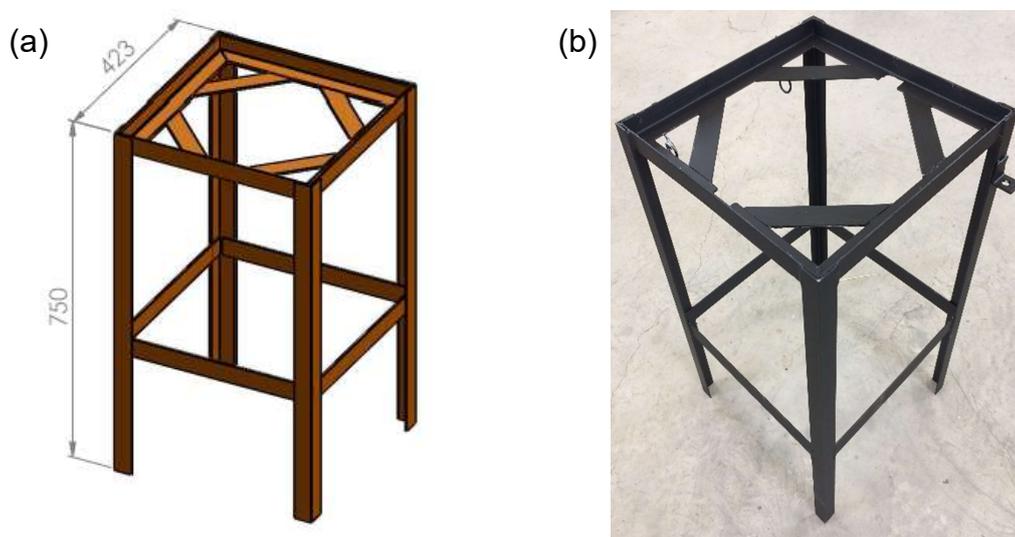
(d) Adaptado Vetriselvan 2014; (e) Adaptado Nilsson, 2016; (f) Adaptado Cong 2014

A Figura 21 mostra os equipamentos de fadiga térmica nos mais recentes trabalhos, a Figura 21 (b) e (f) mostra um desenho esquemático dos equipamentos de fadiga térmica utilizados nas pesquisas de seus autores.

A fabricação do próprio equipamento para ensaio de fadiga térmica utilizado no presente trabalho teve como base o modelo utilizado por Brandim *et al* (2009). O equipamento para ensaio de fadiga térmica teve início com o projeto de modelamento e detalhamento dos desenhos para a fabricação utilizando o *software SolidWorks*, versão 2017. Um desenho técnico com vistas ortogonais e isométricas mostra o conjunto com algumas principais dimensões em mm e detalhes necessários para a fabricações do equipamento de fadiga térmica está contemplado no APÊNDICE 1. O equipamento é composto das seguintes partes: (A) Suporte; (B) Reservatório; (C) Conjunto motriz; (D) Mesa giratória; (E) Sistema de Aquecimento; (F) Sistema de Resfriamento; (G) Automação.

(A) Suporte: fabricado em barras de aço carbono tipo cantoneiras com dimensão de aba igual a 38.1 mm e espessura de 3.2 mm e barras chatas de mesmas dimensões, exibido na Figura 22, tem como função suportar outros componentes como reservatório e sistema de resfriamento.

Figura 22: Suporte do Equipamento de Fadiga Térmica

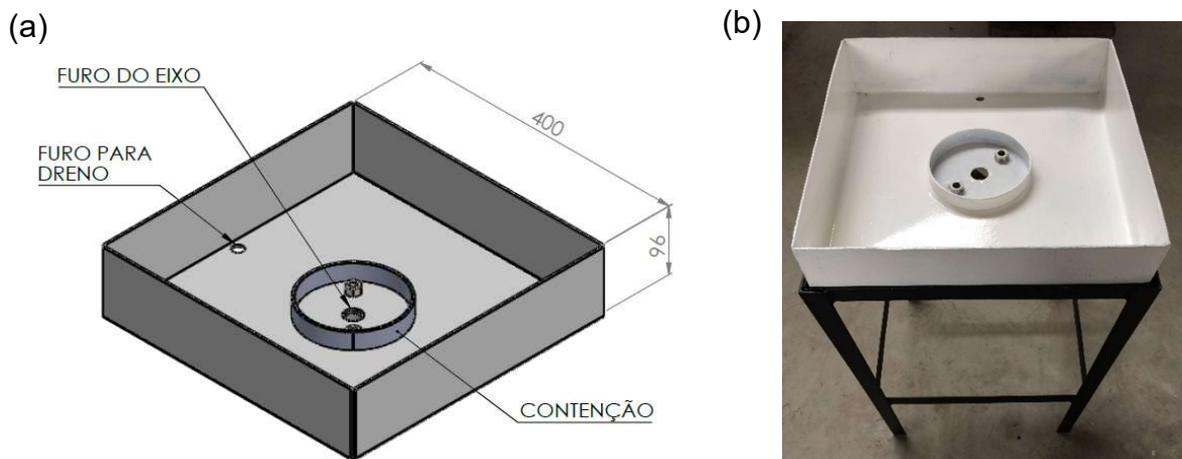


Fonte: Próprio Autor

A Figura 22 (a) mostra o desenho esquemático do suporte com algumas dimensões, todas em mm, já a Figura 22 (b) representa o suporte real, após a fabricação e pintura, alguns ajustes foram feitos durante a fabricação e montagem.

(B) Reservatório: fabricado em chapa de aço carbono com espessura de 3.2 mm, como mostra a Figura 23, além de coletar a água do sistema de resfriamento, tem ainda a função de fixar o motor de passo e mancal, onde o eixo é acoplado.

Figura 23: Reservatório do Equipamento de Fadiga Térmica

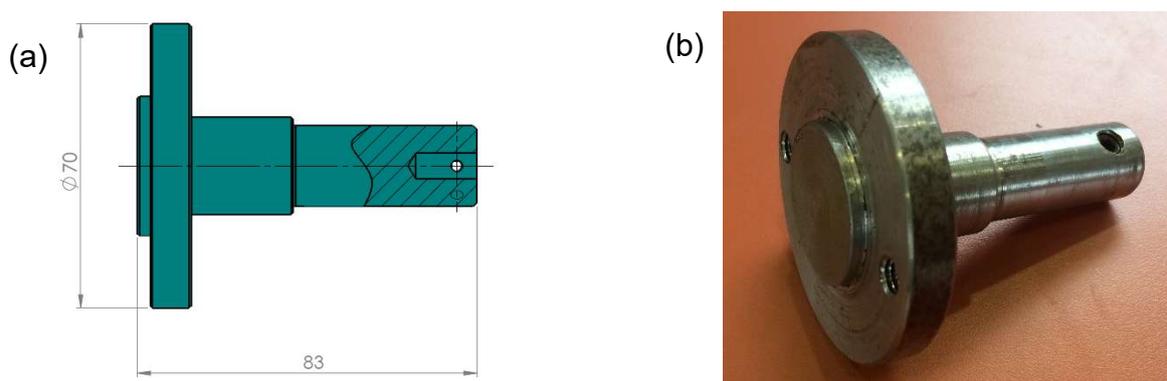


Fonte: Próprio Autor

A Figura 23 (a) mostra o desenho esquemático do reservatório com algumas dimensões, todas em mm, já a Figura 23 (b) representa o reservatório real, após a fabricação e pintura, já montado no suporte. A contenção tem por finalidade impedir que a água do sistema de resfriamento passe pelo furo do eixo e entre em contato com componentes eletrônicos, tal como o motor de passo.

(C) Conjunto Motriz: é composto por um eixo, este fabricado a partir de uma barra redonda de $\varnothing 76.2$ mm em aço carbono, utilizando o processo de usinagem através de um torno até atingir a forma do eixo projetado, conforme Figura 24.

Figura 24: Detalhe do Eixo do Equipamento de Fadiga Térmica

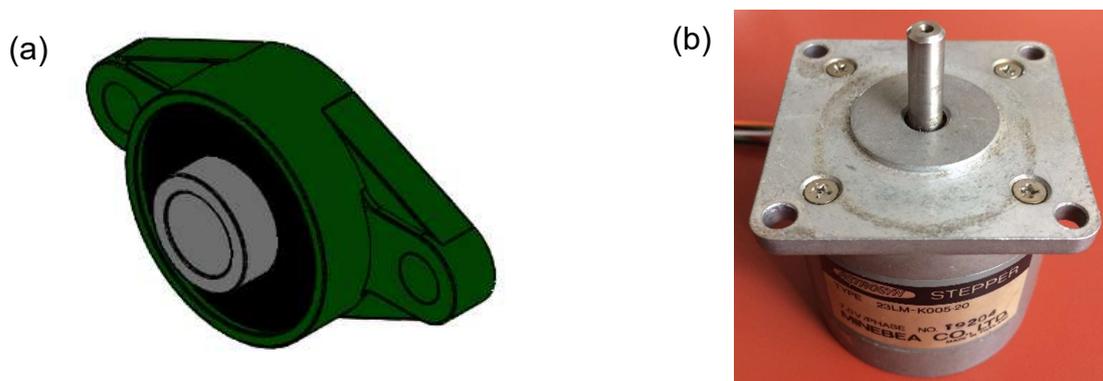


Fonte: Próprio Autor

A Figura 24 (a) mostra o detalhe esquemático do eixo com algumas dimensões, todas em mm, já a Figura 24 (b) mostra o eixo real após usinado, obedecendo o projeto. Ainda fazem parte do conjunto motriz um mancal com rolamento da série FL,

modelo FL205, para eixos de $\varnothing 25$ mm, a Figura 25 (a) mostra um desenho esquemático do mancal. Na Figura 25 (b) mostra um motor de passo da marca Astrosyn, modelo 23LM-K005-20 - 7,0 V (volts).

Figura 25: Mancal e Motor de Passo

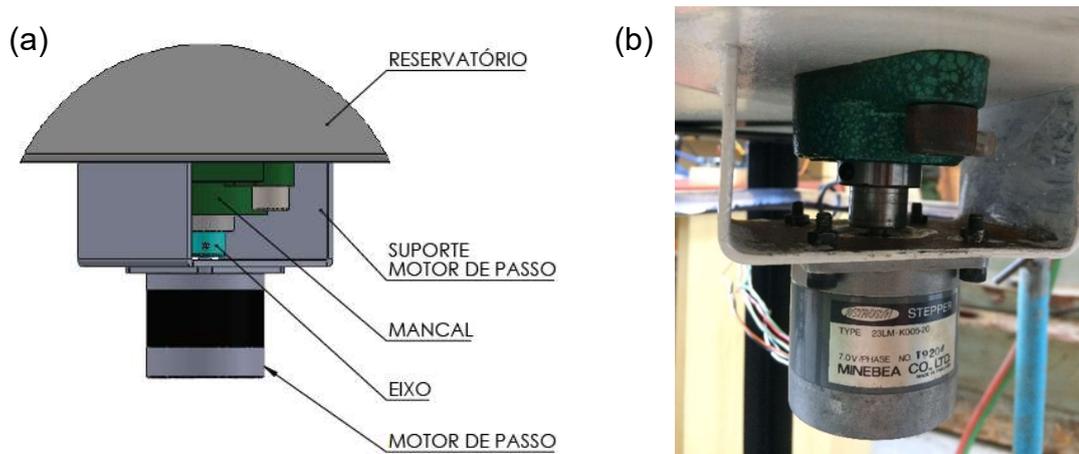


Fonte: Próprio Autor

A escolha do motor de passo se fez necessário pois permite o controle de velocidade e posicionamento mais precisos devido a sua rotação ser em ângulo. A importância destes critérios foi abordada no tópico 4.5.

A função do conjunto motriz é de transferir o sinal elétrico recebido pelo motor de passo e efetuar o movimento de rotação transferindo para o eixo, acoplado no motor e no mancal e conseqüentemente a mesa giratória, essa acoplada ao eixo.

Figura 26: Detalhe da Montagem do Conjunto Motriz

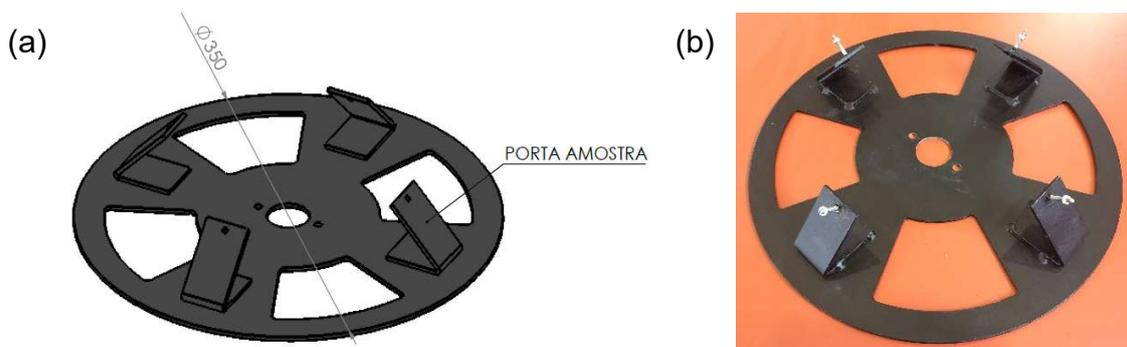


Fonte: Próprio Autor

A Figura 26 (a) mostra o detalhe esquemático da montagem do conjunto motriz no reservatório e a Figura 26 (b) mostra o mesmo detalhe no real.

(D) Mesa Giratória: fabricado em chapa de aço carbono com espessura de 3.2 mm, componente exibido na Figura 27, este é fixado ao eixo através de parafusos, tem a função de receber os CP para o ensaio de fadiga térmica.

Figura 27: Detalhe da Mesa Giratória



Fonte: Próprio Autor

A Figura 27 (a) mostra o desenho esquemático da mesa giratória com o porta amostra e a dimensão do diâmetro da mesa, em mm, já a Figura 27 (b) representa a mesa real, após a fabricação e pintura, alguns ajustes foram feitos durante a fabricação e montagem.

(E) Sistema de Aquecimento: o aquecimento dos CP foi através de chamas, utilizando como gases combustíveis Oxigênio e Acetileno, mangueiras, maçaricos e bicos, os tipos dos maçaricos utilizados foram os para solda modelo Soldox 201 S com bicos de número 6, utilizado para cada estação de aquecimento.

Figura 28: Detalhe do Sistema de Aquecimento

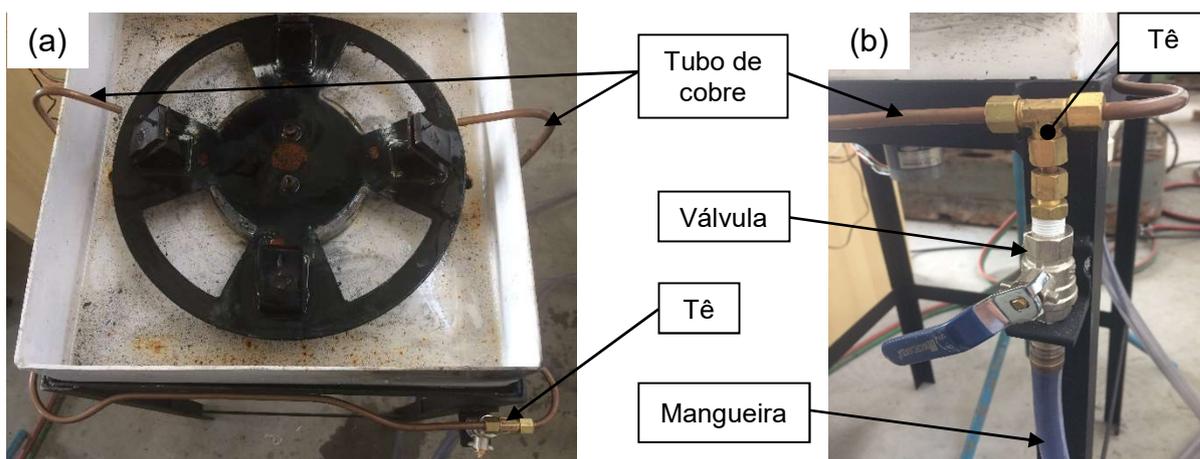


Fonte: Próprio Autor

A Figura 28 mostra em detalhe um dos conjuntos maçarico/bico que compõe o sistema de aquecimento, utilizado no ensaio de fadiga térmica.

(F) Sistema de Resfriamento: o resfriamento dos CP se fez através de água, utilizando uma mangueira conectada ao um ponto da rede de distribuição da instituição, uma válvula, uma conexão tipo “Tê”, cuja função, dividir a tubulação de tubos de cobre com \varnothing 6.35 mm, para cada estação de resfriamento.

Figura 29: Detalhe do Sistema de Resfriamento

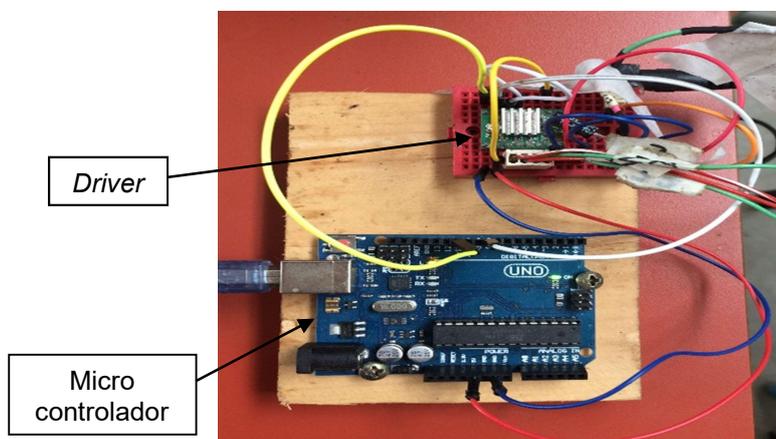


Fonte: Próprio Autor

A Figura 29 (a) mostra uma imagem superior do equipamento de fadiga térmica com a disposição dos tubos em 180 graus no equipamento para o resfriamento dos CP, a Figura 29 (b) mostra no detalhe a entrada de água através da mangueira e o “Tê”, ramificando os tubos para cada estação de resfriamento.

(G) Automação: utilizando o Arduino, uma plataforma de prototipagem de *hardware* e *software OPEN SOURCES*, ou seja, de código aberto. O objetivo do projeto foi criar uma plataforma básica de fácil acesso.

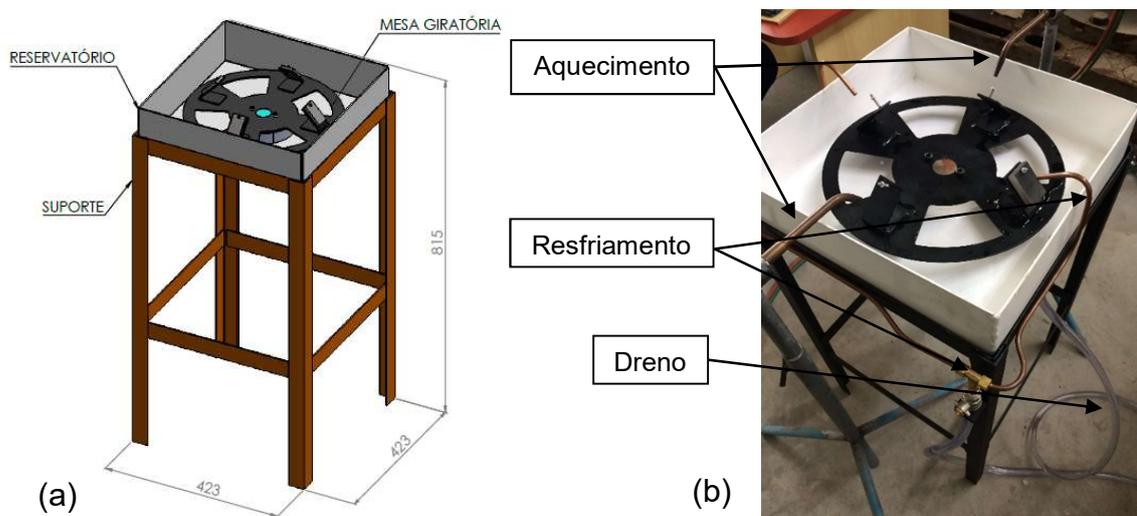
Figura 30: Detalhe dos *Hardwares* da Automação



Fonte: Próprio Autor

A Figura 30 mostra a plataforma de *hardware* Arduino UNO utilizada, que consiste em um microcontrolador AT Mega 328, com 14 portas de entrada e saída e interface USB para a programação e comunicação com computador e o *driver* modelo A 4988, qual a função foi controlar os pulsos para os polos do motor de passo. No APÊNDICE 2 mostra uma imagem da interface do *software* do Arduino, utilizado no projeto do equipamento de fadiga térmica. A Figura 31 mostra uma visão geral do equipamento para ensaio de fadiga térmica.

Figura 31: Visão Geral do Equipamento de Fadiga Térmica



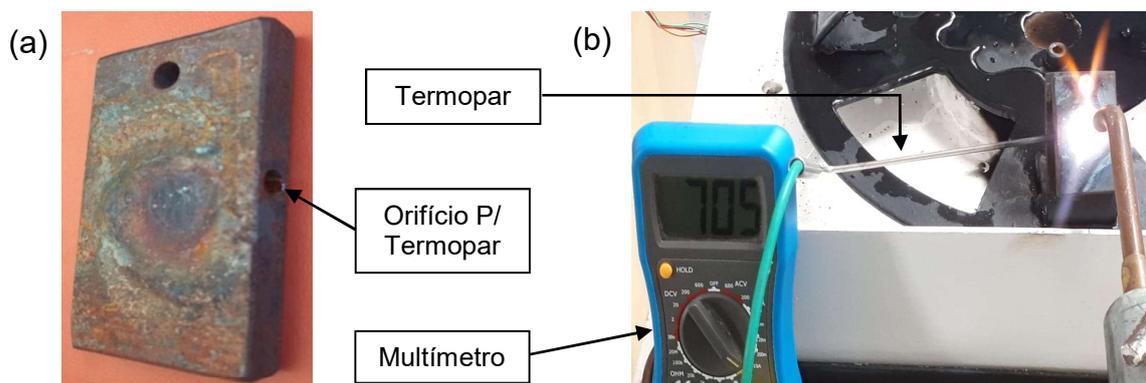
Fonte: Próprio Autor

A Figura 31 (a) mostra o desenho esquemático do equipamento de FT, onde mostra o conjunto montado com dimensões em mm e a Figura 31 (b) detalha o conjunto montado real, indicando a mangueira onde a drenagem do reservatório foi feita e também mostra as estações de aquecimento e resfriamento.

4.4 Ajustes dos Parâmetros para o Ensaio de Fadiga Térmica

Antes de iniciar os ensaios de FT, foi preciso configurar o equipamento junto a programação via Arduino e uma das variáveis necessária é o tempo que o CP leva para atingir a temperatura desejada, que é entre 600 °C a 700 °C no núcleo do CP. De maneira empírica o levantamento do dado foi efetuado, preparando um corpo de prova com dimensões iguais ao da Figura 18, porém com um orifício na longitudinal, para inserção de um termopar tipo “K”, este conectado a um multímetro, com indicador de temperatura, como mostra a Figura 32. O CP foi aquecido mantendo uma distância entre o bico do maçarico de aproximadamente 25 mm e cronometrado o tempo.

Figura 32: Corpo de Prova e Montagem para Parâmetros



Fonte: Próprio Autor

A Figura 32 (a) mostra o detalhe do corpo de prova utilizado para a parametrização inicial, já a Figura 32 (b) mostra em detalhes a montagem do termopar no CP e o momento em que a temperatura atingiu a 705 °C no núcleo. Para valores mais confiáveis, foram efetuadas quatro medições de tempo em que o CP na temperatura de aproximadamente 20 °C atingia o patamar máximo de temperatura de 600 °C a 700 °C através do aquecimento deste, exibido na Tabela 07.

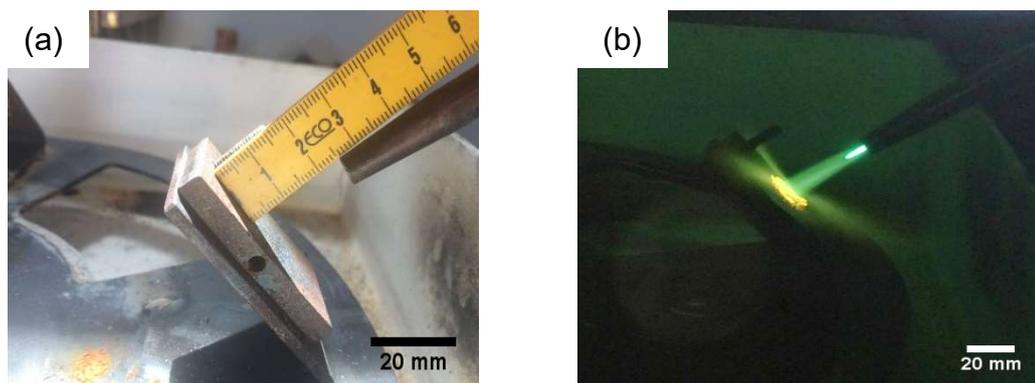
Tabela 07: Parâmetros de Tempo das Temperaturas para o Ensaio de FT

Medições	Temperatura (°C)	Tempo
1	20 a 700	00:00:57
2	20 a 700	00:00:40
3	20 a 700	00:01:10
4	20 a 700	00:01:08
Média		00:00:59
Desvio Padrão		00:00:14

Fonte: Próprio Autor

A Tabela 07 mostra detalhadamente os valores de tempo encontrado após as quatro medições. Com a informação de tempo encontrada, por sua vez a configuração da programação do equipamento via Arduino foi efetuado utilizando a média do tempo de 59 s, porém utilizado 60 s. Um detalhe importante a ressaltar, é o tipo de chama utilizado no parâmetro e no decorrer do ensaio de FT, a chama oxidante foi o tipo de chama pré-estabelecido que alcançou os resultados esperados, comparados aos outros tipos de chama utilizados para os bicos aplicados no ensaio.

Figura 33: Detalhe dos Parâmetros



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 33 (a) mostra o detalhe da medida usada (25 mm) entre o bico do maçarico e o corpo de prova, o detalhe da chama oxidante utilizado para parametrizar e também durante o ensaio, é mostrado na Figura 33 (b), foi utilizado um filtro para melhor visualização da chama.

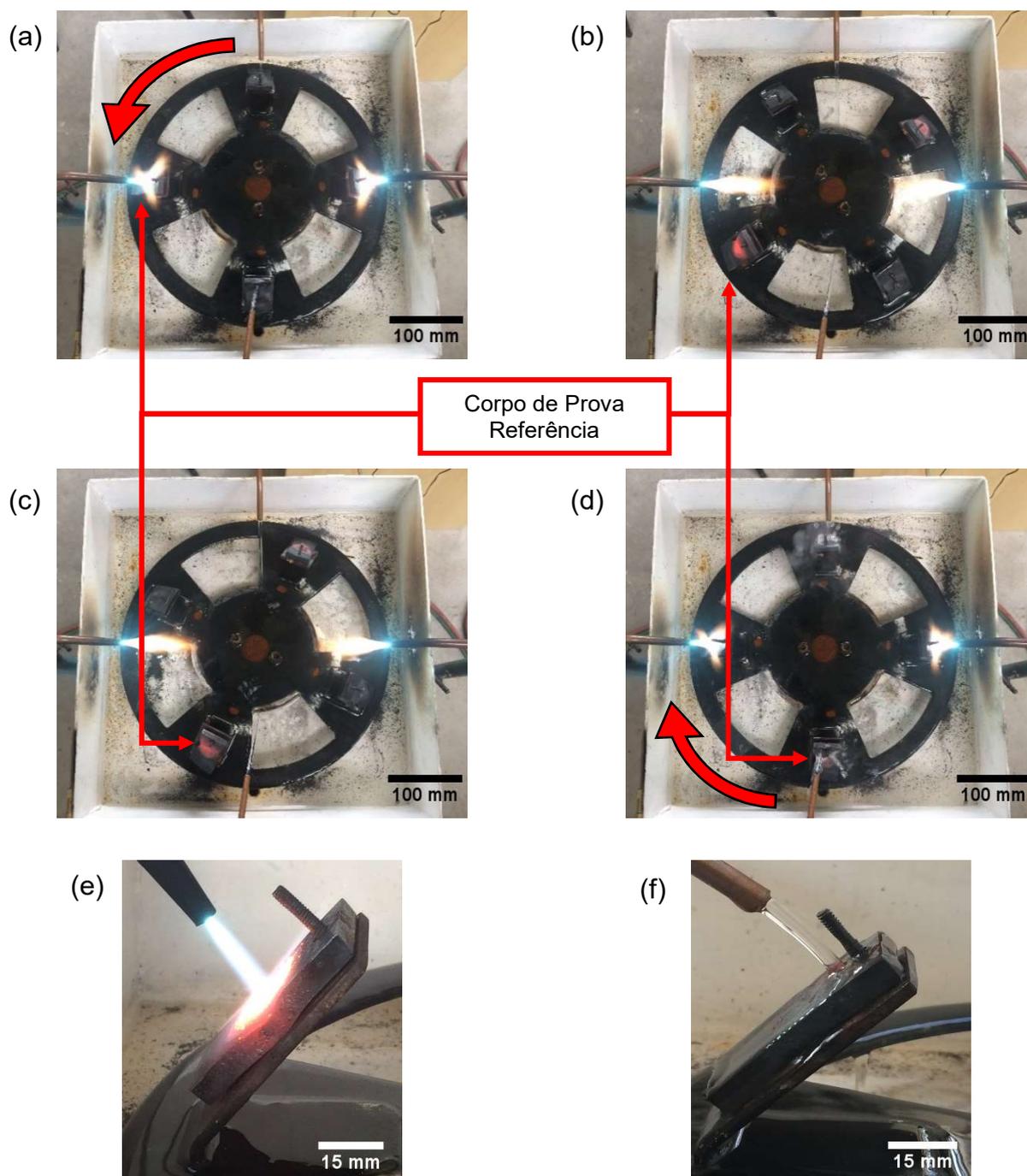
4.5 Ensaio de Fadiga Térmica Oxiacetilenica

Após a parametrização e com o conhecimento do tempo necessário para que o aquecimento dos CP até a temperatura máxima desejada, se deu início ao ensaio de fadiga térmica. Primeiramente os CP foram posicionados nos porta amostras da mesa giratória seguido da regulagem das chamas e posicionamento dos bicos da estação de aquecimento, a estação de resfriamento era então ligada e finalmente o número de ciclos eram informados ao programa, que por sua vez executava através dos *hardwares* do equipamento.

Este ensaio de FT é configurado para quatro CP, no momento em que dois CP encontravam-se aquecendo outros dois CP estavam sendo resfriados, após atingir o tempo programado de 60 s e os CP localizados na estação de aquecimento atingirem o patamar máximo de temperatura entre 600 °C a 700 °C no núcleo, o motor de passo recebia o sinal elétrico e rotaciona 1/4 de revolução no sentido anti-horário, fazendo com que os CP posicionassem a 90°, então os CP que estavam na estação de aquecimento passa para a estação de resfriamento, assim resfriando-os até atingir a temperatura de 20 °C a 25 °C e os CP que se encontravam na estação de resfriamento se posicionam na estação de aquecimento, após o tempo atingir os 60 s, o motor de passo rotaciona 1/4 de

revolução sentido horário, assim completando um ciclo. Os números de ciclos utilizados no presente trabalho foram de 250, 500 e 750 ciclos tendo como suporte os ciclos utilizados nas pesquisas mais recentes, conforme literatura. A importância do motor de passo no projeto foi, por ser preciso no posicionamento exato dos CP nas estações de aquecimento e resfriamento, para melhor autonomia do equipamento.

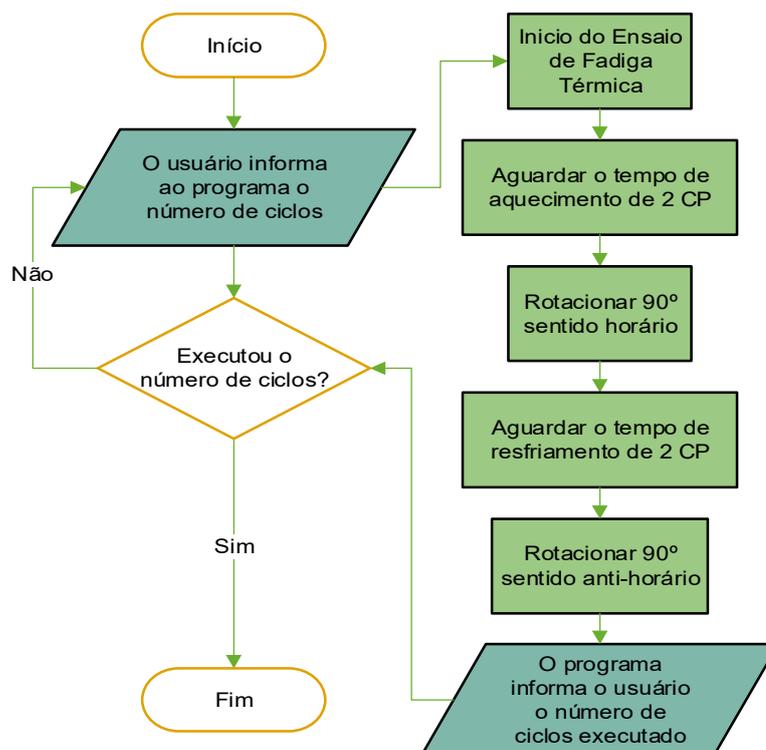
Figura 34: Detalhes do Ensaio de Fadiga Térmica



Fonte: Próprio Autor

Como um todo, a Figura 34 ilustra de maneira pontual e simplificada o momento em que o CP de referência atingiu o patamar máximo de temperatura e se posiciona na estação de resfriamento. Na Figura 34 (a) mostra o sentido de rotação que o CP de referência vai percorrer, as Figura 34 (b) e (c) mostra o percurso intermediário do CP entre as estações, ao se posicionar na estação de resfriamento o CP é resfriado até o tempo já programado, completando um ciclo, então o CP de referência retorna a estação de aquecimento conforme sentido mostrado na Figura 34 (d). As Figura 34 (e) e (F) mostra em detalhe o CP na estação de aquecimento e na estação de resfriamento, respectivamente. Um relatório dos ensaios de fadiga térmica executados, está contemplado no APÊNDICE 3.

Figura 35: Fluxograma Macro do Funcionamento do Ensaio de FT



Fonte: Próprio Autor

A Figura 35 mostra um fluxograma resumido para o melhor entendimento do funcionamento do ensaio de fadiga térmica realizado neste trabalho, importante ressaltar, que ao final de cada ciclo os CP eram estacionados na estação de resfriamento.

Para garantir que a temperatura máxima de aquecimento estava dentro da faixa estabelecida, foi efetuado um monitoramento a cada 100 ciclos, utilizando os mesmos

instrumentos, o corpo de prova com o orifício, o multímetro e o termopar, para os ajustes dos parâmetros, conforme Figura 32 (a) e (b), citado no tópico 4.4.

Tabela 08: Monitoramento da Temperatura no Ensaio de FT

Ciclos	Medições	Ciclo monitorado	Temperatura (°C)
250	1	50 ciclos	630
	2	160 ciclos	620
	3	240 ciclos	600
500	1	50 ciclos	600
	2	220 ciclos	625
	3	470 ciclos	600
750	1	150 ciclos	610
	2	545 ciclos	615
	3	740 ciclos	600

Fonte: Próprio Autor

A Tabela 08, mostra algumas medições das temperaturas efetuado no início, no meio e próximo do final de cada ensaio, sendo a temperatura superficial próximo de 750 °C a 850 °C. Os valores encontrados no monitoramento, foi o da leitura do multímetro, considerando perdas com o ambiente e o tempo de resposta do instrumento.

4.6 Ensaio Não Destrutivo - Análise Visual

Durante o ensaio de fadiga térmica, os corpos de prova foram visualmente analisados, a cada 50 ciclos os mesmos foram fotografados. Ao final do ensaio de fadiga térmica os corpos de prova foram submetidos ao ensaio não destrutivo de análise visual, utilizando o equipamento microscópio estéreo da marca Zeiss, modelo Stemi 2000-C. O intuito do ensaio é para avaliar os aspectos macroscópico dos corpos de prova, submetidos a 250, 500 e 750 ciclos de fadiga térmica, verificando trincas visíveis e deformações.

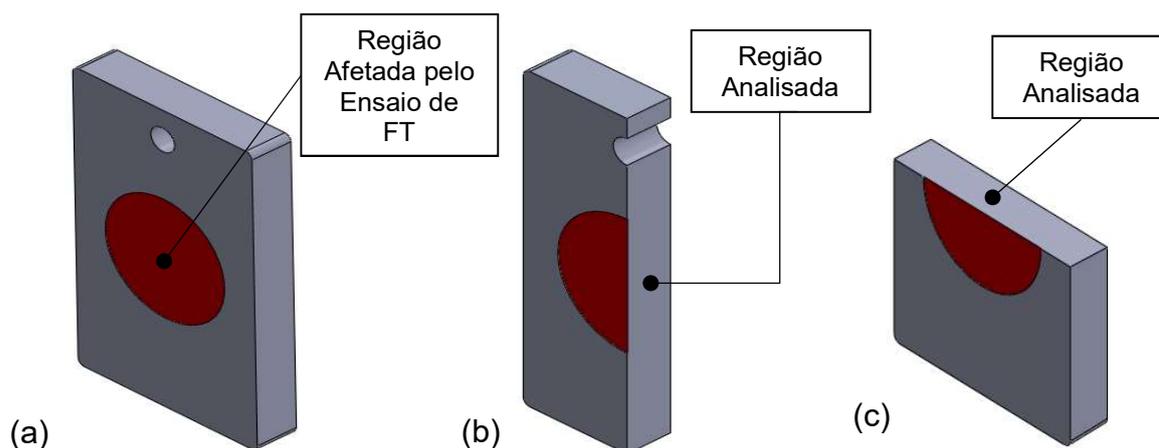
4.7 Retirada das Amostras Após Ensaio de Fadiga Térmica para Análise

Após realizado o ensaio não destrutivo, para cada ciclo de fadiga térmica, dois corpos de prova foram seccionados no sentido longitudinal e dois no sentido

transversal, foi retirado também uma amostra da superfície de uma parte da amostra seccionada longitudinalmente.

As amostras retiradas dos respectivos ciclos, foram utilizadas para as análises de imagens por microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e para ensaio de microdureza Vickers, a Figura 36 mostra desenho esquemático da amostra.

Figura 36: Detalhe das Amostras Retiradas dos CP Após FT



Fonte: Próprio Autor

A Figura 36 (a) mostra um desenho esquemático do corpo de prova após o ensaio de fadiga térmica com o detalhe da região afetada pelo ensaio, na Figura 36 (b) mostra um desenho esquemático da seção longitudinal retirada dos CP e o detalhe da região analisada, mostra também a região retirada para análise de superfície, observa-se que a amostra analisada foi a mais próxima da região afetada pelo o ensaio, já a Figura 36 (c) ilustra esquematicamente a seção transversal retirada dos CP e o detalhe da região analisada.

4.7.1 Microscopia Óptica

Para as análises de imagens por microscopia óptica as amostras de cada corpo de prova tiveram a mesma preparação e procedimentos das amostras submetidas a caracterização inicial citado anteriormente, tendo como objetivo a coleta de imagens do material que sofreu fadiga térmica na condição de 250 ciclos, 500 ciclos e 750 ciclos e compará-los entre si e também com o material como recebido, avaliando a microestrutura, utilizado o mesmo microscópio citado no tópico 4.2.2. O método utilizado para contagem de grãos austeníticos ASTM, foi através do aproveitamento das imagens coletadas pelo MEV, onde o mesmo revelou com eficiência o contorno

de grão das amostras dos diferentes ciclos de fadiga térmica, após a coleta das imagens aplicou-se o método dos interceptos.

4.7.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) / EDS

Após os corpos de prova serem submetidos ao ensaio de fadiga térmica com seus respectivos ciclos, as amostras foram preparadas para análise em microscopia eletrônica de varredura para obter com maior precisão alguns dados como: trincas; constituição e distribuição das fases presentes no material. Foi efetuado juntamente, uma análise por EDS, que é uma ferramenta importante do MEV para a caracterização de materiais metálicos, pois permite identificar a composição das amostras, mesmo que qualitativamente, em pontos específicos da imagem.

A preparação da amostra para análise em seguiu o mesmo procedimento de lixa e polimento e ataque apresentado anteriormente para caracterização inicial. A análise por MEV foi feita no Centro de Microscopia Eletrônica do Sul CEME-SUL da FURG. O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura marca JEOL modelo JSM-6610LV, foi utilizado uma voltagem de 15 kV.

4.7.3 Ensaio de Microdureza Vickers Após Fadiga Térmica

Dos corpos de prova submetidos a fadiga térmica, amostras foram retiradas para o ensaio de microdureza, submetidas ao mesmo procedimento de lixa e polimento já citado anteriormente e realizado o ensaio no mesmo equipamento com os mesmos parâmetros de carga e tempo, para efeito de comparação das amostras de cada ciclo com a amostra do material como recebido, o número de pontos e os espaços foram os mesmos, conforme metodologia citada no tópico 4.2.3.

Após a coleta dos resultados de microdureza, foi possível avaliar o valor de resistência a tração após o ensaio de fadiga térmica através da norma ASTM E140, onde mostra a equivalência dos valores de microdureza com a resistência a tração.

4.7.4 Análise das Trincas

Com o auxílio do MEV foram efetuadas medições de dez trincas, das diversas encontradas, nos diferentes ciclos de fadiga térmica, feito o levantamento dos dados encontrados, resumindo as médias encontradas em uma tabela e plotado um gráfico para melhor visualização, comparando os tamanhos das trincas dos diferentes ciclos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na caracterização inicial são de suma importância, pois através destes, pode-se comparar o efeito do ensaio de fadiga térmica na microestrutura do material e em suas propriedades mecânicas.

Para o presente trabalho foram avaliadas as alterações na microestrutura, tamanho de grão ASTM e microdureza Vickers, além de análise de falhas. Os ensaios de tração e espectrometria teve como importância, a certificação que o aço utilizado no trabalho atendia as exigências da norma. Portanto através dos ensaios utilizados e os resultados da caracterização inicial garantiu que o aço ASTM SA – 516 Gr 60 atendeu os requisitos exigidos, sendo favorável a pesquisa.

Também são apresentados os resultados e discussões das amostras após aplicação dos ciclos térmicos.

5.1 Caracterização Inicial do Aço ASTM SA – 516 Gr 60

Para constatar que o material recebido era composto pelos elementos exigidos por norma ASME e que o fabricante atendeu essa exigência, o material foi submetido a espectrometria de emissão óptica, onde o resultado da análise é mostrado na Tabela 09.

Tabela 09: Resultado da Composição Química do aço ASTM SA – 516 Gr 60

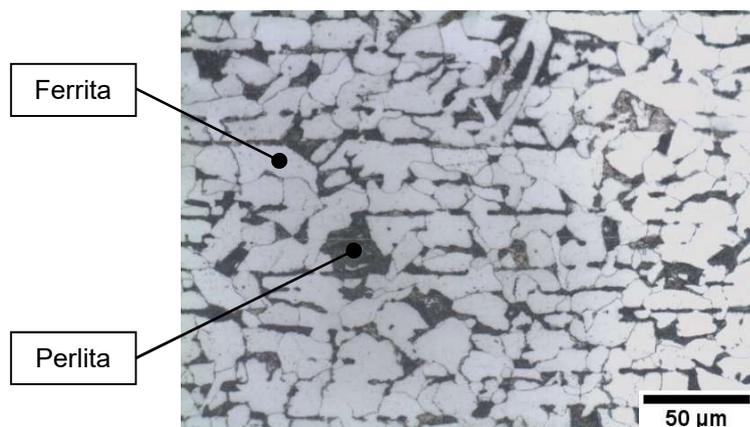
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Al	Cu	Mo	Ceq
0,19	0,75	0,01	0,01	0,35	0,007	0,013	0,062	0,014	0,002	0,375

Fonte: Próprio Autor

Os valores da composição química obtidos após análise estão de acordo com a exigência da norma ASME e estão próximos aos valores do certificado do fabricante (ANEXO A), podendo afirmar que o material recebido contém os elementos químicos para sua finalidade. Foram detectados alguns elementos residuais como, Cu sendo o mesmo originados desde a sucata de aciaria, não apresentado relevância significativa nas amostras analisadas.

Após o procedimento de lixa, polimento e ataque químico no material como recebido, foi realizado a análise por imagens feita no microscópio óptico, onde observa-se sua microestrutura e as fases presentes neste material.

Figura 37: Estrutura Metalográfica ASTM SA – 516 Gr 60 Como Recebido



Fonte: Próprio Autor

A Figura 37 mostra a microestrutura do aço ASTM SA – 516 Gr 60 com magnificação 500x contendo as fases Ferrita e Perlita, sendo esta microestrutura típicas dos aços hipoeutetóides (GONG *et al* 2010; LIM *et al* 2016). Notou-se também a presença de bandeamento longitudinal em todas as amostras relacionado ao processo de conformação mecânica.

Para a caracterização do aço ASTM SA – 516 Gr 60, foram realizados ensaios de microdureza Vickers sendo observado na Tabela 10.

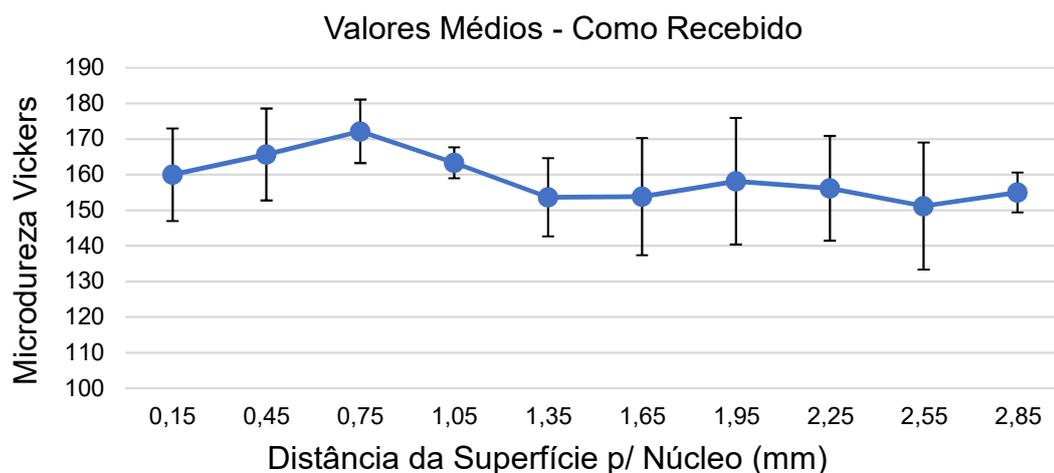
Tabela 10: Microdureza Vickers no Material Como Recebido

Seções	Dureza Média (HV)	Desvio Padrão
Transversal	155,93	7,34
Longitudinal	161,9	6,77
Geral	158,92	6,5

Fonte: Próprio Autor

A Tabela 10 mostra a média da microdureza encontrada na caracterização do aço estudado, o valor da média de 158,92 HV com desvio padrão de 6,5. Lim *et al* (2016) encontrou uma média de microdureza Vickers de aproximadamente 171 HV, para o aço ASTM SA – 516 Gr 70. Bala *et al* (2013) encontraram uma média de microdureza do aço ASTM SA – 516 Gr 70 de 187 HV. Para uma melhor visualização, um perfil de microdureza da amostra do aço como recebido foi plotado, este mostrado na Figura 38.

Figura 38: Perfil de Microdureza Vickers do Material Como Recebido

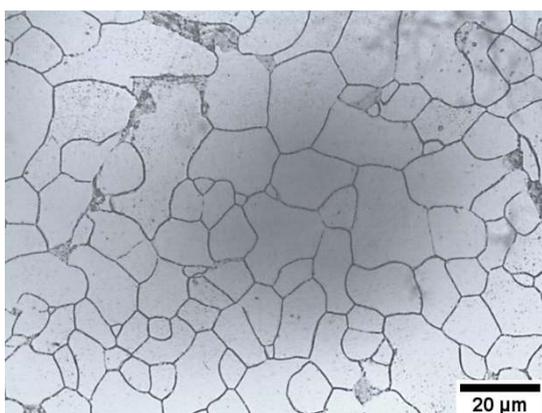


Fonte: Próprio Autor

A Figura 38, mostra o perfil de microdureza, onde este se deu através das médias encontradas nas seções transversais e longitudinais, observa - se maiores valores próximo a superfície de 172 HV, especificamente no ponto a 0,75 mm da superfície. Para distâncias próximas ao núcleo da amostra, obteve-se valores menores, atingindo o pico mais baixo de 151 HV a 2,55 mm da superfície.

Após efetuar os procedimentos, obteve-se o tamanho de grão ASTM na amostra como recebido, utilizando a contagem de grão pelo método de interceptos.

Figura 39: Contornos de Grãos Austeníticos ASTM SA – 516 Gr 60 CR



Fonte: Próprio Autor

A Figura 39 mostra os contornos de grãos do aço ASTM SA – 516 Gr 60 com magnificação 1000x, através desta imagem e aplicação do método, teve-se como resultado de tamanho grão austenítico, o de número 9 ASTM, considerado grãos fino, para o aço ASTM SA – 516 o tamanho de grão austenítico é de 5 ASTM ou maior (ASME, 2004).

Complementando a caracterização inicial do material, foram realizados três ensaios de tração com a finalidade de verificar sua resistência a tração, os resultados obtidos são exibidos na Tabela 11.

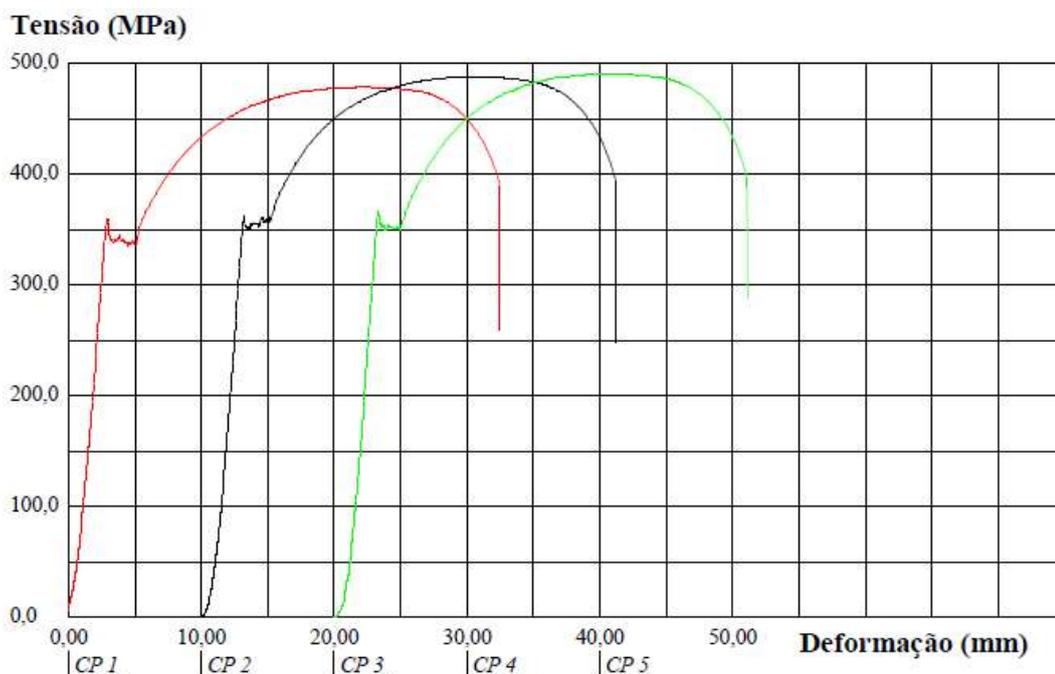
Tabela 11: Resultados dos Ensaios de Tração

Corpos de Prova	Resistencia a Tração (MPa)
CP 1	478,75
CP 2	487,78
CP 3	490,77
Média	485,8
Desvio Padrão	6,26

Fonte: Próprio Autor

O valor médio de resistência a tração encontrado para o material foi de 485,8 MPa, de acordo com a norma, este limite pode variar de 415 MPa a 550 MPa para o aço ASTM SA – 516 Gr 60 (ASME, 2004).

Figura 40: Gráfico Tensão x Deformação ASTM SA – 516 Gr 60



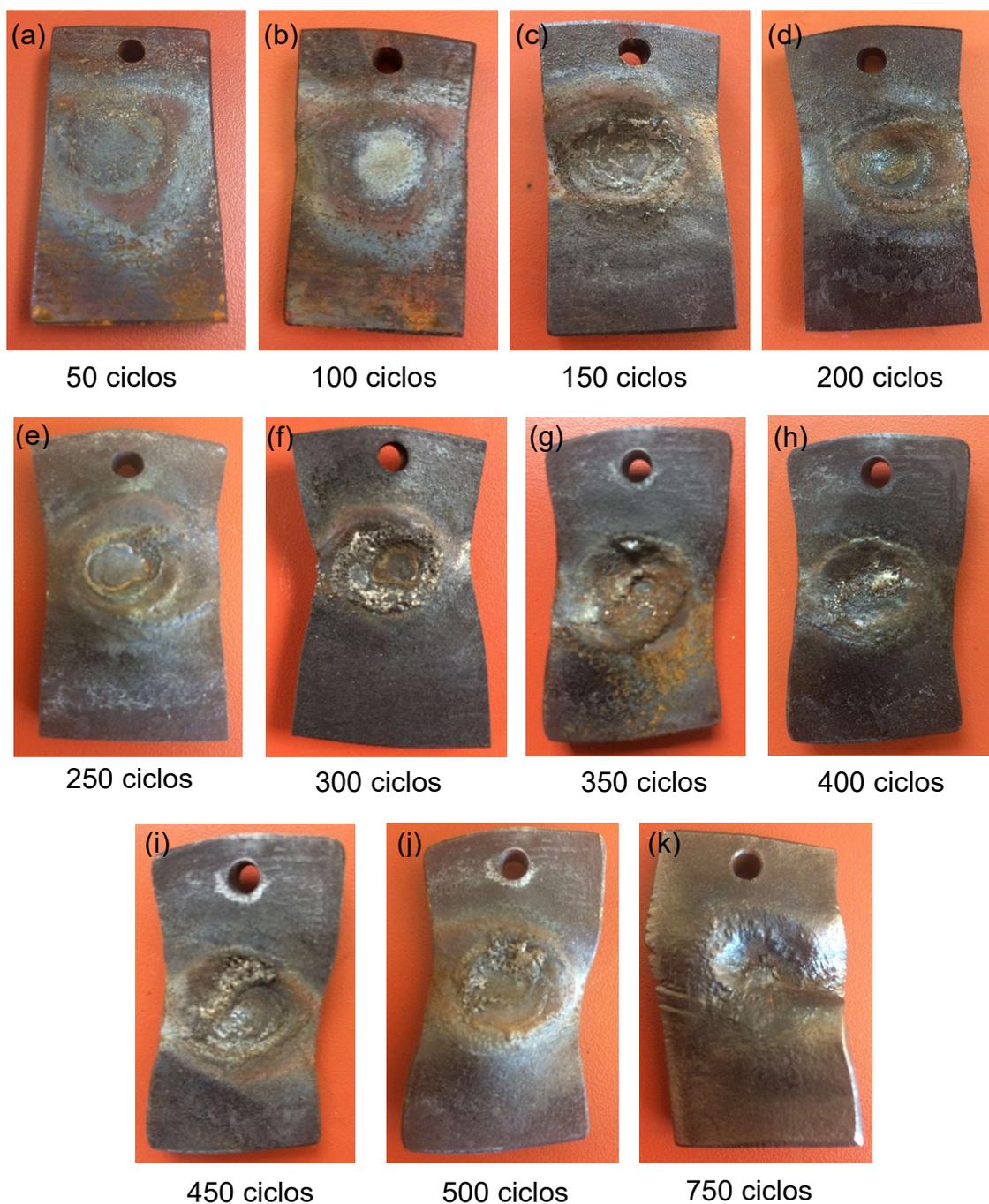
Fonte: Próprio Autor

A Figura 40 mostra o gráfico da tensão versus deformação dos três corpos de prova do aço ASTM SA – 516 Gr 60, utilizado no presente trabalho.

5.2 Análise Visual dos Copos de Prova Submetido a Fadiga Térmica

A Figura 41 mostra os efeitos causados nos corpos de prova a cada 50 ciclos de fadiga térmica, esses verificados através de análise visual. É importante ressaltar que os corpos de prova representado nesta figura são dos seus respectivos ciclos e não a evolução de um único corpo de prova.

Figura 41: Corpo de Prova a Cada 50 Ciclos de Fadiga Térmica

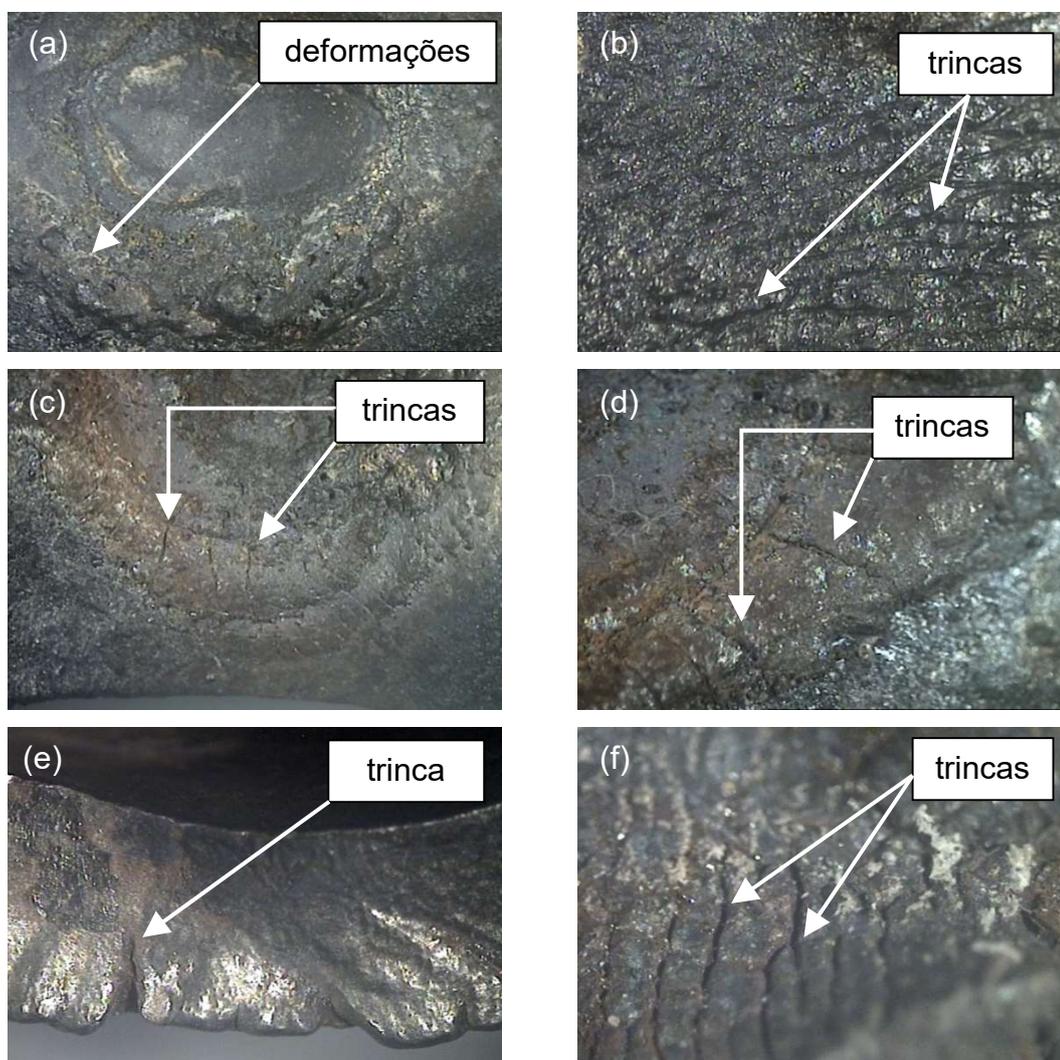


Fonte: Próprio Autor

É notável que uma deformação no corpo de prova já é visível nos 100 ciclos como visto na Figura 41 (b) e agravando essa deformação no decorrer do ensaio, a deformação na região central do corpo de prova foi em função desta ser diretamente afetada pela chama do ensaio, tal deformação fica evidenciada a partir de 150 ciclos, Figura 41 (c), na Figura 41 (k) mostra o corpo de prova após 750 ciclos de fadiga térmica, onde é notável o aparecimento de trincas.

Após término dos ensaios de fadiga térmica, corpo de prova de 250, 500 e 750 ciclos, foram avaliados os aspectos macroscópicos, verificando trincas visíveis e deformações, conforme mostrado na Figura 42.

Figura 42: Imagens Macros Corpo de Prova



Fonte: Próprio Autor

As imagens macros da superfície do corpo de prova submetido a 250 ciclos de fadiga térmica, onde é possível notar a deformação causada pela ação da chama

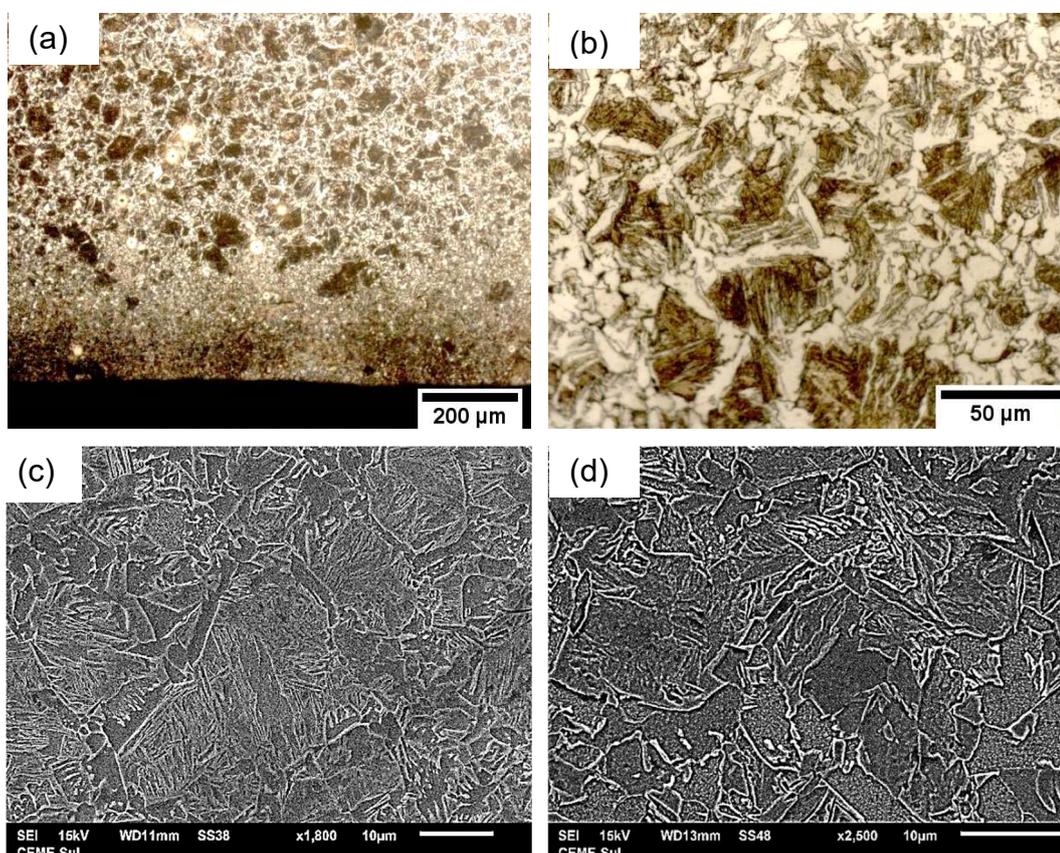
Figura 42 (a) e o surgimento de trincas, como mostrado na Figura 42 (b), para o corpo de prova com 500 ciclos de fadiga térmica, as trincas também aparecem na superfície com mais evidencia, assim mostrado na Figura 42 (c) e (d), quando o corpo de prova foi submetido a 750 ciclos de fadiga térmica é notável o aparecimento de trincas relevantes, mostrado na Figura 42 (e), onde é visível a trinca na seção transversal do CP, nota-se também uma deformação nesta seção, na Figura 42 (f), as trincas na superfície são em maior quantidade comparado com os demais ciclos, trincas macros e superficiais, onde observa-se a interação entre trincas vizinhas (LI, 2018; CONG, 2014; ASAYAMA, 2009).

5.3 Análise Microestrutural Após Ensaio de Fadiga Térmica

A avaliação microestrutural tem o intuito de investigar o efeito dos diferentes ciclos de fadiga térmica no material, foi realizado a coleta de imagens através do microscópio óptico e MEV das amostras de 250, 500 e 750 ciclos de fadiga térmica.

5.3.1 Análise das Amostras Submetidas a 250 Ciclos

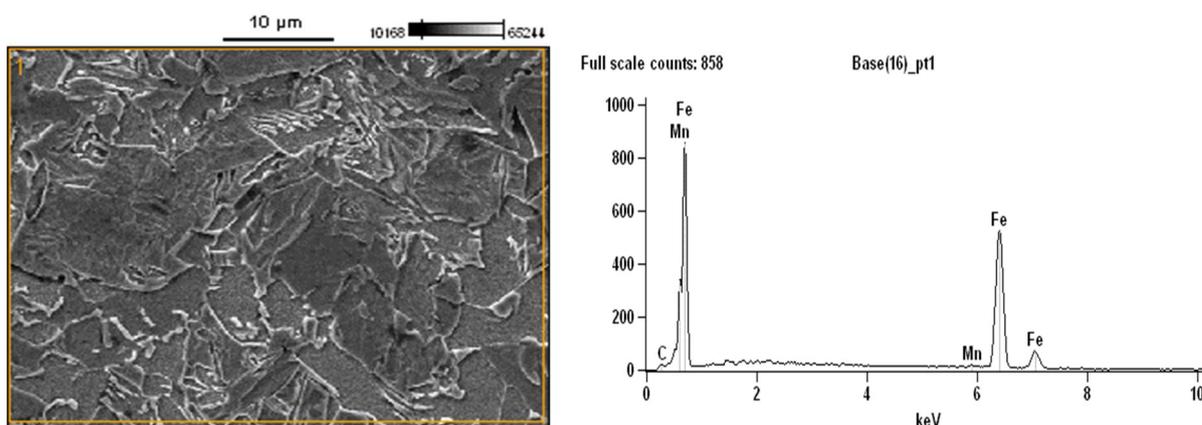
Figura 43: Microestrutura da Amostra Submetida a 250 Ciclos - Seção



Fonte: Próprio Autor

A Figura 43 mostra detalhe da microestrutura da seção, próxima a superfície da amostra, submetida a 250 ciclos de fadiga térmica, nota-se uma primeira camada de grãos bem refinados e aproximadamente 0,5 mm da superfície revela-se uma camada mais grosseira com ilhas de Perlita, mostrado na Figura 43 (a), o detalhe dessas ilhas são mostrada em um aumento de 500x, conforme Figura 43 (b). Imagens coletadas no MEV reforçam o detalhe das ilhas aumentadas 1800x e 2500x de acordo com a Figura 43 (c) e Figura 43 (d) respectivamente, após os primeiros ciclos de fadiga térmica apresentou algumas ilhas de Perlita, formação de finas colônias de Perlita na Ferrita (LIM *et al* 2016; ROA *et al* 2016). A Figura 44 mostra o EDS aplicado nas ilhas de Perlitas encontradas na microestrutura das amostras submetidas a 250 ciclos.

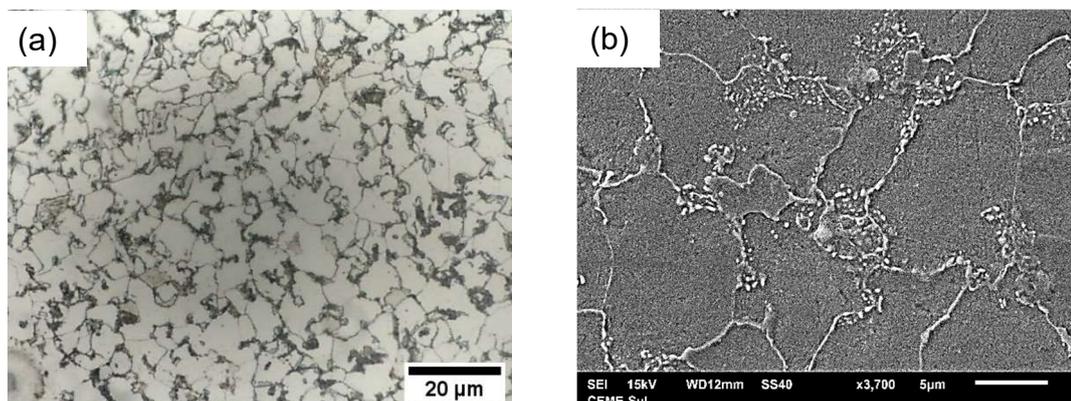
Figura 44: Microsonda – EDS Amostra 250 Ciclos



Fonte: Próprio Autor

Com o uso do EDS foi possível analisar a composição dos elementos nas ilhas de Perlita, mesmo que qualitativamente pode-se observar a presença dos elementos base deste aço, Fe, Mn e C, conforme mostrado na Figura 44.

Figura 45: Microestrutura da Amostra Submetida a 250 Ciclos - Núcleo

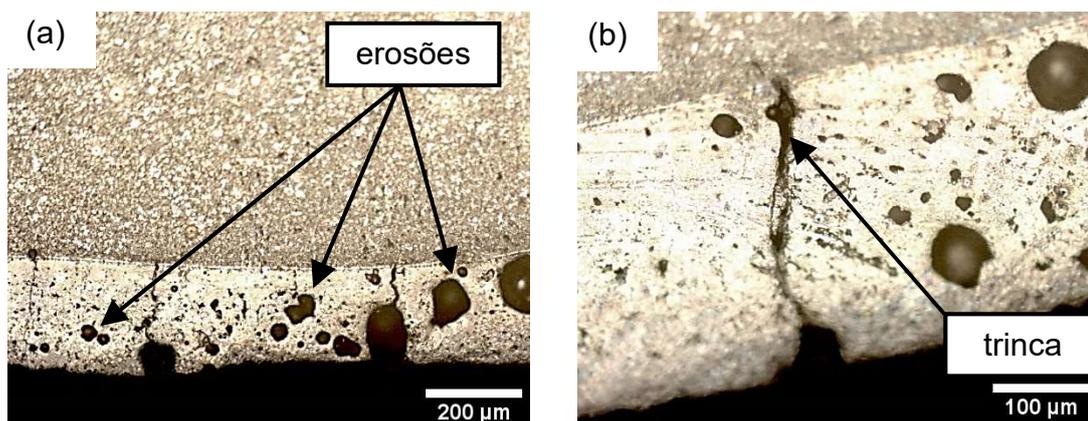


Fonte: Próprio Autor

Ao analisar mais ao núcleo das seções da amostra a 250 ciclos de fadiga térmica, observa-se que sua microestrutura não foi muito alterada, nota-se uma semelhança com a microestrutura do substrato e a incidência das ilhas de Perlita é zero, como mostrado na Figura 45 (a), entretanto há a presença de carbonetos precipitados Figura 45 (b).

Uma análise metalográfica foi feita em uma determinada parte da superfície, a Figura 46 (a) mostra essa região em um aumento de 100x, observa-se uma camada com trincas e erosões ocasionadas pela chama oxidante, ao aumentar para 200x é possível visualizar com mais detalhe esses defeitos, mostrado na Figura 46 (b), a causa provável é de oxidação por alta temperatura (BALA *et al* 2013), reduzindo a resistência, de modo que a falha ocorreu por fadiga térmica (BARBOSA *et al* 2012).

Figura 46: Amostra a 250 Ciclos de Fadiga Térmica – Próximo a Superfície

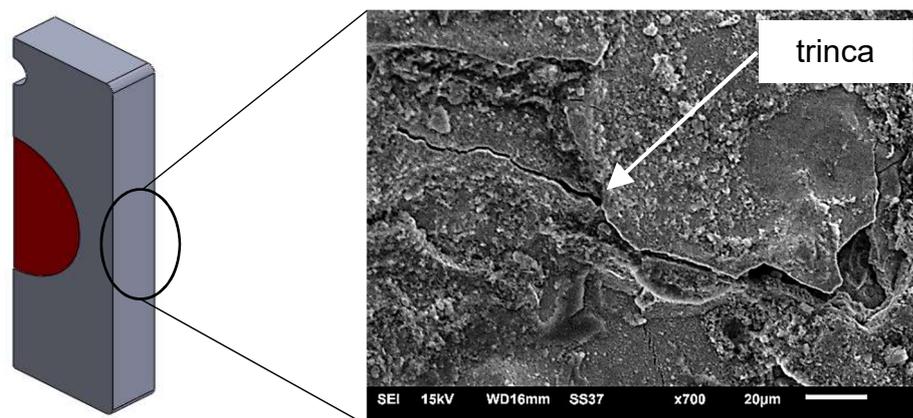


Fonte: Próprio Autor

O tempo de permanência em altas temperaturas seguido de diferenças taxas de resfriamento, podem causar mudanças microestruturais significativas (MOOJEN, 2014). Verificou também nessa região a presença de Martensita revenida de médio carbono, a Martensita muito provavelmente será auto - revenida, porque formou-se a temperaturas altas, possibilitando um revenido parcial na continuação do resfriamento (SANTOS, 2013).

O surgimento de trincas, são as consequências do carregamento térmico e cíclico (SILVA, 2011). Quando uma estrutura está sujeita à fadiga térmica, normalmente múltiplas trincas iniciam e se propagam (ASAYAMA *et al* 2009). Após a análise visual, verificou-se uma incidência de trincas na seção longitudinal da amostra conforme mostrado na Figura 47, assim, uma análise mais a fundo da ocorrência das trincas foi realizada.

Figura 47: Detalhe das Trincas Externas na Amostra a 250 Ciclos

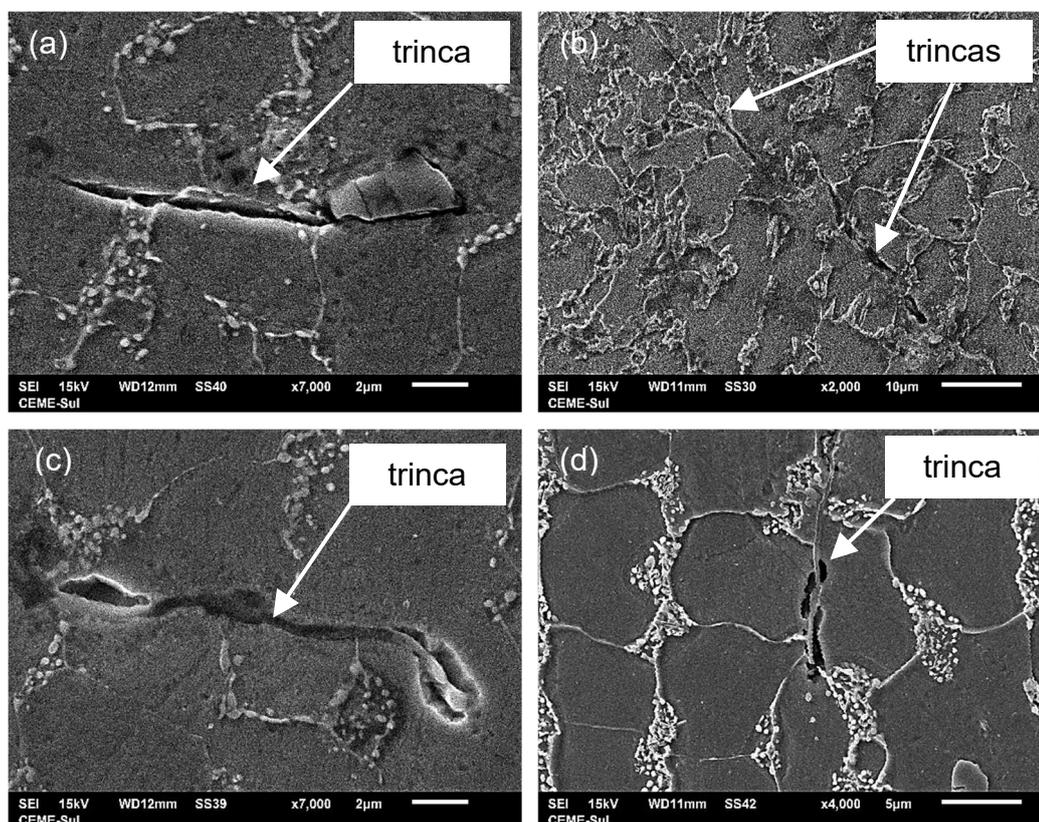


Fonte: Próprio Autor

A Figura 47 também mostra uma das trincas verificadas na seção, onde revelou sem ataque químico, somente através do MEV em um aumento de 700x.

Verificou-se o indício de trincas internas, avaliando a as seções transversais e longitudinais das amostras, conforme Figura 36 (b) e (c), essas devidamente preparadas e atacadas quimicamente, utilizando o MEV para coleta de imagens, exibidas na Figura 48.

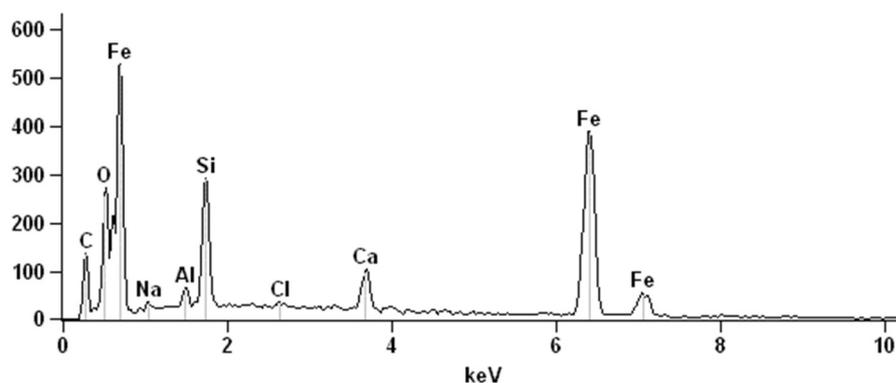
Figura 48: Detalhe das Trincas Internas na Amostra a 250 Ciclos



Fonte: Próprio Autor

A Figura 48 (a) a (d) mostra trincas encontradas na microestrutura da amostra submetida a 250 ciclos de fadiga térmica, nota-se a ocorrência tanto de trincas intragranulares, como mostra a Figura 48 (a) (b) (c), quanto de trincas intergranulares, mostrado na Figura 48 (d). Com o auxílio do MEV foram feitos EDS para análise qualitativa dos elementos nas trincas, assim exibido na Figura 49.

Figura 49: Microsonda – EDS nas Trincas 250 Ciclos



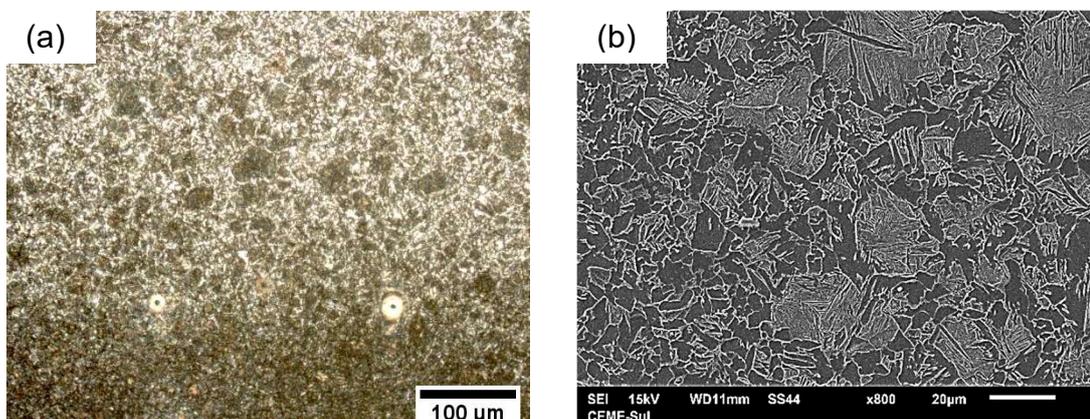
Fonte: Próprio Autor

Onde mostra uma análise média por EDS nas pontas das trincas presentes na amostra de 250 ciclos, observa-se a presença de O, sendo os demais elementos químicos, típicos da composição do substrato.

5.3.2 Análise das Amostras Submetidas a 500 Ciclos

Assim como na amostra submetida a 250 ciclos, a análise da microestrutura para amostra submetida a 500 ciclos de fadiga térmica também foi efetuada, as imagens coletadas para análises são exibidas na Figura 50.

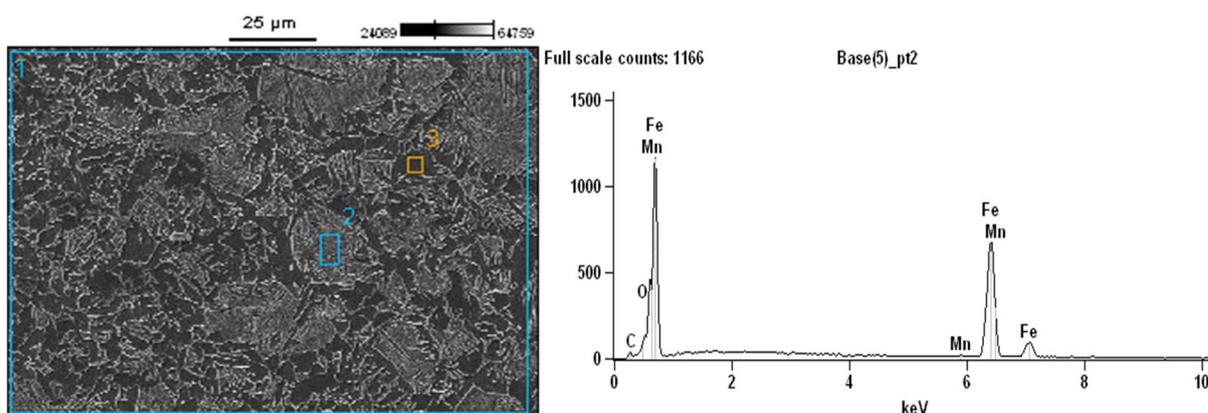
Figura 50: Microestrutura da Amostra Submetida a 500 Ciclos - Seção



Fonte: Próprio Autor

Na seção próximo a superfície da amostra, nota-se uma primeira camada de grãos bem refinados, e também uma camada mais grosseira com ilhas de Perlita, mostrado na Figura 50 (a), o detalhe dessas ilhas são mostrada em imagens do MEV que reforçam o detalhe das ilhas aumentadas 800x de acordo com a Figura 50 (b), seguindo com os ciclos de fadiga térmica apresentou algumas ilhas de Perlita, formação de finas colônias de Perlita na Ferrita (LIM *et al* 2016; ROA *et al* 2016). Feito também para amostra submetida a 500 ciclos de fadiga térmica a análise da composição dos elementos nas ilhas de Perlita, a Figura 51 mostra o EDS aplicado.

Figura 51: Microsonda – EDS Amostra 500 Ciclos

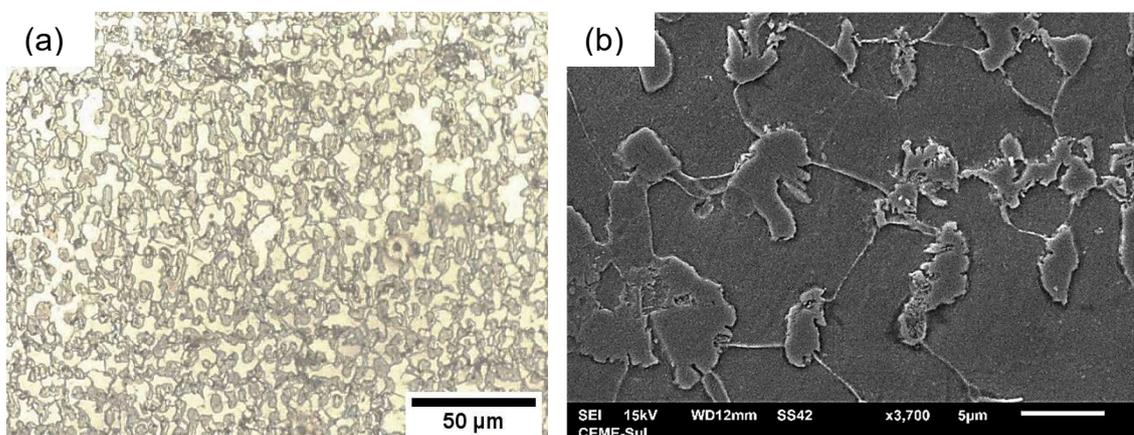


Fonte: Próprio Autor

Mesmo que qualitativamente pode-se observar a presença de O, além dos elementos base deste aço, Fe, Mn e C, conforme mostrado na Figura 51.

A Figura 52 exibe a microestrutura mais ao núcleo das seções da amostra submetida a 500 ciclos de fadiga térmica.

Figura 52: Microestrutura da Amostra Submetida a 500 Ciclos - Núcleo

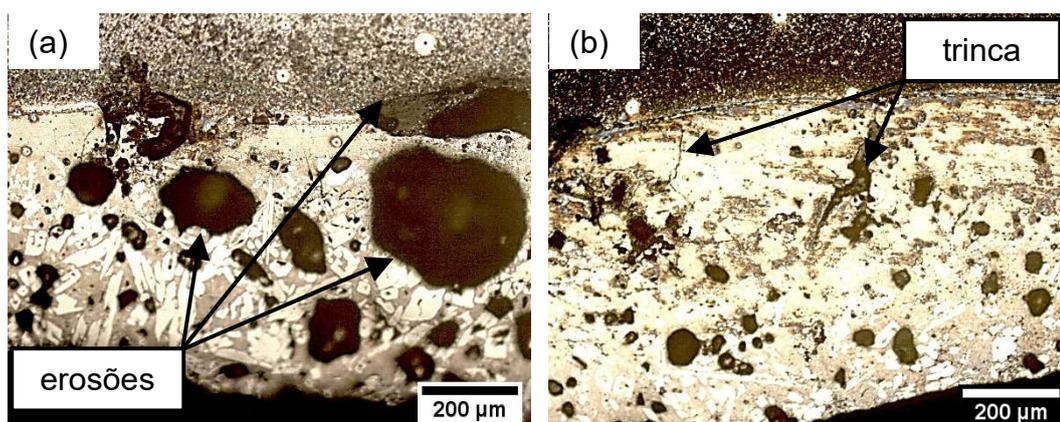


Fonte: Próprio Autor

Ao analisar a microestrutura, observa-se que a incidência das ilhas de Perlita na microestrutura é zero, como mostrado na Figura 52 (a), com um aumento de 3700x, é possível ver o detalhe da presença das fases Ferrita e Perlita, semelhante ao substrato de acordo com a Figura 52 (b), há também a presença de carbonetos precipitados.

Seguindo os critérios utilizados na amostra de 250 ciclos, o mesmo foi feito para a amostra submetida a 500 ciclos de fadiga térmica, onde a análise metalográfica na seção, em uma determinada parte da superfície, onde ocorreu as deformações. A Figura 53 (a) e (b) mostram essa região em um aumento de 100x, observa-se uma camada com trincas e erosões ocasionadas pela chama oxidante, onde esses defeitos já atingem o metal, a causa provável é de oxidação por alta temperatura (BALA *et al* 2013), reduzindo a resistência, de modo que a falha ocorreu por fadiga térmica (BARBOSA *et al* 2012).

Figura 53: Amostra a 500 Ciclos de Fadiga Térmica – Próximo a Superfície



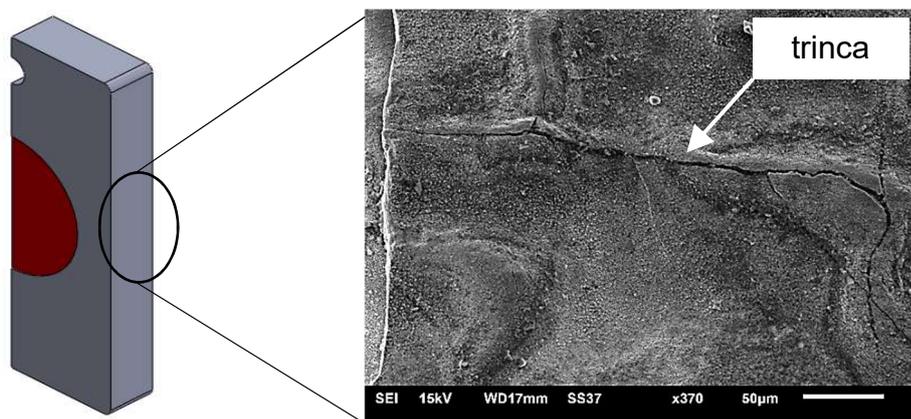
Fonte: Próprio Autor

O tempo de permanência em altas temperaturas seguido de diferentes taxas de resfriamento, podem causar mudanças microestruturais significativas (MOOJEN, 2014). Assim como na amostra de 250 ciclos, verificou também para 500 ciclos a presença de Martensita revenida de médio carbono nessa região, a Martensita muito provavelmente será auto - revenida, porque formou-se a temperaturas altas, possibilitando um revenido parcial na continuação do resfriamento (SANTOS, 2013).

O surgimento de trincas, são as consequências do carregamento térmico e cíclico (SILVA, 2011). Quando uma estrutura está sujeita à fadiga térmica, normalmente múltiplas trincas iniciam e se propagam (ASAYAMA *et al* 2009).

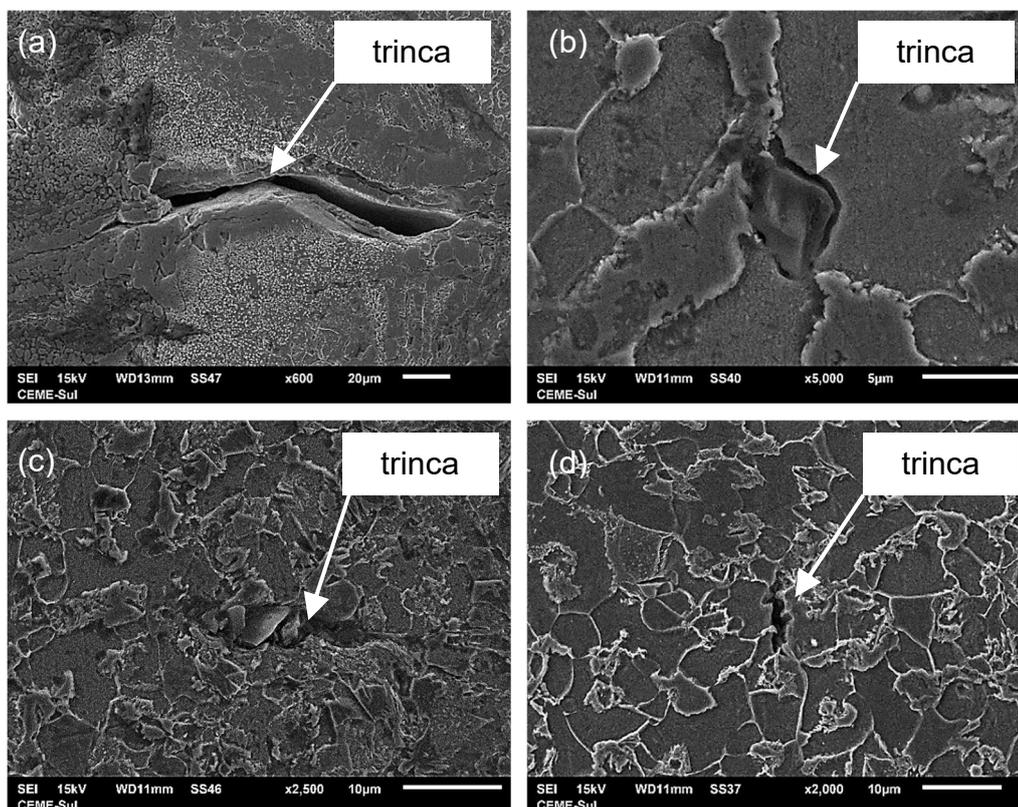
Após a análise visual na amostra a 500 ciclos de fadiga térmica, verificou-se a incidência de trincas na seção longitudinal na parte externa da amostra conforme mostrado na Figura 54, assim como na amostra submetida a 250 ciclos, uma análise mais a fundo da ocorrência das trincas foi realizada para esta condição, 500 ciclos.

Figura 54: Detalhe das Trincas Externas na Amostra a 500 Ciclos



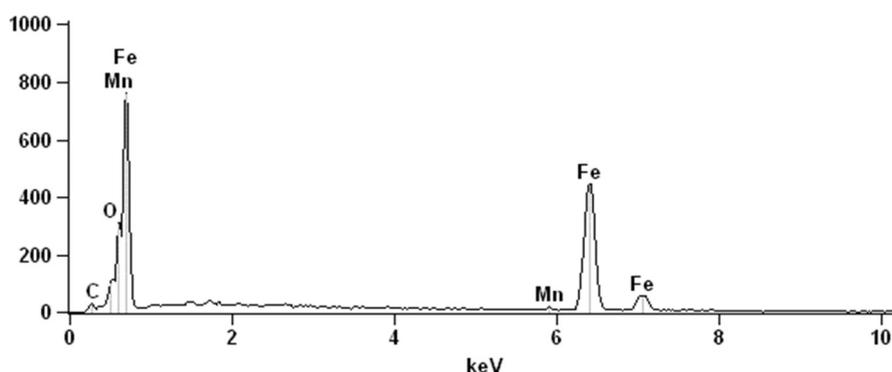
A Figura 54 também mostra uma das trincas verificadas na seção, onde revelou sem ataque químico, somente através do MEV em um aumento de 370x.

Figura 55: Detalhe das Trincas Internas na Amostra a 500 Ciclos



Verificou-se também para amostra submetida a 500 ciclos de fadiga térmica o início de trincas internas, avaliando as seções transversais e longitudinais das amostras, conforme Figura 36 (b) e (c), essas devidamente preparadas e atacadas quimicamente, utilizando o MEV para coleta de imagens. A Figura 55 (a) a (d) mostra trincas encontradas na microestrutura da amostra submetida a 500 ciclos de fadiga térmica, destacando a Figura 55 (a) onde mostra uma trinca mais evidente, essa localizada na seção próximo a superfície diretamente atingida pelos ciclos térmicos. Nota-se a ocorrência tanto de trincas intergranulares, como mostra a Figura 55 (b) e (d), quanto de trincas intragranulares, mostrado na Figura 55 (c). Com o auxílio do MEV foram feitos EDS para análise qualitativa dos elementos nas trincas, assim exibido na Figura 56.

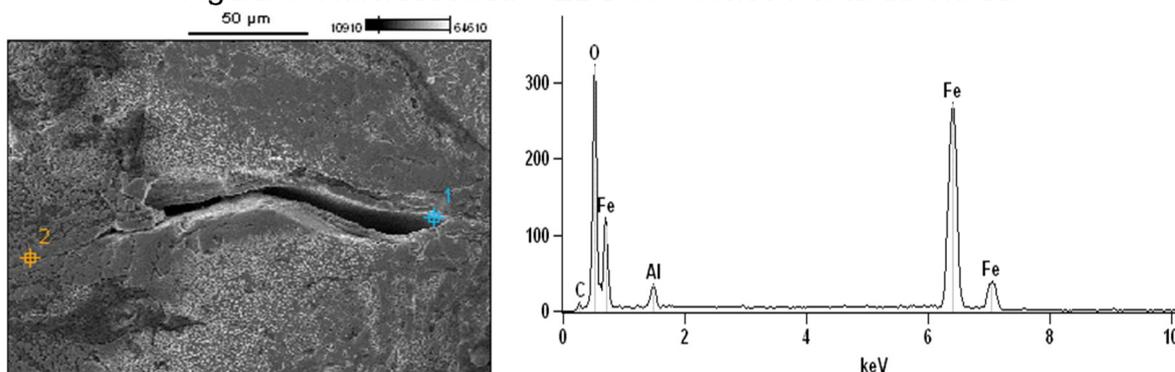
Figura 56: Microsonda – EDS nas Trincas 500 Ciclos



Fonte: Próprio Autor

Onde mostra uma análise média por EDS nas pontas das trincas presentes na amostra de 500 ciclos, observa-se a presença do O, sendo os demais elementos típicos da composição do substrato. Fez-se necessário um análise por EDS na trinca da Figura 55 (a), devido a sua relevância na pesquisa, EDS exibido na Figura 57.

Figura 57: Microsonda – EDS 500 Ciclos Ponta da Trinca



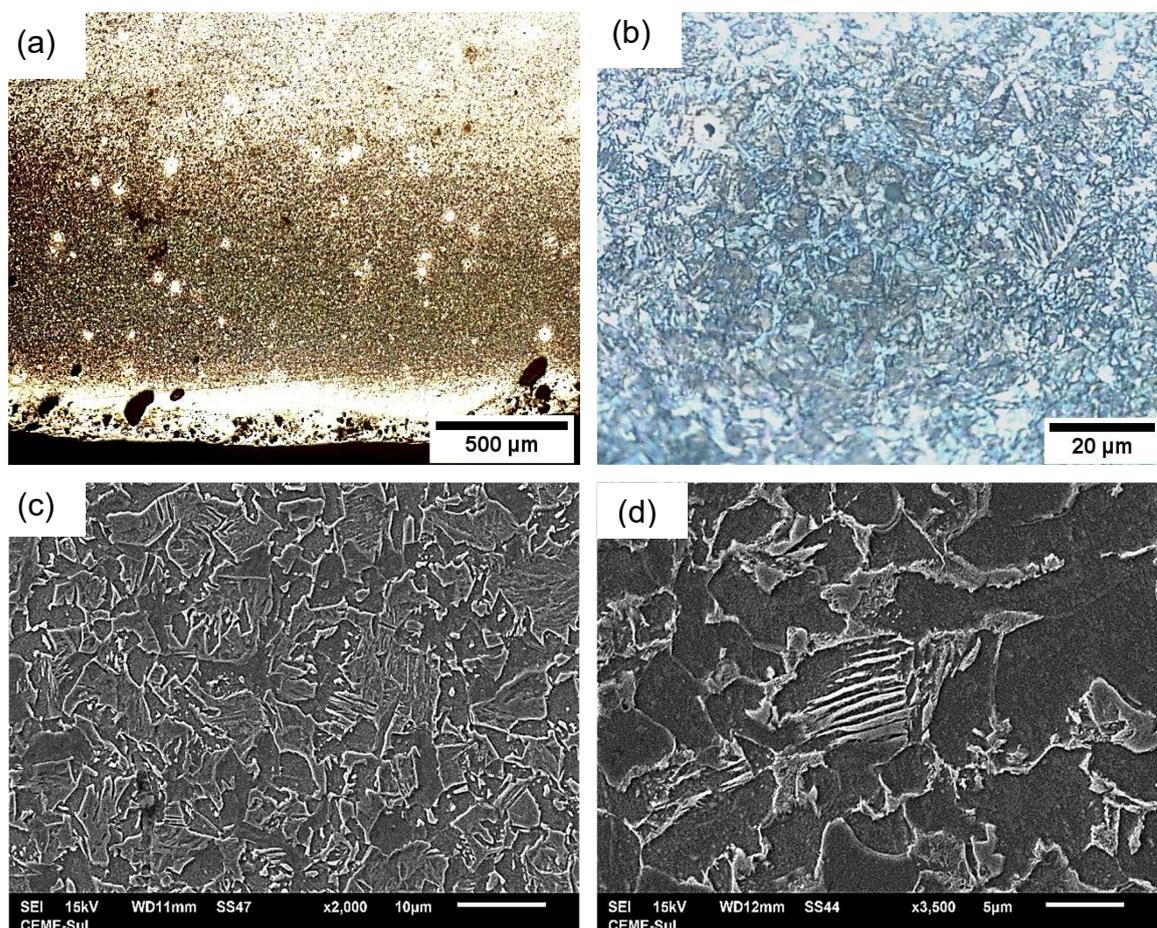
Fonte: Próprio Autor

A presença do O foi mais evidente que os demais elementos, conforme análise dos elementos por EDS na ponta da trinca, assim mostrado na Figura 57.

5.3.3 Análise das Amostras Submetidas a 750 Ciclos

Assim como nas amostra submetida a 250 e 500 ciclos, a análise da microestrutura para amostra submetida a 750 ciclos de fadiga térmica também foi efetuada, analisando a seção próximo a superfície da amostra, nota-se uma primeira camada branca, observa-se uma camada de grãos bem refinados e as ilhas de Perlita estão mais aglutinadas, mostrado na Figura 58 (a), o detalhe das ilhas são mostrada em um aumento de 500x, conforme Figura 58 (b). Imagens coletadas no MEV reforçam o detalhe das ilhas aumentadas 2000x de acordo com a Figura 58 (c) e 3500x conforme Figura 58 (d), após os primeiros ciclos de fadiga térmica apresentou algumas ilhas de Perlita, formação de finas colônias de Perlita na Ferrita (LIM *et al* 2016 e ROA *et al* 2016).

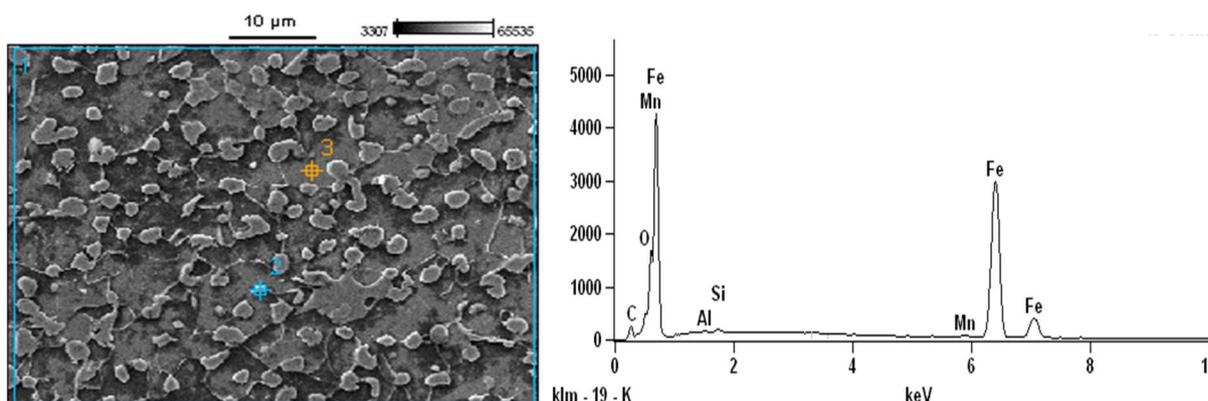
Figura 58: Microestrutura da Amostra Submetida a 750 Ciclos - Seção



Fonte: Próprio Autor

Feito também para amostra submetida a 750 ciclos de fadiga térmica a análise da composição dos elementos em uma parte da amostra, com o uso do EDS mesmo que qualitativamente pode-se observar a presença do O, junto dos elementos base deste aço, Fe, Mn e C, há a presença de Al e Si conforme mostrado na Figura 59.

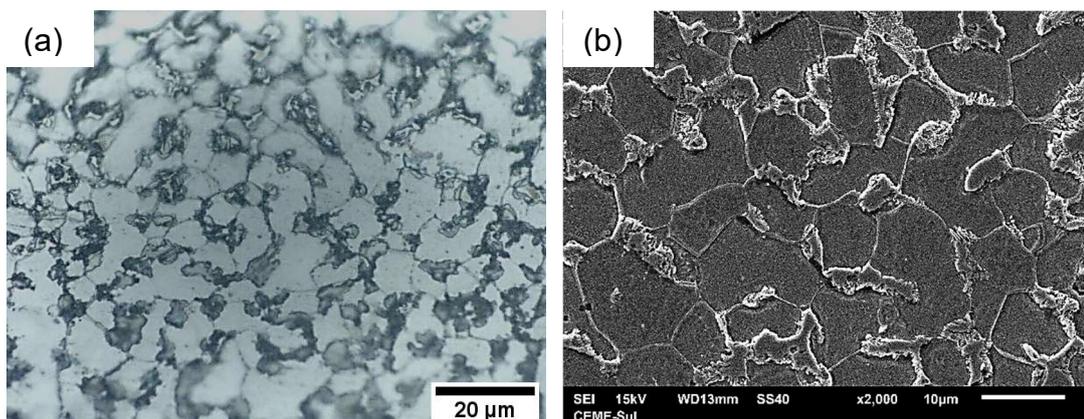
Figura 59: Microsonda – EDS Amostra 750 Ciclos



Fonte: Próprio Autor

Ao analisar mais ao núcleo das seções da amostra a 750 ciclos de fadiga térmica, observa-se que a incidência das ilhas de Perlita na microestrutura é zero, como mostrado na Figura 60 (a), com um aumento de 2000x, é possível ver o detalhe da presença das fases Ferrita e Perlita, semelhante ao substrato de acordo com a Figura 60 (b), há também a presença de carbonetos precipitados.

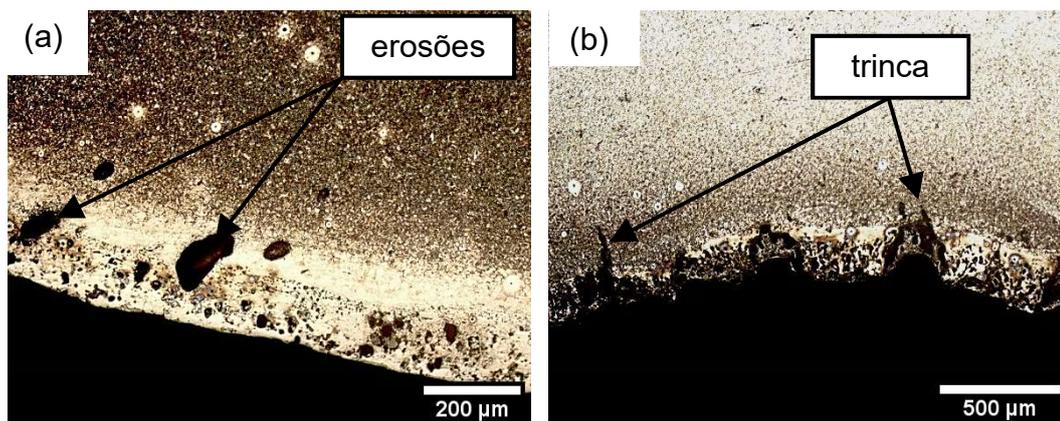
Figura 60: Microestrutura da Amostra Submetida a 750 Ciclos - Núcleo



Fonte: Próprio Autor

Como feito nas amostras de 250 e 500 ciclos, o mesmo foi feito para a amostra submetida a 750 ciclos de fadiga térmica, onde a análise metalográfica na seção, em uma determinada parte da superfície, onde ocorreu as deformações, Figura 61.

Figura 61: Amostra a 750 Ciclos de Fadiga Térmica – Próximo a Superfície

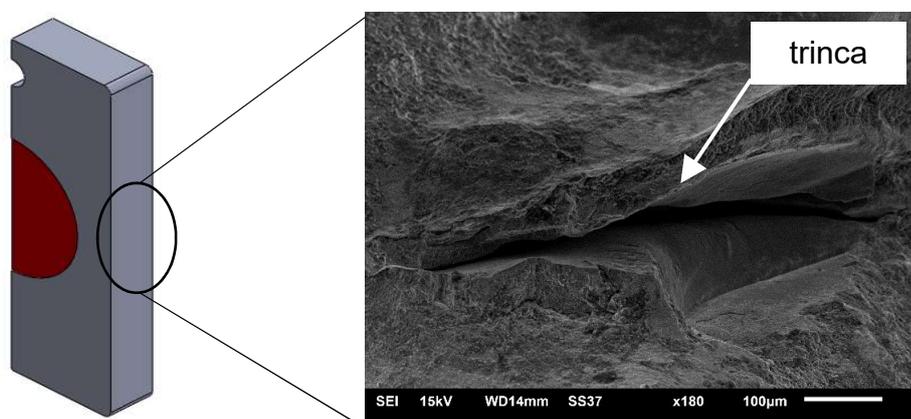


Fonte: Próprio Autor

A Figura 61 (a) e (b) mostram essa região em um aumento de 100x e 50x respectivamente, observa-se uma camada com trincas e erosões ocasionadas pela chama oxidante, onde esses defeitos se propaga ainda mais ao metal, a causa provável é de oxidação por alta temperatura (BALA *et al* 2013), reduzindo a resistência, de modo que a falha ocorreu por fadiga térmica (BARBOSA *et al* 2012). Assim como nas amostras de 250 e 500 ciclos, verificou também para 750 ciclos a presença de Martensita revenida de médio carbono nessa região, para esta condição observa-se uma camada maior, a Martensita muito provavelmente será auto - revenida, porque formou-se a temperaturas altas, possibilitando um revenido parcial na continuação do resfriamento (SANTOS, 2013).

Após a análise visual na amostra a 750 ciclos de fadiga térmica, verificou-se a incidência de trincas na seção longitudinal na parte externa da amostra conforme mostrado na Figura 62.

Figura 62: Detalhe das Trincas Externas na Amostra a 750 Ciclos

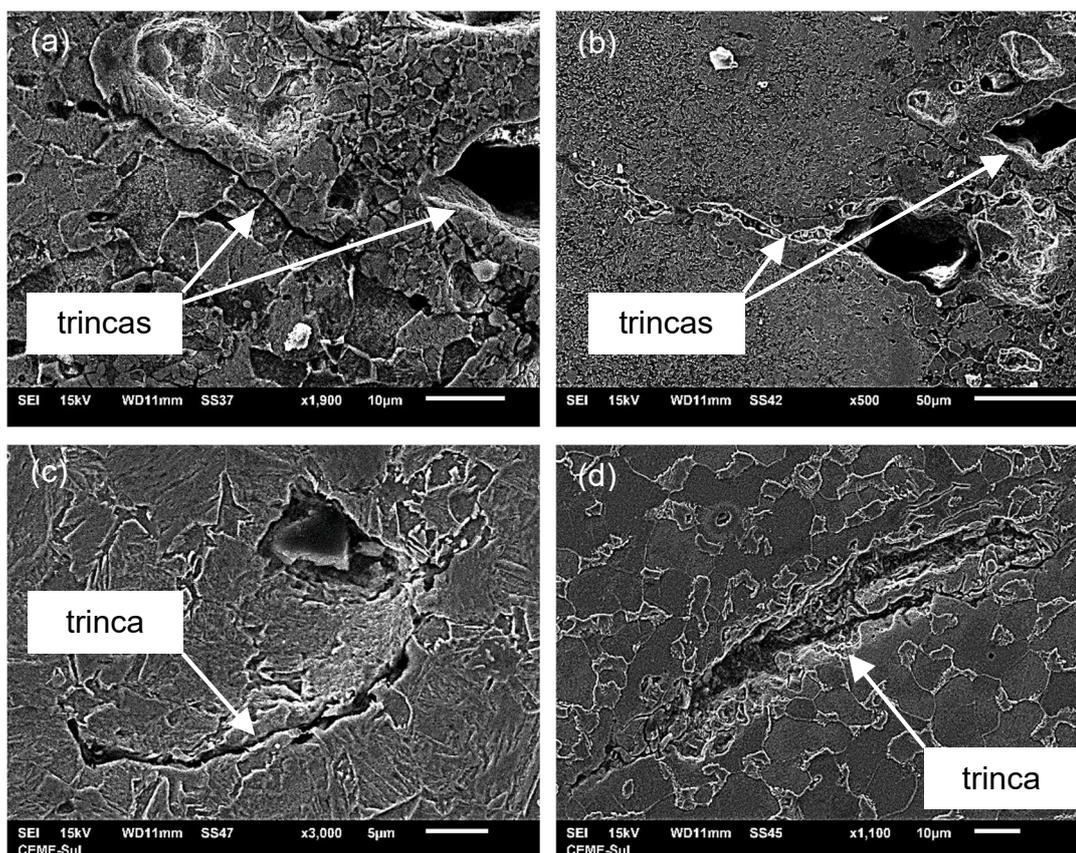


Fonte: Próprio Autor

Assim como na amostra submetida a 250 e 500 ciclos, uma análise mais a fundo da ocorrência das trincas foi realizada para esta condição, 750 ciclos. O surgimento de trincas, são as consequências do carregamento térmico e cíclico (SILVA, 2011). Quando uma estrutura está sujeita à fadiga térmica, normalmente múltiplas trincas iniciam e se propagam (ASAYAMA *et al* 2009). A Figura 62 também mostra uma das trincas verificadas na seção, onde revelou sem ataque químico, somente através do MEV em um aumento de 180x, nota-se que a trinca revelada nesta condição é um defeito mais agravante no material, comparado aos demais ciclos

Verificou-se também para amostra submetida a 750 ciclos de fadiga térmica o indício de trincas internas, avaliando a as seções transversais e longitudinais das amostras, conforme Figura 36 (b) e (c), essas devidamente preparadas e atacadas quimicamente, utilizando o MEV para coleta de imagens, ilustradas na Figura 63.

Figura 63: Detalhe das Trincas Internas na Amostra a 750 Ciclos

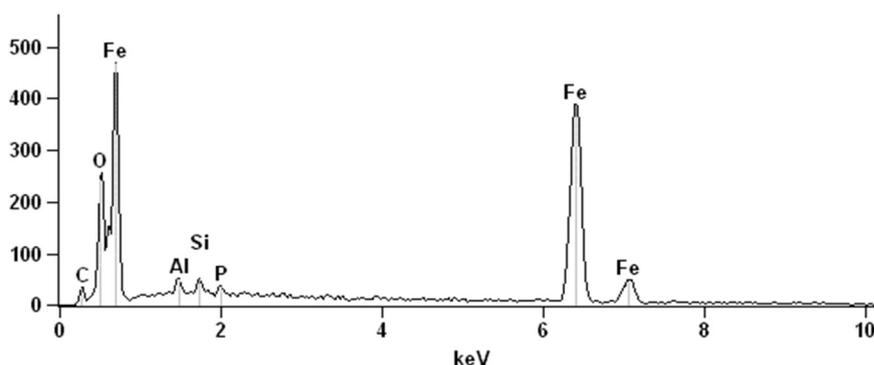


Fonte: Próprio Autor

A Figura 63 (a) e (b) mostra trincas encontradas na microestrutura da amostra submetida a 750 ciclos de fadiga térmica, essas encontradas na seção próxima a superfície diretamente atingida pelos ciclos térmicos, a Figura 63 (c) e (d) mostra a

ocorrência maior de trincas intragranulares, observa-se também que as trincas presentes nessa condição são mais deletérias ao material. Com o auxílio do MEV foram feitos EDS para análise qualitativa dos elementos nas trincas, conforme exibido na Figura 64.

Figura 64: Microsonda – EDS nas Trincas 750 Ciclos



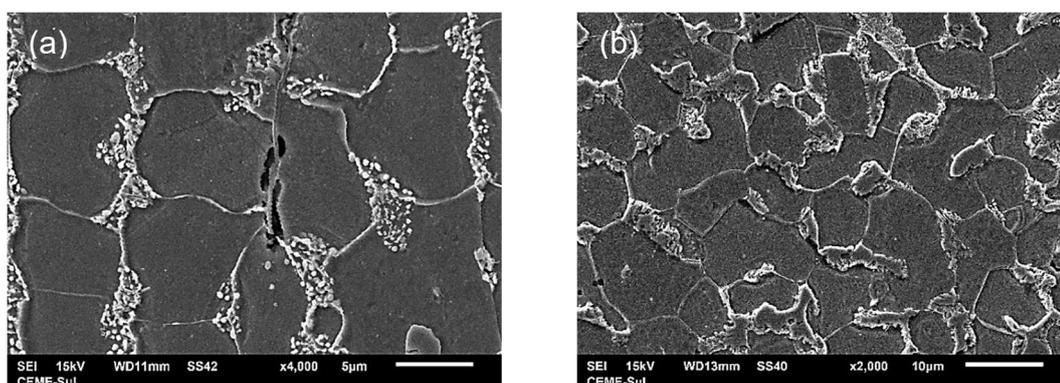
Fonte: Próprio Autor

Assim como nas amostras submetidas a 250 e 500 ciclos, uma análise média por EDS nas pontas das trincas presentes na amostra de 750 ciclos, também foi realizada, observa-se a presença do O, sendo os demais elementos típicos da composição do substrato, como mostra a Figura 64.

5.4 Análise Tamanho de Grão Austenítico

Após aplicar o método de contagem de grão pelo método dos interceptos, teve-se como resultado de tamanho grão austenítico, o de número 12 ASTM, considerado como grãos extrafinos. Imagens dos contornos de grãos são exibidos na Figura 65.

Figura 65: Imagens para Tamanho de Grão ASTM



Fonte: Próprio Autor

A Figura 65 (a) mostra os contornos de grão das amostras submetidas a 250 ciclos de fadiga térmica aumentada 4000x, já na Figura 65 (b) mostra os contornos de grão na amostra submetida a 750 ciclos com aumento de 2000x, tratamentos térmicos promoveram significativo refino de grão na estrutura do aço (ARAÚJO *et al* 2015).

5.5 Análise das Trincas

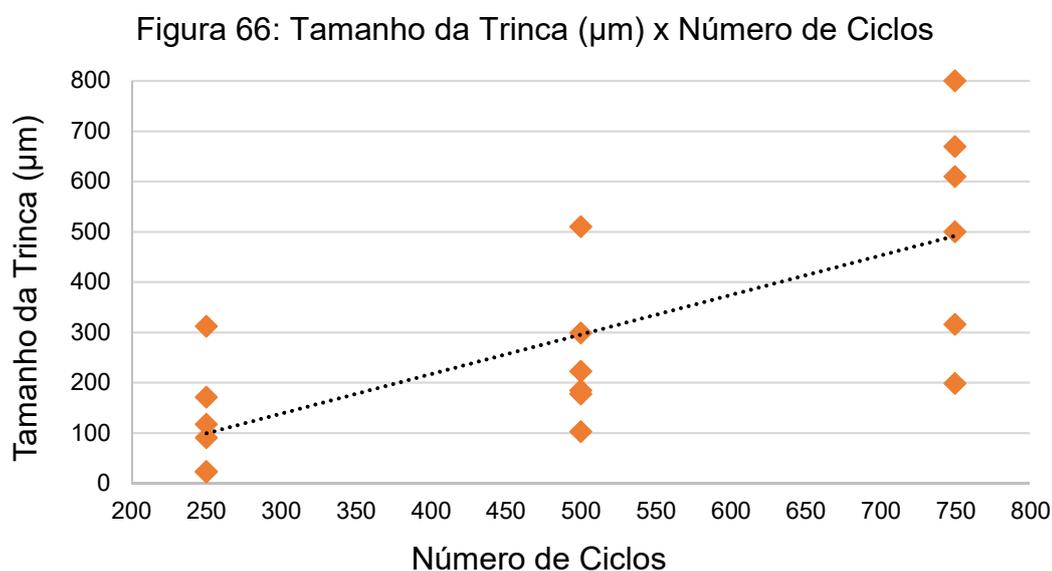
Para analisar a propagação das trincas nas amostras submetidas nos diferentes ciclos de fadiga térmica, 250, 500 e 750 ciclos, foram feitas dez medições das trincas encontradas nas amostras nas diversas imagens coletadas com o auxílio do MEV. A Tabela 12 mostra os valores médios das dez medições do tamanho das trincas para cada condição da amostra.

Tabela 12: Valores Médio do Tamanho das Trincas nas Amostras

Amostra	Tamanho da Trinca (μm)	Desvio Padrão
250 Ciclos	80,7	97,2
500 Ciclos	155,2	161,3
750 Ciclos	330,9	292,6

Fonte: Próprio Autor

Nota-se um aumento dos valores conforme aumenta o ciclo de fadiga térmica (MELLOULI, 2014; CASATI, 2018). Um gráfico de dispersão foi plotado para melhor visualização da evolução das trincas no material, mostrado na Figura 66.



Fonte: Próprio Autor

A Figura 66 mostra o gráfico de dispersão de seis trincas mais relevantes encontradas nas amostras submetidas a 250, 500 e 750 ciclos, ao confrontar os tamanhos das trincas entre os ciclos de fadiga térmica observa-se a tendência do aumento do tamanho da trinca conforme aumenta o número de ciclos de fadiga térmica. Das seis trincas dimensionadas, as de menor comprimento são bem próximas entres os ciclos, a discrepância maior entre os comprimentos é notada nas dimensões de maiores. Ao avaliar o efeito do número de ciclos, com os valores médios das dimensões das dez trincas encontradas nos diferentes ciclos de fadiga térmica, pode-se afirmar que entre 250 a 500 ciclos obteve um aumento no tamanho da trinca de aproximadamente 92,3%, entre 500 e 750 o aumento foi de 113,2%, comparando o menor número de ciclos com o maior, 250 e 750 ciclos, o valor é de aproximadamente 310%.

5.6 Análise Microdureza Vickers Após o Ensaio de Fadiga Térmica

Com o intuito de investigar o efeito dos diferentes ciclos de fadiga térmica no material, foi realizado as medições de microdureza Vickers após os ensaios de 250, 500 e 700 ciclos. Confrontado os perfis de microdureza de cada ciclos, juntamente com o perfil do substrato.

5.6.1 Análise Microdureza Vickers 250 Ciclos

Os valores médios obtidos nas amostras submetidas a 250 ciclos de fadiga térmica foram de 211,8 HV e 240,4 HV nas seções transversal e longitudinal respectivamente. A Tabela 13 mostra também o valor da média geral de microdureza, para 250 ciclo, essa média foi de 226,1 HV com desvio padrão de 63,42.

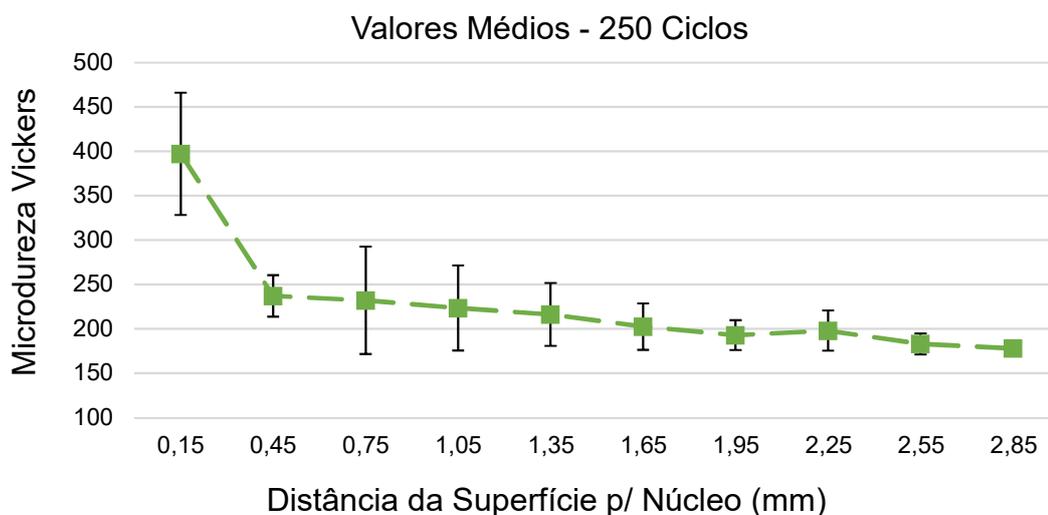
Tabela 13: Microdureza Vickers nas Amostras Submetidas a 250 Ciclos

Seções	Dureza Média (HV)	Desvio Padrão
Transversal	211,8	82,3
Longitudinal	240,4	50,6
Geral	226,1	63,42

Fonte: Próprio Autor

Para uma melhor visualização, um perfil de microdureza da amostra do aço submetida a 250 ciclos foi plotado, mostrado na Figura 67.

Figura 67: Perfil de Microdureza Vickers do Material Submetido a 250 Ciclos



Fonte: Próprio Autor

A Figura 67 mostra o perfil de microdureza, onde este se deu através das médias nas seções transversais e longitudinais, observa - se maiores valores na superfície, de 397 HV, especificamente no ponto a 0,15 mm da superfície. Ocorreu uma queda da microdureza a 0,45 mm da superfície, o valor encontrado neste ponto foi de 237 HV. Para distâncias próximas ao núcleo da amostra, obteve-se valores menores, atingindo o pico mais baixo de 178 HV, localizado a 2,85 mm da superfície.

5.6.2 Análise Microdureza Vickers 500 Ciclos

Para os valores médios obtidos nas amostras submetidas a 500 ciclos de fadiga térmica foram de 247,77 HV e 279,83 HV nas seções transversal e longitudinal respectivamente. A Tabela 14 mostra também o valor da média geral de microdureza, para 500 ciclo, essa média foi de 263,8 HV com desvio padrão de 90,5.

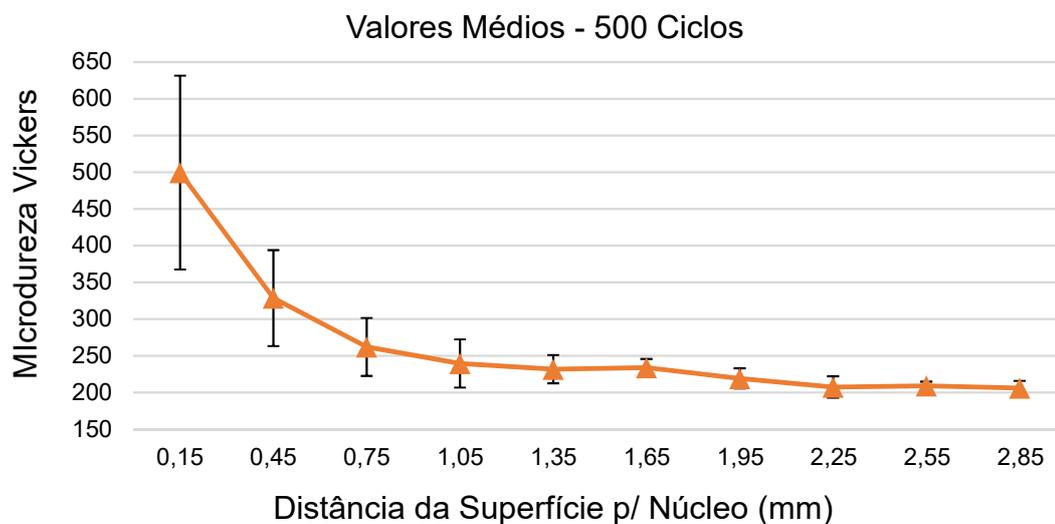
Tabela 14: Microdureza Vickers nas Amostras Submetidas a 500 Ciclos

Seções	Dureza Média (HV)	Desvio Padrão
Transversal	247,77	64,26
Longitudinal	279,83	117,83
Geral	263,8	90,5

Fonte: Próprio Autor

Para uma melhor visualização, um perfil de microdureza da amostra do aço submetida a 500 ciclos foi plotado, mostrado na Figura 68.

Figura 68: Perfil de Microdureza Vickers do Material Submetido a 500 Ciclos



Fonte: Próprio Autor

A Figura 68 mostra o perfil de microdureza, onde foram medidos nas seções transversais e longitudinais, obtendo a média dos valores, assim como no perfil de microdureza de 250 ciclos, observa – se também, maiores valores na superfície, de 500 HV, especificamente no ponto a 0,15 mm da superfície. Ocorreu uma queda da microdureza a 0,45 mm da superfície, o valor encontrado neste ponto foi de 329 HV. Para distâncias próximas ao núcleo da amostra, obteve-se valores menores, atingindo o pico mais baixo de 206 HV, localizado a 2,85 mm da superfície.

5.6.3 Análise Microdureza Vickers 750 Ciclos

Para os valores médios obtidos nas amostras submetidas a 750 ciclos de fadiga térmica foram de 257,7 HV e 299,37 HV nas seções transversal e longitudinal respectivamente. A Tabela 15 mostra também o valor da média geral de microdureza, para 750 ciclo, essa média foi de 278,53 HV com desvio padrão de 71,26.

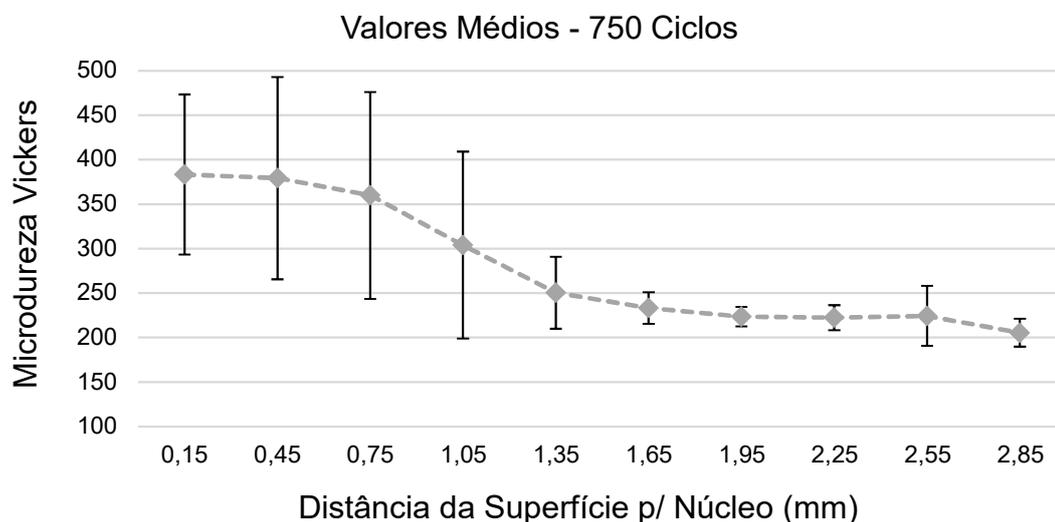
Tabela 15: Microdureza Vickers nas Amostras Submetidas a 750 Ciclos

Seções	Dureza Média (HV)	Desvio Padrão
Transversal	257,7	49,7
Longitudinal	299,37	96,4
Geral	278,53	71,26

Fonte: Próprio Autor

Assim como nos demais ciclos, um gráfico do perfil de microdureza da amostra do aço submetida a 750 ciclos foi plotado, para melhor visualização, ilustrado na Figura 69.

Figura 69: Perfil de Microdureza Vickers do Material Submetido a 750 Ciclos



Fonte: Próprio Autor

Já a Figura 69 mostra o perfil de microdureza, onde foram medidos nas seções transversais e longitudinais, obtendo a média dos valores, assim como no perfil de microdureza de 250 ciclos e 500 ciclos, nota-se, maiores valores na superfície, de 383 HV, especificamente no ponto a 0,15 mm da superfície. Até a distância de 0,75 mm os valores mantiveram-se próximos aos valores encontrados na superfície, a queda da microdureza ocorreu a 1,35 mm da superfície com o valor de 250 HV. Nas distâncias próximas ao núcleo da amostra, obteve-se valores menores, atingindo o pico mais baixo de 205 HV, localizado a 2,85 mm da superfície.

5.6.4 Comparação Microdureza Vickers - CR, 250, 500 e 750 Ciclos

Após o levantamento dos valores médios e dos perfis de microdureza Vickers nas amostras do material como recebido e nas amostras submetidas a 250, 500 e 750 ciclos de fadiga térmica, fez-se necessário o um resumo confrontando os resultados das amostras, para comparar a dureza das amostras após diferentes ciclos de fadiga térmica um gráfico foi plotado (LI *et al* 2018). A Tabela 16 mostra um comparativo dos valores médios de microdureza Vickers para cada condição da amostra.

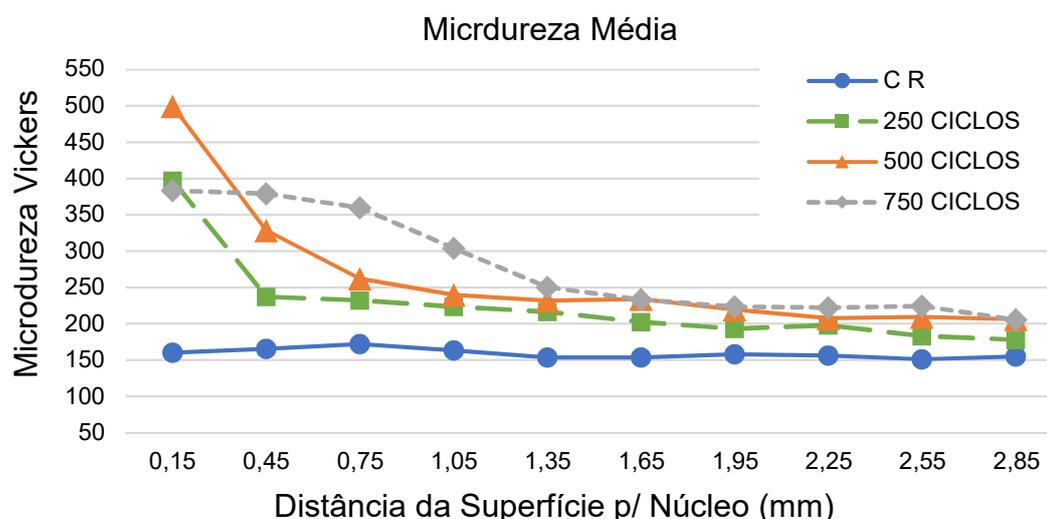
Tabela 16: Valores Médio de Microdureza Vickers nas Amostras

Amostra	Microdureza Vickers	Desvio Padrão
C R	158,92	6,5
250 Ciclos	226,1	63,42
500 Ciclos	263,8	90,5
750 Ciclos	278,53	71,26

Fonte: Próprio Autor

Ao avaliar os valores médios de microdureza encontrados nas diferentes condições da amostra, resultados exibidos na Tabela 16, nota-se um aumento dos valores conforme aumenta o ciclo de fadiga térmica. Um perfil de microdureza foi traçado para melhor visualização, confrontando as amostras do material como recebido e as de diferentes ciclos de fadiga térmica, este mostrado na Figura 70.

Figura 70: Comparativo do Perfil de Microdureza Vickers



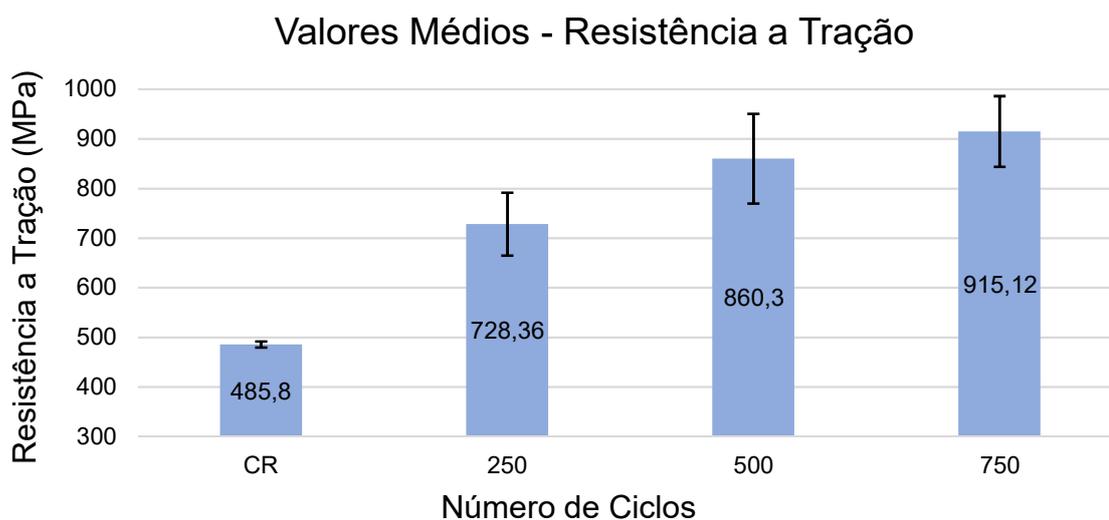
Fonte: Próprio Autor

Ao comparar os valores de microdureza, nota-se maiores valores na superfície, no ponto a 0,15 mm da superfície encontrou-se valores maiores para 250 e 500 ciclos, 397 HV e 500 HV respectivamente, para tais valores altos, pode ter ocorrido a indentação em alguma Martensita não revenida presente em todas as amostras analisadas em sua microestrutura, para 750 ciclos encontrou o valor de 383 HV, nos demais pontos houve uma redução dos valores, aproximando com os valores do material como recebido. Maiores valores de microdureza foram encontrados na ZAC, devido ao refino de grão e da mudança da microestrutura (LIM *et al* 2016). O ensaio

de fadiga térmica observou-se um aumento da microdureza comparado com o material como recebido, conforme o número de ciclos aumenta a microdureza aumenta (ROA *et al* 2016). Outro fator que pode ter contribuído para o aumento da dureza, foi a taxa de resfriamento que ocorreu no ensaio, a dureza aumenta de acordo que a taxa de resfriamento aumenta (ZHANG *et al* 2006). Altas velocidades de resfriamento para variação de temperatura entre 800 °C e 500 °C em um tempo menor que 9,0 segundos, podem-se formar estruturas com dureza superior (RIBEIRO, 2001).

Ao correlacionar os valores médios de microdureza das amostras submetidas a 250, 500 e 750 ciclos de fadiga térmica, com os respectivos valores de resistência a tração conforme ASTM E140, foi possível plotar um gráfico para uma melhor visualização dos resultados, assim ilustrado na Figura 71.

Figura 71: Resistência a Tração (MPa) x Número de Ciclos



Fonte: Próprio Autor

É possível observar uma evolução na resistência a tração, nota-se um aumento dos valores conforme aumenta o ciclo de fadiga térmica, a Figura 71 mostra o resultado do ensaio de tração efetuado no material como recebido (CR) e os valores de resistência a tração de acordo com o valor médio de microdureza Vickers para cada condição da amostra após ensaio de fadiga térmica.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou os aspectos metalúrgicos do aço ASTM SA – 516 Gr 60 submetido à fadiga térmica, aço comumente utilizado na fabricação de caldeiras, após os ensaios em diferentes ciclos de fadiga térmica, avaliou os resultados de cada ciclo e confrontou entre si e com o material sem ser submetido a tal ensaio, assim é possível concluir que:

- O equipamento desenvolvido para o ensaio de fadiga térmica apresentou autonomia e ótimo compromisso em relação ao aquecimento, resfriamento e contagem dos ciclos, assim contribuindo com a pesquisa;
- Verificou que o aço ASTM SA – 516 Gr 60, apresentou nenhuma não conformidade que influenciou os resultados do ensaio de fadiga térmica, certificou que sua composição química e sua resistência a tração atendeu as especificações da norma ASME, apresentou tamanho de grão 9 ASTM E112-13, uma média de microdureza de 158,92 HV e sua microestrutura é composta de Ferrita e Perlita;
- Após os ciclos de fadiga térmica avaliou os aspectos metalúrgicos e as propriedades mecânicas das amostras, onde verificou uma transformação em sua microestrutura, detectou-se a presença de colônias de Perlita e junto a superfície Martensita não revenida. Em todas as regiões verificou recuperação dinâmica, seguida de recristalização originando tamanho de grão austenítico 12 ASTM, considerado grãos extrafinos, comparando com o substrato, nota-se um refino de grão.
- Houve um aumento de dureza para as amostras submetidas aos ciclos de fadiga térmica comparado ao substrato, onde os maiores valores de microdureza se deu na superfície afetada pelo ensaio, devido ao aquecimento na zona intercrítica e de austenitização e o resfriamento brusco com água originando Martensita, e mais ao núcleo da amostra os valores são próximos ao do substrato. Ao correlacionar os valores médios de microdureza com a resistência a tração de acordo com a ASTM E140 observou-se um aumento dos valores desta propriedade conforme aumenta o número de ciclos de fadiga térmica.

- Ao verificar os efeitos da fadiga térmica no material, tanto macro como microscopicamente, observou-se que as falhas surgiram nos primeiros 250 ciclos, as trincas superficiais originaram das várias transformações martensíticas devido à alta temperatura e resfriamento brusco com água ciclicamente, juntamente com esse efeito, observou-se oxidação a alta temperatura, contribuindo para nucleação das trincas;
- Ao confrontar com os demais ciclos, notou que quando aumenta o número de ciclos o tamanho da trinca aumenta. Ao comparar a média do tamanho das trincas encontrada nas amostras obteve um aumento de aproximadamente 310% entre a amostra submetida a 250 ciclos com a amostra submetida a 750 ciclos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de contribuir com a continuidade da pesquisa, estão listadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Melhorias no projeto do equipamento para ensaio de fadiga térmica, possibilitando melhor controle da temperatura, entre outras;
- Utilizar outros aços aplicados na fabricação de caldeiras, aços contendo teores elevados de Ni-Cr;
- Pesquisar sobre o efeito da oxidação a alta temperatura nos componentes das caldeiras;
- Pesquisar algum tipo de tratamento térmico ou termoquímico que possa retardar o efeito de fadiga térmica;
- Avaliar as tensões residuais causadas pelo efeito da fadiga térmica nos aços utilizados em caldeiras.

REFERÊNCIAS

ABE, F. Precipitate design for creep strengthening of 9% Cr tempered martensitic steel for ultra-supercritical power plants. **Science and Technology of Advanced Materials**, v. 9, n. 1, p. 1-15, 2008.

AHMAD, E. *et al.* Effect of Martensite Morphology on Tensile Deformation of Dual-Phase Steel. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 21, n. 3, p. 382–387, 2012.

ALIPOUR, Y.; HENDERSON, P.; SZAKA'LOS, P. The effect of a nickel alloy coating on the corrosion of furnace wall tubes in a waste wood fired power plant. **Materials and Corrosion**, v. 65, n. 2, p. 217-225, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E112-13**, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, 2014.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Section II Part A**, Ferrous Materials Specifications, 2004.

ARAÚJO, L. C. S. *et al.* Avaliação da Influência de Tratamentos Térmicos Pós-Soldagem Sobre a Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Juntas de um Aço API 5L X70Q. **Soldagem & Inspeção**, v. 20, n. 2, p. 171-179, 2015.

ASAYAMA, T.; TAKASHO, H.; KATO, T. Probabilistic Prediction of Crack Depth Distributions Observed in Structures Subjected to Thermal Fatigue. **Journal of Pressure Vessel Technology**, v. 131, p. 1-9, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6892-1**, Materiais metálicos - Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente, 2013.

BALA, N. *et al.* Performance of cold sprayed Ni-20Cr and Ni-50Cr coatings on SA 516 steel in actual industrial environment of a coal fired boiler. **Materials and Corrosion**, v. 64, n. 9, p. 783-793, 2013.

BARBOSA, C.; BARROS, S. K. Failure Analysis of an Aqua Tubular Boiler Tube. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v. 12, n. 6, p. 654–659, 2012.

BARBOSA, U. **EFEITOS DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS DE NORMALIZAÇÃO, RESFRIAMENTO RÁPIDO E ALÍVIO DE TENSÕES NO AÇO ASTM A-516 GRAU 70, UTILIZADO NA FABRICAÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UNESP. Guaratinguetá, p. 108. 2007.

BRANDIM, A. S.; SOUSA, R. R. M.; ALVES JR, C. Desenvolvimento de um equipamento para ensaio de fadiga térmica. **Revista Matéria**, v. 14, n. 1, p. 749–758, 2009.

CARDOSO, M. D. **Comportamento e Mecanismos de Falha à Fluência em Aços P91 e Juntas Soldadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA. Lisboa, p. 120. 2009.

CASATI, R.; FACCIN, R.; VEDANI, M. Microstructural evolution and thermal fatigue resistance of grey cast iron. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 41, n. 1, p. 99–110, 2018.

CONG, D. *et al.* Thermal fatigue resistance of hot work die steel repaired by partial laser surface remelting and alloying process. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 54, p. 55–61, 2014.

DUARTE, C. A.; ESPEJO, E.; MARTINEZ, J. Failure analysis of the wall tubes of a water-tube boiler. **Engineering Failure Analysis**, v. 79, p. 704-713, 2017.

FONTENELLE, M. *et al.* Evaluation of Corrosion Caused by the use of In Natura Biogas in Steam Generator Boilers of Carbon Steel Structural Elements. **Materials Research**, v. 20, n. 3, p. 725-735, 2017.

GONG, Y.; ZHONG, ; YANG, Z.-G. Failure analysis of bursting on the inner pipe of a jacketed pipe in a tubular heat exchanger. **Materials and Design**, v. 31, n. 9, p. 4258–4268, 2010.

HAMDANI, F.; SHOJI, T. Development of Heat-resistant Fe-based Alloys for A-USC Steam Boiler using Ultra-high Purity (UHP) Technology. **Corrosion Science**, v. 144, p. 89-96, 2018.

JIA, Z.-X. *et al.* Crack growth behavior at thermal fatigue of H13 tool steel processed by laser surface melting. **International Journal of Fatigue**, v. 78, p. 61–71, 2015.

JÚNIOR, Á. A. **Avaliação Experimental dos Efeitos da Fadiga Térmica nas Propriedades Mecânicas de um Aço Inoxidável**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - UFMG. Belo Horizonte, p. 129. 2006.

KLOBCAR, D.; TUSEK, J.; TALJAT, B. Thermal fatigue of materials for die-casting tooling. **Materials Science and Engineering: A - Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing**, v. 472, n. 1-2, p. 198–207, 2008.

KODUR, V. V.; AZIZ, E. M. Effect of temperature on creep in ASTM A572 high-strength low-alloy steels. **Materials and Structures**, v. 48, p. 1669–1677, 2015.

KONG, X. *et al.* Optimization of mechanical properties of high strength bainitic steel using thermo-mechanical control and accelerated cooling process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 217, p. 202–210, 2015.

KUMAR, M. M. *et al.* Effect of steamside oxidation and fireside corrosion degradation processes on creep life of service exposed boiler tubes. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 144, p. 45-48, 2016.

LI, J.; SHI, Y.; WU, X. Effect of initial hardness on the thermal fatigue behavior of AISI H13 steel by experimentals and numerical investigations. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 41, n. 6, p. 1-15, 2018.

LIM, Y. C. *et al.* Fabrication of thick multilayered steel structure using A516 Grade 70 by multipass friction stir welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 21, n. 7, p. 564-569, 2016.

LIU, Q. *et al.* Effect of Multistage Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of High-Strength Low-Alloy Steel. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 47, p. 1960-1974, 2016.

MASUYAMA, F. History of Power Plants and Progress in Heat Resistant Steel. **ISIJ International**, v. 41, n. 6, p. 612–625, 2001.

MELLOULI, *et al.* Hardness effect on thermal fatigue damage of hot-working tool steel. **Engineering Failure Analysis**, v. 45, p. 85–95, 2014.

MOOJEN, G. *et al.* Efeitos da Taxa de Resfriamento na Soldagem do Aço API 5L-X80. **Soldagem & Inspeção**, v. 20, n. 1, p. 68-80, 2015.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7°. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MUNDA, P. *et al.* Evolution of Microstructure During Short-term Overheating Failure of a Boiler Water Wall Tube Made of Carbon Steel. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v. 18, n. 1, p. 199–211, 2018.

NILSSON, K.-F. *et al.* Assessment of thermal fatigue life for 316L and P91 pipe components at elevated temperatures. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 168, p. 73–91, 2016.

NORMA REGULAMETADORA. **NR 13**, Caldeiras, Vasos de Pressão, Tubulações e Tanques de Armazenamento, 2018.

PERA, H. **Geradores de vapor: Um Compêndio Sobre a Conversão da Energia Com Vistas à Preservação Ecológica**. 2°. ed. São Paulo: Fama, 1990.

PERAGALLO, R. **Geradores de Vapor**. São Paulo: Libris, 1995.

QAYYUM, *et al.* 3D numerical simulation of thermal fatigue damage in wedge specimen of AISI H13 tool steel. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 180, p. 240–253, 2017.

RIBEIRO, H. O. **SOLDAGEM DO AÇO ASTM A 516 GRAU 60 PARA VASO DE PRESSÃO SUJEITO À CORROSÃO SOB TENSÃO**. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Florianópolis, p. 91. 2001.

ROA, J. J. *et al.* Phase transformation under thermal fatigue of high Mn-TWI Psteel: Microstructure and mechanical properties. **Materials Science and Engineering: A - Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing**, v. 677, p. 431–437, 2016.

SANTOS, I. M. C. **Elaboração de um Diagrama TAC para um Aço de Alta Tenacidade API X-70**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, p. 95. 2013.

SHAHZAD, M. *et al.* The effects of martensite morphology on mechanical properties, corrosion behavior and hydrogen assisted cracking in A516 grade steel. **Materials Research Express**, v. 5, n. 1, p. 1-10, 2018.

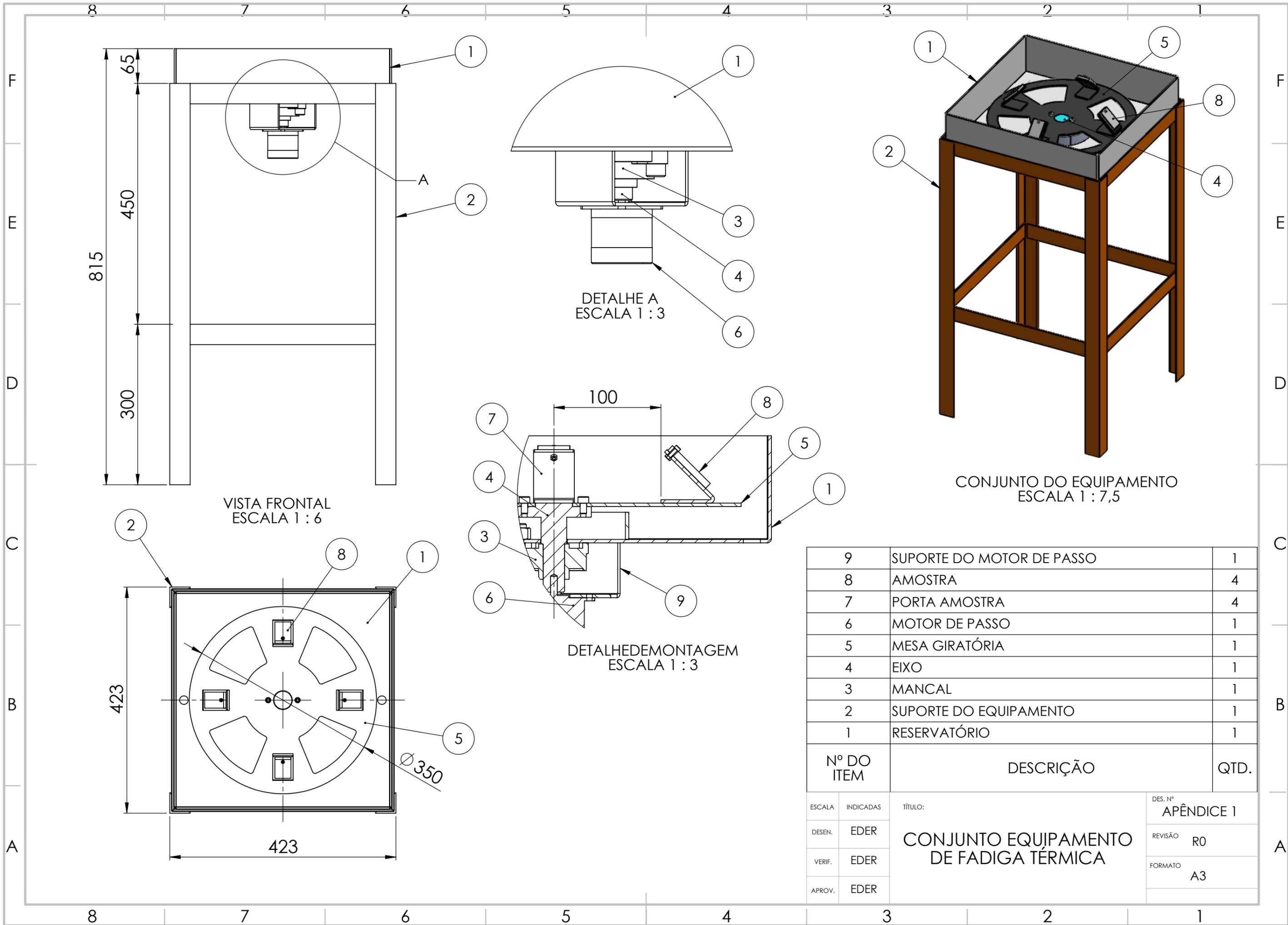
SILVA, L. L.; MANSUR, T. R.; JUNIOR, C. A. C. Thermal fatigue damage evaluation of a PWR NPP steam generator injection nozzle model subjected to thermal stratification phenomenon. **Nuclear Engineering and Design**, v. 241, p. 672–680, 2011.

TONG, X.; DAIA, M.-J.; ZHANG, Z.-H. Thermal fatigue resistance of H13 steel treated by selective laser surface melting and CrNi alloying. **Applied Surface Science**, v. 271, p. 373–380, 2013.

VETRISILVAN, R.; SATHIYA, P.; RAVICHANDRAN, G. Experimental and numerical investigation on thermal fatigue behaviour of 9Cr 1Mo steel tubes. **Engineering Failure Analysis**, v. 84, p. 139–150, 2018.

VISWANATHAN, R.; BAKKER, W. Materials for Ultrasupercritical Coal Power Plants—Boiler Materials: Part 1. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 10, n. 1, p. 81-95, 2001.

ZHANG, M. *et al.* Continuous cooling transformation diagrams and properties of micro-alloyed TRIP steels. **Materials Science and Engineering A**, v. 438–440, p. 296–299, 2006.



VISTA FRONTAL
ESCALA 1 : 6

DETALHE A
ESCALA 1 : 3

DETALHE DE MONTAGEM
ESCALA 1 : 3

CONJUNTO DO EQUIPAMENTO
ESCALA 1 : 7,5

9	SUPORE DO MOTOR DE PASSO	1
8	AMOSTRA	4
7	PORTA AMOSTRA	4
6	MOTOR DE PASSO	1
5	MESA GIRATÓRIA	1
4	EIXO	1
3	MANCAL	1
2	SUPORE DO EQUIPAMENTO	1
1	RESERVATÓRIO	1
Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.

ESCALA	INDICADAS	TÍTULO:	DES. Nº
DESEN.	EDER	CONJUNTO EQUIPAMENTO DE FADIGA TÉRMICA	APÊNDICE 1
VERIF.	EDER		REVISÃO
APROV.	EDER		R0
			FORMATO
			A3

APÊNDICE 2 – INTERFACE SOFTWARE ARDUINO

The screenshot displays the Arduino IDE interface. The top window shows the sketch code for 'ProgramaMotorPassoEderMcFinal'. The code includes pin definitions for digital outputs (10, 13, 9600), a while loop to wait for the serial port to connect, and a main loop that prints heating and cooling cycles. The serial monitor at the bottom shows the output of the program, displaying a sequence of heating and cooling cycles from 1 to 32.

```
void setup() {  
  // put your setup code here, to run once:  
  pinMode(10, OUTPUT);  
  pinMode(13, OUTPUT);  
  Serial.begin(9600);  
  while (!Serial) {  
    ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only  
  }  
  delay(100);  
  Serial.println("Digite o número de ciclos: ");  
  Serial.flush();  
}  
  
int i = 0, j = 0, cont = 0, n_passo1 = 100, n_passo2 = 99, n_rep;  
long int delay_time=61000;  
String num_rep;  
void loop() {  
  if (Serial.available() > 0) {  
    num_rep = Serial.readString();  
    n_rep = num_rep.toInt();  
    Serial.println("Iniciando ciclo...");  
    for (cont; cont < n_rep; cont++) {  
      Serial.print(cont + 1);  
      Serial.print(" de ");  
      Serial.print(n_rep);  
    }  
  }  
}
```

COM3 (Arduino/Genuino Uno)

Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

ProgramaMotorPassoEderMcFinal

19

Autrolagem Show timestamp

19

Arduino/Genuino Uno em COM3

COM3 (Arduino/Genuino Uno)

19

Autrolagem Show timestamp

19

Arduino/Genuino Uno em COM3

Fonte: Próprio Autor

APÊNDICE 3 – RELATÓRIO DO ENSAIO DE FADIGA TÉRMICA

RELATÓRIO ENSAIO FADIGA TÉRMICA			
750 CICLOS			
TESTE	DIA	TEMP. °C	Nº DE CILCOS
1	04/out	600 -700	40
2	05/out	600 -700	44
3	08/out	600 -700	51
4	09/out	600 -700	130
5	10/out	600 -700	150
6	11/out	600 -700	120
7	16/out	600 -700	120
8	17/out	600 -700	95
TOTAL			750
250 CICLOS			
TESTE	DIA	TEMP. °C	Nº DE CILCOS
9	18/out	600 -700	50
10	22/out	600 -700	60
11	08/nov	600 -700	50
12	09/nov	600 -700	90
TOTAL			250
500 CICLOS			
TESTE	DIA	TEMP. °C	Nº DE CILCOS
13	09/nov	600 -700	60
14	12/nov	600 -700	150
15	13/nov	600 -700	150
16	14/nov	600 -700	140
TOTAL			500

Fonte: Próprio Autor

ANEXO A – CERTIFICADO DO AÇO ASTM SA-516 Gr 60

USIMINAS U USINAS SIDERÚRGICAS DE MINAS GERAIS S.A. USINA ATENDENTE CAMARA - IPATINGA/MG/BRASIL R. PROF. JOSE VIEIRA DE MENDONÇA, 3011 BARRIO ENGENHO NOGUEIRA - CP 806 - CEP: 31310-260 IPATINGA - MG - BRASIL INSCRIÇÃO ESTADUAL: 313.002022-0120		CERTIFICADO DE INSPEÇÃO INSPECTION CERTIFICATE CHAPA GROSSA DO LCG STEEL PLATE		Cliente-Customer: BENAFER S/A COMERCIO E INDUSTRIA Nota Fiscal Commercial Invoice 1 003535254 1 Ordem de Venda Sales Order Nº Item 00391716 45 Data de Emissão Date of Issue 25/02/2017 Nº Certificado Certificate Nº 3973610	
Tolerâncias - Tolerances Espessura-Thickness Largura-Width Comprimento-Length -0,25/+0,76 mm -0,00/+160,00mm -0,00/+25,00mm		Folha - Sheet = 1 Aparência Superficial - Surface Appearance SUPERFICIE COMERCIAL COMMERCIAL SURFACE		Folhas por Pacote Sheets per Package 45	
Dimensões Nominais - Nominal Dimensions 6,30 x 2440 x 12000 mm		Borda - Edge / Oleamento - Oiling NAO APARADA E NAO OLEADA MILL EDGE AND DRY		Pesar por Volume Pieces per Packages Net Weight Gross Weight 232 835349193 1600 211 835349224 1	
Placa Volume Slab 221 835349107 1600 222 835349132 1610		Peso Líquido Net Weight 1600 1610		Corrida Heat 139203 49049248 139203 49049250	
Peso Líquido Real Total-Actual Net Weight = 6.390 Tonelagem Pesar Bruto Real Total-Actual Gross Weight = 6.390 Tonelagem		Pesar Bruto Gross Weight 1600 1610		Pesar Líquido Net Weight 1600 1610	
Ensaio de Tensão - Tensile Test Amostra Pos Dir IE IR LE/IR(%) AL(%) 49049224 BB C 360 ✓ 468 ✓ 77 28 49049248 BB C 348 ✓ 485 ✓ 72 30 49049250 BB C 355 ✓ 485 ✓ 73 30 49049273 BB C 344 ✓ 484 ✓ 71 23		Pesar por Volume Pieces per Packages Net Weight Gross Weight 232 835349193 1600 211 835349224 1		Pesar Bruto Gross Weight 1600 1610 1580 139203 49049224	
Unidade-Unit = N/mm² Método de Ensaio LE-Test Method YS = 0,2% BM = 200 mm Larga = 38,1 mm S = Retanular		Composição Química (%) - Chemical Composition (%) C ✓ Si ✓ Mn ✓ P ✓ S ✓ 0,16 0,24 0,79 0,013 0,009 0,033 0,01		Pesar Líquido Net Weight 1600 1610	
Corrida Análise Heat Analysis 139203 # P		Pesar Bruto Gross Weight 1600 1610		Corrida Heat 139203 49049248 139203 49049250	
Fórmula do Carbono Equivalente - Carbon Equivalent Formula A = C+Mn/6		Pesar Líquido Net Weight 1600 1610		Corrida Heat 139203 49049248 139203 49049250	
Condição de Fornecimento - Supply Condition COMO LAMINADO - AS ROLLED ✓		Pesar Bruto Gross Weight 1600 1610		Corrida Heat 139203 49049248 139203 49049250	
Abreviaturas - Abbreviations IE = Limite de Escoamento - YS = Yield Strength AL = Alongamento - El. = Elongation BM = Transversal-Transverse BB = Base no Bordo-Edge Larga = Largura-Width P = Parcela-Ladle		Pesar Líquido Net Weight 1600 1610		Corrida Heat 139203 49049248 139203 49049250	
Abreviaturas - Abbreviations IR = Limite de Resistência - TS = Tensile Strength Dir = Direção-Direction Pos = Posição de Amostragem-Sampling Position BM = Base Medida-Gauge Length S = Seção Transversal-Cross Section Al = Alumínio Total-Total Aluminum		Pesar Bruto Gross Weight 1600 1610		Corrida Heat 139203 49049248 139203 49049250	



Reviewed
 Witnessed
Hartford
Steam
Boiler
 15197
HSB

Observações - Remarks
 PEDIDO MG 01/17
 FDS - Ficha de Dados de Segurança do Produto número 03, disponível na Extranet da Usiminas
 MSDS - Material Safety Data Sheet N° 03 available at Usiminas Extranet

Helber Luiz Oliveira Ribeiro
 helber@usiminas.com.br
 55(51) 3025-3215
 GERENTE GERAL, CONTROLE INTEGRADO DE QUALIDADE
 INTEGRATED QUALITY CONTROL GENERAL MANAGER

VISTORIADOR
 SURVEYOR