

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA FALHA E PROPOSIÇÃO DE UM PLANO DE INSPEÇÃO E TESTES
PARA TROCADORES DE CALOR EVAPORATIVOS UTILIZADOS EM SISTEMAS
DE REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

LEANDRO NUNES COELHO

RIO GRANDE, RS

2020

LEANDRO NUNES COELHO

**ESTUDO DA FALHA E PROPOSIÇÃO DE UM PLANO DE INSPEÇÃO E TESTES
PARA TROCADORES DE CALOR EVAPORATIVOS UTILIZADOS EM SISTEMAS
DE REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica” – Área de Concentração: Engenharia de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. LUCIANO VOLCANOGLO BIEHL

RIO GRANDE, RS

2020

Ficha Catalográfica

C672e Coelho, Leandro Nunes.

Estudo da falha e proposição de um plano de inspeção e testes para trocadores de calor evaporativos utilizados em sistemas de refrigeração industrial / Leandro Nunes Coelho. – 2020.

79 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2020.

Orientador: Dr. Luciano Volcanoglo Biehl.

1. Amônia 2. Integridade Estrutural 3. Inspeção I. Biehl, Luciano Volcanoglo II. Título.

CDU 621.56

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



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



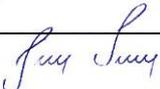
Ata nº **15/2020** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e oito dias do mês de dezembro de dois mil e vinte, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às quatorze horas, via Videoconferência, a que se submeteu o mestrando **LEANDRO NUNES COELHO**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de Soldagem e Materiais do PPMec, com o seguinte título: **ESTUDO DA FALHA E PROPOSIÇÃO DE UM PLANO DE INSPEÇÃO E TESTES PARA TROCADORES DE CALOR EVAPORATIVOS UTILIZADOS EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL.**

Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores Luciano Volcanoglo Biehl, Jorge Luis Braz Medeiros e Jose de Souza. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Luciano Volcanoglo Biehl: _____ **APROVADO** _____.
2. Jorge Luis Braz Medeiros: _____ **APROVADO** _____.
3. Jose de Souza: _____ **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. _____ 
CPF: 575.195.100-00
2. _____ 
CPF: 588.871.210-87
3. _____ 
CPF: 914.626.140-00
- LEANDRO NUNES COELHO: _____  _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meu pais que sempre me apoiaram e incentivaram a ser uma pessoa melhor, e ao meu filho que foi a minha grande inspiração para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

O estudo das falhas de integridade estrutural, aliado com a necessidade de evolução dos padrões de fabricação e aceite técnico de equipamentos envolvendo refrigeração industrial por amônia no Brasil, vem se tornando uma necessidade em função dos graves acidentes envolvendo vazamentos de amônia e suas consequências para os colaboradores, perda de produtividade e repercussão na sociedade. O objetivo desta pesquisa foi estudar a falha ocorrida em um trocador de calor tipo evaporativo utilizado em sistemas de refrigeração industrial, de uma grande agroindústria, por meio da caracterização dos materiais empregados na sua fabricação e na análise das suas uniões soldadas, para identificar se a falha ocorreu em função dos materiais empregados, ou se houve alguma falha no processo de fabricação que contribuiu para o evento, e propor um plano de inspeção e testes, aplicado na etapa de fabricação para garantir a qualidade da fabricação e por consequência a segurança operacional. A metodologia utilizada foi a retirada da amostra do conjunto coletor – feixe tubular do equipamento, e após isso foram divididas em mais duas amostras uma do feixe tubular e outra do coletor composto por chapa conformada – chapa plana para a realização de quatro tipos de ensaio, espectrometria ótica, metalografia, tração e análise macrográfica para identificar se os materiais empregados ou os procedimentos de fabricação contribuíram para a falha do equipamento e após isso propor um plano de inspeção e teste capaz de bloquear as possíveis causas desta falha. Os resultados desta pesquisa indicaram que as propriedades mecânicas estavam de acordo com as normativas aplicadas para materiais empregados na fabricação de equipamentos sujeitos a pressão interna, já o ensaio metalúrgico de metalografia realizado, indicou falhas construtivas e defeitos de soldagem que ocasionaram a falha do equipamento. E em relação ao plano de inspeção e teste proposto neste trabalho, composto por um roteiro sistemático de checagem baseado em normas, documentações de projetos, certificação de materiais, qualificação do pessoal envolvido na fabricação e em conjunto ensaios não destrutivos aplicado durante o processo de fabricação, foi um diferencial deste trabalho, porque permitiu identificar e bloquear as causas da falha apresentadas e evoluir o padrão técnico aceitável de equipamentos para refrigeração por meio de amônia para a agroindústria no Brasil.

Palavras-chave: Amônia; Integridade Estrutural; Inspeção.

ABSTRACT

The study of structural integrity failures, coupled with the need to evolve manufacturing standards and technical acceptance of equipment involving industrial ammonia refrigeration in Brazil, has become a necessity due to the serious accidents involving ammonia leaks and their consequences for employees, productivity losses and repercussions on society. The objective of this research was to study the failure that occurred in an evaporative type heat exchanger used in industrial refrigeration systems, of a large agroindustry, through the characterization of the materials used in its manufacture and in the analysis of its welded joints, to identify whether the failure occurred due to the materials used, or if there was any failure in the manufacturing process that contributed to the event, and to propose an inspection and testing plan, applied in the manufacturing stage to guarantee the quality of the manufacturing and consequently the operational safety. The methodology used was to take the sample from the collector set - tubular bundle of the equipment, and after that, two samples were divided, one from the tubular bundle and the other from the collector composed of shaped plate - flat plate to perform four types of tests, optical spectrometry, metallography, traction and macrographic analysis to identify whether the materials used or the manufacturing procedures contributed to the equipment failure and after that propose an inspection and test plan capable of blocking the possible causes of this failure. The results of this research indicated that the mechanical properties were in accordance with the standards applied to materials used in the manufacture of equipment subject to internal pressure, whereas the metallurgical macrography test carried out, indicated constructive flaws and welding defects that caused the equipment to fail. And in relation to the inspection and test plan proposed in this work, consisting of a systematic check list based on standards, project documentation, material certification, qualification of the personnel involved in the manufacture and together non-destructive tests applied during the manufacturing process, was a differential of this research, because it allowed to identify and block the causes of the failure presented and to evolve the acceptable technical standard of equipment for refrigeration by means of ammonia for the agribusiness in Brazil.

Keywords: Ammonia; Structural Integrity; Inspection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Terminologia da soldagem	20
Figura 2 - Ângulo do chanfro e bisel.....	20
Figura 3 - Terminologia da soldagem	21
Figura 4 - Tipos de uniões soldadas	22
Figura 5 - Ensaio de líquido penetrante	23
Figura 6 - Peça contendo trinca superficial dando origem ao campo de fuga	24
Figura 7 - Ensaio Macrográfico	26
Figura 8 - Macrografia mostrando a presença de porosidade na forma esférica num cordão de solda em AISi (a) e microporosidade entre os ramos dentrícios no mesmo cordão (b).....	29
Figura 9 - Porosidade vermicular com direção e crescimento da raiz para o reforço (a) e porosidade agrupada (b).....	29
Figura 10 - Estrutura analítica experimental proposta.....	33
Figura 11 - Vista geral de um trocador de calor tipo evaporativo	34
Figura 12 - Vista geral das serpentinas do trocador de calor	34
Figura 13 - Coletor de amônia do trocador de calor evaporativo.....	35
Figura 14 - Identificação do local da falha em vermelho	35
Figura 15 - Amostra do bloco de serpentinas para caracterização do material.....	36
Figura 16 – Regiões de remoção das amostras e análises: (A) Região realizada a espectrometria e em (B), região para análise metalográfica e tração.	38
Figura 17 - Secção transversal da amostra S-57512	41
Figura 18 - Secção longitudinal da amostra S-57512.....	41
Figura 19 - Micrografia da amostra S-57512 – Meia espessura.....	42
Figura 20 - Micrografia da amostra S-57512 – Meia espessura – Seção longitudinal.....	43
Figura 21 - Macrografia da amostra S-57512 – Tubo – Perfil superfície interna	43
Figura 22 - Macrografia da amostra S-57512 – Tubo – Perfil da superfície externa .	44
Figura 23 - Macrografia da amostra S-57512 – Costura do tubo	45
Figura 24 - Corpos de prova para os ensaios mecânicos de tração	46
Figura 25 – Coletor chapa conformada – chapa plana.....	48
Figura 26 - Chapa plana.....	48
Figura 27 - amostra removida da chapa conformada S 57517.....	51

Figura 28 - Macrografia da amostra S-57517 – 100X	52
Figura 29 - Macrografia da amostra S-57517 – Chapa conformada a meia espessura	52
Figura 30 - Macrografia da amostra S-57517 - Perfil da superfície externa	53
Figura 31 - Macrografia da amostra S-57517 – Perfil da superfície interna	54
Figura 32 - Amostra removida da chapa pana S 57526	54
Figura 33 - Macrografia da amostra S-57526 – Meia espessura - 100X	55
Figura 34 - Macrografia da amostra S-57526 – Meia espessura - 400X	55
Figura 35 - Macrografia da amostra S-57526 – Superfície externa – 400X.....	56
Figura 36 - Macrografia da amostra S-57526 – Superfície externa – 400X	57
Figura 37 - Chapa conformada – Corpos de prova usinados para os ensaios mecânicos de tração.	58
Figura 38 - Componente na condição de como recebido para os ensaios propostos. Em verde, região de remoção das amostras para macrografia.....	60
Figura 39 - Amostra S-57521: Tubo X Chapa – Junta soldada.....	61
Figura 40 - Amostra S-57521:Tubo X Chapa: Junta soldada oposta a 180° da figura 39	62
Figura 41 - Amostra S-57522: Tubo coletor – Chapa X Chapa	63
Figura 42 - Distribuição Bibliográfica por Estrato	79
Figura 43 - Distribuição dos Artigos por por Percentil Scopus	79

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1 - Processo de soldagem por fusão.....	16
Quadro 2 - Etapas de inspeção do processo de soldagem.....	17
Quadro 3 – Proposta de um plano de inspeção e testes.....	67
Tabela 3 - Resultado da composição obtida por espectrometria de emissão óptica da amostra S- 57511: Tubo Ø 1” x 1,5 mm (% peso).....	39
Tabela 4 - Comparativo entre a composição obtida para a amostra com os requisitos da norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A SA-53/SA-53M Tipo E Grau A (ed. 2015) (% peso).....	40
Tabela 5 - Resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração das amostras.	46
Tabela 6 - Comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração das amostras com os requisitos da norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A SA-53/SA-53M Tipo E Grau A (ed. 2015).	46
Tabela 7 - Resultado da composição obtida por espectrometria de emissão óptica da amostra S- 57516- Chapa conformada (% peso).....	49
Tabela 8 - Resultado da composição obtida por espectrometria de emissão óptica da amostra S- 57525- Chapa plana (% peso).	49
Tabela 9 - Comparativo entre a composição obtida para a amostra com os requisitos da Norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A SA-285/SA-285M Grau C (ed. 2015) (% peso).	50
Tabela 10 - Resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração das amostras. ...	59
Tabela 11 - Comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração das amostras com os requisitos da norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A SA-283/SA-283M Grau C (ed. 2015).....	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	PROCESSOS DE SOLDAGEM APLICADOS NA FABRICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS PARA REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL	16
2.2	MÉTODOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS UTILIZADOS PARA A DETECÇÃO DE FALHAS EM UNIÕES SOLDADAS	22
2.3	PROBLEMAS RELACIONADOS A SOLDAGEM QUE CAUSAM PERDA DE RESISTÊNCIA MECÂNICA E FRATURA PREMATURA EM UNIÕES SOLDADAS	26
2.4	PREMISSAS PARA A ELABORAÇÃO DE PLANOS DE INSPEÇÃO	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	MATERIAIS	32
3.2	MÉTODOS	32
3.2.1	RETIRADA DA AMOSTRA DO CONJUNTO COLETOR SERPENTINA	34
3.2.2	REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ESPECTOMETRIA ÓTICA	36
3.2.3	REALIZAÇÃO DA ANÁLISE METALOGRÁFICA	36
3.2.4	REALIZAÇÃO DO ANÁLISE MACROGRÁFICA	37
3.2.5	REALIZAÇÃO DO TESTE DE TRAÇÃO	37
3.2.6	ANÁLISE ENSAIOS OBTIDOS E IDENTIFICAR CAUSA DA FALHA DO EQUIPAMENTO	37
3.2.7	ELABORAÇÃO DO PLANO DE INSPEÇÃO E TESTES DO EQUIPAMENTO	37
4	ANÁLISE DOS DADOS	38
4.1	ANÁLISE DO FEIXE TUBULAR	38
4.1.1	ESPECTOMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA	39
4.1.2	ANÁLISE METALOGRÁFICA	40
4.1.3	ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO	45
4.2	ANÁLISE DOS DADOS DO COLETOR COMPOSTO POR CHAPA CONFORMADA E CHAPA PLANA	47
4.2.1	ESPECTOMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA	49
4.2.2	ANÁLISE METALOGRÁFICA	50

4.2.2 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO	58
4.2.3 ENSAIO DE MACROGRAFIA	59
4.3 PLANO DE INSPEÇÃO E TESTES	64
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	70
6 CONCLUSÕES	73
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
8 REFERÊNCIAS	75
8.1 REFERÊNCIA NOMINAIS	75
8.2 REFERÊNCIAS POR EXTRATO.....	79
8.3 REFERÊNCIAS POR PERCENTIL SCOPUS	79

1 INTRODUÇÃO

O mercado cada vez mais competitivo exige desafios para o aumento da produtividade das empresas, que necessitam de equipamentos com alta disponibilidade, confiabilidade e segurança operacional. A confiabilidade e segurança de um equipamento está associada ao comportamento de suas falhas.

Os acidentes de gases tóxicos, como vazamentos de amônia, podem expor os trabalhadores e a comunidade, provocando desde uma irritação respiratória, cegueira ou até a morte, com isso o estudo das falhas de integridade estrutural de equipamentos envolvendo refrigeração industrial por amônia no Brasil vem tomando enfoque em função dos vários acidentes envolvendo vazamentos de amônia e suas repercussões (LOPES, 2015).

As análises de falhas em atividades de manutenção têm objetivo de evitar a degradação dos equipamentos e instalações, que o mal uso e o desgaste natural causam. As degradações podem se manifestar como perdas de desempenho, paradas da produção, fabricação de produtos de má qualidade, poluição ambiental, entre outros. Essas manifestações tem uma grande influência negativa na qualidade, produtividade e reputação das empresas, e acabam colocando em risco a sobrevivência da empresa. Isso mostra que o gerenciamento e entendimento das falhas de equipamentos na atividade de manutenção é importante para a melhoria da produtividade, segurança e gerando ganhos potenciais (XENOS, 1998).

A NR13 tem como objetivo condicionar inspeção de segurança para a operação de vasos de pressão, caldeiras e tubulações, mas não aborda inspeções durante o processo de fabricação dos equipamentos e a falta de um plano de inspeção e testes que remeta a uma sequência de checagem de itens durante a fabricação de equipamentos de refrigeração, itens tais como, memoriais de cálculo, documentação de projeto e de profissionais, padronização e de técnicas de inspeção não destrutiva durante o processo de fabricação, tem gerado grandes perdas financeiras para a indústria alimentícia além do grande risco de acidentes envolvendo amônia com seus colaboradores. Por isso a grande necessidade de criação de um plano específico de inspeção e testes para a indústria alimentícia que garanta segurança operacional destes equipamentos.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho foi analisar a falha ocorrida em um trocador de calor tipo evaporativo utilizado em sistemas de refrigeração industrial.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

A fim de atingir o objetivo geral do trabalho, os seguintes objetivos específicos precisaram ser contemplados:

- A. Caracterização mecânico - metalúrgica do feixe tubular do trocador de calor;
- B. Caracterização mecânico - metalúrgica do coletor composto por chapa conformada e chapa plana;
- C. Criação de um plano de inspeção e testes para a etapa de fabricação do equipamento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A união soldada é por natureza uma região crítica em trocadores de calor para o início de trincas, e devido as descontinuidades macro e microscópicas, que pode gerar concentrações de tensão tanto na zona soldada quanto na zona termicamente afetada. As descontinuidades mais comuns são poros, falta de fusão e penetração, fissuras formadas em diferentes momentos de soldagem, inclusões de escoria, e heterogeneidade microestrutural. (BARBOSA, 2019).

Historicamente, as rotinas de inspeção e os critérios de identificação de falha por meio de ensaios não destrutivos, são determinados por uma combinação de desempenho técnico dos equipamentos e métodos empregados aliado a experiencia prática do inspetor, ou seja não temos um roteiro de inspeção definido o qual fica baseado nas necessidades encontradas pelo inspetor no momento da inspeção do equipamento. (SMITH, 2019).

2.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM APLICADOS NA FABRICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS PARA REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL

O processo de soldagem amplamente utilizados nas indústrias é o processo por fusão subgrupos de processos são criados nas mais diversas divisões, um exemplo de divisão é o processo de soldagem por energia utilizada, destaca-se como processo mais utilizado o método por arco elétrico. A seguir mostraremos na tabela 1, que subdivide os principais métodos de soldagem por arco elétrico (COCOTA, 2017).

Quadro 1 - Processo de soldagem por fusão

PROCESSO	FONTES DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR	OUTRAS CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
Soldagem por eletro-escória	Aquecimento por resistência da escória líquida	Contínua ou Alternada	Escória	Automática / Mecanizada. Junta na vertical. Arame alimentado mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessuras \geq 50 mm. Soldagem de peças de grande espessura
Soldagem a arco submerso	Arco Elétrico	Contínua ou Alternada. Eletrodo +	Escória e gases gerados	Automática / Mecanizada ou semi-automática. O arco arde sob uma camada de fluxo granular	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura \geq 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc
Soldagem com eletrodos revestidos	Arco Elétrico	Contínua ou Alternada. Eletrodo + ou -	Escória e gases gerados	Manual. Vareta recoberta por uma camada de fluxo	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
Soldagem com arame tubular	Arco Elétrico	Contínua. Eletrodo +	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral o CO ₂	O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro. Automático ou semi-automático	Soldagem de aços carbono com espessuras \geq 1 mm. Soldagem de chapas
Soldagem MIG/MAG	Arco Elétrico	Contínua. Eletrodo +	Argônio ou Hélio, Argônio + O ₂ , Argônio + CO ₂ , CO ₂	Automática / Mecanizada ou semi-automática. O arame é sólido	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessuras \geq 1 mm. Soldagem de tubos, chapas, etc. Qualquer posição
Soldagem TIG	Arco Elétrico	Contínua ou Alternada. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou mistura destes	Manual ou Automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente	Soldagem de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessuras de 1 a 6 mm. Soldagem de não ferrosos e aços inox. Passes de raiz de soldas em tubulações
Soldagem a gás	Chama oxiacetilénica		Gás (CO, H ₂ , CO ₂)	Manual. Arame adicionado separadamente	Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro

Fonte: HUGUES, 2009.

O processo de soldagem tanto manual como o semiautomático sofre interferência do soldador e seu julgamento é fundamental na mudança ou correção da soldagem durante a execução. Como advento da informática, a sua aplicação neste processo surgiu com o objetivo de incrementar a produtividade e melhorar a qualidade de uma empresa. Sendo que a sua aplicação exige na maioria dos casos a adequação dos procedimentos operacionais da empresa à nova realidade a ser implantada.

O controle da qualidade é um processo abrangente, sendo que a inspeção da qualidade é uma atividade que o integra. A atividade de inspeção é a mais importante do sistema de avaliação da qualidade de um processo industrial. Na prática, a qualidade do processo de soldagem pode ser controlada por meio de três etapas de inspeção: antes, durante e após a realização da soldagem, conforme definição na tabela 2 abaixo:

Quadro 2 - Etapas de inspeção do processo de soldagem

Antes da soldagem	Validade da qualificação dos soldadores; Identificação do metal de base e do consumível; Preparação da junta; Procedimentos e qualificações dos soldadores; Planos de fabricação, inspeção e testes; Especificações e qualidade do metal base de acordo com o certificado com relação às normas AWS e ASME; Calibração dos equipamentos e instrumentos.
Durante a soldagem	Controle de montagem e ajustes das peças; Controle da distorção; Conformidade com procedimentos de soldagem e planos de fabricação; Controle da temperatura de pré-aquecimento e entre passes; Manuseio e controle dos consumíveis de soldagem; Limpeza entre passes e limpeza final da junta;

	Inspeção visual entre passes.
Após a soldagem	Conformidade com desenhos e especificações; Limpeza conforme a especificação procedimento de soldagem; Ensaio não destrutivo de líquido penetrante, ultrassom ou radiografia industrial;

Fonte: HUGUES, 2009.

A seguir são brevemente apresentados os três processos de soldagem mais utilizados em processos de fabricação industrial, FCAW e GTAW, SMAW.

O primeiro processo de soldagem estudado é com arco elétrico com arame tubular, também conhecido por Flux-Cored Arc Welding (FCAW). Este processo utiliza um eletrodo metálico tubular, isto é, não sólido, com diversos formatos internos, e que contém um fluxo apropriado em seu interior para proteção do arco e do cordão. Em algumas situações, a soldagem com arame tubular também pode utilizar gás de proteção.

O segundo processo de soldagem estudado é o Tungsten Inert Gas (TIG), ou gás inerte tungstênio, usa o arco elétrico com proteção gasosa e com eletrodo de tungstênio, um gás inerte, que não reage com outros materiais para proteger a poça de fusão. O processo TIG apresenta variantes, tais como a soldagem TIG por pontos, TIG por corrente pulsada e TIG com arame quente ou hot wire. O processo TIG também é conhecido por Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), soldagem a arco com gás tungstênio.

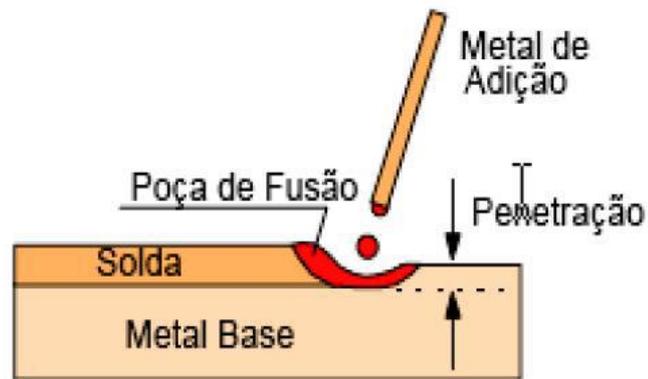
O terceiro processo de soldagem estudado é a soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido, em inglês, Shielded Metal Arc Welding (SMAW). Esta soldagem também conhecida como soldagem manual a arco elétrico (MMA), foi inventada por Thomas Edson e é um processo manual de soldagem que realizado com o calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho. O calor produzido pelo arco elétrico funde o metal, a alma do eletrodo e seu revestimento de fluxo.

Os gases produzidos durante a decomposição do revestimento e a escória líquida protegem o metal de solda da contaminação atmosférica durante a solidificação. Devido à sua versatilidade de processo e da simplicidade de seu equipamento e operação, a soldagem com eletrodo revestido é um dos mais populares processos de soldagem. O SMAW é amplamente utilizado na construção de estruturas de aço e na fabricação industrial. O processo é principalmente utilizado para soldar ferro e aço (incluindo o aço inoxidável), mas também podem ser soldadas com esse método ligas de níquel, alumínio e cobre.

Os processos de soldagem possuem um conjunto de termos próprios e torna-se de grande importância, o conhecimento das designações e abreviaturas dos termos aplicáveis, a seguir os termos mais usuais nos processos de soldagem, sendo que sempre que possível serão mencionados na língua inglesa:

- Soldagem (Welding) é o processo de união de materiais, onde se preserva as características físicas e químicas da junta soldada;
- Solda (Weld) é o efeito do processo;
- Soldador (Welder) Profissional capacitado a executar soldagem manual ou semiautomático;
- Metal de base (Base metal) metal ou liga a ser soldada;
- Metal de adição (Filler metal) metal ou liga adicionado em estado líquido;
- Equipamento (Weldment) produto da fabricação, construção ou montagem soldada, tais como: equipamentos de caldeiraria, tubulação, estruturas metálicas, navios etc;
- Porção de fusão (Weld pool) Região de fusão, volume localizado de metal líquido de adição e do metal de base conforme podemos observar na figura 1.

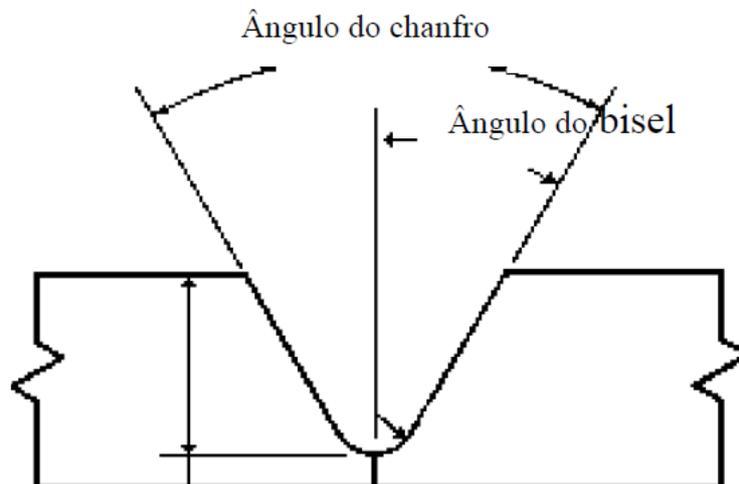
Figura 1 - Terminologia da soldagem



Fonte: HUGUES, 2009.

- Bisel - Borda do componente a ser soldado preparado de forma angular;
- Chanfro - Abertura na superfície de uma peça ou entre componentes onde será efetuada a solda, a figura 2 abaixo mostra o detalhe do ângulo de chanfro e bisel;

Figura 2 - Ângulo do chanfro e bisel

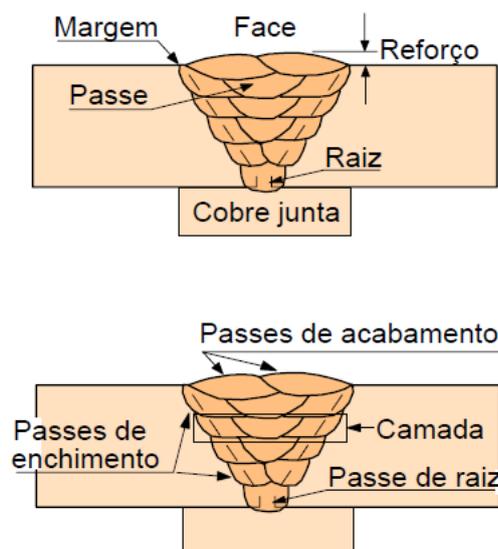


Fonte: HUGUES, 2009.

- Raiz - Região mais profunda de uma junta soldada que corresponde ao 1º passe, região mais propensa a descontinuidades na soldagem;
- Face - Superfície oposta a raiz da solda;
- Camada (Layer): Conjuntos de passes realizados em uma mesma altura em um chanfro;
- Reforço (Reinforcement): Altura máxima alcançada pelo excesso de metal de adição medido a partir da superfície do metal a ser soldado;
- Margem (Toe): Linha de encontro entre a face da solda e a superfície do metal de base;

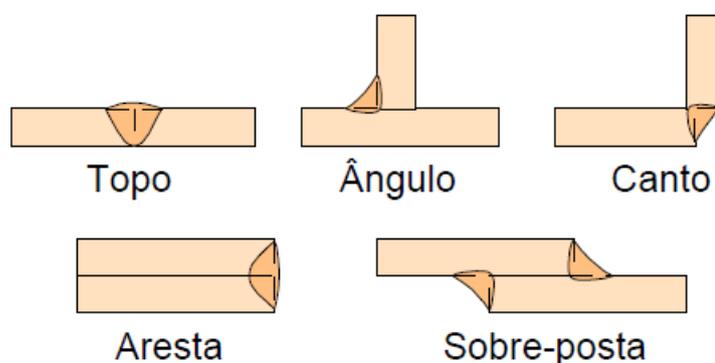
Nas figuras 03 e 04 podemos observar a terminologia de soldagem e os tipos de uniões soldadas respectivamente.

Figura 3 - Terminologia da soldagem



Fonte: HUGUES, 2009.

Figura 4 - Tipos de uniões soldadas



Fonte: HUGUES, 2009.

2.2 MÉTODOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS UTILIZADOS PARA A DETECÇÃO DE FALHAS EM UNIÕES SOLDADAS

Para a inspeção de uniões soldadas, existem algumas técnicas de inspeção não destrutivas que são comumente utilizadas para prever falhas nestes equipamentos, como medição de espessura por ultrassom, ensaios de líquido penetrante, partículas magnéticas, que em diversos casos não podem ser executados em função dos detalhes construtivos dos trocadores de calor comprometendo a qualidade e assertividade destes ensaios.

O ensaio de medição de espessura por ultrassom se caracteriza como um ensaio não destrutivo que tem por objetivo a detecção da perda de espessura decorrente de um processo corrosivo ou abrasivo nos mais variados tipos ou formas de materiais ferrosos ou não ferrosos. Em trocadores de calor é amplamente utilizado para determinar as perdas de espessuras em feixes tubulares, espelhos e coletores.

Ensaio por líquidos penetrantes são amplamente utilizados para detectar descontinuidades superficiais e que sejam abertas na superfície, tais como trincas, poros, dobras. A principal vantagem do método é a sua simplicidade, é de fácil

aplicação e interpretação dos resultados, conforme podemos observar na figura 05 abaixo. (TUĞRUL,1997).

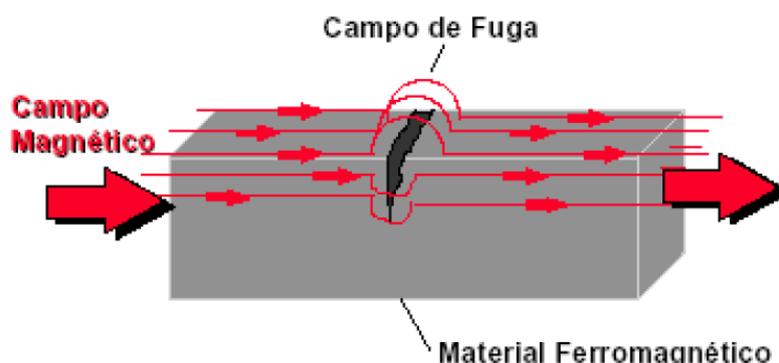
Figura 5 - Ensaio de líquido penetrante



Fonte: GARCIA, SPIM & SANTOS, 2000.

O ensaio por partículas magnéticas consiste em submeter a região soldada, ou parte dela, a um campo magnético. Na região magnetizada da peça, as descontinuidades existentes, ou seja, a falta de continuidade das propriedades magnéticas do material, irão causar um campo de fuga do fluxo magnético. A aplicação das partículas ferromagnéticas provoca a aglomeração destas nos campos de fuga, uma vez que serão por eles atraídas devido ao surgimento de polos magnéticos. A aglomeração indicará o contorno do campo de fuga, fornecendo a visualização do formato e da extensão da descontinuidade o que podemos observar na figura 6 abaixo. Usualmente conseguimos detectar trincas internas com uma profundidade de 3 milímetros o que permite a detecção prematura de uma possível descontinuidade que possa causar falha na união soldada. (KASAI,2011).

Figura 6 - Peça contendo trinca superficial dando origem ao campo de fuga



Fonte: ANDREUCCI, 2009

O ensaio de replica metalográfica em uniões soldadas, também conhecido como microscopia ótica indireta utilizando réplicas metalográficas para caracterização da microestrutura do metal de solda. Este ensaio também denominado de metalografia de campo é um procedimento não destrutivo em que se realiza a preparação metalográfica por lixamento e polimento em campo. O ataque metalográfico é também realizado desta forma. Após revelação da microestrutura, aplica-se uma réplica sobre a região preparada. A réplica metalográfica retrata a microestrutura do local que pode ser observada e documentada utilizando-se um microscópio óptico. (SOUZA, 2013).

Outro ensaio empregado para detecção de trincas em uniões soldadas é o ensaio de correntes parasitas, também chamadas de correntes de Foucault, induzidas ou do inglês eddy current, as correntes parasitas é um dos ensaios não destrutivos (END) que utiliza o princípio da indução eletromagnética. Este princípio se baseia na detecção de uma perturbação no campo eletromagnético no objeto de interesse pela presença de um objeto nesse campo. Esta perturbação pode ser medida e usada para obter espessuras de revestimentos não condutores ou não magnéticos, medir e identificar propriedades físicas e morfológicas, analisar e detectar propriedades de ligas e identificar trincas, inclusões, vazios. É uma técnica muito sensível, versátil e com ampla gama de aplicação na inspeção industrial. (GARCIA, GOMEZ & VÁZQUEZ, 2011).

Em equipamentos em que o ensaio não destrutivo não pode ser aplicado em função da geometria ou acesso difícil, temos a possibilidade de aplicação de ensaios em laboratório, os quais permitem um diagnóstico mais preciso em situações que os ENDs não são aplicáveis. Estes ensaios consistem em remover uma parte ou uma amostra do equipamento e realizar uma sequência de ensaios, a fim de determinar o tipo de material utilizado, sua resistência mecânica e a qualidade das uniões soldadas.

Para a determinação do tipo de material utilizado, um ensaio comumente utilizado é espectrometria de emissão ótica, assim temos certeza dos materiais empregados no trocador de calor.

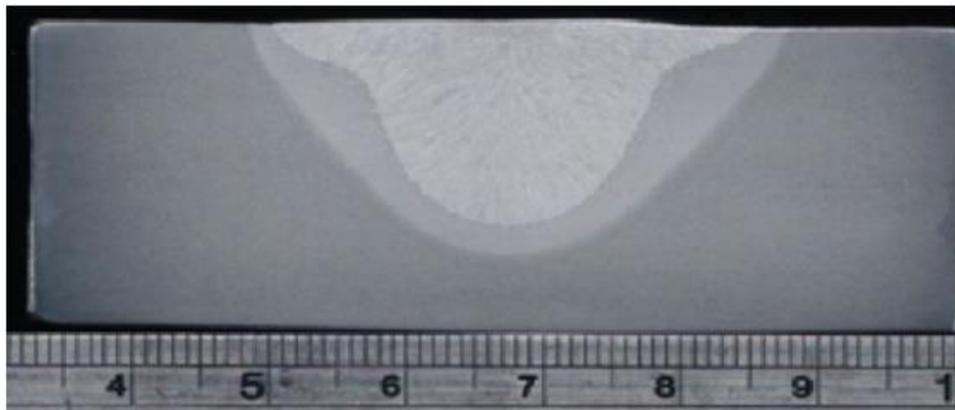
O ensaio de tração consiste na aplicação de uma força de tração axial num corpo de prova padronizado, promovendo a deformação do material na direção do esforço, que tende a alongá-lo até fraturar. Devido à facilidade de execução e reprodutibilidade dos resultados, este ensaio é amplamente utilizado. Além disso, através da medição da força e do alongamento a cada instante do ensaio é possível construir um gráfico tensão-deformação, a interpretação correta desse gráfico fornece importantes propriedades mecânicas do material. A dureza é uma propriedade mecânica largamente utilizada em estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas, e principalmente na especificação e comparação de materiais. Para o conceito de dureza são atribuídos diferentes significados, tais como medida de resistência do material a ações de origem mecânica sobre sua superfície, resistência à penetração, à deformação plástica e ao risco. Vários fatores influenciam a dureza de uma junta soldada; dentre eles citam-se a composição química do metal de base e seu grau de encruamento, a composição química do metal de adição, os efeitos metalúrgicos inerentes ao processo de soldagem, o tratamento térmico e os parâmetros de soldagem. (VOIGT; CUNHA & BOHORQUEZ, 2020).

Uma junta soldada apresenta regiões bastante definidas, que são denominadas metal de base, zona afetada pelo calor e zona fundida; os limites máximos de dureza para estas regiões são definidos por algumas normas e

especificações. Quando esses limites são ultrapassados, significa que houve perda de ductilidade e que a junta soldada pode estar comprometida.

O ensaio de macrografia consiste na verificação a olho nu ou com uma ampliação de no máximo 10 vezes, de uma superfície plana, preparada adequadamente através de lixamento, o que podemos exemplificar na figura 7 abaixo, a superfície é normalmente atacada por uma substância que reage com a superfície lixada e revela detalhes macrográficos da estrutura do material ou da junta soldada ensaiada.

Figura 7 - Ensaio Macrográfico



Fonte: SMITH, 2019.

2.3 PROBLEMAS RELACIONADOS A SOLDAGEM QUE CAUSAM PERDA DE RESISTÊNCIA MECÂNICA E FRATURA PREMATURA EM UNIÕES SOLDADAS

A tendência atual na fabricação de vasos de pressão e equipamentos sujeitos a pressões internas, exigem que as uniões soldadas suportem variações de tensões e temperaturas sem falhar. Infelizmente a qualidade de solda é impactada por problemas que surgem devido à fraca resistência da união soldada que são geralmente enfrentados por os fabricantes que limitam a aplicação de soldagem. O as características de tração da junta de solda dependem principalmente da solda formato do cordão e microestrutura de solda influenciados pelo processo e

parâmetros em soldagem. Durante a soldagem, a corrente, tensão do arco e velocidade de soldagem são os principais parâmetros a serem observados. O ângulo da tocha de soldagem, sua posição em relação à base placa, bem como a direção da soldagem também influenciam a solda qualidade. A penetração da solda tem um grande impacto sobre a junta resistência e sua vida útil, a diluição da solda também influencia na qualidade da solda e também área da zona afetada pelo calor (ZTA) deve ser reduzido para melhorar a qualidade da solda. (PAL; PAL, 2010).

Um termo comumente utilizado no ramo da soldagem é a descontinuidade de solda que surge quando ocorre um desgaste ou interferência nas condições estruturais na região soldada, destacando a falta de uma homogeneidade impactando nas propriedades mecânicas, físicas e metalúrgicas. As descontinuidades podem ser consideradas defeitos de soldagem, e estes defeitos surgem de acordo com as especificações recomendadas. Deste modo, o conhecimento dos tipos de descontinuidade, relacionadas à operação de soldagem e seus mecanismos de formação e controle, representará a diferença entre a operação esperada do componente ou a sua indesejada falha. A presença de descontinuidades exige a aplicação de medidas corretivas que acarretam uma elevação no tempo e no final valor do equipamento fabricado além, logicamente, da insatisfação do cliente (PAL; PAL, 2010).

Os defeitos encontrados nas soldas em aço carbono são variáveis, e os principais são: trincas, porosidade, falta de penetração de solda, excesso de solda e variações no tamanho e aspecto da solda.

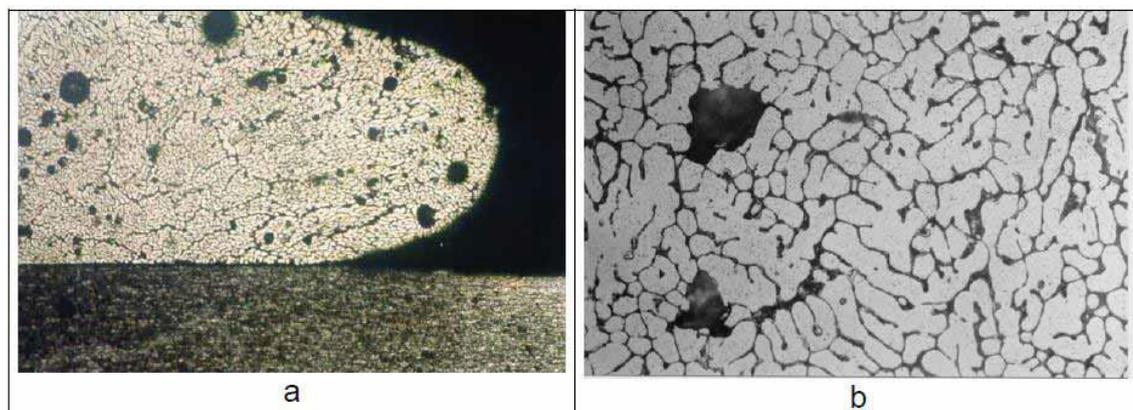
A falta de penetração de solda, este defeito é muito importante de ser estudado em função de tornar a área soldada um ponto concentrador de tensão, aspecto este que pode gerar uma falha muito maior com o decorrer do tempo. Esta falha se caracteriza na falta de penetração da raiz de solda no metal base, em casos de solda em chanfros esta descontinuidade ocorre quando a corrente utilizada é baixa, a preparação da peça é inadequada ou quando a velocidade de soldagem é alta em relação a corrente empregada. (PAL; PAL, 2010).

Outro defeito importante de ser considerado é a mordedura, este defeito tem como característica fundamental a formação de sulcos em todo o contorno do metal base, neste caso uma área maior do que a área do cordão de solda é fundida e com isso semelhante a falta de penetração causa um ponto forte concentrador de tensão. Esta descontinuidade é causada com o mal uso da tocha, uso de corrente muito alta ou muito baixa em relação a espessura do metal. (PAL; PAL, 2010).

A falta de fusão ocorre quando o metal base não consegue fundir com o metal de solda, este processo ocorre quando a corrente é insuficiente e principalmente quando a superfície a ser soldada não é preparada corretamente, ou seja, é necessário remover toda a camada de óxido existente na superfície a ser soldada, e quando isso não é feito corretamente o metal base não funde junto ao metal da solda.

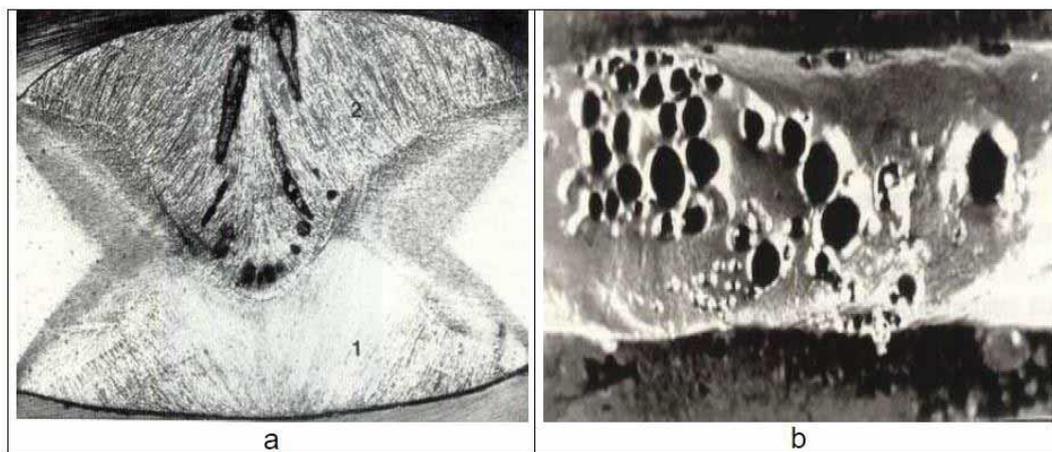
A porosidade nada mais é do que o aparecimento de bolhas de hidrogênio, ou lacunas no cordão de solda, em pequenas quantidades que podemos observar nas figuras 8 e 9, este fator não influencia negativamente a junta soldada, porém em grandes quantidades, a resistência e a ductilidade da junta são fortemente prejudicadas. Uma forma de diminuir a incidência de poros na solda é a utilização de uma corrente alta de soldagem, o surgimento do poro se dá quando a velocidade de solidificação da solda é inferior à velocidade de separação dos gases e vapores intrínsecos à poça de soldagem, este processo pode ser facilmente evitado quando a soldagem for de forma lenta e gradual. 38 Os gases que causam porosidade são o hidrogênio, nitrogênio e dióxido de carbono. O hidrogênio tem origem na umidade presente no consumível ou no metal de base. Para o nitrogênio a origem vem da captação do ar vizinho ao arco voltaico. No caso do dióxido de carbono a origem está na combinação de oxigênio e metal de base em aço não acalmado (BARRA; SANTOS, 1999).

Figura 8 - Macrografia mostrando a presença de porosidade na forma esférica num cordão de solda em AISi (a) e microporosidade entre os ramos dentrícios no mesmo cordão (b).



Fonte: BARRA; SANTOS, 1999

Figura 9 - Porosidade vermicular com direção e crescimento da raiz para o reforço (a) e porosidade agrupada (b).



Fonte: BARRA; SANTOS, 1999

2.4 PREMISSAS PARA A ELABORAÇÃO DE PLANOS DE INSPEÇÃO

A etapa de inspeção durante um processo de fabricação industrial é de suma importância, a exigência cada vez maior por segurança operacional, aumenta a criticidade dos planos para atender a normas e especificações funcionais mais complexas, ter um planejamento de inspeção eficaz e execução torna-se indispensável hoje, um bom plano de inspeção deve levar em consideração os seguintes pontos:

- Compreender a geometria do equipamento e seus critérios de inspeção, conforme especificado no desenho de engenharia;
- Tomada de decisão quanto ao tipo de inspeção a ser realizada no equipamento;
- Elaborar o plano de inspeção e testes aplicado ao equipamento em análise.

Entender o equipamento a ser inspecionado e seus critérios de inspeção é uma questão de interpretação dos desenhos e especificações de engenharia. Uma vez feito isso, as tarefas de inspeção podem ser feitas em seguida. Os Planos de inspeção podem ser elaborados usando o conhecimento dos inspetores e executados de acordo com a necessidade e responsabilidade esperada pela empresa. (ELMARAGHY; BOLLINGER,1987)

Existem equipamentos críticos com múltiplas características em muitos sistemas. Tais equipamentos podem ser de alta responsabilidade, e um plano de inspeção e testes, deve avaliar a qualidade dos itens fabricados, e garantir que erros de fabricação sejam identificados e imediatamente corrigidos para que o equipamento desempenhe ao máximo de sua capacidade proposta, e isso que é esperado do desempenho de um bom plano de inspeção. Em um plano de inspeção completo, cada item está sujeito a um procedimento de inspeção, e se o resultado da inspeção indica que um item não atende aos limites de especificação predeterminados, o item é reprovado ou refeito para que sua qualidade característica esteja dentro dos parâmetros definidos no plano. (DUFFUAA; KHAN, 2005).

O objetivo de um plano de inspeção industrial é aumentar a disponibilidade e segurança operacional e otimizar o ciclo de vida total dos ativos de uma empresa, sem comprometer a segurança ou questões ambientais. As avaliações necessárias para a elaboração de um bom plano de inspeção devem abranger a mitigação do risco em caso de falha do equipamento, tanto no quesito de segurança, perda de desempenho do equipamento e ou sistema, perda de produtividade e financeiras. Observamos nas últimas duas décadas um grande progresso no desenvolvimento de novas estratégias de inspeção e manutenção e tem sido motivada pelo aumento no número, tamanho, complexidade e variedade de ativos nas empresas e aliado com a crescente consciência do impacto da manutenção no meio ambiente, segurança do pessoal, rentabilidade do negócio e qualidade dos produtos. Falhas inesperadas geralmente têm efeitos adversos sobre o meio ambiente e pode resultar em acidentes graves expondo os colaboradores a situação de extremo perigo. Podemos observar a estreita relação entre falhas de inspeção e a ocorrência de acidentes graves. A lucratividade está intimamente relacionada à disponibilidade e confiabilidade do equipamento, enquanto a qualidade do produto é muito dependente da condição do equipamento, esse sem dúvida é o perfeito desafio para um engenheiro de manutenção que é implementar uma estratégia de inspeção que maximiza a disponibilidade e eficiência dos equipamentos, controla a taxa de deterioração do equipamento e garante um ambiente seguro e operação amigável. (KHAN; HADDARA, 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

O equipamento que foi analisado é um trocador de calor tipo evaporativo que está exemplificado na figura 11, este equipamento é responsável pelo subresfriamento da amônia líquida de um sistema de refrigeração.

Na figura 10 podemos observar a estrutura analítica experimental do trabalho proposto o qual sintetiza todo o roteiro que será seguido para elaboração do trabalho proposto.

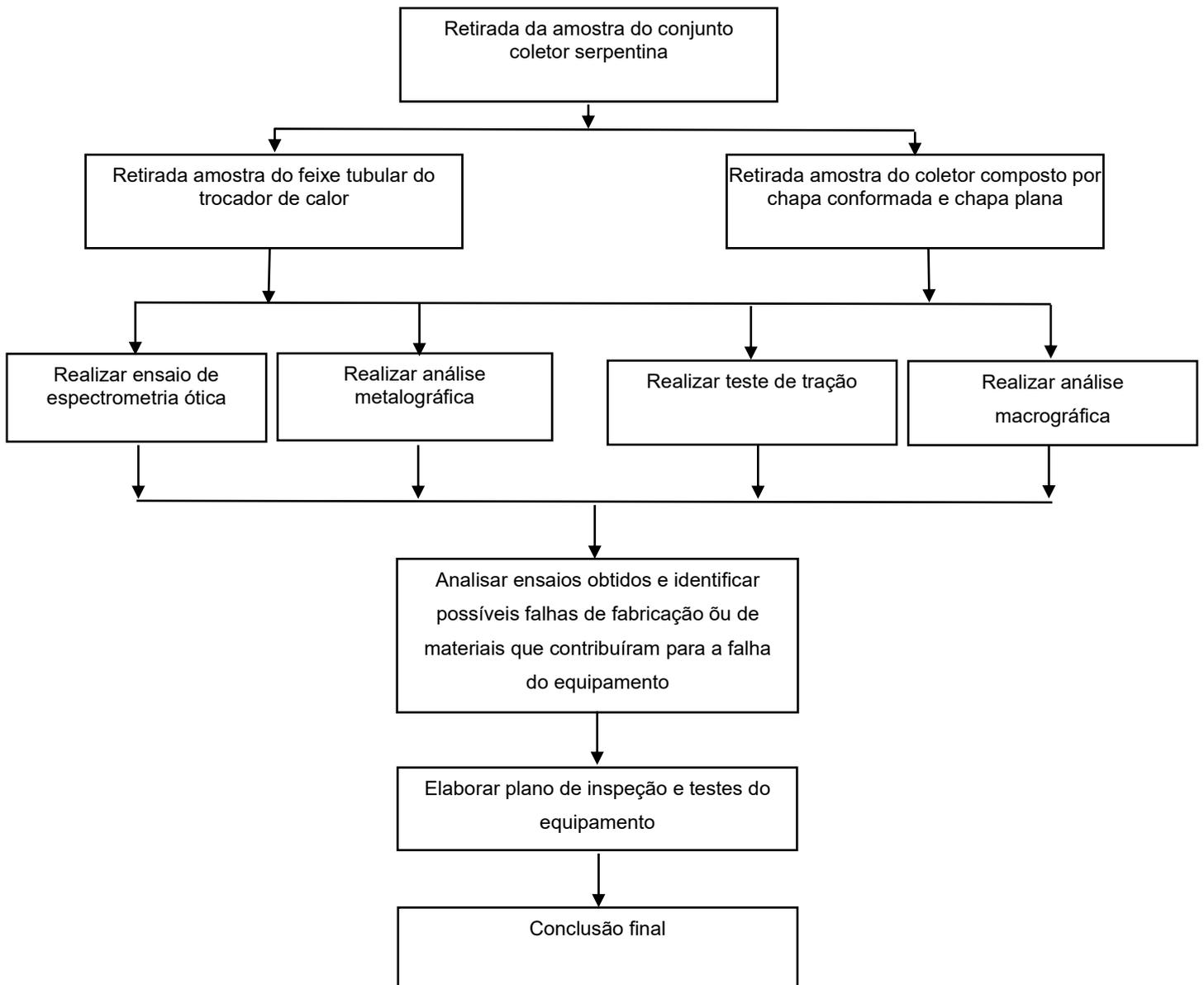
Este trabalho é classificado como uma pesquisa aplicada (estudo de caso), pois tem como objetivo resolver problemas concretos (GARCES, 2010). As abordagens quantitativas e qualitativas foram utilizadas no estudo. A abordagem quantitativa foi empregada para direcionamento do estudo e avaliação da eficácia, e a abordagem qualitativa para análise das soluções dos problemas.

O objeto de estudo do presente trabalho é descrever a falha de um trocador de calor tipo evaporativo que compõe sistemas de refrigeração de grande porte e propor um plano de inspeção e testes que possa bloquear as possíveis causas da falha no momento da fabricação.

3.2 MÉTODOS

O modelo integrado proposto no presente trabalho é ilustrado no fluxograma da figura 10, que consistiu na retirada de uma amostra da serpentina in loco, após isso realizou-se a caracterização dos materiais empregados para a identificação e determinação das suas propriedades mecânicas, análise dos resultados e com base nessas informações elaborar o plano de inspeção e testes para que a causa da falha seja bloqueada no momento da fabricação.

Figura 10 - Estrutura analítica experimental proposta



Fonte: Próprio autor

3.2.1 RETIRADA DA AMOSTRA DO CONJUNTO COLETOR SERPENTINA

Para a realização do trabalho, a figura 11 abaixo mostra o trocador evaporativo em questão, este equipamento foi bloqueado, drenado toda a amônia do seu interior, e logo após removeu-se todos os fechamentos laterais para que possa ser possível o acesso as coletores e serpentinas, nas figuras 12 e 13 podemos observar o detalhe das serpentinas e coletores do equipamento, e na figura 14 uma representação esquemática do local da falha no trocador de calor.

Figura 11 - Vista geral de um trocador de calor tipo evaporativo



Fonte: Próprio autor

Figura 12 - Vista geral das serpentinas do trocador de calor



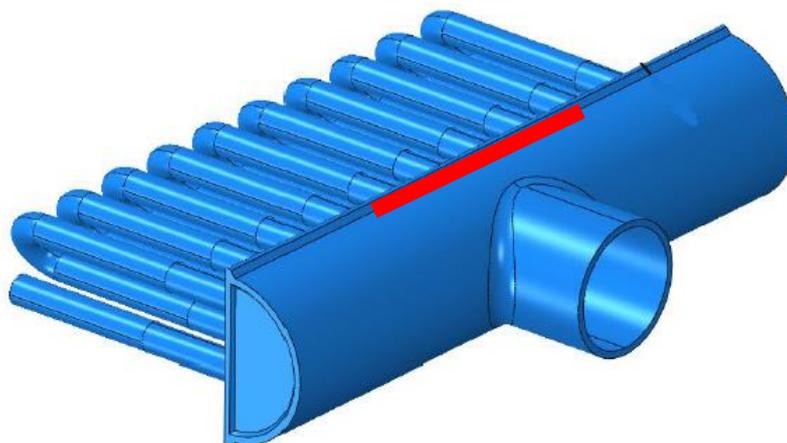
Fonte: Próprio autor

Figura 13 - Coletor de amônia do trocador de calor evaporativo



Fonte: Próprio autor

Figura 14 - Identificação do local da falha em vermelho



Fonte: Próprio autor

Foi removido uma amostra do bloco de serpentinas para a caracterização do material empregado na construção do mesmo, conforme figura 15, e logo após foram removidas amostras do feixe tubular e do coletor a fim de determinar as propriedades mecânicas e metalúrgicas dos materiais empregados na fabricação do conjunto.

Figura 15 - Amostra do bloco de serpentinas para caracterização do material



Fonte: Próprio autor

3.2.2 REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ESPECTOMETRIA ÓTICA

Para a realização deste ensaio, foi removido uma amostra do coletor e do feixe tubular a fim de determinar se os materiais empregados estão de acordo com a norma ASTM A 285 Grau C da norma ASME SEÇÃO II – Edição 2015.

3.2.3 REALIZAÇÃO DA ANÁLISE METALOGRAFICA

A amostra foi removida, a preparação metalográfica foi realizada por lixamento até a granulometria 1200 seguido de polimento em suspensão de alumina 1,0 μm . O ataque químico foi realizado com o reagente Nital 2%, seguido por análise por microscopia óptica.

3.2.4 REALIZAÇÃO DO ANÁLISE MACROGRÁFICA

Para a realização do ensaio de macrografia foi removida uma amostra do coletor das regiões soldadas, a fim de avaliar heterogeneidades com tamanho macroscópico, como trincas, segregação química, porosidades, textura ou outras irregularidades, os quais podem comprometer o desempenho das peças fabricadas, e permite obter informações básicas do material, principalmente de caráter qualitativo. Para a preparação da amostra macrográfica, foi realizado por lixamento até granulometria 600. O ataque químico foi realizado com reagente Nital 10%.

3.2.5 REALIZAÇÃO DO TESTE DE TRAÇÃO

Para a realização deste ensaio, foi removido uma amostra do coletor e do feixe tubular a fim de determinar se os materiais empregados estão de acordo com a norma ASTM A 285 Grau C da norma ASME SEÇÃO II – Edição 2015.

3.2.6 ANÁLISE ENSAIOS OBTIDOS E IDENTIFICAR CAUSA DA FALHA DO EQUIPAMENTO

Busca entender onde ocorreu o problema, se tivemos problemas na seleção de materiais, materiais fora de especificação ou se tivemos problemas no momento da fabricação do equipamento.

3.2.7 ELABORAÇÃO DO PLANO DE INSPEÇÃO E TESTES DO EQUIPAMENTO

Com base nas observações realizadas nos ensaios realizados, elabora um plano de inspeção e testes que possa checar todas as etapas de fabricação do equipamento em análise.

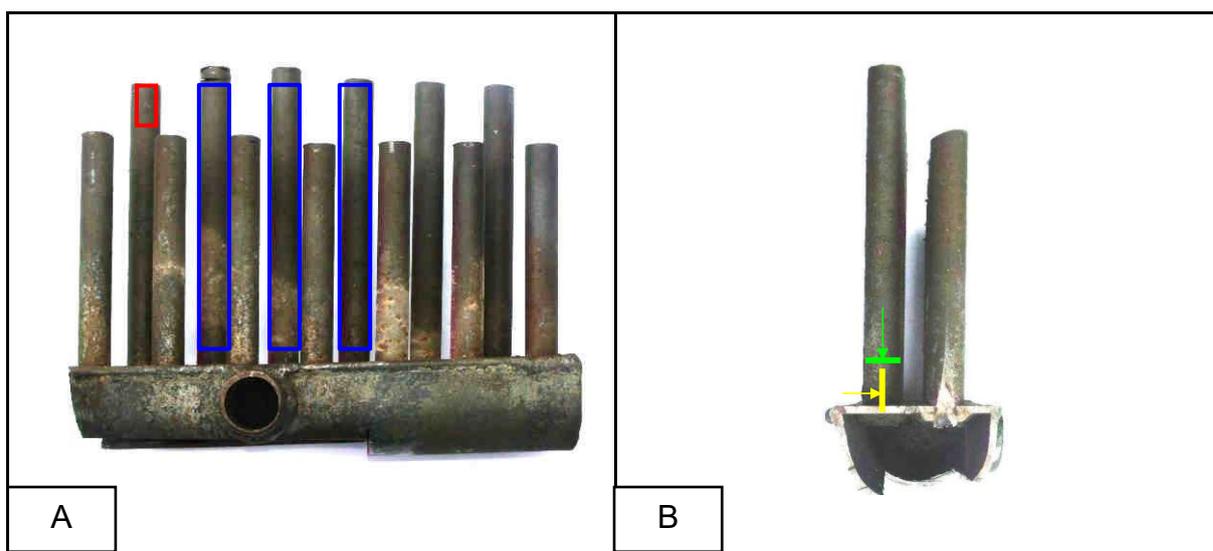
4 ANÁLISE DOS DADOS

4.1 ANÁLISE DO FEIXE TUBULAR

Para a realização dos ensaios no feixe tubular, as amostras foram identificadas conforme abaixo e removidas conforme figura 16 e identificadas conforme abaixo:

- S-57511: Coletor do condensador – Tubo Ø 1" x 1,5 mm – espectrometria;
- S-57512: Coletor do condensador – Tubo Ø 1" x 1,5 mm – metalografia;
- S-57513: Coletor do condensador – Tubo Ø 1" x 1,5 mm – ensaio mecânico de tração ;
- S-57514: Coletor do condensador – Tubo Ø 1" x 1,5 mm – ensaio mecânico de tração;
- S-57515: Coletor do condensador – Tubo Ø 1" x 1,5 mm – ensaio mecânico de tração.

Figura 16 – Regiões de remoção das amostras e análises: (A) Região realizada a espectrometria e em (B), região para análise metalográfica e tração.



Fonte: Próprio autor

Na figura 16 as amostras foram removidas como segue: (A) Em vermelho para espectrometria, em amarelo (B), para análise metalográfica na seção longitudinal, em verde (B) para análise metalográfica na seção transversal, e em azul (A), para os ensaios mecânicos de tração

4.1.1 ESPECTOMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA

Ensaio de Espectrometria BAIRD – Rev 05 Padrão: NIST 1763 Condições ambientais durante o ensaio: Temperatura 22°C e umidade 55%.

Norma de referência: ASTM E415-2017: Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry.

A amostra foi removida como indicado pela figura 15, sendo superfície preparada por lixamento.

A tabela 3 fornece o resultado da composição obtida como média de três análises.

Tabela 1 - Resultado da composição obtida por espectrometria de emissão óptica da amostra S- 57511: Tubo Ø 1" x 1,5 mm (% peso).

Fe Balanço	C 0,077	Si 0,019	Mn 0,356	P 0,004	S 0,015	Cr 0,025	Ni 0,031
Mo 0,086	Cu 0,011	Al 0,033	Ti 0,0007	V 0,0201	B 0,0038	Nb 0,0169	Zr 0,0015

O componente analisado cumpre requisitos de composição da norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A SA-53/SA-53M Tipo E Grau A (ed. 2015).

A tabela 4 mostra o comparativo entre amostra S-57511 e valores da norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A SA-53/SA-53M Tipo E Grau A (ed. 2015) (% peso).

Tabela 2 - Comparativo entre a composição obtida para a amostra com os requisitos da norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A SA-53/SA-53M Tipo E Grau A (ed. 2015) (% peso).

Elemento	Amostra S-57511 Tubo	Norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A SA-53/SA-53M Tipo E Grau A (ed. 2015)
C (Carbono)	0,077	0,25_{máx}
Mn (Manganês)	0,356	0,95_{máx}
P (Fósforo)	0,004	0,050_{máx}
S (Enxofre)	0,015	0,045_{máx}
Cu (Cobre)	0,011	0,40_{máx}
Ni (Níquel)	0,031	0,40_{máx}
Cr (Cromo)	0,025	0,40_{máx}
Mo (Molibdênio)	0,086	0,15_{máx}
V (Vanádio)	0,0201	0,08_{máx}
Cu+Ni+Cr+Mo+V	0,1731	1,00_{máx}

4.1.2 ANÁLISE METALOGRAFICA

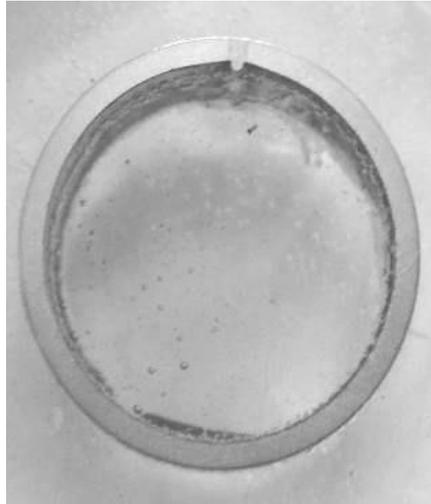
Ensaio de metalografia realizado com a utilização do microscópio Olympus para determinação de Inclusão Não Metálica e medição experimental do Tamanho de Grão Médio, com condições ambientais durante o ensaio: Temperatura 22,6°C e umidade 55%.

Normas de referência para a realização do ensaio: ASTM E407-2015: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, ABNT NBR NM88/2000: Aço – Determinação de Inclusões Não Metálicas – Método Micrográfico e ASTM E112-2013: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.

A amostra foi removida como indicado na figura 16, a preparação metalográfica foi realizada por lixamento até a granulometria 1200 seguido de

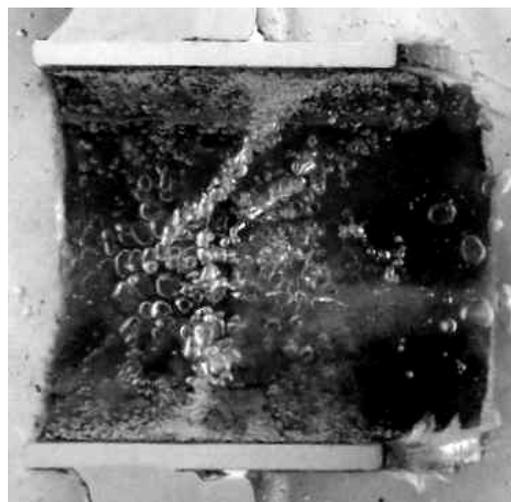
polimento em suspensão de alumina 1,0 μm . O ataque químico foi realizado com o reagente Nital 2%, seguido por análise por microscopia óptica e as figuras 16 e 17 mostram as secções transversal e longitudinal do tubo.

Figura 17 - Secção transversal da amostra S-57512



Fonte: Próprio autor

Figura 18 - Secção longitudinal da amostra S-57512



Fonte: Próprio autor

Os ensaios metalográficos obtidos são apresentados nas conforme as figuras 19,20,21,22 e 23.

Macrografia da amostra S-57512 conforme figura 19: Tubo – Meia espessura – Seção longitudinal – Apresenta distribuições de inclusões não metálicas do tipo óxidos globulares, série fina, tipo D, nível 1, conforme a norma ABNT NBR NM88 (ed. 2000). Sem ataque, 100X

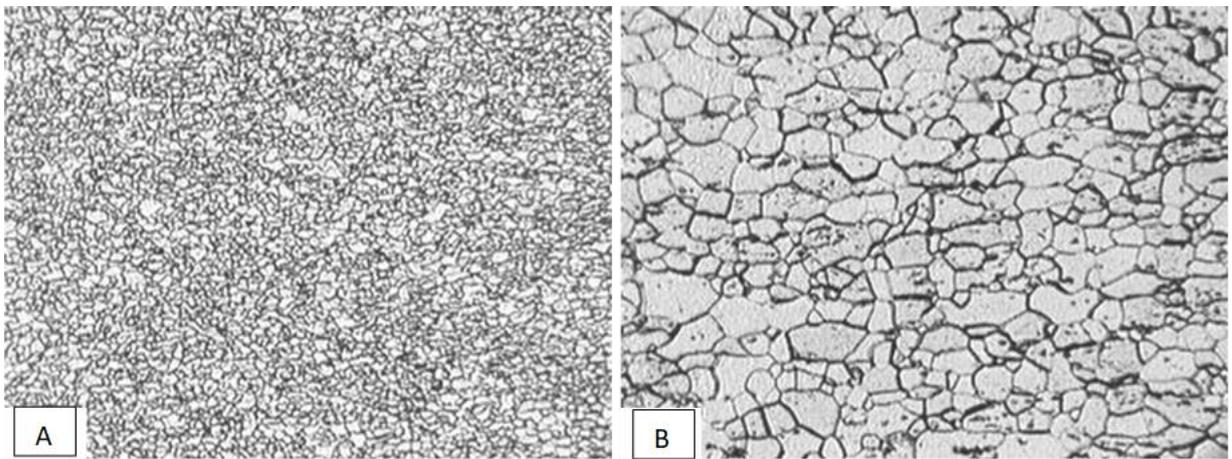
Figura 19 - Micrografia da amostra S-57512 – Meia espessura



Fonte: Próprio autor

Macrografia da amostra S-57512 conforme figura 20: Tubo – Meia espessura – Seção longitudinal – (a) Apresenta microestrutura composta por matriz ferrítica. Tamanho de grão ASTM 10. Nital 2%, 100X. (B) Detalhe da região em (A). Nital 2%, 400X.

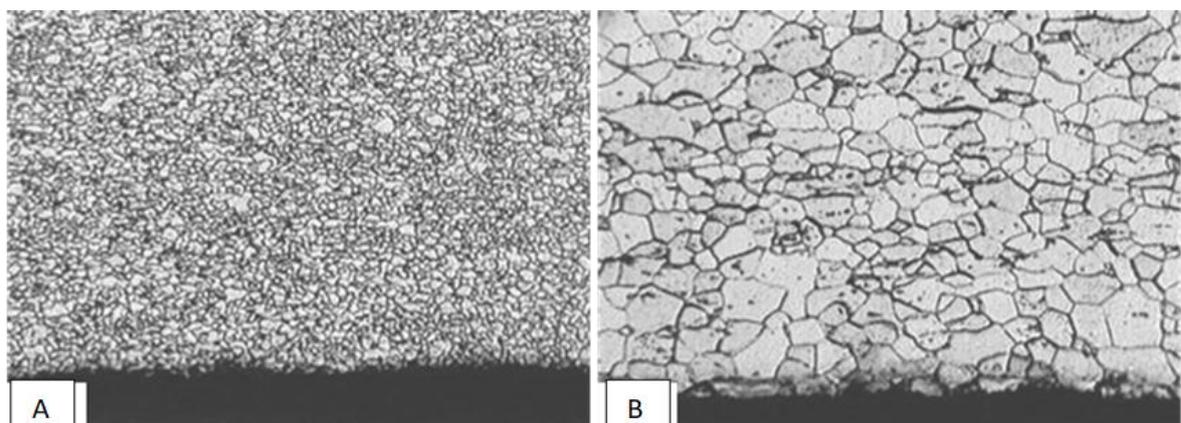
Figura 20 - Micrografia da amostra S-57512 – Meia espessura – Seção longitudinal



Fonte: Próprio autor

Macrografia da amostra S-57512 conforme figura 21: Tubo – Perfil da superfície interna – Seção longitudinal – (A) Apresenta microestrutura composta por matriz ferrítica. Tamanho de grão ASTM 10. Nital 2%, 100X. (B) Detalhe da região em (a). Nital 2%, 400X.

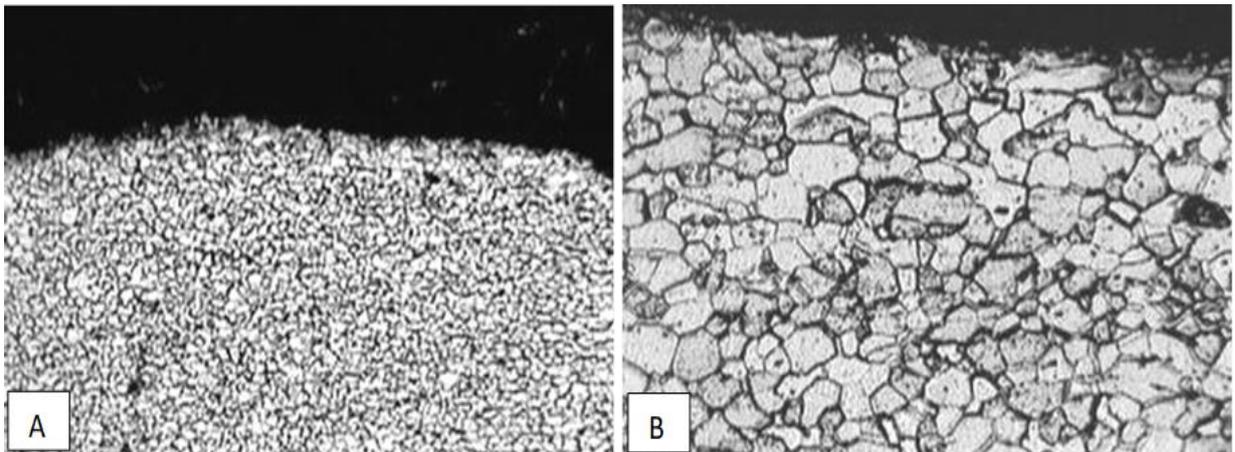
Figura 21 - Macrografia da amostra S-57512 – Tubo – Perfil superfície interna



Fonte: Próprio autor

Macrografia da amostra S-57512 conforme figura 22: Tubo – Perfil da superfície externa – Seção longitudinal – (A) Apresenta microestrutura composta por matriz ferrítica. Tamanho de grão ASTM 10. Nital 2%, 100X. (B) Detalhe da região em (A). Nital 2%, 400X.

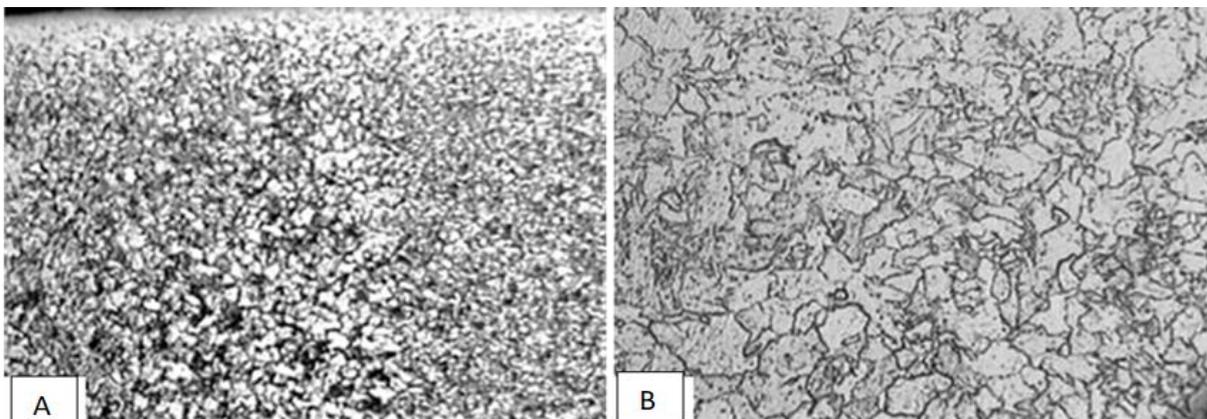
Figura 22 - Macrografia da amostra S-57512 – Tubo – Perfil da superfície externa



Fonte: Próprio autor

Macrografia da amostra S-57512 conforme figura 23: Costura do tubo-próximo à superfície externa – Seção Transversal – (A) Apresenta microestrutura composta por matriz ferrítica com transformação pelo efeito do processo de soldagem. 100X. (B) Detalhe de (A). Costura isenta de discontinuidades. Nital 2%, 400X.

Figura 23 - Macrografia da amostra S-57512 – Costura do tubo



Fonte: Próprio autor

O componente analisado apresenta distribuições de inclusões não metálicas do tipo óxidos globulares, série fina, tipo D, nível 1, conforme a norma ABNT NBR NM88 (ed. 2000), bem como apresenta microestrutura composta por matriz ferrítica, com tamanho de grão ASTM 10 em toda a seção analisada, ausência de decarbonetação superficial e a costura longitudinal do tubo isenta de descontinuidades.

4.1.3 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO

As amostras foram removidas como indicado pela figura 16. Os corpos de prova foram ensaiados na seção total conforme a norma ASTM A370 (ed. 2019).

Condições ambientais durante o ensaio: Temperatura 21°C e umidade 59%

Norma de referência: ASTM A370-2019: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.

Figura 24 - Corpos de prova para os ensaios mecânicos de tração



Fonte: Próprio autor

Tabela 3 - Resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração das amostras.

Amostra	Resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
S-57513	373,4	354,6	28,1
S-57514	373,4	354,6	29,0
S-57515	373,8	358,2	28,5

O material analisado cumpre requisitos de propriedades mecânicas estabelecidas conforme a norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A SA-53/SA-53M Tipo E Grau A (ed. 2015).

A tabela 6 fornece o comparativo entre os resultados obtidos para as amostras com os requisitos da norma citada.

Tabela 4 - Comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração das amostras com os requisitos da norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A

SA-53/SA-53M Tipo E Grau A (ed. 2015).

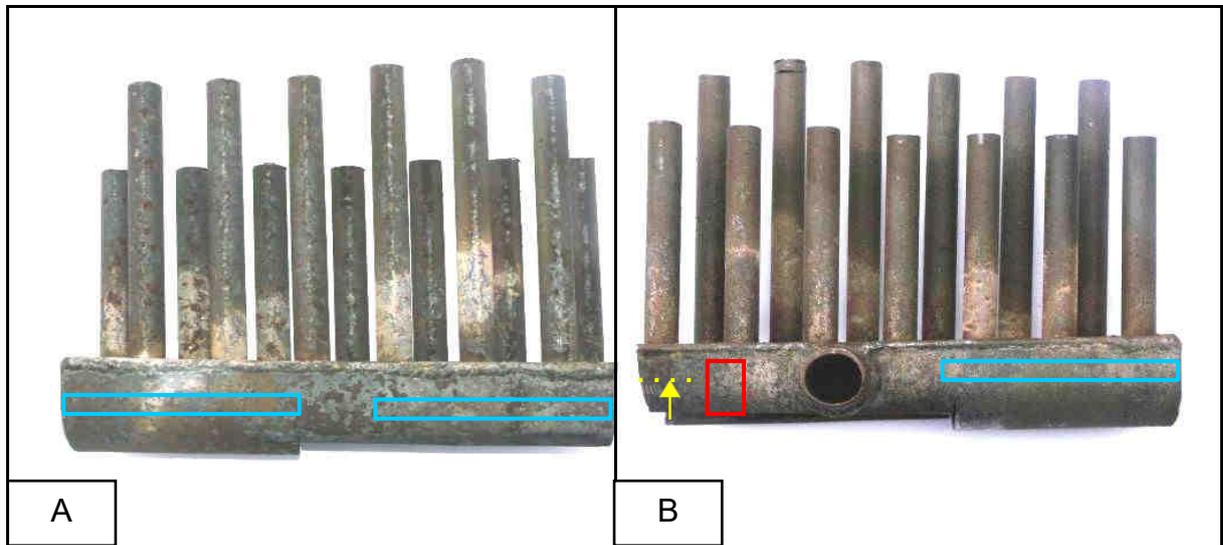
Amostra	Resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
S-57513	373,4	354,6	28,1
S-57514	373,4	354,6	29,0
S-57515	373,8	358,2	28,5
Média dos resultados	373,5	355,8	28,5
Norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A SA-53/SA-53M Tipo E Grau A (ed. 2015)	330,0_{min}	205,0_{min}	27,0_{min}

4.2 ANÁLISE DOS DADOS DO COLETOR COMPOSTO POR CHAPA CONFORMADA E CHAPA PLANA.

Para a realização dos ensaios no feixe tubular, as amostras foram identificadas conforme abaixo e removidas conforme figura 25 e identificadas conforme abaixo:

- S-57516: Chapa conformada – espectrometria;
- S-57517: Chapa conformada – metalografia;
- S-57518: Chapa conformada – ensaio mecânico de tração;
- S-57519: Chapa conformada – ensaio mecânico de tração;
- S-57520: Chapa conformada – ensaio mecânico de tração;
- S-57525: Chapa plana – espectrometria;
- S-57526: Chapa plana – metalografia;
- S – 57521: Tubo Ø 1" x 1,5 mm X Chapa 4,70 mm – macrografia;
- S – 57522: Chapa 4,7mm X Chapa 4,7mm – macrografia.

Figura 25 – Coletor chapa conformada – chapa plana.



Fonte: Próprio autor

As amostras foram removidas da figura 25 como segue: em (B) vermelho para espectrometria, em amarelo (B), para análise metalográfica, e em azul (A), para ensaios mecânicos de tração.

Figura 26 - Chapa plana



Fonte: Próprio autor

As amostras foram removidas da figura 26 como segue: em vermelho para espectrometria, em amarelo, para análise metalográfica.

4.2.1 ESPECTOMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA

Ensaio de Espectrometria BAIRD – Rev 05 Padrão: NIST 1763 Condições ambientais durante o ensaio: Temperatura 22°C e umidade 55%

Norma de referência para realização do teste: ASTM E415-2017: Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry. As amostras foram removidas como indicado pelas figuras 25 e 26, sendo as superfícies preparadas por lixamento.

As tabelas 7 e 8 fornecem os resultados das composições obtidas por amostra ensaiada como média de três análises.

Tabela 5 - Resultado da composição obtida por espectrometria de emissão óptica da amostra S- 57516- Chapa conformada (% peso).

Fe Balanço	C 0,111	Si 0,021	Mn 0,423	P 0,006	S 0,016	Cr 0,037	Ni 0,034
Mo 0,090	Cu 0,011	Al 0,032	Ti 0,0005	V 0,0204	B 0,0039	Nb 0,0165	Zr 0,0015

Tabela 6 - Resultado da composição obtida por espectrometria de emissão óptica da amostra S- 57525- Chapa plana (% peso).

Fe Balanço	C 0,111	Si 0,022	Mn 0,431	P 0,008	S 0,016	Cr 0,038	Ni 0,036
Mo 0,092	Cu 0,011	Al 0,033	Ti 0,0007	V 0,0207	B 0,0040	Nb 0,0184	Zr 0,0015

Os componentes analisados cumprem requisitos de composição da norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A SA-285/SA-285M Grau C (ed. 2015).

A tabela 9 mostra um comparativo entre as composições obtidas da chapa conformada e da chapa plana em relação a norma ASME.

Tabela 7 - Comparativo entre a composição obtida para a amostra com os requisitos da Norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A SA-285/SA-285M Grau C (ed. 2015) (% peso).

Elemento	Amostra S-57516 Chapa conformada	Amostra S-57525 Chapa plana	Norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A SA-285/SA-285M Grau C (ed. 2015)
C (Carbono)	0,111	0,111	0,28 _{máx}
Mn (Manganês)	0,423	0,431	0,98 _{máx}
P (Fósforo)	0,006	0,008	0,025 _{máx}
S (Enxofre)	0,016	0,016	0,025 _{máx}

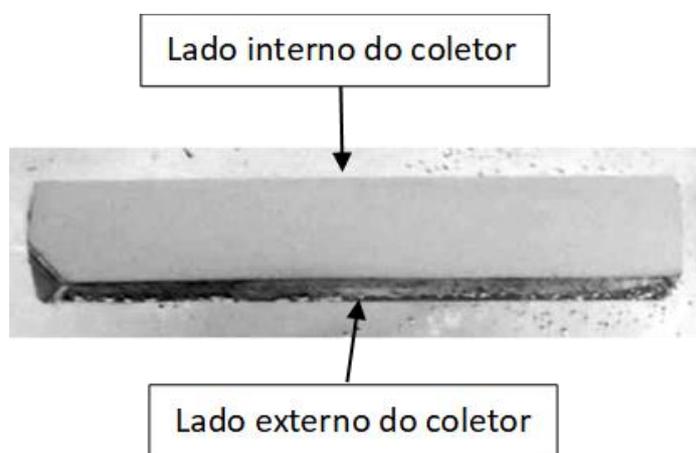
4.2.2 ANÁLISE METALOGRÁFICA

Ensaio de metalografia realizado com a utilização do microscópio Olympus para determinação de Inclusão Não Metálica e medição experimental do Tamanho de Grão Médio, com condições ambientais durante o ensaio: Temperatura 22,6°C e umidade 55%.

Normas de referência para a realização do ensaio: ASTM E407-2015: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, ABNT NBR NM88/2000: Aço – Determinação de Inclusões Não Metálicas – Método Micrográfico e ASTM E112-2013: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.

A amostra foi removida como indicado nas figuras 24 e 25, a preparação metalográfica foi realizada por lixamento até a granulometria 1200 seguido de polimento em suspensão de alumina 1,0 μm . O ataque químico foi realizado com o reagente Nital 2%, seguido por análise por microscopia óptica.

Figura 27 - amostra removida da chapa conformada S 57517



Fonte: Próprio autor

Macrografia da amostra S-57517 conforme figura 28: Chapa conformada – Meia espessura – Apresenta distribuição de inclusões não metálicas de óxidos globulares, série fina, tipo D, nível 3, conforme a norma ABNT NBR NM88 (ed. 2000). Sem ataque, 100X.

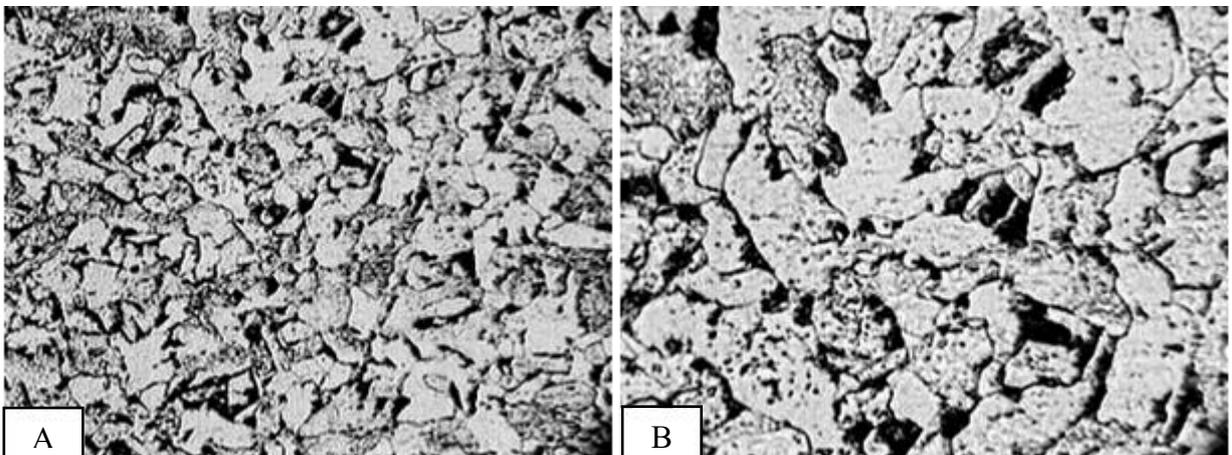
Figura 28 - Macrografia da amostra S-57517 – 100X



Fonte: Próprio autor

Macrografia da amostra S-57517 conforme figura 29: Chapa conformada – Meia espessura – (a) Apresenta microestrutura composta por matriz ferrítica com perlita. Tamanho de grão ASTM 10. Nital 2%, 400X. (b) Detalhe da região em (a). Nital 2%, 800X.

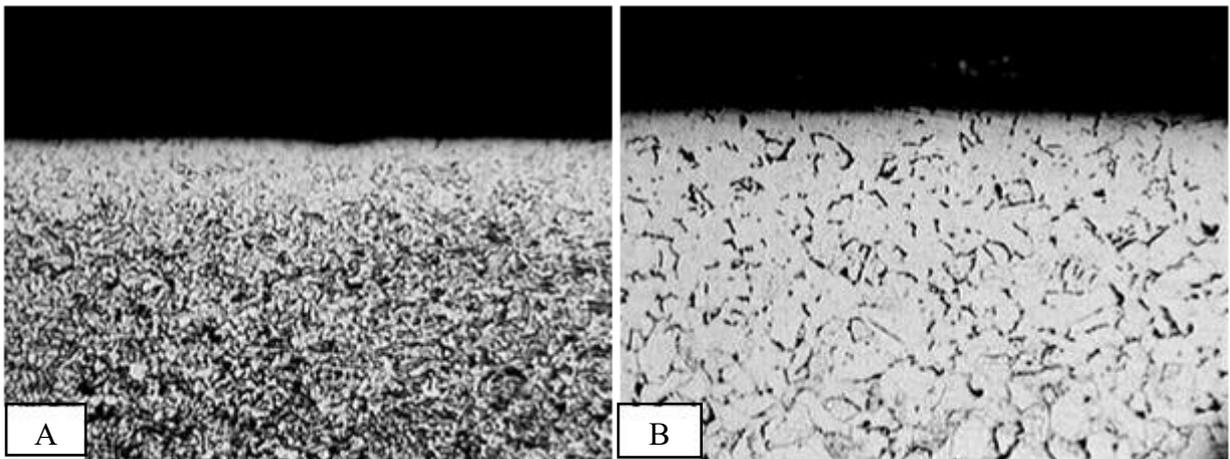
Figura 29 - Macrografia da amostra S-57517 – Chapa conformada a meia espessura



Fonte: Próprio autor

Macrografia da amostra S-57517 conforme figura 30: Chapa conformada – Perfil da superfície externa – (a) Apresenta microestrutura composta por matriz ferrítica com perlita. Tamanho de grão ASTM 10. Presença de camada descarbonetada com espessura de 0,05 mm. Nital 2%, 100X. (b) Detalhe da região em (a). Nital 2%, 400X.

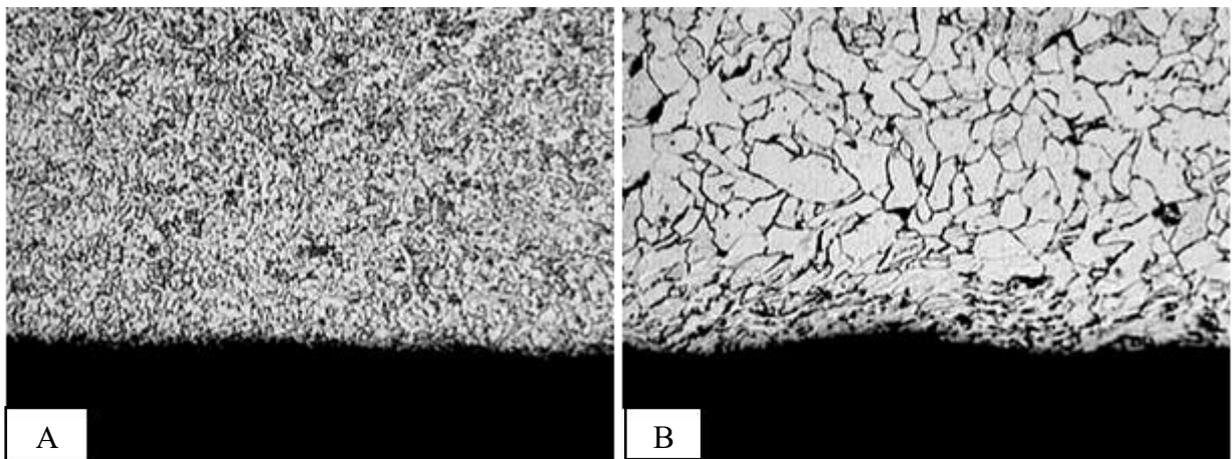
Figura 30 - Macrografia da amostra S-57517 - Perfil da superfície externa



Fonte: Próprio autor

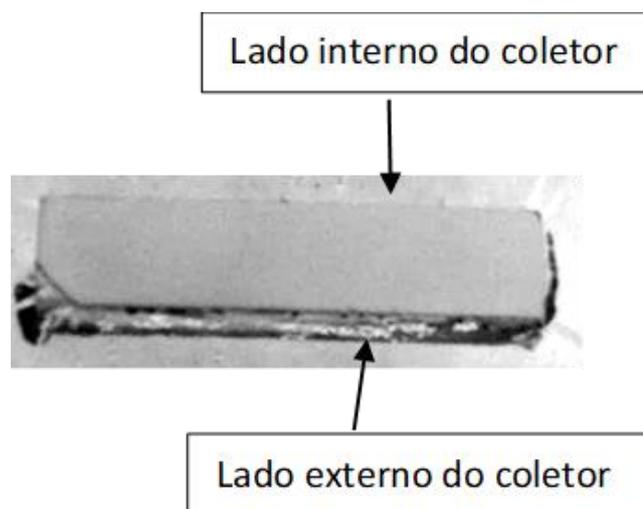
Macrografia da amostra S-57517 conforme figura 31: Chapa conformada – Perfil da superfície interna – (a) Apresenta microestrutura composta por matriz ferrítica com perlita. Tamanho de grão medido ASTM 10 Nital 2%, 100X. (b) Detalhe da região em (a). Nital 2%, 400X.

Figura 31 - Macrografia da amostra S-57517 – Perfil da superfície interna



Fonte: Próprio autor

Figura 32 - Amostra removida da chapa pana S 57526



Fonte: Próprio autor

Macrografia da amostra S-57526 conforme figura 33: Chapa plana – Meia espessura – Apresenta distribuição de inclusões não metálicas de óxidos globulares, série fina, tipo D, nível 3, conforme a norma ABNT NBR NM88 (ed. 2000). Sem ataque, 100X.

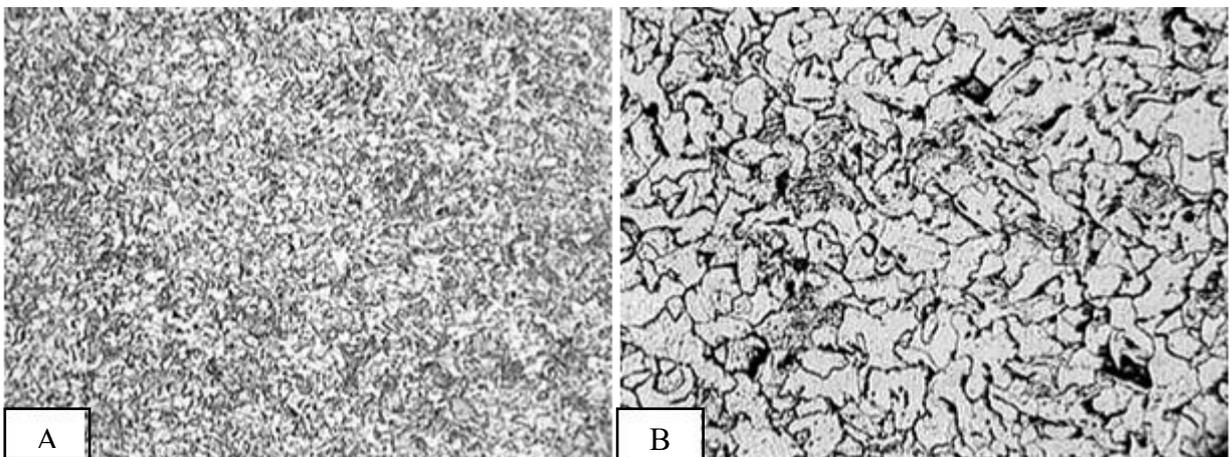
Figura 33 - Macrografia da amostra S-57526 – Meia espessura - 100X



Fonte: Próprio autor

Macrografia da amostra S-57526 conforme figura 34: Chapa plana – Meia espessura – (a) Apresenta microestrutura composta por matriz ferrítica com perlita. Tamanho de grão ASTM 10. Nital 2%, 100X. (b) Detalhe da região em (a). Nital 2%, 400X.

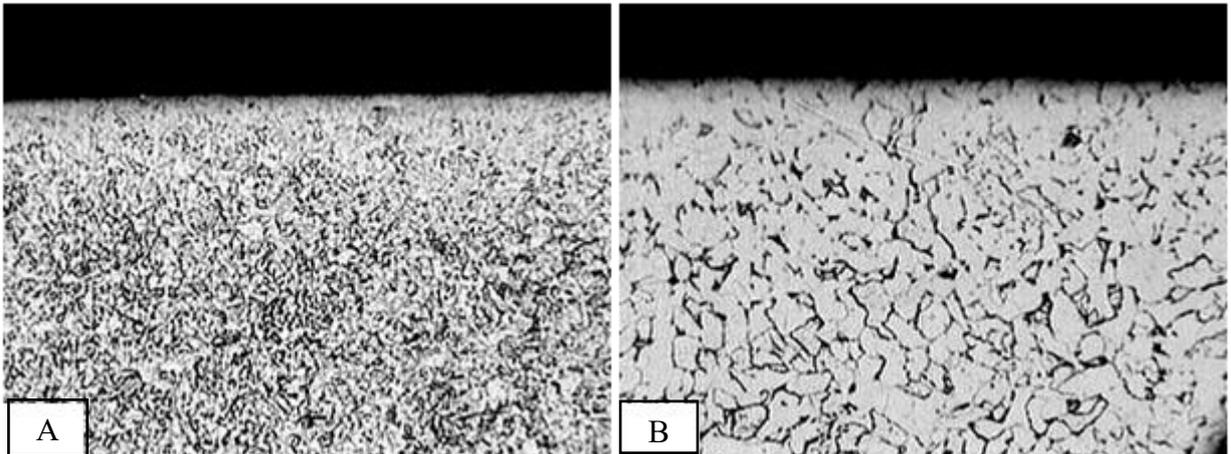
Figura 34 - Macrografia da amostra S-57526 – Meia espessura - 400X



Fonte: Próprio autor

Macrografia da amostra S-57526 conforme figura 35: Chapa plana – Perfil da superfície externa – (a) Apresenta microestrutura composta por matriz ferrítica com perlita. Tamanho de grão ASTM 10. Nital 2%, 100X. (b) Detalhe da região em (a). Nital 2%, 400X.

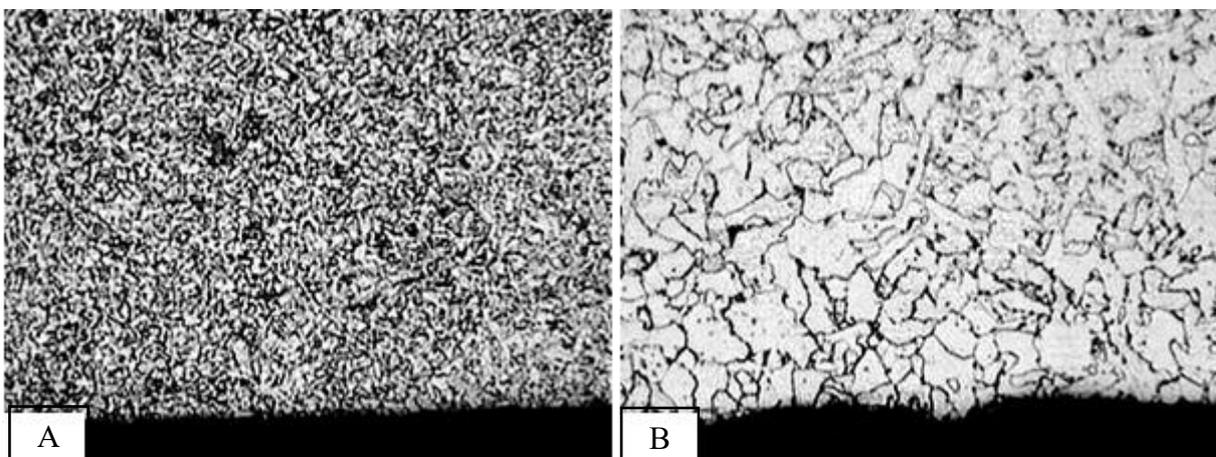
Figura 35 - Macrografia da amostra S-57526 – Superfície externa – 400X



Fonte: Próprio autor

Macrografia da amostra S-57526 conforme figura 36: Chapa plana – Perfil da superfície interna – (a) Apresenta microestrutura composta por matriz ferrítica com perlita. Tamanho de grão ASTM 10. Nital 2%, 100X. (b) Detalhe da região em (a). Nital 2%, 400X.

Figura 36 - Macrografia da amostra S-57526 – Superfície externa – 400X



Fonte: Próprio autor

Podemos observar que o resultado da amostra S – 57517 da chapa conformada que o componente analisado apresenta distribuição de inclusões não metálicas de óxidos globulares, série fina, tipo D, nível 3, conforme a norma ABNT NBR NM88 (ed. 2000). A microestrutura em toda a seção analisada é composta por matriz ferrítica com perlita e com tamanho de grão ASTM 10. Presença de camada descarbonetada próximo à superfície externa da chapa com espessura medida de 0,05 mm.

Referente ao resultado da amostra S – 57526 da chapa plana, o componente analisado apresenta distribuição de inclusões não metálicas de óxidos globulares, série fina, tipo D, nível 3, conforme a norma ABNT NBR NM88 (ed. 2000), e a microestrutura em toda a seção analisada é composta por matriz ferrítica com perlita e com tamanho de grão ASTM 10.

4.2.2 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO

Condições ambientais durante o ensaio: Temperatura 21°C e umidade 59%.

Norma de referência: ASTM A370-2019: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.

As amostras foram removidas como indicado pela figura 24. Os corpos de prova foram usinados conforme a norma ASTM A370 (ed. 2019).

A figura 37 apresenta os corpos de prova após a usinagem.

A tabela 10 fornece os resultados obtidos nos ensaios das amostras.

Figura 37 - Chapa conformada – Corpos de prova usinados para os ensaios mecânicos de tração.



Fonte: Próprio autor

Tabela 8 - Resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração das amostras.

Amostra	Resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
S-57518	451,3	366,9	29,2
S-57519	466,1	391,5	28,0
S-57520	463,7	384,2	27,0

Quanto as propriedades mecânicas da chapa conformada, O material analisado cumpre requisitos de propriedades mecânicas conforme a norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A SA-285/SA-285M Grau C (ed. 2015). A tabela 11 fornece o comparativo entre os resultados obtidos para as amostras com os requisitos da norma citada.

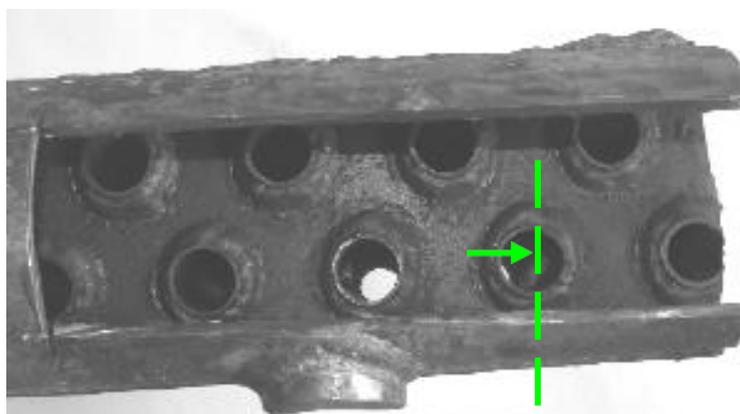
Tabela 9 - Comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios mecânicos de tração das amostras com os requisitos da norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A SA-283/SA-283M Grau C (ed. 2015).

Amostra	Resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
S-57518	451,3	366,9	29,2
S-57519	466,1	391,5	28,0
S-57520	463,7	384,2	27,0
Média	460,4	380,9	28,1
Norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A SA-285/SA-285M Grau C (ed. 2015).	380,0-515,0	205,0_{min}	27,0_{min}

4.2.3 ENSAIO DE MACROGRAFIA

O ensaio metalográfico consiste em ensaios realizados em materiais metálicos, para caracterização de suas propriedades metalográficas. São realizados ensaios macrográficos em peças soldadas para se ter uma noção da qualidade da solda ou da zona termicamente afetada.

Figura 38 - Componente na condição de como recebido para os ensaios propostos. Em verde, região de remoção das amostras para macrografia.



Fonte: Próprio autor

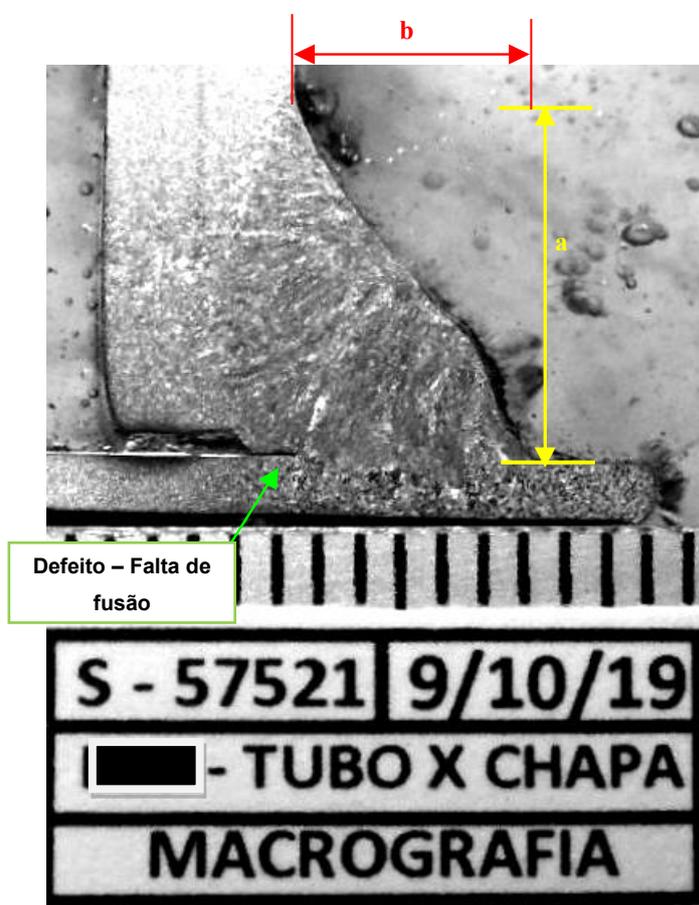
Condições ambientais durante o ensaio: Temperatura 22°C e umidade 55%.

Norma de referência: ASTM E407-2015: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.

As amostras foram removidas como indicado na figura 38, e a preparação macrográfica foi realizada por lixamento até granulometria 600. O ataque químico foi realizado com reagente Nital 10%, seguido por análise macrográfica tendo como referência a norma ASME IX (ed 2019).

Os resultados das macrografias são apresentadas conforme figuras 39, 40 e 41. A macrografia realizada na amostra S-57521, conforme figura 39, apresenta falta de fusão na raiz (em verde). Dimensões das pernas: (a x b) 9,2 x 5,8mm. Garganta efetiva: 5,4mm. Nital 10%. Escala em milímetros.

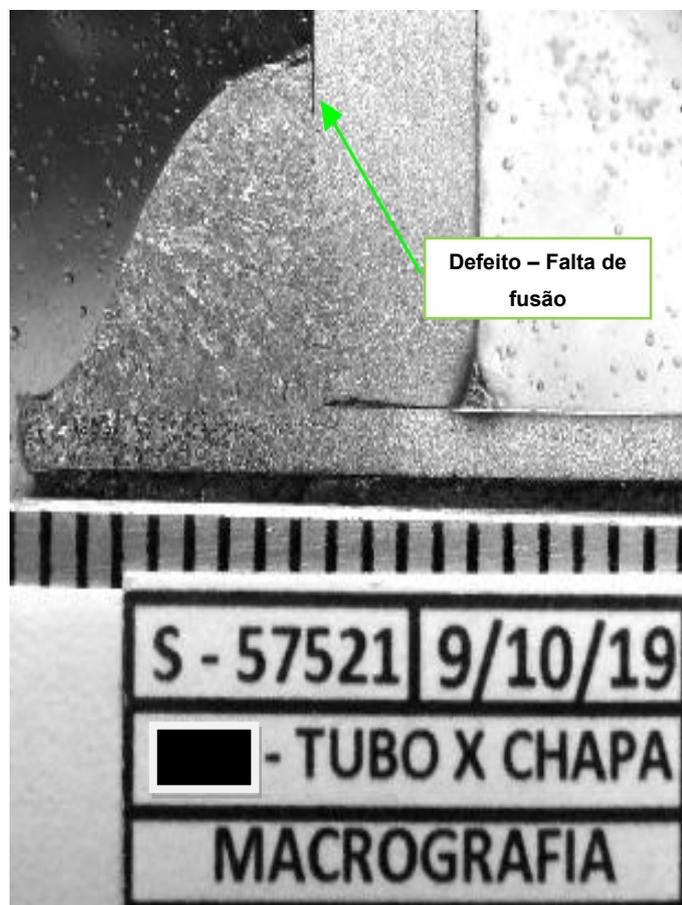
Figura 39 - Amostra S-57521: Tubo X Chapa – Junta soldada



Fonte: Próprio autor

A figura 40, apresenta a macrografia realizada na amostra S-57521, a qual foi observado falta de fusão (em verde). Dimensões das pernas: (a x b) 8,0 x 8,0mm – Garganta efetiva: 6,5mm. Nital 10%. Escala em milímetros.

Figura 40 - Amostra S-57521:Tubo X Chapa: Junta soldada oposta a 180° da figura 39



Fonte: Próprio autor

A figura 41, apresenta a macrografia realizada na amostra S-57522, a qual foi observada na junta soldada falta de penetração. Espessura mínima no metal de solda = 2,5 mm (em vermelho). Nital 10%. Escala em milímetros.

Figura 41 - Amostra S-57522: Tubo coletor – Chapa X Chapa



Fonte: Próprio autor

Os resultados obtidos nos ensaios de macrografia nas amostras comparados aos requisitos da norma ASME IX (ed. 2018), é possível observar os seguintes pontos:

- Junta soldada - tubo \varnothing 1" x 1,5 mm – Amostra S-57521

As juntas soldadas de união da chapa plana com o tubo apresentam falta de fusão, e portanto, não cumprem os requisitos da norma ASME IX (ed. 2019);

- Junta soldada - chapa plana x chapa conformada – Amostra S - 57522

A junta soldada de união das chapas apresentam falta de penetração, e portanto, não cumprem os requisitos da norma ASME IX (ed. 2019);

4.3 PLANO DE INSPEÇÃO E TESTES

O plano de inspeção e testes proposto foi dividido em três etapas, a primeira etapa se refere a checagem de documentação de projeto e de profissionais envolvidos na fabricação, a segunda etapa composta por inspeção de fabricação e a terceira etapa de entrega do livro de segurança do equipamento ou databook.

A primeira etapa do plano é composta pelos seguintes itens:

- Checar o detalhamento do projeto executivo proposto e confirmar se atende a norma ASME B 31.3 e NR12;
- Conferir cálculo da pressão máxima de trabalho admissível PMTA conforme ASME B 31.3;
- Verificar certificados dos materiais usados na fabricação do equipamento conforme norma ASME B 13.3;
- Verificar a especificação do procedimento de soldagem conforme norma ASME IX;
- Verificar o registro de qualificação do processo de soldagem conforme norma ASME IX;
- Verificar o registro de qualificação dos soldadores;
- Verificar os procedimentos internos dos ensaios realizados ou da empresa fornecedora conforme ASME V;
- Conferir a qualificação dos inspetores de soldagem conforme FBTS / SNQC ABENDI;
- Conferir a qualificação dos inspetores que serão usados no controle de qualidade do processo conforme SNQC ABENDI;
- Realizar a verificação da pintura conforme N 1358/ ISO 3233.

A segunda etapa de checagem remete a inspeção durante a fabricação do equipamento, composta pelos seguintes itens:

- Conferência de desenhos do equipamento conforme NBR 5580;
- Realizar inspeção visual nas soldas conforme AWS D 1.1;
- Realizar ensaio de líquido penetrante na raiz e acabamento na junta dos coletores principais e auxiliares conforme ASME B 31.3;
- Realizar ensaio de líquido penetrante nas juntas da serpentina conforme ASME B 31.3;
- Realizar macografia na junta soldada, mínimo uma por geometria;
- Realizar ultrassom nas juntas dos coletores (soldas de topo), conforme ASME B 31.3;
- Realizar ensaio de radiografia em juntas das serpentinas de topo onde não há acesso para a realização do ultrassom, conforme norma ASME B 31.1;
- Realizar verificação da pintura conforme normas N1318 / ISO 3233;
- Realizar teste de estanqueidade conforme norma NBR 5580;
- Realizar teste hidrostático com 25 kgf/cm²;
- Realizar a identificação dos blocos via sinete dos soldadores e identificar equipamento.

A terceira etapa do plano de inspeção e testes, refere-se a entrega da documentação para formar o livro de segurança do equipamento ou databook, que é composto pelos seguintes itens:

- Entrega do relatório de inspeção dimensional da serpentina;
- Entrega do relatório de inspeção visual de soldagem;
- Entrega dos relatórios de macrografia;

- Entrega dos relatórios de inspeção por líquido penetrantes;
- Entrega dos relatórios de inspeção por ultrassom;
- Entrega dos relatórios de inspeção por radiografia;
- Entrega dos relatórios de estanqueidade da serpentina e do equipamento completo;
- Entrega do relatório de revestimentos utilizados;
- Checar prazo de garantia do equipamento;
- Emissão na anotação de responsabilidade técnica referente ao projeto e fabricação;
- Checar pressurização do equipamento para transporte e entrega.

Podemos observar sistematicamente consolidada as três etapas do plano de inspeção e testes no quadro 3, e ele foi construído para facilitar o trabalho do inspetor em campo, remetendo a cada item que deve ser verificado para garantir a integridade estrutural do equipamento e bloquear possíveis falhas de fabricação.

Quadro 3 – Proposta de um plano de inspeção e testes

PLANO DE INSPEÇÃO E TESTES (PIT)		DATA: 17/02, 09 e 16/03/2020
Fornecedor / Fabricante: XXXXX		Equipamento: 8 Blocos de Condensador (Substituição) – Liso 3600 x 12
Cliente Final: Rio Verde / GO		Pedido de Compra: Desenho Código 11-005443-2-2_0-0
Especificação / Norma Base: ASME B 31.3 (2018)		PIT Número: 003/2020 Revisão 0.

ITEM	ENSAIO	ATIVIDADES DE INSPEÇÃO	Amostra / Norma	TIPO DE INSPEÇÃO			OBSERVAÇÃO
				F	L	S	
1.1	DOCUMENTAÇÃO ETAPA 1 DE 3	Conferir detalhamento do Projeto – Atendimento norma	100% ASME B31.3 (2018) NR12			X	
1.2		Conferir Cálculo da PMTA do equipamento	100% ASME B31.3 (2018)			X	
1.3		Certificados dos materiais usados na fabricação do equipamento / conforme especificado em projeto e galvanização	100% ASME B31.3 (2018) Norma 6323			X	
1.4		Verificar EPS (Especificação de Procedimento de Soldagem)	100% ASME IX – 2019			X	
1.5		Verificar a RQPS usada na soldagem	100% ASME IX – 2019			X	
1.6		Verificar a RQS dos soldadores	100% ASME IX – 2019			X	
1.7		Verificar os procedimentos internos os ensaios realizados ou de uma empresa fornecedora	100% ASME V – 2017				
1.8		Conferir a qualificação dos inspetores de soldagem	100% FBTS / SNQC ABENDI				
1.9		Conferir a qualificação dos inspetores que serão usados no controle de	100% SNQC ABENDI				

		qualidade do processo SQNC ABENDI).					
1.10		Realizar a verificação da pintura	100% N1358 Iso 3233-1998)				

ITEM	ENSAIO	ATIVIDADES DE INSPEÇÃO	AMOSTRAGEM Critério de Aceitação	TIPO DE INSPEÇÃO			OBSERVAÇÃO
				F	L	S	
2.1	INSPEÇÃO DE FABRICAÇÃO ETAPA 2 DE 3	Conferir dimensões principais dos desenhos – Coletores e serpentina conforme projeto. Espessura mínima da serpentina nas curvas	100% PROJETO nbr 5580:2002 (Item 4.3.2.3)			X	
2.2		Realizar exame visual de soldagem nas soldas dos coletores conforme	100% AWS D1.1 2018 (dinamicamente carregados)			X	
2.3		Realizar ensaio de liquido penetrante na raiz e acabamento nas juntas dos coletores principais e auxiliares	100% ASME B 31.3 2018			X	
2.4		Realizar ensaio de liquido penetrante nas juntas da serpentina	100% ASME B 31.3 2018			X	
2.5		Realizar Macrografia na junta soldada da serpentina / Topo.	1 por geometria Lixamento até granulometria 600 e Ataque Nital 10%	X			

PLANO DE INSPEÇÃO E TESTES (PIT)		DATA: 17/02, 09 e 16/03/2020
Fornecedor / Fabricante: XXXXX		Equipamento: 8 Blocos de Condensador (Substituição) – Liso 3600 x 12
Cliente Final: Rio Verde / GO		Pedido de Compra: Desenho Código 11-005443-2-2_0-0
Especificação / Norma Base: ASME B 31.3 (2018)		PIT Número: 003/2020 Revisão 0.

2.6	Realizar ensaio de ultrassom nas juntas dos coletores (soldas de topo).	100% ASME B 31.3 2018			X	
2.7	Realizar ensaio de radiografia em juntas da serpentina (topo) onde não há acesso para realização de ultrassom.	10% ASME B 31.3 2018				
2.8	Realizar a verificação da pintura	100% N1358 (sq 3233-1998)			X	
2.9	Teste de Estanqueidade da serpentina com 50,0 kgf / cm ² durante 5 segundos	100% nBr 5580:2002 (item 6.3.4.1.1)			X	
2.10	Teste Hidrostático com 25,0 kgf / cm ² – Equipamento completo	100%	X			
2.11	Realizar identificação dos blocos via sinete dos soldadores e da identificação do equipamento	100%	X			
2.12	Indicar dispositivo de segurança para garantir o funcionamento seguro do equipamento	100%	X			

ITEM	ENSAIO	ATIVIDADES DE INSPEÇÃO	AMOSTRAGEM	TIPO DE INSPEÇÃO			OBSERVAÇÃO
				F	L	S	
3.1	ENTREGA FINAL ETAPA 3 DE 3	Relatórios de inspeção dimensional da serpentina	100%	X			
3.2		Relatórios de inspeção Visual de soldagem	100%			X	
3.3	ENTREGA DO DATA BOOK DO EQUIPAMENTO	Relatórios de Macrografia	100%	X			
3.4		Relatórios de inspeção por Líquido Penetrante	100%			X	
3.5		Relatórios de inspeção por ultrassom	100%			X	

3.6	Relatórios de inspeção por radiografia	100%				
3.7	Relatórios de Estanqueidade da serpentina e do equipamento completo	100%	X			
3.8	Relatórios de Revestimento (galvanização) com espessura mínima de 85 micras de espessura de camada	100% NBR6323;ASTMA123			X	
3.9	Conferir a garantia do equipamento	100%	X			
3.10	Entrega Final do databook com ART Anotação de Responsabilidade Técnica relativa ao projeto e a fabricação.	100%	X			
3.11	Envio do equipamento pressurizado com nitrogênio a uma pressão de 3,0 bar com manômetro instalado.		X			

F – Fabricante L – Laboratório Terceirizado S – Sub-Fornecedor

O quadro 3, apresenta uma proposta de um plano de inspeção e testes que foi desenvolvida nesta pesquisa, a qual tem a finalidade de garantir que a fabricação ocorra conforme a proposta da tabela, e assegurando a qualidade dos trocadores de calor evaporativos adquiridos pela empresa.

Após a elaboração do projeto executivo de ampliação ou modernização da instalação de refrigeração, que contempla a aquisição de trocadores de calor tipo evaporativo, na emissão do contrato de compra para o fornecedor, a tabela 12 deve ser inserida junto para assinatura do contrato, colocando o fornecedor ciente das exigências quanto a documentação exigida, inspeções e testes que serão realizadas durante o processo de fabricação do equipamento, sendo todas as etapas restritivas para o aceite técnico do equipamento.

Configurando a sistemática de inspeção exigida durante a fabricação de equipamentos para refrigeração industrial remetendo a uma metodologia de inspeção e testes, conforme apresentado na tabela 12, temos como assegurar a integridade mecânica do equipamento, refletindo em uma maior disponibilidade, produtividade e segurança operacional para a empresa que adquiriu o equipamento.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Verificando os ensaios mecânicos – metalúrgicos realizados no feixe tubular do trocador de calor e no coletor composto por chapa conformada e chapa plana, afim de certificar que os materiais empregados para a fabricação são aderente as normas aplicáveis e identificar se houve alguma alteração na microestrutura que pudesse levar a falha do trocador de calor em questão, podemos afirmar que os requisitos mínimos normativos referente a sua composição química e propriedades mecânicas, que o componente analisado cumpre requisitos de composição química conforme a norma ASME BPVC SEÇÃO II PARTE A SA-53/SA-53M Tipo E Grau A, e quanto suas propriedades mecânicas e micrográficas atendem as seguintes normas: ASTM E407-2015: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, ABNT NBR NM88/2000: Aço – Determinação de Inclusões Não Metálicas – Método Micrográfico e ASTM E112-2013: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, e ASTM A370-2019: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.

Os resultados da caracterização das juntas soldadas revelaram através das macrografias realizados nas uniões soldadas dos conjuntos tubo - chapa plana e chapa plana – chapa conformada, conforme figuras 39, 40 e 41, que houveram descontinuidades na união soldada, como falta de fusão, falta de penetração e projeto inadequado da união soldada. esses defeitos fragilizam a união soldada e o que ocasionou a falha prematura do equipamento (COCOTA, 2017).

A junta soldada é por natureza uma região crítica para o início de trincas, e devido às descontinuidades macro e microscópicas, encontradas na investigação das uniões soldadas, geraram concentrações de tensão na zona soldada, o que ocasionou consequentemente a ruptura das mesmas. (BARBOSA, 2019).

A penetração da solda tem um grande impacto sobre a resistência da junta e consequentemente sobre sua vida útil, a diluição da solda também influência na

qualidade da solda e área da zona afetada pelo calor (ZTA) deve ser reduzido para melhorar a qualidade da solda. (PAL; PAL, 2010).

Nas macrografias realizadas neste trabalho, observamos que as tecnologias empregadas no controle e inspeção do processo de soldagem precisam de atualização constante, principalmente nas atividades de fabricação de equipamentos críticos. Para produzir soldas de alta qualidade e de forma consistente, a soldagem a arco elétrico requer pessoal treinado, certificado e qualificado aliado a procedimentos definidos de fabricação e inspeção portanto, o uso do sistema de controle na fabricação pode eliminar muito do "palpite de trabalho" frequentemente empregado por soldadores para especificar parâmetros de soldagem para uma dada tarefa (TEWARI; GUPTA; PRAKASH, 2010).

Os métodos de ensaios não destrutivos propostos no plano de inspeção e testes, sugeridos neste trabalho como: Ensaio de líquido penetrante, inspeção visual, ensaio de ultrassom e ensaio de radiografia, são amplamente utilizados e aprovados para a detecção dos defeitos encontrados nas uniões soldadas com o principal objetivo de detectar defeitos intoleráveis e para determinar as coordenadas, tamanho e tipo de defeitos detectados. Diagnóstico cuidadoso de um defeito detectado torna possível considerar o ensaio não destrutivo como um técnica para refinamento de tolerâncias a defeitos de uniões soldadas. (GURIVETA; PRONYAKIN, 1996).

A grande maioria das fabricantes de equipamento para refrigeração industrial, possuem basicamente um processo de fabricação artesanal, potencializado pela ausência de controles e padrões no processo produtivo bem como a falta de um plano de inspeção e testes destes equipamentos durante sua fabricação, que fosse capaz de checar cada etapa do processo, causaram a falha do equipamento conforme indicado na figura 14.

Para garantirmos uma fabricação que atenda as boas práticas de fabricação, a existência de um plano de inspeção e testes composto por verificações durante a

produção, e de ensaios não destrutivos é um método eficaz que garante o cumprimento dos requisitos mínimos estabelecidos para auditar o processo de fabricação de equipamentos de responsabilidade como os trocadores de calor utilizados em refrigeração industrial. (CARVALHO, 2008).

Com o plano de inspeção e testes aplicado nas etapas de projeto e fabricação dos equipamentos de refrigeração industrial, conseguimos bloquear as principais descontinuidades tais como, poros, falta de fusão e penetração, fissuras formadas em diferentes momentos de soldagem, inclusões, e heterogeneidade microestrutural, conseqüentemente o grande ganho é na segurança operacional, em função de ter um equipamento seguro produzido de acordo com as normas de fabricação de classe mundial além de ganhos de produtividade. (BARBOSA, 2019).

A abrangência do plano de inspeção e testes, pode iniciar na etapa de homologação de fornecedores, visto que ele remete a documentações de projeto, qualificação do pessoal envolvido na fabricação, e na etapa de produção do item, visto que ele remete as inspeções a serem realizadas durante o processo produtivo a fim de assegurar a qualidade dos materiais e processos de soldagem envolvidos. A metodologia inicia quando o plano de inspeção e testes é enviado a empresa homologada que irá fabricar o trocador de calor, sendo que o aceite técnico do equipamento pela empresa contratante é feito quando 100% dos itens são aprovados pelo time de inspeção da empresa contratante, garantindo assim que o equipamento seja recebido e entre em operação atendendo os padrões definidos no plano. (SMITH, 2019).

6 CONCLUSÕES

A partir da presente pesquisa observou-se que nos ensaios realizados para caracterização mecânico – metalúrgica realizada no feixe tubular do equipamento observamos que os materiais empregados atendem as normas ASME e ABNT que são amplamente referenciadas para fabricação de trocadores de calor.

A caracterização mecânica – metalúrgica do coletor composto por chapa conformada e chapa plana, observamos que os materiais empregados estão de acordo com as normativas utilizadas para projeto de trocadores de calor, mas na investigação realizada nas uniões soldadas do coletor do trocador de calor evaporativo, através dos ensaios macrográficos, revelaram descontinuidades nas juntas soldadas que geraram concentrações de tensão na zona soldada e contribuíram para a falha do equipamento em questão.

Foi criado um plano de inspeção e testes, composto por 33 itens subdivididos em 3 grandes grupos, que abrangem as etapas de análise de documentação de materiais empregados, qualificação dos soldadores e memoriais de cálculos, a etapa de inspeção de fabricação a qual são exigidos ensaios não destrutivos para assegurar a qualidade das uniões soldadas, e por último a etapa de entrega final do equipamento onde são conferidos e arquivados todos os relatórios das inspeções realizadas, a anotação de responsabilidade técnica de projeto e fabricação, a fim de formalizar a entrega do data book ou livro de segurança do equipamento.

O plano de inspeção e testes proposto nesta pesquisa, garante que em todas as etapas de fabricação do equipamento, sejam respeitadas normas, procedimentos e padrões definidos, a fim de garantir além da integridade mecânica do equipamento, a segurança operacional, visto que um vazamento de amônia pode colocar em risco a vida dos colaboradores das empresas que empregam refrigeração industrial por meio de amônia em seus processos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, sugerem-se os seguintes pontos:

- Estudo de falhas em tubulações de aço carbono utilizadas para refrigeração industrial;
- Estudo falhas em válvulas utilizadas para refrigeração industrial;
- Estudo de falhas em evaporadores utilizados em refrigeração industrial;
- Estudo de técnicas não destrutivas para ensaio de tubulações e vasos de pressão sem a remoção de isolamento térmico;
- Estudo de vida remanescente para equipamentos de refrigeração industrial;
- Impacto da refrigeração variável na performance de túneis de congelamento;
- Análise do desempenho de uniões soldadas submetidas a baixas temperaturas.

8 REFERÊNCIAS

8.1 REFERÊNCIA NOMINAIS

ANDREUCCI, Ricardo. Partículas Magnéticas. São Paulo: Abende, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM88: aço – **determinação de inclusões não metálicas.- método micrográfico** 3.ed. Rio de Janeiro, 2000. 39 p

ASTM E407-99. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, American Society for Testing Materials (ASTM), Disponível em: www.astm.org. Acesso em 08 nov. 2019.

ASTM-E112. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, American Society for Testing Materials (ASTM) 2013. Disponível em: www.astm.org. Acesso em 08 nov. 2019.

BARBOSA, Luiz Henrique Soares et al. Fatigue crack growth rates on the weld metal of high heat input submerged arc welding. **International Journal of Fatigue**, v. 119, p. 43-51, 2019. Percentil Scopus 95%.

BARRA, S. R.; SANTOS, A. Descontinuidades em Soldagem-Florianópolis-SC. **Universidade Federal de Santa Catarina-Centro Tecnológico, Outubro, 1999.**

BOILER, A. S. M. E. et al. Rules for inservice inspection of nuclear power plant components. **ASME Boiler and Pressure Vessel Code An International Code**, 2001..

CARVALHO, A. A. et al. Reliability of non-destructive test techniques in the inspection of pipelines used in the oil industry. **International journal of pressure vessels and piping**, v. 85, n. 11, p. 745-751, 2008. Percentil Scopus 67%

COCOTA, José Alberto Naves et al. Discontinuity detection in the shield metal arc

welding process. **Sensors**, v. 17, n. 5, p. 1082, 2017. Percentil Scopus 87%.

CODE, Pressure Vessel. Rules for Construction of Pressure vessels. **American Society of Mechanical**, 1989.

DA SILVA, Alex Sander Chaves; SILVEIRA, Vitor Affonso Lopes; DE SOUZA, Henrique Carvalho. Ensaio não destrutivo aplicados na fabricação e recuperação de trocadores de calor casco tubos/Non-destructive tests in the manufacture and recovery of shell and tube heat exchangers. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 7, p. 8767-8786, 2019.

DRINKWATER, Bruce W.; WILCOX, Paul D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review. **NDT & e International**, v. 39, n. 7, p. 525-541, 2006. Percentil Scope: 88%.

DUFFUAA, S. O.; KHAN, Mehmood. Impact of inspection errors on the performance measures of a general repeat inspection plan. **International Journal of Production Research**, v. 43, n. 23, p. 4945-4967, 2005. Percentil Scope: 94%

ECHER, Leonel. Análise de uniões soldadas através do método da tensão estrutural via elementos finitos. 2012..

ELMARAGHY, H. A.; GU, P. H.; BOLLINGER, J. G. Expert system for inspection planning. **CIRP Annals**, v. 36, n. 1, p. 85-89, 1987. Percentil Scope: 94%.

ESAB. Soldagem e cortes Brasil. Disponível em : <http://www.esab.com.br/>. Acesso em 08 out. 2019.

GARCES, Solange Beatriz Billig. Classificação e tipos de pesquisas. **Universidade de Cruz Alta–Unicruz**, 2010.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. dos. Ensaio dos Materiais. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora. UNICAMP, Campinas. 2000.

GARCÍA-MARTÍN, Javier; GÓMEZ-GIL, Jaime; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, Ernesto. Non-destructive techniques based on eddy current testing. **Sensors**, v. 11, n. 3, p. 2525-2565, 2011. Percentil Scopus 87%.

GURIEVA, T. M.; PRONYAKIN, V. T. The methods of detection and the analysis of welded and brazed joint defects emerging during ITER components manufacturing. **Journal of nuclear materials**, v. 233, p. 918-921, 1996. Percentil Scopus: 85%

Hibbeler, R. C. **Resistência dos Materiais**. Editora PEARSON, São Paulo.

HUGHES, Steven E. (Ed.). **A quick guide to welding and weld inspection**. Elsevier, 2009.

KASAI, Naoya et al. Quantitative investigation of a standard test shim for magnetic particle testing. **Ndt & E International**, v. 44, n. 5, p. 421-426, 2011. Percentil Scope: 88%.

KHAN, Faisal I.; HADDARA, Mahmoud M. Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning. **Journal of loss prevention in the process industries**, v. 16, n. 6, p. 561-573, 2003. Percentil Scope: 89%

LOPES, Toni Jefferson et al. RISK ANALYSIS APPLIED TO INDUSTRIAL REFRIGERATION INSTALLATIONS THAT USE AMMONIA. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 1, p. 160-166, 2015. Percentil scope 12,5%.

MARQUES, P. V. Soldagem – **Fundamentos e Tecnologia**. Editora UFMG, Belo Horizonte, 2005, 362p.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo Villani. Soldagem i introducao aos processos de soldagem. **Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Metalúrgica. Belo Horizonte**, p. 13, 2000.

PAL, Kamal; PAL, Surjya K. Study of weld joint strength using sensor signals for various torch angles in pulsed MIG welding. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 3, n. 1, p. 55-65, 2010. Percentil Scopus: 88%.

REIS, Ruham Pablo et al. Influência do Material de Base sobre o Rendimento de

Fusão em Soldagem a Arco. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 4, p. 369-376, 2011.

SMITH, A. T. et al. Use of non-destructive testing for engineering critical assessment: Background to the advice given in BS 7910: 2013. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 169, p. 153-159, 2019. Percentil Scopus 67%

SOUZA, Guttemberg Chagas de et al. Avaliação da proporção de fases em juntas soldadas de tubulações de aço inoxidável duplex mediante aplicação de ensaios não destrutivos. **Soldagem & Inspeção**, v. 18, n. 2, p. 158-168, 2013. Percentil Scope: 27%.

TELLES, Pedro C; Silva. **Tubulações industriais**. 10ª Ed, Editora LTC, 2006.

TEWARI, S. P.; GUPTA, Ankur; PRAKASH, Jyoti. Effect of welding parameters on the weldability of material. **International Journal of Engineering Science and Technology**, v. 2, n. 4, p. 512-516, 2010. Percentil Scopus: 49%.

THE JAMES F. LINCOLN. **The procedure handbook of arc welding**. 14ª Ed, James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 2000.

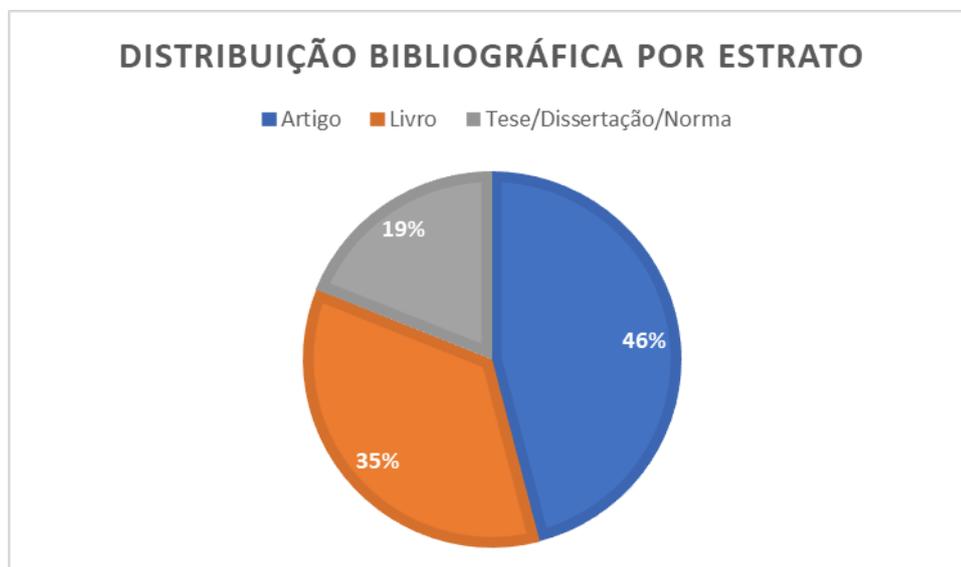
TUĞRUL, A. Beril. Capillarity effect analysis for alternative liquid penetrant chemicals. **NDT & E International**, v. 30, n. 1, p. 19-23, 1997. Percentil Scope: 88%.

VOIGT, Anna Louise; CUNHA, Tiago Vieira da; BOHÓRQUEZ, Carlos Enrique Niño. Influência do Posicionamento da Tocha de Soldagem sobre a Geometria e Sanidade do Cordão de Solda Produzido com o Processo GMAW Convencional em Elevadas Velocidades de Soldagem. **Soldagem & Inspeção**, v. 25, 2020. Percentil Scope: 27%.

XENOS, Harilaus G. Gerenciando a Manutenção Produtiva: O Caminho para Eliminar Falhas nos Equipamentos e Aumentar a Produtividade. 1.ed. Rio de Janeiro: EDG, 1998. 302 p.

8.2 REFERÊNCIAS POR EXTRATO

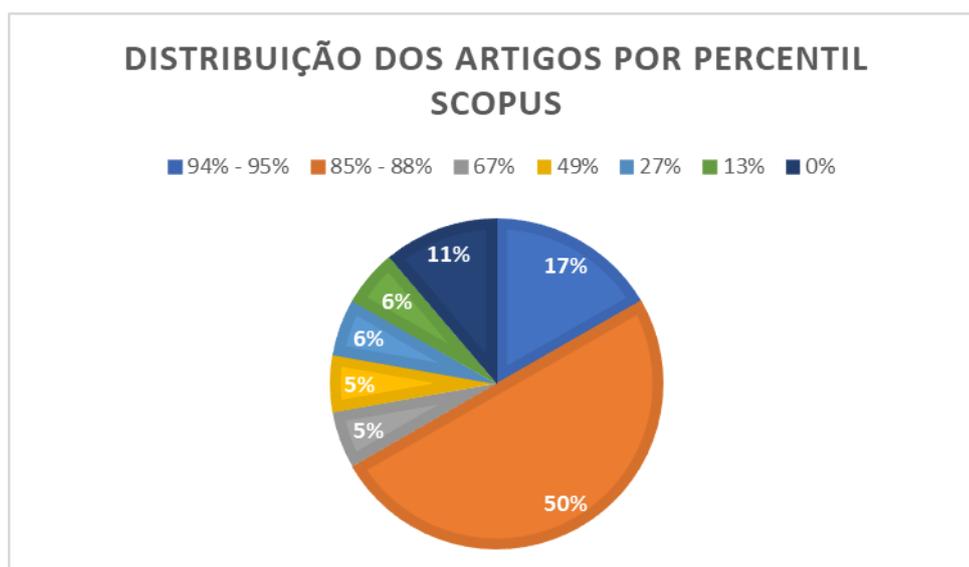
Figura 42 - Distribuição Bibliográfica por Estrato



Fonte: Próprio Autor

8.3 REFERÊNCIAS POR PERCENTIL SCOPUS

Figura 43 - Distribuição dos Artigos por por Percentil Scopus



Fonte: Próprio Autor