

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

VALTER FLORENCIO

**ANÁLISE DAS CAUSAS PARA O SURGIMENTO DE
TRINCAS EM AUTOCLAVE A VAPOR PARA
ESTERILIZAÇÃO DE ARTIGOS MÉDICO HOSPITALARES**

SANTOS/SP

2020

VALTER FLORENCIO

**ANÁLISE DAS CAUSAS PARA O SURGIMENTO DE
TRINCAS EM AUTOCLAVE A VAPOR PARA
ESTERILIZAÇÃO DE ARTIGOS MÉDICO HOSPITALARES**

Dissertação apresentada à
Universidade Santa Cecília como parte dos
requisitos para obtenção de título de mestre no
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. Felipe
Bertelli.

SANTOS/SP

2020

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

620.1126
F654a

Florencio, Valter

Análise das causas para o surgimento de trincas em autoclave a vapor para esterilização de artigos médico hospitalares. / Valter Florencio.
2020.
78 f.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Bertelli
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2020.

1.Autoclave. 2.Vaso de pressão. 3.Análise de falhas. 4.Integridade estrutural. I. Bertelli, Felipe. II. Análise das causas para o surgimento de trincas em autoclave a vapor para esterilização de artigos médico hospitalares.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe por todo incentivo, à minha esposa e aos meus filhos e netos que me apoiaram de diversas maneiras durante esta importante etapa de minha vida e, a todos aqueles que investem esforços em seu autodesenvolvimento, tendo na educação o melhor caminho.

AGRADECIMENTOS

À Deus, primeiramente pela família, graças alcançadas, bênçãos, saúde e paz.

À minha família: minha mãe Eunice pela grandeza e caráter, meu pai Alcides (em memória) pelas bases do conhecimento, minha esposa Tânia pela dedicação e amor a família e aos meus filhos, Jader, Jardel e Joyce que me apoiaram na realização desta atividade.

Ao meu grande amigo Clóvis de Toledo Ordonhes, pelo caráter, incentivo, parceria e apoio moral, cuja contribuição representou importante marco profissional.

À minha grande amiga e ex-orientadora Educacional Maria da Penha P. Tsuboi, pelos inúmeros conselhos, orientações, incentivos e apoio moral ainda nos primórdios da aprendizagem industrial no SENAI-RJ.

Ao Engenheiro Químico e de Segurança do Trabalho Roberto Tadashi Kurihara, por seu inestimável conhecimento em inspeção de equipamentos industriais, com o qual tive o privilégio do aprendizado prático em muitas aulas de campo.

Ao Engenheiro Mecânico Renzo Loris Filipi, por seu inestimável conhecimento em projeto, fabricação e inspeção de autoclaves, cuja contribuição foi primordial para a realização deste trabalho.

Ao Enfermeiro Especialista em Esterilização Josaphat S. Nascimento, por sua inestimável contribuição em processos de esterilização de artigos médico hospitalar.

Ao Técnico de Manutenção de Autoclaves Domingos Teixeira, pelas valiosas informações e doação da câmara da autoclave objeto deste estudo.

Aos meus colegas de turma e funcionários em especial a Imaculada e Sandra que me ajudaram durante todo o meu mestrado na Unisanta.

Aos colegas do laboratório de ensaios metalográficos da Escola SENAI OSASCO, que colaboraram com as realizações das análises metalográficas.

Ao Professor Doutor Felipe Bertelli, por toda orientação, paciência e ensinamentos compartilhados, e aos demais professores que contribuíram na minha formação acadêmica.

RESUMO

Autoclaves hospitalares são empregadas na esterilização de materiais e instrumentais cirúrgicos aplicados a diversos procedimentos hospitalares. De acordo com a Norma Regulamentadora nº13 do Ministério do trabalho, tais equipamentos são classificados como vasos de pressão, apresentando alto risco operacional, caso não sejam observadas as corretas normas de projeto, fabricação, instalação, inspeção de segurança. Assim sendo, este trabalho teve como objetivo a análise para determinação das causas para o surgimento de trincas nas paredes da câmara interna de uma autoclave a vapor do tipo gravitacional, após 15 anos de uso ininterruptos numa central de materiais estéril de um hospital na Grande São Paulo. Este equipamento possui uma câmara interna e externa feitas em aços inoxidáveis AISI 304 (câmara externa) e 316L, respectivamente, com polimento sanitário (câmara interna). Foram feitas análises metalográficas e de microdureza, além de avaliação por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície das trincas detectadas. Os resultados foram avaliados em conjunto com os relatórios de inspeções de segurança e na análise da qualidade da água empregada na geração do vapor, que apontaram para formação de trincas por fadiga devido ao projeto e mau processamento da solda durante a fixação do perfil metálico da câmara externa sobre a câmara interna, bem como uso inadequado de água para geração de vapor.

Palavras Chave: autoclave, vasos de pressão, análise de falhas, integridade estrutural.

ABSTRACT

Hospital autoclaves are used for sterilization of materials and surgical instruments, in turn applied to various hospital procedures. According to the Ministry of Labor Regulatory Standard N°13, such equipment is classified as pressure vessels, presenting a high operational risk if the correct design, manufacture, installation, safety inspection norms are not observed. and mainly operation and maintenance. Thus, this study aimed to analyze the causes of the cracking of the internal chamber walls of a gravitational steam autoclave after 15 years of uninterrupted use in a sterile material center of a hospital in Greater São Paulo. It was built in stainless steel AISI 304 (outer chamber) and 316L with sanitary polishing (inner chamber). Metallographic and microhardness analyzes were performed, as well as scanning electron microscopy (SEM) evaluation of the crack surface detected. The results were evaluated, together with safety inspection reports and water quality analysis used in steam generation and pointed to a degradation due to fatigue cracking effects due to poor weld processing during external camera fixation, as well as improper use of water for steam generation

Key words: autoclave, pressure vessels, failure analysis, structural integrity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura Básica de uma autoclave horizontal de alto vácuo, com vistas inclinada e de secção longitudinal, respectivamente.....	18
Figura 2 - Ciclo de esterilização a vapor saturado.	19
Figura 3 - Disposição geométrica de diferentes tipos de vasos de pressão [Adaptado de ASME VII Divisão1	24
Figura 4 - Vaso de pressão de secção retangular com reforço estrutural externo [Adaptado do código ASME VII divisão 1, Ed. 2010].....	26
Figura 5 - Modelo de autoclave hospitalar [catálogo BAUMER S.A]	27
Figura 6 - Modelos de autoclaves: (a) modelo a vácuo e (b) modelo gravitacional...28	
Figura 7 - Resumo estatístico de acidentes com equipamentos enquadrados na NR-13 de 2001 a 2014 (Fonte: O autor)	34
Figura 8 - Formas comuns de construções de recipientes metálicos para líquidos, soluções ou líquidos com sólidos em suspensão [adaptado - Catálogo da Acesita].37	
Figura 9 - Curva S-N - Aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 316L (Adaptado de BUENO, 1996)	44
Figura 10 - Autoclave (a), porta com volante central (b), câmara interna (c).	46
Figura 11 - Câmara interna: (a) perspectiva e (b) superior)	47
Figura 12 - Identificação de corpos de prova para avaliação metalográfica.....	48
Figura 13 - Localização das regiões de retirada de amostras para os corpos de provas.	49
Figura 14 - Amostra obtida para caracterização metalográfica e análise do perfil de dureza.	50
Figura 15 - Fluxograma para obtenção dos resultados propostos	50
Figura 16 - Calcificações da câmara interna por vapor de água (a) e marcas de deformação plástica na câmara interna após remoção de incrustações (b).	52
Figura 17 - Vazamentos revelados durante a aplicação de teste de estanqueidade com água na câmara externa.....	52
Figura 18 - Ensaio por líquido penetrante (a) e identificação das trincas (b)	53
Figura 19 – Localização dos pontos de medição de dureza na região da solda e chapas de ligação	54
Figura 20 - Gráfico das medições de dureza Vickers (HV)	55

Figura 21 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 01. Aumento de 50X e ataque Marble.....	56
Figura 22 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 01. Aumento de 100X e ataque Marble.....	56
Figura 23 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 01. Aumento de 500X e ataque Marble.....	57
Figura 24 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 02. Aumento de 50X e ataque Marble.....	57
Figura 25 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 02. Aumento de 100X e ataque Marble.....	58
Figura 26 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 02. Aumento de 500X e ataque Marble.....	58
Figura 27 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 03. Aumento de 50X e ataque Marble.....	59
Figura 28 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 03. Aumento de 100X e ataque Marble.....	59
Figura 29 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 03. Aumento de 500X e ataque Marble.....	60
Figura 30 - Obtenção do corpo de prova para análise da superfície de fratura	61
Figura 31 - Superfície de fratura referente ao corpo de prova retirado da câmara interna (aço AISI 316L).	62
Figura 32 - Linha de separação entre superfície fraturada e superfície destacada...62	62
Figura 33 - Superfície de fratura intergranular na região de estrias.	63
Figura 34 - Superfície de fratura intergranular na região de estrias.	63
Figura 35 - Pontos avaliados por EDS na superfície de fratura.....	64
Figura 36 - Difração por raios-x dos 4 pontos selecionados na superfície de fratura	65
Figura 37 - Representação esquemática das regiões de ocorrência de trincas.	67
Figura 38 - Fresta e falha localizadas na câmara interna no CP 01.....	68
Figura 39 - Fresta localizada entre a câmara interna e externa	68
Figura 40 - Ciclos de pressão e vácuo nas câmaras interna e externa e efeitos sobre a deformação elástica	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da Dureza da Água	29
Tabela 2 - Qualidade da água pela NBR ISO 17665:2010.....	30
Tabela 3 - Padrão organoléptico de potabilidade da água	31
Tabela 4 - Ocorrências de acidentes envolvendo equipamentos enquadrados pela Nr-13 – caldeiras, vasos de pressão e tubulações- período de 2001 a 2014.....	33
Tabela 5 – Composição química e limites de resistência dos aços austenítico AISI 304L e AISI 316L.....	35
Tabela 6 - Limite de resistência à fadiga - aços inoxidáveis austeníticos	44
Tabela 7 - Dados de projeto da autoclave e seu enquadramento nr-13.....	45
Tabela 8 - Principais dados construtivos da autoclave.....	45
Tabela 9 - Principais características do consumível de solda	46
Tabela 10 -Resultado das medições de dureza Vickers (HV)	55
Tabela 11 - Resultado da análise química por EDS.....	65

Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A.D	–	<i>Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter</i> (Alemanha)
ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	–	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANVISA	–	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASME	–	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
BS	-	<i>British Standards</i> (Reino Unido)
CE	-	Câmara Externa
CI	-	Câmara Interna
CME	-	Central de Materiais Estéreis
CP	-	Corpo de Prova
E	-	Eletrodo
EAS	–	Estabelecimento Assistencial de Saúde
EDS	-	<i>Energy Dispersion Spectroscopy</i>
ER	-	Eletrodo Revestido
F	-	Agrupamento de metais de adição ou eletrodos com semelhantes características de soldagem.
ISO	-	<i>International Organization for Standardization</i>
LP	–	Líquido penetrante
MARBLE	-	Reagente metalográfico indicado para inox austeníticos
MEV	-	Microscopia de Varredura Eletrônica
MS	-	Ministério da Saúde
MTA	-	Máxima Temperatura Admissível
MTb	-	Ministério do Trabalho
NBR	–	Norma Técnica Brasileira
NR-13	-	Norma Regulamentadora nº 13
OIT	-	Organização Internacional do Trabalho
PMTA	-	Pressão Máxima de Trabalho Admissível
RDC	-	Resolução da Diretoria Colegiada
RGI	-	Risco Grave e Iminente
SEM	-	Scanning electron microscopy
SFA	-	Sistema universal de classificação de materiais de

		enchimento (eletrodos)
SMAW	-	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
SNCTTI	-	Syndicat National de la Chaudronnerie, de la Tolerie, et de la Tuyauterie Industrielle (França)
ZTA	-	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

BAR	-	Unidade de Pressão
C	—	Classe de Fluido contido em vaso de pressão
Ca	-	Cálcio
CaCO ₃	-	Carbonato de Cálcio
Cl	-	Cloro
Cr	-	Cromo
Fe	-	Ferro
HV	-	Dureza Vickers
kgf/cm ²	—	Unidade de Pressão
kgv/h	—	Medida de produção de vapor
kW	—	Unidade de Potência
mg/l	—	Medida de concentração em peso de uma substância por unidade de volume em água ou água residuais
mm	-	milímetro
Mn	-	Manganês
Mo	-	Molibdênio
Ni	-	Níquel
R	-	Raio interno de curvatura
Rm	-	Raio médio da curvatura
S	-	Enxofre
Si	-	Silício
t	-	Espessuras
x	-	Multiplicador
°C	-	Graus Celsius

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.	RESULTADOS.....	51
5.	DISCUSSÕES	66
6.	CONCLUSÕES.....	72
7.	REFERÊNCIAS	73

1. INTRODUÇÃO

No campo da medicina, um mesmo instrumental cirúrgico pode ser utilizado várias vezes sem ser descartado, desde que ele seja corretamente desinfectado e esterilizado. Existem vários tipos de esterilização, sendo possível o uso de meios químicos ou meios físicos. Os meios químicos envolvem cuidados especiais com o manuseio, o armazenamento e futuro descarte destes produtos. Já os meios físicos de esterilização são mais comumente empregados, principalmente no ambiente hospitalar, através do uso de autoclaves, cujo mecanismo de funcionamento envolve condições simultâneas de pressão, positiva ou negativa (vácuo), e calor, dentro de uma câmara controlada. Para clínicas e laboratórios é considerado o método mais econômico e de maior segurança.

Sua correta empregabilidade está associada à necessidade de constantes manutenções dentro das normas técnicas e regulamentadoras, a fim de se evitar acidentes com riscos de explosões e garantir a efetividade do processo de esterilização. Quando há negligências das condições operacionais, tais como uso de água não tratada para geração do vapor, falta de manutenção ou execução de reparos estruturais que não obedeçam aos códigos de projeto, manual de fabricação e a própria NR-13, se tornam reais os riscos de acidentes inerentes ao seu mecanismo de funcionamento.

A partir do uso intensivo de máquinas à vapor, surgiu-se a necessidade de regulamentar projetos de construção de vasos de pressão devido as frequentes explosões que vinham acontecendo na época. Depois de uma explosão catastrófica ocorrida no ano de 1815 em Londres, o parlamento britânico passou a exigir que todas as caldeiras fossem construídas a ferro forjado, com tampos hemisféricos e com duas válvulas de segurança, o que na época representara um grande avanço tecnológico. Também na Filadélfia, em 1817, começou a regulamentação de testes hidrostáticos e rotinas de inspeção sobre as caldeiras. Porém, o aspecto de normalização e padronização de vasos de pressão só foi ser consolidado em 1911 com o código ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) feito a partir de uma comissão especial incumbida de redigir a primeira norma de vasos de pressão e caldeira após uma grande explosão ocorrida em 1905 na cidade de Brockton,

Massachusetts, com 58 mortos e 117 feridos (ALTAFINI, 2002).

Autoclaves a vapor são equipamentos que operam em condições simultâneas de pressão (positiva), vácuo (pressão negativa) e calor dentro de uma câmara controlada, tendo como algumas finalidades a esterilização através do calor úmido sob pressão de artigos hospitalares, embalagens para acondicionamento de alimentos industrializados, a impermeabilização e impregnação de componentes químicos em madeiras para aumento da sua durabilidade, dentre outros. Durante o uso, devem suportar fatores mecânicos e metalúrgicos de movimentações das chapas, desde que a sua câmara interna seja mantida em condição de conformidade de limpeza e polimento para operar ao fim do que se destinam (BUSTAMANTE, 2017)

Loris Filipe (2018) define que estes equipamentos são projetados e fabricados de acordo com a norma técnica brasileira NBR 16035-2012, que regulamenta os requisitos mínimos para construção de caldeiras e vasos de pressão. Ela está baseada no código americano ASME, na seção VIII e divisão 1-2010.

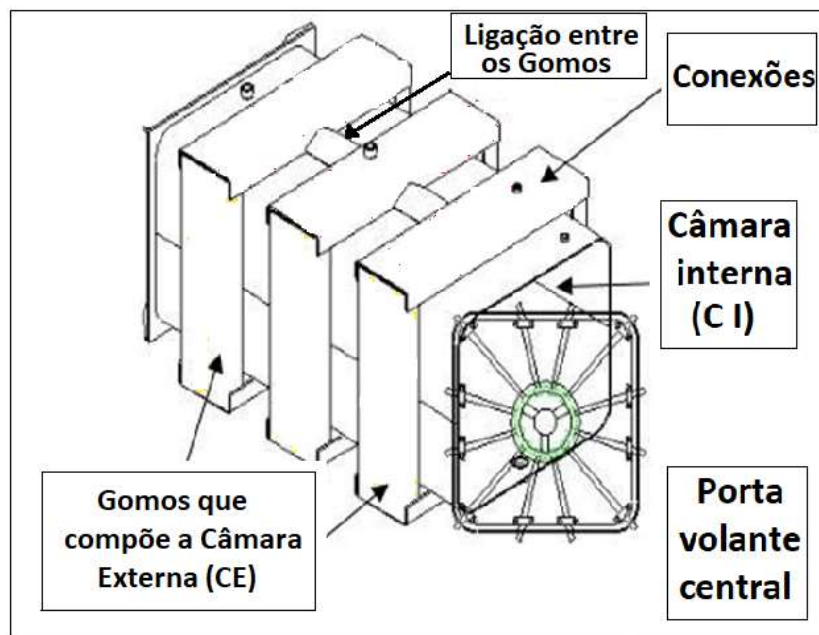
De acordo com a norma técnica brasileira NBR 11816:2003, esterilizadores a vapor com vácuo para produtos de saúde são constituídos por uma câmara interna, onde se insere a carga a esterilizar. Normalmente esta câmara é construída em aço inoxidável austenítico AISI 316L, com polimento sanitário no formato de seção transversal circular, retangular ou quadrada, para adaptar-se as necessidades físicas no local e podem conter uma ou duas portas. Além disso, possuem uma câmara externa de aquecimento, feita em aço inoxidável AISI 304, que também tem a função de reforço estrutural. Estes dois aços inoxidáveis têm características mecânicas de alta resistência mecânica, boa tenacidade à fratura, além de serem resistentes à corrosão (UHRICI, 2019).

O princípio de funcionamento destes aparelhos é a exposição do material ao vapor saturado seco em temperaturas $<120^{\circ}\text{C}$ e pressão maior que a atmosférica, bem como o tempo controlados. Essa combinação resulta na desnaturação irreversível de enzimas e proteínas, acarretando a destruição dos microrganismos presentes nos artigos hospitalares.

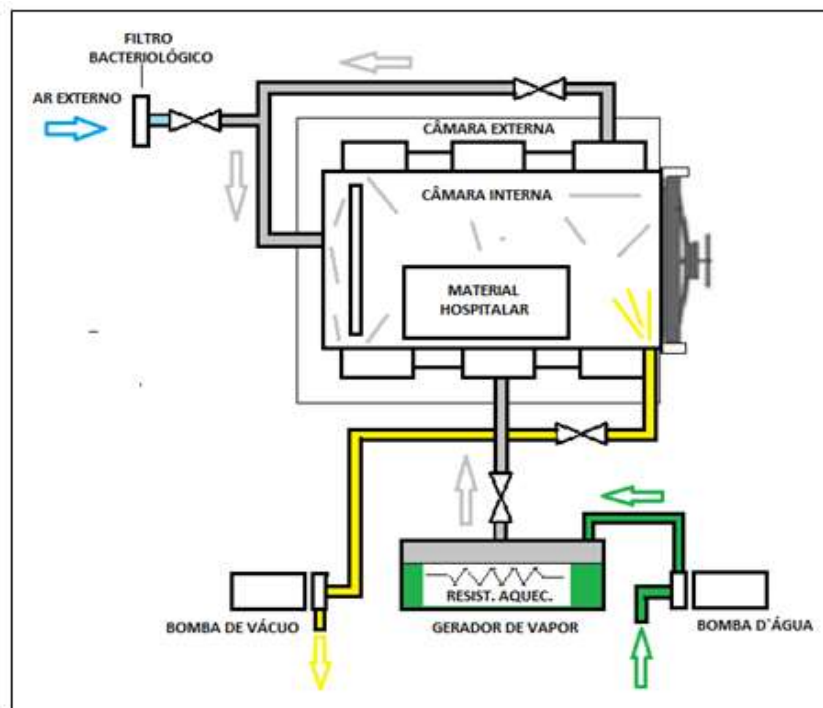
De acordo com Bustamante (2017), o que vai determinar a temperatura de destruição (desnaturação) de cada bactéria é a labilidade térmica de suas proteínas

e ácidos nucleicos, geralmente entre 50°C e 90°C. A temperatura do processo varia conforme os materiais a serem esterilizados, situando-se aproximadamente entre 121°C e 134°C, com pressão de vapor entre 1,2 kgf/cm² (121 °C) e 2,2 kgf/cm² (134 °C). A operação de uma autoclave inclui a remoção do ar, a penetração do vapor e a secagem. A Figura 1(a) apresenta uma autoclave a vapor de formato horizontal e suas principais partes estruturais. Na Figura 1(b) pode ser visto de maneira esquemática seu circuito de tubulações, onde o vapor saturado é introduzido sob pressão primeiramente na câmara externa (CE) para aquecimento do sistema e durante o ciclo de esterilização na câmara interna (CI).

Segundo Amorim (2017), o ciclo de esterilização inicia-se com ciclos de vácuo na câmara interna, objetivando a remoção de todo o ar antes da injeção de vapor, sendo repetido até obtenção de ausência completa de ar na câmara. Após a etapa de remoção do ar, inicia-se o ciclo de aquecimento, onde a câmara interna é pressurizada com vapor até atingir a pressão e temperatura estabelecida no ciclo. Depois, o ciclo de esterilização é feito com pressão e temperatura constante e tempo variável, dependendo do tipo de material a ser esterilizado e do agente patogênico que se objetiva eliminar. Após o ciclo de esterilização, inicia-se o ciclo de secagem da carga, onde a câmara interna é despressurizada através de sucessivos ciclos de vácuo/pressurização, até que seja totalmente despressurizada para abertura da porta e retirada de objetos esterilizados.



(a)



(b)

Figura 1 - Estrutura Básica de uma autoclave horizontal de alto vácuo, com vistas inclinada e de secção longitudinal, respectivamente.

De acordo com Bordini (1997) o tempo total estimado para a realização de um ciclo convencional de esterilização a vapor é de aproximadamente 90 minutos. A Figura 2 apresenta como se dá um ciclo de esterilização em autoclaves a vapor, com ciclos de vácuo.

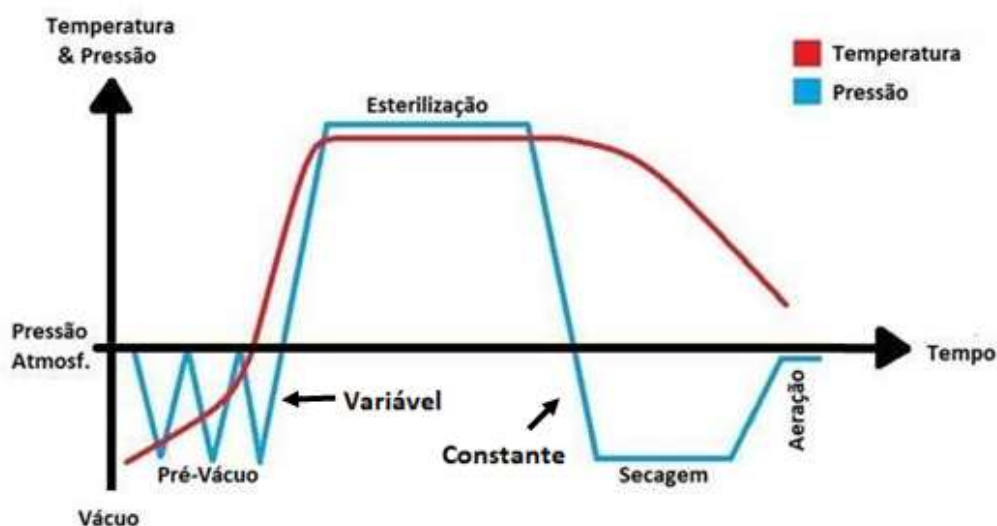


Figura 2 - Ciclo de esterilização a vapor saturado.

De acordo com Loris Filipe (2018), as portas das autoclaves, por sua vez, podem ser acionadas (abertas) 6 a 12 vezes ao dia, em um ciclo médio de 3600 vezes ao ano e, em se tratando de autoclaves com 2 portas, são 7200 vezes neste período. Logo, este elevado número de acionamentos pode conferir ao material falhas por fadiga em diversos componentes.

A resolução técnica RDC-15/2012 da ANVISA, outra legislação brasileira que estabelece as condições de funcionamento de uma Central de Esterilização de Materiais (CME), diz em seu Art. 95 que “A água utilizada no processo de geração do vapor das autoclaves deve atender às especificações do fabricante da autoclave”. A própria Nr-13, em seu subitem 13.4.3.4, afirma que a qualidade da água deve ser controlada e tratamentos devem ser implementados, quando necessários, para compatibilizar suas propriedades físico-químicas com os parâmetros de operação da caldeira, no caso da autoclave, o gerador de vapor a eletricidade.

O uso inadequado de água não tratada na geração do vapor permite a

formação de pontos de corrosão e de trincas nas câmaras interna e externa que, com o passar do tempo, contribuem para a redução da vida útil de componentes da autoclave. É comum observar em inspeções rotineiras calcificações nas chapas das paredes internas pelo uso de água não tratada, além de reparos por soldas para correção de vazamentos, evitando o alto custo para substituição por componentes originais do fabricante. Além destes reparos, é comum o uso de componentes inteiros, como a câmara interna e externa, feitos de maneira artesanal, motivado pelo baixo custo. Por outro lado, sabe-se que os acidentes envolvendo autoclaves podem ser extremamente perigosos pelo risco de explosão; esse risco é elevado a um nível muito maior quando sua manutenção não é feita segundo as normas técnicas e regulatórias vigentes.

1.1. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo avaliar as causas para o surgimento de trincas nas paredes da câmara interna de uma autoclave a vapor do tipo gravitacional, após 15 anos de uso ininterruptos numa Central de materiais Estéreis de um hospital na Grande São Paulo.

1.2. Objetivos Secundários

Visando atingir o objetivo geral do trabalho, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- i) Realizar END (ensaios não destrutivos) através do teste de estanqueidade e líquido penetrante, a fim de identificar pontos de vazamentos e verificar a geometria desses pontos, respectivamente.
- ii) Realizar análises de microdureza Vickers, tanto da região soldada do perfil metálico que compõe a câmara externa sobre a chapa da câmara interna, quanto na região termicamente afetada ZTA a fim de verificar o perfil de dureza desta região;
- iii) Caracterizar através de metalografia e microscopia eletrônica de varredura (MEV) a composição morfológica da microestrutura da solda e avaliar a formação de trincas ao redor da solda de fixação da câmara externa sobre

a câmara interna.

- iv) Realizar a caracterização fractográfica das trincas detectadas para identificar possível falha por fadiga.

1.3. Justificativa e relevância do tema

As falhas em autoclaves envolvem riscos de explosões com danos materiais e possibilidade de perdas de vidas humanas, uma vez que este equipamento trabalha sob pressão e vapor de água, sendo constantemente manuseado por profissionais de diversas áreas. Esses riscos se agravam quando sua manutenção preventiva não é feita segundo as normas técnicas e regulatórias vigentes. Alguns componentes internos muitas vezes não são substituídos por outros do mesmo fabricante qualificado, sendo trocados ao fim de sua vida útil por outros possivelmente mais baratos, fabricados de maneira artesanal. Estas práticas podem ser perigosas e gerar iminentes riscos à segurança de instalações e de pessoas que irão utilizar tais equipamentos.

1.4. Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

1. Uma fundamentação teórica, que aborda os principais pontos da regulamentação do uso e condições operacionais obrigatórias para autoclaves, normas de projetos para autoclaves, bem como uma revisão sobre os procedimentos experimentais em soldas de aços inoxidáveis utilizados na sua fabricação;
2. Descrição do modelo e tipo da autoclave utilizada na pesquisa e identificação dos pontos críticos onde se formaram as trincas na câmara interna;
3. Realização de ensaios laboratoriais para mapear a busca dos possíveis motivos para formação de trincas nas câmaras interna e externa e
4. Apresentação dos resultados encontrados, juntamente com as discussões sobre os motivos para o descarte do equipamento.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Normatização

As normas de projeto são estabelecidas não só com a finalidade de padronizar e simplificar o cálculo estrutural dos vasos de pressão, mas também assegurar as condições mínimas de segurança para a sua operação.

2.1.1 Normas internacionais para vasos de pressão

O código ASME, as normas e publicações, conferências, educação continuada e programas de desenvolvimento profissional fornecem uma base para o avanço do conhecimento técnico e um mundo mais seguro. Nele, foram consolidadas e unificadas diversas normas já existentes nos Estados Unidos, sendo o primeiro código utilizado em larga escala para padronizar vasos de pressão. A cada três anos é publicada uma nova edição do código que é atualmente o mais utilizado no mundo.

Na Inglaterra, em 1976, surgiu a norma BS 5500 publicada pela *British Standards Institution*, baseada em critérios da norma internacional ISO. Na Alemanha a norma legal obrigatória utilizada é a *A.D. Merkblatt* publicada pelo grupo de trabalho para vasos de pressão *Arbeitsgemeinschaft Drückbehälter* que especifica exigência de materiais, fabricação e inspeção de vasos de pressão e o código francês SNCTTI. O texto normativo não abrange apenas critérios, fórmulas de cálculos e exigências de detalhes de projeto, mas também regras, detalhes e exigências relativas à fabricação, montagem e inspeção de vasos de pressão, além dos materiais a serem empregados. Ele apresenta três seções, sendo que a seção VIII, *Pressure Vessels*, trata de vasos de pressão especificamente. Esta seção, por sua vez, divide-se em três partes.

Na divisão 1 estão incluídas no escopo todos os vasos de pressão, exceto os vasos sujeitos a chama, Vasos para ocupação humana, Vasos com pressões de operação entre 0 a 1 kg/cm² ou acima de 200 kg/cm² e Vasos para água pressurizada com pressão de até 20 kg/cm² e temperatura até 99 °C;

O corpo do vaso de pressão é chamado de casco, que faz o papel de “parede” na estrutura, aguentando os esforços mecânicos e envolvendo o volume

útil do vaso de pressão. A maior parte dos cascos de vasos de pressão são os cilíndricos, devido a sua facilidade de fabricação, de transporte, aproveitamento de chapas inteiras para fabricação do vaso e é adequado à maioria dos serviços. Outros formatos comuns, porém, menos utilizados são os cascos, quadrados, retangulares, esféricos e cônicos, além de combinações de vários cascos cilindros e cônicos.

A Figura 3 apresenta alguns tipos de cascos e suas disposições geométricas:

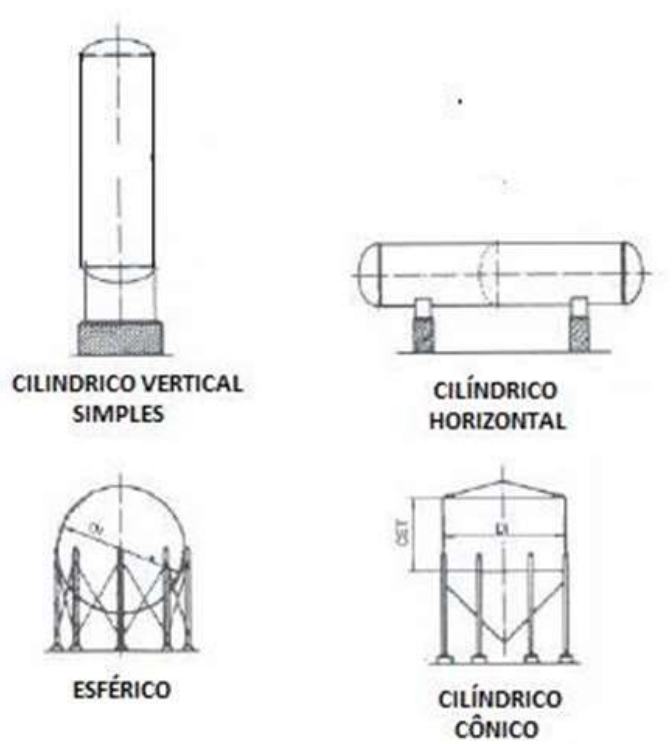


Figura 3 - Disposição geométrica de diferentes tipos de vasos de pressão [Adaptado de ASME VII Divisão1]

Os tampos dos vasos de pressão são as peças que abrem e fecham os cascos cilíndricos e fazem o papel da “porta” na estrutura. O seu dimensionamento é extremamente importante pois além dos esforços de pressão é necessário dimensionar a estrutura que abre e fecha o tampo de forma a vedar o fluido dentro do vaso de pressão, impedindo vazamentos de pressão, temperatura e matéria do seu interior. Os tipos mais comuns de tampo são os elípticos, toriesféricos, hemisféricos, cônicos e planos.

2.1.2 Norma Brasileiras para vasos de pressão

No Brasil a norma que especifica os requisitos mínimos que devem ser adotados para a construção de caldeiras ou vasos de pressão é a ABNT NBR 16035, que está em conformidade com a ABNT NBR ISO 16528. Esses requisitos são estabelecidos pela ABNT para garantir que os vasos de pressão construídos tenham maior nível de confiabilidade quanto a sua segurança e sejam os mais uniformes possíveis, independente do código de construção adotado.

A NBR 16035, cujo título é “Caldeiras e vasos de pressão – Requisitos mínimos para construção”, conta atualmente com 5 partes: ABNT NBR 16035-1: 2012 Ed 2; ABNT NBR 16035-2: 2012 Ed 2; ABNT NBR 16035-3: 2012 Ed 2; ABNT NBR 16035-4: 2012 Ed 2; ABNT NBR 16035-5:2013.

Diferentemente da grande maioria dos equipamentos encontrados nas indústrias, as caldeiras e vasos de pressão são equipamentos que exigem inúmeros cuidados especiais em sua operação e manutenção, pois a parada não programada destes equipamentos implica muitas vezes na paralização de toda a produção. Além disso, a operação e manutenção incorreta destes equipamentos podem levá-los a permanecerem em uma condição que ofereça riscos graves e iminentes aos trabalhadores que executam atividades em seu entorno, expondo-os a uma possível explosão com capacidade de destruir total ou parcialmente as instalações.

Desde sua criação em 1978, a NR-13 passou por sete revisões em seu texto original, sendo a mais recente através da Portaria 1.082 publicada no Diário Oficial da União em 18 de dezembro de 2018. Com as revisões, a NR-13 passou a ser mais abrangente tendo como novo título “Caldeiras, Vasos de Pressão, Tubulações e Tanques Metálicos de Armazenamento”.

Esta Norma Regulamentadora define os requisitos mínimos para que as organizações empresariais possam estabelecer uma gestão da integridade estrutural de caldeiras a vapor, vasos de pressão, suas tubulações de interligação e reservatórios metálicos de armazenamento, visando contemplar aspectos relacionados à fabricação, instalação, inspeção, operação e manutenção destes, sempre tendo em vista a saúde e a segurança dos trabalhadores (MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2018).

O não cumprimento dos itens previstos na NR-13, que possam causar

acidentes ou doenças do trabalho com lesões graves a integridade física do trabalhador, constitui uma condição de Risco Grave e Iminente - RGI (MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2017).

A autoclave objeto deste estudo se enquadra no código ASME VIII - divisão 1 como vaso de pressão de seção retangular com reforço externo, onde a estrutura da câmara externa, além de servir para conduzir o vapor de aquecimento, tem a função de reforço estrutural. A Figura 4 apresenta esquematicamente os detalhes de um projeto deste tipo de autoclave.

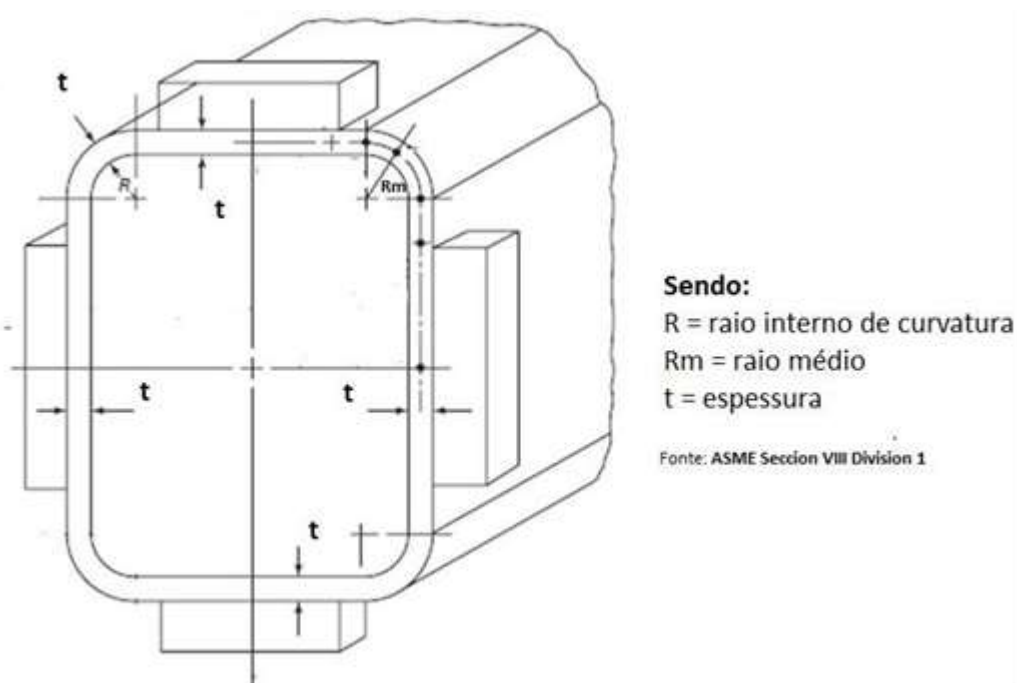


Figura 4 - Vaso de pressão de secção retangular com reforço estrutural externo [Adaptado do código ASME VII divisão 1, Ed. 2010]

2.2. Autoclave

A principal função da autoclave hospitalar a vapor é a esterilização e consiste em manter o material contaminado em contato com um vapor de água, em temperatura extremamente elevada, por um tempo suficiente para matar todos os microrganismos e bactérias. Exemplificando, uma autoclave funciona como uma junção das seguintes variáveis: calor/pressão/tempo, sendo que o calor/pressão está associado ao uso do vapor saturado. A Figura 5 mostra um modelo de autoclave utilizado em hospitais.



Figura 5 - Modelo de autoclave hospitalar [catálogo BAUMER S.A]

2.2.1 – Esterilização por autoclaves

Na maioria das autoclaves de esterilização a vapor existe um sistema de controle de temperatura e pressão que permite o ciclo programado de aquecimento e pressurização em função do tempo. Para que uma esterilização seja realizada de forma correta por uma autoclave, três parâmetros (temperatura, pressão e tempo) são alterados em etapas durante um ciclo de funcionamento. Essas etapas são: aquecimento, remoção do ar, carga de vapor, esterilização, exaustão e secagem, conforme demonstrado na Figura 1 deste trabalho.

Segundo Amorim (2017), a principal diferença entre as autoclaves a vapor está no seu método de retirada de ar da câmara de esterilização. Basicamente, os dois tipos de autoclaves presentes no mercado são as autoclaves gravitacionais e as autoclaves de vácuo. A Figura 6 , demonstra os dois tipos mais utilizados.

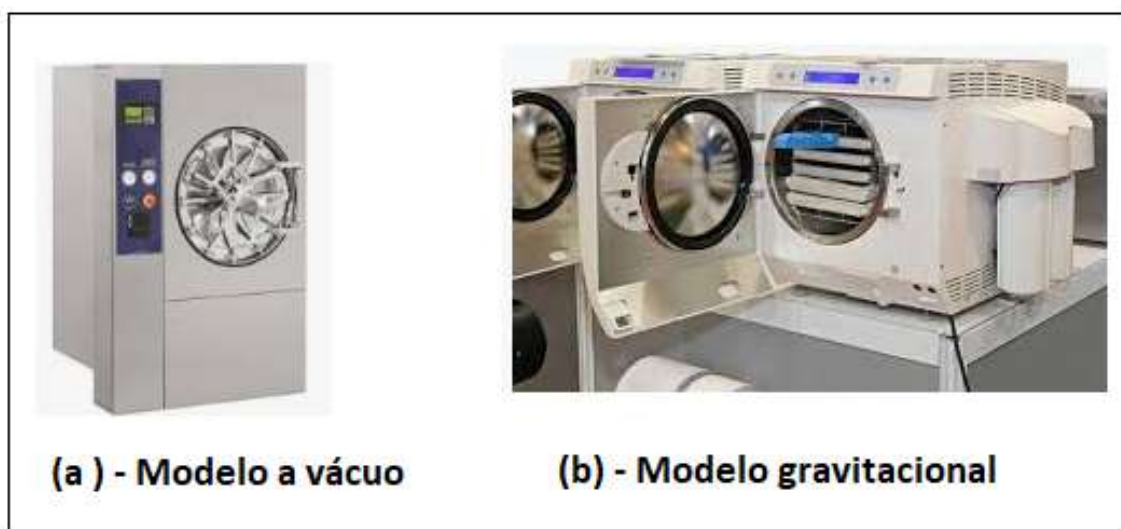


Figura 6 - Modelos de autoclaves: (a) modelo a vácuo e (b) modelo gravitacional.

Os modelos gravitacionais retiram o ar de suas câmaras por meio da gravidade e injetam o vapor juntamente com esse ar e o expõem. Já os modelos de vácuo retiram o ar de suas câmaras de esterilização de maneira forçada, ou seja, utilizam bombas de vácuo para realizar a sucção do ar. Essa segunda opção é mais rápida e eficiente na retirada de ar de seu interior. A autoclave a vapor utiliza calor úmido (com presença de vapor d'água) e pressão para esterilização de artigos hospitalares.

Autoclaves são empregadas nas mais diversas áreas como: laboratórios químicos, laboratórios farmacêuticos, laboratórios clínicos, hospitais e demais ambientes da saúde. Para a esterilização de material sujo ou contaminado, primeiramente o material é adequadamente lavado e enxaguado e depois colocado dentro da câmara interna da autoclave. Em seguida, a resistência elétrica aquece a água contida no gerador de vapor até a sua evaporação ou, o vapor é suprido diretamente pela rede canalizada oriunda de uma instalação de caldeiras, dependendo do modelo da autoclave. O vapor de água sob pressão e em temperatura elevada destrói os microrganismos e seus esporos. Segundo Bustamante (2017), o que vai determinar a temperatura de destruição (desnaturação) de cada bactéria é a labilidade térmica de suas proteínas e ácidos nucleicos, geralmente entre 50°C e 90°C.

O Ministério da Saúde (2001), em orientações gerais para Central de Esterilização, define o processo de autoclavação como eletivo nas unidades

hospitalares, indicado para os artigos termoresistentes. O vapor saturado é o vapor na temperatura de saturação e equivale ao ponto de ebulição da água produzido pela combinação da energia que aquece a água ao nível de pressão maior que a atmosférica, elevando a temperaturas de esterilização (121°C à 135°C) em um curto tempo. A avaliação das variáveis do método são o tempo, temperatura e pressão. Os equipamentos são programados com a razão tempo e temperatura. A programação deve seguir critérios estabelecidos na validação do equipamento e das cargas a serem processadas.

As etapas do processo de esterilização em autoclave sob pressão de vapor são:

- i) Tempo de subida de temperatura, que contempla a desaeração e a pressurização da autoclave até a temperatura de processo;
- ii) Esterilização
- iii) Esfriamento

A operação denominada desaeração tem por finalidade a remoção total do ar do interior do equipamento através de injeção de vapor, garantindo a uniformidade e a eficiência da esterilização. A remoção de ar da autoclave é feita por meio de vácuo parcial. Uma completa evacuação de ar de um compartimento define um vácuo perfeito.

Os parâmetros físico-químicos da água influenciam significativamente no resultado de esterilização por vapor saturado. Sendo a sua dureza (propriedade relacionada com a concentração de íons de determinados minerais dissolvidos) um dos principais parâmetros a ser observado, esta pode ser quantificada pela presença de sais alcalinos terrosos em sua composição, geralmente o cálcio e o magnésio. A Tabela 1 apresenta a classificação da dureza da água:

Tabela 1 - Classificação da Dureza da Água	
Classificação	Concentração (mg/l CaCO₃)
Mole	> 50
Moderada	>50≤150
Dura	>150≤300
Muito dura	> 300

Adaptado pelo Autor. Fonte: (FUNASA,2004)

Uma água muito dura pode ocasionar incrustações em tubulações e em superfícies metálicas, como as resistências elétricas, o que pode ocasionar entupimentos, deficiência na transferência de calor no processo de esterilização e superaquecimento das próprias resistências elétricas, causando o seu rompimento (LORIS FILIPI, 2018).

As exigências da norma técnica ISO 17665:2010 ou equivalente ao país de destino, quanto à qualidade da água a ser utilizada na geração de vapor para esterilização, está descrita na Tabela 2.

Tabela 2 - Qualidade da água pela NBR ISO 17665:2010

Contaminante	Valor limite	Contaminante	Valor limite
Sedimentos	≤ 15 mg/l	Cloretos	≤ 3 mg/l
Silício	≤ 2 mg/l	Fosfatos	≤ 0,5 mg/l
Ferro	≤ 0,2 mg/l	Condutividade	≤ 50 µS/cm
Cádmio	≤ 0,0005 mg/l	pH	De 6,5 a 8,0
Chumbo	≤ 0,05 mg/l	Aparência	Incolor, límpida
Metais Pesados	≤ 0,1 mg/l	Dureza	≤ 0,1 mmol/l

Adaptado pelo Autor. Fonte: (NBR ISO 17665:2010)

Já o Ministério da Saúde, através da Portaria nº 2914 de 12/12/2011, estabelece os parâmetros físico-químicos permitidos para água potável, ou seja, água de abastecimento público, conforme Tabela 3.

De acordo com o manual técnico do fabricante BAUMER S.A, o vapor utilizado para esterilização deve encontrar-se no estado saturado, com título mais próximo possível de 1, o que representa a situação ideal de 100% de vapor e 0% de condensado. Na prática, é aceitável a utilização de vapor com título acima de 95%.

O material particulado e outros contaminantes existentes na água utilizada na geração do vapor serão carregados, junto com o condensado, para o interior da câmara de esterilização. A existência de impurezas e minerais em suspensão ou dissolvidos na água utilizada na geração, assim como valores altos de carbonatos, vão provocar manchas ou oxidação em instrumentais e utensílios de aço inox, incrustação na câmara de geração de vapor e na de esterilização, além das resistências de aquecimento, diminuindo a vida útil dos materiais esterilizados e do equipamento.

Tabela 3 - Padrão organoléptico de potabilidade da água

Parâmetro	CAS (1)	Unidade	VMP (2)
Alumínio	7429-90-5	mg/l	0,2
Amônia (comoNH ₃)	7664-41-7	mg/l	1,5
Cloreto	16887-00-6	mg/l	250
Cor Aparente		µH	15
1,2 Diclorobenzeno	95-50-1	mg/l	0,01
1,4 Diclorobenzeno	106-46-7	mg/l	0,03
Dureza Total		mg/l	500
Etilbenzeno	100-41-4	mg/l	0,2
Ferro	7439-89-6	mg/l	0,3
Gosto e Odor		Intensidade	6

NOTAS: (1) CAS é o número de referência de compostos e substâncias químicas adotados pelo *Chemical Abstract Service*. (2) Valor Máximo Permitido

Adaptado pelo autor.

Fonte: (ANEXO X da Portaria MS nº 2914 de 12/12/2011 – Ministério da Saúde)

De acordo com Loris Filipi (2018), as formas de contaminações da câmara interna em aço inox AISI 316 L se dá por agentes químicos inadequados aplicados na limpeza do equipamento, forma incorreta de decapar e passivar para impedir progressão da ação corrosiva do agente químico de limpeza, a utilização de detergentes enzimáticos/alcalinos inadequados ou programação de receitas incorretas na lavagem de instrumentais que facilitam a geração de resíduos (que são carregados na esterilização). Outra forma seria o uso de resíduos de óxido de magnésio aplicado no isolamento das resistências elétricas de aquecimento da água no gerador de vapor (quando estas queimam desprendem e contaminam o vapor) e finalmente pelo uso de água na geração de vapor fora dos parâmetros estabelecidos por normas/fabricante e, sem o devido tratamento. A contaminação da câmara interna em aço inox AISI 316 L se inicia de modo leve e se agrava com o tempo.

A água ou vapor fora de norma representam cerca de 65% dos motivos de descartes de autoclaves. O item condutividade, que hoje é determinado como máximo permitido de 50 micro Siemens/cm pela norma NBR11816, será reduzido para próximo de 5 micro Siemens/cm com o advento da EN 285–NBR17665. (LORIS FILIPI, 2018).

2.2.2 - Riscos envolvendo a operação de autoclaves

Autoclaves são usadas por muitos EAS (estabelecimentos assistências de saúde) para a esterilização de materiais em altas temperaturas, entre 121 e 134°C, e pressão até 2,2 BAR. A temperatura e a pressão são geradas com vapor quente, o que torna autoclaves sistemas de risco para queimaduras pelo contato físico com partes da autoclave ou com o vapor. A explosão de vidrarias devido a tensões térmicas na abertura de autoclaves pode resultar em ferimentos graves e queimaduras, assim como o manuseio descuidado de frascos quentes no esvaziamento da autoclave. As condições de operação extremas no interior do equipamento geram riscos de explosões quando ocorrem falhas no equipamento.

Entre julho de 2001 e outubro de 2014, os Auditores Fiscais do Trabalho fizeram 22.796 análises de acidentes de trabalho, visando identificar condições e fatores de risco que levam à ocorrência de agravos à saúde do trabalhador em nível nacional, bem como verificando a ocorrência de infrações às normas trabalhistas de proteção a segurança e saúde no trabalho. A elaboração e divulgação de resumos de relatórios de tais análises, além de assegurar o direito da sociedade à informação, visa ampliar as medidas de prevenção de acidentes e doenças do trabalho (MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2016).

O não atendimento aos deveres normativos exigidos pela NR-13 não implica somente no descumprimento as leis trabalhistas brasileiras. Seu descumprimento implica na sujeição dos trabalhadores a condições de risco que, em caso de acidente, podem acarretar desde ferimentos leves até o óbito.

A Tabela 4 resume as ocorrências de acidentes fatais e as que causaram ferimentos aos trabalhadores, possíveis causas, consequências aos processos e os tipos de autuações baseadas na NR-13, nas quais as empresas foram enquadradas.

As empresas e estados onde ocorreram os acidentes mencionados, são, respectivamente: indústrias químicas, petroquímicas, têxtil, alimentícia, alimentos e refino de óleo comestível, usina de açúcar e álcool, hospitais, recauchutadora de pneus, destilarias e alambiques; nos estados de: São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Pará, Paraíba, Paraná, Rio Grande do Norte e Ceará.

Tabela 4 - Ocorrências de acidentes envolvendo equipamentos enquadrados pela Nr-13 – caldeiras, vasos de pressão e tubulações- período de 2001 a 2014.

Total de Acidentes	24
Mortes	12
Feridos	65
Equipamentos	Vasos de pressão, Autoclaves, Caldeiras, Tubulações
Causas	Falha em válvula de segurança; explosões de equipamentos; bloqueio inadvertido em dispositivos de segurança; falhas em soldas; falha em misturador a vácuo; rompimento de filtro de vapor; ausência de guarda corpo; rompimento de caixa de evaporação; falha no sistema alimentação de caldeira; defeito no painel elétrico da caldeira; falha de operação; falta de manutenção; defeito no manômetro; defeito de fabricação; excesso de pressão.
Consequências	Vazamento de amônia; Projeção de partes; Rompimento de tampa; Vazamento de ácido; Explosão de autoclave; Queda de altura; Choque elétrico; Queda de alvenaria refratária; Destruição parcial de instalações.
Autuações do Ministério do Trabalho	Falta de projetos de instalações de vaso de pressão; falta de treinamento operador de vaso de pressão; falta documentação obrigatória de vaso de pressão; casa de caldeiras irregular; falta de inspeção de segurança; instalação irregular de vaso de pressão; bloqueio inadvertido de dispositivos de segurança; - falta de treinamento de reciclagem de operador; falta de estágio prático operador de unidade de processo; falta de válvula de segurança; falta de manômetro no vaso de pressão; falta de projeto de alteração e reparos; falta de inspeção de segurança inicial em vaso de pressão; falta de treinamento de operador de caldeiras e estagio prático; falta de calibração em dispositivo de segurança de vaso de pressão; falta projeto de Instalação da caldeira; falta de documentação obrigatória de caldeira; falta de acesso seguro para manutenção; ausência de operador de caldeira

A Figura 7 apresenta de maneira gráfica o percentual relativo a cada fator contribuinte do acidente. A maior porcentagem de acidentes foi indicada como falha humana, envolvendo negligência, imperícia e imprudência em vários níveis, desde o operacional ao gerencial (69%).

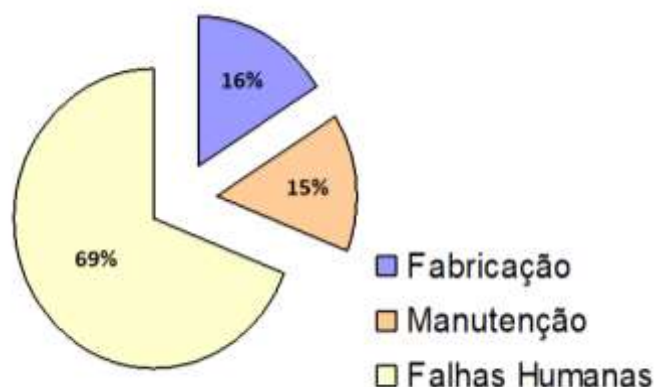


Figura 7 - Resumo estatístico de acidentes com equipamentos enquadrados na NR-13 de 2001 a 2014 (Fonte: O autor)

2.3. Ligas metálicas para aplicação em autoclaves: Aço Inoxidável do tipo Austenítico

Os aços com teores de cromo em torno de 18,0% em peso e 8,0% em peso de níquel são conhecidos por possuírem boas características inoxidáveis, sendo muito usados em peças que necessitam altas resistências à corrosão ou em ambientes químicos. Não são endurecíveis por têmpera (transformações martensíticas), porém, são endurecíveis por trabalho a frio.

Estes aços inoxidáveis requerem atenção no que diz respeito ao tratamento térmico, devido ao não-refinamento de grão por este procedimento. Na condição solubilizados, geralmente não são magnéticos. Quando trabalhados a frio, aumenta-se a dureza por encruamento, obtendo-se leve sensibilidade magnética. No caso do AISI 304, quando são aquecidos acima de 600°C, tendem a ocorrer corrosão no contorno de grão (corrosão intergranular). Portanto, para peças que necessitam altas resistências à corrosão, como é o caso da câmara interna de autoclaves, sugerem-se os aços com baixos teores de carbono (304/316L).

Como inoxidáveis, são conhecidos os aços que contêm um teor mínimo de cromo de 12,0% e de carbono máximo de 1,2%. A sua resistência à corrosão é gerada em função de uma camada passiva, aderente e impermeável, que se forma na superfície deste aço, composta de cromo. A passividade dos aços inoxidáveis é significativamente melhorada através do acréscimo nos teores de cromo e também mediante a adição de molibdênio.

Para a seleção e utilização dos aços inoxidáveis, há a necessidade de

considerar alguns parâmetros, tais como o tratamento térmico a ser aplicado em função do meio e do método de trabalho e do processo em função da qualidade do aço. A Tabela 5 a seguir mostra os principais elementos químicos e algumas propriedades mecânicas dos aços AISI 304 e AISI 316L.

Tabela 5 – Composição química/limites de resistência à tração e ao escoamento dos aços austenítico AISI 304L e AISI 316L

	AISI 304L	AISI 316 L
C	≤0.080 %	≤ 0.030 %
Cr	18 - 20 %	16 - 18 %
Fe	66.345 - 74 %	61.9 - 72 %
Mn	≤2.0 %	≤ 2.0 %
Mo	-	2.0 - 3.0 %
Ni	8.0 - 10.5 %	10 - 14 %
P	≤0.045 %	≤0.045 %
Si	≤ 1.0 %	≤ 1.0 %
S	≤ 0.030 %	≤0.030 %
Limite de resistência à tração	505 MPa	560 MPa
Limite de escoamento	205 MPa	290 MPa
Dureza Vickers	≤180 HV	≤195 HV

**Adaptado pelo autor.
Fonte: (PADILHA, 2004)**

Cada elemento de liga tem função importante nas propriedades metalúrgicas e mecânicas. O cromo é um dos principais elementos de liga nos aços Cr-Mo ferríticos para promover resistência à oxidação e tem como papel principal nos aços Cr-Mo de baixa liga a neutralização da tendência à grafitação promovida pelo Mo. Entretanto, por ser um excelente formador de carbonetos, tende a retirar o Mo da matriz, reduzindo o endurecimento por solução sólida (PADILHA, 2004). Além disso, evita a grafitação (oposto ao silício), deixando a estrutura esferoizada, reduz a tendência à formação de trincas durante o resfriamento da têmpera, melhora a resistência do aço à fragilização pelo hidrogênio e a resistência à corrosão. O principal efeito do cromo é de aumentar a resistência (SOUZA, 2001).

Apesar da perda de resistência à fluência relacionada à formação de

carbonetos instáveis, a presença de carbonetos na matriz pode ser benéfica para a tensão de ruptura, principalmente se eles estiverem finamente dispersos e tiverem forma acicular. Os carbonetos formados com cromo não são estáveis em altas temperaturas, já que eles esferoidizam facilmente e crescem rapidamente formando grandes blocos. O espaçamento entre os carbonetos fica maior do que o necessário para reter as discordâncias, diminuindo, então, a possibilidade de endurecer a matriz (PADILHA, 2004).

Já o molibidênio forma carbonetos Mo_2C , aumenta a tenacidade, a dureza, a resistência mecânica, a resistência à fluência, a resistência ao desgaste e a resistência à corrosão em meios clorados e não oxidantes. Ajuda a manter a estrutura cúbica de corpo centrado do ferro. É dispersante de carbonetos, intensifica o efeito de outros elementos de liga, retarda o crescimento de grãos e aumenta a resistência ao alívio das tensões depois da têmpera (SOUZA, 2001).

O aumento progressivo no teor de Mo de 0,8 a 1,6% aumenta a tensão limite de ruptura desses aços. Os átomos de Mo têm afinidade com os elementos de liga intersticiais mais forte que o Cr, resultando, então, em um maior endurecimento por solução sólida. Em aços ferríticos, a presença de 1% em peso de Mo em solução é suficiente para bloquear o movimento de discordâncias. Logo, a adição de mais de 1% de Mo não traz benefícios, assumindo que todo o Mo está em solução. .

O endurecimento por solução sólida do Mo pode ser comprometido pela precipitação de carbonetos de Mo, uma vez que ele é um formador de carbonetos tão forte que a precipitação é limitada unicamente pela quantidade disponível de C acima do equilíbrio no aço. Este fato sugere que a precipitação de carbonetos (e a consequente diminuição de Mo em solução na matriz) pode ser controlada pela diminuição do teor de C no aço. Alternativamente, outros elementos de liga, com maior afinidade ao C que o Mo, como o Ti, o Nb e o V, podem ser adicionados ao aço. Isso retira C da solução e permite que o Mo permaneça em solução. (PADILHA, 2004).

2.4. O projeto de equipamentos em aço inoxidável

Além das recomendações feitas, considerando as temperaturas de trabalho e as composições químicas de diversos meios, no projeto do equipamento devem

ser considerados outros aspectos, que vão desde a resistência mecânica dos materiais até a forma dos equipamentos. Na soldagem, assim como em outras etapas de um processo de fabricação, são introduzidas tensões no material metálico (HAMADA e YAMAUCHI, 2002). O cuidado que deve ser tomado é muito grande e deve-se tentar sempre introduzir a menor quantidade destas tensões, já que tratamentos térmicos para aliviar tensões nem sempre são possíveis (pela forma e o tamanho dos produtos fabricados).

A forma dos equipamentos tem uma grande importância no comportamento do material frente à corrosão. Geometrias que impõem uma condição de pouca movimentação de fluidos sobre determinadas regiões da superfície de um material, com velocidades relativamente baixas são, em particular, prejudiciais porque podem favorecer formas localizadas de degradação, como a corrosão por pites e em frestas (neste último caso, as baixas velocidades dos fluidos, ou fluidos estagnados provocam com maior facilidade depósitos sobre a superfície dos materiais). Em outros casos, o projeto pode favorecer formas de corrosão associadas a processos de cavitação e erosão (LIN, ELLAWAY e ADRIEN, 2001).

Na Figura 8 são apresentadas algumas formas não adequadas e outras mais adequadas para recipientes que contenham líquidos, soluções ou líquidos com sólidos em suspensão. A facilidade de drenagem, a forma dos cantos dos recipientes e os espaços mortos são aspectos que merecem atenção. Nos recipientes com a forma indicada por (a), depósitos de líquidos e sólidos podem provocar corrosão em frestas e por pites.

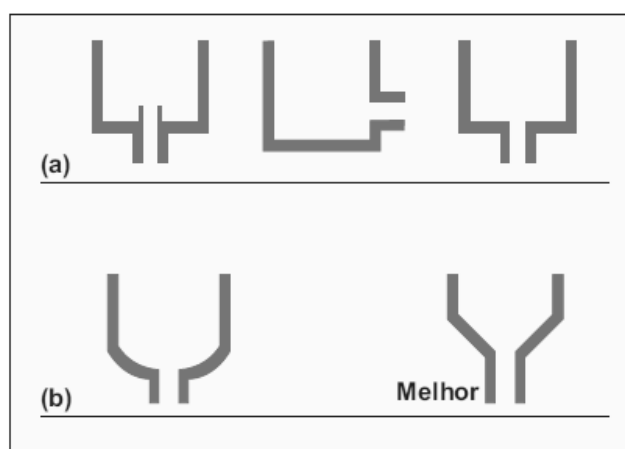


Figura 8 - Formas comuns de construções de recipientes metálicos para líquidos, soluções ou líquidos com sólidos em suspensão [adaptado - Catálogo da Acesita]

2.5. Processo de soldagem

Denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado deste processo. O processo de soldagem teve seu grande impulso durante a II Guerra Mundial, devido à fabricação de navios e aviões soldados, apesar de o arco elétrico ter sido desenvolvido no século XIX (MARQUES et al, 2007).

A maioria dos processos de soldagem necessita da geração de altas temperaturas locais que permita a junção dos metais. O tipo da fonte de calor é frequentemente usado como descrição básica do tipo do processo, como por exemplo, soldagem a gás e a soldagem a arco. Os processos de soldagem podem ser classificados de acordo com o tipo de fonte de energia ou de acordo com a natureza da união. Industrialmente, os processos de soldagem mais empregados são os que utilizam a eletricidade como geração de energia para realizar a união (ESAB, 2010).

O processo de soldagem ao arco elétrico com eletrodos revestidos (*Shielded Metal Arc Welding* - SMAW) consiste em um arco elétrico formado com o contato do eletrodo na peça a ser soldada (Figura 9). O eletrodo então é consumido à medida que vai se formando o cordão de solda, cuja proteção contra contaminações do ar atmosférico é feita por atmosfera gasosa e escória, provenientes da fusão do seu revestimento (PRAXAIR, 2010). Este processo pode ser aplicado na montagem das partes internas que compõem uma autoclave hospitalar, especificamente na união das chapas de aço AISI 304L e 316L que formam as câmaras interna e externa. Quando feito de maneira manual, sem o uso de maquinário industrial automatizado, este processo depende muito das habilidades do soldador em seu processamento, sendo um fator de risco importante a ser considerado para esta análise.

A maioria de aços inoxidáveis são soldados na condição recozida ou laminado a quente, tornando o crescimento do grão geralmente restrito. Nos metais de base endurecidos por trabalho a frio, a recristalização e crescimento do grão podem resultar em significativo amolecimento na ZTA. Neste caso, a ZTA é distinta, e o tamanho de grão é claramente maior do que aquele do metal base (HSIEH, 2012).

O processo de soldagem de aços inoxidáveis austeníticos estão sujeitos à

formação de dois defeitos distintos, rachadura de solidificação e falta de penetração, ambos estão relacionados com a composição química do metal de base e do material de adição. A propensão à fissuração é determinada principalmente pelo modo de solidificação e pela quantidade de elementos residuais, tais como fósforo e enxofre. Níveis elevados de enxofre podem levar à fissuração da linha de centro da solda e à fissuração da ZTA, enquanto níveis muito baixos (inferiores a ~50 ppm) nos tipos 304L e 316L estão associados à falta de defeitos de penetração na solda e a uma perda distinta no controle de poças de fusão durante a soldagem (ESAB, 2010).

A principal desvantagem dos aços inoxidáveis austeníticos é a possibilidade de ocorrência do fenômeno de sensitização, inicialmente observado na ZTA. Quando os aços austeníticos são aquecidos entre 425 a 815° C, carbeto de cromo do tipo Cr_{23}C_6 precipitam no contorno de grãos, diminuindo o teor de cromo em solução, levando a uma deterioração na resistência a corrosão.

No que tange aos processos que oferecem condições favoráveis para ocorrer a sensitização, a soldagem devido à alta concentração energética é o processo mais susceptível a propiciar a sensitização nos aços inoxidáveis austeníticos. Assim, o estabelecimento dos parâmetros adequados é de suma importância para o controle da sensitização durante a soldagem dos aços inoxidáveis austeníticos, em particular, os aços AISI 304 (PADILHA, 2004).

Todos os aços austeníticos são relativamente de boa soldabilidade, com exceção dos aços com adição de enxofre para facilitar a usinagem, pois este elemento causa a fragilidade a quente nas ligas metálicas. Os aços austeníticos, em comparação com aços comuns, apresentam maior coeficiente de expansão térmica, maior resistência elétrica e menor condutividade térmica. O grande problema que pode ocorrer durante a soldagem desses aços é a precipitação de carbonetos nos contornos de grãos da ZTA, prejudicando a resistência à corrosão. Para minimizar este problema e, também, problemas de distorção, recomenda-se soldar estes aços com maior velocidade de soldagem (MODENESI, 2001).

Desde que a ZTA seja aquecida a temperaturas que se aproximem da temperatura *solidus* da liga, muitos dos precipitados que estão no metal base podem dissolver-se. Isto pode conduzir a uma supersaturação da matriz austenítica durante o resfriamento, tendo por resultado a formação de vários precipitados. Os

carbonetos e os nitretos são os precipitados mais prováveis de formar-se na ZTA de aços inoxidáveis austeníticos. Formam-se normalmente ao longo dos contornos de grão. Mesmo que não seja notado em ensaios metalográficos, precipitados de Cr_{23}C_6 e Cr_2N estarão presentes na ZTA de aços inoxidáveis austeníticos. Seu tamanho, distribuição, e morfologia são dependentes da composição da liga e do ciclo do térmico da ZTA (HSIEH,2012).

A maioria dos processos de soldagem por fusão é caracterizada pela utilização de uma fonte de calor intensa e localizada. Esta energia concentrada pode gerar, em pequenas regiões, temperaturas elevadas, altos gradientes térmicos, variações bruscas de temperatura e, conseqüentemente, extensas variações de microestrutura e propriedades em um pequeno volume de material (ESAB, 2006).

No que tange à precipitação de carboneto de cromo na soldagem, o tempo é de suma importância para a ocorrência do fenômeno. Sendo também que a velocidade de resfriamento é um dos parâmetros responsáveis pela ocorrência da precipitação dos carbonetos de cromo. É sabido que na soldagem, o fluxo de calor dependerá da energia aplicada durante o processo e, essa energia dependerá do processo de soldagem utilizado, por exemplo, no caso de soldagem com processo TIG (GTWA), rendimentos (η) da ordem de 0,10 a 0,40. Logo se tem um processo detentor de baixo aporte térmico. Assim sendo, quanto maior o aporte térmico, maior a possibilidade de se aumentar o tempo entre temperaturas de 800°C a 500°C. Essa faixa de temperatura é o nível a qual se processa o fenômeno de sensitização.

Os aços inoxidáveis austeníticos são geralmente usados após um tratamento térmico de estabilização, isto é, são aquecidos a temperaturas entre 1000 e 1100° C e resfriados rapidamente ao ar ou em água. Este tratamento tem como objetivos permitir a recristalização da microestrutura encruada, manter em solução sólida o carbono, e com isto dar ao material uma estrutura essencialmente austenítica com a menor quantidade possível de outros constituintes, em particular carbonetos. Esta estrutura representa uma condição otimizada em termos de ductilidade e resistência à corrosão. (FERRARESI, 2013).

2.5.1 Sensitização

O termo sensitização é empregado para descrever tratamentos térmicos que

tornam uma liga susceptível à corrosão intergranular. A exposição térmica necessária para sensibilizar um aço pode ser relativamente breve, como num processo de soldagem, ou muito longa, como na operação de equipamentos a temperatura elevadas (HAMADA e YAMAUCHI, 2002).

O fenômeno da sensibilização está relacionado ao empobrecimento de cromo nas regiões vizinhas onde ocorre a precipitação de carbonetos, geralmente na forma $M_{23}C_6$, quando submetidas a esse nível de temperatura. Sendo o Cr um dos metais mais propícios a essa formação, por sua afinidade com o carbono. Em função deste empobrecimento, dependendo do ambiente a que esse material seja submetido, poderá ocorrer corrosão intergranular (PADILHA, 2004).

A sensibilização de aços inoxidáveis austeníticos pode ocorrer, por exemplo, durante um resfriamento lento, após exposição do material à solubilização, ou após um processo de soldagem. Em situações de uso, a sensibilização pode acontecer em virtude de falhas operacionais, mesmo que por curtos períodos de tempo, expondo o material a temperaturas elevadas, na faixa de sensibilização, acima daquelas projetadas para a sua utilização. O grau de sensibilização depende do tempo de exposição em uma determinada temperatura, da taxa de resfriamento, da composição do aço e, principalmente, do teor de carbono. A sensibilização pode ser evitada através difusão do cromo para regiões do aço carentes desse elemento, por meio de tratamento térmico de solubilização, em temperaturas maiores que 900°C, seguido de resfriamento brusco (CHOI, 2005).

2.6. Falha em vasos de pressão

Os vasos de pressão são considerados de alto risco devido ao somatório das variáveis quando se refere à severidade das condições de trabalho e à possibilidade de armazenamento de fluidos nocivos e perigosos (FARIA, 2019 *apud* LOSITO, 2015).

As falhas de vasos de pressão podem estar relacionadas ao aumento da pressão interna devido à pressurização excessiva por falha humana ou entupimentos e obstruções, causando tensões acima da resistência à tração do material e causando ruptura do vaso. Também podem falhar por conta da redução da resistência do material causada por corrosão, superaquecimento e defeito do

material ou ainda algum impacto externo (FARIA, 2019, apud MOSNIER et al., 2003). Por outro lado, as falhas por fadiga podem ocorrer nos casos em que o vaso é ciclicamente carregado, como é o caso de autoclaves hospitalares.

A região da solda é um dos locais mais propensos ao aparecimento de trincas, pois esta região sofre alterações em sua microestrutura, além de ser um local de concentração de tensões residuais. Desta forma é de extrema importância que peças que serão submetidas a tensões dinâmicas, como é o caso da pressurização/despressurização de câmaras internas e externas de autoclaves, sejam projetadas para minimizar esses concentradores, a fim de aumentar a vida útil do componente. Especificamente, o canto vivo pode localizar-se na fresta formada sob o perfil metálico da câmara externa sobre a câmara interna, sendo uma região que merece atenção especial.

De acordo com Norton (2004), existem três estágios característicos de uma falha por fadiga, são elas: início ou nucleação das trincas, propagação (linhas de praia) e ruptura. O primeiro estágio pode ter pequena duração, as trincas podem já estar presente na manufatura do material ou serem geradas durante seu uso, são de modo geral imperceptíveis a olho nu, sendo visíveis somente em escala microscópica. Uma vez iniciada, a trinca vai aumentando de tamanho, ou seja, se inicia o processo de propagação. A segunda fase deste processo é a mais longa e pode estar presente durante toda vida útil do material, durante este processo é formado na região da fratura uma estrutura que se assemelha a marcas de praia, esta estrutura é característica do processo de propagação da trinca, as linhas representam as etapas do aumento da descontinuidade. O terceiro estágio é caracterizado pela ruptura repentina do material, o momento em que ocorre a fratura depende de características como material utilizado, tipo de carregamento aplicado, valor de tensões, entre outros.

É comum que vasos de pressão operem sob pressões e temperaturas que variam no tempo. Nessa situação, a aplicação repetida de cargas é a principal responsável pelo mecanismo de fadiga. Tendo em vista que na análise das tensões atuantes, essas estão dentro do regime elástico do material, (inclusive nos pontos críticos), uma das técnicas que pode ser utilizada é a utilização da curva SN para prever a vida deste vaso. A vida considerada é o número de ciclos de tensões a que o vaso pode ser submetido antes que seja iniciada uma macrotrinca, precedente à

fase de propagação. (ALMEIDA, 2018)

A análise de fadiga mecânica para vasos de pressão pode ser conduzida através da Divisão 2 da Seção VIII do ASME, no apêndice 5. São aspectos relevantes nesta análise:

- 1) Números de ciclos de carga completos;
- 2) Número de ciclos de carga parciais;
- 3) Número de ciclos térmicos, em mesmo material, e
- 4) Número de ciclos térmicos caso haja união de materiais com coeficientes de expansão térmica distintos.

Estes valores levantados determinarão se a análise deverá ou não ser conduzida. Outros aspectos como concentradores de tensões, existência de soldas de filete, também deverão ser avaliados. A vida em fadiga de um componente, dentro do contexto da engenharia, é o número de ciclos até a fratura, ou seja, o número de ciclos para a nucleação de trincas somando ao número de ciclos para a sua propagação até a fratura final ou o número de ciclos previamente estabelecido segundo o critério definido no projeto (HERTZBERG 1996).

As curvas S-N (*Stress-Number of cycles*) também conhecida como curva de Wöhler, caracterizam a magnitude da força aplicada sobre o corpo de prova pelo número de ciclos até o rompimento. Este método serve para prever e controlar o número de ciclos com uma determinada carga até o rompimento. Segundo Shigley, Budynas e Nisbett (2011), através do levantamento das curvas S-N, pode-se demonstrar o comportamento do material quanto a sua resistência à fadiga.

Quanto ao número de ciclos, classifica-se a fadiga em: fadiga de baixo ciclo (FBC) com até 10^3 ciclos, ou ainda fadiga de alto ciclo (FAC), que corresponde a números de ciclos superiores a 10^3 ciclos (TURATTI, 2017).

Na fabricação da autoclave objeto deste estudo, utilizou-se aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e AISI 316, cuja Tabela 6 e gráfico da Figura 9 apresentam os limites de resistência à fadiga.

Tabela 6 - Limite de resistência à fadiga - aços inoxidáveis austeníticos

Material	Limite de Resistencia a Fadiga (Mpa)	Número de Ciclos (N)
AISI 304	245	10^6
AISI 316	273	10^6

Fonte: FKM-Guideline, 2003
Adaptado pelo autor

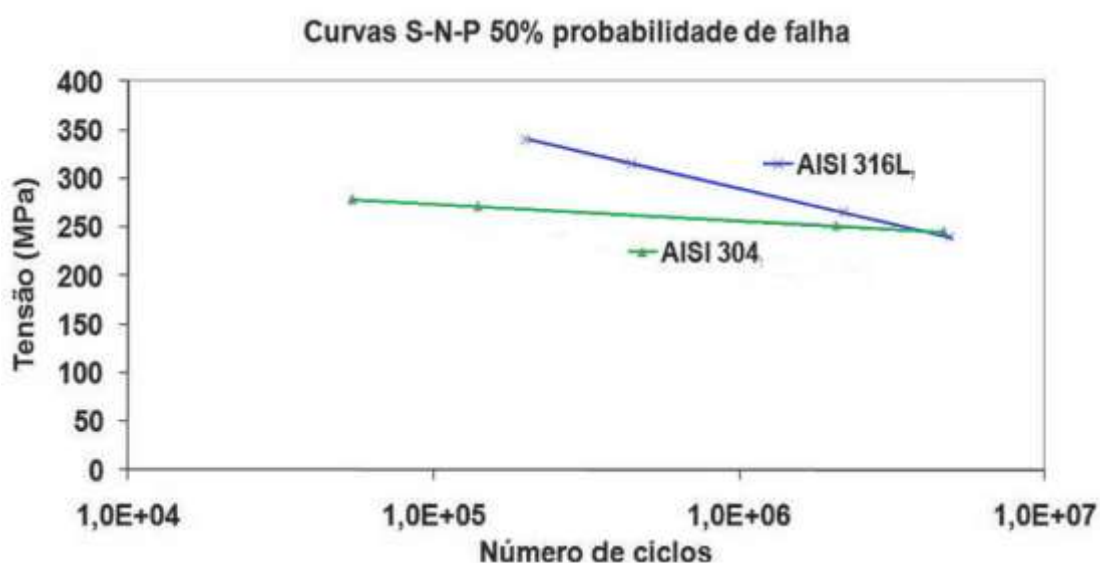


Figura 9 - Curva S-N - Aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 316L (Adaptado de BUENO, 1996)

Quando aplicados em ambiente húmido, os materiais metálicos de uma maneira geral podem ser afetados de maneira significativa quanto ao comportamento da resistência em fadiga, devido aos efeitos corrosivos que tendem a alterar as condições superficiais, resultando em uma modificação da curva S-N. Aços inoxidáveis do tipo 304 e 316L sobrem esse efeito mesmo em fadiga de baixo ciclo (MAYA E BUSCH, 1975; WANG, MELETIS E HUANG, 2013), sendo necessário a manutenção do polimento sanitário conforme as normas previstas de fabricação, a fim de se evitar nucleação e propagação de trincas prematuras em componentes internos de autoclaves.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi baseado na avaliação das condições estruturais de uma autoclave a vapor de esterilização tipo gravitacional, utilizada por 15 anos ininterruptos em uma unidade hospitalar, a fim de se obter os possíveis motivos das falhas que levaram à sua retirada definitiva de operação. Suas características principais de enquadramento pela NR-13 e construtivas são dadas na Tabela 7 e Tabela 8:

Tabela 7 - Dados de projeto da autoclave e seu enquadramento nr-13

Tipo	Categoria NR-13	Grupo Potencial de Risco	Classe do Fluido	MTA (°C)	PMTA (kgf/cm ²)	Volume (Litros)	Potencia Elétrica (kW)	Produção de vapor (kgv/h)
Vaso de Pressão encamizado	V	5	C	128	1,6	100	15	18,7

Adaptado pelo autor.
Fonte: (Prontuário do fabricante SERCON)

Tabela 8 - Principais dados construtivos da autoclave

Tipo / Dimensões	Materiais			
	Câmara Externa	Câmara Interna	Porta tipo volante central	Estrutura de suporte
Retangular 620x420mm	AISI 304 Espessura 4,0 mm	AISI 316L Espessura 4,0 mm	AISI 316L Espessura 4,0 mm	ASTM A36 Perfil L 1 1/2" x 3/16"

Adaptado pelo autor.
Fonte: (Prontuário do fabricante SERCON)

O processo de soldagem identificado no equipamento foi o SMAW (ER) com metal de adição: E 316L 16 SFA 5.4 F Número 5 e eficiência de solda de 0,7, cujas características principais estão na Tabela 9.

Tabela 9 - Principais características do consumível de solda

Processo	Consumível SFA 5.4	Propriedades Químicas						Propriedades Mecânicas			Eficiência de Solda
ER	ER316L F nº 5	Mn (%)	Mo (%)	C (%)	Si (%)	Ni (%)	Cr (%)	E (%)	L.E (Mpa)	R.T (Mpa)	0,7
		0,70	2,70	0,03	0,70	11,70	18,70	40	460	570	

Adaptado pelo autor.

Fonte: (Catalogo do fabricante ESAB)

A Figura 10 apresenta a imagem do equipamento e detalhes do sistema de fechamento e câmara interna, respectivamente. Posteriormente, a Figura 11 (a) apresenta a câmara interna desmontada da autoclave e a Figura 11 (b) apresenta as marcações das regiões de interesse na autoclave para remoção dos corpos de provas CP1, CP2 e CP3, além de suas conexões e terminais de ligação dos gomos da câmara externa soldados sobre a câmara interna.



(a)



(b)



(c)

Figura 10 - Autoclave (a), porta com volante central (b), câmara interna (c).



(a)



(b)

Figura 11 - Câmara interna: (a) perspectiva e (b) superior)

De acordo com a ABNT-NBR 15547:2006, nas inspeções de segurança, segundo a NR-13, o profissional habilitado pode se utilizar de diversos métodos para detecção de vazamentos em vasos de pressão, inclusive em autoclaves a vapor.

Comumente esta inspeção é iniciada por uma avaliação visual, onde é possível identificar impressões e manchas ou ainda áreas molhadas sob o equipamento, as quais podem revelar a existência de trincas ou fissuras. Levando isto em consideração, neste trabalho foi realizada a inspeção visual para identificação das principais regiões da câmara interna com impressões de calcificações na superfície metálica. Posteriormente, um teste de estanqueidade foi aplicado na câmara externa (CE) com água, tendo como limite de pressão $1,6 \text{ kgf/cm}^2$, equivalente a pressão indicada para operação pelo fabricante.

Após a identificação das regiões com vazamentos dentro da câmara interna, que se revelaram próximos às soldas de fixação dos gomos (perfis) da câmara externa sobre a câmara interna, foi aplicado o ensaio de líquido penetrante para identificação da posição exata e geometria das trincas. Amostras de materiais das regiões que apresentaram trincas e de outras regiões não trincadas, porém que apresentaram deformações plásticas visíveis, foram obtidas de acordo com a Figura 12 (a) e (b), a fim de se avaliar o perfil de dureza da região. Os corpos de prova CP1 e CP2 foram amostras extraídas de duas secções transversais às trincas de acordo com a linha tracejada preta, conforme indicado na Figura 14 (a) e CP3 foi uma amostra extraída de uma região com marcas de deformação plástica sob a região soldada Figura 12 (b), mas sem formação de trinca.



Figura 12 - Identificação de corpos de prova para avaliação metalográfica

A Figura 13 apresenta esquematicamente as regiões da câmara externa onde foram obtidas as amostras de materiais para os corpos de provas.

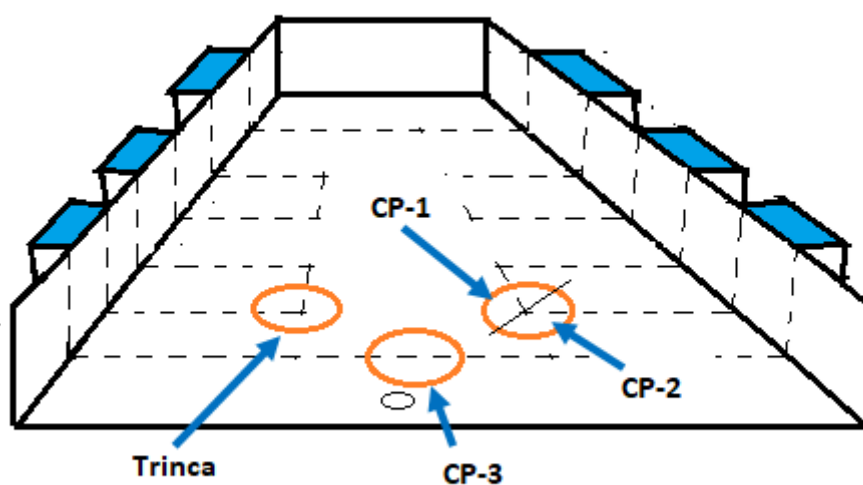


Figura 13 - Localização das regiões de retirada de amostras para os corpos de provas.

Após o corte as amostras foram lixadas, polidas e atacadas quimicamente com reagente *Marble* (solução contendo 4g CuSO_4 + 20ml HCl + 20ml H_2O), sendo que na Figura 14 podemos observar a característica geral das amostras, que contém a região de solda e as chapas de junção da câmara interna e externa



Figura 14 - Amostra obtida para caracterização metalográfica e análise do perfil de dureza.

Para caracterização metalográfica foram utilizadas técnicas de Microscopia eletrônica de Varredura e emprego de EDS para identificação de produtos de corrosão possivelmente formados durante a evolução da trinca. Também uma caracterização fractográfica foi feita a fim de se identificar as condições superficiais da fratura.

A Figura 15 apresenta o fluxograma completo das análises feitas neste trabalho, a fim de sintetizar a proposta experimental:

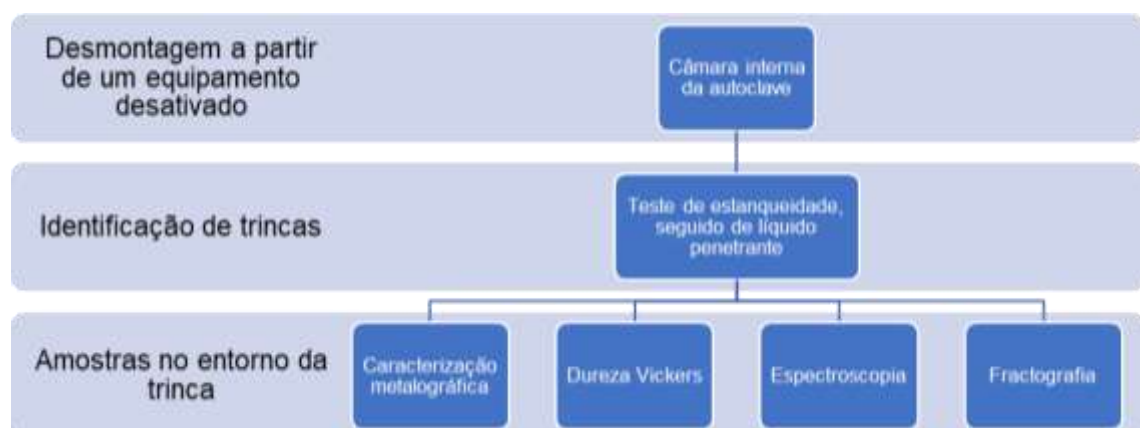


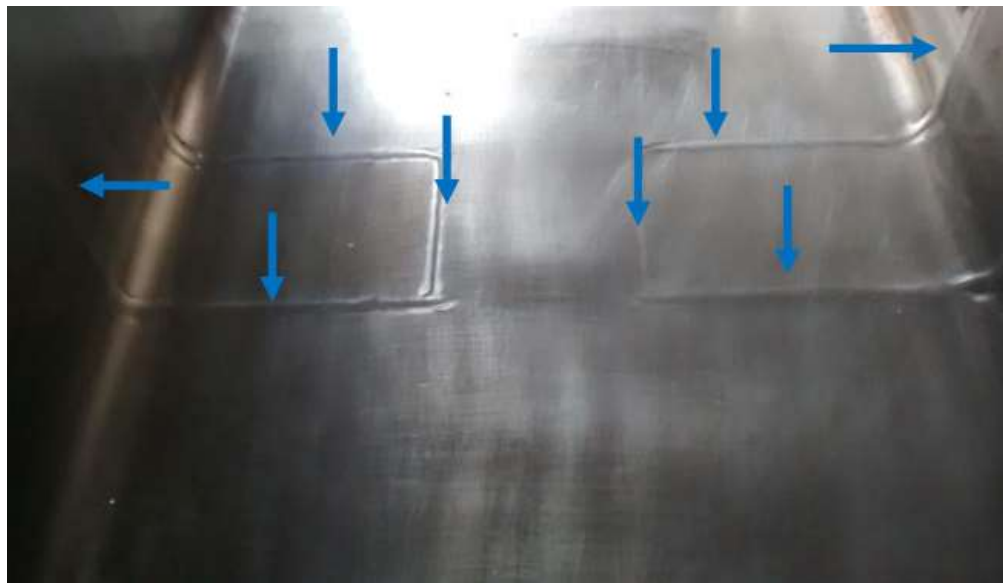
Figura 15 - Fluxograma para obtenção dos resultados propostos

4. RESULTADOS

As características superficiais das paredes da câmara interna da autoclave investigada são apresentadas na Figura 16-a, sendo possível visualizar as impressões de calcificações na superfície metálica pelo uso prolongado de vapor de água de baixa qualidade, contendo sais indesejados e dureza acima do permitido pela NR. Após a remoção das calcificações através de lixamento manual é possível observar (Figura 16-b) as marcas bem definidas de deformação plástica na região do contorno correspondente à localização da solda de fixação dos gomos (perfil) da câmara externa. Em um primeiro momento é possível observar claramente as manchas esbranquiçadas que indicam vazamentos de vapor da câmara externa para câmara interna.



(a)



(b)

Figura 16 - Calcificações da câmara interna por vapor de água (a) e marcas de deformação plástica na câmara interna após remoção de incrustações (b).

Com o teste de estanqueidade foi possível revelar alguns pontos de vazamentos conforme indicado na Figura 17. Eles foram localizados de maneira simétrica em todas as quinas de deformação plástica apontadas na Figura 14-b e 15.

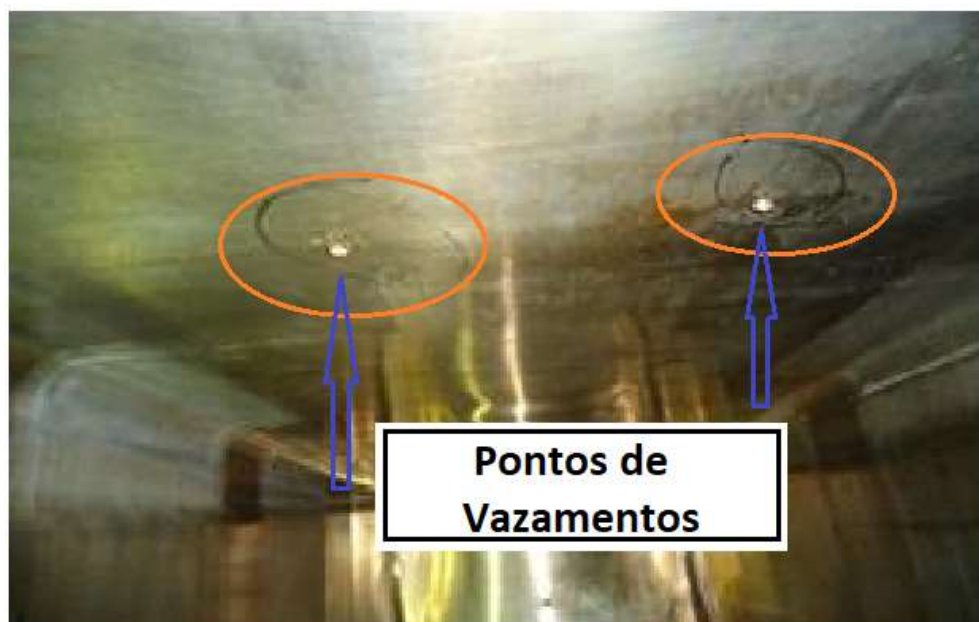
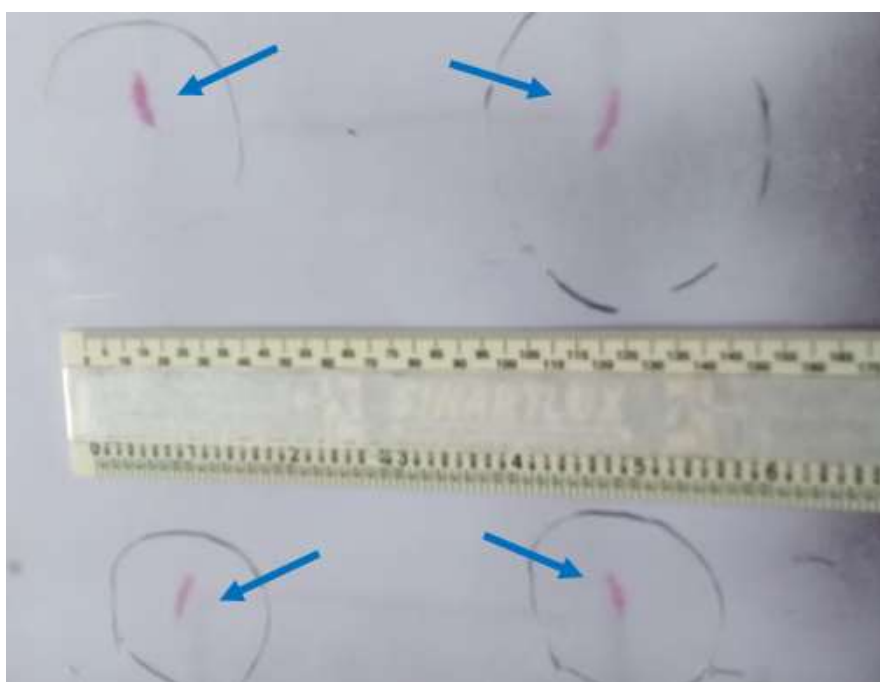


Figura 17 - Vazamentos revelados durante a aplicação de teste de estanqueidade com água na câmara externa

Para se determinar o tamanho das trincas, um segundo teste foi feito utilizando-se LP (líquido penetrante), conforme indicado na Figura 18 (a). As trincas podem ser visualizadas na Figura 18(b), sendo que as mesmas foram sempre localizadas nas quinas das marcas de deformação plástica mencionadas anteriormente, evidenciando que esta é uma região crítica no projeto desta autoclave.



(a)



(b)

Figura 18 - Ensaio por líquido penetrante (a) e identificação das trincas (b)

Nos processos de soldagem por fusão, efeitos indesejados podem surgir nas regiões próximas à solda, nas chamadas zonas termicamente afetadas (ZTAs). Estas podem conter diferentes tamanhos, de acordo com a difusividade térmica do metal base, que conduzirá, rapidamente ou não, o calor envolvido para o restante da peça. Essa concentração de calor no entorno da solda gera alteração no tamanho de grão e permite a formação de precipitados, distorções, concentrações de tensões, dentre outros, que alteram as propriedades mecânicas localmente. O ideal em engenharia é que as soldas e o metal base mantenham uma dureza constante para evitar a nucleação e propagação de fissuras (MODENESI, 2001).

Para se avaliar as características das soldas e das regiões próximas às soldas, o mapeamento da dureza e da microestrutura foram feitos de acordo com o esquema apresentado na Figura 19, para os 3 CPs avaliados, sendo que os resultados são apresentados resumidamente na Tabela 10, representando a média das medidas encontradas em 5 medições em cada posição e no gráfico apresentado na Figura 20.

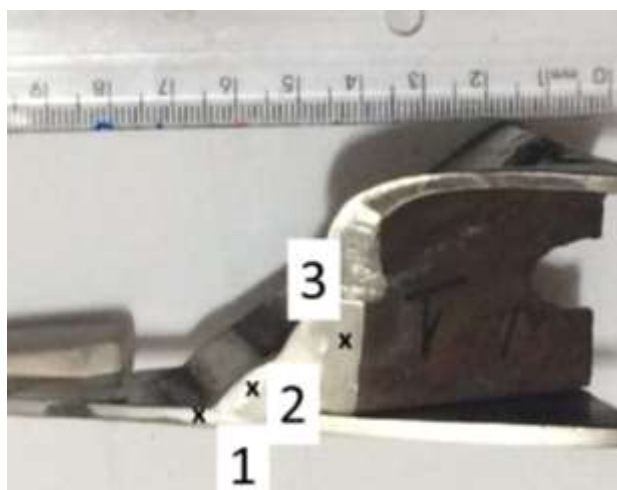


Figura 19 – Localização dos pontos de medição de dureza na região da solda e chapas de ligação

Tabela 10 -Resultado das medições de dureza Vickers (HV)

Corpo de Prova	Posição 1 Metal base AISI 316L	Posição 2 Região de Solda	Posição 3 ZTA
CP-1	218	205	234
CP-2	219	218	229
CP-3	236	271	255

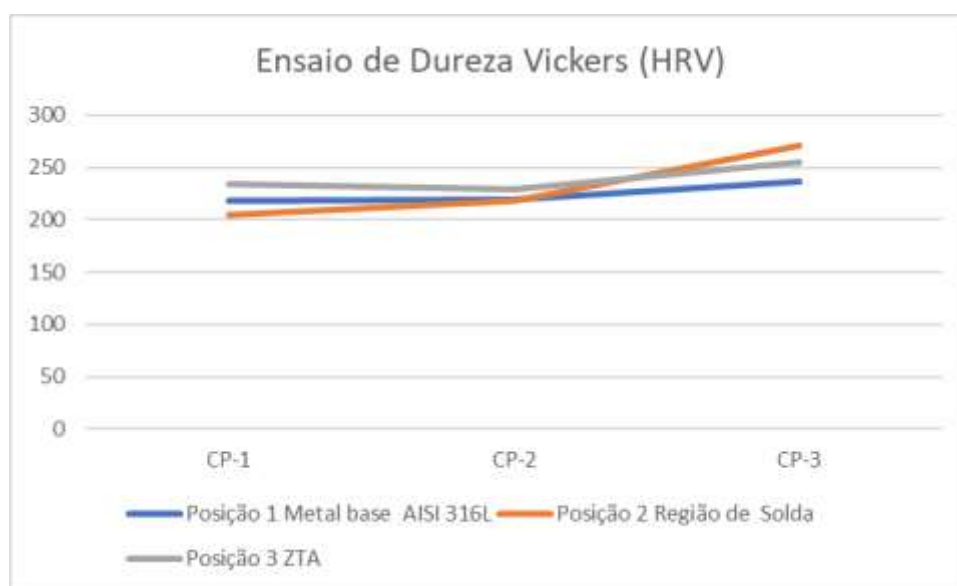


Figura 20 - Gráfico das medições de dureza Vickers (HV)

Com relação à microestrutura das soldas e da ZTA, as Figuras 21-28 apresentam a sequência de corpos de prova 01, 02 e 03 avaliadas, em uma sequência de aumentos ópticos de 50 vezes, 100 vezes e 500 vezes.

Os corpos de prova 01 e 02 foram obtidos das quinas próximas às trincas, conforme apresentado na Figura 15. É possível observar nas Figuras 20-22 que a ZTA é formada por uma matriz austenítica e ferritas delta alinhadas. Nas Figuras 23, 24 e 25 (CP 02) esta característica é observada, porém, o alinhamento ocorre de maneira muito sucinta em algumas partes da linha de fusão que separa a solda do metal de base. Já no CP 03, nas Figuras 26, 27 e 28, a microestrutura apresentada na ZTA possui o alinhamento de ferrita delta em camadas sucessivas. A partir da linha de fusão ocorre também a formação de austenita primária crescendo de forma epitaxial, com solidificação de ferrita nos contornos de grão.



**Figura 21 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 01.
Aumento de 50X e ataque Marble.**



**Figura 22 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 01.
Aumento de 100X e ataque Marble.**



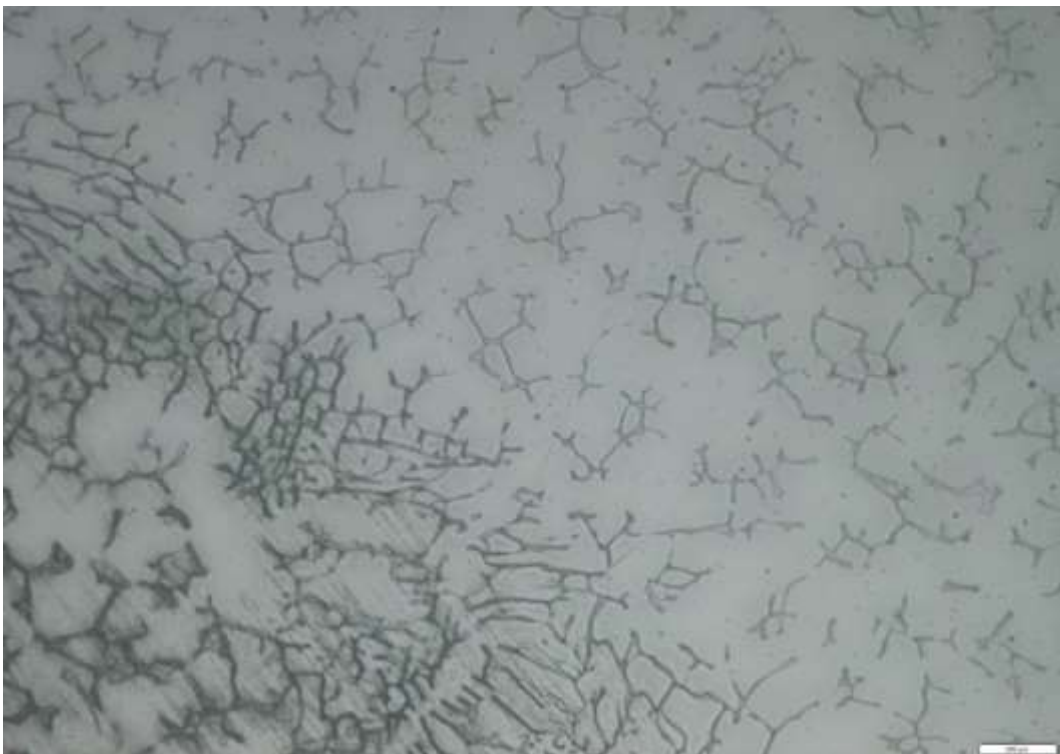
**Figura 23 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 01.
Aumento de 500X e ataque Marble.**



**Figura 24 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 02.
Aumento de 500X e ataque Marble.**



**Figura 25 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 02.
Aumento de 100X e ataque Marble.**



**Figura 26 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 02.
Aumento de 500X e ataque Marble.**



**Figura 27 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 03.
Aumento de 50X e ataque Marble.**



**Figura 28 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 03.
Aumento de 100X e ataque Marble.**

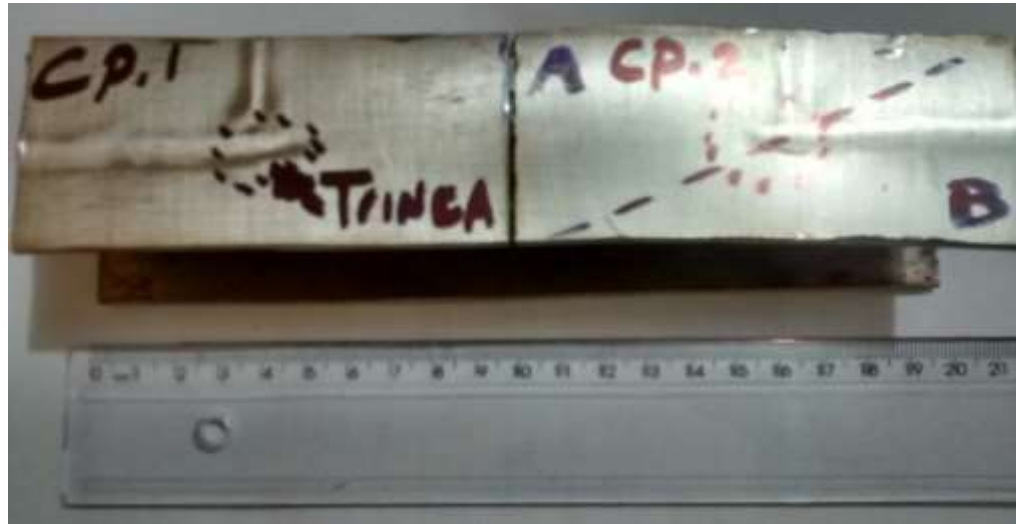


Figura 29 - Microestrutura da ZTA no aço 316L e cordão de solda no corpo de prova 03. Aumento de 500X e ataque Marble.

Uma das regiões identificadas com a formação de uma fissura foi seccionada para avaliação da morfologia da superfície de fratura. A Figura 30-a apresenta a região da trinca analisada, onde a fissura ainda não havia se destacado. Na Figura 30-b a amostra sendo destacada e na Figura 30-c a amostra a ser avaliada.

A Figura 31 apresenta a morfologia da superfície de fratura, sendo possível observar uma linha bem definida de separação da região recém destacada e outra já fraturada ao longo do tempo. Abaixo desta linha de separação é possível observar uma fratura do tipo alveolar ou *dimples*, característica de uma fratura dúctil do aço AISI 316L. Já na parte superior, uma superfície mais aprofundada onde nota-se uma superfície formada ao longo dos anos de maneira lenta pelo processo de fadiga.

Nas Figura 32 é possível observar mais claramente as estrias características de fratura por fadiga e fratura alveolar ou *dimples*, na região destacada inferior. As Figura 33 e 34 apresentam um aumento de 1000 e 5000 vezes na região de estrias, onde é possível ver, além das estrias, trincas intergranulares.



(a)



(b)



(c)

Figura 30 - Obtenção do corpo de prova para análise da superfície de fratura

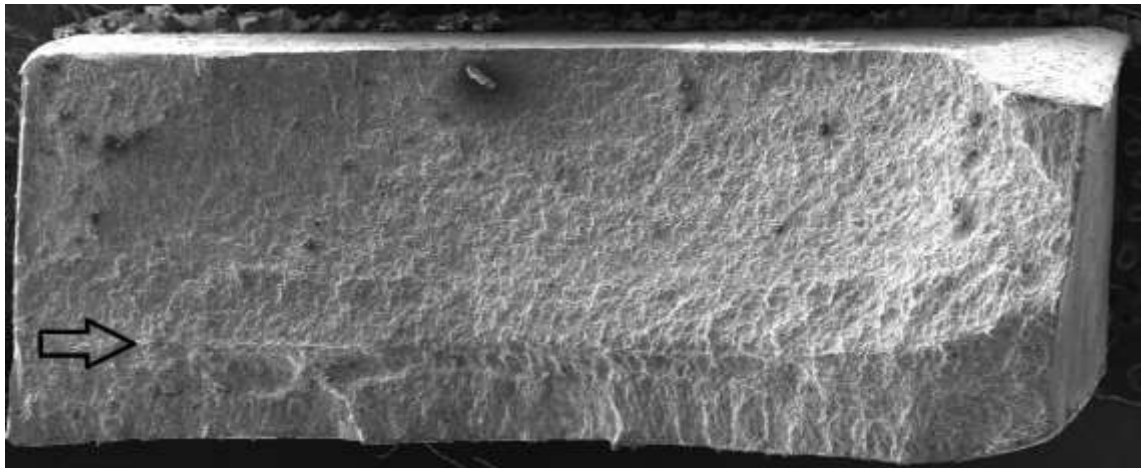


Figura 31 - Superfície de fratura referente ao corpo de prova retirado da câmara interna (aço AISI 316L).

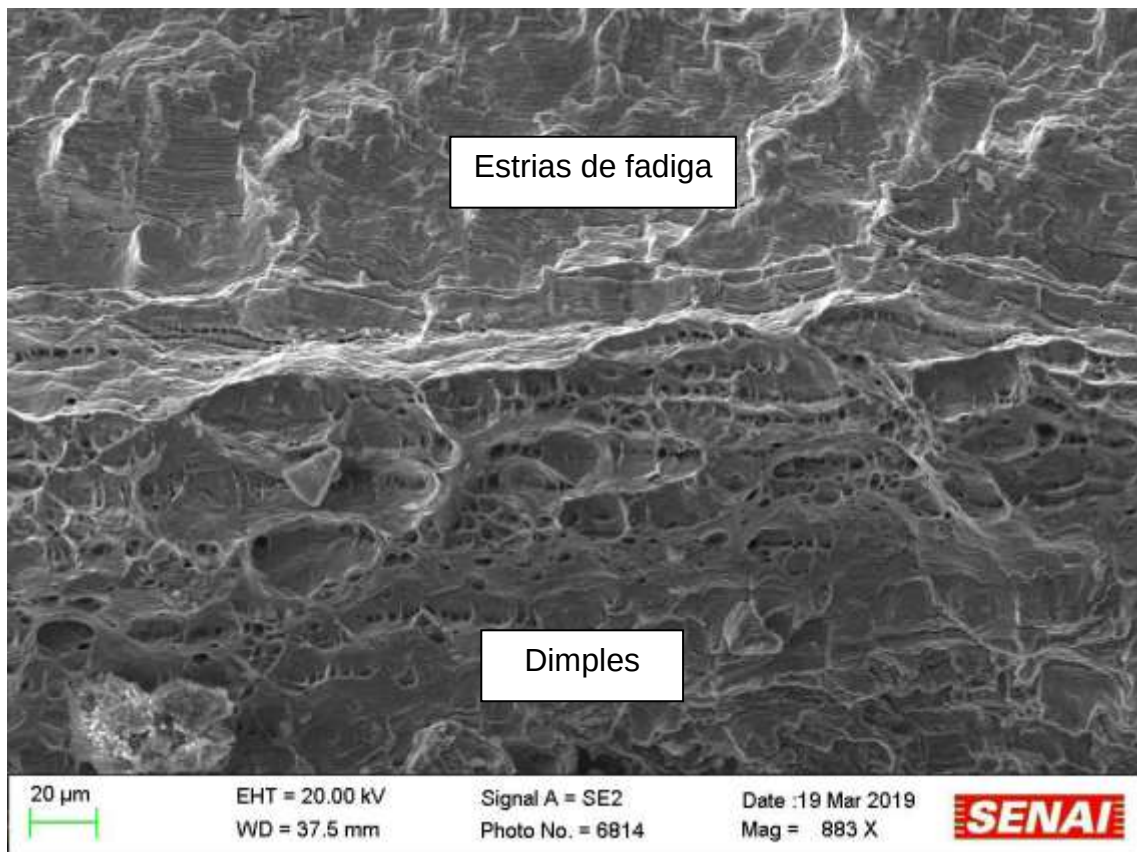


Figura 32 - Linha de separação entre superfície fraturada e superfície destacada.

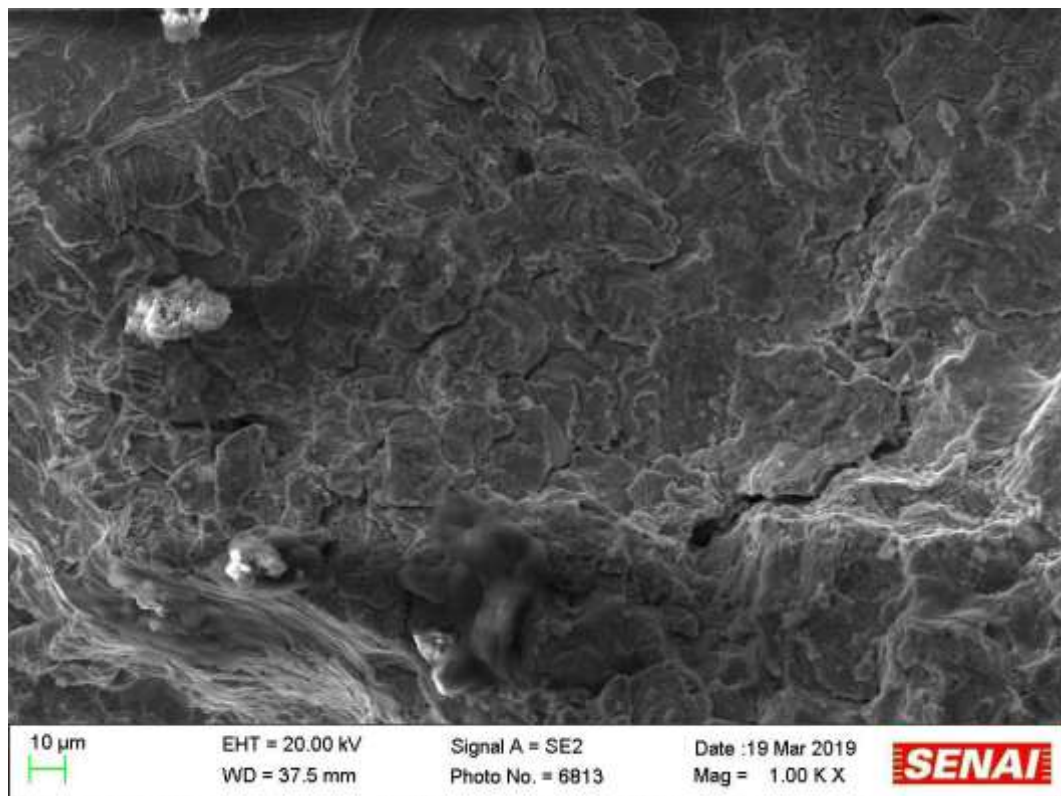


Figura 33 - Superfície de fratura intergranular na região de estrias.

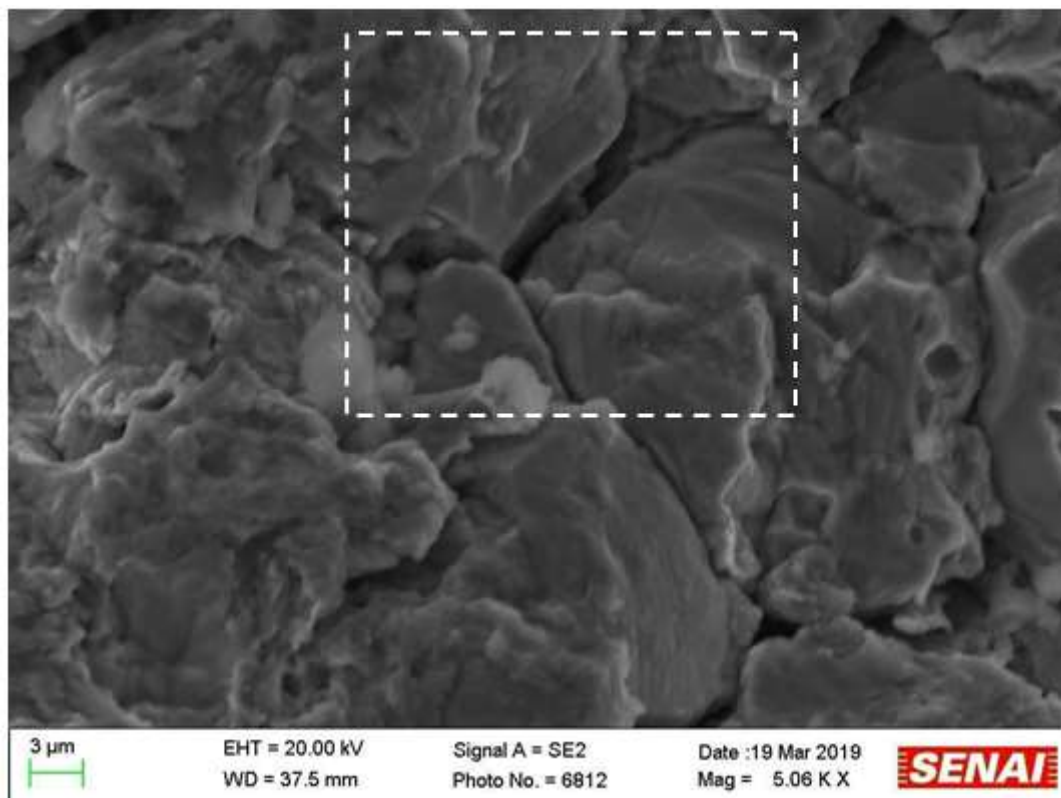


Figura 34 - Superfície de fratura intergranular na região de estrias.

Para avaliar a composição química da superfície fraturada e identificação de possíveis pontos de corrosão ou formação de precipitados foi utilizada a técnica de espectroscopia de raios-X por dispersão de energia – EDS (do inglês *Energy Dispersion Spectroscopy*) e as Figura 35 e 36 apresentam as 04 regiões selecionadas e correspondentes picos de difração. Foram observados os picos dos elementos pertencentes à composição química da liga, Fe, C, Si, Ni, Mo, Mn, Cr, além de Ca na posição do espectro 3. Vale destacar que os percentuais mínimo e máximo de Cr permitidos para esse tipo de aço inoxidável está na faixa de 16% a 18% em peso. Porém, o percentual encontrado foi acima deste valor. Isto pode caracterizar uma precipitação de Cr para determinadas regiões da microestrutura, provenientes do processo de sensitização durante a soldagem (PADILHA e AMBOZIO FILHO, 2004).

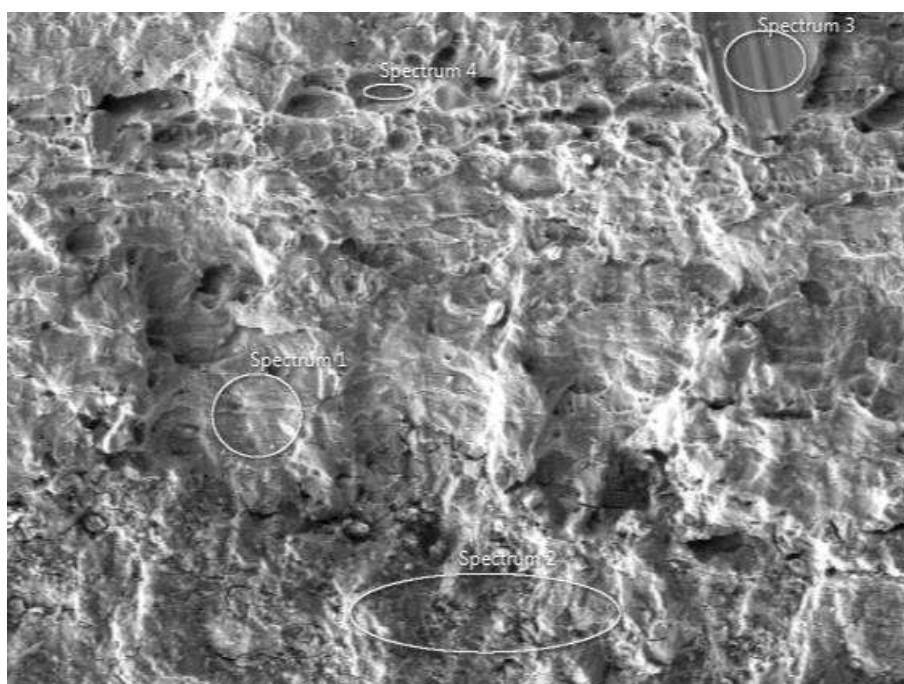


Figura 35 - Pontos avaliados por EDS na superfície de fratura

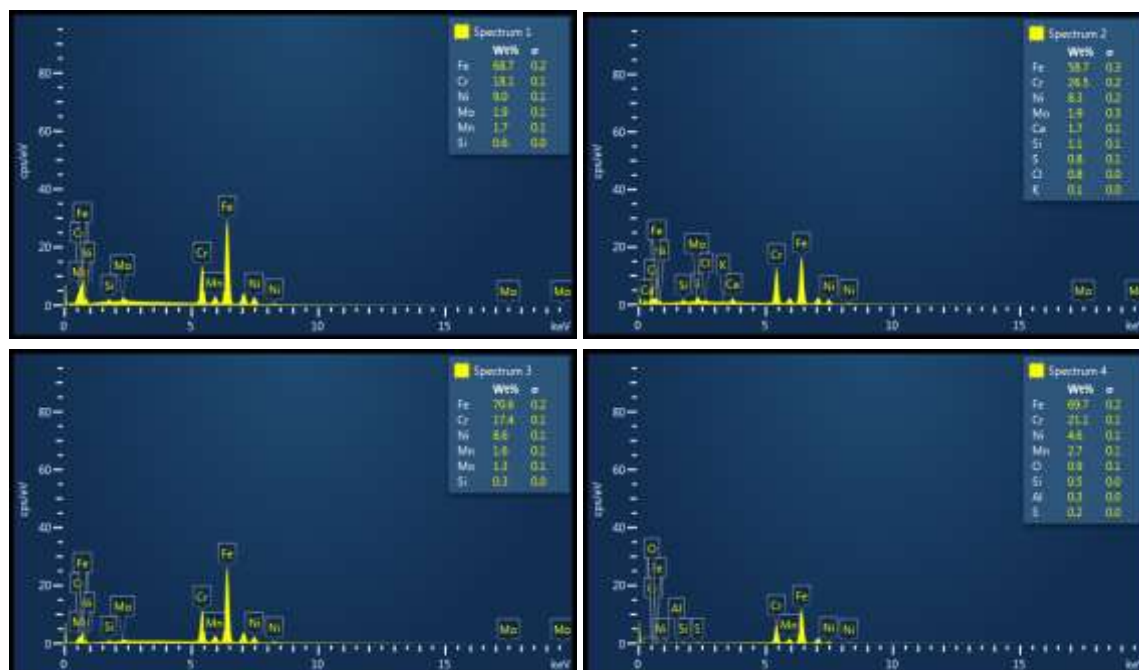


Figura 36 - Difração por raios-x dos 4 pontos selecionados na superfície de fratura

A Tabela 11 apresenta de forma resumida a variação dos valores dos percentuais de Cr nos pontos analisados na superfície de fratura. Nota-se que os espectros 2 e 4 apresentam percentual acima do permitido para a liga e o espectro 1 encontra-se no limite máximo de variação, o que pode ser considerado um acúmulo local de cromo por sensitização.

Tabela 11 - Resultado da análise química por EDS

Pontos	Cr (% em peso)
Espectro 1	18,1
Espectro 2	26,5
Espectro 3	17,4
Espectro 4	21,1

AISI 316L – Limite Cr 16 a 18%

Adaptado pelo Autor

5. DISCUSSÕES

Parte dos problemas de falhas nas autoclaves são causados por negligência nas ações preventivas, seja por parte da equipe de manutenção ou do próprio operador do equipamento.

Com relação à avaliação da qualidade da água usada na geração do vapor, observou-se que nos relatórios de inspeções Nr-13 anteriores, já eram apontadas recomendações para utilização de equipamento para tratamento de água. Além disso, o sistema de filtragem para material particulado existente foi apontado como não adequado, pois a água proveniente da rede pública de abastecimento, dada a suas características físico químicas, torna-se e um agravante para incrustações e processo corrosivo dos componentes metálicos do equipamento. De acordo com a Tabela 3, a dureza da água proveniente da rede pública é muito superior àquela definida pela norma técnica NBR ISO 17665:2010 apresentada na Tabela 2, o que pôde ser comprovado também pelas calcificações apresentadas na Figura 16-a.

De acordo com o teste de estanqueidade (Figura 17) a localização dos pontos de vazamento da câmara externa para dentro da câmara interna foram identificados. Posteriormente, o ensaio de líquido penetrante indicou com maior precisão o tamanho e direcionamento da falha, conforme apresentado nas Figura 18. A localização das fissuras mostra que estas sempre ocorreram nas regiões onde a deformação plástica visível na chapa da câmara interna (Figura 19-b) estava localizada abaixo da região soldada à câmara externa. Esta forma quadrangular indica o desenho exato por onde o cordão de solda foi depositado.

De maneira esquemática, o posicionamento destas fissuras pode ser visualizado na Figura 37. Estas estão localizadas em duas regiões distintas no entorno da solda de junção da câmara externa sobre a câmara interna. Ocorre que, quando a trinca se forma dentro da câmara externa, o vapor dessa câmara se mistura com o vapor da câmara interna, provocando alteração de pressão e, conseqüentemente aumentando o risco de explosão, tendo em vista que essa câmara foi projetada para trabalhar com pressão inferior à da externa. Quando a trinca se forma fora da câmara externa, o vazamento do vapor da câmara interna se espalha para o ambiente, sendo impossível controlar os níveis de pressão e vácuo

para o correto funcionamento da esterilização pela autoclave. Isto pôde também ser evidenciado pela presença de poças de água no entorno do equipamento.

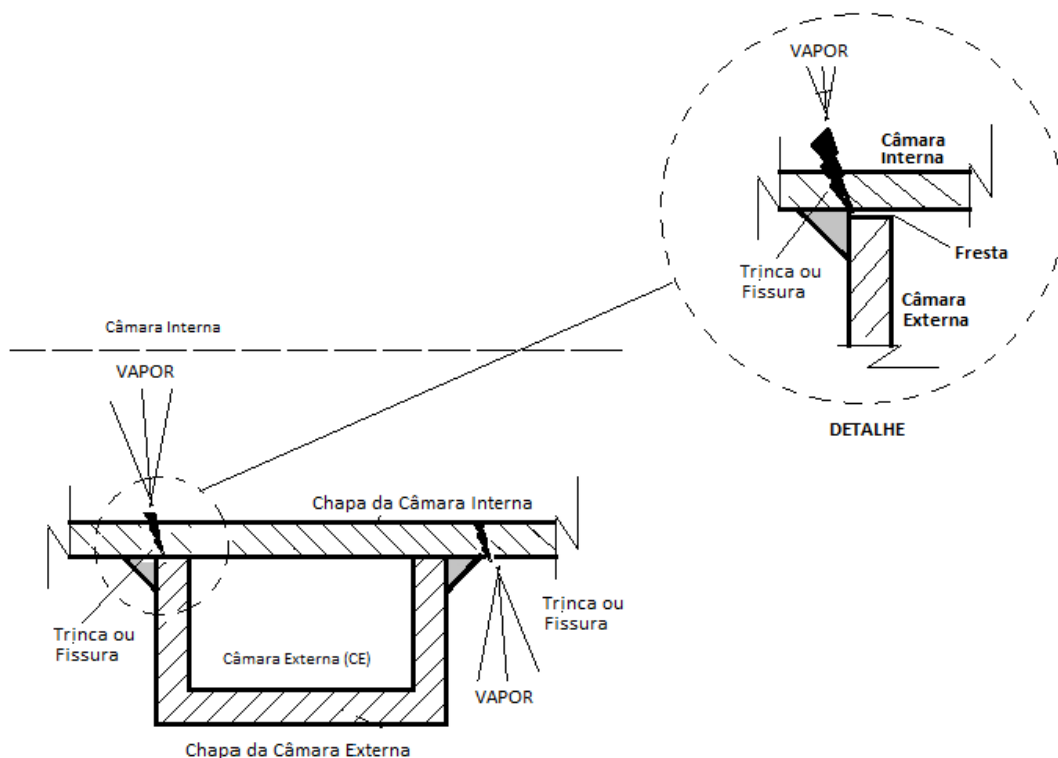


Figura 37 - Representação esquemática das regiões de ocorrência de trincas.

A fresta indicada na Figura 37 pode ser vista na Figura 38, através da secção do corpo de prova CP 01. A Figura 39 apresenta a fresta no CP 03 na região de soldagem entre as câmaras externa e interna, onde não ocorreram trincas.



Figura 38 - Fresta e falha localizadas na câmara interna no CP 01.



Figura 39 - Fresta localizada entre a câmara interna e externa

Para melhor entendimento dos motivos do surgimento das trincas nas regiões próximas à fresta de soldagem, a Figura 40 ilustra de maneira esquemática as movimentações das chapas das paredes que compõe a câmara interna e externa

durante o ciclo de esterilização, em diferentes faces da autoclave, uma com e outra sem o tubo de condução de vapor entre os gomos da câmara externa. Na prática há duas interligações entre os gomos da câmara externa, sendo um na parte superior e outro na inferior.

Durante os diversos ciclos de esterilização realizados em um turno de trabalho, a câmara externa fica constantemente pressurizada para manter o aquecimento da autoclave e a alternância entre pressurização e vácuo só ocorre na câmara interna. Durante os ciclos de vácuo as paredes internas estão fortemente tracionadas, pois as forças de tração ocasionadas pelo vácuo interno somam-se as forças de compressão provocadas pela pressurização da câmara externa, sendo mais acentuada nas regiões onde estão os tubos de ligação entre gomos, pois há um aumento da área de atuação. É possível observar que há uma flexão das chapas da câmara interna para o centro da câmara durante a formação de vácuo e para o sentido oposto quando a câmara é pressurizada. Esta inversão no sentido da flexão das chapas tem maior amplitude entre os vãos das câmaras externa onde não há tubos de ligação entre gomos pela formação de vãos livres.

Por outro lado, a amplitude das movimentações das chapas durante os ciclos de pressurização geram esforços concentrados de tração e compressão nas regiões de ligação que, quando combinadas com quinas ou frestas de soldas agudas inerentes ao projeto, como é o caso aqui observado, podem gerar concentração de tensões e gerar a falha por fadiga devido ao alto número de ciclos de pressurização e despressurização.

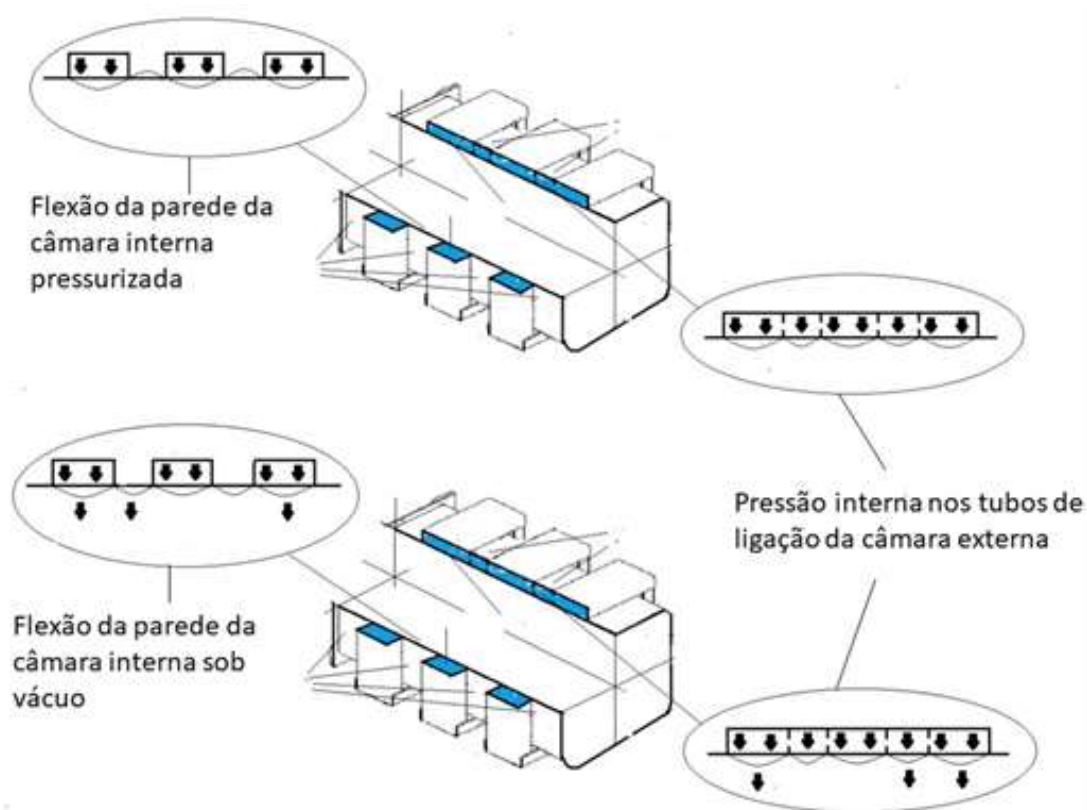


Figura 40 - Ciclos de pressão e vácuo nas câmaras interna e externa e efeitos sobre a deformação elástica

Uma vez que o projeto da ligação dos gomos da câmara externa apresenta a formação de uma fresta, outro fator agravante está na sensitização durante a soldagem. Os picos da espectroscopia durante a análise por EDS (Figura 36) demonstram composição de cromo acima de 16% em peso. No ponto 2 o espectro apresenta 26,5% de cromo e no ponto 4, 21% em peso de cromo. O Aço 316L utilizado deve ser austenitizado em alta temperatura por pouco tempo para que o cromo permaneça diluído na austenita ao invés de precipitar, o que provavelmente não pode ser executado em um equipamento deste tamanho e complexidade. As soldas, por sua vez, apresentaram dureza semelhantes e sem muita variação com relação ao metal base.

As características da superfície da falha apresentada na Figura 32 indicam a formação de estrias de fadiga. Este fenômeno associado ao efeito da sensitização gerou também trincas intergranulares observadas nas Figura 33 e 33. Considerando a concentração de cloro presente na água utilizada para geração de vapor,

possivelmente o efeito de corrosão sob tensão ocorreu em etapas do processo de deslocamento da fissura com deslocamento intergranular, pois foram encontrados picos de Cl e Ca ao menos no espectro 2 da análise por EDS.

6. CONCLUSÕES

Na autoclave, objeto deste estudo, foi observado que a mesma trabalhou a maior parte do tempo sem o devido tratamento adequado de sua água aplicada na geração de vapor, mesmo admitindo-se por hipótese que ao menos no início de sua utilização a empresa empregou água com algum tipo de tratamento dentro das normas. Foram observadas marcas de incrustações generalizadas nas paredes da câmara interna e no interior do gerador de vapor, porém, pequenos vestígios no interior da câmara externa, quando a mesma fora seccionada para retirada dos corpos de provas, indicando uma eficiência de circulação de vapor pelo sistema.

Em relação às técnicas metalográficas aplicadas neste trabalho, a análise química por EDS da superfície de fratura mostrou a presença de S, Cl e Ca que possivelmente são contaminações posteriores a ruptura, ou seja, encontravam-se presentes no vapor gerado por uma água sem o devido tratamento, a qual vazava através das fissuras.

A superfície de fratura apresentou estrias características de falha por fadiga. Ao mesmo tempo foram observadas trincas intergranulares e regiões com percentual de cromo acima dos limites estabelecidos pela AISI para o aço inoxidável 316L, o que indica a possibilidade de sensitização durante a soldagem.

Ao analisar os corpos de provas retirados das regiões da câmara externa, foi observado que no processo de fabricação do equipamento não foi dada a devida continuidade do cordão de solda de fixação do perfil (gomos) da câmara externa sobre a câmara interna. A região de interligação entre os gomos que formam a câmara externa permitiu a formação de frestas sobre a câmara interna, onde, durante os ciclos de pressurização, formaram pontos de concentração de tensão.

Por fim, é possível concluir que as trincas se formaram por fadiga e dentro da câmara interna, nos cruzamentos de interligações destas com o perfil do tubo de ligação, sob a fresta do perfil metálico (gomo) da câmara externa sobre a interna e na região da ZTA da junção soldada, ou seja, região de concentração de tensão e sujeita aos esforços repetitivos por diversos ciclos de trabalho, conforme ilustrado na Figura 38. Por haver uma padronização nas regiões das ocorrências das trincas, sugerimos que houve algum problema no processo de montagem do equipamento associado ao projeto que permitiu formação de frestas entre as câmaras.

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. C. **Projeto Mecânico - Enfoque Baseado na Fadiga e na Mecânica de Fratura**. 1. ed. São Paulo: GEN LTC, 2018.

ALTAFINI, C. A; **Apostila de Caldeiras**. D.E.M Universidade de Caxias do Sul, 2002. 36p. Disponível em <<http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/caldeiras-apostila.pdf>>. Acesso em: 09 de outubro de 2017.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Seção VIII Divisão 1: Caldeiras e Vasos de Pressão**. Tradução do Instituto brasileiro de Petróleo, 1º ed. Rio de Janeiro, IBP, 1986.

AMORIM, R.D et al: **Investigação no Processo de Esterilização por Autoclave**. Disponível em: <http://repositorio.aee.edu.br/bitstream/aee/488/1/TCC%20II%20-%20Diogo%20de%20Souza%3B%20Leandro%20Torres%20e%20Rafael%20Duarte.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2019.

ESAB, **Apostila Metalurgia da soldagem, 2010**. Publicado no site www.esab.com.br/literatura/apostilas/Apostila%20Metalurgia%20da%20Soldagem.pdf, acessado em 12/04/2020.

ASME. **Boiler and Pressure Vessel Code**, Seção VIII, Divisão 1 e Divisão 2

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT . NBR 11816:2003: Esterilizadores a Vapor com Vácuo para Produtos e Saúde**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT . NBR 15417:2006: Vasos de Pressão: Inspeção de Segurança em Serviço**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 16035-1:2012 Ed 2: Caldeiras e vasos de pressão – Requisitos mínimos para**

construção – Parte1: Geral. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 16035-2:2012**
Ed 2: Caldeiras e vasos de pressão – Requisitos mínimos para a construção
Parte 2: conforme ASME code Seccion 1. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 16035-3:2012**
Ed 2: Caldeiras e vasos de pressão – Requisitos mínimos para a construção
Parte 2: conforme ASME code, Seccion VIII, Division 1. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR ISO16528-1:2008: Caldeiras e vasos de pressão Parte 1: Requisitos de desempenho.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR ISO16528-2:2008: Caldeiras e vasos de pressão Parte 2: Procedimentos para atendimento integral da ABNT NBR ISO 16528-1.** Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR ISO17665-1:2010: Esterilização de produtos para saúde – Vapor Parte 1: Requisitos para o desenvolvimento, validação e controle de rotina nos processos de esterilização de produtos para saúde.** Rio de Janeiro, 2010.

BAUMER, **Manual de Manutenção da Autoclave HI-SPEED-II.** Disponível em: http://interhospitalar.com.br/images/hospitalar/manual/MM_B_100_200_300_500_completo_Site.pdf. Acessado em 05 ago. 2019.

BRASIL, Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Boas Práticas para Processamento de Produtos para Saúde. Resolução-RDC nº15/2012.** Brasília: ANVISA, 2012.

Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento - 3ª edição revisada.** Brasília: FUNASA, 2004. Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/manual_saneamento_3ed_rev_p1.pdf,

Acesso em 05 ago. 2019.

BORDINI, C. M. **Tipos de Esterilização por vapor**. São Paulo: NASCECME, 1997. Disponível em: <http://www.nascecme.com.br/artigos/Statim%20-%20tabela%20flash-2.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2020.

BUENO, D. P. **Estudo do comportamento em fadiga do aço inoxidável AISI 316L através da análise dos parâmetros geométricos das bandas de deslizamento persistentes**. Dissertação de mestrado, UFRGS, 1996.

BUDYNAS. R.G. & NISBETT. J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley. Projeto de Engenharia Mecânica**. V 8. P 230-283. Mc Graw Hill. Bookman. 2011.

BUSTAMANTE, F. **Conceitos Básicos de Esterilização**. Disponível em: <http://www.cvs.saude.sp.gov.br/up/SEC%20SAUDE%20S%20PAULO%20201.pdf>. Acessado em 05 ago. 2019.

CHOI, K. Y., KIM, S. S., **Morphological analysis and classification of types of surface corrosion damage by digital image processing**. Corrosion Science, v. 47, n. 1, p. 1-15, 2005.

FARIA, B. C.; OLIVEIRA, B. F.; SILVA, S.E.T.P. **Análise de Falha e do Projeto construtivo de um vaso de pressão**. Perspectivas Online: Exatas & Engenharia, v. 09, n. 24, p. 1 - 18, 2019. Disponível em: https://ojs3.perspectivasonline.com.br/exatas_e_engenharia/article/view/1731/1378. Acesso em: 26 fev. 2020

FERRARESI, V. A. **Metalurgia da Soldagem dos Aços Inoxidáveis Austeníticos**. São Paulo: FEMEC/UFU, 3 jul. 2013. Disponível em: [file:///C:/Users/Valter/Downloads/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20%20inox%20-%20p%C3%B3s%20-%20parte%203%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Valter/Downloads/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20%20inox%20-%20p%C3%B3s%20-%20parte%203%20(2).pdf). Acesso em: 26 fev. 2020.

FKM-Guideline. **Analytical Strength Assessmnt of componentes in Mechanical Engineering**. Conselho Alemão de Pesquisa em Engenharia (do alemão.

Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM). Traduzida para o inglês por E. Haibach. 5 ed. Frankfurt, Alemanha. 2003

HAMADA, I., YAMAUCHI, K. **Sensitization behavior of type 308 stainless steel weld metals after postweld heat treatment and low-temperature aging and its relation to microstructure**. Metallurgical and Materials Transactions A 33, 1743–1754 (2002).

HERTZBERG, R.W. **Deformation and fracture mechanics of engineering materials**. 4.ed. New York: John Wiley & Sons, 786 p. 1996.

HSIEH, Chih-Chun et al. **Overview of Intermetallic Sigma (σ) Phase Precipitation in Stainless Steels**.: KUO, K. journal of the Iron e steel institute, vol. 181. ed. Japão, 19 jan. 2012. Disponível em: <http://downloads.hindawi.com/archive/2012/732471.pdf>,. Acesso em: 12 abr. 2020.

LIN, J., ELLAWAY, M., ADRIEN, R. **Study of corrosion material accumulated on the inner wall of steel water pipe**. Corrosion Science. Volume 43, Issue 11, 2001, Pages 2065-2081

LORIS FILIPI, R. **A Importância da Gestão em Manutenção para Melhora da Produtividade das Áreas Relacionadas**. Disponível em: <<http://nascecmecme.com.br/4o-e-ultimo-dia-da-14-jornada-norte-nordeste/>>. Acesso em: 30 dez. 2018.

MAIYA, P.S., BUSCH, D.E. **Effect of surface roughness on low-cycle fatigue behavior of type 304 stainless steel**. MTA 6, 1761 - 1975.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.; **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**; MG; Editora UFMG; 2007.

Ministério da Saúde. **Manual de Central de Esterilização**, Brasília: Ministério da Saúde, 2001. Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/orientacoes_gerais_central_esterilizacao

p2.pdf, Acesso em 05 ago. 2019.

Ministério da Saúde. **Portaria 2914 de 12 de dezembro de 2011**. Brasília: Ministério da Saúde, 2011. Disponível em: <http://www.saude.mg.gov.br/images/documentos/PORTARIA%20No-%202.914,%20DE%2012%20DE%20DEZEMBRO%20DE%202011.pdf>. Acesso em 05 ago. 2019.

Ministério do Trabalho e Emprego. **Análises de Acidentes do Trabalho** – Organizado por Fernando Araújo Ferreira. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2016. Disponível em: <https://segurancadotrabalhonwn.com/livro-analises-de-acidentes-e-doencas-do-trabalho-download/> Acessado em 05 ago. 2019.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. 1.ed. São Paulo: SENAI-SP, 2001.

Norma Regulamentadora nº 13: Caldeiras e Vasos de Pressão da Portaria MTb nº 3.214 de 08/06/1978. Alterada através da Portaria MTb nº 1.082 de 18/12/2018: Caldeiras, Vasos de Pressão, Tubulações e Tanques Metálicos de Armazenamento. Brasília: Ministério do Trabalho, 2018. disponível em: http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/56127453/do1-2018-12-20-portaria-n-1-082-de-18-de-dezembro-de-2018-56127448. Acesso em 05 ago.2019.

NORTON, ROBERT L. **Projeto de Máquinas, uma abordagem integrada**, Bookman, 4ª Ed. 2004.

PADILHA, A. F., AMBROZIO FILHO, F. **Técnicas de Análise microestrutural**. 1.ed. São Paulo: Hemus, 2004.

PADILHA, A. F., GUEDES, L. C. **Aços Inoxidáveis Austeníticos**. São Paulo: Hemus, 2004.

PRAXAIR; SOLDA – **Eletrodo Revestido**; Disponível em:

<http://www.praxair.com/sa/br/bra.nsf/0/12d42d3ad963a7a7852572500060c5e2?OpenDocument>; acesso em 17 mai. 2011.

ESAB, SFA-5.5/SFA-5.5M - **Specification for Low-alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding** : Edição – Julho 1, 2011.

Receita Federal. **Tabela de Vida Útil e Valor Residual**. Brasília: Ministério da Economia, 2019. Disponível em: https://www.cnm.org.br/contadores/img/pdf/parte_2_depreciacao.pdf. Acesso em 05 ago. 2019.

SOUZA, S. A. – **Composição Química dos Aços** – São Paulo: Editora Edgard Blucher – 1987 – 1ª reimpressão 2001.

TURATTI, E. **Avaliação do comportamento do Aço SAE 4140 submetido a ensaios de Fadiga**. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário Univates. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Curso de engenharia mecânica. 2017.

UHRÍČIK, M., ORAVCOVÁ, M., PALČEKA, P., ORŠULOVÁ, T., HANUSOVÁ, P. **Analysis of dependence of internal damping on temperature of austenitic steels AISI 304 and AISI 316L**. Transportation Research Procedia 40 - 2019.

WANG, Y.; MELETIS, E.I., HUANG, H. **Quantitative study of surface roughness evolution during low-cycle fatigue of 316L stainless steel using Scanning Whitelight Interferometric (SWLI) Microscopy**. International Journal of Fatigue. v 48, 2013.