

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

ROMULO ROCHA DE ARAÚJO LIMA

**AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL
316L SOLDADAS PELO PROCESSO SMAW**

**RECIFE
2017**

ROMULO ROCHA DE ARAÚJO LIMA

**AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL
316L SOLDADAS PELO PROCESSO SMAW**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Materiais e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira.

Coorientador: Prof. Dr. Tiago Leite Rolin

RECIFE

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

- L732a Lima, Romulo Rocha de Araújo.
Avaliação das tensões residuais em chapas de aço inoxidável 316L soldadas pelo processo SMAW / Romulo Rocha de Araújo Lima. – 2017.
76 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira.
Coorientador: Prof. Dr. Tiago Leite Rolin.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.
Inclui Referências e Apêndices.
1. Engenharia Mecânica. 2. Tensões residuais. 3. ASTM A-240 TP 316L. 4. Método DPC. I. Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti. (Orientador). II. Rolin, Tiago Leite. (Coorientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-57

22 de dezembro de 2017

“AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM CHAPAS DE AÇO
INOXIDÁVEL 316L SOLDADAS PELO PROCESSO SMAW”

ROMULO ROCHA DE ARAÚJO LIMA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E
FABRICAÇÃO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM
COORDENADOR

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA (UFPE)

Prof. Dr. YOGENDRA PRASAD YADAVA (UFPE)

Prof. Dr. EDSON FERNANDO PEREIRA (IFPE)

À minha amada família e aos meus amigos, os quais foram e são de fundamental importância em minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus, nosso pai supremo.

Ao Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira, pela sua orientação, paciência e colaboração, e aos demais professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE.

Aos meus amados pais e heróis Romeu Vieira e Dulce Rocha pelo amor, apoio e ensinamentos que me fizeram ser a pessoa sou.

Aos meus irmãos Michelle Rocha e Petronio Rocha, os quais são meus exemplos de vida, e DEUS não poderia ser mais generoso em colocar-me em suas vidas.

À minha esposa Danielly Alves pelo amor, companheirismo, incentivo e paciência.

Aos meus sogros José dos Santos e Eunice Alves (*In memoriam*), a minha cunhada Cibelly Alves e Marli.

À minha cunhada Simone, que junto com meu irmão me derem de presente a honra de ser padrinho do lindo Pietro.

À meu sobrinho querido Vinícius.

Aos meus familiares, tios, tias, primos e primas, pelo carinho, estímulo e incentivo.

À empresa WPS – Na pessoa do seu Diretor Wellington Pereira pelo apoio na fabricação dos corpos de prova;

Aos amigos de longas datas Felipe Fernandes, Márcio Luiz, André Gustavo e Carlos Alberto, que sempre apoiaram e me incentivaram nessa jornada.

Aos amigos Douglas, Dimas, Ionaldo, Weydson, Marcelo Marques, Danilo, Demétrius, Miquéias, Dejailson, Marcelo Torres, Nunes, Jairo, Aldemir, Márcio, Paternak, Israel, Enéas, Wilton, Edson, Bráulio, Eduardo, Paulo, Ozevaldo, Joaquim, e demais amigos de UPE, UFPE, IFPE, e Codistil do Nordeste, pelo apoio de sempre.

Aos técnicos pertencentes aos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE, pela contínua ajuda.

RESUMO

As tensões residuais em chapas de aço inoxidável ASTM A-240 TP 316L soldadas pelo processo SMAW (eletrodo revestido) foram avaliadas. O método de medição utilizado foi o DPC – Deslocamento de Pontos Coordenados, que tem uma metodologia teórico-experimental em desenvolvimento na UFPE. Para o estudo foram fabricados cinco CPs (corpos de prova), sobre os quais foram feitas seis furações, sendo uma de 10mm (referencial) e as demais (cinco) de 2mm junto à ZTA (zona termicamente afetada), com distância entre centros de 10mm no eixo x, e 5mm no eixo y. Após a soldagem, os furos nas chapas foram referenciados numa mesa de medição por coordenadas. Em seguida, os corpos de prova foram tratados termicamente para alívio de tensão. Depois de tratados, novas medições nos furos foram feitas para se medir os deslocamentos produzidos pelo tratamento. Baseado nos deslocamentos produzidos, as tensões foram calculadas na direção x (transversal) e y (longitudinal). Os resultados do estudo mostraram valores de tensões entre 250 e 350 MPa para a direção y e entre 25 e 35 MPa para a direção x. Comparando-se os resultados obtidos neste estudo, aos resultados obtidos por outros métodos de análises, pode-se dizer que a metodologia empregada, apesar do custo acessível, é bastante satisfatório.

Palavras-chave: Tensões residuais. ASTM A-240 TP 316L. Método DPC.

ABSTRACT

The residual stresses in ASTM A-240 TP 316L stainless steel plates welded by SMAW process (coated electrode) were evaluated. The measurement method used was CPD – Coordinate points displacement, which has a theoretical-experimental methodology under development in UFPE. For this study, five specimens were manufactured, using six drill holes in each specimen, at where of them with 10 mm (referential) and the other ones (five) with 2 mm next to HAZ (heat affected zone), using the distance between the centers of 10 mm in X axis and 5 mm in Y axes. After welding, the drill holes in the plates were referenced in a measuring table by coordinates. After, these specimens were heat-treated for tension relief. Then, new measurement in the holes was taken to measure the displacement produced by the heat-treatment. According to displacements produced, the stresses were calculated in Y axes/direction (longitudinal) and X axes/direction (transversal). The study results showed values of stresses between 250 and 350 MPa for Y axes/direction and between 25-35 MPa for X direction/axes. Comparing found results in this study, to found results in another methods of analysis, we can say that the used methodology, despite of very low cost, is quite satisfactory.

Keywords: Residual stress. ASTM A-240 TP 316L. Method CPD.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processos de soldagem por fusão	13
Figura 2 – Processo de soldagem por eletrodo revestido	16
Figura 3 – Classificação eletrodo revestido.....	18
Figura 4 – Posições de soldagem	19
Figura 5 – Posições de soldagem	19
Figura 6 – Eletrodos aço inoxidável	20
Figura 7 – Divisão dos materiais metálicos	23
Figura 8 – Velocidade de oxidação de acordo com a quantidade de Cromo na liga. 25	
Figura 9 – Aços Inoxidáveis da série 300 e suas composições.	28
Figura 10 – Gráfico de tratamentos térmicos mais usuais após soldagem	29
Figura 11 – Gráfico TT para o tratamento térmico de alívio de tensões.....	30
Figura 12 – Tipos de tensões residuais com os diferentes tipos de escala.....	32
Figura 13 – Composição básica de uma máquina de medição por coordenadas	39
Figura 14 – Chapa traçada para fabricação dos CPs.....	41
Figura 15 – Peças cortadas para a fabricação dos CPs	41
Figura 16 – Identificação no eletrodo, e caixa de armazenamento (a), (b), (c) e (d). 42	
Figura 17 – Retificador para soldagem com eletrodos revestidos BR 425.....	43
Figura 18 – Montagem e travamento dos CPs para a soldagem (a) e (b).....	45
Figura 19 – Sequência de passes na soldagem dos CPs	45
Figura 20 – Execução da soldagem dos CPs (a) e (b).....	46
Figura 21 – Monitoramento dos parâmetros de soldagem na execução (a) e (b).	46
Figura 22 – Esquema de usinagem das furações (em mm) no corpo de prova	47
Figura 23 – Usinagem das furações no corpo de prova (a), (b) e (c).....	47
Figura 24 – Sequência do mapeamento realizado pela máquina de medições por coordenada e sentido de soldagem.	48
Figura 25 – Máquina de Medição por Coordenadas, modelo CRYSTA 574.	49
Figura 26 – Amostra para definição da temperatura de tratamento.	50
Figura 27 – CP no interior do forno antes do TTAT (a) e (b).	50
Figura 28 – CP após o TTAT resfriando ao ar.....	51
Figura 29 – Perfis de temperatura em diferentes velocidades de soldagem.....	53
Figura 30 – Comparação das tensões residuais médias totais (MPa).	56
Figura 31 – Deslocamento das furações no CP 01	57

Figura 32 – Tensões residuais longitudinais CP 01	58
Figura 33 – Deslocamento das furações no CP 02	58
Figura 34 – Tensões residuais longitudinais CP 02	59
Figura 35 – Deslocamento das furações no CP 03	60
Figura 36 – Tensões residuais longitudinais CP 03	60
Figura 37 – Deslocamento das furações no CP 04	61
Figura 38 – Tensões residuais longitudinais CP 04	61
Figura 39 – Deslocamento das furações no CP 05	62
Figura 40 – Tensões residuais longitudinais CP 05	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrão quanto à composição química.	23
Tabela 2 – Classificação dos aços inoxidáveis e equivalência com a norma ASTM A-240 (aços austeníticos e ferríticos) e ASTM A-176 (aços martensíticos).27	
Tabela 3 – Principais métodos de medição de tensões residuais	35
Tabela 4 – Aplicabilidade de cada técnica de medição de tensões residuais para materiais frequentemente encontrados na indústria.....	36
Tabela 5 – Composição química do aço inoxidável 316L.	40
Tabela 6 – Propriedades mecânicas do eletrodo E316L-17.....	42
Tabela 7 – Composição química do eletrodo E316L-17.....	42
Tabela 8 – Características de soldagem do eletrodo E316L-17.....	42
Tabela 9 – Características técnicas da retificadora balmer 425.	44
Tabela 10 – Cálculo do aporte térmico.....	45
Tabela 11 – Coordenadas dos furos antes do TTAT.....	52
Tabela 12 – Coordenadas dos furos após TTAT.....	52
Tabela 13 – Coordenadas dos furos antes e após TTAT	53
Tabela 14 – Coordenadas dos furos antes e após TTAT	54
Tabela 15 – Coordenadas dos furos antes e após TTAT	54
Tabela 16 – Coordenadas dos furos antes e após TTAT	54
Tabela 17 – Coordenadas dos furos antes e após TTAT	55
Tabela 18 – Deformação dos pontos referenciados nos eixos X e Y	55
Tabela 19 – Comparações das tensões residuais [Mpa] nos eixos X e Y	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL.....	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO (MMA / SMAW)	16
3.1.1	Energia de Soldagem para o Processo	21
3.2	TIPOS DE AÇO PARA CONSTRUÇÃO MECÂNICA	22
3.2.1	Classificação dos aços	22
3.2.2	Aços inoxidáveis	24
3.2.3	Tipos de aços inoxidáveis.....	26
3.3	TRATAMENTO TÉRMICO	28
3.3.1	Tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT)	29
3.4	TENSÕES RESIDUAIS	31
3.4.1	Tipos de tensões residuais	32
3.4.2	Tensões Residuais na Soldagem	33
3.4.3	Medição de Tensões Residuais.....	34
3.4.4	Método do Furo Cego.....	37
3.4.5	Método DPC	37
3.5	MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS.....	39
4	MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1	MATERIAIS	40
4.1.1	Metal de Base (MB)	40
4.1.2	Metal de adição	41
4.2	MÉTODOS	43
4.2.1	Equipamentos aplicados.....	43
4.2.2	Soldagem dos CPs.....	44
4.2.3	Usinagem das furações para a medição por coordenadas.....	47
4.2.4	Tratamento térmico de alívio de tensões.....	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
6	CONCLUSÕES	64
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICES.....	70

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é o processo união de materiais (mais comumente nos metais), de importância principalmente nas indústrias metal mecânica, onde é amplamente utilizada na fabricação e manutenção de peças, estruturas e equipamentos de uma forma generalizada (PEIXOTO, 2012).

Em um contexto geral, estaleiros, caldeirarias, indústrias automotiva, civil e aeronáutica, em geral, são utilizados diversos processos de soldagem para uma diversa gama de aplicações, sendo necessário um estudo prévio para a escolha do processo adequado.

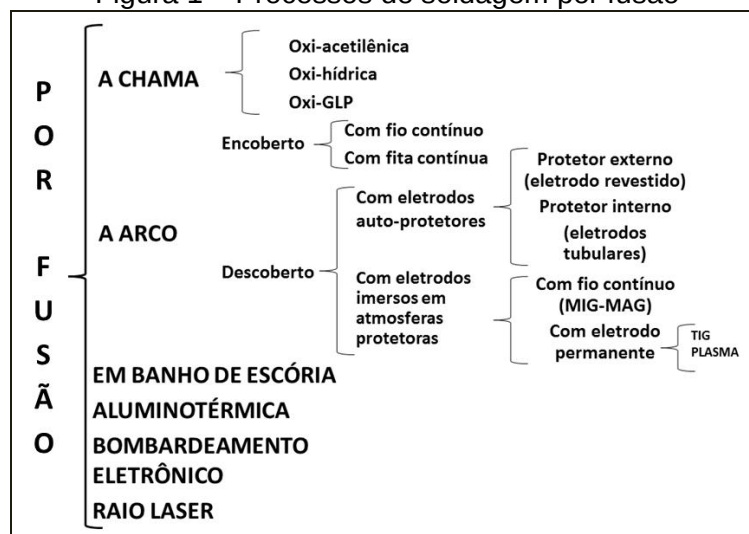
Na execução e após o processo de soldagem, podem-se apresentar diversos defeitos, como por exemplo, trincas, porosidades, inclusões, sendo um dos principais problemas gerados pelo processo, a tensão residual. (SIMEI, 2012)

A tensão residual pode ser definida como qualquer tensão existente no volume de um material sem aplicação de carga externa (ESTEFEN, 2008). Essas tensões geradas influenciam diretamente na característica da resistência mecânica das estruturas soldadas, uma vez que o aparecimento de trincas é considerado um grande problema, podendo fazer a estrutura colapsar, provocando assim grandes perdas, e até acidentes de grandes proporções (GURVITZ, 2012).

A tensão residual na soldagem surge decorrente às contrações no resfriamento, devido ao gradiente térmico durante o ciclo de aquecimento e resfriamento das regiões adjacentes ao cordão com a consequente plastificação. (NAEEM, *et al.*, 2008) Devido à soldagem ser na maioria das vezes um processo de deposição em cordões, o resfriamento da peça não ocorre homoganeamente no metal de base e na própria solda, assim sendo, a superfície externa será mais rapidamente resfriada que a superfície interna (ALEXANDROV e LIPPOLD, 2007).

A soldagem pode ser realizada por diversos processos, conforme Figura 1 a qual exemplifica os tipos de processos fusão.

Figura 1 – Processos de soldagem por fusão



Fonte: Borges, 2017

Dentre os principais processos de soldagem por fusão, pode-se citar:

- ✓ Eletrodo revestido (MMA/SMAW);
- ✓ MIG / MAG (GMAW);
- ✓ TIG (GTAW);
- ✓ Arco submerso (SAW);

Um dos principais processos de soldagem utilizados na indústria metal mecânica, naval e de caldeirarias que podemos citar é a por eletrodo revestido. É realizada com o calor de um arco elétrico mantido entre duas partes metálicas, a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho/metal base (ESAB, 2014). Criado o arco elétrico entre a extremidade do eletrodo e o metal de base a ser soldado, gera-se um calor de alta intensidade, podendo chegar aos 5000° C, que funde o eletrodo e a superfície da peça próximo ao arco instantaneamente (OLIVEIRA, *et al*, 2014).

Como todos os processos de união, a soldagem apresenta em sua utilização vantagens e desvantagens, como:

Vantagens: Alta eficiência e resistência mecânica; Operação manual ou automatizada; Variedade de processos; Aplicáveis a uma grande gama de materiais; Custo relativamente baixo.

Desvantagens: Exigem controle e testes diversos para garantir sua integridade; Exige pessoal qualificado para a execução; Exige que a preparação da junta a ser soldada seja adequada, como limpeza e geometrias corretas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Obter e avaliar as tensões residuais geradas pela soldagem por eletrodo revestido em chapas de aço inoxidável ASTM A240 TP 316L, utilizando o método de deslocamento de pontos coordenados (DPC).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar as chapas de teste com bisel de 30° e depois soldar com eletrodo revestido.
- Usinar as furações referenciais em uma região adjacente ao cordão de solda.
- Referenciar as furações em uma mesa de medição por coordenadas.
- Tratar termicamente as chapas de teste numa faixa de temperatura inferior à temperatura de recristalização.
- Medir o deslocamento dos pontos (furações) previamente mapeados antes do tratamento térmico de alívio de tensões TTAT, e após o (TTAT).
- A partir dos deslocamentos dos pontos (furações) calcular as tensões residuais e classifica-las como trativas ou compressivas, baseado no afastamento ou aproximação dos pontos após o TTAT.

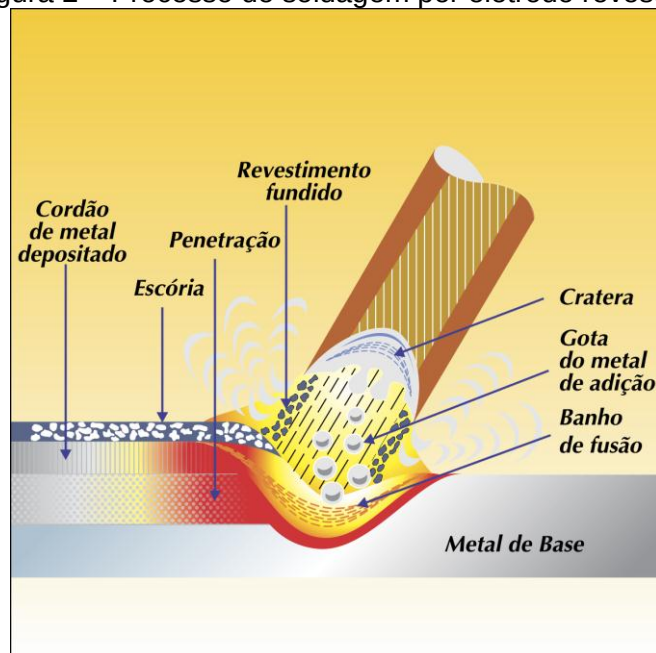
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO (MMA / SMAW)

É a soldagem a arco elétrico tendo como metal de adição o eletrodo revestido (Shielded Metal Arc Welding – SMAW), que também é conhecida como soldagem manual a arco elétrico (Manual Metal Arc – MMA) (GUEDES, 2009).

É realizada com o calor gerado por um arco elétrico mantido entre as partes metálicas, a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça a ser unida, que é conhecida como metal de base. O calor gerado pelo arco elétrico, que é extremamente alto, é suficiente para fundir o metal de base, a alma do eletrodo (metal de adição) e o revestimento. Quando o metal é fundido se transformam em gotas, e são transferidas através do arco criado para a poça de fusão, a proteção da atmosfera é realizada pelos gases produzidos durante a decomposição do revestimento. A escória líquida que está localizada na poça de fusão tem a função de proteger o metal de solda da atmosfera enquanto está sendo realizada a solidificação. A Figura 2 exemplifica o processo (MODENESI e MARQUES, 2000).

Figura 2 – Processo de soldagem por eletrodo revestido



Fonte: MODENESI e MARQUES, 2000.

Este processo de soldagem é o mais utilizado dentro das indústrias metal-mecânica, naval entre outras, tanto para a fabricação de peças e equipamentos novos, quanto para a sua manutenção e seus reparos. Dentre os processos de soldagem mais usuais, o por eletrodo revestido possui uma maior flexibilidade, uma vez que a maioria dos metais pode ser unida ou revestida pelo processo, e o mesmo é de baixo investimento para sua aplicação (MODENESI, 2009).

Atualmente, o mercado dispõe de uma grande variedade de eletrodos revestidos, onde são facilmente encontrados, e cada eletrodo possuindo em seu revestimento as características e a capacidade de produzir os próprios gases para a proteção, dispensando o suprimento adicional de gases, que em outros processos de soldagem são de fundamental importância (MODENESI e MARQUES, 2000).

Uma grande vantagem da utilização dos eletrodos revestidos, é que podem ser usados em todas as posições (vertical, plana, sobre cabeça e horizontal), também pode ser utilizado em praticamente todas as espessuras de metal de base e em áreas de acesso limitado, contanto que tenham a visibilidade para a execução da soldagem. Pode ter a função de revestimentos duros, corte e goivagem. É bem mais simples em termos de necessidades de equipamentos, com o custo de investimento relativamente baixo quando equiparado com outros processos (MODENESI e MARQUES, 2000).

Como todos os processos de soldagem, o por eletrodo revestido tem suas vantagens e desvantagens, como grande gama de eletrodos, baixo investimento, não utiliza gases de proteção, flexibilidade de aplicação, mas se caracteriza por ser um processo lento de baixa produtividade, grande quantidade de gases e fumos gerados pela queima dos eletrodos.

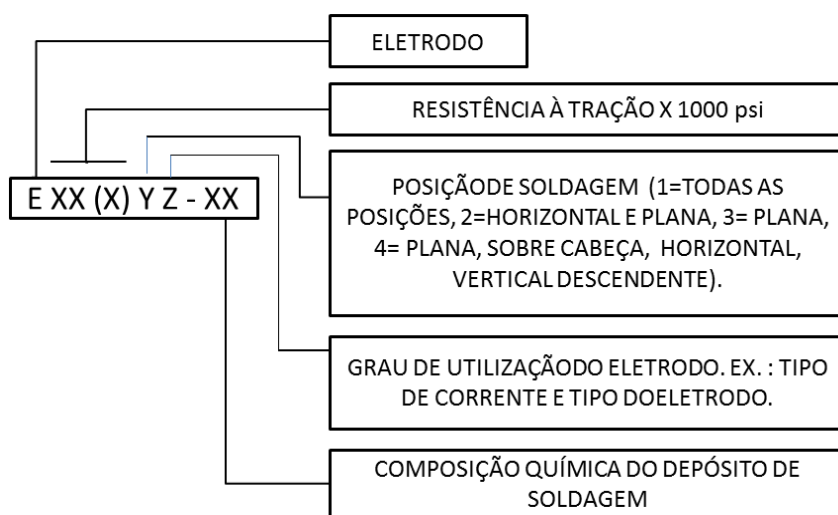
Dentre as aplicações deste processo, cita-se manutenção, fabricação e montagem de estruturas e equipamentos em materiais diversos como aços carbono de baixa, média e alta ligas, aços inoxidáveis, latão, cobre e alumínio, materiais dissimilares (mais de um tipo de metal), entre outros.

A classificação dos eletrodos revestidos é referenciada de acordo com o material a ser soldado, bem como a sua aplicação. A norma mais utilizada para o processo é a ASME (American Society of Mechanical Engineers Sociedade Americana dos Engenheiros Mecânicos), que segue as referências e definições da AWS (American Welding Society Sociedade Americana de Soldagem).

A classificação eletrodo é feita de acordo com o tipo de material consumível, propriedades mecânicas, posições de soldagem, tipo de revestimento e composição química do metal depositado.

Para os eletrodos Revestidos Aço Carbono e Aço Baixa Liga segundo ASME II Part C AWS SFA 5.1 e 5.5, tem-se a classificação conforme a Figura 3:

Figura 3 – Classificação eletrodo revestido



Fonte: ESAB, 2014

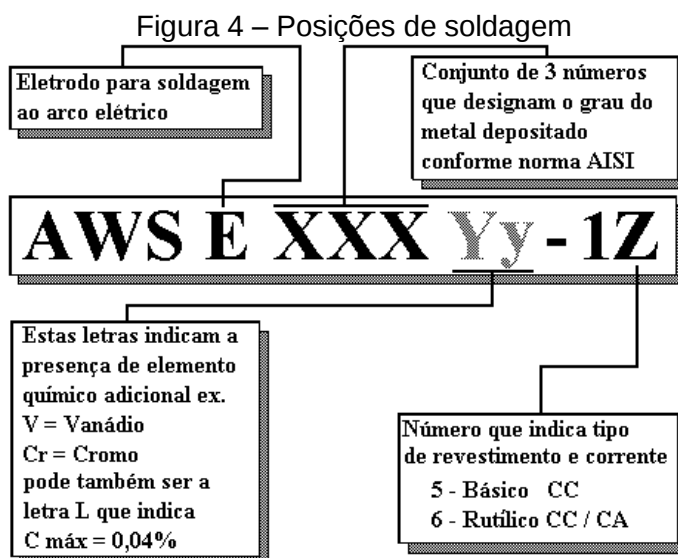
Como eletrodos mais usuais e comuns utilizados na fabricação, montagem e manutenção de estruturas e equipamentos, citam-se (ESAB, 2014):

E6010 Resistência à tração do metal depositado, mínima de 60ksi (~430MPa). Soldagem em todas as posições em corrente CC+. Revestimento tipo celulósico ligado com silicato de sódio.

E6013 Resistência à tração do metal depositado, mínima de 60ksi (~430MPa). Soldagem em todas as posições em correntes CA, CC+ ou CC. Revestimento tipo rutílico ligado com silicato de potássio.

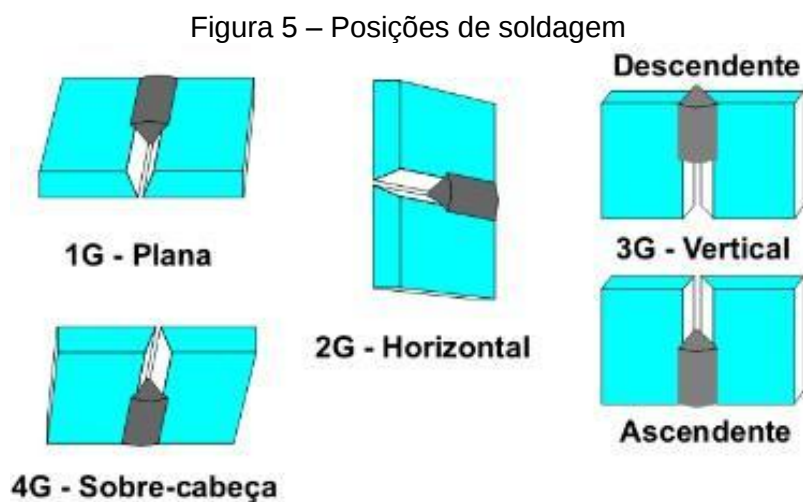
E7018 Resistência à tração do metal depositado, mínima de 70ksi (~490MPa). Soldagem em todas as posições em correntes CA, CC+. Revestimento tipo básico de baixo hidrogênio e pó de ferro ligado com silicato de potássio.

Para interpretação das especificações dos eletrodos para aços inoxidáveis (AWS A 5.4), pode ser vista na Figura 4 conforme a norma AWS A 5.4.



Fonte: ESAB, 2017

Para as soldas de topo, têm-se as seguintes posições de soldagem, conforme a Figura 5.



Fonte: SIMONETTI, 2013

Existe uma grande diversidade de eletrodos para aço inoxidável, que é o objeto do estudo, como é mostrado na Figura 6, onde são descritas as propriedades mecânicas, bem como as composições químicas do material que será depositado.

Figura 6 – Eletrodos aço inoxidável

ELETRODO	METAL DEPOSITADO	
	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	PROPRIEDADES MECÂNICAS
rutílico E308L-17 E308-17	C 0,03 Si 0,8 Mn 0,8 Cr 19,6 Ni 9,9	T 560-600 Mpa A 38-42%
rutílico E347-17	C 0,03 Si 0,63 Mn 0,86 Cr 19,3 Ni 9,35 Mo 0,2 Nb 0,44	T 600-650 MPa A 31-33%
rutílico E316L-17 E316-17	C 0,03 Si 0,7 Mn 0,7 Cr 18,7 Ni 11,7 Mo 2,7	T 550-600 MPa A 33-38%
básico-rutílico E316L-15 E19 12 3 L B 20 +	C <0,03 Si 0,7 Mn 0,7 Cr 18 Ni 12 Mo 2,8	T 580 MPa E 435 MPa A 40% 95 J @ 20°C 75 J @ -60°C 60 J @ -120°C 30 J @ -196°C FN 3-8
rutílico E309L-17	C 0,03 Si 0,85 Mn 1,03 Cr 23,66 Ni 12,26 Mo 0,19	T 700-750 MPa A 31-33%
rutílico E309-16	C 0,1 Si 0,4 Mn 1,3 Cr 24 Ni 13,25 Mo 0,3	T 600-630 MPa A 32-36%

Fonte: ESAB, 2017

3.1.1 Energia de Soldagem para o Processo

O interesse térmico na operação de soldagem é, sobretudo, o de consentir a interpretação e prevenção dos fenômenos metalúrgicos no qual a operação esta englobada. Nos processos de soldagem, o cordão de solda e a zona termicamente afetada passam por ciclos térmicos que variam de acordo com suas disposições em relação à fonte de calor ou ao arco formado. Os pontos mais próximos da fonte de calor experimentam temperaturas mais elevadas e por tempos mais longos e todo esse efeito é medido a partir do cálculo da energia de soldagem, ou aporte térmico (GONÇALVES, 2015).

O aporte térmico (heat input) total é definido pela Equação 3.1

$$H_t = \frac{V \cdot I}{v} \quad (3.1)$$

Onde:

$H_t \rightarrow$ Aporte de calor [J/mm];

$V \rightarrow$ Tensão no arco [V];

$I \rightarrow$ Corrente de soldagem [A];

$v \rightarrow$ Velocidade de soldagem [mm/s].

No entanto, essa energia que é produzida na soldagem não é totalmente transferida para a peça. Para cada processo é definido um coeficiente η de eficiência de transferência de energia, e no caso da soldagem a SMAW (eletrodo revestido) a eficiência adotada é de 85%, $\eta=0,85$ (WAINER, *et al* 2004). Assim sendo, o aporte de calor líquido para a soldagem por eletrodo revestido é definido pela Equação 3.2:

$$H_t = \eta \frac{V \cdot I}{v} \quad (3.2)$$

Onde:

$H_t \rightarrow$ Aporte de calor [J/mm];

$\eta \rightarrow$ Eficiência térmica do processo;

$V \rightarrow$ Tensão no arco [V];

$I \rightarrow$ Corrente de soldagem [A];

$v \rightarrow$ Velocidade de soldagem [mm/s].

3.2 TIPOS DE AÇO PARA CONSTRUÇÃO MECÂNICA

Para a fabricação e manutenção de equipamentos e estruturas, há uma grande gama de materiais que podem ser encontrados em nosso mercado, onde muitos desses são reconhecidos como sendo metais, porém, em sua maioria, eles sejam ligas metálicas.

A união de dois ou mais elementos químicos cria uma liga, sendo necessário que pelo menos um desses seja um metal, para que existam propriedades metálicas nas mesmas. Alguns exemplos de ligas são: O latão, que é uma liga de cobre e zinco, o aço carbono, eu é uma liga de ferro e carbono, o bronze, que é uma liga de cobre e estanho entre outras.

Devido à suas propriedades mecânicas, a grande abundância da matéria prima na natureza para sua produção, e o preço competitivo em relação à outros materiais, o aço é um material que há grande usabilidade na indústria de fabricação e manutenção. A definição do aço não é simples, visto que, a rigor, os aços comerciais não são ligas binárias, apesar dos seus principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, eles contêm sempre outros elementos secundários, presentes devido aos processos de fabricação. Nestas condições, podemos definir o aço como sendo uma liga Ferro-Carbono, contendo geralmente de 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos secundários (como Silício, Manganês, Fósforo e Enxofre), presentes devido aos processos de fabricação (ZOLIN, 2011)

3.2.1 Classificação dos aços

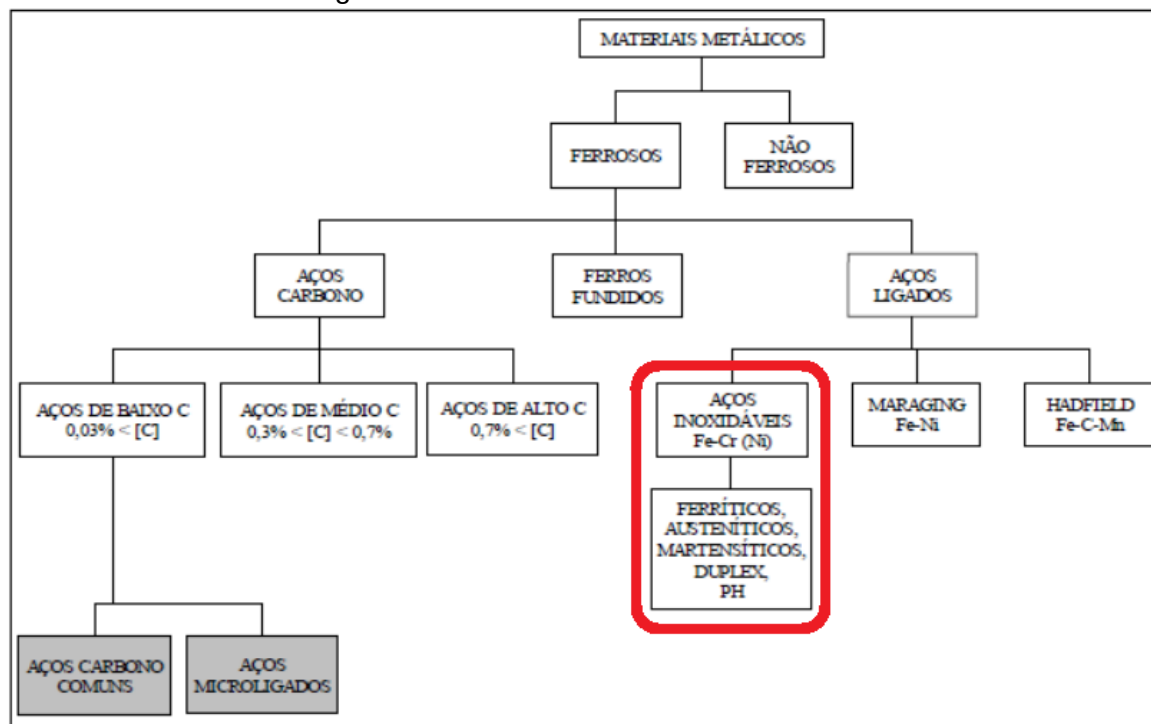
Como classificação, permite-se uma distinção entre os aços carbono comuns e os aços ligados, onde o aço-carbono são ligas de Ferro-Carbono contendo média de 0,008% até 2,11% de carbono, e os aço-liga, que são os aços carbono que contêm elementos de liga, ou apresenta os elementos residuais em teores acima dos que são considerados normais (DENVER S.A., 2017).

A Figura 7 apresenta a classificação dos materiais metálicos e em especial, serão referenciados somente os aços ligados, especificamente o aço inoxidável.

Os aços-liga, ou aços ligados, são subdivididos da seguinte forma:

1. Aços de baixo teor de ligas: Menos de 8% de elementos de liga;
2. Aços de alto teor de ligas: Elementos de liga acima de 8%.

Figura 7 – Divisão dos materiais metálicos



Fonte: Denver S.A., 2017

Para facilitar a seleção de materiais, uma vez que há uma grande gama de variedade, as associações técnicas especializadas criaram um padrão quanto à suas composições químicas, Tabela 1, dando origem aos sistemas SAE, DIN, ABNT e AISI.

Tabela 1 – Padrão quanto à composição química.

AISI	Tipo de aço
13XX	Aços-Mn com 1,75%Mn médio
23XX	Aços-Ni com 3,5%Ni
25XX	Aços-Ni com 5,0%Ni
31XX	Aços-Ni-Cr com 1,25%Ni e 0,65%Cr e 0,80Cr
E33XX	Aços-Ni-Cr com 3,50%Ni, 1,50 e 1,57%Cr
40XX	Aços-Mo com 0,25%Mo médio
41XX	Aços-Cr-Mo com 0,50% ou 0,95%Cr e 0,12%, 0,20%, 0,25% e 0,30%Mo

AISI	Tipo de aço
43XX	Aços-Ni-Cr-Mo com 1,82%Ni, 0,50% ou 0,80%Cr, 0,25%Mo
46XX	Aços-Ni-Mo com 0,85% ou 1,82%Ni e 0,20% ou 0,25%Mo
47XX	Aços-Ni-Cr-Mo com 1,05%Ni, 0,45%Cr, 0,20% e 0,35%Mo
48XX	Aços-Ni-Mo com 3,50%Ni e 0,25%Mo
50XX	Aços-Cr com 0,27%, 0,40%, 0,50%Cr e 0,65%Cr
51XX	Aços-Cr com 0,80% a 1,05%Cr

Fonte: SENAI (1997)

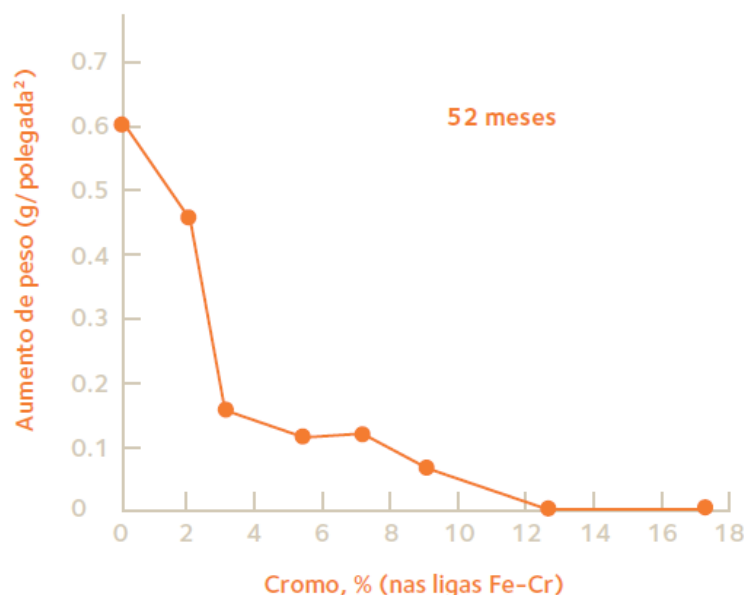
Os elementos químicos que são encontrados comumente nos metais podem influenciar em algumas características, como a solução sólida, o tamanho de grão, a tenacidade, a solubilidade, a resistência a tração, a resistência a corrosão e as temperaturas de transformação.

3.2.2 Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro (Fe), carbono (C) e cromo (Cr) com um mínimo de 10,50% de Cr. Outros elementos metálicos também integram estas ligas, mas o Cr é considerado o elemento mais importante porque é o que dá aos aços inoxidáveis uma elevada resistência à corrosão. (CARBÓ, 2008)

Em determinados tipos de atmosferas, como as rurais, que tem baixos índices de contaminação, pode-se observar eu há uma grande diminuição da velocidade de oxidação destas ligas uma vez que aumenta-se proporcionalmente a quantidade de Cr presente nas mesmas, Figura 8. Com 10,50 % de Cr constata-se que a liga não sofre corrosão atmosférica nessas condições e este é o critério utilizado para sustentar a definição dada para os aços inoxidáveis (CARBÓ, 2008).

Figura 8 – Velocidade de oxidação de acordo com a quantidade de Cromo na liga



Fonte: CARBÓ (2008)

Basicamente, como expresso anteriormente, os aços inoxidáveis são ligas de ferro-cromo, e outros metais atuam como elementos de liga sendo o cromo o mais importante, e sua presença confere a resistência à corrosão, que varia de acordo como seu percentual. São aços que são produzidos de forma que não ocorre oxidação em ambientes considerados normais, com atmosfera não agressiva. A principal característica dos aços inoxidáveis que é a de resistência à corrosão, é obtida graças à formação de um óxido protetor, que cria uma película e essa impede o contato do metal base com a atmosfera (LONDOÑO, 1997).

O fenômeno pelo qual o metal ou a liga deixam de ser corroídos, quando termodinamicamente deveríamos esperar o contrário, é conhecido como passividade. Sabe-se que a formação destes filmes é favorecida pela presença de meios oxidantes e é formada pela reação entre a água e o metal base, e está constituído por um hidróxido dos metais Cr e Fe. O filme passivo dos aços inoxidáveis é muito fino e aderente. (CARBÓ, 2008).

3.2.3 Tipos de aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são classificados pela AISI (norma mais utilizada pelo comércio de aços inoxidáveis) em duas “famílias”: A “família” da série 300 e a “família” da série 400.

A série 300 é composta pelos aços austeníticos, onde os mesmos não são magnéticos e possuem estrutura CFC (cúbica de face centrada), e é composto basicamente de ligas de Fe-Cr-Ni.

A série 400 é composta pelos aços inoxidáveis ferríticos, onde os mesmos são magnéticos e possuem estrutura CCC (cúbica de corpo centrado), e são compostos basicamente ligas Fe-Cr (MORAIS, 2010).

Pode ser evidenciado que em todos os aços inoxidáveis, sempre estarão presentes o carbono e outros elementos que também são encontrados em todos os aços, como por exemplo, o silício (Si), o manganês (Mn), o fósforo (P) e o enxofre (S) (LONDOÑO, 1997).

Os AI (aços inoxidáveis) da série 400 são divididos em dois grupos onde tem-se os ferríticos que em geral apresentam o cromo mais alto e o carbono mais baixo, e os martensíticos, que são os AI que tem predominância de um cromo mais baixo e um carbono mais alto, isto claro, em comparação com os AI ferríticos, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação dos aços inoxidáveis e equivalência com a norma ASTM A-240 (aços austeníticos e ferríticos) e ASTM A-176 (aços martensíticos).

CLASSIFICAÇÃO	AISI	UNS (ASTM)	OBSERVAÇÕES
Austenítico	301	S30100	
"	304	S30400	304 comum
"	304	S30400	Maior conteúdo de Níquel
"	304L	S30403	
"	304H	S30409	
"	316	S31600	Hoje é fabricado um tipo único 316/316L
"	316L	S31603	
"	321	S32100	
Ferrítico	409	S40910	Estabilizado com Ti
"	409	S40900	Estabilizado com Ti, Nb
"	410S	S41008	
"	430	S43000	
"	430		Estabilizado com Nb
"	439	S43932	
"	441	DIN 1.4509	
"	444	S44400	
Martensítico	420	S42000	C aprox. 0,33%
"	420	S42000	C aprox. 0,20%

Fonte: CARBÓ (2008)

Para transformar uma estrutura ferrítica em uma estrutura austenítica, é feita a adição de níquel que é o elemento de liga, em determinadas quantidades, e isso tem como consequência mudança brusca em muitas de suas propriedades.

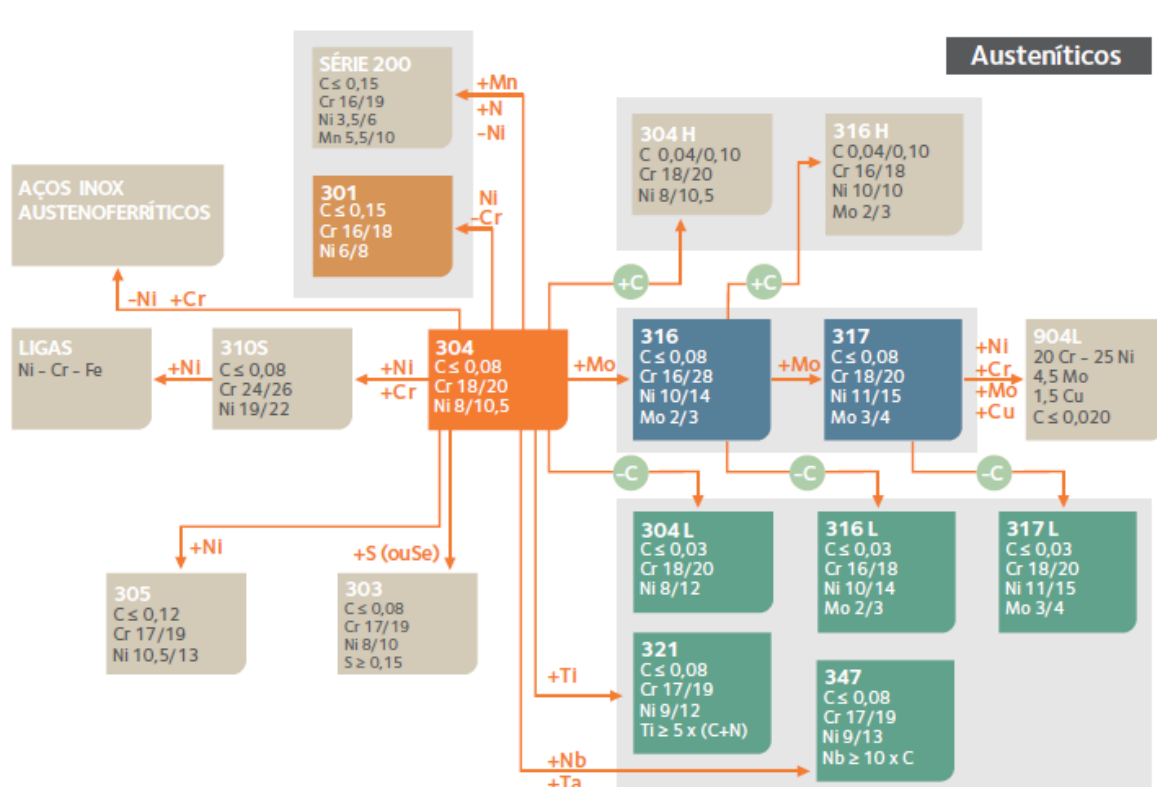
Entre os aços inoxidáveis austeníticos (série 300), o mais conhecido e utilizado é o AISI 304, que é composto por 18%Cr-8%Ni apresenta excelente resistência à corrosão, também excelente ductilidade e excelente soldabilidade, que para a indústria metal mecânica é de imensa importância (SENATORE, FINCETO, PEREA, 2007).

Na série 300, também temos os aço inoxidável ASTM A240 TP 316 que é composto por 18%Cr-13%Ni, e em relação ao 304, pode-se dizer que devido à sua composição, são mais duráveis, porém é mais caro que o 304. Também são amplamente utilizados na indústria metal mecânica, principalmente na fabricação de conjuntos soldados.

Tanto o AISI 304 quanto o AISI 316 podem ser comercializados com um teor menor de carbono, sendo apresentada sua designação seguida de um "L" que significa "low" (na língua inglesa significa "baixo"). No AISI 304, é apresentado 0,07% de carbono, já no AISI 304L 0,03% de carbono, e são apresentados os mesmos percentuais para o AISI 316 e 316L respectivamente (MORAIS, 2010).

As aplicações mais comuns são em equipamentos para as indústrias alimentícias, aeronáutica, naval, petrolífera, de papel e celulose, têxtil e química; destilarias, caldeiraria, tubos e vasos de pressão, mineração e refinarias. A Figura 9 apresenta a série 300 e suas composições químicas.

Figura 9 – Aços Inoxidáveis da série 300 e suas composições.



Fonte: CARBÓ (2008)

3.3 TRATAMENTO TÉRMICO

O tratamento térmico em metais é o conjunto de operações envolvendo aquecimento, tempo de permanência em determinadas temperaturas e resfriamento sob condições controladas, com o objetivo de melhorar as suas propriedades ou conferir características pré-determinadas (GIMENES, 1997).

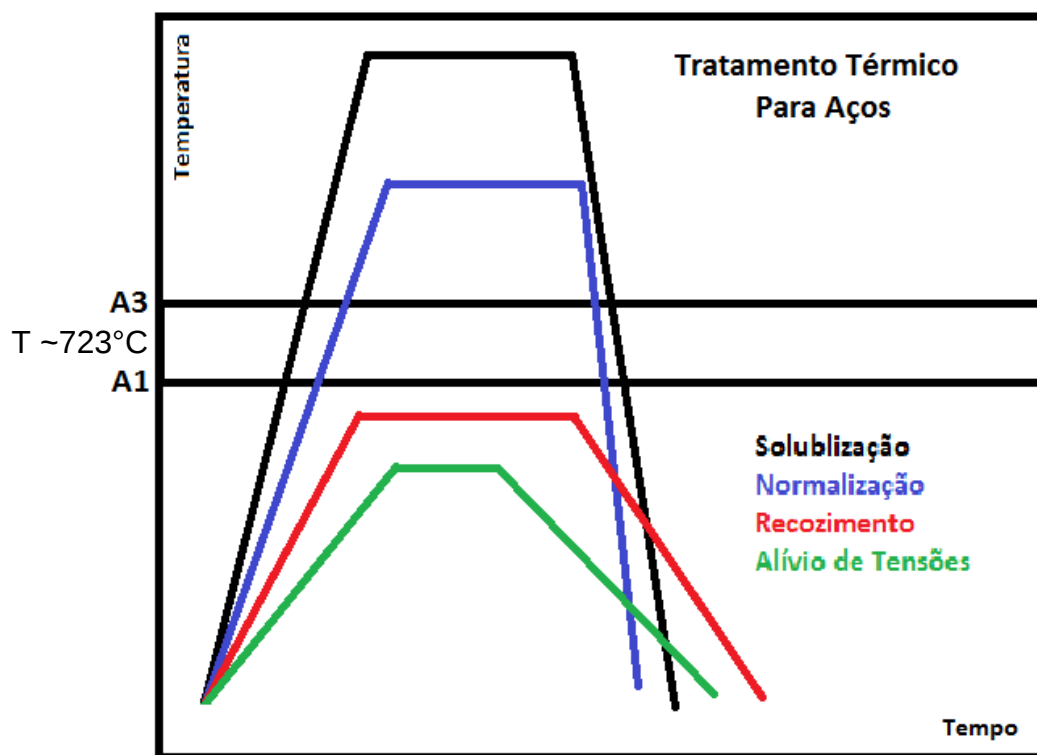
Dentre os principais tipos de tratamentos térmicos, pode-se citar os seguintes:

- Alívio de tensões;
- Pré-aquecimento;
- Pós-aquecimento;
- Têmpera;

- Solubilização;
- Revenimento;
- Recozimento e
- Normalização.

A Figura 10, enfatiza os tratamentos térmicos mais usuais.

Figura 10 – Gráfico de tratamentos térmicos mais usuais após soldagem

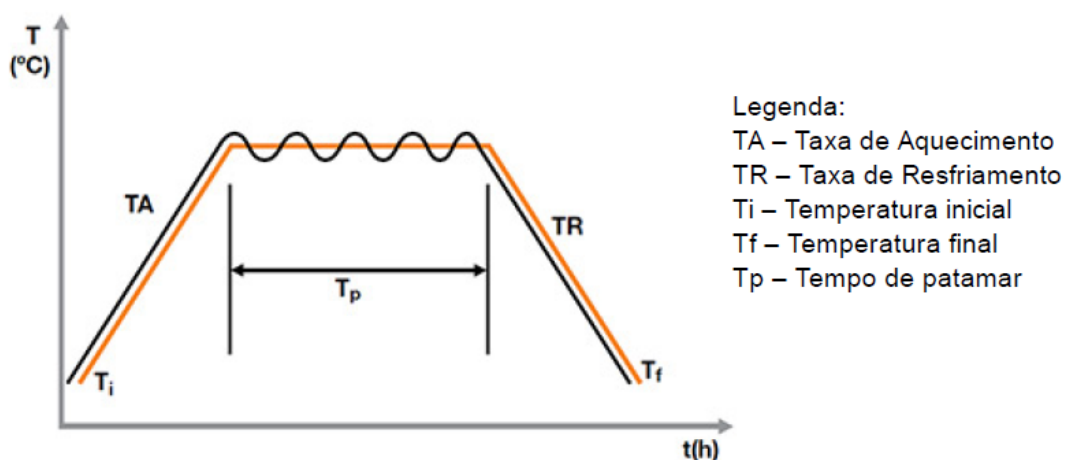


Fonte: O autor

3.3.1 Tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT)

Durante a realização da operação de soldagem, tensões residuais são criadas na peça soldada. Isso ocorre devido ao fenômeno conhecido como dilatação térmica, e é causada pelo calor gerado durante o processo. Sabe-se que a dilatação térmica é diretamente proporcional à variação de temperatura (MODENESI, *et al*, 2012). Desta forma, em uma junta soldada, a região que é fundida é a mais próxima ao arco elétrico e, na medida em que vai se distanciando, ou seja, que o ponto fica mais afastado da zona fundida, a temperatura máxima, que pode ser chamada também de temperatura de pico, essa diminui, conforme a Figura 11.

Figura 11 – Gráfico TT para o tratamento térmico de alívio de tensões



Fonte: ESAB (2014)

Quanto à temperatura, a variação da mesma faz com que o aquecimento seja heterogêneo, causando desta forma tensões de expansão e contração na peça, uma vez que o metal, a uma alta temperatura, tende a expandir, e suas adjacências resistem a essa expansão. Da mesma forma, quando a peça de fusão começa a resfriar, o metal que estava aquecido se contrai, gerando o aparecimento de tensões de tração nas regiões de interface. Se a resultante dessas forças de tração e compressão não é nula, surgem, assim, tensões residuais. Como resultado dessas tensões, podem ser geradas distorções e falhas prematuras na peça (MODENESI, *et al*, 2012).

A forma mais comumente utilizada para minimizar essas tensões, ou seja, aliviá-las, é fazendo o tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) que, onde como já é explicitado que, consiste na realização de aquecimento da peça de trabalho ou corpo de provas (CP) após a execução da etapa de soldagem.

Para a realização do TTAT, é de extrema importância saber qual é a temperatura de transformação do material a ser tratado, uma vez que há o risco do mesmo atingir a temperatura de recristalização do material, e o mesmo ter as suas propriedades mecânicas alteradas.

Alguns dos principais objetivos do TTAT podem ser citados, como (MODENESI, *et al*, 2012):

- Redução de empeno;

- Diminuição da dureza tanto da zona fundida quanto da zona termicamente afetada;
- Aumento da ductilidade;
- Aumento da resistência à corrosão sob tensão e
- Aumento da resistência à fadiga.

A principal característica para ser necessária a realização do TTAT, é quando tem-se materiais sujeitos a falha, principalmente, devido à presença de tensões residuais.

Tal situação é comumente encontrada em peças com espessuras elevadas, pois na soldagem de aços, as tensões decorrentes na peça devido aos ciclos térmicos da soldagem, não provocam deformações, devido à grande rigidez da mesma, desta forma provoca um travamento e acarreta o surgimento de tensões residuais. Como nos materiais de grandes espessuras o resfriamento acontece mais lentamente, devido à dissipação de calor, há uma grande tendência que as microestruturas formadas sejam frágeis (MODENESI, *et al*, 2012).

Outra situação onde é necessário o TTAT é em peças que sejam submetidas a carregamentos cíclicos, que podem apresentar tensões residuais que podem acelerar o aparecimento de falhas por fadiga, assim tendo sua vida útil menor. Um exemplo que pode ser citado é o de eixos automotivos.

3.4 TENSÕES RESIDUAIS

As tensões residuais são tensões criadas internamente e que se desenvolvem em componentes que apresentam um estado de equilíbrio macroscópico no material. Os campos de tensões residuais ocorrem no material mesmo sem a existência de carregamentos externos, gradientes de temperatura, forças de corpo ou influência da gravidade. Muitas falhas em serviço de componentes de máquinas e estruturas resultam da superposição das tensões resultantes das cargas aplicadas com as tensões residuais na peça, muitas vezes causando falha (SUTERO, 2005).

Não há como se prever a ocorrência de tensões residuais com exatidão, pois para isso, tem-se que conhecer o histórico do material aplicado na peça fabricada,

desde o processo de fabricação da matéria prima (MP), até o processo de soldagem da peça acabada.

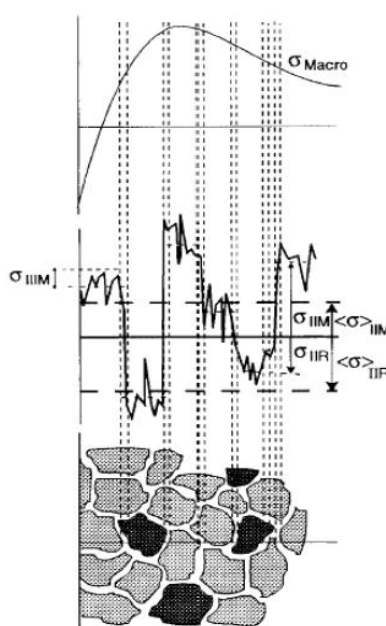
As operações de manufatura são os principais processos geradores de tensões residuais, tendo como exemplo a fundição, a laminação, a estampagem, a trefilação, a usinagem, os tratamentos térmicos e os termo-químicos, a soldagem e o dobramento, entre outras. Em alguns casos as tensões residuais podem ser introduzidas mais tarde na vida do material, durante procedimentos de instalação, montagem, eventuais sobrecargas, ou ainda, por reparos e modificações em serviço (SUTERO, 2005).

3.4.1 Tipos de tensões residuais

Tensões residuais podem ser classificadas em três tipos, tendo como principais: Tipo 1, que são as tensões residuais macroscópicas; Tipo 2, que são as tensões residuais microscópicas e; Tipo 3, que são as tensões residuais submicroscópicas.

Essas classificações são referenciadas a partir das distâncias que as tensões podem ser observadas na figura 12.

Figura 12 – Tipos de tensões residuais com os diferentes tipos de escala



Fonte: Oliveira (2009)

As tensões macroscópicas, tipo I, são as mais encontradas, e normalmente, elas se apresentam ao longo de toda a extensão do material ou peça. Ao longo de grandes distâncias, essas tensões podem variar, e pode se estender à vários grão de determinada peça ou amostra (WITHERS e BHADESHIA, 2001).

Um padrão que é encontrado normalmente de tensões residuais macroscópicas é em união por processo de soldagem de chapas, principalmente com espessuras finas. Considerando que as tensões são constantes ao longo da espessura, é apresentado o comportamento das tensões residuais no plano da chapa no eixo perpendicular e ao longo do eixo do cordão da solda. O valor máximo de tensão trativa, ocorre sobre o cordão de solda, diminuindo a medida que se afasta, até que numa determinada distância, o campo de tensão inverte o sinal de forma a satisfazer o equilíbrio das tensões internas (SUTERO, 2005).

As tensões residuais microscópicas ou micro-tensões, que são o tipo II, são tensões estruturais e que cobrem uma distância de um grão ou uma parte de grão, desta forma, a região que sofrerá influência destas tensões será imposta a um pequeno número desses grãos. Essas tensões ocorrem pela interação entre os grãos de uma mesma fase ou de fases diferentes, ou ainda entre partículas presentes no interior do material, como precipitados e inclusões, e a matriz. Assim sendo, os níveis desse tipo de tensões são mais significativos em materiais que apresentam microestruturas complexas, formadas por várias fases, ou nos que estão sujeitos a transformação de fase (OLIVEIRA, 2009).

A tensão tipo III, que são as submicrotensões, são as que estão equilibradas nos limites de uma ou mais células unitárias, e são originadas pela harmonia entre as interfaces e os campos de discordâncias.

3.4.2 Tensões Residuais na Soldagem

As tensões residuais na soldagem são formadas especificamente pelos escoamentos localizados devido aos aquecimentos e resfriamentos não uniformes, que ocorrem durante o ciclo térmico (GUROVA, *et al*, 2007).

Dessa forma, têm-se três principais tipos de tensões inerentes ao processo de soldagem, que são:

- ✓ Tensões residuais de contração no resfriamento;

- ✓ Tensões residuais devido ao resfriamento superficial intenso e
- ✓ Tensões residuais devido à transformação de fases.

Essas tensões residuais são normalmente e comumente perigosas e indesejáveis por sua superposição com as tensões de serviço ou cargas aplicadas. As tensões residuais compressivas geralmente possuem um efeito benéfico na vida de fadiga, propagação de trincas ou corrosão sob tensão. Enquanto que tensões residuais trativas, geralmente, reduzem a performance do material sob os mesmos efeitos, prejudicando o comportamento das estruturas (SUTERO, 2005).

3.4.3 Medição de Tensões Residuais

Como relatado anteriormente, as medições das tensões residuais são de extrema dificuldade, pois estão em peças e componentes livres de qualquer carregamento externo. As técnicas tradicionais experimentais para medição de tensões residuais, geralmente são baseadas em mudança de propriedades antes e após a realização de um carregamento, então essas tensões residuais não são percebidas.

A princípio, todas as medições eram realizadas por técnicas exclusivamente destrutivas e em muitos casos, havia a introdução de novas tensões durante o a execução do ensaio. Contudo, essas técnicas para medição estão sendo aperfeiçoadas e o conceito de incerteza da medição está cada vez mais sendo introduzido e presente (LU, 1996).

A escolha do método a ser utilizada deve ter com base em uma série de critérios que devem ser verificados, como por exemplo: o material e a geometria do componente, o tipo de tensão residual, a localização onde a medição será realizada (em campo ou em laboratório), o tipo de intervenção (método destrutivo ou não destrutivo), a precisão, o tempo, a repetitividade e o custo (CALLE, 2004).

Segundo Calle e Alves (2009) as técnicas de medição podem ser divididas em três grandes grupos, Tabela 3, tomando como base a função da natureza do mecanismo que utilizam para medir as tensões:

- ❖ Técnicas baseadas no relaxamento de tensões

- Técnicas não destrutivas e semi-destrutivas:
 - Furo passante;
 - Furo cego incremental;
 - Fotoelasticidade;
 - Holografia;
 - Deslocamento de ponto coordenado.

- Técnicas destrutivas:
 - Curvatura;
 - Rosenthal e Norton;
 - Gunnert;
 - Ueda.

- Técnicas de difração:
 - Raios-X;
 - Synchrotron;
 - Nêutrons;
 - Elétrons.

- Técnicas baseadas na sensibilidade de algumas propriedades do material à tensão:
 - Magnéticos;
 - Ultrassom;
 - Raman;
 - Termo-elástico.

Tabela 3 – Principais métodos de medição de tensões residuais

CLASSIFICAÇÃO	PRINCIPAIS MÉTODOS	OBSERVAÇÕES
Semidestrutivos	Método do furo cego	Execução de um furo, ϕ 0,8 a 3,2mm (ASM E 837)
Destrutivos	Método de remoção de camadas (Método da deflexão)	Camadas retiradas por ataque químico. Pode estar aliada ao método de Difração de Raios X (método não destrutivo)
	método do seccionamento	Cortes parciais longitudinais ou transversais ao eixo de peças axisimétricas. Ex. cilindros
Não destrutivos	Difração de raios X	Variação das distâncias entre os planos atômicos. (SAE J784a)

CLASSIFICAÇÃO	PRINCIPAIS MÉTODOS	OBSERVAÇÕES
Não destrutivos	Difração de nêutrons	Semelhante ao método de Raios X, no entanto, como inspeção em todo o volume
	Difração de nêutrons	Semelhante ao método de Raios X, no entanto, como inspeção em todo o volume
	Método ultrassônico	Variação da velocidade de ondas ultrassônica no interior do material
	Método magnético	Relação entre propriedades magnética, permeabilidade, indução e efeito Barkhausen

Fonte: Suter (2005)

Dentre os métodos de medição das tensões residuais, alguns se destacam para determinados materiais aplicados na indústria, devido principalmente às características e propriedades dos mesmos, como pode-se citar, o tamanho do grão e suas propriedades magnéticas, que tem grande influência na escolha da técnica de medição (SUTERO, 2005).

A tabela 4 mostra algumas aplicabilidades de métodos utilizados em determinados materiais, tendo como referência principal, suas características.

Nela, o destaque está sendo feito para o aço inoxidável.

Tabela 4 – Aplicabilidade de cada técnica de medição de tensões residuais para materiais frequentemente encontrados na indústria.

Descrição	Métodos						
	furo cego	deflexão	Seccionamento	raios X	difração de nêutrons	ultra-som	magnético
Aços-carbono	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Aços de baixa-liga	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Aços inox	Sim	Sim	Sim	Sim, grãos não muito grandes	Sim	Baixa sensibilidade	Difícil
Ligas de Alumínio	Sim	Sim	Sim	Sim, problemas de tamanho dos	Sim	Sim	Não

Fonte: Suter (2005)

Como falado anteriormente, a técnica a ser escolhida e utilizada, deve estar de acordo com a sensibilidade em relação as propriedades dos materiais, para que

haja uma maior confiabilidade na medição. Alguns desses parâmetros são: a natureza do material, o tipo de tensão residual, a geometria da peça, onde será realizada a medição, o tipo de intervenção, a incerteza e o custo da medição.

Dentre os principais métodos de medição, temos o método do furo cego, que é considerado de baixo custo, e de alta confiabilidade, principalmente quando comparado a métodos destrutivos.

3.4.4 Método do Furo Cego

Este método consiste na usinagem de uma furação (não passante) com diâmetro entre 0,8 e 3,2mm, onde serão monitoradas e analisadas possíveis deformações nas regiões vizinhas à furação (MACHERAUCH e KLOSS, 1986).

É o método mais comumente utilizado para a medição de tensões residuais. Partindo do princípio que a superfície livre de um furo é livre de tensões normais e radiais e tensões de cisalhamento, é colocado um extensômetro próximo ao furo usinado, que fará a medição da deformação causada pelo alívio de tensões devido à usinagem (GUIMARÃES, 2010).

3.4.5 Método DPC

A técnica de medição usando o método de Deslocamento de Pontos Coordenados (DPC) desenvolvido pelo grupo de Desenvolvimento de Novos Materiais Metálicos da UFPE tem como grande vantagem, em relação às demais metodologias, sua sensibilidade aos efeitos de anisotropia da chapa do painel e sua capacidade na medição de tensões residuais a baixo custo (GONÇALVES, 2015).

A técnica de deslocamento de pontos coordenados é utilizada em substituição ao método do furo cego, onde o este parte do princípio do deslocamento de pontos após a usinagem de um furo passante em uma chapa (fina) para aliviar as tensões residuais. Através de um extensômetro deslocamentos os deslocamentos são medidos para o posterior cálculo das tensões. Devido às restrições apresentadas pelo método de furo cego, e tratando-se de chapas espessas e soldadas em múltiplos passes pode-se utilizar o método de medição por coordenadas, que é bem mais operacional e econômico. Pois se trata de um método

no qual as tensões no estado plano são medidas através de deslocamento de pontos pela deformação (SIQUEIRA FILHO, *et al.*, 2013).

Esse método consiste na usinagem de furações não passantes sobre a zona termicamente afetada (ZTA), paralelamente ao cordão de solda, como pode-se verificar na Figura 24. As furações depois de usinadas são referenciadas em uma máquina de medição por coordenadas e após a medição, é realizado o tratamento térmico para alívio de tensão em temperaturas próximas à temperatura de recristalização. Depois do tratamento térmico os corpos de prova (CP) são novamente referenciados na mesa de coordenadas.

Conhecendo-se a extensão dos deslocamentos produzidos pelo tratamento, as tensões residuais podem ser calculadas através das Eq. 3.3 e da Eq. 3.4, considerando a condição de estado plano de tensões (OKUMURA e TANIGUSGI (2002)):

$$\sigma_x = -\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \quad (3.3)$$

$$\sigma_y = -\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_x, \varepsilon_y = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.5)$$

Onde:

$\sigma_y \rightarrow$ Tensão residual longitudinal - direção da solda [Pa];

$\sigma_x \rightarrow$ Tensão residual transversal - direção normal à linha da solda [Pa];

$E \rightarrow$ Módulo de elasticidade [Pa];

$\varepsilon_y \rightarrow$ Deformação na direção da solda;

$\varepsilon_x \rightarrow$ Deformação na normal a linha da solda;

$\nu \rightarrow$ Coeficiente de Poisson.

$\Delta L \rightarrow$ Variação das coordenadas antes e depois do TTAT sentido longitudinal ou transversal..

$L \rightarrow$ Comprimento total da amostra.

3.5 MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

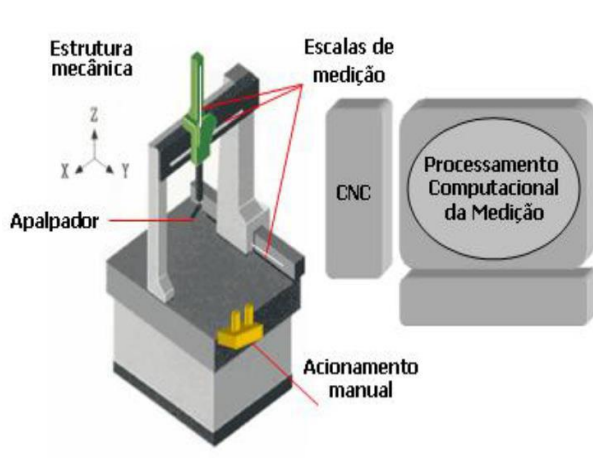
A necessidade de uma maior confiabilidade faz com que os métodos convencionais de medições sejam menos utilizados, pois é preciso estar dentro dos padrões de tolerância especificados para determinadas aplicações, onde se podem ter superfícies complexas, e desta forma, há limitações. Desta forma, surgem as máquinas de medir por coordenadas como sendo uma solução para esse problema.

A máquina de medição por coordenadas, Figura 13, apresenta como características, flexibilidade, alta velocidade de medição, baixo nível de incertezas e alta aplicabilidade. A mesma foi desenvolvida para melhorar os métodos convencionais de medição, apresentando uma medição confiável, dentro dos padrões de tolerância especificados. O principal objetivo dessa máquina é determinar parâmetros dimensionais através da medição das coordenadas (x_i , y_i , z_i) de pontos sobre a superfície de uma peça e processar estes parâmetros matematicamente (ROLIM,2003).

Segundo LUCENA, 2009, Uma MMC pode ser dividida basicamente em cinco componentes:

- Estrutura mecânica;
- Sistema de deslocamento;
- Apalpador com cabeçote;
- Controle CNC;
- Software de medição.

Figura 13 – Composição básica de uma máquina de medição por coordenadas



Fonte: Rolim, (2003)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Metal de Base (MB)

Neste trabalho foi utilizado como material de base, o aço inoxidável ASTM A - 240 TP 316L, que é um aço de grande utilização em diversas áreas da indústria metal mecânica, como as indústrias alimentícia, petroquímica, química, açúcar e etanol, entre outras atividades de ramos distintos. O aço inoxidável 316L, que é um aço austenítico, tem como sua composição química, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Composição química do aço inoxidável 316L.

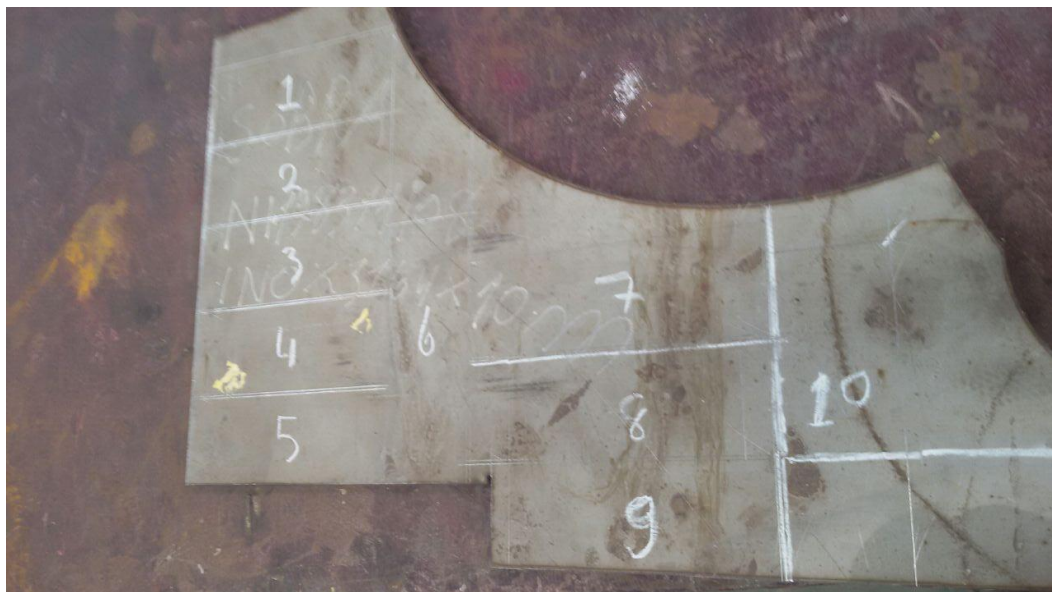
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	B	Cu	N2
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	PPM
AISI 316L	0,022	1,31	0,5	0,035	0,003	16,6	10,06	2,027	0,0031	0,0016	0,05	289

Fonte: Certificado de qualidade Acelor Mittal, 2017

Para a realização da pesquisa, foi comprado um retalho de chapa de aço inoxidável ASTM A240-TP316L com espessura 10 mm. No retalho, manualmente, foram traçadas dez peças com dimensões 210 mm x 75 mm e logo após a traçagem, as mesmas foram cortadas através de esmerilhadeira angular. Assim que as peças foram cortadas, houve a etapa de traçagem do bisel, onde o mesmo ficou com 2 mm de altura de raiz, e 30°. Após esta etapa, os mesmos seguiram para a soldagem, onde as dez peças foram transformadas em cinco CPs.

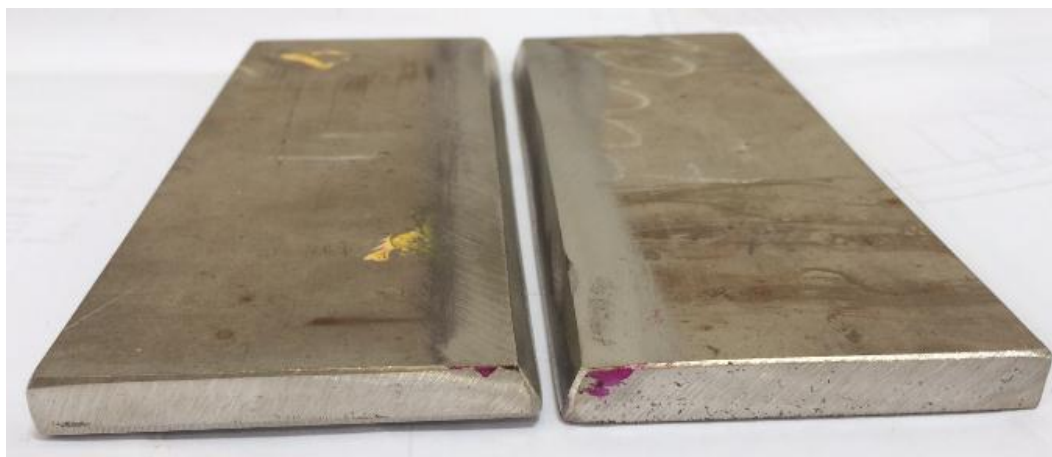
A Figura 14 mostra a chapa com a traçagem, enumerando a quantidade de peças que foram cortadas para a fabricação dos CPs, e a Figura 15 as chapas já cortadas e chanfradas.

Figura 14 – Chapa traçada para fabricação dos CPs



Fonte: O autor

Figura 15 – Peças cortadas para a fabricação dos CPs



Fonte: O autor

4.1.2 Metal de adição

Para a realização da soldagem, foi utilizado o eletrodo revestido KST 4435 LCW – E316L-17 do fornecedor KESTRA, onde sua especificação atende as normas AWS A5.4 e ASME SFA-5.4 , tendo como suas principais características mostradas nas tabelas 6, 7 e 8.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do eletrodo E316L-17.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	Resistência à tração (N/mm ²)	Limite de escoamento 0,2% (N/mm ²)	Alongamento (%)	Resistência ao impacto (J/°C)	Tratamento térmico
	>550	>350	>35	>70	-

Fonte: KESTRA, 2017

Tabela 7 – Composição química do eletrodo E316L-17.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
	<0,03	18,3	11,8	2,5	0,7	<0,9

Fonte: KESTRA, 2107

Tabela 8 – Características de soldagem do eletrodo E316L-17.

CARACTERÍSTICAS DE SOLDAGEM	DIÂMETRO (mm)	CORRENTE (A)
	2,00	40 - 80
	2,50	60 - 80
	3,25	80 - 115
	4,00	120 - 170
	5,00	160 - 220

Fonte: KESTRA, 2017

A Figura 16 (a), (b), (c) e (d) mostra a identificação marcada no próprio eletrodo, bem como na caixa onde o mesmo é armazenado.

Figura 16 – Identificação no eletrodo, e caixa de armazenamento (a), (b), (c) e (d).



Fonte: O autor

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Equipamentos aplicados

No processo de soldagem por eletrodo revestido (SMAW), para que tenhamos uma solda eficiente e com confiabilidade, devemos utilizar os equipamentos corretos, dentro dos padrões estabelecidos.

Desta forma, mostraremos a descrição do equipamento utilizado para a realização da soldagem dos CPs, Figura 17, bem como suas principais características mostradas na tabela 9.

Figura 17 – Retificador para soldagem com eletrodos revestidos BR 425.



Fonte: BALMER, 2017

Segundo o manual de operação da BALMER, o retificador para soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido em corrente contínua, modelo 425 Profissional, proporciona uma excelente estabilidade e facilidade na abertura do arco, com ótima tensão de saída, alta potência e ciclo de trabalho, atendendo os mais exigentes requisitos de solda e robustez, são ótimos para soldagem de uma ampla linha de eletrodos revestidos de varias bitolas.

O retificador é recomendado para a soldagem de seguintes materiais:

- Aços de baixo e médio teor de carbono
- Aços de baixa liga

- Aços inoxidáveis resistentes aos ácidos e ao calor
- Revestimentos duros
- Aplicações específicas (ex: goivagem)
- Ferro fundido

Tabela 9 – Características técnicas da retificadora balmer 425.

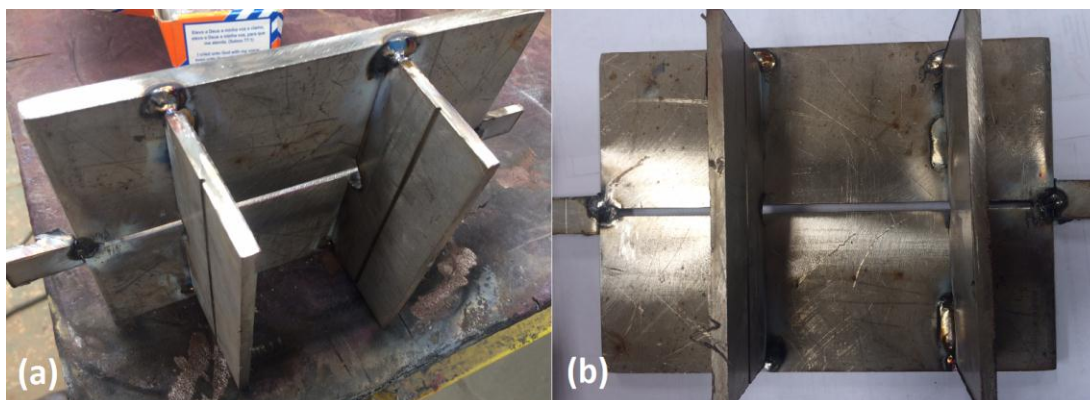
Características Técnicas	
Tensão (V)	3 x 220/380/440
Frequência (Hz)	50/60
Pôtencia Máxima Potência Nominal (kVA)	30 18,7
Corrente Máxima Corrente Nominal (A)	70/49/41 49/28,3/24,5
Fator de Potência (cos φ)	0,6
Tensão a Vazio Tensão de Trabalho (V)	75 22 a 37
Regulagem de Corrente (Tipo)	Núcleo Móvel
Faixa de Corrente (A)	50 a 425
Ciclo de trabalho (A@%)	425@40 270@100
Grau de Proteção (Classe)	IP 21
Classe de Isolação Térmica	B
Ventilação (Tipo)	Forçada
Norma	NBR 9378
Peso (Kg)	152
Dimensões (mm) (C x L x A)	700 x 510 x 810

Fonte: BALMER, 2017

4.2.2 Soldagem dos CPs

Nessa etapa, as peças foram montadas formando o CP a ser soldado. As mesmas foram travadas com chapas ponteadas na parte de trás do CP, conforme Figura 18 (a) e (b) , assim, minimizando deformações em decorrência da alta quantidade de calor criada durante o processo.

Figura 18 – Montagem e travamento dos CPs para a soldagem (a) e (b).

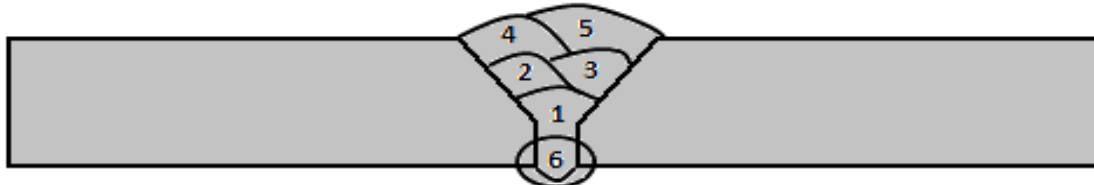


Fonte: O autor

Após a preparação e montagem dos CPs, foram realizadas as soldas por um soldador de sinete (S-01), conforme Figura 20, que é qualificado para a execução de soldas no processo por eletrodos revestidos (SMAW).

Os cordões de solda foram realizados conforme sequência esquemática de passes mostrada na Figura 19, na posição plana.

Figura 19 – Sequência de passes na soldagem dos CPs .



Fonte: O autor

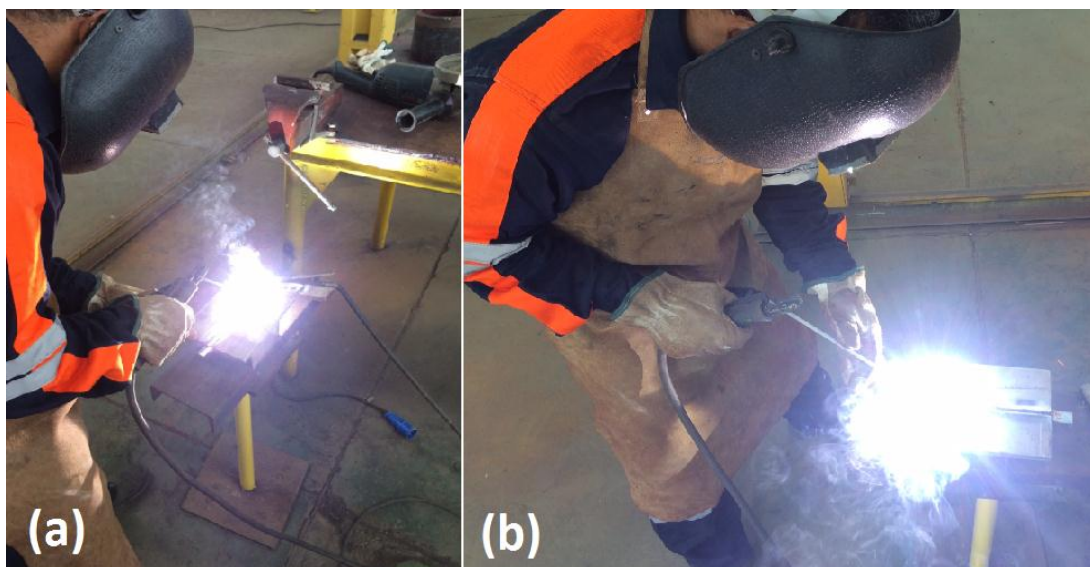
A energia de soldagem do processo SMAW utilizado para as chapas, foi calculada a partir dos parâmetros descritos na Tabela 10.

Tabela 10 – Cálculo do aporte térmico

Parâmetros:	CP 01	CP 02	CP 03	CP 04	CP 05
Tensão (V)	25	24	21	24	21
Corrente (A)	100	115	85	115	86
Velocidade (mm/s)	2,33	2,83	1,93	2,83	1,91
Aporte Térmico (J/mm)	912,017	828,975	786,14	828,975	803,717

Fonte: O autor

Figura 20 – Execução da soldagem dos CPs (a) e (b).



Fonte: O autor

Para uma maior confiabilidade da solda e dos resultados, todo o processo foi acompanhado por um inspetor de soldagem nível 2 , qualificado pelo SNQC FBTS, desde a traçagem dos corpos de prova, ao acompanhamento *in loco* da execução da soldagem, instruindo, conduzindo e monitorando o soldador e os parâmetros anteriormente pré-definidos, conforma Figura 21 (a) e (b).

Figura 21 – Monitoramento dos parâmetros de soldagem na execução (a) e (b).

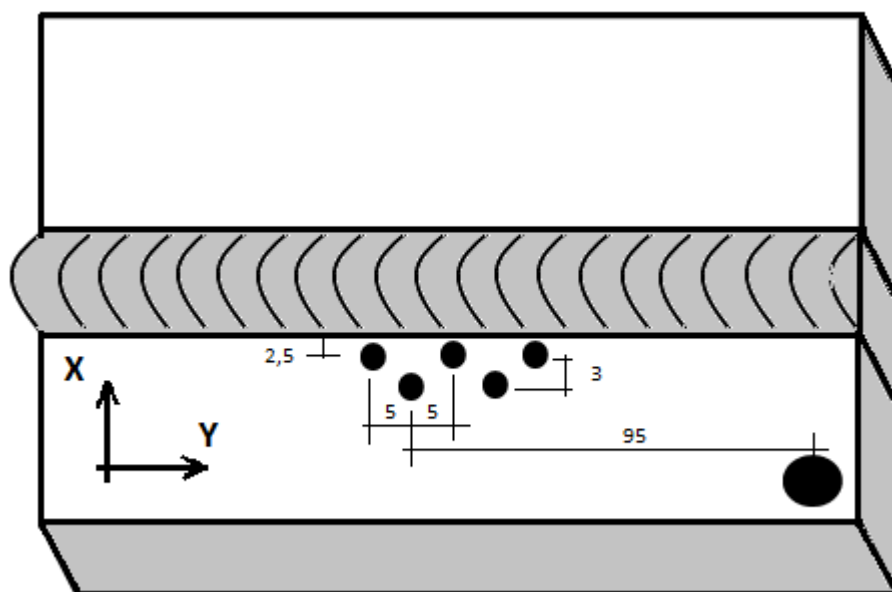


Fonte: O autor

4.2.3 Usinagem das furações para a medição por coordenadas

Para a realização das medições por coordenadas, foram realizadas furações conforme Figura 22.

Figura 22 – Esquema de usinagem das furações (em mm) no corpo de prova

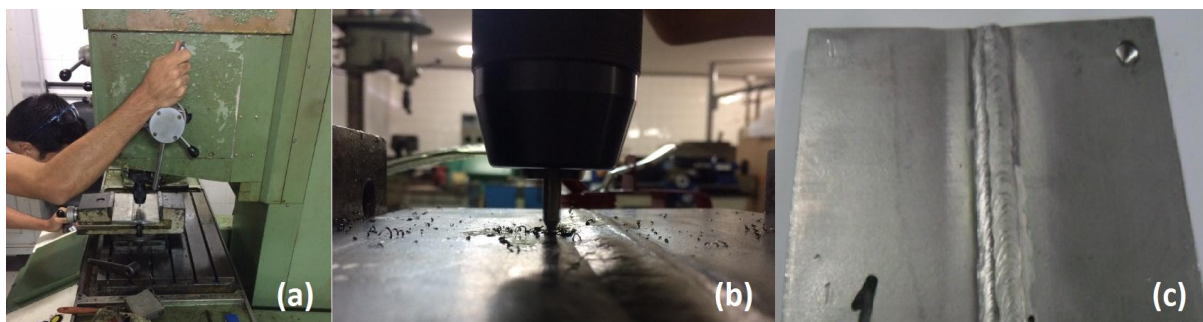


Fonte: O autor

Foram usinados cinco furos de 2,5 mm na ZTA, e um furo de 10 mm, que serviu como ponto referencial para as medições. Em todas as furações, a profundidade é de 2 mm.

O serviço de usinagem foi realizado na UFPE por um técnico do laboratório, utilizando uma furadeira de bancada, Figura 23 (a), (b) e (c).

Figura 23 – Usinagem das furações no corpo de prova (a), (b) e (c).

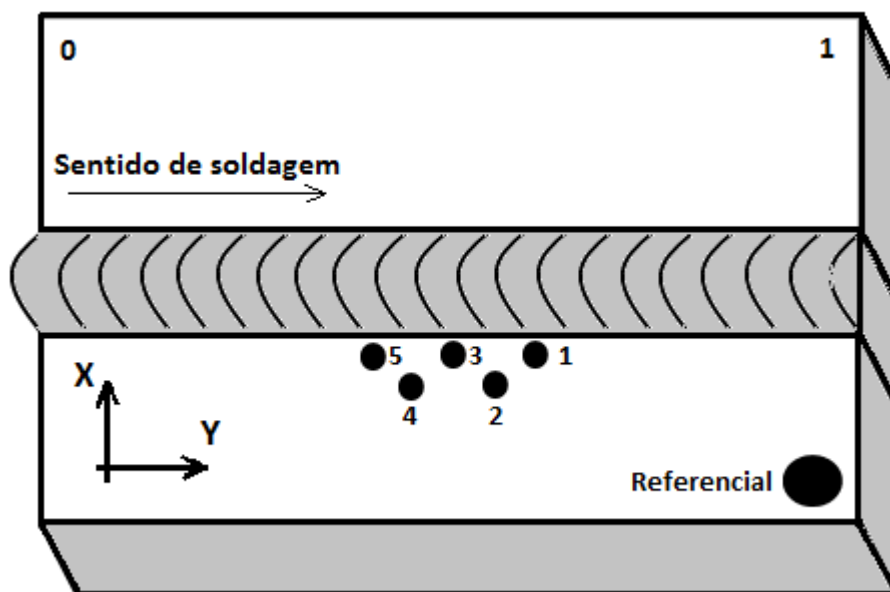


Fonte: O autor

A sequência do mapeamento das furações é de extrema importância, uma vez que se não for seguida, não há como haver a comparação das distâncias antes e depois do tratamento térmico.

A sequência é ilustrada na Figura 24.

Figura 24 – Sequência do mapeamento realizado pela máquina de medições por coordenada e sentido de soldagem.



Fonte: O autor

O procedimento de mapeamento, é realizado seguindo as coordenadas (X , Y) do centro de cada furo, tendo como o ponto de referencia a furação de 10 mm e é realizada por uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) com controle numérico computadorizado, modelo CRYSTA 574 (curso de medição de 700 mm e resolução de 0,0005 mm), fabricação MITUTOYO, ano 2004, com certificado de calibração 01778/11, do Laboratório de Medição por Coordenadas da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (GONÇALVES, 2015), conforme ilustra a Figura 25.

Figura 25 – Máquina de Medição por Coordenadas, modelo CRYSTA 574.



Fonte: GONÇALVES (2015)

4.2.4 Tratamento térmico de alívio de tensões

Para a realização do tratamento térmico de alívio de tensões, a primeira etapa é a de definição da temperatura máxima que os CPs deveriam atingir durante o tratamento, de forma que a recristalização do material não fosse atingida. Foram tiradas duas amostras do material de base, sendo uma introduzida em um forno Mufla equipado com termopares Cromel-Alumel, para tratamento à 780°C durante 60 minutos, seguida por resfriamento ao ar até a temperatura ambiente (Figura 26), a outra amostra não foi tratada termicamente para servir de referência. Após o tratamento, foi verificado através de microscopia óptica, que na amostra tratada não houve modificação de sua microestrutura (recristalização).

Desta forma, a temperatura para o tratamento de alívio de tensões, foi definida em 780°C, o tempo de tratamento sendo de 60 minutos a partir do equilíbrio da temperatura a ser tratada, e o resfriamento ao ar (temperatura ambiente).

Figura 26 – Amostra para definição da temperatura de tratamento.

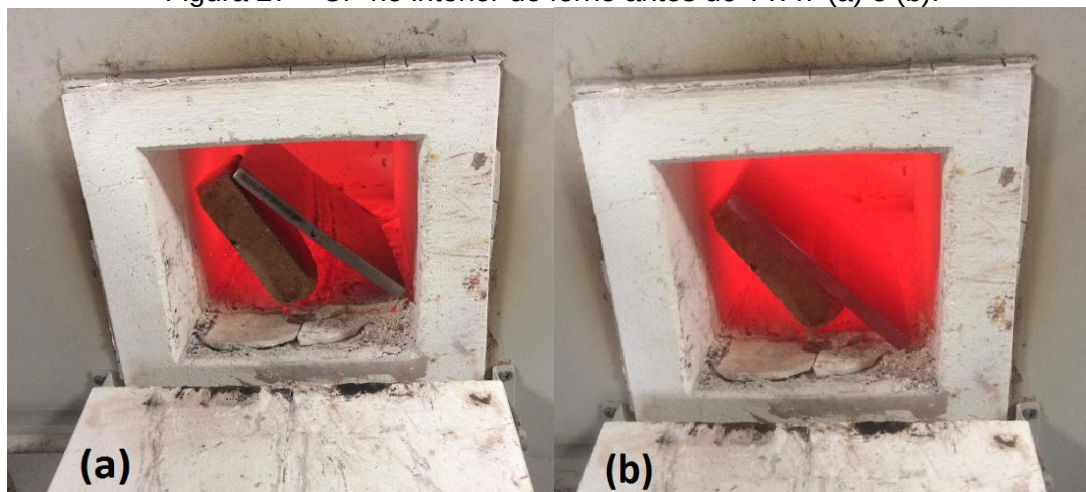


Fonte: O autor

Os CPs foram tratados termicamente conforme temperatura, tempo e resfriamento previamente definidos.

Nas Figura 27 (a) e (b) vemos a peça após o acondicionamento no forno, após o tratamento térmico, ainda no interior do forno, e a Figura 28 após o tratamento no exterior do forno.

Figura 27 – CP no interior do forno antes do TTAT (a) e (b).



Fonte: O autor

Figura 28 – CP após o TTAT resfriando ao ar.



Fonte: O autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com as medições das distâncias médias de x e y realizadas após a soldagem, antes e depois do TTAT, conforme Tabelas 11 e 12, foram calculadas as tensões residuais longitudinais e as totais geradas pela soldagem com o eletrodo revestido.

Tabela 11 – Coordenadas dos furos antes do TTAT

Chapa	Furo 1 Direção		Furo 2 Direção		Furo 3 Direção		Furo 4 Direção		Furo 5 Direção	
	X	Y	x	y	x	y	x	Y	x	y
1	47,00775	85,07715	48,76825	91,0167	46,8659	96,39525	48,6356	100,56115	46,7582	105,4532
2	46,82175	83,079	49,48965	87,6098	46,78575	93,5437	50,2102	98,85935	47,5618	102,8011
3	47,6669	83,9641	49,26065	89,49575	47,1967	94,40395	49,13725	99,3402	47,01705	104,44415
4	48,54515	83,3223	50,10545	89,087	48,63435	94,38295	50,05235	99,20165	47,90625	103,76315
5	45,9298	84,92125	47,9072	90,29215	45,77225	95,1171	47,6861	99,98615	45,5432	105,08845

Fonte: O autor

Tabela 12 – Coordenadas dos furos após TTAT

Chapa	Furo 1 Direção		Furo 2 Direção		Furo 3 Direção		Furo 4 Direção		Furo 5 Direção	
	X	Y	x	y	x	y	x	Y	x	y
1	46,82715	85,17485	48,60355	91,0986	46,66055	96,4871	48,46235	100,66485	46,528	105,58075
2	46,6133	83,20285	49,2648	87,73775	46,5356	93,66955	49,9393	99,0103	47,2935	102,931
3	47,69845	83,96715	49,2746	89,4958	47,2223	94,41175	49,18305	99,35375	47,0541	104,4401
4	48,80785	83,1051	50,3708	88,8718	48,91335	94,19175	50,38685	99,0069	48,2608	103,55395
5	45,8481	84,96315	47,8194	90,32795	45,69185	95,1553	47,5963	100,02475	45,4344	105,1314

Fonte: O autor

Todos os cinco corpos de prova foram soldados pelo processo de eletrodo revestido, sendo executados seis passes: O primeiro passe a raiz, segundo e terceiro enchimento, quarto e quinto acabamento, e o sexto uma contra solda. Todos os passes foram realizados num mesmo sentido de soldagem.

Para o estudo das tensões residuais longitudinais, foram realizadas furações na ZTA, cujas coordenadas foram aferidas antes e depois do TTAT, tendo como resultado as medições das Tabelas 13, 14, 15, 16 e 17.

Tabela 13 – Coordenadas dos furos antes e após TTAT

Corpo de prova 1										
FURO	X1	Y1	X2	Y2	ϵ_x	ϵ_y	E/1-v2	σ_y	σ_x	σ Total
1	47,0078	85,0772	46,8272	85,1749	-0,001196	0,000465	212087,91	220,53	-25,272	221,974
2	48,7683	91,0167	48,6036	91,0986	-0,001091	0,00039	212087,91	193,875	-28,78	195,999
3	46,8659	96,3953	46,6606	96,4871	-0,00136	0,000437	212087,91	245,145	-26,138	246,535
4	48,6356	100,5612	48,4624	100,6649	-0,001147	0,000494	212087,91	250,366	17,927	251,007
5	46,7582	105,4532	46,528	105,5808	-0,001525	0,000607	212087,91	332,464	32,764	334,075

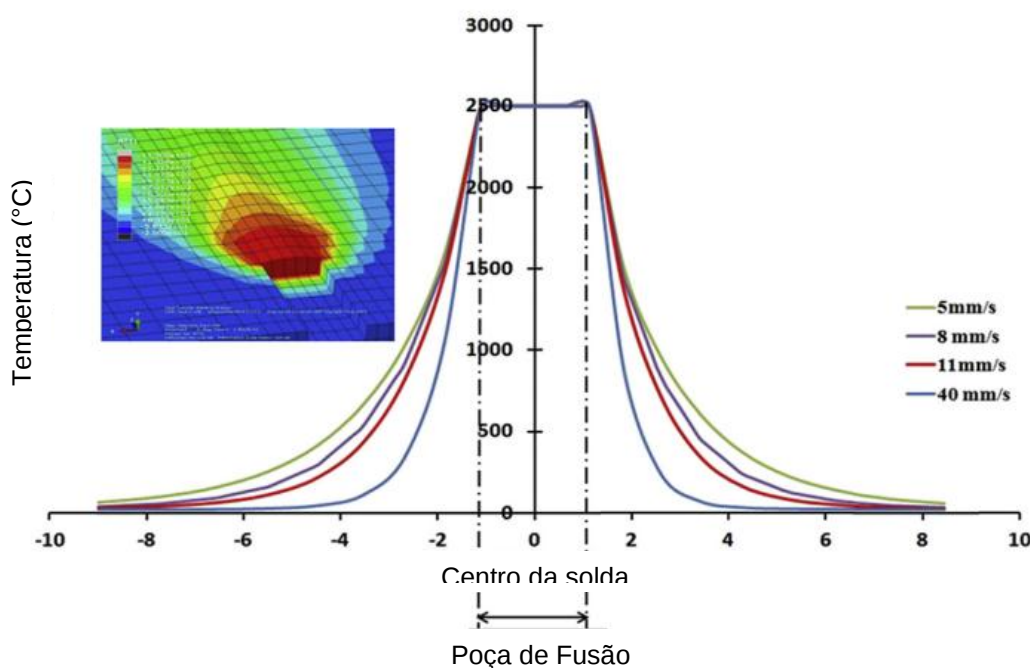
Utilizado o módulo de elasticidade de 193 GPa e o coeficiente de Poisson de 0,30 conforme Ficha técnica de aço inoxidável Irestal Group

Fonte: O autor

Nesta tabela tem-se as tensões longitudinais inclusas no campo trativo enquanto as tensões transversais flutuam próximo ao zero, considerando que as mesmas possuem valores inferiores a 35Mpa.

Conforme pode ser visto na figura 29 há uma alteração nas repartições térmicas devido à redução do aporte térmico, essa variação acarreta uma mudança nas zonas de distribuição das tensões residuais, e por consequência torna a posição dos furos mais crítica à medida que as curvas se estreitam (ELMESALAMY, *et al.*, 2016).

Figura 29 – Perfis de temperatura em diferentes velocidades de soldagem.



Fonte: Adaptado de Elmesalamy, *et al.*, 2016

Tabela 14 – Coordenadas dos furos antes e após TTAT

Corpo de prova 2										
FURO	X1	Y1	X2	Y2	ϵ_x	ϵ_y	E/1- ν_2	σ_y	σ_x	σ Total
1	46,8218	83,079	46,6133	83,2029	-0,001381	0,000589	212087,91	268,089	-21,633	268,96
2	49,4897	87,6098	49,2648	87,7378	-0,001489	0,000609	212087,91	279,06	-32,052	280,895
3	46,7858	93,5437	46,5356	93,6696	-0,001657	0,000599	212087,91	314,792	-19,686	315,407
4	50,2102	98,8594	49,9393	99,0103	-0,001794	0,000718	212087,91	360,876	-4,659	360,906
5	47,5618	102,8011	47,2935	102,931	-0,001777	0,000618	212087,91	348,457	-3,262	348,473

Utilizado o módulo de elasticidade de 193 GPa e o coeficiente de Poisson de 0,30 conforme Ficha técnica de aço inoxidável Irestal Group

Fonte: O autor

Na tabela 14 tem-se um comportamento similar, mas o aumento no aporte da amostra 02 levou todas as tensões transversais para o campo compressivo mantendo as tensões longitudinais próximas ao zero.

Tabela 15 – Coordenadas dos furos antes e após TTAT

Corpo de prova 4										
FURO	X1	Y1	X2	Y2	ϵ_x	ϵ_y	E/1- ν_2	σ_y	σ_x	σ Total
1	48,5452	83,3223	48,8079	83,1051	0,001739	-0,001033	212087,91	-307,544	102,693	324,236
2	50,1055	89,0870	50,3708	88,8718	0,001757	-0,001024	212087,91	-327,613	78,504	336,888
3	48,6344	94,3830	48,9134	94,1918	0,001847	-0,000910	212087,91	-332,991	74,066	341,129
4	50,0524	99,2017	50,3869	99,0069	0,002215	-0,000926	212087,91	-418,539	44,750	420,924
5	47,9063	103,7632	48,2608	103,5540	0,002348	-0,000995	212087,91	-442,071	50,692	444,968

Utilizado o módulo de elasticidade de 193 GPa e o coeficiente de Poisson de 0,30 conforme Ficha técnica de aço inoxidável Irestal Group

Fonte: O autor

A tabela 15 mostra inversão no comportamento das tensões longitudinais inclusas no campo compressivo e transversais no campo trativo, mostrando um efeito similar associado ao aumento da corrente quando comparadas as amostras 02 e 04 com a 01, ou seja, a variação deste parâmetro provoca uma divisão entre as tensões longitudinais e transversais, colocando cada uma em um capo distinto.

Tabela 16 – Coordenadas dos furos antes e após TTAT

Corpo de prova 3										
FURO	X1	Y1	X2	Y2	ϵ_x	ϵ_y	E/1- ν_2	Σ_y	σ_x	σ Total
1	47,6669	83,9641	47,7211	83,9672	0,000359	0,000015	212087,91	-70,958	-18,626	73,361
2	49,2607	89,4958	49,2946	89,4958	0,000225	0,000000	212087,91	-52,196	-15,751	54,521
3	47,1967	94,4040	47,2523	94,4118	0,000368	0,000037	212087,91	-65,406	-12,036	66,505
4	49,1373	99,3402	49,1931	99,3538	0,000370	0,000064	212087,91	-56,421	-3,673	56,540
5	47,0171	104,4442	47,0741	104,4401	0,000378	-0,000019	212087,91	-86,456	-30,165	91,567

Utilizado o módulo de elasticidade de 193 GPa e o coeficiente de Poisson de 0,30 conforme Ficha técnica de aço inoxidável Irestal Group

Fonte: O autor

A tabela 16 mostra que a redução no aporte térmico da amostra 03 provoca um efeito oposto ao observado nas tabelas 14 e 15. Ou seja, a redução no aporte térmico, conforme visto na figura 31, torna crítico o posicionamento dos furos, os qual nesta amostra não manteve um correto alinhamento, justificando assim as leves alterações apresentadas.

Tabela 17 – Coordenadas dos furos antes e após TTAT

Corpo de prova 5										
FURO	X1	Y1	X2	Y2	ϵ_x	ϵ_y	E/1-v2	σ_y	σ_x	σ Total
1	45,9298	84,9213	45,8481	84,9632	-0,000541	0,000199	212087,91	97,702	-13,586	98,642
2	47,9072	90,2922	47,8194	90,3280	-0,000581	0,000170	212087,91	92,359	-25,965	95,939
3	45,7723	95,1171	45,6919	95,1553	-0,000533	0,000182	212087,91	100,499	-5,955	100,675
4	47,6861	99,9862	47,5963	100,0248	-0,000595	0,000184	212087,91	106,780	-11,910	107,442
5	45,5432	105,0885	45,4344	105,1314	-0,000721	0,000204	212087,91	132,421	-8,432	132,689

Utilizado o módulo de elasticidade de 193 GPa e o coeficiente de Poisson de 0,30 conforme Ficha técnica de aço inoxidável Irestal Group

Fonte: O autor

A tabela 17 correspondente ao corpo de prova 05, com redução do aporte térmico em relação a amostra 01, manteve todas as tensões longitudinais no campo trativo e as transversais próximas ao zero com uma leve tendência a compressão.

Para as tensões inferiores a 35 MPa é possível considerar o valor próximo ao zero pois segundo (GONÇALVES, 2015) a medida das tensões residuais no método de DRX possui variação de mais o menos 80 MPa, o que torna razoável a hipótese tomada.

A tabela 18 apresenta as deformações dos pontos nos eixos Y e X, permitindo verificar valores maiores no eixo Y em relação ao X.

Tabela 18 – Deformação dos pontos referenciados nos eixos X e Y

FURAÇÃO										
1		2		3		4		5		
CP	ϵ_y	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_x
1	-0,001196	0,0004652	-0,0010907	0,00039	-0,0013599	0,00043738	-0,0011474	0,0004938	-0,0015245	0,0006074
2	-0,0013808	0,0005892	-0,0014894	0,0006089	-0,001657	0,00059895	-0,001794	0,0007181	-0,0017768	0,000618
3	0,0003589	0,000015	0,0002245	0,000000	0,0003682	0,000037	0,0003695	0,000064	0,0003778	-0,000019
4	0,0017394	-0,0010333	0,001757	-0,0010238	0,0018474	-0,00090961	0,0022152	-0,0009265	0,002348	-0,000995
5	-0,0005411	0,0001991	-0,0005815	0,0001703	-0,0005328	0,00018173	-0,0005947	0,0001836	-0,0007205	0,0002043

Fonte: O autor

A tabela 19 apresenta um comparativo entre as tensões residuais nos eixos X e Y, através do qual nota-se valores elevados para os CPs 02 e 04, cuja corrente e

tensão de soldagem foram mais elevadas, com médias de 115A e 24V. Já os CPs 03 e 05 com tensões inferiores e valores médios de 85/86A para a corrente e 21V para a tensão de soldagem.

Já o CP 01 foi soldado com os parâmetros adequados e reais tendo uma corrente de 100A e tensão de 25V gerando um maior aporte térmico em relação aos outros CPs.

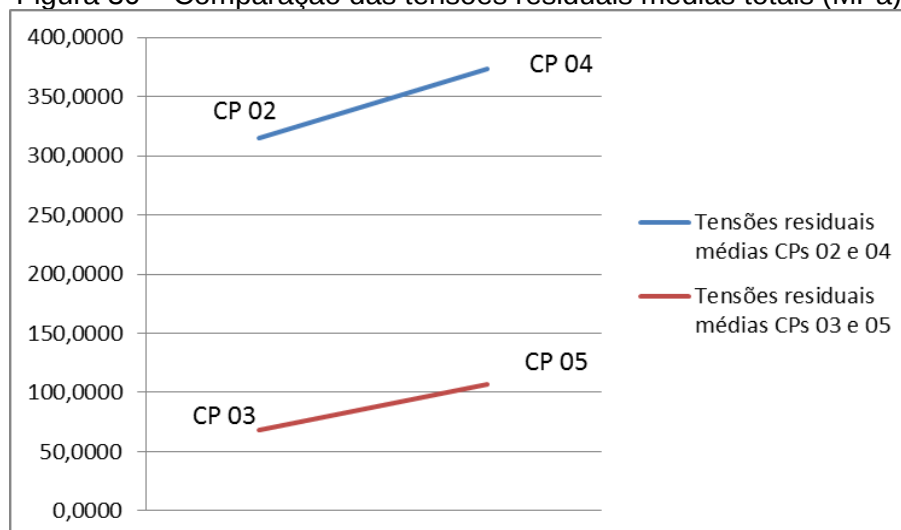
Tabela 19 – Comparações das tensões residuais [Mpa] nos eixos X e Y

FURAÇÃO										
	1		2		3		4		5	
CP	σ_y	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y	σ_x
1	220,53	-25,272	193,875	-28,78	245,145	-26,138	250,366	17,927	332,464	32,764
2	268,089	-21,633	279,06	-32,052	314,792	-19,686	360,876	-4,659	348,457	-3,262
3	-70,958	-18,626	-52,196	-15,751	-65,406	-12,036	-56,421	-3,673	-86,456	-30,165
4	-307,544	102,693	-327,613	78,504	-332,991	74,066	-418,539	44,75	-442,071	50,692
5	97,702	-13,586	92,359	-25,965	100,499	-5,955	106,78	-11,91	132,421	-8,432

Fonte: O autor

A Figura 30 apresenta tensões residuais médias de 314 e 374 MPa nos CPs 02 e 04, e de 68 e 107 Mpa nos CPs 03 e 05 variando devido à utilização de parâmetros de soldagem.

Figura 30 – Comparação das tensões residuais médias totais (MPa).



Fonte: O autor

Quando comparados os CPs 02 e 04, nos quais se utilizou os mesmos parâmetros de soldagem, era esperado valores similares de tensões para furos contidos na mesma linha, porém este fato não foi verificado devido ao

desalinhamento dos mesmos, o que pode modificar a zona de tensão a qual o furo está submetido, conforme o ilustrado na figura 30. Comparando-se os CPs 03 e 05 tem-se um aporte térmico 2,11% menor, justificando a leve alteração das medições entre si.

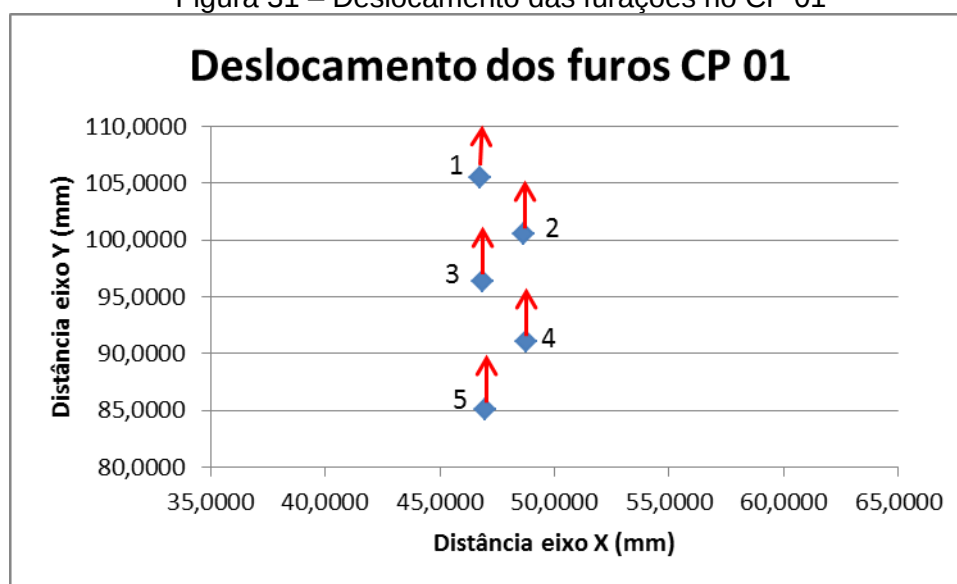
Como abordado anteriormente, as tensões residuais geradas durante a soldagem por eletrodo revestido formam regiões com tensões trativas e compressivas.

Observou-se em todos os corpos de prova, um maior valor de tensão residual no furo 5 devido ao sentido de soldagem se manter constante para todos os passes na mesma amostra.

Em uma união irrestrita, normalmente, são geradas tensões de tração longitudinais em torno da linha de solda e de compressão em áreas adjacentes (OKUMURA e TANIGUSGI, 2002).

Na Figura 31, são mostrados os deslocamentos dos cinco furos referenciados no eixo Y do CP 01, os quais apresentaram um recuo após o TTAT, porém os quando comparados os deslocamentos das furações (1 ; 3), (3 ; 5) e (2 ; 4) torna-se perceptível um comportamento trativo das tensões caracterizado pelo deslocamento positivo dos mesmos

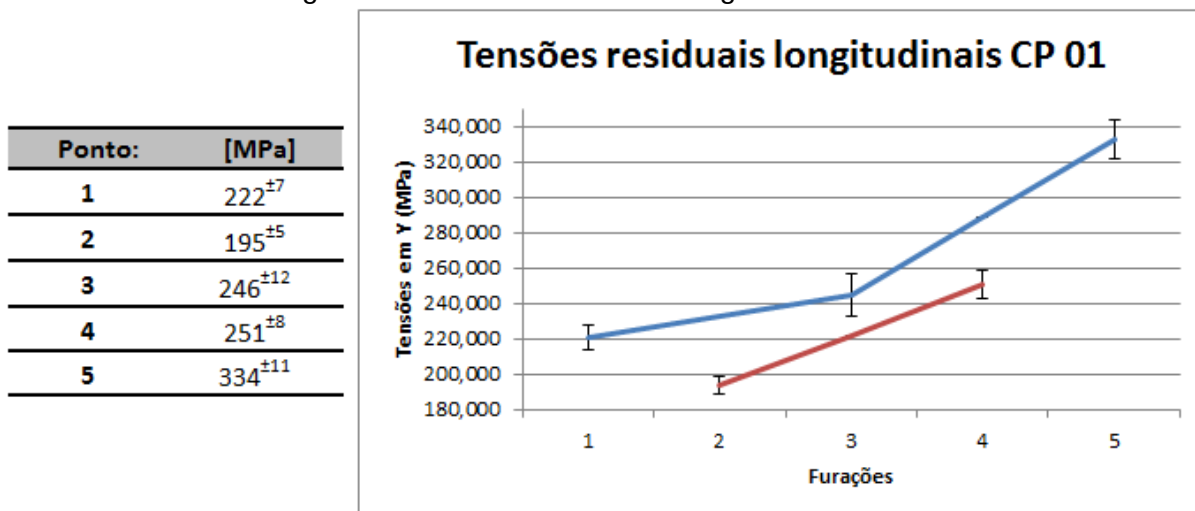
Figura 31 – Deslocamento das furações no CP 01



Fonte: O autor

As tensões residuais longitudinais aliviadas, apresentadas em módulo, na Figura 32 variam entre 195 MPa e 334 MPa na ZTA do CP 01.

Figura 32 – Tensões residuais longitudinais CP 01



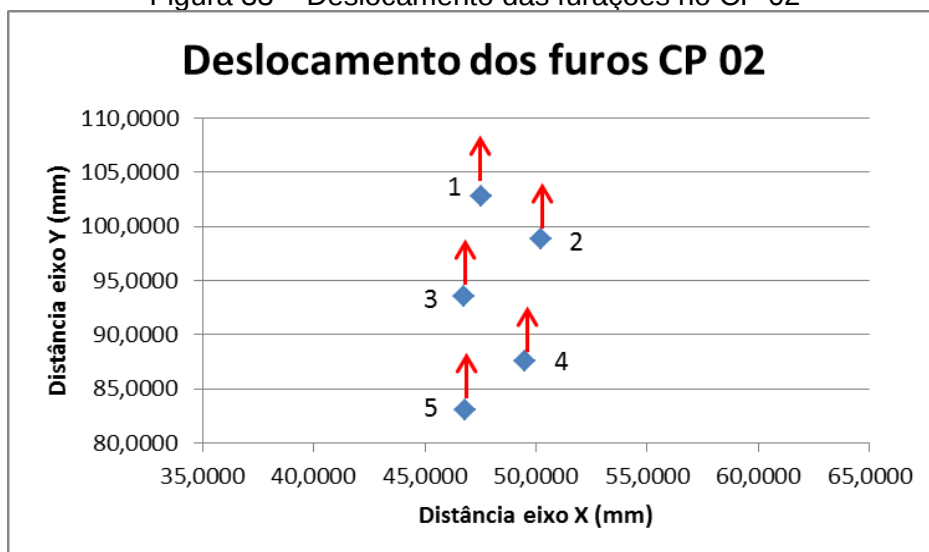
Fonte: O autor

Baseando-se no desalinhamento dos furos, e comparando os que se encontram dentro da mesma repartição térmica, pode-se analisar os furos (1 ; 3) os quais possuem uma diferença de 11% nos valores da tensão.

Na Figura 33 são mostrados os deslocamentos dos cinco furos referenciados no eixo Y do CP 02 os quais apresentaram um recuo quando comparados antes e após o TTAT, similar ao CP 01.

Nessa amostra também foi notado um comportamento trativo das tensões devido aos deslocamentos positivos entre as furações (1 ; 3), (3 ; 5) e (2 ; 4). Resultado concordante com (PRATIHAR, *et al*, 2009) e (JIANG, *et al.*, 2011).

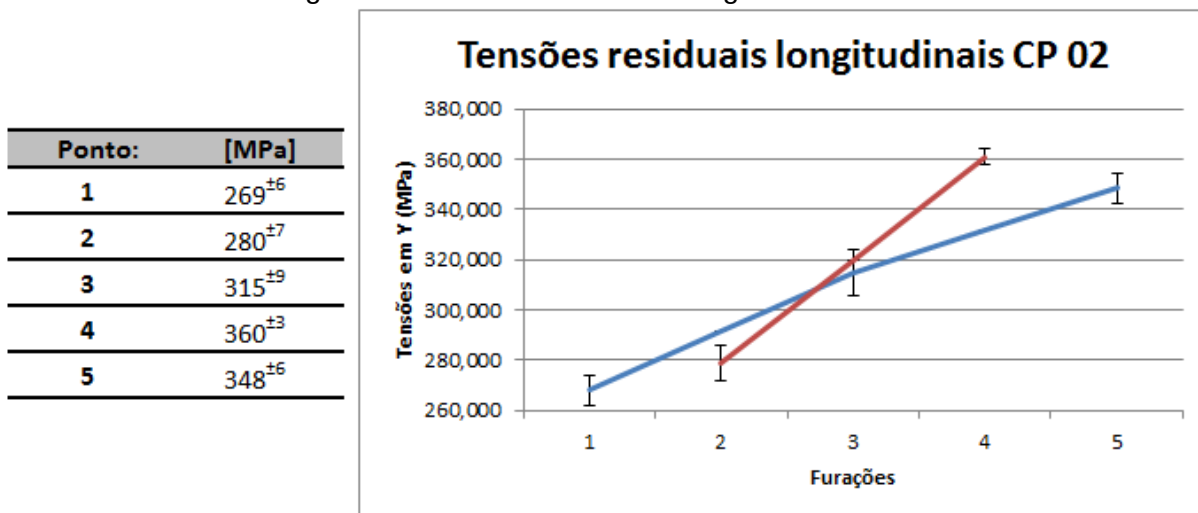
Figura 33 – Deslocamento das furações no CP 02



Fonte: O autor

As tensões residuais longitudinais aliviadas, apresentadas em módulo, na Figura 34 variam entre 268 MPa e 360 MPa na ZTA do CP 02.

Figura 34 – Tensões residuais longitudinais CP 02



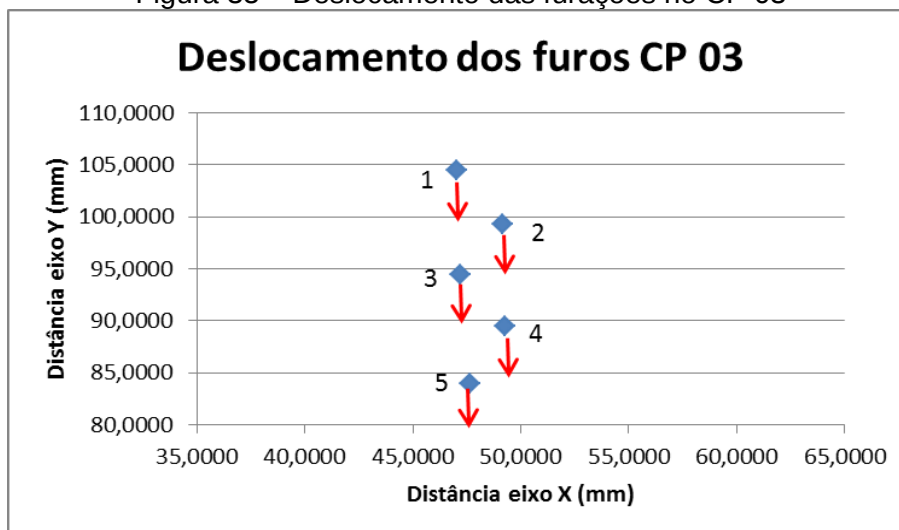
Fonte: O autor

Partindo-se da mesma análise e comparando os furos contidos na mesma repartição térmica tem-se os furos (3 ;5) com uma diferença de 10% entre os valores de tensões residuais.

No aço carbono ASTM A131 gr AH 36, os distanciamentos referentes aos furos possuem um caráter compressivo na região da zona termicamente afetada e trativo na região do cordão de solda (GONÇALVES, 2015). Para o aço Inoxidável ASTM A240 TP 316L, tem-se um comportamento diferente, pois na ZTA do CP 03 foram constatadas regiões de tensões trativas e compressivas, a partir dos deslocamentos dos pontos após o TTAT.

Na Figura 35, são mostrados os deslocamentos dos cinco furos referenciados no eixo Y do CP 03, diferente dos resultados dos CPs 01 e 02, não houve recuo dos mesmos em relação às medições realizadas antes do TTAT, e sim um maior distanciamento entre as furações. Já os deslocamentos entre as furações (1 ; 3) foram positivas, caracterizando a região como trativa, e os deslocamentos entre as furações (3 ; 5) e (2 ; 4), foram negativos, configurando essas regiões como compressivas.

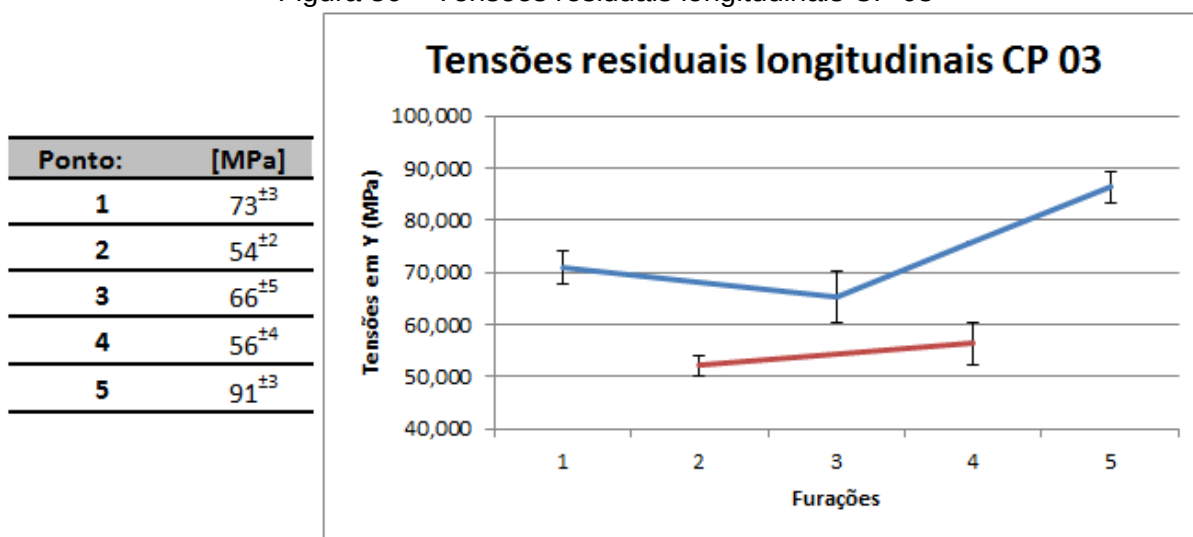
Figura 35 – Deslocamento das furações no CP 03



Fonte: O autor

As tensões residuais longitudinais aliviadas, apresentadas em módulo, na Figura 36 variam entre 52 MPa e 86 MPa na ZTA do CP 03.

Figura 36 – Tensões residuais longitudinais CP 03



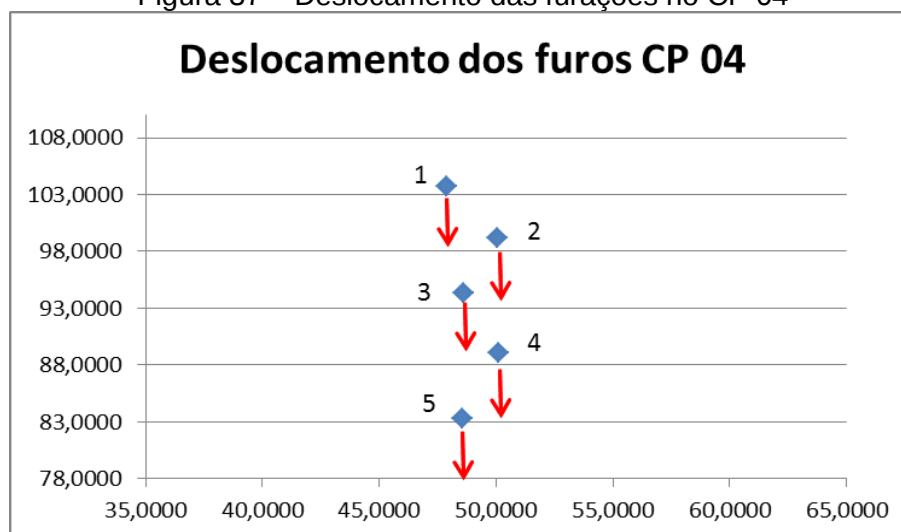
Fonte: O autor

Novamente analisando os furos contidos na mesma repartição térmica tem-se os furos (2; 4) com uma diferença de 4% nas tensões residuais.

Na Figura 37, são mostrados os deslocamentos dos cinco furos referenciados no eixo Y do CP 04, não havendo recuo das distâncias e sim um maior distanciamento das furações após o TTAT assim com ocorreu no CP 03.

Os deslocamentos entre as furações (1 ; 3), (3 ; 5) e (2 ; 4) são todos negativos, configurando nessa região o aparecimento de tensões compressivas.

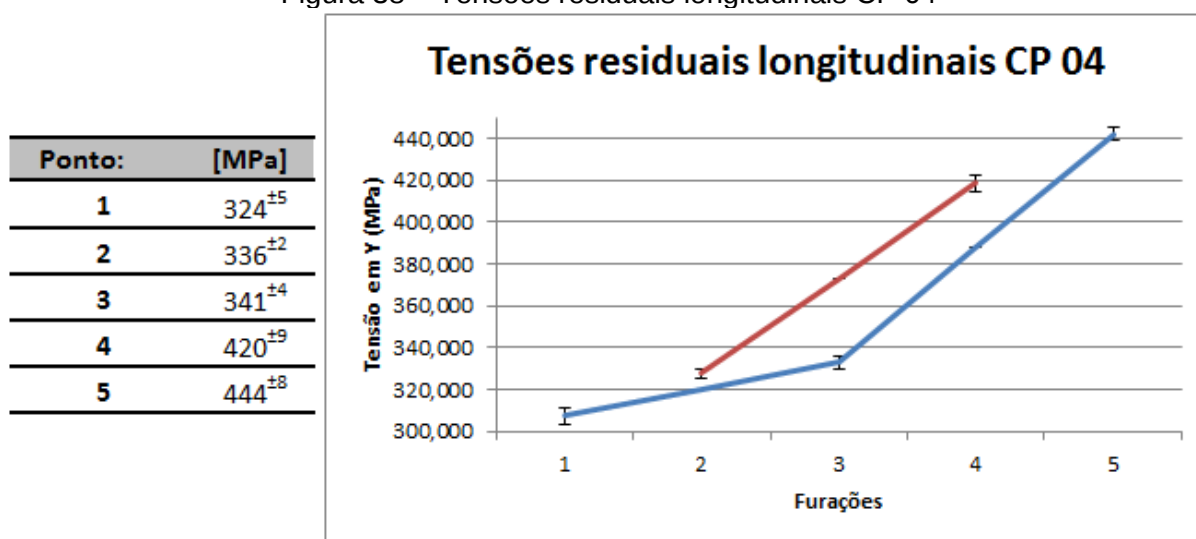
Figura 37 – Deslocamento das furações no CP 04



Fonte: O autor

As tensões residuais longitudinais aliviadas, apresentadas em módulo, na Figura 38 variam entre 307 MPa e 442 MPa na ZTA do CP 04.

Figura 38 – Tensões residuais longitudinais CP 04



Fonte: O autor

Seguindo o mesmo raciocínio os furos (1 ; 3) estão contidos dentro da mesma repartição térmica e possuem uma diferença de 5% nos valores das tensões residuais.

Com a variação do sentido de soldagem observa-se um deslocamento preferencial dos pontos coordenados centrais localizados na zona termicamente

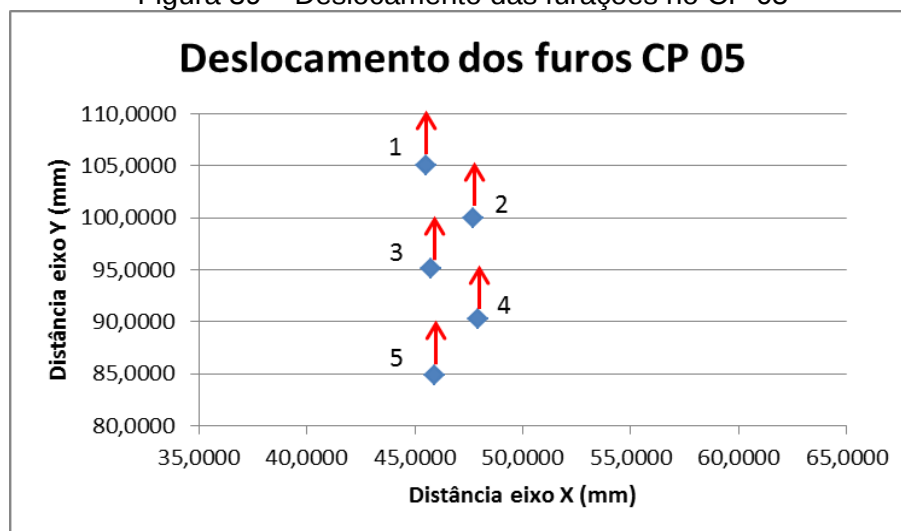
afetada deslocando-se no sentido contrário ao cordão de solda mais próximo, devido ao relaxamento promovido pelo TTAT (GONÇALVES, 2015).

Nos CPs utilizados na pesquisa todos os 6 passes foram executados seguindo um mesmo sentido, fazendo todas as furações se deslocarem em um mesmo sentido, contrário do cordão de solda, após o TTAT.

Na Figura 39, são mostrados os deslocamentos dos cinco furos referenciados no eixo Y do CP 05, observando-se de forma similar aos CPs 01 e 02, após o TTAT houve um recuo dos mesmos em relação às medições realizadas antes do TTAT.

Em relação aos deslocamentos entre as furações (1 ; 3) houve um deslocamento negativo, configurando uma região compressiva. Nas distâncias entre as furações (3 ; 5) e (2 ; 4), todos os deslocamentos foram positivos configurando nessas regiões um comportamento trativo das tensões. Resultado este similar ao obtido por (ELMESALAMY, *et. al*, 2014), o qual constatou que a redução do aporte térmico acentua este efeito.

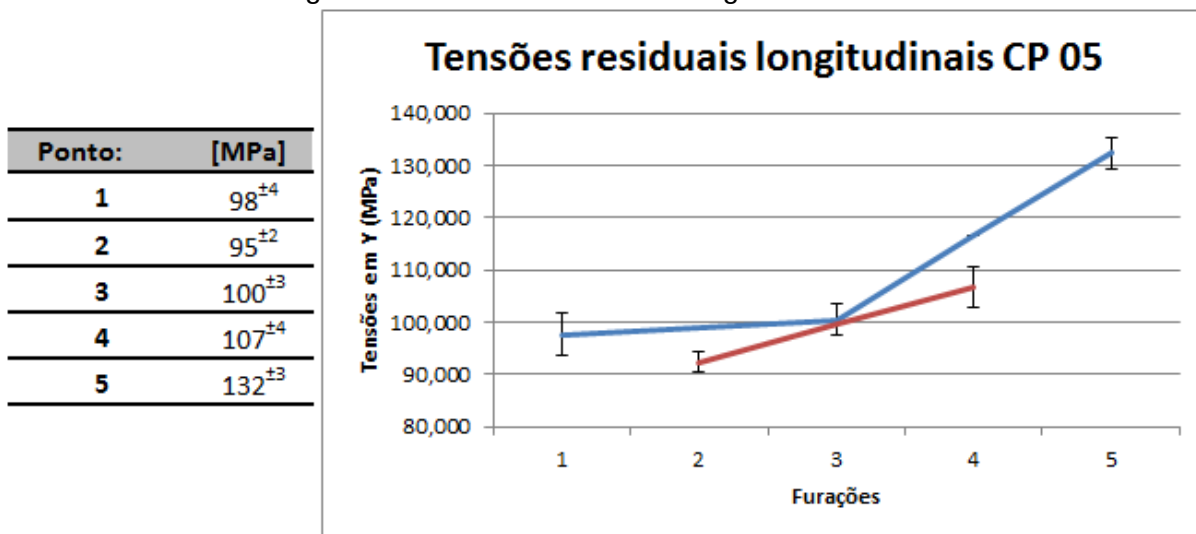
Figura 39 – Deslocamento das furações no CP 05



Fonte: O autor

As tensões residuais longitudinais aliviadas, apresentadas em módulo, na Figura 40 variam entre 92 MPa e 132 MPa na ZTA do CP 05.

Figura 40 – Tensões residuais longitudinais CP 05



Fonte: O autor

Assim cosiderando apenas os furos posicionados dentro da mesma repartição térmica, devido ao desalinhamento das furações tem-se os pares (2; 4) com 12% e (1; 3) com 2% de variação nas tensões residuais.

6 CONCLUSÕES

Assim os resultados obtidos validam este método para o material ensaiado obtendo valores de tensões residuais variando de 100 a 350 MPa, dependendo da posição do furo, para amostras soldadas com parâmetros ideais.

Outro resultado que valida o presente método foi a resposta das tensões a variação do aporte térmico mostrando-se ser proporcional ao mesmo. Assim para as amostras 02 e 04, soldadas com aporte 10% inferior a amostra base (Amostra 01).

Seguindo a mesma linha as amostras 03 e 05 soldadas com aporte 15% inferior a amostra 01 apresentou tensões residuais inferiores.

Considerando o desalinhamento dos furos em relação ao cordão de solda e analisando apenas os pares contidos dentro da mesma repartição térmica obteve-se uma variação de 10% nos valores das tensões residuais.

Outro comportamento merecedor de destaque é o fato de o furo cinco apresentar em todas as amostras valores superiores quando comparado aos demais furos. Isto ocorre devido a sua localização referente à direção de soldagem. Ou seja, o furo é o primeiro a entrar em contato com o calor oriundo da tocha, assim ele possui um maior gradiente térmico quando comparado aos demais, sendo mais afetado pela deformação plástica do material.

Foi constatada a manutenção de uma direção de soldagem tende a deslocar os pontos coordenados no mesmo sentido, por este motivo para o cálculo das deformações específicas o comprimento de referência (L_0) deve ser tomado como o comprimento total do corpo soldado.

Por fim, com relação ao método de deslocamento de pontos coordenados, a presente pesquisa complementa o trabalho desenvolvido pelo Laboratório De Termometria e Simulações Termomecânicas da UFPE, para validar o método DPC, aplicando o mesmo em outro material.

7 REFERÊNCIAS

ALEXANDROV, B. T.; LIPPOLD, J. C. **Single Sensor Differential Thermal Analysis of Phase Transformations And Structural Changes During Welding And Postweld Heat Treatment**. Welding in the World, November 2007, Volume 51

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook – Fundamentals of Welding**, vol. 1, 7a ed., 1994, 373 p.

BALMER. Retificadores de solda. < <http://www.balmer.com.br/balmer/equipamento/eletrodos-revestidos/retificadores/br-425/> > Acesso em 01 de Outubro de 2017.

BORGES, M. **Processos de União Térmica – Soldagem**. <http://mmborges.com/processos/Uniao/uniao%20termica%20-%20soldagem.htm>. Acesso em 28 de setembro de 2017.

CALLE, M.A.; ALVES, M. . **Methodology for Numerical Modelling of the Shot Peening Process using Multibody System**. In: 8th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications, 2009, Bauru. Proceedings of the 8th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications. Bauru: UNESP, 2009. v. 8.

CALLE, G. M. A. **Análise Numérico-Computacional das Tensões Residuais Induzidas pelo Jateamento com Granalha**, p. 96, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. (Dissertação)

CARBÓ, H. M. **Aços inoxidáveis: Aplicações e especificações**, Arcelor Mittal, 2008. (Catálogo Técnico)

DENVER S.A. **Aços estruturais**. Disponível em: < <http://www.denversa.com.br/site/files/produtos/ba34aa7ebb8e04f694a76c816cee0afc.pdf> > Acesso: 13 de Agosto 2017.

ELMESALAMY. A, S.; ABDOLVAND, H.; WALSH, J.N.; FRANCIS. J. A.; SUDER. W.; WILLIAMS. S.; **Measurement and modelling of the residual stresses in**

autogenous and narrow gap laser welded AISI grade 316L stainless steel plates. Disponível em: International Journal of Pressure Vessels and Piping 147 (2016) 64-78.

ELMESALAMY. A, S.; FRANCIS. J. A.; LI. L. **A comparison of residual stresses in multi pass narrow gap laser welds and gas-tungsten arc welds in AISI 316L stainless steel.** Disponível em: International Journal of Pressure Vessels and Piping 113 (2014) 49e59

ESAB. Conhecimento – Catálogo técnico. ESAB.COM.BR, **Processo de Soldagem: Eletrodo Revestido (MMA/SAW)**, 2014.

ESAB. Conhecimento - Catálogo técnico. ESAB.COM.BR, **Eletrodos Revestidos**, 2005.

ESAB. Conhecimento - Catálogo técnico. ESAB.COM.BR, **Tratamento térmico de alívio de tensões na soldagem**, 2014.

ESTEFEN, S; GUROVA, T; CASTELO, X, LEONTIEV, A. **Análise de evolução do estado das tensões residuais de soldagem**, SENAI, Rio de Janeiro, RJ, 2008. (EXPOSOL)

GIMENES, L. **Tratamento térmico em juntas soldadas.** Edição 1997. <http://assets.cimm.com.br/uploads/cimm/publicacao/arquivo/320/tratamen.16.pdf>
Acesso em 02 de outubro 2017.

GONÇALVES, I. L. **Influência da temperatura no tratamento de alívios de tensões em uma junta soldada baseado no método DPC** – Universidade Federal de Pernambuco. Recife - PE, 2015. (Dissertação)

GUEDES, R.P. **Influência na Corrente de Soldagem nas Propriedades de Aços de Alta Resistência e Baixa Liga Soldadas com Eletrodo revestido.** Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2009. (Dissertação).

GUIMARÃES, P. B. **Estudo do campo de temperatura obtido numericamente para posterior determinação das tensões residuais numa junta soldada de aço**

ASTM AH36. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2010. (Tese de doutorado).

GUROVA, T; QUARANTA, F; ESTEFEN, S. **Monitoramento do estado das tensões residuais durante a fabricação de navios.** Laboratório de tecnologia submarina, COPPE/UFRJ, 2007.

GURVITZ, A. Q, K;. **Influência do Tipo de Eletrodo nas Tensões Residuais e na Qualidade Superficial da Juntas Soldadas de Aço A36.** TCC. CEFET, Rio de Janeiro, RJ. 2012.

IRESTAL GROUP. **Fichas Técnicas de Aço Inoxidável.** Disponível em <http://data.irestal.com/files/files/2012030204152715829.pdf>. Acesso em 03 de Outubro de 2017

JIANG, W.C.; WANG, B.Y.; GONG, J.M. Gong.; TU, S.T. **Finite element analysis of the effect of welding heat input and layer number on residual stress in repair welds for a stainless steel clad plate.** Disponível em: Materials and Design 32 (2011) 2851–2857.

KESTRA. **Catálogo técnico de eletrodo revestido KST 4435 LCW.** < <http://www.kestra.com.br/uploads/product/files/1110/DSEL - 0108 - ST 4435 LCW.pdf> > Acesso em 01 de Outubro de 2017.

LONDOÑO, A. J. R. **Estudo da Precipitação de Nitreto de Cromo e Fase Sigma Por Simulação Térmica da Zona Afetada pelo Calor na Soldagem Multipasse de Aço Inoxidável Duplex.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 1997.

LU, J., ***Handbook of Measurement of Residual Stresses***, editora Fairmont Press, Universidade da Califórnia, 1996.

LUCENA, H. N. **Geração de estratégias de medição de superfícies complexas em sistema CAD para máquinas de medir por coordenadas**, UNIMEP, Santa Bárbara d'Oeste, SP, 2009. (Dissertação).

MACHERAUCH, E.; KLOSS, K.H. **“Origin measurements and evaluation of residual stress”**. **Proceedings of the International Conference on Residual Stress**, pp.3-26, Garmisch, Partenkirchen, Germany, 1986. MACHERAUCH, E.; KLOSS, K.H. **“Origin measurements and evaluation of residual stress”**. **Proceedings of the International Conference on Residual Stress**, pp.3-26, Garmisch, Partenkirchen, Germany, 1986.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Introdução aos Processos de Soldagem**. UFMG, Minas Gerais, MG, Novembro 2000.

MODENESI, P. J.; **Fontes de Energia para a Soldagem a Arco**. UFMG, Minas Gerais, MG, 2009.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V; SANTOS, D. B. **Introdução á Metalurgia de Soldagem**. UFMG, Minas Gerais, MG, Novembro 2012.

MORAIS, V. L. **Estudo comparativo da deformação a frio e da resistência à corrosão nos aços inoxidáveis austeníticos AISI 201 e AISI 304**. Escola Politécnica, São Paulo, SP, 2010. (Dissertação)

NAEEM. U, D.; EJAZ. M, Q.; HAMMOUDA. M, M.; **Analysis of weld-induced residual stresses and distortions in thin-walled cylinders**. Disponível em: Journal of Mechanical Science and Technology 23 (2009) 1118~1131

OKUMURA, T.; TANIGUSGI, C. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2002.

OLIVEIRA, G. L. **Avaliação de tensões residuais de soldagem em chapas planas do aço estrutural ASTM A516 G70**. Dissertação, UFCE, Fortaleza, CE, 2009.

OLIVEIRA, E. S.; LILES, S. A.; SANTANA, W. C.; RIBEIRO, R.B.; BASTOS, D. C. **Análise Comparativa da Solda por Eletrodo Revestido Com e Sem Tecimento**. III Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento, 2014.

PEIXOTO, A. L. **Soldagem**. Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2012)

PRATIHAR, S.; TURSKI, M.; EDWARDS, L.; BOUCHARD, P, J. **Neutron diffraction residual stress measurements in a 316L stainless steel bead-on-plate weld specimen**. Disponível em: International Journal of Pressure Vessels and Piping 86 (2009) 13–19.

ROLIM, T. L. **Sistemática indicadora de método para calibração de máquinas de medição por coordenadas**, UFPB, João Pessoa, PB, 2003. (Tese).

SENAI. **Programa de certificação de pessoal de manutenção: Mecânica-Tratamentos térmicos**. SENAI / CST, SC, 1997.

SENATORE, M.; FINZETTO, L.; PEREA, E. **Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 2007.

SIMEI. **Soldagem**. Catálogo Técnico, 2012. <https://lcsimei.wordpress.com/materiais-tecnicos-2/soldagem/> . Acesso em 25 de Setembro de 2017.

SIMONETTI, M. J. Catálogo 2. **Processo de soldagem**. UNIP, Sorocaba, SP, 2013.

SIQUEIRA FILHO, A. V. **Estudo Comparativo das Tensões Residuais em Juntas Soldadas pelas Técnicas de Medição por Coordenadas e Difração de Raios-X**. Tese de Doutorado. UFPE, Recife, PE. 2012.

SUTERO, R. **Medições de tensões residuais por endentação associada à holografia eletrônica**. Tese de doutorado, UFSC, Florianópolis, SC, 2005.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processos e metalurgia**. São Paulo, Editora Edgard Blücher, 2004.

WITHERS, P.J; BHADESHIA, H. K. D. H. **Residual stress Part 1- Measurement techniques**. *Materials Science and Technology*, v. 17, n. 4, p. 355-365, abr. 2001.

ZOLIN, I. **Materiais de Construção : mecânica**, 3. ed. – Santa Maria : Universidade Federal de Santa Maria : Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011.

Apêndice B – Certificado de qualificação de soldadores.

Figura 1 B – Certificado de qualificação do soldador S 01.

		CERTIFICADO DE QUALIFICAÇÃO DE SOLDADORES (ASME SECTION IX) WELDER PERFORMANCE QUALIFICATION				CQS - WPQ	
						Nº	001/17
SOLDADOR: Welder:	ALBERTO HENRIQUE SILVA LIMA (CPF: 067.415.124-03)				SINETE Nº: Stamp No.:	S-01	
EPS Nº: WPS No.:	001/17	REV.	-	NORMA: Standard:	ASME Sec. IX - Ed.2013		
VARIÁVEIS DA SOLDAGEM Welding Variables (QW - 416)		VALORES DA QUALIFICAÇÃO Actual Values			FAIXA QUALIFICADA Range Qualified		
PROCESSO DE SOLDAGEM / Welding Process		SMAW			SMAW		
TIPO DE PROCESSO / Type Process		Manual			Manual		
COBRE JUNTA / Backing (QW - 402-4/7)		COM / With			COM / With		
METAL DE BASE / Base Metal (QW - 403-1/423)		ASTM A240 316L	PARA To	ASTM A240 316L	PNº 1 a 15F, 34 ; PNº41 a PNº49(3*)	PARA PNº 1 a 15F, 34 ; PNº41 a PNº49 (3*)	
ESPESSURA DO DEPÓSITO / Thickness Deposited (QW - 404.30/452.1b) (mm)		10 mm			t ≤ 20,0 mm		
DIÂMETRO / Diameter (QW-403.16/452.3) (mm)		N/A			N/A		
CLASSIFICAÇÃO AWS / Classification (QW - 432)		E316L			Qualquer Aplicável / All applicable		
ESPECIFICAÇÃO / Specification (QW - 432)		AWS A5.4			AWS A5.4		
F. Nº / F No. (QW - 433)		5			5		
POSIÇÃO / Position (QW - 405-1/461-9)		1G			Plana / Flat		
PROGRESSÃO / Progression (QW - 405-3)		N/A			N/A		
TIPO DO GAS / Type Gas (QW - 408-7)		N/A			N/A		
GAS PURGA / Backing Gas (QW- 408-8)		N/A			N/A		
MODO DE TRANSFERÊNCIA / Transfer Mode (QW - 409-2)		N/A			N/A		
CORRENTE E POLARIDADE / Current Type and Polarity (QW - 409-4)		CC+			CC+		
RESULTADOS DOS ENSAIOS / Test Results							
ENSAIO DE DOBRAMENTO / Bend Test	(X) QW - 462-2 (LATERAL / Side)	(X) QW - 462-3 (TRANSV; R e F)	(X) QW - 462-3 (LONGIT; R e F)				
TIPO / Type	RESULTADO / Result	RESULTADO / Result	RESULTADO / Result				
DF1 - DOBRAMENTO FACE 1	-	APROVADO	-				
DF2 - DOBRAMENTO FACE 2	-	-	-				
DR1-DOBRAMENTO RAIZ 1	-	APROVADO	-				
DR2-DOBRAMENTO RAIZ 2	-	-	-				
ENSAIO VISUAL / Visual Examination (QW - 194) (2*) RAS-CP 01/17 (19/01/2017)							
ENSAIO RADIOGRÁFICOS / Radiographic Test (QW - 191) <u>N/A</u>							
RESULTADO DOS ENSAIOS DAS SOLDAS EM ÂNGULO / Fillet Welds Tests Results (QW - 462-4(b), QW - 462-4(c))							
TESTE DE FRATURA / Fracture Test <u>N/A</u>							
COMPRIMENTO E PERCENTUAL DOS DEFEITOS / Length and percent of defects <u>N/A</u> mm <u>N/A</u>							
EXAME MACROGRÁFICO / Macro Examination <u>N/A</u>							
DIMENSÃO PERNAS / Fillet Size: <u>N/A</u> mm x <u>N/A</u> mm							
CONVEXIDADE / Convexity: <u>N/A</u> mm ou CONCAVIDADE / Concavity: <u>N/A</u> mm <u>N/A</u>							
TESTE DE SOLDAGEM CONDUZIDO POR / Welding supervised by: <u>DOUGLAS HENRIQUE DE MELO PEREIRA - SNQC/FBTS Nº3418 ISN2</u>							
ENSAIOS MECÂNICOS CONDUZIDOS POR/ Mechanical tests conducted by: <u>DOUGLAS HENRIQUE DE MELO PEREIRA - SNQC/FBTS Nº3418 ISN2</u>							
Observação / Remarks : (1*) Qualificado para qualquer diâmetro e espessura para solda em ângulo. Qualified for any diameter and thickness for Fillet welding. (2*) Exame visual realizado. Visual examination performed. (3*) Incluindo material designados, de composição química semelhante a este material conforme descrito em QW 423.1. Including designated material, chemical composition similar to this material as described in QW 423.1 Certificamos que as declarações neste registro estão corretas e que os corpos de prova foram preparados, soldados e testados conforme as exigências da ASME IX. We certify that the statements in this record are correct and that the test coupons were prepared, welded and tested in according to requirements of ASME IX. N.A. = Não Aplicável / No Applicable							
Inspetor de Soldagem N2 (Welding Inspector Level 2)		Controle de Qualidade (Quality Control)		Fiscalização (Customer)		Data (Date)	
 DOUGLAS HENRIQUE DE M. PEREIRA Engenheiro Mecânico - CREA 51.522-PE Insp. de Soldagem N2 - 3418 FBTS LP-N2-G SNQC 10.193 - Abendi						19/01/2017	

Apêndice C – Certificado de qualidade da chapa ASTM A 240 TP 316L.

Figura 1 C – Certificado de qualidade do material empregado nos CPs.

AcelorMittal Inox Brasil S.A.



CERTIFICADO DE QUALIDADE

Número: XXXXXX
 Pedido ACELORMITTAL: XXXXXX
 Data: XXXXXX
 Nota Fiscal: XXXXXX

Cliente:

XXXXXXXXXXXX
 XXXXXXXXXXXX

Aço **AISI 316L** Acabamento **NA1** Produto: **CHAPA**

Dimensões: 10.00 mm x 1300 mm x 6000 mm

Marcação:

Composição Química

Número Corrida	C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	Al %	B %	Cu %	N2 PPM			
842885C	0,022	1,31	0,5	0,035	0,003	16,6	10,06	2,027	0,0031	0,0016	0,05	289			

Ensaio Variável	Unid. Med	842995C032		842995C033					
		Inicial	Final	Inicial	Final				
Lim. Resistência	Mpa		586,00		586,00				
Lim. Escoamento 0,2%	Mpa		339,00		339,00				
Alongamento	%		56,00		56,00				
Tam Grão Austenítico			8/7		8/7				
Dureza RB	HRB	77,33	77,33	77,33	77,33				
Oxálico		APROV	0	APROV	0				
Peso Líquido	Kg		3950		2638				
Peso Bruto	Kg		4060		2746				

Identificação de unidade metálica: OK

Qualidade superficial / dimensional: OK

Tratamento térmico: Temp. mínima de solubilização 1040 °C

Normas: ASTM A 240/A240M 08

Observações: ATENDE DUPLA CERTIFICAÇÃO COMO AISI 316L / AISI 316

a) Material sem contaminação por mercúrio

b) Certificamos que os resultados acima descritos estão corretos e de acordo com as especificações ou concessão autorizada

c) Sistema de gestão da qualidade certificado conforme norma ISO 9001-Certificado ABS QE nº 30071

d) Sistema de gestão da qualidade certificado conforme norma ISO/TS-Certificado ABS QE nº 38324

e) Sistema de gestão da ambiental certificado conforme norma ISO 14001-Certificado ABS QE nº 65989