

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

EDUARDO SANCHES FARIAS

**ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS NA SOLDAGEM DE PEÇAS DE AÇO AISI
4140. UMA COMPARAÇÃO ENTRE O TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE
TENSÕES E A VIBRAÇÃO SUB-RESSONANTE**

SANTOS/SP

2016

EDUARDO SANCHES FARIAS

**ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS NA SOLDAGEM DE PEÇAS DE AÇO AISI
4140. UMA COMPARAÇÃO ENTRE O TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE
TENSÕES E A VIBRAÇÃO SUB-RESSONANTE**

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

SANTOS/SP

2016

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

ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS NA SOLDAGEM DE PEÇAS DE AÇO AISI 4140. UMA COMPARAÇÃO ENTRE O TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES E A VIBRAÇÃO SUB-RESSONANTE

Farias, Eduardo Sanches.

Análise das tensões residuais na soldagem de peças de aço AISI 4140. Uma comparação entre o tratamento térmico de alívio de tensões e a vibração sub-ressonante.

/ Eduardo Sanches Farias. - 2016.

n. de f. 93.

Orientador: Dr. Felipe Bertelli.

Coorientador: Me.Natal de Jesus Gaspar.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2017.

Soldagem com vibração. 2. Tensão residual. 3. Alívio de tensões

I. Bertelli, Felipe

II. Gaspar, Natal de Jesus.

III. Análise das tensões residuais na soldagem de peças de aço

AISI 4140. Uma comparação entre o tratamento térmico de alívio de tensões e a vibração sub-ressonante.

DEDICATÓRIA

*“Dedico este trabalho primeiramente a DEUS.
Minha Esposa, Mãe, Filhos, Irmãos e Amigos”*

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Felipe Bertelli, pela colaboração, contribuição e experiência para a conclusão desta dissertação.

Ao amigo e Prof. Dr. José Carlos Morilla, pela paciência, orientação e dedicação no apoio técnico e experiência no que contribuiu para a elaboração deste trabalho, um verdadeiro amigo que esteve sempre presente.

Ao Prof. Me Natal de Jesus Gaspar, pelo apoio técnico, pela paciência, dedicação e companheirismo em todos os momentos.

Aos amigos e colaboradores direto Prof. Me Aldo João Alberto e Me Carlos Augusto Pereira Martins que contribuíram com sua experiência e orientação do trabalho.

Ao Prof. Me Rodrigo Silveira Morilla pelo apoio a interpretação de texto em língua inglesa.

Ao Coordenador Geral dos Programas de Pós Graduação Stricto Sensu, Prof. Dr. Marcos Tadeu Tavares Pacheco, pela experiência adquirida e aplicada na, elaboração deste trabalho.

À UNIVERSIDADE SANTA CECILIA (UNISANTA) pela excelência no curso de mestrado em Engenharia Mecânica, o que me propiciou conhecimento técnico para a elaboração deste trabalho.

À empresa ENGEBASA – Pela disponibilização das suas dependências, da equipe de soldagem e pelo apoio técnico que foram necessários para conclusão desse trabalho.

EPIGRAFE

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer”.

Albert Einstein

RESUMO

No meio industrial é necessário à busca de novas formas de se aplicar métodos que garantam a qualidade e a eficiência de uma junta soldada. A indústria utiliza o tratamento térmico para aliviar as tensões residuais em juntas soldadas e recentemente está sendo utilizado o alívio das tensões residuais por meio da vibração sub-ressonante. Essa técnica vem ganhando aliados e uma linha de pesquisa sólida que tende ao aprimoramento dessa tecnologia em busca de economia e agilidade, principalmente na área industrial. Neste trabalho foi possível avaliar e comparar os dois métodos de tratamento de alívio de tensões de uma peça de aço 4140. Assim, com as informações obtidas e dos parâmetros estudados utilizando o ensaio pelo método do furo cego, efetuou-se uma comparação das tensões residuais de uma junta soldada sem tratamento de alívio de tensões, uma junta soldada com aplicação da vibração sub-ressonante durante o processo, e uma junta soldada, submetida ao tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT), permitindo assim, a realização de uma análise da eficiência das remoções das tensões residuais entre os diferentes tipos de métodos de tratamento, na busca de alternativas para eliminação das tensões residuais.

Palavras-chave: Soldagem com vibração. Tensão residual. Alívio de tensão.

ABSTRACT

In the industrial environment it is necessary to search for new ways to apply methods that guarantee the quality and efficiency of a welded joint. The industry uses heat treatment to relieve residual stresses in welded joints, and recently begin to use sub-resonant vibration for residual stress relief. This technique has been winning allies and a solid research line that tends to the improvement searching for economy and agility, mainly in the industrial area. In this work it was possible to evaluate and compare the two methods of stress relief treatment of a piece made of steel 4140. Thus, with the information obtained and the parameters studied using the blind bore test, a comparison of the residual stresses of a welded joint without stress relief treatment, a welded joint submitted to sub-resonant vibration during the process, and a welded joint, submitted to the stress relief thermal treatment (TTAT), allowing the performance of an analysis about the efficiency of the removal of residual stresses between the different types of treatment methods, in the search for alternatives to eliminate the residual stresses.

Keywords: Vibration welding. Residual stress. Stress relief.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pirâmide demonstrando as várias organizações normativas.	20
Figura 2 – Diagrama de fases parcial Ferro-Carbono.	23
Figura 3 – Comparação entre o limite os limites de resistência ao escoamento dos aços SAE 4140 (a) e aço A36 (b).....	25
Figura 4 – Zonas de uma junta soldada – passe único em detalhes às três regiões da junta soldada.	27
Figura 5 – Correlação entre as zonas de soldagem e suas respectivas temperaturas no diagrama ferro-carbono.	29
Figura 6 – Diagrama de TRC do aço AISI 4140.....	30
Figura 7 – Volume ocupado pelo metal de adição: (a) no estado liquido e (b) na temperatura ambiente. (Fonte: Figura adaptada pelo Autor, 2016).....	33
Figura 8 – Comparação entre as tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras (a) e as tensões longitudinais ao longo da direção transversal (y) em uma solda de topo (b). (Fonte: Martins, 2014 e Marques et al 2012).....	34
Figura 9 – Diagrama de Graville.....	36
Figura 10 – Diagrama de fases parcial ferro-carbono - localização do recozimento subcrítico.....	41
Figura 11 – Parâmetros de TTAT para o aço AISI – 4140.	42
Figura 12 – Curva típica de ressonância.....	43
Figura 13 – Zona sub-harmônica ou sub-ressonante.....	45
Figura 14 – Estudo do efeito das vibrações na dissipação de energia.....	46
Figura 15 – Alteração e estabilização da curva de ressonância após a aplicação da frequência sub-harmônica de alívio de tensões.	48
Figura 16 – Exemplos de extensômetros, (a) roseta tipo A (b) representação gráfica em 3D. (Fonte: Alberto, 2016).	50
Figura 17 – Detalhe das marcações e identificações na chapa de aço AISI 4140....	51
Figura 18 - Máquina de corte com jato de água.....	52
Figura 19 – Dimensões das peças de teste: (a) – vista frontal e (b) perspectiva mostrando os detalhes em três dimensões.....	52
Figura 20 – Identificação das camadas e números de passes – (a) sem identificação dos passes e (b) com identificação dos passes.	54
Figura 21 – Sequência de soldagem e identificação das camadas – (a) representação gráfica e (b) peça de teste soldada.	54

Figura 22 – Peça submetida ao preaquecimento com maçarico.....	55
Figura 23 – Forno utilizado para o TTAT – Universidade Santa Cecília.....	58
Figura 24 – Gráfico de TTAT elaborado com os dados do quadro 8.....	60
Figura 25 – Máquina de vibração ou microprocessador META-LAX® e o painel de controle.	60
Figura 26 – Mesa de vibração, transdutor de vibração, microprocessador, motor de corrente contínua, peça de teste e peça de fixação.	61
Figura 27 – (a) Posicionamento da peça de teste na mesa de vibração. (b) dispositivo de vibração (transdutor).....	62
Figura 28 – Manutenção da temperatura durante a soldagem.....	62
Figura 29 – Gráfico da Amplitude x Frequência da vibração sub-ressonante.	63
Figura 30 – (a) Peça com detalhes da penetração e (b) Acabamento final da solda.	66
Figura 31 – Posicionamento da roseta e dos extensômetros no corpo de prova para execução do ensaio de furo cego (a) local do ensaio e (b) detalhe da montagem da roseta.	67
Figura 32 – Gráfico da tensão residual equivalente versus profundidade da solda C.	70
Figura 33 – Gráfico da tensão residual equivalente versus profundidade da solda com TTAT.....	72
Figura 34 – Gráfico da tensão residual equivalente versus profundidade da solda com vibração e sem manta.	74
Figura 35 – Gráfico da tensão residual equivalente versus profundidade da solda com vibração e manta.	76
Figura 36 – Comparação entre as tensões residuais equivalentes.	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros de TTAT para aço carbono e aços de baixa liga.....	21
Quadro 2 – Técnicas para a determinação experimental de tensões residuais.	38
Quadro 3 – Principais métodos de medição de tensões residuais.	39
Quadro 4 – Métodos para aliviar tensões residuais.	40
Quadro 5 - Composição química do aço SAE 4140 e do eletrodo E-8018-B2.	53
Quadro 6 – Características do cordão da peça C.	56
Quadro 7 - Características do cordão da peça D.	57
Quadro 8 – Acompanhamento dos parâmetros de TTAT.....	59
Quadro 9 – Parâmetros utilizados na programação da máquina de vibração – META-LAX®.....	63
Quadro 10 – Parâmetros de soldagem com vibração do aço SAE 4140 com eletrodo E-8018-B2 – peça A.	64
Quadro 11 – Parâmetros de soldagem com vibração do aço SAE 4140 com eletrodo E-8018-B2 – Peça B.....	65
Quadro 12 – Tensões residuais.	69
Quadro 13 – Tensões residuais após realização do TTAT.	71
Quadro 14 – Tensões residuais – solda com vibração sem manta.	73
Quadro 15 – Tensões residuais – solda com vibração e manta.....	75
Quadro 16 – Comparação entre as tensões residuais equivalentes entre as soldas executadas.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química de um aço AISI 4140 – Análise do produto.....	24
Tabela 2 – Tensões admissíveis de um aço AISI 4140.....	24

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI – American Iron and Steel Institute
ASME - American Society of Mechanical Engineers
ASTM - American Society for Testing and Materials
ATVS – Alívio de Tensões por Vibração Sub-ressonante
a.C. – Antes de Cristo
CEQ – Carbono Equivalente
CP – Corpo de Prova
D – Diâmetro
ER – Eletrodo Revestido
fbr – Frequência antes da ressonância
fml – Frequência sub ressonante
frp – Frequência do pico de ressonância
GOIV - Goivagem
HRC – Rockwell – Método de ensaio de dureza
MB – Metal Base
MPa – Megapascal – unidade de pressão
MFLE – Mecânica da fratura elástica
N – Número de ciclos.
SMAW – Shielded Metal Arc Welding
SAE - Society of Automotive Engineers
R – Raio
TRC – Transformação de Resfriamento Contínuo
TTT - Tempo de Transformação em determinada Temperatura
TTAT – Tratamento Térmico para Alívio de Tensões
ZF – Zona Fundida
ZL– Zona de Ligação
ZAT – Zona Afetada Termicamente
ZAT-GG– Zona Afetada Termicamente de grãos grossos
ZAT-GF– Zona Afetada Termicamente de grãos finos
ZAT-IC– Zona Afetada Termicamente intercrítica
ZAT-SC– Zona Afetada Termicamente subcrítica

LISTA DE SÍMBOLOS

σ - Tensão

$^{\circ}\text{C}$ – Grau Celsius

% - Porcentagem

ε - Deformação

L – Comprimento

Σ - Amplitude de tensão

A - Amperagem

C - Carbono

P – Fósforo

S – Enxofre

Si – Silício

Mn - Manganês

Mo – Molibdênio

Ni - Níquel

Cr – Cromo

H – Hidrogênio

Hz – Hertz – unidade de frequência

V – Voltagem

mm – Milímetro

mm/s – Milímetro por segundo

kJ/mm – Quilo Joule por milímetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO-----	17
2	NORMALIZAÇÃO, ASSOCIAÇÕES NORMALIZADAS E O AÇO AISI 4140-	19
2.1	<i>ASME – American Society of Mechanical Engineers</i> -----	20
2.2	<i>AISI – American Iron and Steel Institute</i> -----	21
2.3	<i>AÇO AISI/SAE 4140</i> -----	22
3	SOLDAGEM-----	26
3.1	<i>Histórico da Soldagem</i> -----	26
3.2	<i>Soldagem do Aço AISI 4140</i> -----	27
4	TENSÕES RESIDUAIS -----	32
4.1	<i>Tensões Residuais na Soldagem</i> -----	32
4.2	<i>Cálculo das Tensões residuais no Processo de Soldagem</i> -----	34
4.3	<i>Determinação Experimental das Tensões Residuais</i> -----	37
4.4	<i>Controle e Alívio de Tensões Residuais</i> -----	39
5	TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES -----	41
6	TRATAMENTO POR VIBRAÇÕES SUB-RESSONANTES -----	43
6.1	<i>Alívio de tensões por vibrações</i> -----	43
6.2	<i>Vibrações aplicadas na soldagem</i> -----	46
7	MÉTODO DO FURO CEGO PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS--	49
7.1	<i>Norma ASTM - E 837</i> -----	49
8	MATERIAIS E MÉTODOS-----	51
8.1	<i>Obtenção dos corpos de prova</i> -----	51
8.2	<i>Sequência de soldagem</i> -----	53
8.3	<i>Soldagem das peças de teste dos corpos de prova</i> -----	55
8.3.1	<i>Tratamento termico de alívio de tensões – TTAT – peça D</i> -----	58
8.4	<i>Soldagem com vibração</i> -----	60
8.4.1	<i>Ensaio de tensões residuais – furo cego</i> -----	66
9	RESULTADOS E DISCUSSÃO. -----	68
9.1	<i>Solda sem tratamento de alívio de tensões</i> -----	68
9.2	<i>Solda com TTAT – peça D</i> -----	71
9.3	<i>Solda com vibração sem manta – peça A</i> -----	72
9.4	<i>Solda com vibração e manta – peça B</i> -----	74
10	CONCLUSÃO-----	77
10.1	<i>Solda peça C – sem tratamento de alívio de tensões</i> -----	77

10.2	<i>Solda peça D - com tratamento térmico de alívio de tensões</i>	77
10.3	<i>Solda peça A – ATVS sem manta</i>	78
10.4	<i>Solda peça B – ATVS com manta</i>	78
10.5	<i>Comparação entre as peças soldadas</i>	78
11	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	82
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
	ANEXO A	90
	ANEXO B	91
	ANEXO C	92
	ANEXO D	93

1 INTRODUÇÃO

O aço é o material mais versátil das ligas metálicas que apresenta uma grande variedade de tipos e formas, para atender eficientemente a uma ou mais aplicações dentro de várias áreas industriais (RASMA, 2015).

Uma das formas mais comuns de união entre peças de aço é a soldagem, que hoje é o principal método no processo da união permanente entre peças metálicas utilizadas industrialmente, permitindo a montagem de conjuntos com rapidez, segurança e economia de processo e de materiais. Sua importância é evidenciada tanto pela sua presença nas mais diferentes atividades industriais quanto pela influência que a necessidade de uma boa soldabilidade tem no desenvolvimento de novos tipos de aços e outras ligas metálicas (MARQUES et al.; 2012).

Dentre os diversos métodos empregados para minimizar os efeitos induzidos pelo processo de soldagem, são encontrados os tratamentos térmicos que consistem em um conjunto de operações envolvendo o aquecimento, tempo de permanência em determinada temperatura e o resfriamento sob condições controladas. Todavia, seu emprego é muitas vezes limitado pelos seguintes fatores (AOKI et al., 2005).

- O custo do tratamento em termos de equipamento e de consumo de energia;
- Tempo de processamento;
- Deterioração da superfície tratada através da formação de camadas de óxidos, descoloração e escamações;
- Necessidade de processamento subsequente para remoção das camadas de óxido formadas durante o tratamento;
- Limitações em relação a formas e dimensões dos componentes mecânicos;
- Em alguns casos pode promover alterações metalúrgicas microestruturas e alterar propriedades mecânicas importantes que usualmente são adquiridas durante outros processos termomecânicos;
- Limitações de tratamento em relação à forma, dimensões e quando o componente é constituído de materiais dissimilares.

Além dos tratamentos térmicos, existe como opção o tratamento por vibração mecânica que vem surgindo como uma alternativa aos tratamentos térmicos, por apresentar um menor custo de energia e menor número de horas de trabalho, assim como, a não alteração das propriedades mecânicas de parte dos componentes não são afetadas pelo tratamento vibracional, as tensões não reaparecem em serviços posteriores e também não há riscos de contaminação ambiental (BRAGA, 2011).

O tratamento de juntas soldadas por vibração mecânica é uma técnica conhecida desde a década de 1950, teve seu início no Brasil em 2001 e possui potencial para solucionar problemas oriundos da concentração de tensões advindas dos processos de soldagem. Essa técnica consiste em vibrar um componente mecânico em um ponto abaixo da frequência de ressonância, denominada zona sub-harmônica ou sub-ressonante, durante um determinado tempo, visando reduzir e redistribuir as tensões residuais introduzidas nas estruturas soldadas (JIJIN et al., 2006).

Será apresentada nesse trabalho uma comparação das tensões residuais entre os seguintes tipos de corpos de prova:

- Peça A e B = Corpos de prova soldado e submetido à vibração sub-ressonante durante a soldagem;
- Peça C = Corpo de prova soldado não submetido à vibração sub-ressonante e nem ao tratamento térmico;
- Peça D = Corpo de prova soldado não submetido à vibração sub-ressonante e tratado termicamente com os parâmetros estabelecidos pela norma ASME B31.3.

Tal estudo tem a intenção de determinar a possibilidade da utilização do processo de vibração sub-ressonante em substituição ao tratamento térmico de alívio de tensões. O objetivo dessa substituição é reduzir o consumo de energia e o tempo do processamento do Tratamento Térmico para Alívio de Tensões (TTAT) pelo Alívio de Tensões por Vibração Sub-ressonante durante a soldagem (ATVS).

2 NORMALIZAÇÃO, ASSOCIAÇÕES NORMALIZADAS E O AÇO AISI 4140

“Normalização é o processo de estabelecer e aplicar regras a fim de abordar ordenadamente uma atividade específica, para o benefício e com a participação de todos os interessados, e em particular, promover a otimização da economia, levando em consideração as condições funcionais e as exigências de segurança” (ABNT, 2016).

A normalização técnica surgiu das necessidades de o homem estimar dimensões e distâncias para construir, produzir e colher sua alimentação (ABNT, 2016).

Esta atividade é executada em diferentes níveis de complexidade, começando localizadamente e alcançando o nível internacional (REGAZZI, 2000).

Dentro da importância de cada um destes níveis, existe a necessidade de atuação harmônica e integrada, uma vez que os objetivos da normalização são comuns a todos os níveis (REGAZZI, 2000).

O envolvimento da normalização pode ser realizado no âmbito das seguintes formas:

- a) um país específico – denominada Normalização Nacional;
- b) uma única região geográfica, econômica ou política do mundo – denominada Normalização Regional;
- c) vários países do mundo – denominada Normalização Internacional.

De forma sistematizada a Normalização é executada por organismos que contam com a participação das partes interessadas no assunto, do objeto da normalização e que têm como principal função a elaboração, aprovação e divulgação de normas. Assim os níveis da normalização costumam ser representados por uma pirâmide, que tem em sua base a normalização empresarial, seguida da nacional e da regional, ficando no topo a normalização internacional (ABNT, 2016).

A figura 1 mostra os diversos níveis de organização normativos.



Figura 1 – Pirâmide demonstrando as várias organizações normativas.
(Fonte: ABNT, 2016).

A representação da pirâmide expressa na figura 1 é definida conforme o grau de responsabilidade, caracterizado pelos níveis de normalização entre a empresarial e a internacional.

2.1 ASME – American Society of Mechanical Engineers

Fundada em 1880 como *American Society of Mechanical Engineers*, ASME é uma organização profissional que permite a colaboração, a partilha de conhecimentos e o desenvolvimento de competências em todas as disciplinas da engenharia, promovendo simultaneamente o papel fundamental do engenheiro na sociedade (ASME, 2016).

Segundo Gaspar (2013), O código ASME recomenda as seguintes normas para a construção e montagem de tubulações e equipamentos:

- ASME B31.1- Power Piping, 2012;
- ASME B31.3 - Process Piping, 2012;
- ASME Seção I - Rules for Construction of Power Boiler, 2011;
- ASME Seção III - Alternative Rules For Construction of High Power Boiler, 2011;
- ASME Seção VIII – Rules for Construction of Pressure Vessels, 2011;

- ASME Seção IX - Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators, 2011.

Dentre os códigos da ASME, código ASME B31.3 - 2014, aplicável em soldagem, determina a classificação dos materiais base de acordo com sua composição química, limite de resistência, onde os mesmos são denominados de P *numbers* – (ASME IX – QW-422), o aço AISI 4140, foi enquadrado como P-N4 Gr 1 e 2 (1,0% Cr e 0,5% Mo), pois conforme sua composição química, ele é similar ao aço ASTM A-387. No quadro 1, estão mostrados os limites TTAT para um aço P-N4.

Quadro 1 – Parâmetros de TTAT para aço carbono e aços de baixa liga.

Tabela 331.1.1 - PN 4 - ASME B31.3 – 2014			
Requisitos de tratamento térmico de alívio de tensões para aço carbono e aços de baixa liga			
Material	Temperatura de tratamento - °C	Tempo mínimo de tratamento	
		Até 50 mm	Acima de 50 mm
P- N 4 Gr 1 e 2	650 a 705	1 hora para cada 25 mm, 15 min mínimo	2 horas mais 15 minutos para cada espessura adicional de 25 mm acima de 50 mm

(Fonte: ASME B31.3, 2014 com adaptação).

O quadro 1 classifica as condições de tratamento térmico de alívio de tensão dos aços de baixa liga conforme ASME B31.3 – 2014, que determina o tempo mínimo exigido conforme espessura, material e temperatura.

2.2 AISI – American Iron and Steel Institute

O *American Iron and Steel Institute* (AISI) é uma associação de produtores de aço da América do Norte. Suas organizações predecessoras remontam a 1855 e é uma das mais antigas associações comerciais nos Estados Unidos. A AISI assumiu sua forma atual em 1908, com Elbert H. Gary, presidente da *United States Steel Corporation*, como seu primeiro presidente (AISI, 2016).

Seu desenvolvimento foi em resposta à necessidade de uma agência de cooperação na indústria de ferro e aço para a recolha e divulgação de estatísticas e de informações, procedendo das investigações, proporcionando um fórum para a

discussão de problemas e avançar os interesses da indústria (AISI, 2016). Na prática, o sistema de classificação mais adotado é o *Society of Automotive Engineers (SAE) / AISI*. Nele, o aço carbono é normalmente identificado pelo grupo 1xxx.

Os algarismos base para os vários aços-carbono e aços ligados e as porcentagens aproximadas dos elementos de liga mais significativos recebem classificação, como exemplificado a seguir:

- 10xx - C;
- 11xx – C, com alto teor S e baixo teor P;
- 13xx - 1,75% Mn;
- 23xx - 3,5% Ni;
- 31xx - 1,5% Ni, 0,6% Mo;
- 40xx - 0,20 ou 0,25% Mo;
- 41xx - 0,5; 0,8 ou 0,95% Cr; 0,12; 0,2 ou 0,3% Mo;
- 43xx - 1,83% Ni; 0,5 ou 0,8% Cr; 0,25% Mo.

Os aços que possuem requisitos de temperabilidade adicionais recebem um (H) dentro o seu código de classificação.

2.3 AÇO AISI/SAE 4140

Habitualmente, os aços são empregados majoritariamente nas áreas industriais, como exemplo, os aços de baixa liga, da família SAE 4xxx. Os aços 41xx são ligados ao Cromo ($\approx 1\%$) e ao Molibdênio ($\approx 0,2\%$), que alcançam elevada resistência por meio de tratamento térmico de têmpera seguido de revenido, conhecido como beneficiamento (RASMA, 2015).

O aço da série 4140, também conhecido como aço-cromo-molibdênio, é classificado como aço médio carbono ligado para beneficiamento. Este assume teores de carbono entre 0,3% e 0,5% em sua estrutura, explicando a classificação de ser considerado um aço de médio carbono (ROCHA apud RASMA, 2015).

Chegam a temperaturas de até 480°C, entretanto, valores acima disso, reduzem a resistência do material rapidamente (RASMA, 2015).

No diagrama de fases parcial Ferro-Carbono representado na figura 2 é considerado somente uma das duas regiões principais, de 0 a 2,1%C de carbono que é a área correspondente aos aços e a área com porcentagem acima desses valores, são considerados como ferro fundido. Sendo assim, a classificação segue conforme a ABNT NBR- 6215 (2011) da seguinte forma:

- Aços (ligas contendo até 2% de carbono):
 - Baixo Carbono: teor menor que 0,25% C;
 - Médio Carbono: teor entre 0,25 e menor que 0,6% C;
 - Alto carbono: teor acima de 0,6% C.

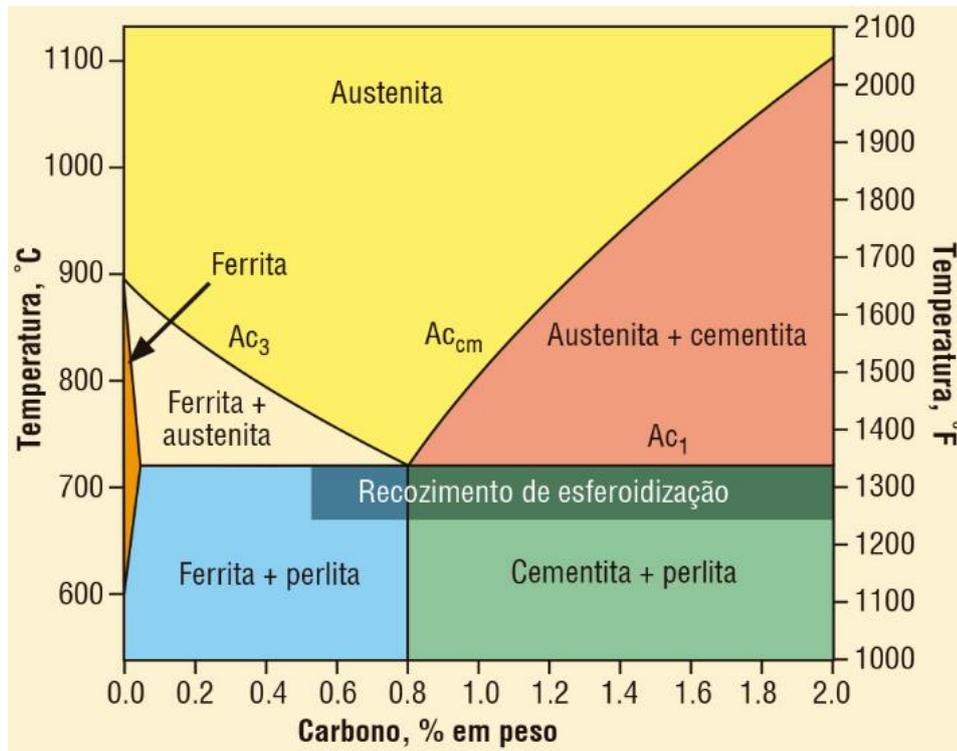


Figura 2 – Diagrama de fases parcial Ferro-Carbono.

(Fonte: Adaptada ASM Metal Handbook, 1991).

Observa-se na figura 2 que a estrutura formada pelo aço 4140 em função da sua quantidade de carbono que é de 0,4% C forma ferrita e perlita, nas condições de equilíbrio dilatadas pelo diagrama parcial Ferro-Carbono.

Este tipo de aço é uma liga metálica bastante usada em aplicações industriais, principalmente em indústrias de forjamento. A capacidade de encruar e a elevada tenacidade deste tipo de aço estão vinculadas aos elementos de liga adicionados, no caso o Cr e o Mo. Deste modo, o aço AISI 4140 tornou um dos metais mais importantes para as aplicações que requisitem resistência à deformação, tratamentos térmicos ou termoquímicos são comumente empregados para melhorar as propriedades mecânicas desse aço (CORREA, 2013).

Na tabela 1 pode se observar as porcentagens dos elementos que constituem o aço AISI 4140, conferindo-lhe resistência mecânica e dureza com ductilidade e tenacidade, onde são adicionados ao aço, elementos químicos como o cromo e o molibdênio.

A tabela 1 mostra a composição química de um aço AISI 4140.

Tabela 1 – Composição química de um aço AISI 4140 – Análise do produto.

(%)	C	Mn	P (máx)	S (máx)	Si	Cr	Mo
MIN	0,38	0,75			0,15	0,80	0,15
MAX	0,43	1,00	0,030	0,040	0,35	1,10	0,25

(Fonte: NBR NM 87/2000).

Obs.: A análise do produto é a que se efetua para determinar a composição química do aço de amostras tiradas do produto.

O cromo é um elemento que forma carbonetos estáveis e muito duros nos aços. Sua tendência de formar carbonetos é maior que a do manganês e menor que a do tungstênio. Ele é adicionado nos aços de baixa liga em teores da ordem de 0,8 % a 1,10 %. Tem um efeito moderado sobre a temperabilidade e endurece ligeiramente a ferrita por solução sólida. O cromo aumenta a temperatura de recristalização da ferrita trabalhada a frio (SOUZA, 2009).

Segundo Aguiar (2001), o molibdênio é um formador de carbonetos mais forte que o cromo e quando dissolvido na austenita tem grande efeito sobre a temperabilidade, aumentando-a fortemente. No revenimento, acima de 260°C, o molibdênio retarda muito a estrutura da martensita nos aços de médio e alto carbono. O molibdênio minimiza o efeito da fragilidade ao revenido. Esta função é realçada quando o aço contém cromo ou cromo-níquel ou nos aços ao manganês, o que auxilia a reduzir ou eliminar a tendência à fragilidade ao revenido.

As características mecânicas do aço AISI 4140 podem ser verificadas na tabela 2 onde é possível visualizar as tensões de ruptura e limite de escoamento, além da dureza e do alongamento máximo.

Tabela 2 – Tensões admissíveis de um aço AISI 4140.

AÇO	σ_R (MPa)	σ_E (MPa)	ALONGAMENTO (%)	DUREZA
AISI 4140 normalizado até 815°C	655	415	25,7	207 HV

(Fonte: ABNT NBR NM 87/2000).

Na tabela 2 pode ser observado que a taxa de escoamento (relação entre o limite de escoamento e o limite de ruptura) é igual a 0,63. Essa taxa é 21% maior que a apresentada pelo aço ASTM - A 36 que tem o limite de escoamento maior que os aços carbonos comuns.

Portanto o limite de ruptura do A-36 conforme ASTM é de 475 MPa e o limite de escoamento 250 MPa, que é o mais próximo do limite de ruptura, é que fornece uma região elástica proporcionalmente maior.

A figura 3 a seguir representa a comparação da resistência ao escoamento entre os aços AISI 4140 figura 3(a) e o aço A 36 figura 3(b).

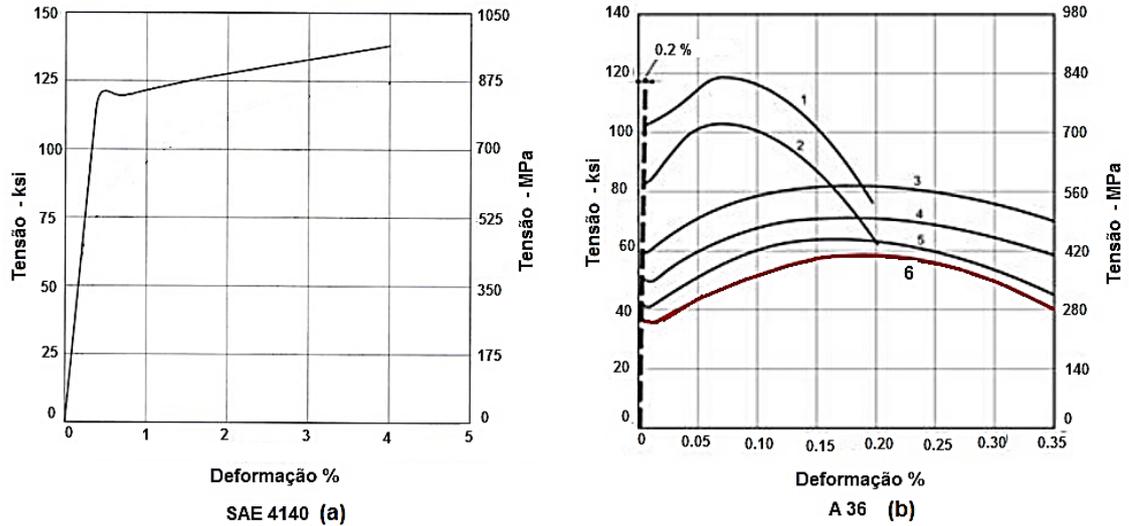


Figura 3 – Comparação entre o limite os limites de resistência ao escoamento dos aços SAE 4140 (a) e aço A36 (b).

(Fonte: Adaptado de ASM Internacional Atlas of stress, 2002).

E possível verificar na figura 3 (b) que a curva representada pelo número seis na cor vermelha (A 36), apresenta o limite de resistência de ruptura e escoamento feito em comparação com o aço AISI 4140.

3 SOLDAGEM

Denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é a conclusão deste processo (WAINER et al.,2013).

Indícios de soldagem foram encontrados na Pérsia, por volta de 4000 a.C. A história da soldagem mostra que desde as mais remotas épocas, muitos artefatos já eram confeccionados utilizando recursos de brasagem, sendo que alguns destes artefatos foram descobertos com mais de 4000 anos; a soldagem por forjamento também tem sido utilizada há mais de 3000 anos (MARQUES et al.,2009).

Na antiguidade e na Idade Média a soldagem foi um dos fatores preponderantes na fabricação de armas, instrumentos cortantes e no grande avanço na busca de melhorias do processo de fabricação industrial. Assim a soldagem foi, durante esse período, um processo importante na tecnologia metalúrgica devido à escassez e o alto custo do aço. A soldagem permaneceu como um processo secundário de fabricação até o século XIX, quando a tecnologia começou a mudar radicalmente (MARQUES et al. 2009).

3.1 Histórico da Soldagem

Com a eclosão da Segunda Guerra Mundial, e em função de sua maior utilização, a técnica da soldagem passou a ser mais utilizada nos processos de fabricação; pelos quais se submeteu a um grande impulso em sua tecnologia pelo desenvolvimento de novos processos e aperfeiçoamento dos já existentes (WAINER et al.,2013).

Segundo Wainer et al., (2013), a soldagem moderna começou a ser moldada a partir da descoberta do arco elétrico, bem como também pela sintetização do gás acetileno (C_2H_2) no século XIX, o que permitiu que se iniciassem alguns processos de fabricação de peças, utilizando estes novos recursos.

Dos vários processos existentes para soldagem, neste trabalho foi empregado o processo com eletrodo revestido (*“Shielded Metal Arc Welding”* – SMAW), ou simplesmente ER.

3.2 Soldagem do Aço AISI 4140

Para compreender a soldabilidade dos aços é necessário conhecer as várias transformações microestruturais que ocorrem nas diversas regiões da solda.

No caso da soldagem com passe único, a solda é geralmente dividida em três regiões:

- Zona fundida (ZF), constituída pelo metal fundido;
- Zona de ligação (ZL), constituída por uma estreita região onde ocorre uma fusão parcial do metal de base (MB), junto à zona fundida e;
- Zona afetada termicamente (ZAT), região do MB que sofreu alterações microestruturais causadas pelo calor da soldagem.

A ZAT é ainda subdividida em ZAT de grãos grossos (ZAT-GG), ZAT de grãos finos (ZAT-GF), ZAT intercrítica (ZAT-IC) e ZAT subcrítica (ZAT-SC). É possível verificar na figura 4 estas diversas regiões da solda (AGUIAR et al., 2002).

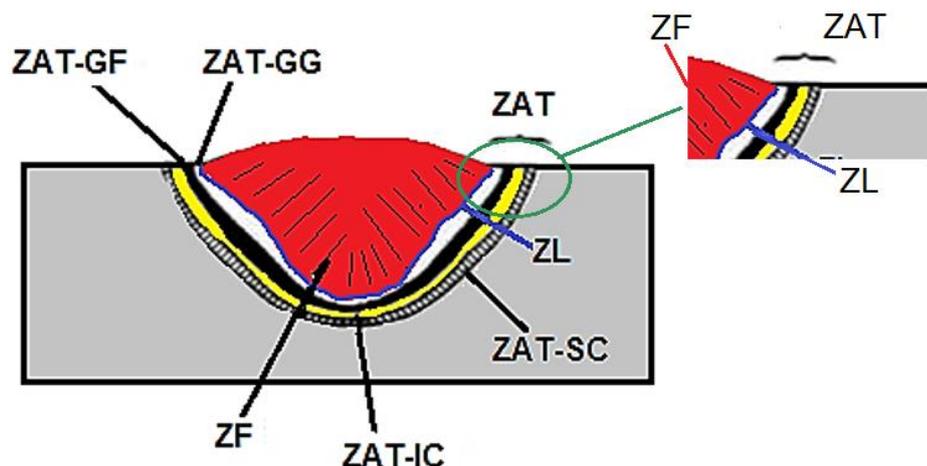


Figura 4 – Zonas de uma junta soldada – passe único em detalhes às três regiões da junta soldada.

(Fonte: Adaptado de Aguiar, 2002).

A figura 4 representa de forma objetiva, as zonas afetadas termicamente de uma solda com passe único, conforme suas características de transformações microestruturais.

Além da soldagem do passe único existe também a soldagem de multipasse onde nesse caso é muito mais complexo devido à causa da presença de zonas reaquecidas dentro da zona fundida, assim o refino parcial da microestrutura pelo passe subsequente aumenta a heterogeneidade na microestrutura e das propriedades mecânicas da peça a ser soldada. Dentro da zona fundida o pico de

temperatura excede o ponto de fusão do material de base e a composição química do mesmo, que dependerá da escolha dos consumíveis, da taxa de diluição do MB e das condições de soldagem. (AGUIAR et al., 2002).

A taxa de diluição da solda é a modificação da composição química do metal de adição causada pela parcela do metal de base, que sofreu fusão e passou a compor a zona fundida, mensurada pela porcentagem do metal de base que participa na formação do cordão de solda. Assim a diluição é avaliada para determinar a composição química do metal de solda e posteriormente tentar prever a microestrutura resultante e as suas propriedades (FILHO et al., 2010).

Na região da zona fundida há alta velocidade de resfriamento e de solidificação da soldagem, os elementos de liga e as impurezas podem segregar para as regiões interdendríticas ou intercelulares e para o centro da solda, resultando numa composição química localmente heterogênea. Com isso, o comportamento da transformação do metal de solda pode ser bastante diferente do MB (AGUIAR et al., 2002).

A qualidade metalúrgica do cordão de solda é inferior ao metal de base. Isso decorre da presença de tensões residuais, deformações na solda, alterações metalúrgicas, mecânicas e possíveis descontinuidades. Devido a essas características, o metal de solda e suas regiões adjacentes, a zona afetada termicamente (ZAT), apresenta reduzida tenacidade à fratura em comparação com o MB, sendo, conseqüentemente, mais susceptível às fraturas (MOREIRA, 2008).

A composição química da zona afetada termicamente permanece inalterada por uma larga faixa, onde o pico de temperatura não atingiu o ponto de fusão do metal de base. Todavia, ocorre uma mudança considerável na microestrutura durante a soldagem devido ao severo ciclo térmico. O metal imediatamente vizinho à zona fundida é aquecido dentro do campo austenítico onde, os precipitados que se formam em processos anteriores, são geralmente dissolvidos (AGUIAR et al., 2002).

Desta forma, o papel de evitar o crescimento do grão da austenita em temperaturas elevadas (efeito cinturão), deixando de existir e a austenita experimenta um substancial crescimento de grão, produzindo a região grosseira da zona afetada termicamente. O tamanho médio do grão austenítico, que é função do pico de temperatura atingido, decresce com o aumento da distância da zona fundida. Devido à variação das condições térmicas com a distância da zona de ligação, a

ZAT, como foi dito, é composta da ZAT-GG, da ZAT-GF, da ZAT-IC e da ZAT-SC (AGUIAR et al., 2002).

A figura 5 mostra a correlação das várias regiões de uma junta soldada e suas respectivas temperaturas no diagrama ferro carbono. Observa-se também que o MB está situado nas temperaturas entre 400°C e 600°C enquanto a ZAT que varia de 600°C a 1400°C.

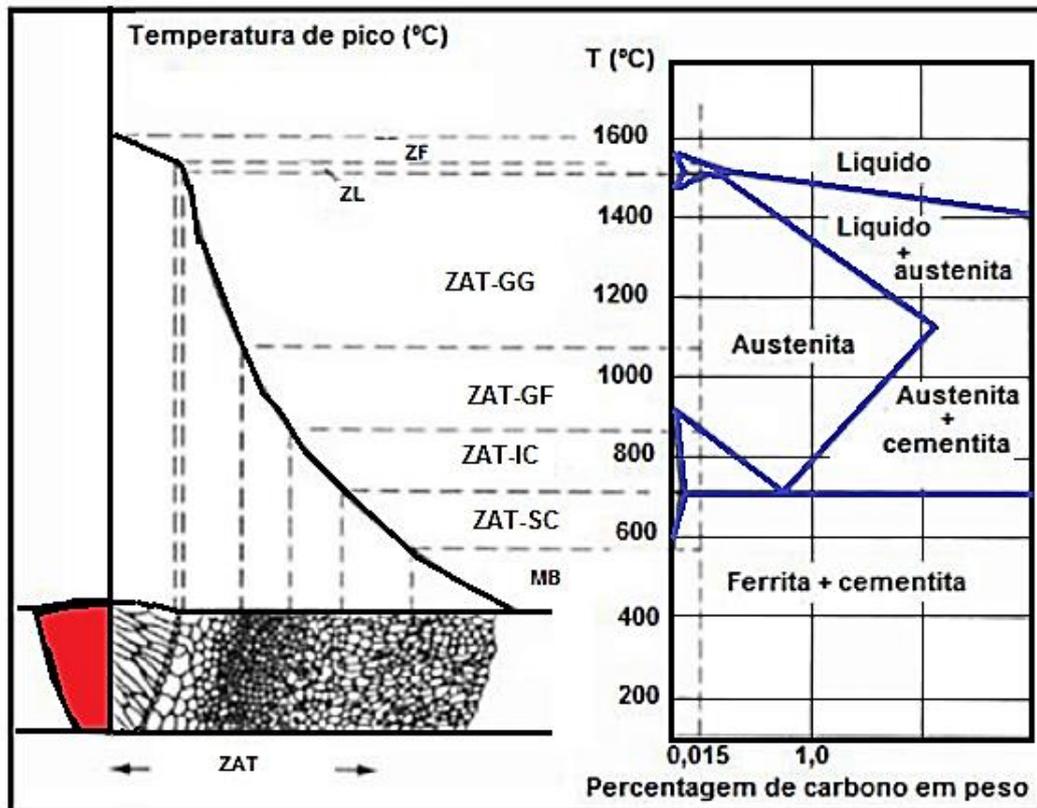


Figura 5 – Correlação entre as zonas de soldagem e suas respectivas temperaturas no diagrama ferro-carbono.

(Fonte: Adaptado de Aguiar, 2002).

Observa-se que na figura 5 as regiões definidas estão conforme, as suas características e com relação à temperatura:

ZF – Zona fundida (1600°C) o metal está líquido.

ZAT – GG - Região de crescimento de grão (1100 a 1500°C).

ZAT – GF – Região de refino de grãos – (830 a 1100°C).

ZAT – IC – Região intercrítica – (700 a 830°C).

ZAT – SC – Região subcrítica – (580 a 727°C) - Quando a temperatura de pico se torna menor.

Segundo K uchler (2009), num ponto da ZAT logo al em da poça de fusão a temperatura aumenta rapidamente a um nível próximo a da poça de fusão e diminui rapidamente produzindo um efeito como o da têmpera.

Ainda segundo K uchler (2009), esta região torna-se austenítica durante o aquecimento e pode formar martensita quando se resfria.

Na soldagem multipasse a situa o   mais complexa devida a presença de zonas reaquecidas. O refino parcial, devido aos passes subsequentes, aumenta a homogeneidade das várias regiões com respeito   microestrutura e as propriedades mecânicas, a reaustenitiza o e o reaquecimento subcrítico, que podem ter um efeito profundo na microestrutura e nas propriedades na ZAT (BUENO, 1999).

Dentro desse raciocínio,   importante o estudo da região soldada usando como ferramenta o diagrama de transforma o de resfriamento contínuo (TRC), que   um instrumento utilizado para a visualiza o da temperabilidade dos aços. Pelo previsto a presença de certas fases na microestrutura final de uma solda, justifica a sua utiliza o, pois as características mecânicas da região soldada são similares   curva TRC do aço, comparada com a curva TRC da solda (AGUIAR, 2001).

A figura 6 mostra as diversas curvas de resfriamento traçadas sobre o diagrama TRC do aço ABNT 4140 (AGUIAR, 2001).

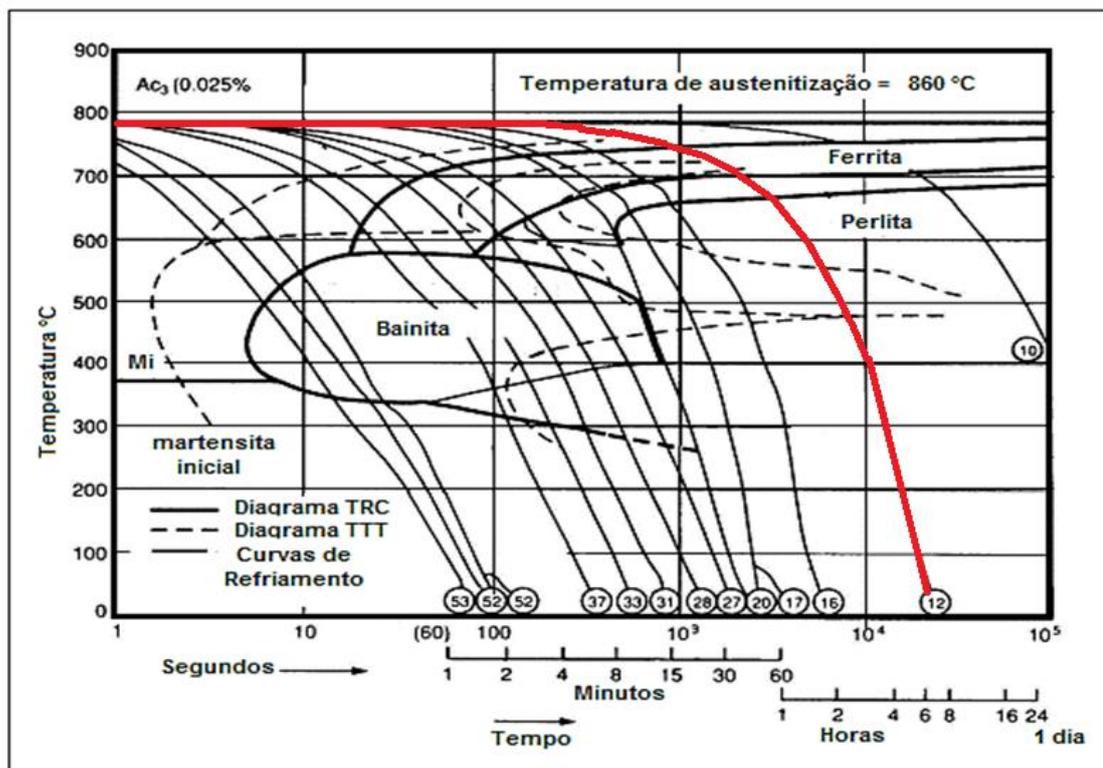


Figura 6 – Diagrama de TRC do aço AISI 4140.

(Fonte: Aguiar, 2001).

A posição do diagrama TRC é um indicativo da temperabilidade do aço, conseqüentemente, da sua soldabilidade. Quanto mais para a direita o diagrama estiver posicionado mais fácil será a formação de martensita, portanto, pior a soldabilidade. Os fatores que influenciam na posição do diagrama TRC são: a composição química, o tamanho do grão da austenita e a sua homogeneidade. Sabe-se que as composições químicas, com exceção do cobalto, todos os elementos tradicionalmente utilizados na fabricação dos aços, deslocam o diagrama para a direita, aumentando o tempo de incubação da austenita, logo, retardando o início de transformação em produtos como ferrita e perlita, facilitando, assim, a formação de martensita (AGUIAR, 2001).

Segundo Aguiar (2001), os contornos de grãos constituem um local preferencial para a nucleação de temperabilidade do aço. Este fato justifica a facilidade da ZAT-GG de formar martensita. A homogeneidade da austenita também tem um papel importante na posição do diagrama TRC. Uma austenita heterogênea, ou seja, com carbonetos, carbonitretos, nitretos, óxidos e sulfetos não dissolvidos, apresenta um tempo de incubação menor, pois, estas heterogeneidades funcionam como sítios para a nucleação da ferrita.

O resfriamento rápido tem o mesmo efeito dos elementos que aumentam a temperabilidade. O oposto ocorre quando uma baixa velocidade de resfriamento atua num determinado ponto da solda, favorecendo a nucleação de ferrita em sítios existentes, diminuindo, assim, a possibilidade de formação de martensita. Pelo fato da velocidade de resfriamento variar de ponto a ponto na ZAT e que cada curva de resfriamento cruza o diagrama em locais específicos, a ZAT apresenta microestruturas diferentes em cada ponto. Próximo a linha de fusão, as microestruturas prováveis são martensita e bainita, isso se o aço tiver uma composição adequada e não simplesmente um carbono equivalente adequado (AGUIAR, 2001).

4 TENSÕES RESIDUAIS

Tensões residuais são aquelas que permanecem na peça quando todas as suas solicitações externas são removidas. Essas tensões aparecem frequentemente em peças submetidas a diferentes processamentos térmicos ou mecânicos (fundição, soldagem, laminação, forjamento, usinagem, dobramento, têmpera, etc.) e representam um grande potencial para a formação de trincas, falta de estabilidade dimensional e à tendência de fratura frágil, diminuindo a vida útil do componente, além de comprometer seu comportamento (MARQUES et al., 2012).

Em geral, essas tensões quando são compressivas na superfície de uma peça elas aumentam a vida do componente mecânico, quando solicitado por cargas cíclicas. O oposto ocorre com as tensões residuais de tração (TOTTEN et al., 2003).

O caráter a ser estudado é o da deformação, que pode ser elástica ou plástica. Quando elástica, as tensões residuais atingem, no máximo, a tensão de escoamento local do material e quando forem plástica elas ultrapassam esse limite, e quando plásticas, as tensões podem ser aliviadas aquecendo-se o material até uma temperatura próxima a tensão de escoamento que seja igual ou inferior às tensões residuais presentes no material. Neste caso as tensões residuais irão causar deformações plásticas e serão aliviadas (DONATO, 2008).

As tensões residuais podem ser divididas em macrotensões e microtensões, de acordo com as distâncias que elas se apresentam com significantes variações. A primeira varia de forma contínua e suave ao longo de grandes porções volumétricas do corpo, e a última mantém uma distribuição acentuada ao longo de um grão ou partículas. Essas duas condições das tensões residuais são consequência de deformações plásticas heterogêneas causadas por forças externas, e no processo de conformação a frio, são referidas principalmente como macrotensões (RODRIGUES, 2007).

4.1 Tensões Residuais na Soldagem

Tensões residuais de soldagem são consequências da variação heterogênea de temperatura no material decorrentes da realização na soldagem. Neste contexto, as etapas de aquecimento e resfriamento são de suma importância. Se uma peça for aquecida e resfriada de modo uniforme e não existirem restrições as suas variações

dimensionais (dilatação e contração), essas não resultam em efeitos mecânicos na peça, isto é, após o ciclo térmico não deverão apresentar nenhuma tensão residual ou distorções (COFIÑO, 2010).

Ainda neste raciocínio, as tensões residuais em soldagem são tensões presentes sem a atuação de forças ou momentos externos, formadas durante o processo de soldagem, devido ao resfriamento e como consequência das deformações temporárias, locais, de magnitude macroscópica e microscópica do cordão de solda na ZAT e no MB.

Uma maneira de visualizar o desenvolvimento de tensões internas em uma peça soldada é representada na figura 7.

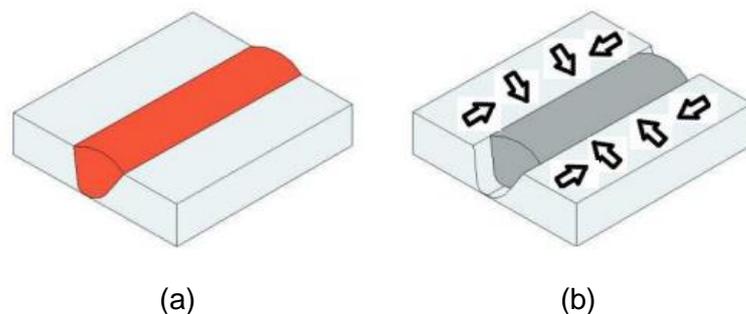


Figura 7 – Volume ocupado pelo metal de adição: (a) no estado líquido e (b) na temperatura ambiente. (Fonte: Figura adaptada pelo Autor, 2016).

Nesta figura, é possível observar que no instante em que o material foi depositado em um corpo de prova, o metal de adição aquecido no estado líquido ocupa um determinado volume representado na figura 7(a), a mesma quantidade de material sólido exposto a uma temperatura ambiente, representado pela figura 7(b), ocupa somente uma parte deste volume. Assim, no final deste processo, o material foi preenchido na sua totalidade como apresentado inicialmente, caracterizando assim as condições de intensidade, de tensão e deformação produzidas na peça. As setas da figura 7(b) representam os sentidos das deformações que ocorrem no momento do resfriamento.

Durante a soldagem, as tensões residuais podem ser desenvolvidas devido ao aquecimento e resfriamento não uniformes de uma pequena área, acompanhado dos gradientes térmicos que surgem entre a superfície e o núcleo da junta. Além disso, a transformação de fase que ocorre no metal de solda e na zona afetada pelo calor contribui para a evolução da tensão residual (HEINZE et al., 2011).

Outra forma de representar as regiões de tensão residuais que ocorrem no momento de uma soldagem é através de gráficos comparativos, que relacionam tensões residuais em direções longitudinais ao longo da direção transversal de uma solda. Assim, a figura 8(a) representa uma comparação entre tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras, com o comportamento de uma solda de topo na região de fusão de tração (σ_x) e compressão, representada pela figura 8(b).

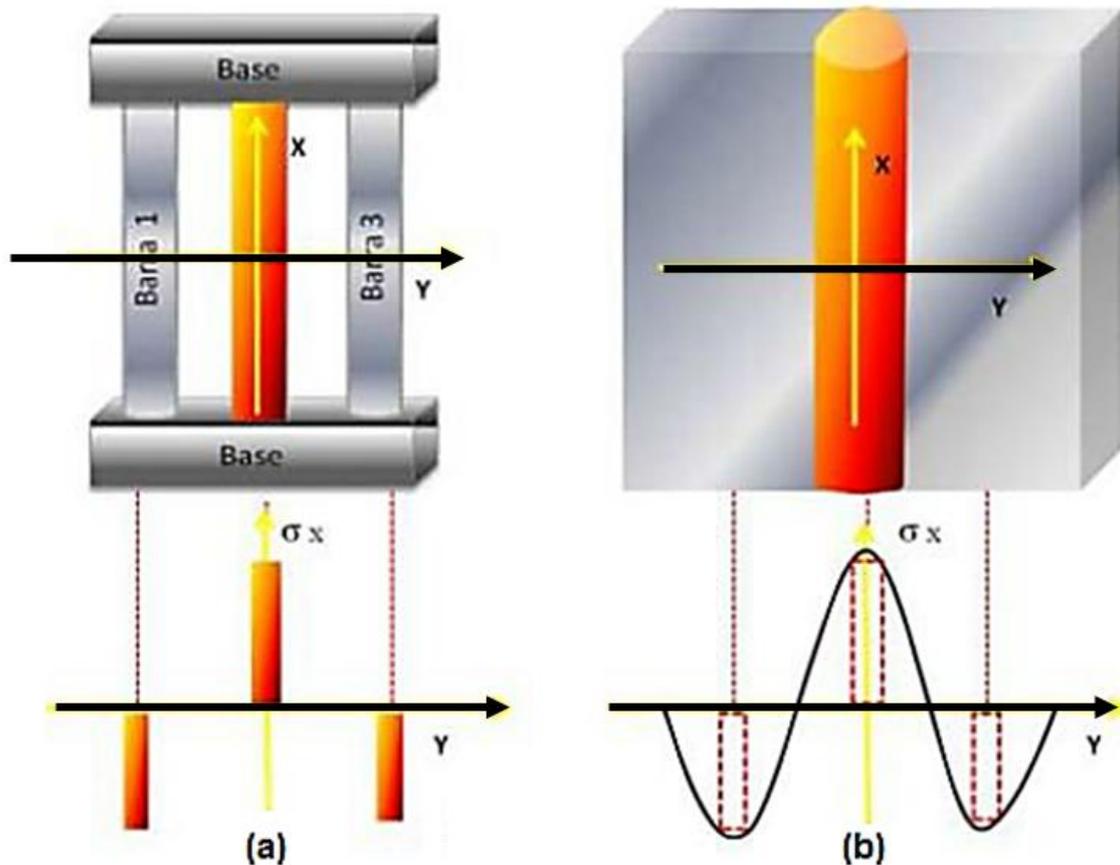


Figura 8 – Comparação entre as tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras (a) e as tensões longitudinais ao longo da direção transversal (y) em uma solda de topo (b).
(Fonte: Martins, 2014 e Marques et al 2012).

Por este raciocínio, pode-se esperar como consequência em uma soldagem, o desenvolvimento de tensões residuais de tração, na região da solda e de tensões de compressão no metal de base, conforme mostra a figura 8.

4.2 Cálculo das Tensões residuais no Processo de Soldagem

As tensões residuais existentes em um componente podem ser calculadas por várias equações, desenvolvidas experimentalmente. As equações do carbono equivalente (CE) foram as primeiras a serem utilizadas para estimar a

susceptibilidade das trincas do aço no processo de soldagem e também determinar a necessidade de pré-aquecimento e pós-aquecimento para evitar estas trincas. Estas equações contemplam os efeitos de diversos elementos químicos, presentes na liga, na temperabilidade do aço.

O *International Institute of Welding* – IIW propôs a Equação (1) para o carbono equivalente:

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni+Cu}{15} + \frac{Cr+Mo+V}{5} \quad (1)$$

Sendo:

CE_{IIW} = Carbono equivalente segundo o *International Institute of Welding*;

C = Carbono;

Mn = Manganês;

Ni = Níquel;

Cu = Cobre;

Cr = Cromo

Mo = Molibdênio;

V = Vanádio.

Observando a formulação do carbono equivalente apresentada na Equação (1), percebe-se que o carbono é o elemento que mais afeta a soldabilidade do aço, pois é o único elemento que na expressão o denominador é igual a 1, enquanto nos demais, o denominador é maior que um.

O diagrama de Graville, representado na figura 9, mostra a susceptibilidade a trincas induzidas por hidrogênio em função da conjunção entre o teor de carbono e do carbono equivalente (GRAVILLE apud AGUIAR, 2001).

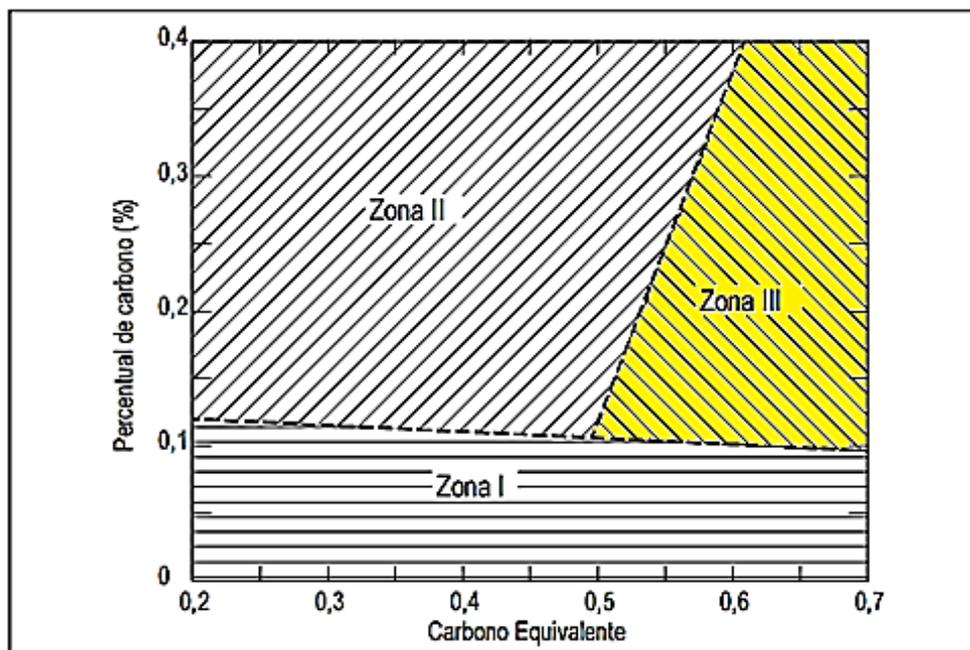


Figura 9 – Diagrama de Graville.

(Fonte: Adaptado de Graville apud Aguiar, 2001).

O diagrama de Graville é uma ferramenta usada para avaliar a necessidade do tratamento térmico após soldagem, baseada no conceito da composição química e da porcentagem de carbono e do CE do metal de base, representado por três zonas distintas: zona I, zona II e zona III (ZALAZAR, 2013).

Na zona I, que é a dos aços de baixo carbono e baixa temperabilidade, encontram-se os materiais não muito susceptíveis a trincas induzidas. Na zona II os aços têm carbono mais alto que os da zona I, mas apresentam, ainda, baixa temperabilidade, sendo, portanto, possível evitar microestruturas sensíveis a trincas pelo controle do resfriamento da ZAT. Isso pode ser alcançado por meio do controle da energia de soldagem e da utilização de preaquecimento. Na zona III, destacado na cor amarelo, os aços têm carbono e temperabilidade alta, podendo facilmente produzir microestruturas sensíveis às trincas. Para se evitar as trincas induzidas nessa zona, devem-se usar processos de preaquecimento e tratamento térmico pós-soldagem (ASM METALS HANDBOOK, 1993).

O aço AISI 4140 se situa na zona III do diagrama de Graville, indica que a soldagem necessita de cuidados especiais visto que a possibilidade de formação de martensita na ZAT-GG é grande, em decorrência das elevadas temperaturas de austenitização e das altas velocidades de resfriamento desenvolvidas na soldagem (AGUIAR, 2001).

4.3 Determinação Experimental das Tensões Residuais

Deve-se ter cuidado na escolha da técnica de medição de tensão residual na qual será necessário saber qual o tipo de tensão é importante ao projeto do componente para melhorar seu desempenho ou assegurar-se de uma integridade estrutural. Como consequência, um comportamento inesperado pode não ser devido a medidas erradas de tensões, mas devido à medição do tipo errado de tensão pela escolha inadequada da técnica (COFIÑO, 2010).

Existem vários métodos para a medição das tensões residuais, entretanto somente alguns são utilizados na prática, em componentes que podem apresentar pequenas ou grandes dimensões, como corpos de prova, pontes e aviões. Estes podem ser destrutivos, semi destrutivos ou não destrutivos e em nenhum deles a tensão desejada é medida diretamente. A análise obtém o valor de deformação elástica do material, e através de fórmulas provenientes da teoria da elasticidade a tensão residual correspondente é calculada (MARQUES et al., 2012).

Cada método apresenta suas aplicações, características, limitações e peculiaridades, e os principais parâmetros que devem ser levados na escolha da técnica de medição são: a natureza do componente, tipo de tensões residuais, gradiente de tensões residuais, geometria do componente e o custo final da medição (COFIÑO, 2010).

As técnicas de relaxação de tensões são baseadas na medida da deformação elástica que ocorre quando uma parte de um corpo de prova contendo tensões residuais é removida. A mudança de forma resultante da deformação pode ser medida por diferentes sensores. Assim, dependendo do tipo de sensor usado, de sua forma de colocação e de remoção do material, diferentes técnicas são definidas. Quando sensores elétricos (extensômetros) ou mecânicos são usados, as deformações elásticas associadas à remoção de material podem ser determinadas quantitativamente e com a aplicação de equações da teoria da elasticidade, as tensões residuais inicialmente existentes no material podem ser determinadas. Embora sejam técnicas destrutivas, estas são as mais usadas para a determinação experimental de tensões residuais (MARQUES et al., 2012).

O quadro 2, apresenta diversas técnicas que podem ser utilizadas para a determinação de tensões residuais em soldas.

Quadro 2 – Técnicas para a determinação experimental de tensões residuais.

GRUPO	TÉCNICA
Técnica de relaxação de tensão	Técnicas com extensômetros elétricos.
	Técnicas com extensômetros mecânicos.
	Técnicas com revestimentos frágeis.
	Técnicas com revestimentos fotoelásticos.
Técnica de difração de raios X	Difração em filme.
	Difração com difratômetro.
Técnicas baseadas em propriedades sensíveis a tensão	Técnicas com ultrassom.
	Técnicas com medidas de dureza.
	Técnicas com propriedades magnéticas.
Técnicas de fissuração	Fissuração pelo hidrogênio.
	Fissuração por corrosão sob tensão.

(Fonte: Marques et al 2012).

Os métodos de medição de tensão residual e a sua seleção dependem de vários elementos, entre eles os que estão relacionados à natureza do campo de tensões, ao tipo de tensões (macroscópicas, microscópicas ou submicroscópicas), ao tempo e recurso disponíveis, à incerteza necessária na medição, da geometria da região (profundidade, geometria e forma) e ao local de medição (em campo ou no laboratório).

As várias técnicas de medição de tensões residuais podem ser classificadas em métodos semi destrutivos, destrutivos e não destrutivos, conforme mostrado no quadro 3.

Quadro 3 – Principais métodos de medição de tensões residuais.

DIVISÃO	MÉTODO	OBSERVAÇÕES
Semi destrutivos	Furo cego	Execução de um furo, alívio localizado de tensão
Destrutivos	Remoção de camadas (deflexão)	Camadas retiradas por ataque químico, pode estar aliada ao método de difração de raios-X (método não destrutivo)
	Seccionamento	Cortes parciais longitudinais ou transversais ao eixo de peças assimétricas
Não destrutivos	Difração de raios-X	Variação das distâncias entre os planos atômicos
	Difração de nêutrons	Análogo ao método de raios-X, no entanto, com maior profundidade de penetração
	Ultrassom	Variação da velocidade de ondas ultrassônicas no interior do material
	Magnético	Relação entre propriedades magnética

(Fonte: Adaptado de Suterio, 2005).

Conforme verificado no quadro 3, em destaque, o furo cego, enquadra-se na divisão dos métodos de ensaios semidestrutivos, definido como um ensaio localizado e que foi utilizado neste trabalho.

4.4 Controle e Alívio de Tensões Residuais

O nível de tensões residuais em uma junta soldada pode ser diminuído reduzindo-se a quantidade de calor fornecido à junta ou a quantidade de metal depositado. Isto pode ser feito, otimizando o desenho do chanfro e reduzindo o ângulo do chanfro ou usando preparações simétricas e evitando deposição dos cordões de solda em excesso, evitando assim o reforço excessivo em soldas de topo ou minimizando o tamanho das soldas de filete (MARTINS, 2014).

A seleção de processos de maior eficiência térmica (fonte de maior intensidade) é uma possível alternativa de controle, mas difícil de ser justificável economicamente em muitos casos. Para a soldagem de alguns tipos de aços, metais de adição que sofrem transformação martensítica a uma temperatura suficientemente baixa, estes métodos podem ser usados, pois a formação de

martensita vem acompanhada por um aumento de volume que contrabalança a contração do material e, assim, reduz o nível de tensões residuais (MARQUES et al., 2012).

Após a soldagem, as tensões podem ser aliviadas em uma peça ou estrutura por métodos térmicos ou mecânicos, alguns, apresentados no quadro 4.

Quadro 4 – Métodos para aliviar tensões residuais.

PROCEDIMENTO		DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICAS	LIMITAÇÕES
Mecânico	Vibração	Vibrações são aplicadas na estrutura causando uma ressonância baixa o que ocasiona deformação plástica parcial da estrutura e alívio de tensões.	Operação simples.	Inadequado para chapas grossas ou grandes estruturas. Alívio de tensões não é uniforme.
Térmico	Recozimento para alívio de tensões	Aquecimento a 600 - 700°C (aços ferríticos) ou 900°C (aços austeníticos) seguido de resfriamento lento. Pode ser local ou total.	Muito utilizado e bastante eficiente	Inaplicável para grandes estruturas e difícil de ser executado no campo. Custo elevado.

(Fonte: Adaptado de Marques et al., 2012).

No quadro 4 observa-se que o procedimento de vibração, é considerado um processo mecânico, enquanto que o recozimento, um processo térmico.

Ainda nesse quadro, a representação dos principais métodos para aliviar as tensões residuais em uma peça soldada foi definida por sua característica e limitações. Nesse trabalho foi utilizado o método de alívio de tensão por vibração.

Estes métodos apresentados se baseiam em permitir a deformação permanente localizada do componente que possui tensões residuais, reduzindo ou eliminando as variações dimensionais responsáveis pela existência das tensões residuais. No caso do uso de métodos térmicos, a elevação da temperatura leva a uma redução do limite de escoamento do material facilitando a sua deformação plástica. Além disto, dependendo da temperatura e do tempo de tratamento, a deformação por fluência pode ocorrer no material, contribuindo para o alívio de suas tensões residuais. Os métodos mecânicos se baseiam em facilitar o escoamento plástico localizado pela aplicação de alguma forma de carregamento mecânico (MARQUES et al. 2012).

5 TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES

Tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) é corresponde a um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os materiais, em condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera do ambiente e velocidade de resfriamento. Esse tipo de tratamento tem como finalidade, alterar as propriedades mecânicas do material de maneira que seja reduzida a dureza superficial e o limite de resistência, dentre outras propriedades. Em contra partida, por exemplo, ele promove o aumento da ductilidade e o limite de fadiga (CHIAVERINI, 2008).

O TTAT aplicado em uma junta soldada tem como objetivo a redução dos níveis de tensão residual. Na figura 10, é mostrada a localização no diagrama de ferro-carbono onde ocorre o recozimento subcrítico. O recozimento subcrítico também é conhecido como alívio de tensões.

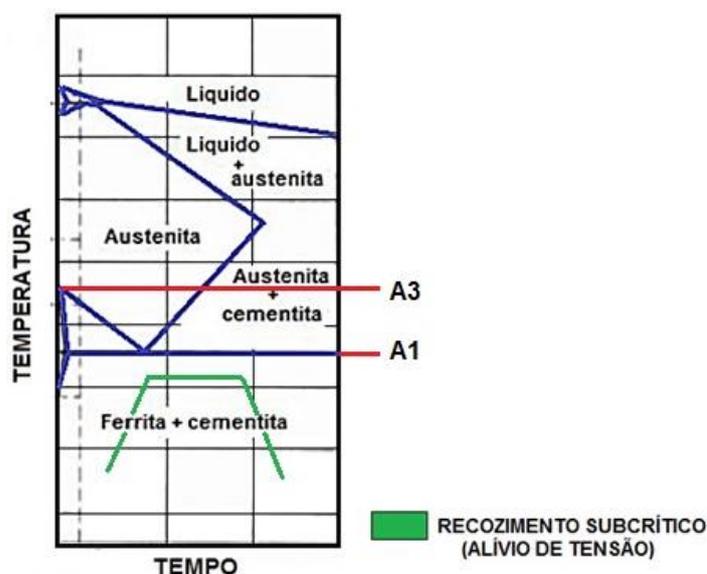


Figura 10 – Diagrama de fases parcial ferro-carbono - localização do recozimento subcrítico.
(Fonte: Elaborada pelo Autor, 2016).

Observa-se nesta figura, que o alívio de tensão ocorre abaixo da linha A1, do diagrama ferro-carbono. O alívio de tensão representado pela cor verde na figura 10 está mais bem detalhado na figura 11 onde mostra os parâmetros de TTAT para um aço AISI 4140.

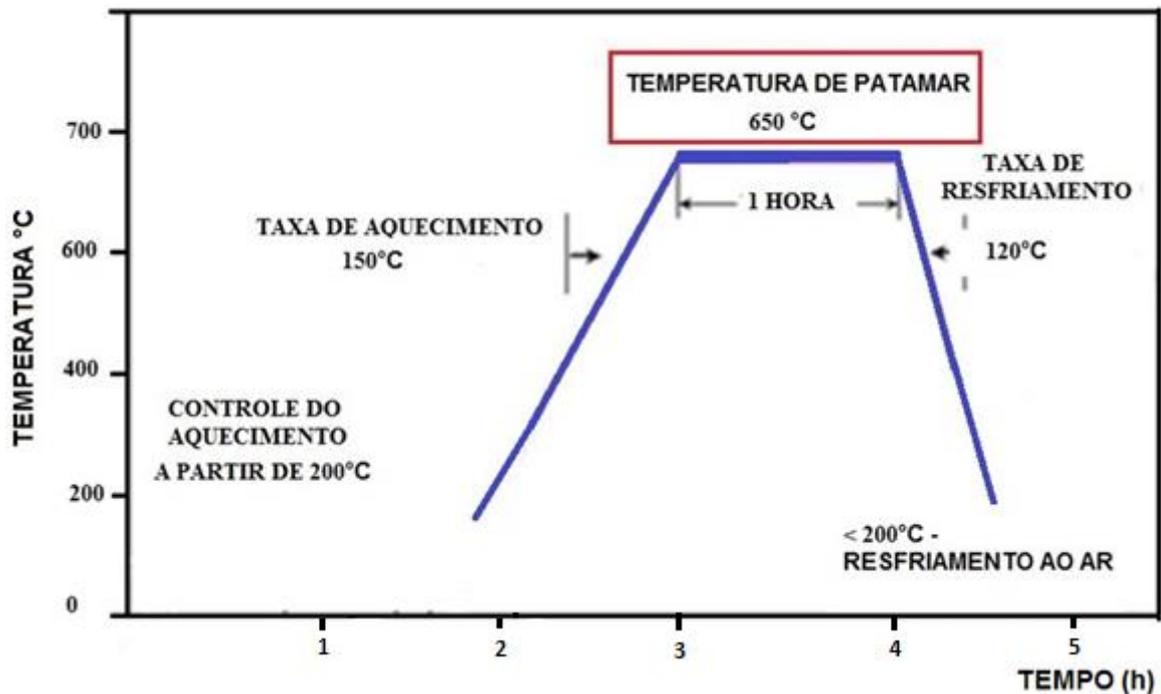


Figura 11 – Parâmetros de TTAT para o aço AISI – 4140.
(Fonte: ASME B31. 3-2014, Adaptada pelo Autor, 2016).

O TTAT para o aço AISI 4140 consiste no aquecimento de uma peça de maneira uniforme com velocidade de aquecimento igual a 150°C/h, seguido de manutenção na temperatura de 650°C por uma hora a cada 25 mm da maior espessura da peça, com posterior resfriamento de controle até a temperatura de 200°C e após isso, o resfriamento é até a temperatura ambiente conforme representação esquemática da figura 11.

6 TRATAMENTO POR VIBRAÇÕES SUB-RESSONANTES

Qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração ou oscilação. O balançar de um pêndulo e o movimento de uma corda dedilhada são exemplos típicos de vibração. A teoria de vibração trata do estudo de movimentos oscilatórios de corpos e as forças associadas a eles (RAO, 2008).

Mais recentemente, muitas investigações foram motivadas pelas aplicações da vibração na área da engenharia, como projetos de máquinas, fundações, estruturas, motores, turbinas e sistemas de controle (RAO, 2008).

A aplicação de vibração em uma peça, com uma determinada frequência e amplitude de oscilação faz com que o corpo vibre com uma determinada amplitude. Ao atingir a frequência natural, que é aquela representada pelo pico de ressonância, mostrada na figura 12, a amplitude de vibração aumenta e diz que o corpo entrou em ressonância (HEBEL, 1989).

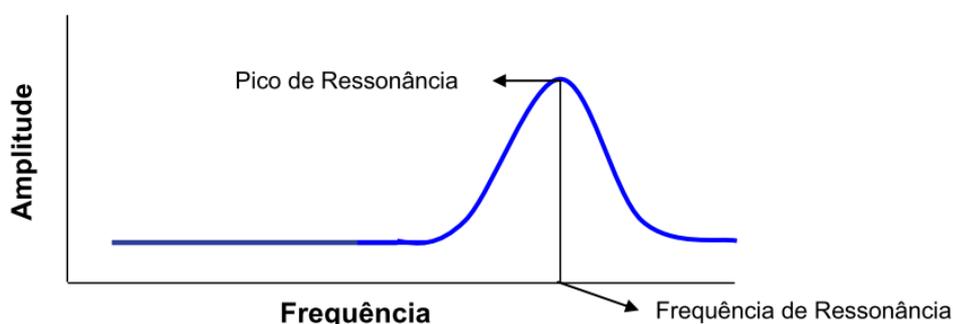


Figura 12 – Curva típica de ressonância.
(Fonte: Martins, 2014).

Observa-se na figura 12, que a aplicação da frequência de ressonância é mantida por um determinado tempo, onde não apresenta mais alteração na curva e conseqüentemente, haverá redução de tensões residuais.

6.1 Alívio de tensões por vibrações

O tratamento por Vibrações Sub-ressonantes ou Sub-harmônicas é a indução de movimento atômico acelerado em um material para a remoção de tensões internas. Esta técnica pode ser comparada ao "Envelhecimento Natural" (tratamento de alívio de tensões por oxidação ao tempo por longo período), pois, em ambas, não ocorrem os efeitos nocivos da aplicação de calor, como a escamação, a perda de

dureza ou a redução das propriedades mecânicas, ocorridos nos tratamentos térmicos convencionais (ALBERTO, 2016 e MARTINS, 2014).

O alívio de tensões por meio de vibrações teve início como testes de fadiga que ocorreram na Segunda Guerra Mundial. Nessa época o Departamento de Defesa da Alemanha e a Marinha dos Estados Unidos aplicavam vibração ressonante para tentar quebrar asas de aviões e cascos de navios. A ideia por trás desses testes é que se não houvesse fratura nos testes, não existiria fratura em serviço. Estes testes permitiram que se pudesse aventar a possibilidade de usar as vibrações para eliminar as tensões residuais de peças soldadas e fundidas de uma maneira diferente do tratamento térmico até então conhecido (MARTINS, 2014).

No início da década de 1960 várias empresas entre elas, a Battelle Memorial e a Grumman Aerospace, investiram em pesquisas relacionadas à aplicação de vibração mecânica para eliminação de tensões, pois já era de conhecimento a possível eliminação de tensões em peças fundidas e soldadas usando a vibração (MARTINS, 2014).

August George Hebel Jr. e August George Hebel III, da empresa americana Bonal Technologies Inc., também iniciaram o desenvolvimento de pesquisas neste campo. Eles chegaram à conclusão que a aplicação da frequência de ressonância não era realmente eficaz para o alívio de tensões. Nesse ponto, o que se consegue obter uma eficácia de 40% dos resultados encontrados com o alívio térmico tradicional (HEBEL, 1989).

Esses mesmos pesquisadores conseguiram isolar os fatores críticos dos testes e formaram a base do uso efetivo da vibração para executar um alívio de tensões com resultados consistentes.

Para o uso da vibração como tratamento para o alívio de tensões os fatores críticos são: a frequência de ressonância e a estabilização da curva de ressonância após tratamento.

Segundo Hebel (1989), a frequência ideal para este propósito está abaixo da frequência de ressonância na zona conhecida como Sub-harmônica ou Sub-ressonante. A figura 13 mostra a localização da zona sub-harmônica, descrita por Hebel.

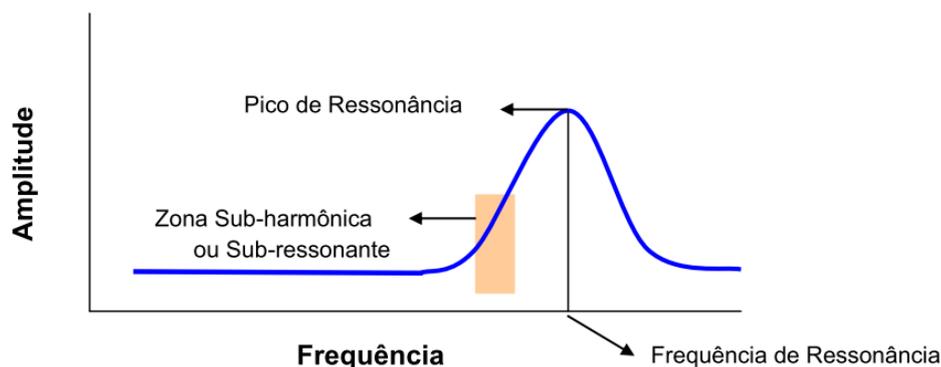


Figura 13 – Zona sub-harmônica ou sub-ressonante.

(Fonte: Adaptado de Skinner, 1987).

O aprofundamento teórico desta nova tecnologia se iniciou em 1987 com um estudo de Richard Skinner, apresentado no artigo "*An Investigation into the Theory Behind Subresonant Stress Relieve*" (Um Estudo sobre a Teoria do Alívio de Tensões Sub-ressonante), Skinner trabalhava na Lockheed Missiles and Aerospace e buscava o desenvolvimento da vibração como forma de alívio de tensões em peças de aço, alumínio e titânio. Neste estudo foi avaliado detalhadamente, cada parte da curva de ressonância mostrada na figura 13 e como ocorre a dissipação da energia em função da frequência aplicada.

A energia dissipada é entendida como a quantidade de tensões internas contidas na peça que foi removida. Segundo Skinner, a região sub-harmônica utilizada nesta tecnologia é a que possui maior capacidade de atuação neste sentido (SKINNER, 1987).

A figura 14 apresenta três curvas de histerese (tensão *versus* deformação), para três frequências diferentes as quais estão definidas como: fbr, fml e frp.

Definidas conforme a sequencia a seguir:

- fbr - é definida como frequência antes da ressonância, que apresenta um grau médio de histerese;
- fml - frequência sub-ressonante, que exibe um grau de histerese alto;
- frp - frequência do pico de ressonância que expõe um grau menor, em comparação com as demais.

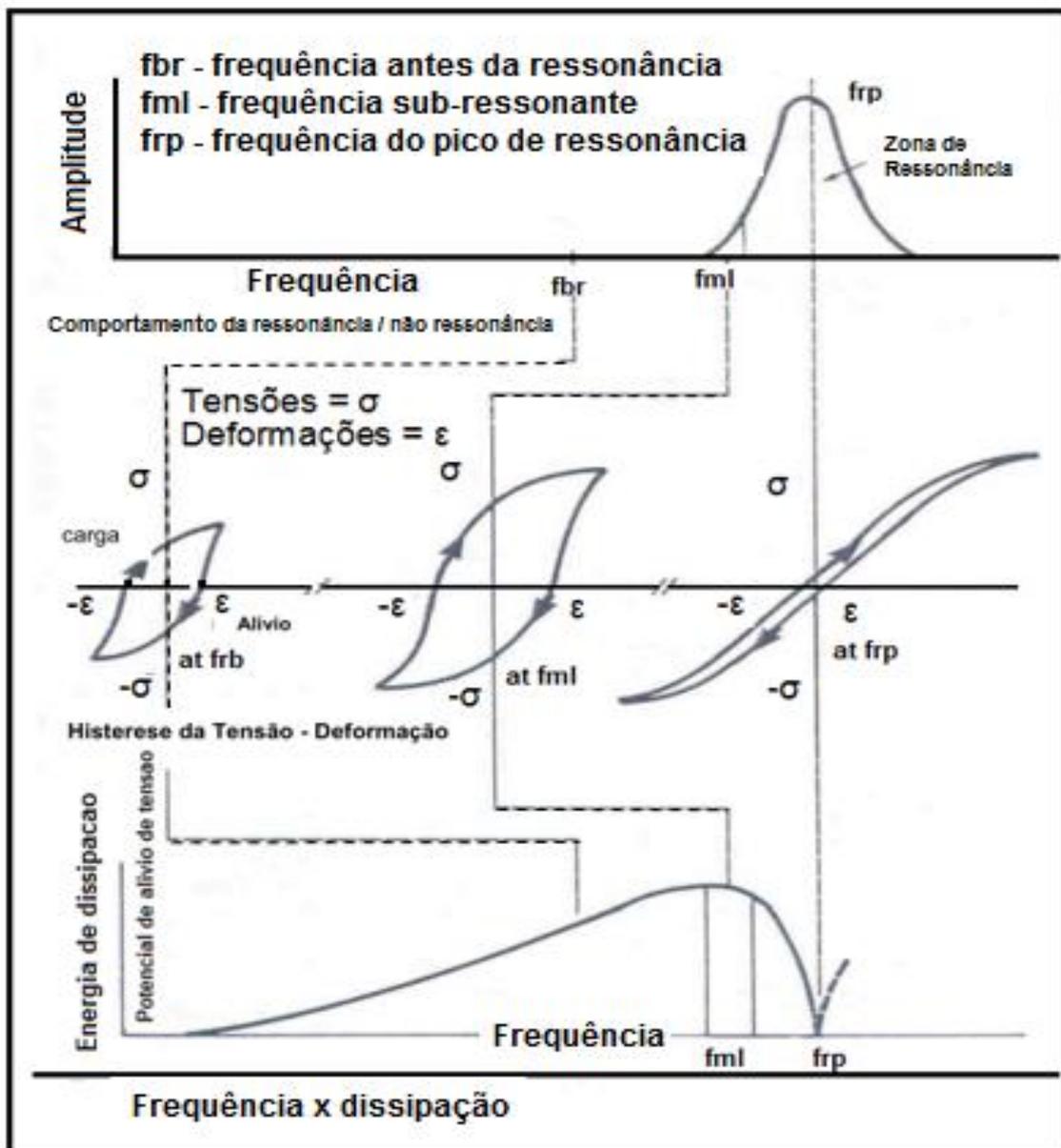


Figura 14 – Estudo do efeito das vibrações na dissipação de energia.
(Fonte: Adaptado de Skinner, 1987).

Observa-se pelas curvas de histerese que a maior energia dissipada é obtida quando a frequência natural é igual a 1/3 da amplitude, conforme a representação gráfica na figura 14, denominada de frequência sub-ressonante.

6.2 Vibrações aplicadas na soldagem

O alívio das tensões residuais utilizando-se de vibrações mecânicas, como uma alternativa ao tratamento térmico para a redução das tensões residuais em estruturas e componentes, tem sido discutida desde a década de 1950. A aplicação em componentes soldados foi estudada por Crisi e Mendonça (2006), que fizeram

um estudo para comparar o alívio das tensões residuais, obtido pelo tratamento térmico e pela vibração mecânica (SANTOS 2011).

Segundo Crisi e Mendonça (2006), nas amostras tratadas termicamente ocorreu redução na resistência à tração e aumento no alongamento, resultado diferente, da amostra tratada por meio de vibrações, na qual não houve nenhuma alteração nessas propriedades. Diferentemente dos resultados de resistência a tração e alongamento, nos testes de impacto a energia absorvida pelo corpo de prova, para os dois casos, praticamente foram as mesmas. As durezas resultantes para ambos os tratamentos, também, foram similares.

De acordo com Hornsey (2006) a aplicação de vibrações para alívio das tensões residuais não é para ser um substituto dos tratamentos térmicos, quando se deseja alteração no limite de resistência, escoamento e dureza superficial de um componente, fato observado pelos experimentos de Mendonça (2006).

Ainda, segundo Hornsey (2006), o alívio das tensões residuais por meio de vibrações pode ser usado em qualquer fase do processo de fabricação, eliminando os inconvenientes dos tratamentos térmicos como incrustações e alteração dimensional, além de dispensar longos tempos de consumo de energia.

Por fim, Hornsey (2006), afirma que o processo de alívio de tensões por vibrações sub-ressonantes é relativamente curto quando comparados ao do tratamento térmico, com tempo de tratamento aproximadamente igual há 30 minutos.

Yang (2008) desenvolveu um modelo de elementos finitos para prever tensões residuais em solda e simular o alívio através de vibrações, observou que para vibração não ressonante (frequência cuja curva de histerese está mais à esquerda na Figura 14) a redução das tensões depende muito da amplitude da vibração, e para a vibração ressonante, a frequência da vibração é essencial na redução das tensões, sendo que na frequência sub-harmônica existe a maior redução de tensões para uma mesma amplitude, o que ratifica o estudo de Skinner (SANTOS 2011).

Segundo Alberto, 2016, uma curva de ressonância é obtida mantendo-se uma frequência tal, que sua amplitude seja aproximadamente um terço da amplitude total da ressonância, baseado na teoria de Skinner.

Esta frequência é mantida por um determinado tempo, que varia em relação ao peso e ao material da peça a ser aliviada (MARTINS, 2014).

Assim, para confirmar se as tensões residuais foram totalmente removidas, deve-se aplicar uma vibração de amplitude e frequência conhecida, curva (1), após isso a mesma operação de vibração é feita com uma nova frequência de tratamento representada pela curva (2), uma vez que houve alteração na curva. Ou seja, repete-se a operação anterior e executa-se em seguida o mesmo procedimento obtendo a terceira leitura da curva. Caso a terceira curva (3) observada, seja exatamente igual à segunda, pode-se afirmar que o alívio está completo por não apresentar diferença de frequência entre os picos de ressonância, após o alívio das tensões residuais (ALBERTO, 2016), conforme mostra figura 15.

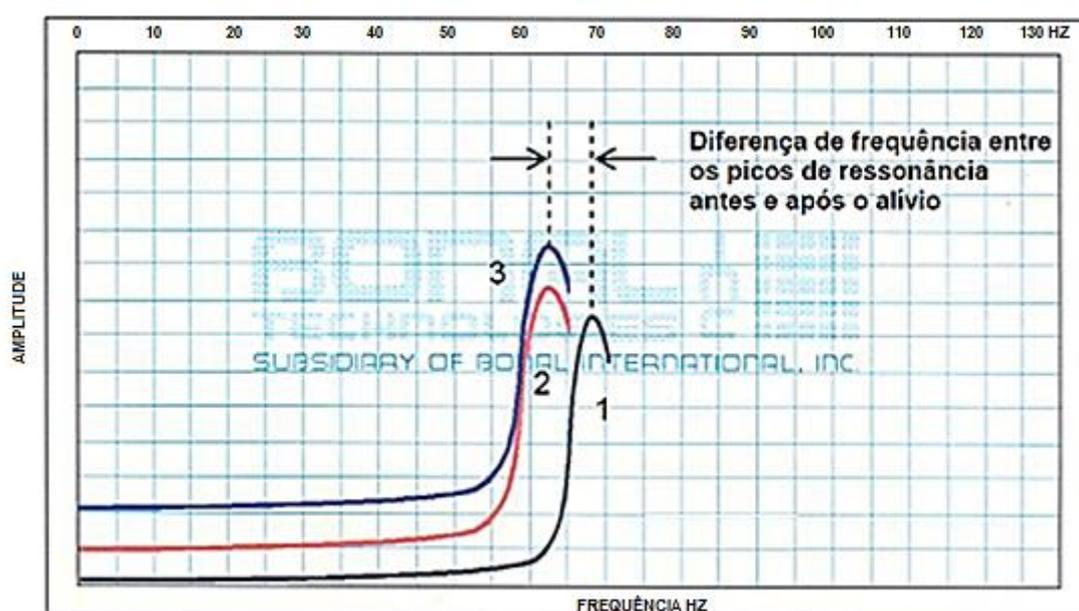


Figura 15 – Alteração e estabilização da curva de ressonância após a aplicação da frequência sub-harmônica de alívio de tensões.

(Fonte: Meta-lax, 2013).

Ainda conforme Alberto, 2016, o pico de ressonância desloca-se para a esquerda, possuindo uma frequência menor que a curva original (1). A curva (3) coincidindo em sua ascensão com a curva (2) da segunda leitura significa que, após aplicar mais vibrações para alívio, a curva não se alterou, ou seja, todas as tensões residuais que estavam presentes na peça foram removidas.

Conforme Martins, 2014, após esta observação, pode-se aplicar indefinidamente frequências de alívio de tensões, que a curva de ressonância não se altera, comprovando mais uma vez que o alívio está completo.

7 MÉTODO DO FURO CEGO PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

Há vários métodos para medição das tensões residuais, que foram se desenvolvendo ao longo de muitos anos, e cada qual com a sua particularidade e aplicabilidade podendo ser destrutivos, semidestrutivos e não destrutivos (MAKINO, 1994).

Os métodos destrutivos são aqueles que descartam a utilização da amostra analisada, ou seja, a peça deverá ser sucateada, no semidestrutivos a peça de amostra poderá ser recuperada após a medição, e no método não destrutivo não ocorre nenhum dano na amostra analisada, podendo ser utilizada normalmente após a medição (MAKINO, 1994).

Segundo Makino, 1994, para a medição das tensões residuais, dentre os métodos destrutivos pode se destacar a remoção de camadas do material para alívio das tensões residuais, no método semidestrutivo é utilizado os ensaios de furo cego e dos métodos não destrutivo a utilização da difração de raios-X.

No método do furo cego um furo é usinado no componente, e são medidas as deformações causadas na superfície, oriundas do aumento da profundidade. As deformações são medidas utilizando uma roseta de deformações constituída por extensômetros elétricos. Este é o método comumente utilizado e também considerado um dos melhores métodos experimentais de medição de tensões residuais.

Para realização do ensaio pelo método do furo cego é utilizada a norma ASTM E-837.

7.1 Norma ASTM - E 837

A Norma ASTM E837-13 descreve os parâmetros para a utilização da técnica do furo-cego para a realização das medições das tensões residuais. Nos casos em que a espessura do componente é menor que 2,4 mm, a norma recomenda a execução de um furo passante, e para espessuras maiores é utilizado o furo cego.

Segundo a norma, o método de ensaio é aplicável nos casos em que o comportamento do material é linear-elástico.

Resultados satisfatórios de medição podem ser conseguidos desde que as tensões residuais não excedam 80% da tensão de escoamento do material.

Ainda, conforme a norma ASTM E837-13 existem 03 tipos de rosetas A, B e C. A utilização de cada tipo está vinculada à espessura da peça de ensaio, que não deve exceder 0,2 do diâmetro para rosetas do tipo A e B e 0,24 do diâmetro para as rosetas do tipo C. Nesse trabalho será utilizada a roseta do tipo A, recomendada para uso em geral nas medições de tensões residuais, cuja configuração de grade é obtida a partir de um filme metálico aderido a uma folha de plástico, que serve de suporte e isolante entre o extensômetro e as peças em estudo.

A figura 16 mostra o detalhe do posicionamento da roseta tipo A, o diâmetro (circulo vermelho) desta roseta e à realização da usinagem de um furo cego no centro de uma determinada peça.

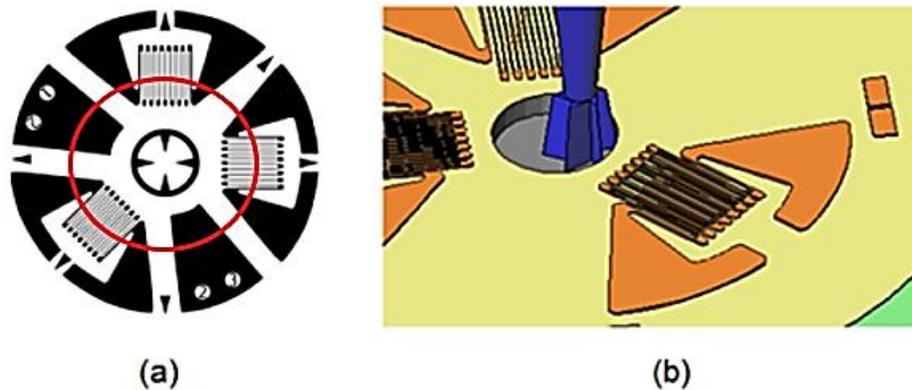


Figura 16 – Exemplos de extensômetros, (a) roseta tipo A (b) representação gráfica em 3D.
(Fonte: Alberto, 2016).

A figura 16(a) ilustra uma roseta tipo A, conforme especificação da norma ASTM E837-2013, o diâmetro do extensômetro está destacado na cor vermelha, e a figura 16(b) é uma representação gráfica da execução do furo cego.

8 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os corpos de provas, o método utilizado para sua obtenção, a identificação e a forma de tratamento utilizado, bem como o ensaio realizado para determinar as tensões residuais.

Assim, os corpos de provas foram confeccionados a partir de uma chapa de aço AISI 4140 onde foram traçados e identificados, para atender as condições determinadas na elaboração deste trabalho, conforme ilustração na figura 17.



Figura 17 – Detalhe das marcações e identificações na chapa de aço AISI 4140.
(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Após marcações e identificações executadas na chapa de aço, conforme representado na figura 17 e em seguida, foi possível iniciar o processo de posicionamento e corte da chapa pelo método de jato d'água conforme uma programação prévia.

8.1 Obtenção dos corpos de prova

Após a realização das marcações e identificação das peças, os corpos de provas seguiram para o posicionamento e corte das chapas na seguinte maneira:

Utilizando o processo de corte por meio jato de água com uma máquina Mach 2 – Flow 2400 com uma pressão de 414 MPa, com uma vazão de 3 litros por minuto, onde foi utilizado um abrasivo da marca ZIRTEC1 st grade, com um diâmetro de bico

de 0,9 mm. Na figura 18 ilustra a máquina de jato de água utilizada para execução do corte dos corpos de provas.



Figura 18 - Máquina de corte com jato de água.
(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

A máquina de corte Mach 2 com jato de água foi utilizada na preparação e corte das peças de aço para construção dos corpos de prova, ilustrada pela figura 18.

Após o corte, a preparação e o posicionamento das peças, onde as mesmas seguiram os seguintes procedimentos para fabricação dos corpos de provas.

Foram soldadas duas partes de uma chapa de aço AISI 4140 com 16 mm de altura, 190 mm de comprimento e 190 mm de largura, como está representada na figura 19.

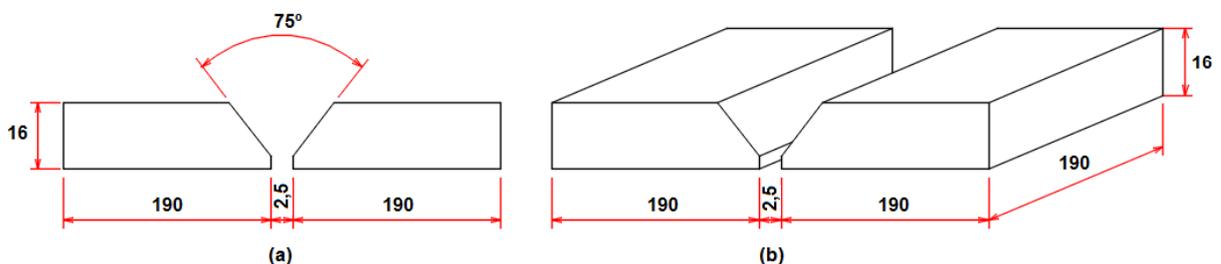


Figura 19 – Dimensões das peças de teste: (a) – vista frontal e (b) perspectiva mostrando os detalhes em três dimensões.
(Fonte: Elaborada pelo Autor, 2016).

Como pode ser observado também na figura 19(b) onde se descreve as dimensões em (mm) da chapa de teste e na figura 19(a) o detalhe do ângulo com o chanfro de 75° de acordo com o especificado pela norma ASME B31. 3 – 2014. No total foram confeccionadas quatro chapas de teste:

- Duas chapas de teste soldada sem tratamento e sem vibração.
- Duas chapas de teste soldada utilizando o método com vibração.

A soldagem foi realizada com eletrodo revestido de classificação E8018-B2 da AWS A5.5, cuja composição química é similar ao do aço SAE 4140, conforme pode ser observado no quadro 5.

Quadro 5 - Composição química do aço SAE 4140 e do eletrodo E-8018-B2.

	C(%)	Mn (%)	P (%) (máx.)	S (%) (máx.)	Si (%)	Cr (%)	Mo (%)
4140	0,43	0,75	0,030	0,040	0,15	0,95	0,25
E8018-B2	0,06	0,76	0,01	0,01	0,49	1,25	0,50

(Fonte: Elaborada pelo Autor - Dados do catálogo Bohler, 2016).

A soldagem com o eletrodo E-8018-B2 cuja composição química está descrita no quadro 5 foi realizada de duas maneiras diferentes:

- Soldas realizadas em uma bancada e
- Soldas realizadas em uma bancada equipada com um conjunto de equipamentos que promovem a vibração da mesma e por consequência, da peça a ser soldada, sendo que uma das peças foi protegida com uma manta, a fim de reduzir a velocidade de resfriamento.

8.2 Sequência de soldagem

Para a verificação da sequência dos passes, foi executado o ensaio de macrografia com a utilização de reagente NITAL 5%, conforme demonstrado na figura 20(a) e o mapeamento dos respectivos cordões foram identificados a partir deste ensaio representado na figura 20(b).

Denomina-se goivagem, a operação de remoção de material por meios mecânicos ou térmicos com o objetivo de se preparar um chanfro. (AWS A3.0 – 2010).

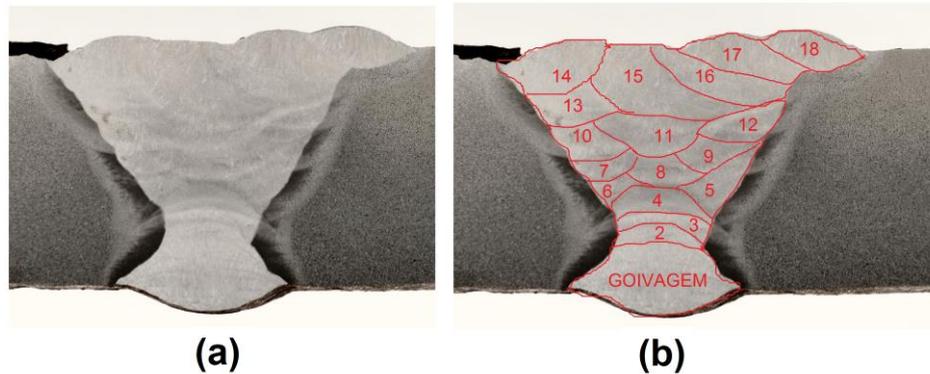


Figura 20 – Identificação das camadas e números de passes – (a) sem identificação dos passes e (b) com identificação dos passes.
(Fonte: Elaborada pelo Autor, 2016).

A figura 20 apresenta as características do contorno desta solda, a quantidade de passes e a identificação do número de passes, executados durante o processo de soldagem em geral, incluindo o processo de goivagem.

Para a obtenção dos corpos de provas, a soldagem foi realizada nas peças de testes por sucessivos (e sobrepostos) cordões de solda e a quantidade de camadas, cuja sequência pode ser verificada na figura 21(a) e o resultado final dessa solda foram registrados conforme a figura 21(b).

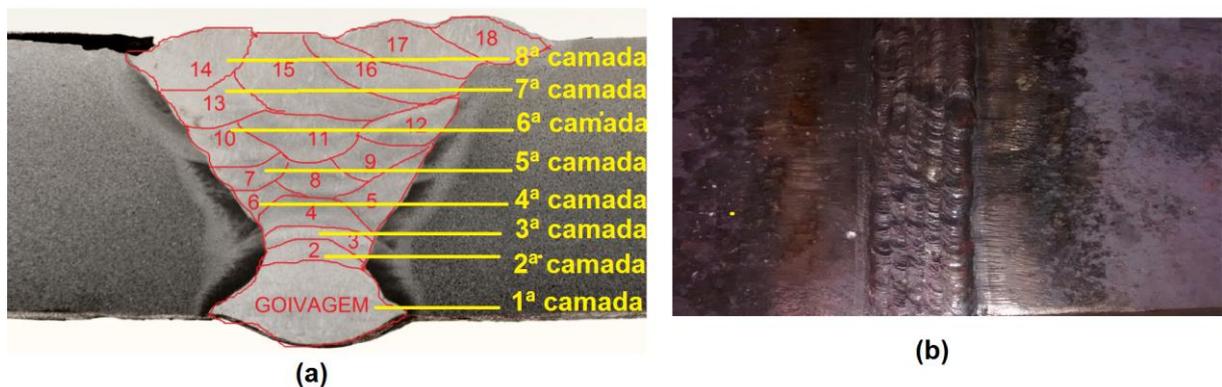


Figura 21 – Sequência de soldagem e identificação das camadas – (a) representação gráfica e (b) peça de teste soldada.
(Fonte: Elaborada pelo Autor, 2016).

Pode ser observadas, por meio do ensaio de macrografia que foram depositadas 08 camadas de solda, formadas por um total de dezoito cordões, incluindo o passe de solda no local da goivagem GOIV conforme a figura 21(a) e a figura 21(b) que ilustra a conclusão desse processo.

Antes do início da soldagem, foi executado um preaquecimento de 150°C com maçarico tipo chuva, a fim de remover a umidade e manter o aquecimento da peça conforme recomendação técnica e ilustrada pela figura 22.



Figura 22 – Peça submetida ao preaquecimento com maçarico.
(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Na figura 22, pode se observar que o preaquecimento está sendo executado pelo lado oposto por onde se iniciara a soldagem, o que irá garantir que toda a região a ser soldada esteja na temperatura recomendada.

Durante a soldagem foi executada a manutenção da temperatura, que variou em torno de 200°C, monitorada por meio de lápis de temperatura. Foram também monitoradas as oscilações dos consumíveis, e a velocidade de soldagem que determinou a energia consumida por camada.

8.3 Soldagem das peças de teste dos corpos de prova

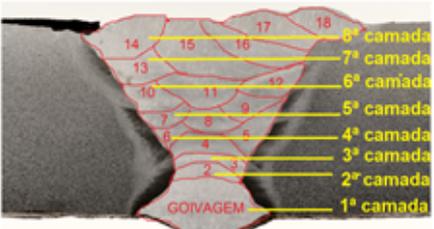
As peças cortadas a partir da chapa de aço AISI 4140 foram divididas em dois grupos distintos, onde o primeiro grupo foi dividido por peça C e D, e foi soldados sem a aplicação de vibração e o segundo grupo dividido por peças A e B onde foram soldados com vibração.

Os detalhes dos procedimentos aplicados em cada peça foram diferenciados a partir da seguinte maneira:

Na peça C, não foi aplicado nenhum tipo de tratamento após a conclusão da soldagem, na peça D foi executado o TTAT, já na peça A, a soldagem com vibração teve seu resfriamento sem manta e a peça B, o seu resfriamento foi protegido com manta evitando o resfriamento brusco da peça soldada.

A seguir, no quadro 6, são apresentadas as características do cordão obtido na soldagem da peça C, sem nenhum tipo de tratamento.

Quadro 6 – Características do cordão da peça C.

DADOS GERAIS - SOLDAGEM - PEÇA C					
	Metal Base	Material (1):	Material (2):	Material (3):	
	Especificação	<i>AISI 4140</i>	<i>AISI 4140</i>	-	
	Espes. Peça	<i>16,0 mm</i>	<i>16,0 mm</i>	-	
	comprimento	<i>190 mm</i>	<i>190 mm</i>	-	
Posição	Progressão	Cobre-Junta	Goivagem	Chanfro	Ângulo
1G	<i>NA</i>	<i>com</i>	<i>com</i>	<i>em "V"</i>	<i>75 °</i>
Abertura da Raiz		Face Raiz	Pré-Aq.	Interpasse	Pós-Aquec.
<i>N.A.</i>		<i>N.A.</i>	<i>≥ 150 °C</i>	<i>≤ 300 °C</i>	

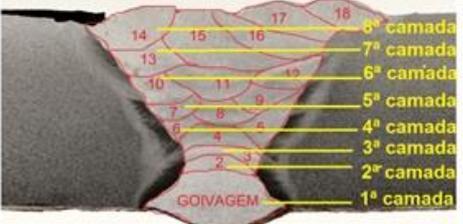
ACOMPANHAMENTO DURANTE A SOLDAGEM												
Passe	Camada	Processo	Consumível			Características Elétricas			Vazão do Gás		Veloc. (mm/s)	Energia (kJ/mm)
			Classif. AWS	Ø (mm)	Oscilação (mm)	Tipo corr. e	Faixa Tensão (V)	Faixa Corrente (A)	Purga (l/min)	Prot. (l/min)		
1	1	SMAW	E8018-B2	3,25	6,0	CC+	24	102	N.A.	N.A.	2,5	0,98
2	2	SMAW	E8018-B2	3,25	5,0	CC+	26	102	N.A.	12	2,0	1,33
3	3	SMAW	E8018-B2	3,25	6,0	CC+	24	103	N.A.	N.A.	2,5	0,99
4	4	SMAW	E8018-B2	3,25	6,0	CC+	25	103	N.A.	N.A.	2,3	1,10
5	4	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	25	102	N.A.	N.A.	2,4	1,05
6	4	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	24	103	N.A.	N.A.	2,5	0,99
7	5	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	23	104	N.A.	N.A.	3,8	0,63
8	5	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	24	102	N.A.	N.A.	4,0	0,61
9	5	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	25	102	N.A.	N.A.	4,0	0,64
10	6	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	26	103	N.A.	N.A.	3,8	0,71
11	6	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	24	102	N.A.	N.A.	2,5	0,98
12	6	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	22	103	N.A.	12	2,0	1,13
13	7	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	25	104	N.A.	N.A.	2,5	1,04
14	8	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	26	103	N.A.	N.A.	2,3	1,15
15	8	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	25	104	N.A.	N.A.	2,4	1,07
16	8	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	25	103	N.A.	N.A.	2,5	1,03
17	8	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	26	101	N.A.	N.A.	2,5	1,05
18	8	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	24	102	N.A.	N.A.	2,5	0,98
GOIV	1	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	24	103	N.A.	N.A.	2,5	0,99

(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Observa-se que com os dados descritos no quadro 6, em que a média da velocidade da soldagem 2,78 mm/s, a oscilação média do consumível 7,4 mm, a intensidade de corrente 102 A, a média da tensão foi de 25 V e a energia de soldagem teve uma média de 0,99 kJ/mm.

Do mesmo modo no quadro 7, pode ser verificado os parâmetros da soldagem da peça D com TTAT.

Quadro 7 - Características do cordão da peça D.

DADOS GERAIS - SOLDAGEM CONVENCIONAL - PEÇA D					
	Metal Base	Material (1):	Material (2):	Material (3):	
	Especificação	<i>AISI 4140</i>	<i>AISI 4140</i>	-	
	Espes. Peça	<i>16,0 mm</i>	<i>16,0 mm</i>	-	
	comprimento	<i>190 mm</i>	<i>190 mm</i>	-	
Posição	Progressão	Cobre-Junta	Goivagem	Chanfro	Ângulo
<i>1G</i>	<i>NA</i>	<i>com</i>	<i>com</i>	<i>em "V"</i>	<i>75 °</i>
Abertura da Raiz	Face Raiz	Pré-Aq.	Interpasse	Pós-Aquec.	
<i>N.A.</i>	<i>N.A.</i>	<i>≥ 150 °C</i>	<i>≤ 300 °C</i>		

ACOMPANHAMENTO DURANTE A SOLDAGEM												
Passe	Camada	Processo	Consumível			Tipo corr. e Polaridade	Características Elétricas		Vazão do Gás		Veloc. (mm/s)	Energia (kJ/mm)
			Classif. AWS	Ø (mm)	Oscilação (mm)		Faixa Tensão (V)	Faixa Corrente (A)	Purga (l/min)	Prot. (l/min)		
1	1	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	26	102	N.A.	N.A.	2,5	1,06
2	2	SMAW	E8018-B2	3,25	6,0	CC+	24	103	N.A.	12	2,0	1,24
3	3	SMAW	E8018-B2	3,25	6,0	CC+	25	102	N.A.	N.A.	2,5	1,02
4	4	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	25	103	N.A.	N.A.	2,3	1,10
5	4	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	25	102	N.A.	N.A.	2,4	1,05
6	4	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	24	103	N.A.	N.A.	2,5	0,99
7	5	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	23	104	N.A.	N.A.	3,8	0,63
8	5	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	24	103	N.A.	N.A.	4,0	0,62
9	5	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	25	102	N.A.	N.A.	4,0	0,64
10	6	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	26	103	N.A.	N.A.	3,8	0,71
11	6	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	24	102	N.A.	N.A.	2,5	0,98
12	6	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	22	103	N.A.	12	2,0	1,13
13	7	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	25	104	N.A.	N.A.	2,5	1,04
14	8	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	26	103	N.A.	N.A.	2,3	1,15
15	8	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	25	104	N.A.	N.A.	2,4	1,07
16	8	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	25	103	N.A.	N.A.	2,5	1,03
17	8	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	26	101	N.A.	N.A.	2,5	1,05
18	8	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	24	102	N.A.	N.A.	2,5	0,98
GOIV	1	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	24	103	N.A.	N.A.	2,5	0,99

(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Obteve-se que com os dados do quadro 7, a média da velocidade de soldagem foi 2,78 mm/s, a oscilação média do consumível 7,5 mm, a intensidade de corrente 103 A e a média da tensão 25 V. A energia de soldagem foi em média de 0,99 kJ/mm.

Na peça de teste D, foi executada a soldagem e efetuado o tratamento térmico recomendado pela norma ASME B31.3, 2014. Após a conclusão do TTAT, foram retirados corpos de provas para executar os ensaios do furo cego e a verificação das tensões residuais.

8.3.1 Tratamento térmico de alívio de tensões – TTAT – peça D

Após conclusão da soldagem, a peça de teste D, em que foi submetida ao tratamento térmico de alívio de tensões, seguindo os parâmetros técnicos normalizados conforme descrição a seguir.

O tratamento foi executado em um forno modelo QUIMIS® conforme mostrado na figura 23.



Figura 23 – Forno utilizado para o TTAT – Universidade Santa Cecília.
(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Como este tipo de forno não fornece nenhum tipo de gráfico para controle da temperatura, os dados obtidos neste processo foram anotados manualmente e foi elaborado um quadro com os parâmetros coletados no processo do tratamento térmico.

Assim a sequência do controle e acompanhamento do TTAT poderá ser verificada no quadro 8 conforme os parâmetros de tempo, temperatura, velocidade do aquecimento e velocidade do resfriamento. O controle de patamar do TTAT está destacado pela cor vermelho também representado nesse gráfico.

Quadro 8 – Acompanhamento dos parâmetros de TTAT.

TEMPO (minutos)	TEMP. °C	VEL. AQUEC.	TEMPO (minutos)	TEMP. °C	VEL. RESFR.	TEMPO (minutos)	TEMP. °C	VEL. RESFR.	
09:00	162	25°C/h	14:10	648	98°C/h	19:50	265	97°C/h	
09:10	165		14:20	637		20:00	245		
09:20	170		14:30	620		20:10	230		
09:25	181		14:40	605		20:20	218		
09:35	200	60°C/h	14:50	585	97°C/h	20:30	210		
09:45	210		15:00	566		20:40	198		
09:50	220		15:10	551		20:50	192		
10:00	230		15:20	526		21:00	187		
10:20	240	135°C/h	15:30	513	97°C/h	PARÂMETRO DE TRATAMENTO TERMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES			
10:25	250		15:40	495					
10:35	260		15:50	479		VELOCIDADE DE AQUECIMENTO			150°C / h
10:45	282		16:00	459		PATAMAR			650°C / 1 HORA
10:50	310	112°C/h	16:10	447	97°C/h	VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO			120°C / h
11:00	330		16:20	436					
11:10	348		16:30	417					
11:15	364		16:40	413					
11:20	385	49°C/h	16:50	401	52°C/h				
11:25	403		17:00	390					
11:30	417		17:10	387					
11:40	438		17:20	376					
11:50	460	650°C / 1 h	17:30	367	97°C/h				
12:00	493		17:40	360					
12:10	520		17:50	352					
12:20	540		18:00	337					
12:30	550	97°C/h	18:10	334	97°C/h				
12:40	575		18:20	322					
12:45	600		18:30	309					
12:55	624		18:40	308					
13:05	650	650°C / 1 h	18:50	302	97°C/h				
13:20	651		19:00	297					
13:30	651		19:10	290					
13:40	651		19:20	285					
13:50	651		19:30	277					
14:05	651		19:40	270					

(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

No quadro 8, pode ser verificado que o tempo de patamar foi de aproximadamente 650°C por 1 hora, e que as velocidades de aquecimento e resfriamento não ultrapassaram o limite estabelecido por norma.

Com os dados do quadro 8, foi elaborado o gráfico de TTAT da figura 24.

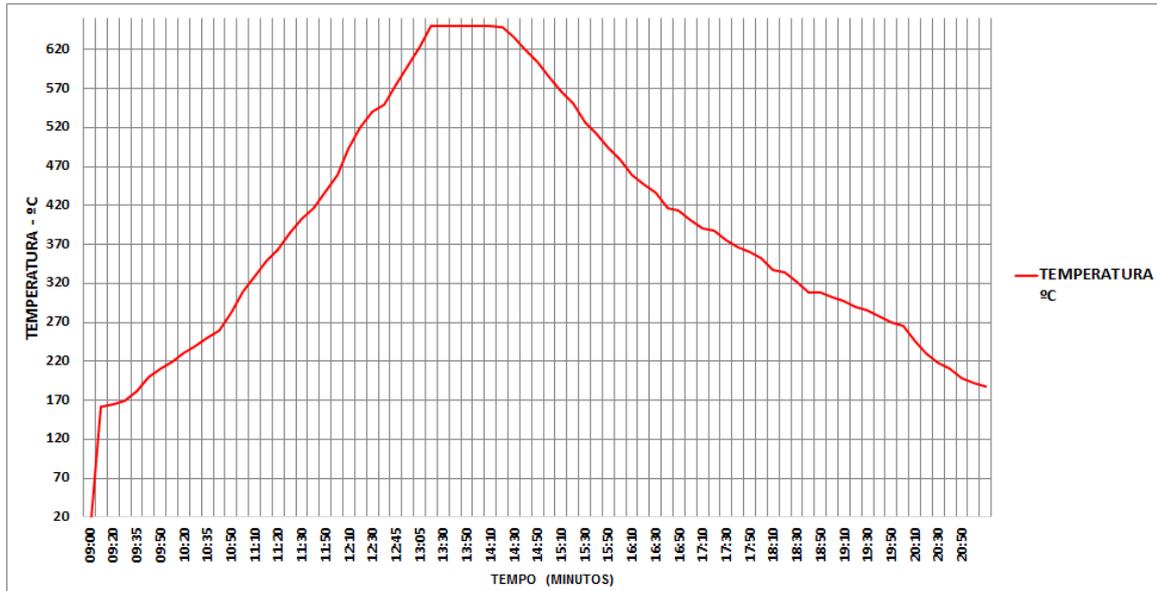


Figura 24 – Gráfico de TTAT elaborado com os dados do quadro 8.
(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Na figura 24, pode se notar que o TTAT ocorreu a 650°C no período de uma hora, no intervalo das 13h e 05 min e 14h e 05 min. e pode-se perceber também que a velocidade de resfriamento foi de 97°C/hora.

8.4 Soldagem com vibração

Do total das peças, foi executada em duas chapas de teste a execução da soldagem com vibração, denominadas com peça A e B.

A máquina utilizada para a vibração é a da marca Meta-lax®, série 2400, a figura 24(a) mostra a máquina de vibração e a figura 24(b) destaca o painel de controle.



(a)



(b)

Figura 25 – Máquina de vibração ou microprocessador META-LAX® e o painel de controle.
(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Na figura 25(b) ilustra o painel de controle da máquina, onde estão localizados os comandos, para inserir os dados, que serão utilizados para a execução da soldagem com vibração.

A figura 26 representa os componentes do conjunto necessário para aplicação do processo vibracional, utilizado no processo de soldagem: mesa vibratória, transdutor de vibração, micro processador, motor de corrente contínua, peça de teste e peça de fixação.



Figura 26 – Mesa de vibração, transdutor de vibração, microprocessador, motor de corrente contínua, peça de teste e peça de fixação.
(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

A figura 26 representa o processo vibracional aplicado na peça soldada, onde o motor de corrente contínua e o dispositivo de vibração estão ligados a um microprocessador que recebe um sinal do transdutor e envia o comando necessário ao motor, que repassa a mesa de vibração, controlando assim a vibração e a frequência necessária para a remoção das tensões residuais.

As peças A e B foram posicionadas e travadas na bancada de vibração e em seguida foram configurados os dados para início da vibração, conforme o peso e as características do material já inserido na programação, a figura 27(a) mostra o acoplamento e o travamento da peça de teste com a mesa vibratória e a figura 27(b) mostra o dispositivo de vibração acoplado à mesa (transdutor).

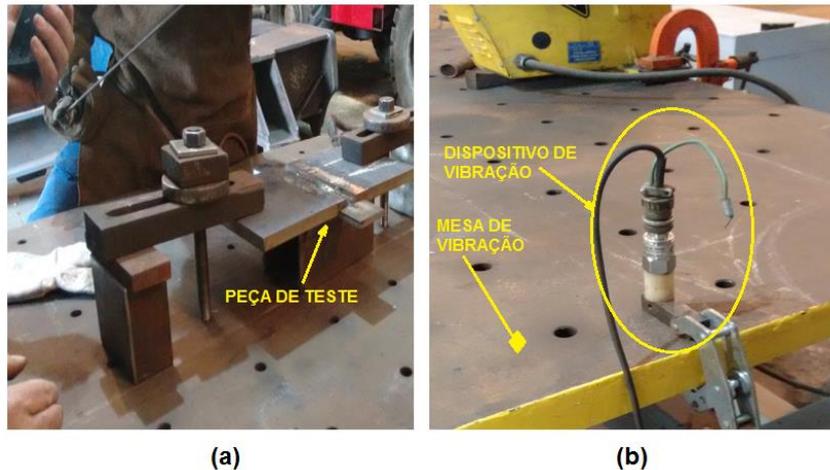


Figura 27 – (a) Posicionamento da peça de teste na mesa de vibração. (b) dispositivo de vibração (transdutor).

(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

A fixação da peça de teste na bancada foi executada com o chanfro posicionado para cima e limitadores foram instalados na lateral desse dispositivo auxiliar, para compensar a altura da peça a ser soldada, representada na figura 27 (a), e o transdutor de vibração utilizado para transmissão dos sinais elétricos que foi fixada a mesa, em destaque na figura 27(b).

A peça de teste foi aquecida a uma temperatura inicial de 150°C por meio de um maçarico tipo chuva e controlado com lápis de temperatura, antes de iniciar a soldagem com vibração, a figura 28 mostra a realização deste preaquecimento.



Figura 28 – Manutenção da temperatura durante a soldagem.

(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Observa-se na figura 28 que o preaquecimento foi executado utilizando o maçarico e direcionado pelo lado do chanfro, por onde se inicia a soldagem e a disposição do travamento da peça a ser soldada.

A representação da frequência e amplitude utilizada na condição sub-ressonante está indicado no quadro 9, que foi utilizada antes de iniciarmos o processo de soldagem das peças.

Quadro 9 – Parâmetros utilizados na programação da máquina de vibração – META-LAX®.

AMPLITUDE (Hz)	PICO DE RESSONÂNCIA (Hz)	TEMPO (min.)
65,3	82,3	40

(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Com os dados obtidos da amplitude e frequência sub-ressonante do quadro 9, foi possível elaborar o gráfico da figura 29, que representa o pico de ressonância utilizado durante a soldagem das peças dos corpos de prova.

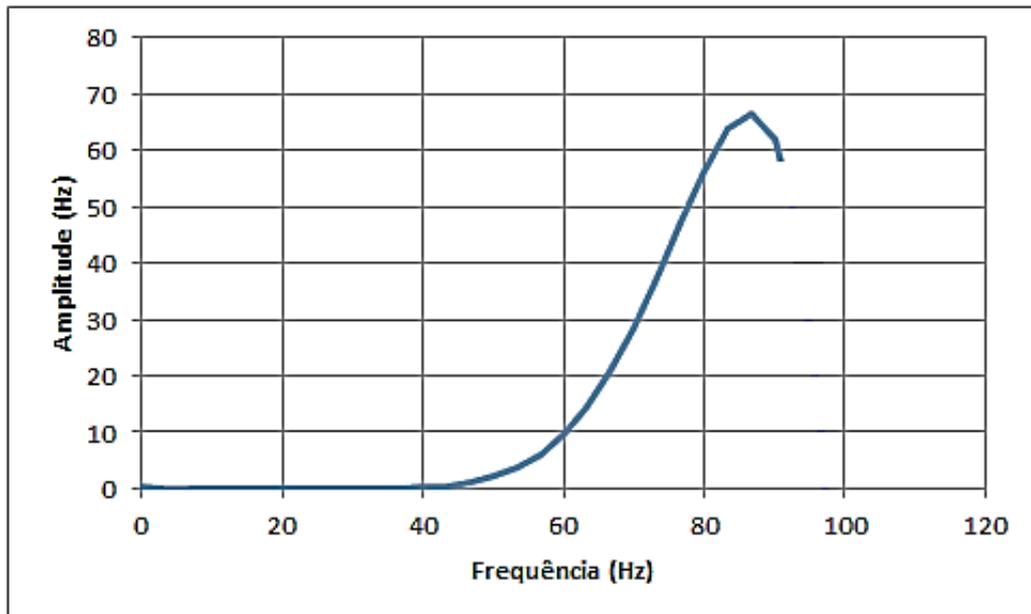


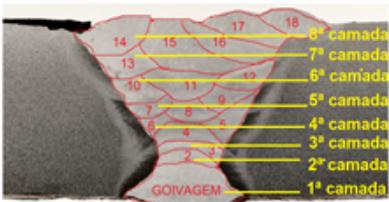
Figura 29 – Gráfico da Amplitude x Frequência da vibração sub-ressonante.

(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

A figura 29 representa a curva da Amplitude x Frequência da posição sub-ressonante das peças de aço AISI 4140 utilizada durante o processo de soldagem.

A peça de teste A, foi executada utilizando o método de soldagem com vibração onde os parâmetros utilizados podem ser observados no quadro 10.

Quadro 10 – Parâmetros de soldagem com vibração do aço SAE 4140 com eletrodo E-8018-B2 – peça A.

DADOS GERAIS - SOLDAGEM COM VIBRAÇÃO - PEÇA A					
	Metal Base	Material (1):	Material (2):	DADOS VIBRAÇÃO	
	Especificação	<i>SAE 4140</i>	<i>SAE 4140</i>	<i>FREQUÊNCIA - 65,3 Hz</i>	
	Espes. Peça	<i>16,0 mm</i>	<i>16,0 mm</i>	<i>PICO RESS- 82,3 Hz</i>	
	comprimento	<i>190 mm</i>	<i>190 mm</i>	-	
Posição	Progressão	Cobre-Junta	Goivagem	Chanfro	Ângulo
<i>1G</i>	<i>NA</i>	<i>com</i>	<i>com</i>	<i>em "V"</i>	<i>75 °</i>
Abertura da Raiz		Face Raiz	Pré-Aq.	Interpasse	Pós-Aquec.
<i>N.A.</i>		<i>N.A.</i>	<i>≥ 150 °C</i>	<i>≤ 300 °C</i>	

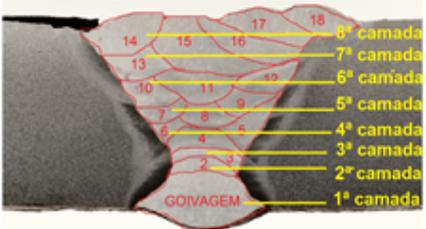
ACOMPANHAMENTO DURANTE A SOLDAGEM												
Passe	Camada	Processo	Consumível			Características Elétricas			Vazão do Gás		Veloc (mm/s)	Energia (kJ/mm)
			Classif. AWS	Ø (mm)	Oscilação (mm)	Tipo corr. e Polaridade	Faixa Tensão (V)	Faixa Corrente (A)	Purga (l/min)	Prot. (l/min)		
1	1	SMAW	E8018-B2	3,25	9,0	CC+	26	102	N.A.	N.A.	2,5	1,06
2	2	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	23	101	N.A.	N.A.	2,0	1,16
3	3	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	23	100	N.A.	N.A.	2,5	0,92
4	4	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	23	104	N.A.	N.A.	2,3	1,03
5	4	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	23	102	N.A.	N.A.	2,4	0,96
6	4	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	25	103	N.A.	N.A.	2,5	1,03
7	5	SMAW	E8018-B2	3,25	9,0	CC+	25	104	N.A.	N.A.	3,8	0,69
8	5	SMAW	E8018-B2	3,25	6,0	CC+	24	102	N.A.	N.A.	4,0	0,61
9	5	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	25	103	N.A.	N.A.	4,0	0,64
10	6	SMAW	E8018-B2	3,25	9,0	CC+	25	104	N.A.	N.A.	3,8	0,69
11	6	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	23	102	N.A.	N.A.	2,5	0,94
12	6	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	23	103	N.A.	NA	2,0	1,18
13	7	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	25	102	N.A.	N.A.	2,5	1,02
14	8	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	26	103	N.A.	N.A.	2,3	1,15
15	8	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	27	102	N.A.	N.A.	2,4	1,13
16	8	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	26	104	N.A.	N.A.	2,5	1,08
17	8	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	24	102	N.A.	N.A.	2,4	1,01
18	8	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	25	104	N.A.	N.A.	2,5	1,04
GOIV	1	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	23	103	N.A.	N.A.	2,6	0,91

(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Verifica-se que com os dados do quadro 10, a média da velocidade de soldagem foi de 2,78 mm/s, a oscilação média do consumível foi de 7,7 mm, a intensidade de corrente foi de 103 A e a média da tensão foi de 25 V. Também pode ser observado que a média da energia de soldagem foi de 0,97 kJ/mm.

Esse mesmo método foi utilizado para a peça B, onde a soldagem com vibração e os parâmetros estão mostrados no quadro 11.

Quadro 11 – Parâmetros de soldagem com vibração do aço SAE 4140 com eletrodo E-8018-B2 – Peça B.

DADOS GERAIS - SOLDAGEM COM VIBRAÇÃO - PEÇA B					
	Metal Base	Material (1):	Material (2):	DADOS VIBRAÇÃO	
	Especificação	SAE 4140	SAE 4140	FREQUÊNCIA - 65,3 Hz	
	Espes. Peça	16,0 mm	16,0 mm	PICO RESS- 82,3 Hz	
	comprimento	190 mm	190 mm	-	
Posição	Progressão	Cobre-Junta	Goivagem	Chanfro	Ângulo
1G	NA	com	com	em "V"	75°
Abertura da Raiz		Face Raiz	Pré-Aq.	Interpasse	Pós-Aquec.
N.A.		N.A.	≥ 150 °C	≤ 300 °C	

ACOMPANHAMENTO DURANTE A SOLDAGEM												
Passe	Camada	Processo	Consumível			Características Elétricas			Vazão do Gás		Veloc (mm/s)	Energia (kJ/mm)
			Classif. AWS	Ø (mm)	Oscilação (mm)	Tipo corr. e Polaridade	Faixa Tensão (V)	Faixa Corrente (A)	Purga (litros)	Prot. (litros)		
1	1	SMAW	E8018-B2	3,25	9,0	CC+	25	102	N.A.	N.A.	2,5	1,02
2	2	SMAW	E8018-B2	3,25	6,0	CC+	24	104	N.A.	12	2,0	1,25
3	3	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	25	103	N.A.	N.A.	2,5	1,03
4	4	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	23	104	N.A.	N.A.	2,3	1,03
5	4	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	25	103	N.A.	N.A.	2,4	1,06
6	4	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	24	104	N.A.	N.A.	2,5	1,00
7	5	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	25	103	N.A.	N.A.	3,8	0,68
8	5	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	25	104	N.A.	N.A.	4,0	0,65
9	5	SMAW	E8018-B2	3,25	8,0	CC+	24	102	N.A.	N.A.	4,0	0,61
10	6	SMAW	E8018-B2	3,25	6,0	CC+	25	103	N.A.	N.A.	3,8	0,68
11	6	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	24	104	N.A.	N.A.	2,5	1,00
12	6	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	23	103	N.A.	12	2,0	1,18
13	7	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	25	104	N.A.	N.A.	2,5	1,04
14	8	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	26	103	N.A.	N.A.	2,3	1,15
15	8	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	27	104	N.A.	N.A.	2,4	1,15
16	8	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	25	103	N.A.	N.A.	2,5	1,03
17	8	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	27	102	N.A.	N.A.	2,5	1,10
18	8	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	24	104	N.A.	N.A.	2,5	1,00
GOIV	1	SMAW	E8018-B2	3,25	7,0	CC+	24	102	N.A.	N.A.	2,4	1,02

(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Verifica-se que com os dados do quadro 11, que a média da velocidade de soldagem foi de 2,77 mm/s, a oscilação média do consumível foi de 7,2 mm, a intensidade de corrente foi de 103 A e a média da tensão foi de 26 V.

Outra observação que pode ser feita é que a média da energia de soldagem ficou em 1kJ/mm.

As peças de testes soldadas com vibração não sofreram nenhum tipo de tratamento.

A figura 30(a) ilustra a solda de penetração de uma das peças de teste que foi soldada e o detalhe da limpeza por esmerilhamento.



Figura 30 – (a) Peça com detalhes da penetração e (b) Acabamento final da solda.
(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Na figura 30(a), pode-se verificar a limpeza entre os passes de soldagem, executado por meio de esmerilhamento, e na figura 30(b), é a solda finalizada com a limpeza dos passes de acabamento.

Após a conclusão da soldagem foram retirados corpos de provas do ensaio de furo cego, para a verificação das tensões residuais.

8.4.1 Ensaio de tensões residuais – furo cego

Para a determinação das tensões residuais, o método utilizado foi o do furo cego, desta forma foram obtidos um total de quatro corpos de provas, onde um corpo de prova foi utilizado para a soldagem de uma peça, sem nenhum tratamento para alívio de tensão, o outro corpo de prova, foi utilizado para executar uma soldagem e posteriormente a aplicação do TTAT e finalmente dois corpos de provas para soldagem com vibração.

Para o ensaio do furo cego e os detalhes e descrições do posicionamento no corpo de prova estão ilustrados conforme representação da figura 30.

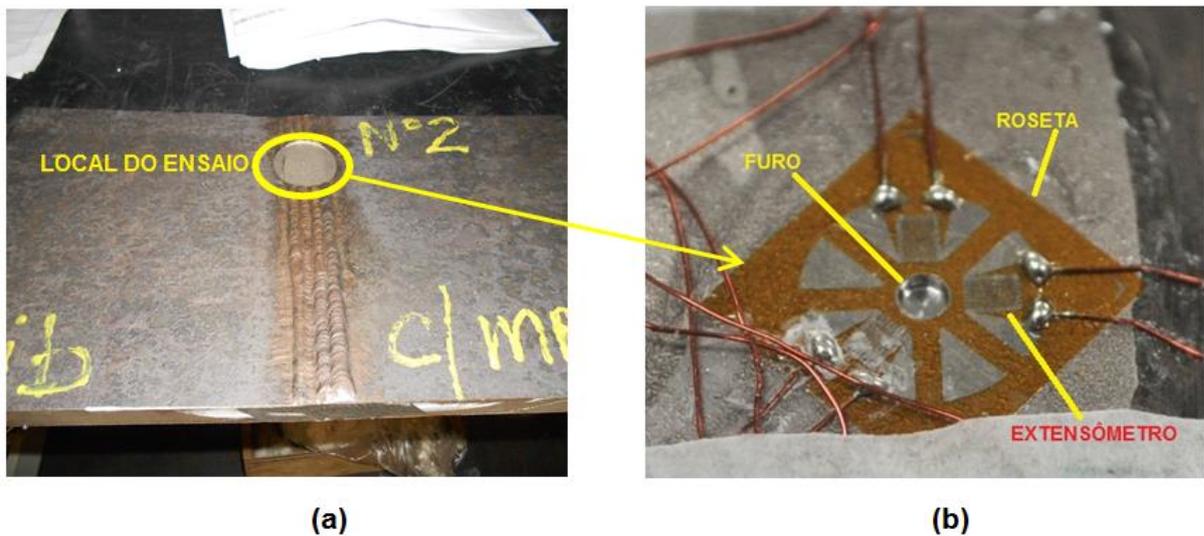


Figura 31 – Posicionamento da roseta e dos extensômetros no corpo de prova para execução do ensaio de furo cego (a) local do ensaio e (b) detalhe da montagem da roseta.

(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

A figura 31(a) ilustra o posicionamento do furo cego na peça de teste e a figura 31(b) mostra o detalhe do conjunto entre o furo cego com relação à roseta tipo delta e a fixação dos extensômetros para medição das tensões residuais produzidas em cada camada de profundidade das peças.

Neste trabalho não será estudado a morfologia da região soldada nem da ZAT.

9 RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Com os resultados obtidos nos ensaios de análise de tensão residual pelo método do furo cego, em que foram comparadas as tensões residuais nas peças soldadas, a primeira, pelo processo convencional sem tratamento térmico e sem vibração, a segunda com tratamento térmico, a terceira soldada aplicando o processo de vibração com resfriamento com manta e a última soldada com vibração com resfriamento a temperatura atmosférica (sem manta).

9.1 Solda sem tratamento de alívio de tensões

Após a realização do ensaio pelo método do furo cego, os parâmetros encontrados foram planilhados conforme Quadro 11 em que as tensões máximas (σ_1) e as tensões mínimas (σ_2), foram determinadas para cada profundidade de medição. Com as tensões máximas e mínimas foram encontradas as tensões equivalentes pelo critério de Von Mises conforme equação a seguir:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 * \sigma_2} \quad (2)$$

em que

σ_{eq} = Tensão Equivalente por Von Mises

σ_1 = Tensão Máxima

σ_2 = Tensão Mínima

Assim as tensões residuais da solda da peça C obtidas pelo ensaio do furo cego estão representadas no quadro 12 das tensões mínimas, máximas e da tensão residual equivalente de acordo com a profundidade.

Quadro 12 – Tensões residuais.

SOLDA – PEÇA C			
Profundidade mm	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_{eq} (MPa)
0,011	779	701	743
0,017	784	707	748
0,024	791	711	754
0,033	803	715	763
0,043	818	715	772
0,054	833	712	780
0,067	845	707	785
0,081	851	703	788
0,096	849	698	784
0,113	841	687	776
0,131	825	667	758
0,150	804	641	736
0,171	780	605	709
0,193	752	571	680
0,216	715	551	649
0,241	686	525	621
0,267	677	483	604
0,294	667	450	589
0,323	645	429	569
0,352	617	404	543
0,384	574	374	505
0,417	530	340	465
0,451	495	299	432
0,486	467	261	405
0,523	456	237	395
0,561	471	227	408
0,600	500	224	434

(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Com os dados obtidos das tensões equivalentes deste quadro foi elaborado o gráfico da figura 32, que mostra a variação da tensão equivalente com a profundidade.

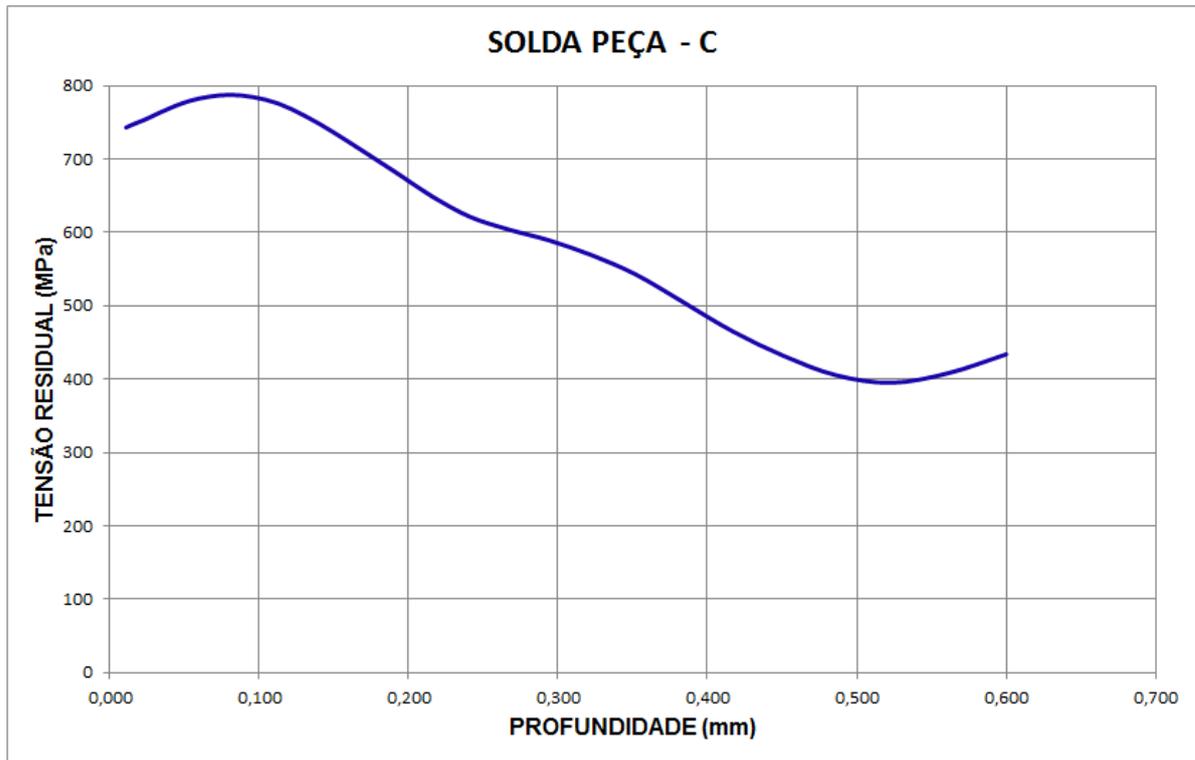


Figura 32 – Gráfico da tensão residual equivalente versus profundidade da solda C.
(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Com os dados obtidos no quadro 12 e com o gráfico da figura 32 pode-se observar que a tensão equivalente próxima a superfície foi de 743 MPa para uma profundidade de 0,011 mm e a tensão final obtida 434 MPa para 0,6 mm.

Identifica-se no gráfico da Figura 31 que a tensão residual equivalente da solda na peça C, diminui com o aumento gradativo da profundidade do furo cego.

9.2 Solda com TTAT – peça D

Foi utilizado para determinação das tensões residuais equivalente na soldagem com TTAT o mesmo método utilizado na peça C, cujos dados obtidos no quadro 13, representado pela peça D.

Quadro 13 – Tensões residuais após realização do TTAT.

SOLDA COM TTAT – PEÇA D			
Profundidade mm	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_{eq} (MPa)
0,011	576	372	506
0,017	572	357	500
0,024	565	338	492
0,033	550	312	478
0,043	519	275	450
0,054	463	228	401
0,067	377	171	327
0,081	287	120	250
0,096	217	69	192
0,113	171	76	148
0,131	150	72	130
0,150	122	63	106
0,171	70	44	61
0,193	29	3	28
0,216	19	-26	39
0,241	19	-32	45
0,267	50	-23	65
0,294	83	-4	85
0,323	100	25	90
0,352	90	31	79
0,384	122	44	107
0,417	143	33	130
0,451	73	31	63
0,486	81	-5	84
0,523	97	18	89
0,561	105	64	92
0,600	57	2	56

(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Com os dados obtidos das tensões equivalentes do quadro 13, foi elaborado o gráfico da figura 33, que representa as condições obtidas no ensaio de furo cego da solda com TTAT, representado a seguir.

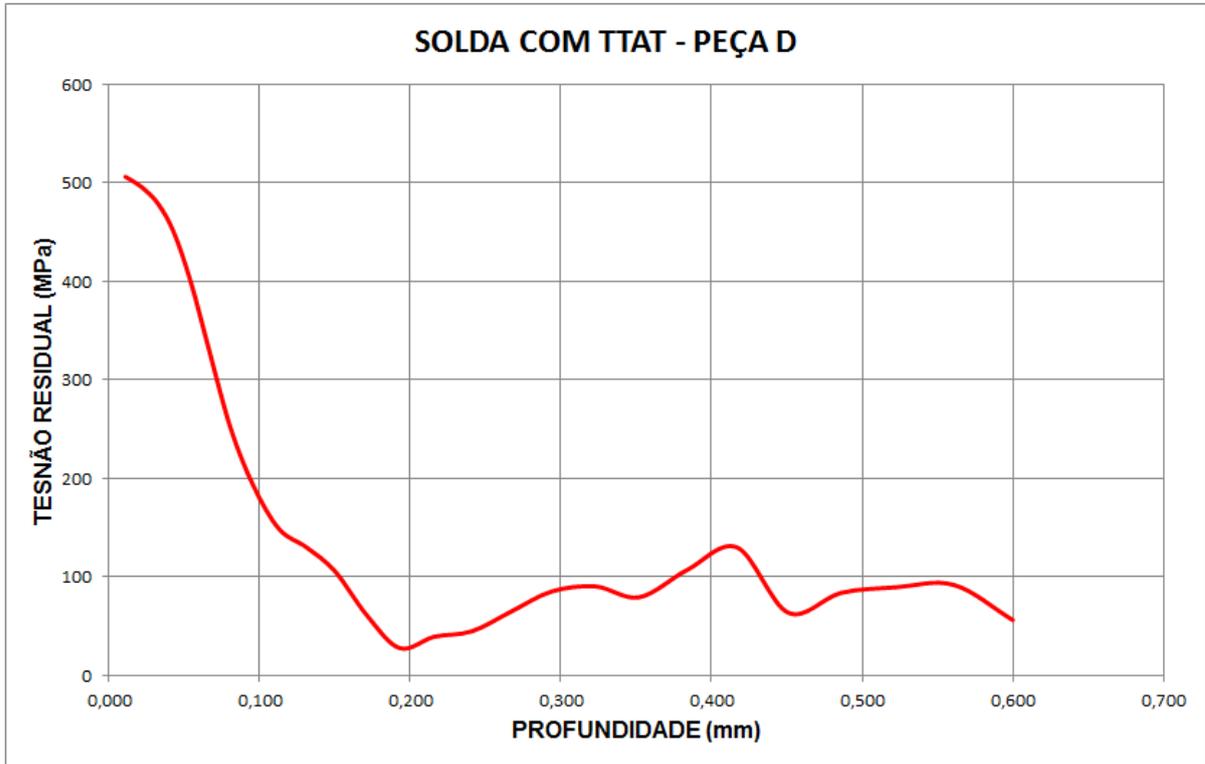


Figura 33 – Gráfico da tensão residual equivalente versus profundidade da solda com TTAT.
(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Com as tensões máximas e mínimas obtidas pelo ensaio por furo cego, onde foi determinada a tensão equivalente por Von Mises na solda com TTAT, com os dados obtido no quadro 13 é possível determinar a tensão residual equivalente próximo a superfície que representa 506 MPa de profundidade 0,011 mm e uma tensão residual equivalente final de 56 MPa para 0,6 mm.

Baseando-se nas informações obtidas no gráfico da figura 33, conclui-se que, conforme o aumento da profundidade a tensão residual equivalente diminui até a profundidade de 0,2 mm. A partir desta profundidade a tensão equivalente fica em torno de 79 MPa atingindo picos de 130 MPa e vales de 70 MPa.

9.3 Solda com vibração sem manta – peça A

Com os dados obtidos pelo ensaio do método do furo cego da solda com vibração sem manta foi elaborado o quadro 14, que representa a peça A.

Quadro 14 – Tensões residuais – solda com vibração sem manta.

SOLDA COM VIBRAÇÃO SEM MANTA – PEÇA A			
Profundidade mm	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_{eq} (MPa)
0,011	63	-82	126
0,017	73	-45	103
0,024	85	-3	87
0,033	101	52	87
0,043	124	106	116
0,054	182	131	163
0,067	255	155	223
0,081	328	183	285
0,096	396	215	343
0,113	461	252	400
0,131	516	290	448
0,150	561	324	488
0,171	596	354	519
0,193	619	375	540
0,216	629	388	550
0,241	628	395	550
0,267	622	395	545
0,294	618	386	541
0,323	606	381	531
0,352	586	389	516
0,384	578	392	511
0,417	589	387	518
0,451	607	384	532
0,486	620	391	543
0,523	636	396	556
0,561	661	389	575
0,600	705	363	611

(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Com as informações das tensões máximas e mínimas foi determinada a tensão equivalente por Von Mises.

Assim com os dados obtidos das tensões equivalentes coletadas no quadro 14, foi possível elaborar o gráfico da figura 34.

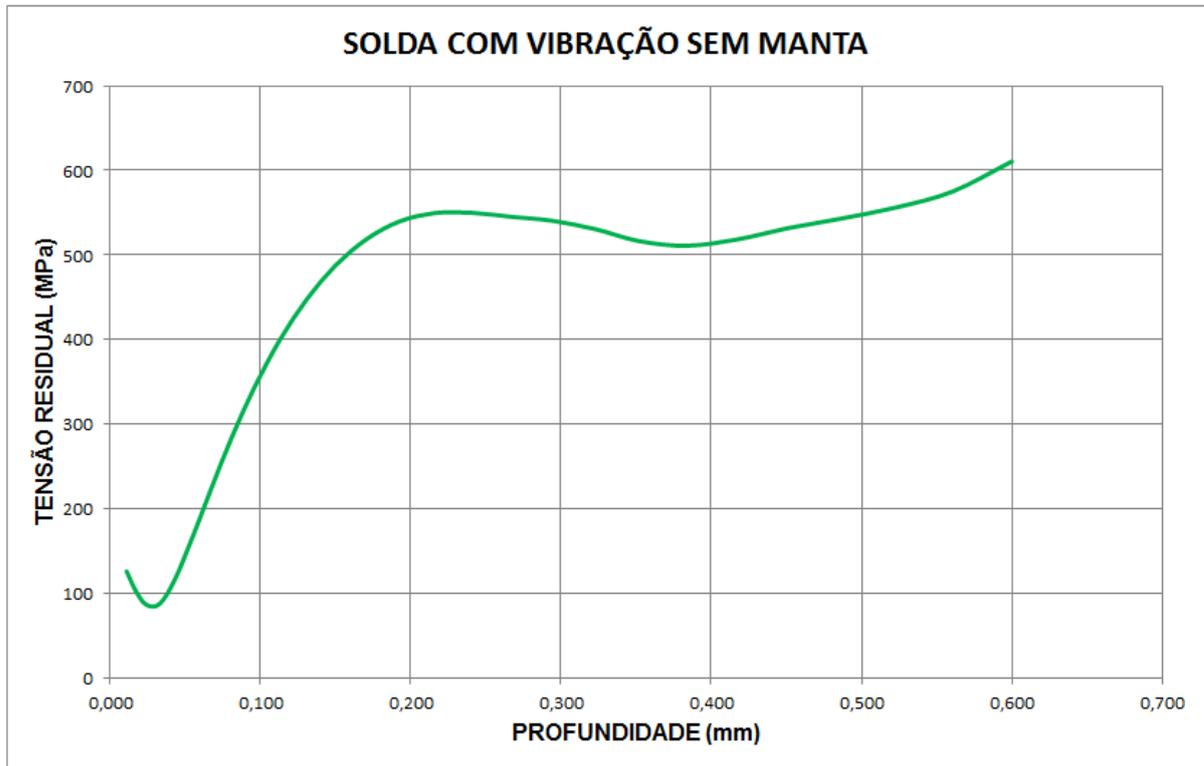


Figura 34 – Gráfico da tensão residual equivalente versus profundidade da solda com vibração e sem manta.

(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Partindo das informações obtidas do quadro 14 em que o mesmo apresenta uma tensão inicial de 126 MPa para uma profundidade de 0,011 mm e uma tensão final de 611 MPa de profundidade correspondente a 0,6 mm.

Observa-se no gráfico da Figura 33, que a tensão residual equivalente aumenta com o aumento da profundidade.

Com as informações obtidas no gráfico da figura 33, conclui-se que, conforme o aumento da profundidade a tensão residual equivalente diminui até a profundidade de 0,2 mm. A partir desta profundidade a tensão equivalente fica em torno de 547 MPa atingindo picos de 611 MPa e vales de 511 MPa.

9.4 Solda com vibração e manta – peça B

Do mesmo modo como se utilizou para determinar as tensões da solda com vibração sem manta, foi elaborado o quadro 15, com os parâmetros obtidos nos dados do ensaio por furo cego, para a soldagem com vibração e manta identificada como peça B, apresentada a seguir.

Quadro 15 – Tensões residuais – solda com vibração e manta.

SOLDA COM VIBRAÇÃO E MANTA – PEÇA B			
Profundidade mm	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_{eq} (MPa)
0,011	427	129	379
0,017	467	298	410
0,024	511	380	460
0,033	558	517	539
0,043	636	554	599
0,054	667	528	610
0,067	625	471	564
0,081	556	420	502
0,096	523	403	475
0,113	537	418	488
0,131	559	440	510
0,150	592	450	535
0,171	604	442	541
0,193	608	455	548
0,216	607	470	551
0,241	635	518	585
0,267	570	502	539
0,294	461	403	435
0,323	408	362	387
0,352	454	410	434
0,384	438	405	422
0,417	387	350	370
0,451	367	336	353
0,486	440	403	423
0,523	410	352	384
0,561	450	338	406
0,600	435	403	420

(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Com as informações das tensões máximas e mínimas onde foi determinada a tensão equivalente por Von Mises na solda com vibração e manta.

Assim, com os dados obtidos da tensão equivalente do quadro 15, foi possível elaborar o gráfico da figura 35, apresentado a seguir.

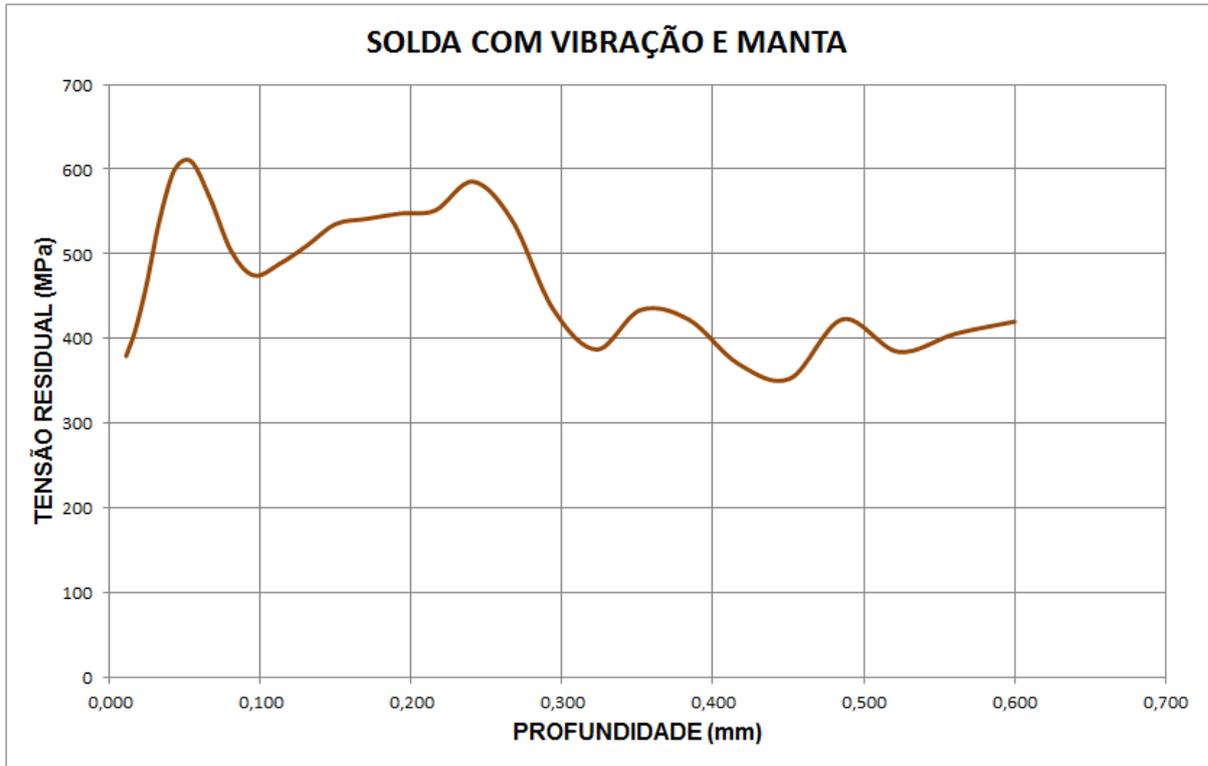


Figura 35 – Gráfico da tensão residual equivalente versus profundidade da solda com vibração e manta.

(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Pode-se afirmar com os dados obtidos no quadro 15, que a tensão inicial apresentada foi de 379 MPa com uma profundidade de 0,011 mm e uma tensão residual final de 420 MPa de uma profundidade de 0,6 mm.

Nota-se no gráfico da Figura 35, que a tensão residual equivalente da solda com vibração e manta sofre uma variação na tensão de acordo com o aumento da profundidade da peça B, submetida pelo ensaio do furo cego.

10 CONCLUSÃO

Para a avaliação se houve ou não a redução das tensões residuais equivalentes, as peças soldadas com vibração sem manta, com manta e com TTAT, foram comparadas com a soldagem sem tratamento e vibração.

10.1 Solda peça C – sem tratamento de alívio de tensões

Com relação à soldagem sem tratamento e sem vibração é possível afirmar após a avaliação da tensão equivalente mostrada na figura 31, que próximo a superfície da solda a tensão residual equivalente é de 743 MPa. Conforme a profundidade aumenta esta tensão diminui chegando ao limite de 434 MPa a uma profundidade máxima de 0,6 mm, com isso conclui-se que as maiores tensões estão próximas a superfície. Do quadro 12, foi determinado que a máxima tensão equivalente é 788 MPa, a mínima 395 MPa e a média 634 MPa. O desvio padrão encontrado foi de 142 MPa.

10.2 Solda peça D - com tratamento térmico de alívio de tensões

Do mesmo modo para a solda com TTAT foi possível afirmar após a avaliação da tensão equivalente mostrada na figura 32, que as tensões próximas a superfície da solda, possui uma tensão residual equivalente de 506 MPa, conforme a profundidade vai aumentando esta tensão diminui chegando ao limite de 56 MPa a uma profundidade máxima de 0,6 mm.

Do quadro 13, foi determinado que a máxima tensão equivalente é 506 MPa, a mínima 28 MPa e a média 194 MPa. O desvio padrão encontrado foi de 167 MPa.

Ainda no quadro 13, observa-se que a partir da profundidade de 0,113 mm a média da tensão residual equivalente fica em 83 MPa.

10.3 Solda peça A – ATVS sem manta

Para a solda com vibração sem manta conclui-se que após a avaliação da tensão equivalente mostrada na figura 33, a tensão próxima a superfície da solda apresenta uma tensão residual equivalente de 126 MPa a partir do aumento da profundidade até 0,6 mm onde a tensão limite é de 611 MPa

Do quadro 14, foi determinado que a máxima tensão equivalente 611 MPa, a mínima 87 MPa e a média 404 MPa. O desvio padrão encontrado foi de 183 MPa.

Ainda no quadro 14, observa-se que a partir da profundidade de 0,171 mm a tensão residual equivalente aumenta permanecendo na faixa de 520 MPa a 600 MPa

10.4 Solda peça B – ATVS com manta

Da mesma forma à solda com vibração com manta afirma-se que após a avaliação da tensão equivalente mostrada na figura 34, a tensão próxima a superfície da solda apresenta uma tensão residual equivalente de 379 MPa a partir do aumento da profundidade até 0,6 mm onde a tensão limite é de 420 MPa

Do quadro 15, foi determinado que a máxima tensão equivalente 610 MPa, a mínima 353 MPa e a média 477 MPa. O desvio padrão encontrado foi de 77 MPa.

Ainda na figura 34, observa-se que houve uma variação da tensão equivalente no decorrer da profundidade.

10.5 Comparação entre as peças soldadas

Com os dados obtidos das tensões residuais equivalentes pelo critério de Von Mises e utilizando o ensaio do método do furo cego na soldagem sem tratamento e sem vibração, soldagem com TTAT, soldagem com vibração e manta, soldagem com vibração sem manta, foi gerado o quadro 16 que possibilitou o acompanhamento e a comparação das medições de tensões geradas, desde a superfície das peças até a profundidade de 0,6 mm.

Quadro 16 – Comparação entre as tensões residuais equivalentes entre as soldas executadas.

PROFUNDIDADE mm	SOLDA COM VIBRAÇÃO SEM MANTA PEÇA - A σ_{eq} (MPa)	SOLDA COM VIBRAÇÃO E MANTA PEÇA - B σ_{eq} (MPa)	SOLDA SEM TRATAMENTO PEÇA - C σ_{eq} (MPa)	SOLDA COM TTAT PEÇA - D σ_{eq} (MPa)
0,011	126	379	743	506
0,017	103	410	748	500
0,024	87	460	754	492
0,033	87	539	763	478
0,043	116	599	772	450
0,054	163	610	780	401
0,067	223	564	785	327
0,081	285	502	788	250
0,096	343	475	784	192
0,113	400	488	776	148
0,131	448	510	758	130
0,150	488	535	736	106
0,171	519	541	709	61
0,193	540	548	680	28
0,216	550	551	649	39
0,241	550	585	621	45
0,267	545	539	604	65
0,294	541	435	589	85
0,323	531	387	569	90
0,352	516	434	543	79
0,384	511	422	505	107
0,417	518	370	465	130
0,451	532	353	432	63
0,486	543	423	405	84
0,523	556	384	395	89
0,561	575	406	408	92
0,600	611	420	434	56
MINIMO	87	353	395	28
MÁXIMO	611	610	788	506
MÉDIA	404	477	634	194
DES. PAD.	183	77	142	167

(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

Além dos dados das tensões obtidos neste ensaio também foi possível determinar a tensão máxima, mínima, a média e o desvio padrão de cada peça submetida a esse ensaio.

O quadro 16 possibilitou à visualização de cada ponto de tensão encontrada pelo ensaio do método do furo cego, aplicada nas diferentes peças, onde foi possível monitorar as tensões residuais geradas em cada corpo de prova, que gerou o gráfico da figura 36 a seguir.

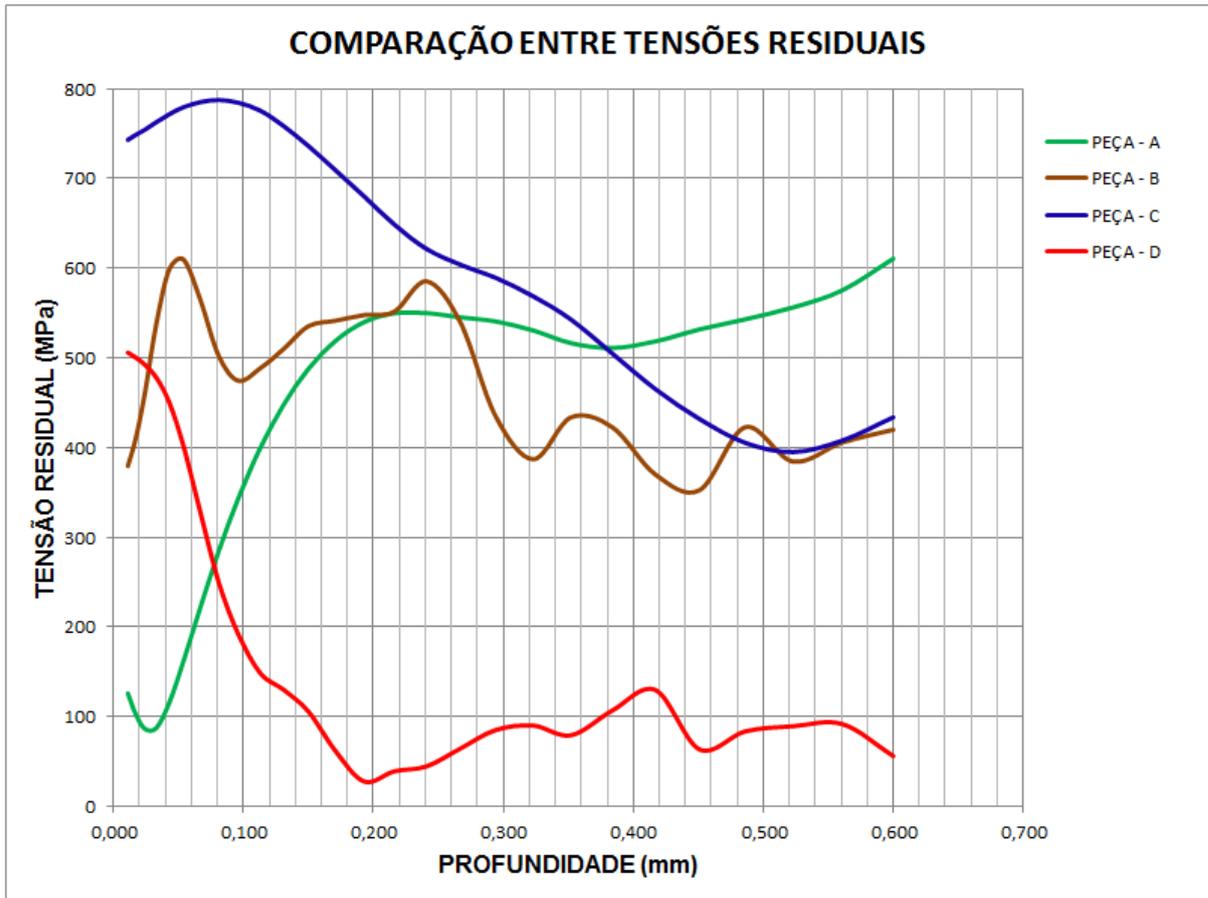


Figura 36 – Comparação entre as tensões residuais equivalentes.
(Fonte: Elaborada pelo autor, 2016).

O gráfico da figura 36 apresenta as diferenciações das tensões encontradas em cada peça de teste, de acordo com as tensões residuais versus profundidade, possibilitando comparar os dados estudados, dentro dos parâmetros encontrados nos ensaios.

Para uma comparação da efetividade da redução das tensões residuais nas peças, foi considerada a tensão residual de 400 MPa, que é a tensão máxima atingida na peça C.

As tensões residuais equivalentes apresentadas pela peça C, em comparação com a peça D em cada ponto monitorado da profundidade foram de 32% maior no início do ensaio e 87% maior ao término e dentro da média dos dados obtidos no ensaio, ficou em torno de 69% maior, caracterizando assim a eficiência do TTAT na remoção das tensões residuais equivalentes, produzidas após a soldagem.

As tensões residuais equivalentes apresentadas pela peça C, em comparação com a peça A verificou-se que as tensões residuais desta, ficaram acima da tensão

limite de 400 MPa, caracterizando que não houve uma redução das tensões residuais da soldagem com vibração sem manta .

Do mesmo modo quando comparado com a peça B, as tensões residuais também ficaram acima do limite de 400 MPa, caracterizando assim que também não houve uma redução das tensões residuais da soldagem com vibração e manta.

As tensões residuais equivalentes apresentadas pela peça D, em comparação com a peça A em cada ponto monitorado da profundidade, foram de 75% maior no início do ensaio e 91% menor ao termino e dentro da média dos dados obtidos no ensaio ficou em torno de 52% menor, caracterizando novamente a eficiência do TTAT na remoção das tensões residuais equivalentes comparados com o procedimento aplicado nessa soldagem com vibração sem manta.

As tensões residuais equivalentes apresentadas pela peça D, em comparação com a peça B em cada ponto monitorado da profundidade, foram de 25% maior no início do ensaio e 87% menor ao termino e dentro da média dos dados obtidos no ensaio ficou em torno de 59% menor, caracterizando novamente a eficiência do TTAT na remoção das tensões residuais equivalentes comparados com o procedimento aplicado nessa soldagem com vibração com manta.

As tensões residuais equivalentes apresentadas pela peça A, em comparação com a peça B em cada ponto monitorado da profundidade, foram de 76% menor no início do ensaio e 31% maior ao termino e dentro da média dos dados obtidos no ensaio ficou em torno de 15,3%, caracterizando assim, que as variações ocorreram de forma aleatória em pontos específicos.

Logo, diante das informações obtidas e comparadas com os dados utilizados dentro dos parâmetros estudados no quadro 16, conclui-se que a forma mais eficiente para o tratamento de alívio de tensões residuais, ainda é o método utilizado pelo TTAT em comparação aos demais métodos expostos neste trabalho.

11 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta pra trabalhos futuros, poderá ser verificada as seguintes condições:

1 – Executar a soldagem no aço AISI 4140 e submeter ao método de vibração sub-ressonante após essa soldagem;

2 – Analisar por meio de ensaio de dureza e macrografia, estudando a morfologia da região soldada e da ZAT.

3 – Realizar ensaio de fadiga para a verificação do comportamento do corpo de prova a esse tipo de solicitação;

4 - Executar ensaio de tração e ensaio de dureza em peças soldadas com vibração para determinação do limite de resistência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR – **Níveis de Normalização**, <http://www.abnt.org.br/normalizacao/o-que-e/niveis-de-normalizacao> - acesso em 23/01/2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 87/2000: Aços carbono e ligados para construção mecânica - designação e composição química**. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6215/2011: Produtos siderúrgicos - Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

AGUIAR, W. M. - **Soldagem do aço ABNT 4140 sem Tratamento Térmico Posterior**. Fortaleza, UFC, 2001, 96p. Dissertação (mestrado). Programa de Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza: 2001.

AGUIAR, W. M.; FARIAS, J. P.; SILVA, C. C. - **Avaliação da Tenacidade da ZAC-GG em Aço ABNT 4140 Recuperado por Soldagem**. In: XX Encontro de Iniciação a Pesquisa, Universidade Federal do Ceará, 2002.

ALBERTO, A. J., **Comparação das Tensões Residuais em Soldas de Reparo no Aço ASTM A335 Gr.P91 Submetidas aos Tratamento de Alívio de Tensões por Tratamento Térmico e por Vibração Sub-ressonante** – Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Santa Cecília, Santos – São Paulo, 2016.

AISI – American Iron and Steel Institute – <https://www.steel.org> - Acesso em 23/01/2016.

AOKI, S., NISHIMURA, T., HIROI, T., **Reduction method for residual stress of welded joint using random vibration** – Nuclear Engineering and Design, Volume 235, Issue 14, June 2005, Pages 1441-1445. (science direct)

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. E 837-13. **Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method**. West Conshohocken, 2013, 17 p.

ASME – AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS – **Process piping B31.3 – 2014**. - [https://www.asme.org/products/codes-standards/b313-2014-process-piping-\(1\)](https://www.asme.org/products/codes-standards/b313-2014-process-piping-(1)) – Acesso em 29/10/2016.

ASME – AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS – **Mission, Vision-and-strategic** - https://www.asme.org/about-asme/who-we-are/mission-vision-and-strategic-focus?cm_re=Who%20We%20Are-_-Left%20Navigation-Mission%20Vision%20and%20Strategic%20Priorities - Acesso em 03/05/2016.

ASM METALS HANDBOOK - **Volume 06 - Welding, Brazing and Soldering**, TA459.M43 1990 620.1'6 90-115; ISBN 0-87170-377-7(V.1), SAN 204-7586 ISBN 0-87170-382-3, Printed in THE UNITED STATES OF AMERICA, Materials Park, OHIO,1993.

ASM METALS HANDBOOK - **Heat-treating** - American Society for Metals, v.4, Materials Park, OHIO,1991.

AWS A3.0 – **Standard Welding Terms and Definitions** – Edition 2010.

BRAGA, E. M. - **A Vibração como Elemento de Alívio de Tensões Residuais em Cordões de Solda**. Grupo de Caracterização de Materiais - GCAM, ITEC – UFPA, Belém, PA – Agosto, 2011.

BONAL TECHNOLOGIES INC., Disponível em <http://www.bonal.com/tech/tech.html>, - Acesso em 10/02/2016.

BUENO, E. R. - **Desenvolvimento do Procedimento de Soldagem do AISI 4140 sem Tratamento Térmico Posterior** - Dissertação de Mestrado - Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

CALLISTER, Jr., W. D.– **Ciência e engenharia de materiais uma introdução** – Editora - LTC, Rio de Janeiro, 2008.

COFIÑO, R. C. - **Análise das Tensões Residuais em uma Junta Soldada em Condição Overmatch** - Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2010. Disponível em: <http://fei.edu.br/~rodrMagn/TFC/Rachel.pdf>. Acessado em 02/04/2012

CORREA, F. J. – **Comparação das propriedades mecânicas do aço AISI 4140 no estado recozido e no estado normalizado** - [http://www.ufrgs.br/ldtm/publicacoes/Artigo%20-%20Recozimento Normaliza%C3%A7%C3%A3o%20-%20Forge.pdf](http://www.ufrgs.br/ldtm/publicacoes/Artigo%20-%20Recozimento%20Normaliza%C3%A7%C3%A3o%20-%20Forge.pdf) – Acesso em 16/06/2016

CRISI, G. S.; MENDONCA D. P.; **Stress relief of welds by heat treatment and vibration: a comparison between the two methods**. The Library Vibratory Stress Relief. p. 1 – 8, 2006. http://www.vsrtechnology.net/wp-content/uploads/crisi_mendonca.pdf - Acesso em 17/06/2016.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. 599p.

DONATO, G. H. B. - **Efeitos de Heterogeneidades Mecânicas sobre Forças Motrizes de Trinca em Juntas Soldadas: Determinação Experimental de Tenacidade e Extensão de Metodologias de Avaliação de Criticidade de Defeitos**. - 284 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

FILHO, P. P. R., CAVALCANTE, T. S., ALBUQUERQUE, V. H. V., SILVA, C. C., TAVARES, J. M. R. S. – **Sistema Computacional para Determinação da Taxa de Diluição em Soldadura** – Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões ISSN-1646-7078 – volume. 18, p 55-61.- Portugal, 2010.

FREITAS, C. A. S. - **Análise Teórico-experimental da Conexão Estampada de Treliça Espacial de Aço sob carregamentos Estático e Cíclico**. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2008.

FREITAS, W. S. - **Avaliação das Propriedades Mecânicas e Resistência a Fadiga do Aço AISI 4140 Submetido a Diferente Valores de Temperatura de Revenimento**, Dissertação de mestrado - Pontifica Universidade Católica de Minas gerais - Belo Horizonte, MG. 2010.

GASPAR, N. J.; – **Potencial Uso do Passe de Revenimento no Reparo de Soldas; Avaliação Via Mapeamento de Durezas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Santa Cecilia, Santos - SP, 2013.

HEBEL, T. E. - **Heat-treating, stress relieving**. p 1, 2, 3, 4 set. 1989.

HEINZE, C., SCHENK, C., RETHMEIER, M. – **Numerical calculation of residual stress development of mult-pass gas metal arc welding** - journal of constructional steel research, Agosto – 2011.

HORNSEY, J. S., **Residual Stresses: Their Causes, and the Effective Means of Treatment to Reduce the Residual Stresses and to Improve the Fatigue Life in Engineering Components**, South Africa, January – 2006.

JIJIN X. LIGONG C., CHUNZHEN N., **Effect of vibratory weld conditioning on the residual stresses and distortion in multipass girth-butt welded pipes**, Institute of Welding, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China Received 6 July 2006; received in revised form 7 November 2006; accepted 7 November - 2006.

KÜCHLER, M. M. – **Aplicação da Técnica da Dupla Camada na Soldagem de Dutos em Operação** – Porto Alegre: UFRGS, 2009. 95 pg. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM – Porto Alegre, RS – 2009.

MAKINO, A.; NELSON, D. V. **Residual-stress Determination by Single-axis Holographic Interferometry and Hole Drilling – Part I: Theory**. Experimental Mechanics, v. 34, p. 66-78, Março - 1994.

MANSUR, T. R.; ATANZIO, F. N. N.; GOMES, P. T. V.; RABELLO, E. G.; SILVA, L. L.; SCORALICK, G. A.; SANTOS, M. C. V.; BRACARENSE, A. Q. - **Estudo das tensões residuais em juntas soldadas de materiais dissimilares e determinação dos limites de resistência à fadiga dos metais de base** – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – Revista soldagem e inspeção, volume 16, p274-284, – Belo Horizonte, Minas Gerais, 2011.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; SANTOS, D. B. **Introdução a Metalurgia da Soldagem**. – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf> - Acesso em 16/06/2015.

MARTINS, C. A. P.; - **Alívio de Tensões por vibrações sub-ressonantes: Análise e parametrização**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Santa Cecília, Santos – São Paulo, 2014.

MOREIRA, A. F. - **Influência da Atmosfera Protetora no Cordão de Solda Obtido Através dos Processos de Soldagem GMAW e FCAW**. – Unesp - Universidade Estadual Paulista., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), p.146, 2008.

MOOSBRUGUER, Charles – **Atlas of stress – strain curves** – ASM – Internacional – Second edition – ISBN – 13.980-0 87170-739-0 – 2002

RAO, Singiresu - **Vibrações Mecânicas** - 4. ed. – Editora – Person, 2008.

RASMA, E. T. - **Caracterização Estrutural e Mecânica do Aço AISI/SAE 4140 Tratados sob diferentes Tratamentos Térmicos** – Campo dos Goytacazes – RJ – Dissertação de mestrado – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF – 2015.

REGAZZI, F. C. L. - **Normas Técnicas: Conhecendo e Aplicando na sua Empresa**. 4.ed. revisada e atualizada - Carlos Luiz Regazzi Filho. -Brasília, D.F.: CNI, COMPI, 2000.55p.

RODRIGUES, L. D. - **Medição de Tensões Residuais em Tubos visando a Determinação de Esforços em Dutos Enterrados** - Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/10462/10462_3.PDF e http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/10462/10462_1.PDF - Acesso em 24/01/2016.

SANTOS, C. H. – Dissertação de Mestrado – **Estudo do Alívio de Tensões Residuais, em Peças Estampadas, pela Técnica de Vibração Mecânica** - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – SP, 2011.

SKINNER, R. D. **An investigation Into the Theory behind Sub-Resonant Stress Relieve** – Uma Pesquisa sobre a Teoria de Alívio de Tensões por Vibrações Sub-Resonantes. p. 10, 1987. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

SOUZA, S. A. – **Composição Química dos Aços** – São Paulo, Editora Edgard Blucher – 1987 – 3ª reimpressão 2009.

SUTERIO, R. - **Medição de Tensões Residuais por Indentação Associada à Holografia Eletrônica**, 169 f. Tese: Doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

TEOFILO, J. B. L.- **Estrutura e Propriedades dos Materiais** - UFPA – ITEC – Universidade de Engenharia Mecânica - <https://jorgeteofilo.files.wordpress.com/2013/11/epm-apostila-capc3adtulo09-ensaios-mod.pdf> - Acesso em 06/06/2016.

TOTTEN, G. E.; HOWES, M.; INOUE, T. - **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel – Manual de Tensões Residuais e Deformações do Aço**. Ohio: ASM International, 2003.

WAINER, E. B.; Sérgio, D.; MELLO, F. D. H. – **Soldagem – Processo e Metalurgia**
– Editora Blucher, 9^a reimpressão – 2013.

ZALAZAR, M. - **Soldabilidade dos Aços** -
<https://metfusion.wordpress.com/2013/08/10/soldabilidad-de-los-aceros/&prev=search> - Ing, Universidad Nacional del Comahue. Argentina, 2013 –
Acesso em 06/06/2016.

ANEXO A

Dados de ensaios por meio de furo cego soldagem com vibração sem manta – peça

A.

```

H-DRILL RESIDUAL STRESS CALCULATION ----- Integral Method
-----
1 vib sem manta

Rosette type           = 062 RE           Rosette mean diameter = 5.13 mm
Young's modulus        = 207.0 GPa          Hole diameter          = 1.600 mm
Poisson's ratio        = 0.300             Stress depth limit    = 1.03 mm

Std strain err (auto) = 0.3 ue

Rms strain misfit     = 0.4 ue <-- satisfactory

beta=angle Smax clockwise from gage 1

--- STRAINS --- 90% ----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----
Depth   e1   e2   e3  prob. Smax  Smin  Tmax  beta  SX   SY   TXY
mm      ue   ue   ue  bound MPa   MPa   MPa   deg  MPa  MPa  MPa
-0.006  0    0    0
0.000   0    0    0      63   -82   72   66   -58   40  -53
0.011   0   -1   -1      73   -45   59   66   -25   54  -44
0.014   0   -1   -1      85    -3   44   65    13   69  -34
0.017   0   -1   -1     101    52   24   61    63   89  -20
0.021   0   -2   -1     124   106    9   29   120  110   -8
0.024   0   -2   -1     182   131   26   -3   182  131    3
0.028   1   -2   -1     255   155   50   -6   254  156   10
0.033   1   -2   -1     328  183   72   -4   327  184   11
0.038   1   -2   -1     396  215   91   -2   396  215    7
0.043   1   -2   -1     461  252  104    0   461  252    1
0.049   0   -2   -1     516  290  113    1   516  290   -3
0.054   0   -2   -1     561  324  119    0   561  324   -1
0.060   0   -2   -1     596  354  121   -1   595  354    4
0.067  -2   -3   -3     619  375  122   -1   619  375    5
0.074  -2   -3   -3     629  388  121    0   629  388    2
0.081  -5   -6   -4     628  395  117    0   628  395    0
0.089  -9   -8   -6     622  395  113   -1   622  395    5
0.096  -9   -8   -6     618  386  116   -3   618  386   11
0.105  -14  -12  -8     606  381  112   -2   606  382    8
0.113  -14  -12  -8     586  389    98   -1   586  389    5
0.122  -20  -17  -11     578  392    93    1   578  392   -2
0.131  -20  -17  -11     589  387  101    1   589  387   -5
0.141  -28  -23  -14     607  384  111   -1   607  384    3
0.150  -28  -23  -14     620  391  114   -2   620  392    8
0.161  -37  -29  -19     636  396  120    0   636  396   -1
0.171  -37  -29  -19     661  389  136   -2   661  389   12
0.182  -47  -36  -23     705  363  171   -9   697  371   53
0.193  -47  -36  -23     629  388  121    0   629  388    2
0.205  -59  -45  -29     628  395  117    0   628  395    0
0.216  -59  -45  -29     622  395  113   -1   622  395    5
0.229  -71  -54  -34     618  386  116   -3   618  386   11
0.241  -71  -54  -34     606  381  112   -2   606  382    8
0.254  -84  -64  -41     586  389    98   -1   586  389    5
0.267  -84  -64  -41     578  392    93    1   578  392   -2
0.280  -99  -74  -48     589  387  101    1   589  387   -5
0.294  -99  -74  -48     607  384  111   -1   607  384    3
0.308  -115  -86  -55     620  391  114   -2   620  392    8
0.323  -115  -86  -55     636  396  120    0   636  396   -1
0.338  -130  -97  -63     661  389  136   -2   661  389   12
0.352  -130  -97  -63     705  363  171   -9   697  371   53
0.368  -146 -109 -71     607  384  111   -1   607  384    3
0.384  -146 -109 -71     620  391  114   -2   620  392    8
0.400  -164 -123 -80     636  396  120    0   636  396   -1
0.417  -164 -123 -80     661  389  136   -2   661  389   12
0.434  -181 -135 -87     705  363  171   -9   697  371   53
0.451  -181 -135 -87     629  388  121    0   629  388    2
0.468  -201 -149 -97     628  395  117    0   628  395    0
0.486  -201 -149 -97     622  395  113   -1   622  395    5
0.505  -220 -163 -105     618  386  116   -3   618  386   11
0.523  -220 -163 -105     606  381  112   -2   606  382    8
0.542  -240 -177 -113     586  389    98   -1   586  389    5
0.561  -240 -177 -113     578  392    93    1   578  392   -2
0.587  -261 -189 -120     589  387  101    1   589  387   -5
0.600  -261 -189 -120

```


ANEXO C

Dados de ensaios por meio de furo cego solda sem tratamento – peça C.

```

H-DRILL RESIDUAL STRESS CALCULATION ----- Integral Method
-----
3 não vib

Rosette type           = 062 RE           Rosette mean diameter = 5.13 mm
Young's modulus        = 207.0 GPa          Hole diameter          = 1.600 mm
Poisson's ratio        = 0.300             Stress depth limit     = 1.03 mm

Std strain err (auto) = 0.5 ue

Rms strain misfit      = 0.4 ue <-- satisfactory

beta=angle Smax clockwise from gage 1

--- STRAINS --- 90% ----- STRESSES (X is in gage 1 direction) ----
Depth   e1   e2   e3  prob. Smax  Smin  Tmax  beta  SX   SY   TXY
  mm    ue   ue   ue  bound  MPa   MPa   MPa   deg  MPa  MPa  MPa
0.006   -1   -1   -1
0.008           779  701   39  -10  776  704   13
0.011   -2   -2   -2
0.014           784  707   39   -5  783  707    7
0.017   -4   -4   -3
0.021           791  711   40    1  791  711   -1
0.024   -6   -6   -6
0.029           803  715   44    8  801  716  -12
0.033  -10   -9   -9
0.038           818  715   52   14  811  721  -25
0.043  -15  -14  -13
0.049           833  712   60   19  820  725  -37
0.054  -22  -21  -19
0.061           845  707   69   22  826  727  -48
0.067  -26  -25  -22
0.074           851  703   74   24  828  727  -54
0.081  -34  -33  -28
0.089           849  698   76   24  825  723  -56
0.096  -42  -40  -34
0.104           841  687   77   24  815  712  -57
0.113  -51  -50  -43
0.122           825  667   79   23  801  692  -57
0.131  -62  -62  -53
0.140           804  641   81   22  782  663  -55
0.150  -73  -72  -61
0.161           780  605   87   22  756  628  -60
0.171  -87  -85  -71
0.182           752  571   91   22  726  597  -64
0.193  -99  -98  -80
0.205           715  551   82   20  697  570  -52
0.216 -115 -113 -92
0.228           686  525   80   19  669  542  -49
0.241 -130 -128 -105
0.254           677  483   97   22  649  511  -67
0.267 -146 -144 -116
0.280           667  450  108   22  637  479  -74
0.294 -163 -161 -128
0.309           645  429  108   17  626  447  -61
0.323 -181 -178 -140
0.338           617  404  106   13  606  416  -48
0.352 -201 -196 -152
0.368           574  374  100   10  568  380  -32
0.384 -218 -212 -163
0.400           530  340   95    3  530  341  -10
0.417 -237 -228 -174
0.434           495  299   98    1  495  299   -2
0.451 -256 -244 -185
0.469           467  261  103    2  466  261   -6
0.486 -274 -258 -193
0.504           456  237  109    3  455  238  -11
0.523 -291 -272 -202
0.542           471  227  122    1  471  227   -3
0.561 -310 -286 -209
0.587           500  224  138   -8  495  229   36
0.600 -329 -299 -217

```

