FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LEONARDO CORRÊA NEVES
LUIZ HENRIQUE ALVES VIEIRA
SADRAQUE SOUZA PRATES
SANDER ZAMBON

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO EM JUNTA SOLDADA PELO PROCESSO TIG – AÇO ASTM A335 (P11)

ARACRUZ
2017

LEONARDO CORRÊA NEVES
LUIZ HENRIQUE ALVES VIEIRA
SADRAQUE SOUZA PRATES
SANDER ZAMBON

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO EM JUNTA SOLDADA PELO PROCESSO TIG – AÇO ASTM A335 (P11)

Trabalho de conclusão de curso submetido ao departamento de Engenharia Mecânica da FAACZ – Faculdades Integradas de Aracruz como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. João Paulo Calixto da Silva.

ARACRUZ
2017

LEONARDO CORRÊA NEVES

LUIZ HENRIQUE ALVES VIEIRA

SADRAQUE SOUZA PRATES

SANDER ZAMBON

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO EM JUNTA SOLDADA PELO PROCESSO TIG – AÇO ASTM A335 (P11)

Trabalho de conclusão de curso submetido ao departamento de Engenharia Mecânica da FAACZ – Faculdades Integradas de Aracruz como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em ___ de _____ de 2017

COMISSÃO EXAMINADORA

_____

Prof. Me. João Paulo Calixto da Silva
Faculdades Integradas de Aracruz
Orientador

_____

Prof. Esp. Anderson Fanchiotti da Silva
Faculdades Integradas de Aracruz

_____

Prof. Esp. Ernandes Marcos Scopel
IFES - Aracruz

DECLARAÇÃO DO AUTOR

Declaro, para fins de pesquisa acadêmica, didática e técnico-científica, que este Trabalho de Conclusão de Curso pode ser parcialmente utilizado, desde que se faça referência à fonte e ao autor.

Aracruz, ___ de _____ de 2017.

LEONARDO CORRÊA NEVES
LUIZ HENRIQUE ALVES VIEIRA
SADRAQUE SOUZA PRATES
SANDER ZAMBON

À Deus pela vida e por ter nos guiado em todos os momentos desta trajetória.

Ao Professor João Paulo Calixto da Silva pela orientação, apoio e atenção concedida que foram de suma importância para realização deste trabalho.

Aos professores, alunos e funcionários da FAACZ que colaboraram de forma direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

Ao Instituto Federal do Espírito Santo (IFES – Campus Aracruz), a FAACZ (Faculdades Integradas de Aracruz) e a empresa IMETAME que forneceram todos os recursos técnicos que possibilitaram a realização deste trabalho.

Às nossas famílias pelos apoios e incentivos ao longo desta trajetória.

Por fim, a todos que de certa forma nos ajudaram a realizar este trabalho.

O NOSSO MUITO OBRIGADO!

RESUMO

O aço ligado ASTM A335 P11 pode apresentar diferentes comportamentos quando se aplicam diferentes tipos de tratamentos térmicos (BOSQUETTI et. al., 2015). Neste trabalho foi avaliada a influência da temperatura de pré-aquecimento no comportamento da junta soldada do aço ASTM A335 P11 pelo processo de soldagem TIG utilizando como material de adição o eletrodo ER 80S-B2. O pré-aquecimento adotado foi baseado no cálculo do carbono equivalente, onde o resultado obtido de 0,48 levou a escolha da temperatura de 200 ºC, e para estudo e comparação, foi escolhida as temperaturas de 100 ºC e 300 ºC, e verificando suas influências através dos ensaios de micrografia, microdureza e tração. Avaliando as juntas soldadas, estas apresentaram melhores resistências a tração e uma menor dureza com o uso da maior temperatura de pré-aquecimento, com isso pode-se constatar que o uso do pré-aquecimento é de extrema importância na soldagem desse aço.

Palavras-chave: ASTM A335 (P11); Pré-aquecimento; Soldagem TIG.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Soldagem TIG (Esquemática) 16
Figura 02 - Equipamento para soldagem TIG 17
Figura 03 - Aço ligado ASTM A335 P11. 25
Figura 04 - Aço ligado ASTM A335 P11 já cortado 26
Figura 05 - Detalhe ilustrativo do chanfro. 27
Figura 06 - Fresadora CLEVER HV-1. 28
Figura 07 - Esquema de separação das juntas. 28
Figura 08 - Maçarico utilizado para aplicação do pré-aquecimento 30
Figura 09 - Termômetro infravermelho modelo MT-360 30
Figura 10 - Máquina de Solda 31
Figura 11 - Ilustração da junta soldada 32
Figura 12 - Ilustração dos corpos de prova divididos 32
Figura 13 - Ilustração do corpo de prova para ensaio de tração 33
Figura 14 - Máquina de ensaio de tração EMIC DL-60000 33
Figura 15 - Lixamento, polimento e ataque das amostras 34
Figura 16 - Microscópio Óptico 34
Figura 17 - Perfil de microdureza especificado pela norma H-0133 35
Figura 18 - Microdurômetro digital HM112 35
Figura 19 - MB sem receber pré-aquecimento, 250X. 36
Figura 20 - MB com com pré-aquecimento de 100 °C, 250X. 36
Figura 21 - MB com com pré-aquecimento de 200 °C, 250X. 37
Figura 22 - MB com com pré-aquecimento de 300 °C, 250X. 37
Figura 23 - MS 100 °C, 400X. 37
Figura 24 - Textura acicular 37
Figura 25 - MS com com pré-aquecimento de 200 °C, 400X. 38
Figura 26 - MS com com pré-aquecimento de 300 °C, 400X. 38
Figura 27 - ZTA com com pré-aquecimento de 100 °C, 250X. 39
Figura 28 - ZTA com com pré-aquecimento de 200 °C, 250X. 39
Figura 29 - ZTA com com pré-aquecimento de 300 °C, 250X. 39
Figura 30 - Perfil de dureza da junta com pré-aquecimento de 100 °C 40
Figura 31 - Perfil de dureza da junta com pré-aquecimento de 200 °C 40
Figura 32 - Perfil de dureza da junta com pré-aquecimento de 300 °C 41

Figura 33 - Comparação entre as durezas da linha 1 42
Figura 34 - Comparação entre as durezas da linha 2 42
Figura 35 - Ensaio de tração 100 °C 43
Figura 36 - Ensaio de tração 200 °C 44
Figura 37 - Ensaio de tração 300 °C 44

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Soldagem TIG e polaridade utilizadas para diferentes metais.....18
Tabela 02 - Temperatura de pré-aquecimento recomendada x Ceq 21
Tabela 03 - Composição química do aço ASTM A335 Grau P11 25
Tabela 04 - Propriedades mecânicas dos aços com especificação A-335 25
Tabela 05 - Composição química do aço ASTM A335 Grau P11 conforme o CERTIFICADO DE INSPEÇÃO do fabricante 26
Tabela 06 - Composição química do eletrodo ER80S-B2 27
Tabela 07 - Ensaio de tração do aço ASTM A335 P11 45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME - American Society of Mechanical Engineers

ASTM - American Society for Testing and Materials

C - Carbono

Ceq - Carbono Equivalente

Cr - Cromo

Cu - Cobre

GMAW - Gas Metal Arc Welding

GTAW - Gas Tungsten Arc Welding

IIW – International Institute of Welding

MAG - Metal Active Gas

MB – Metal de base

MIG - Metal Inert Gas

Mm - Milímetros

Mn - Manganês

Mo – Molibidênio

MS – Metal de solda

Ni - Níquel

P - Fósforo

S - Enxofre

SAW - Submerged Arc Welding

Si - Silício

SMAW - Shielded Metal Arc Welding

TIG - Tungsten Inert Gas

V - Vanádio

ZAC - Zona Afetada pelo Calor

ZTA - Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
2 OBJETIVOS 14
2.1 OBJETIVO GERAL 14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15
3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM 15
3.1.1 Processo de soldagem TIG 16
3.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS 18
3.2.1 **Pré-aquecimento** 19
3.2.1.1 Como determinar a temperatura ideal de pré-aquecimento 20
3.3 ZONA TÉRMICAMENTE AFETADA 22
3.4 METAL BASE 23
4 METODOLOGIA 26
4.1 METAL BASE 26
4.2 METAL DE ADIÇÃO 27
4.3 PREPARAÇÃO E SOLDAGEM DAS AMOSTRAS 27
4.3.1 Corpo de prova 27
4.3.2 Pré-aquecimento 29
4.3.3 Processo de soldagem TIG 31
4.6 ENSAIO DE TRAÇÃO 33
4.7 MICROGRAFIA 34
4.8 ENSAIO DE MICRODUREZA 35
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 36
5.1 MICROGRAFIA 36
5.2 ENSAIO DE MICRODUREZA 40
5.3 ENSAIO DE TRAÇÃO 43
6 CONCLUSÕES 46
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 46
REFERÊNCIAS 47
ANEXO A 51
ANEXO B 53
ANEXO C 55

ANEXO D 56

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui cerca de 2926 usinas termelétricas, ao qual contribuem com cerca de 26,9% do total de potência instalada de geração de energia elétrica (ANEEL, 2017). A geração do vapor é de fundamental importância nessas usinas e seu transporte se faz necessário (BOSQUETTI et. al., 2015). Um aço muito utilizado para fazer esse transporte é o ASTM A335 (P11).

O aço ligado ASTM A335 P11 é muito utilizado em tubulações que transportam vapor, por ter bom desempenho quando em uso em alta temperatura, e pode apresentar diferentes comportamentos quando se aplicam diferentes tipos de tratamentos térmicos (BOSQUETTI et. al., 2015). A soldagem desses aços requerem cuidados especiais, pois são materiais temperáveis por causa da adição de elementos de liga, e tem sua ZTA suscetível ao endurecimento (GIMENES JUNIOR, 1997).

Pelo fato da maioria dos metais serem bons condutores térmicos, o calor na região de soldagem é rapidamente escoado por toda a massa envolvida no processo, acarretando um resfriamento relativamente rápido. Para cada composição de aço existe uma taxa de resfriamento crítico e se a taxa de resfriamento escolhida excede o valor crítico do metal de solda, estruturas duras de martensita podem se desenvolver e então existe um grande risco de fraturas sobre a influência das tensões térmicas na presença de hidrogênio (TSAI, 1993 apud PEREZ, 2007).

O pré-aquecimento é o método mais largamente usado para eliminar as trincas induzidas por hidrogênio (trincas a frio – são aquelas que ocorrem algum tempo após a soldagem) em soldas. O pré-aquecimento diminui a taxa de resfriamento da solda, reduz as chances para formação de microestruturas frágeis, influenciando nas propriedades mecânicas da junta soldada e aumentando o tempo para o hidrogênio se difundir da solda (DAVIDSON, 2003 apud GASPAR, 2013).

O pré-aquecimento é aplicado quando se deseja controlar as propriedades mecânicas do metal base, podendo-se mensurar essas propriedades através de análises, tais como: análise de micrografia, ensaio de microdureza e ensaio de

tração (MARQUES et al., 2004 apud ROSALINO, SFALSIN JUNIOR e SIQUEIRA, 2014).

O presente trabalho visa analisar comparativamente juntas soldadas do aço ASTM A335 Grau P11, unidas pelo método de soldagem TIG, com temperaturas de pré-aquecimento de 100°C, 200°C e 300ºC, verificando através de ensaios, se há diferenças significativas na microestrutura e nas propriedades mecânicas do metal estudado, tendo como benefício na indústria a escolha de uma temperatura de pré-aquecimento que apresente melhores propriedades mecânicas para a aplicação do aço, tendo um aumento na vida útil do equipamento, reduzindo assim custos com a substituição do material e mão-de-obra, proveniente da manutenção do equipamento. (AZEVEDO, DOMINGOS e ALVARENGA, 2014).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a influência da temperatura de pré-aquecimento na microestrutura e propriedades mecânicas na soldagem TIG de aços ASTM A335 (P11).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar o efeito na microestrutura da junta soldada, através do ensaio de micrografia.
- Determinar o perfil de dureza ao longo da seção soldada, através do ensaio de microdureza Vickers.
- Analisar a resistência mecânica entre as juntas produzidas, através do ensaio de tração.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM

Segundo Modenesi, Marques e Santos (2012), processo de soldagem é uma operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas. A soldagem é o mais importante processo de união de metais utilizado industrialmente, em conjunto com a brasagem, tem importante aplicação desde a indústria microeletrônica até a fabricação de navios e outras estruturas com centenas ou milhares de toneladas de peso (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2005).

De acordo com Wainer, Brandi e Mello (1992), o processo de soldagem teve grande impulso durante a II guerra mundial, devido a fabricação de navios e aviões soldados, apesar de o arco elétrico ter sido desenvolvido no século XIX. Os processos a arco elétrico permanecem como a técnica de soldagem mais usada, após serem introduzidos no final do século XIX. A fonte de calor é um arco elétrico estabelecido entre a peça a ser soldada e o eletrodo metálico. A energia elétrica, convertida em calor, gera um arco com temperatura de aproximadamente 7000º C, consequentemente provocando a junção dos metais através da fusão. Alguns processos a arco incluem eletrodo revestido (SMAW), arco submerso (SAW), TIG (GTAW) e MIG/MAG (GMAW) (ZAMPIERI JÚNIOR, 2014).

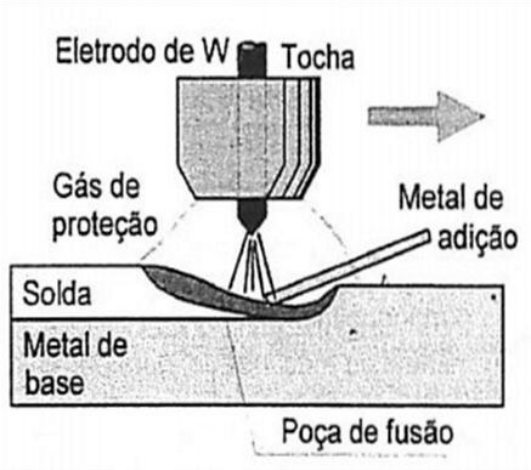
“Em tubulações industriais, a maior parte das ligações são soldadas com solda por fusão (welding), com adição de eletrodo […]” (TELLES, 2001).

3.1.1 Processo de soldagem TIG

Este processo foi comercialmente utilizado em 1942, nos Estados Unidos, mas já havia sido patenteado no fim dos anos 20. Era um processo usado para a soldagem em ligas de magnésio de assentos de aviões. A princípio utilizou-se o gás hélio e a corrente contínua, devido à dificuldade em estabilizar o arco, posteriormente superada (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992).

Na soldagem a arco com eletrodo de tungstênio proteção gasosa (Gas Tungsten Arc Welding-GTAW) a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão destas através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça a unir. Para evitar a contaminação pela atmosfera, a poça de fusão e o arco são protegidos por uma nuvem de gás inerte ou mistura de gases inerte. A soldagem pode ou não ser feita com metal de adição e, quando usado, é feita diretamente na poça de fusão. A figura 01 ilustra o processo, que também é conhecido como TIG (Tungsten Inert Gas) (MARQUES MODENESI e BRACARENCE, 2005).

Figura 01 - Soldagem TIG (esquemática)



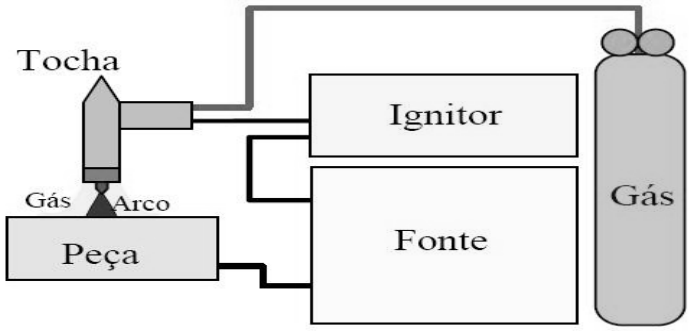
Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENCE, 2005

Esse processo não é geralmente empregado para juntas espessas, devido à sua pequena taxa de deposição (0,2 a até 2 kg/h) entretanto, existindo requerimento de

alta qualidade, juntas de grandes espessuras podem ser soldadas completamente ou somente o passe raiz realizado por TIG (MACHADO, 1996).

“Os equipamentos básicos para a soldagem são: fonte de energia; unidade de alta frequência; reservatório de gás para a soldagem e tocha TIG”, mostrado na figura 02 (WAINER, BRANDI E MELLO, 1992).

Figura 02 – Equipamento para soldagem TIG



Fonte: MARQUES et al., 2009.

A escolha da fonte de soldagem deve ser precedida de uma análise minuciosa, pois deve ser levado em consideração o trabalho de soldagem a ser executado, podendo-se escolher entre as de corrente contínua, com polaridade direta ou inversa, e as de corrente alternada, onde cada um destes três tipos de fonte possui suas próprias peculiaridades (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

Na polaridade direta, os elétrons se dirigiram do eletrodo para o metal base, permitindo uma penetração bastante profunda, visto que a junta de solda será bombardeada, enquanto que na polaridade inversa, a junta soldada pode apresentar problemas devido a penetração ser bem mais baixa. Finalmente, na soldagem TIG com CA haverá uma repetição cíclica das fases correspondente à CC com polaridade direta e CC com polaridade inversa, o arco se tornara ligeiramente estável, permitindo uma penetração media no metal base. A tabela 01 apresenta as polaridades que deve ser empregadas na soldagem de diferentes tipos de materiais (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

Tabela 01 - Soldagem TIG e polaridades utilizadas para diferentes metais

Metal	Corrente Alternada com Alta Frequência	Corrente Contínua Polaridade Direta	Corrente Contínua Polaridade Inversa
Aço	**Limitada**	**Adequada**	**-**
Aço inoxidável	**Limitada**	**Adequada**	**-**
Ferro fundido	**Limitada**	**Adequada**	**-**
Alumínio e suas ligas	**Adequada**	**-**	**Possível para chapas finas**
Magnésio e suas ligas	**Adequada**	**-**	**Possível para chapas finas**
Cobre e suas ligas	**Limitada**	**Adequada**	**-**
Bronze alumínio	**Adequada**	**Limitada**	**-**

Fonte: OKUMURA E TANIGUCHI, 1982.

“O arco elétrico na soldagem TIG é bastante estável, suave, e produz soldas com boa aparência e acabamento, que exigem pouca ou nenhuma limpeza após a operação” (MARQUES, MODENESI e BRACARENCE, 2005).

Para uma melhor eficiência do fluxo de fluidos que são transportados no interior de tubulações, tais características são aproveitadas no passe de raiz da soldagem, pois permite um melhor acabamento (ZAMPIERI JÚNIOR, 2014).

3.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Com o objetivo de melhorar as propriedades dos metais ou conferir-lhes características pré-determinadas, os tratamentos térmicos são operações envolvendo aquecimento, tempo de permanência em determinadas temperaturas e resfriamento sob condições controladas (GIMENES JUNIOR, 1997).

A estrutura cristalina, normalmente denominada microestrutura, determina as propriedades específicas dos metais, onde a temperatura à qual o metal é aquecido, o período de tempo em que ele é mantido àquela temperatura e a taxa sob a qual ele é resfriado, todos esses parâmetros influenciam na estrutura cristalina do metal.

Podemos manipular a microestrutura, seja na siderúrgica ou no procedimento de soldagem. Dentre os métodos mais comuns de se manipular a microestrutura estão os tratamentos térmicos (PEREZ, 2007).

“Os principais tratamentos térmicos associados às operações de soldagem são: Recozimento, Normalização, Têmpera, Revenimento, Solubilização, Alivio de Tensões, Pré-Aquecimento e Pós-Aquecimento” (GIMENES JUNIOR, 1997).

3.2.1 Pré-aquecimento

“Define-se, como temperatura de pré-aquecimento, a temperatura inicial em que toda a peça ou a parte desta onde a solda será realizada é colocada antes do inicio da operação” (MODENESI, MARQUES e SANTOS, 2012).

“O pré-aquecimento da junta a ser soldada é uma maneira de reduzir a taxa de resfriamento do metal. A temperatura de pré-aquecimento pode variar de 50°C a 540°C, sendo mais comumente aplicada na faixa de 150°C a 200°C” (PEREZ, 2007).

Quando aplicado o pré-aquecimento consegue reduzir o teor de martensita da solda, refinar os microconstituintes gerando uniformidade nos grãos, melhorando a ductilidade, baixando a dureza e minimizando a probabilidade de fissuração durante o resfriamento (KEEHAN et al., 2006 apud ROSALINO, SFALSIN JUNIOR E SIQUEIRA, 2014).

“Um controle do pré-aquecimento (aplicação controlada de calor no metal base (MB)), é essencial nas regiões adjacentes da junta a ser soldada, imediatamente antes da operação de soldagem para a remoção de umidade da peça” (GASPAR, 2013).

“A velocidade de resfriamento é muito importante na determinação da microestrutura da solda de ligas que sofrem transformação microestrutural no estado sólido, particularmente os aços” (MODENESI, MARQUES e SANTOS, 2012).

“Em alguns metais esse resfriamento rápido pode contribuir para a formação de microestruturas prejudiciais na região de soldagem” (FORTES, 2005).

A necessidade do pré-aquecimento pode aumentar com alguns fatores como: teor de carbono e de elementos de liga do material de base; tamanho da peça; temperatura inicial; velocidade de soldagem e diâmetro do consumível. (PEREZ, 2007).

“O pré-aquecimento em metais com alta condutibilidade térmica, facilita as operações de soldagem” (GIMENES JUNIOR, 1997).

“[…] processos de soldagem diferentes podem exigir diferentes temperaturas de pré-aquecimento para evitar problemas de soldagem” (ATKINS, 2002 apud PEREZ, 2007).

Devido a adição de elementos de liga como: Cromo, Molibdênio, Níquel, Vanádio, além do Carbono, a soldagem dos aços baixa liga requerem cuidados especiais, pois são materiais temperáveis e tem sua ZTA suscetível ao endurecimento, geralmente as faixas de pré-aquecimento são mais elevadas que os aços ao carbono (GIMENES JUNIOR, 1997).

3.2.1.1 - Como determinar a temperatura ideal de pré-aquecimento

Segundo Fortes (2005), a composição do material de base deve ser conhecida para se escolher a temperatura de pré-aquecimento correta, pois ela é controlada por dois principais fatores:

- O teor de carbono do material de base
- O teor de ligas do material de base

Basicamente quanto maior for o teor de carbono do material de base, maior será a temperatura de pré-aquecimento requerida. Esse raciocínio se aplica também ao teor de ligas, mas num grau levemente menor, pois temperabilidade de um aço está

relacionada ao seu teor de carbono acrescido dos teores de certos elementos de liga. Um método simples para determinar a necessidade de pré-aquecimento de uma solda é o do carbono equivalente (Ceq) e quanto maior esse valor maior será a temperatura de pré-aquecimento requerida (PEREZ, 2007).

A equação 1 é dada pelo IIW (International Institute of Welding), a qual é largamente utilizada para o cálculo do carbono equivalente (FORTES, 2005):

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

A tabela 02 fornece valores sugeridos de temperaturas de pré-aquecimento para diferentes valores de carbono equivalente:

Tabela 02 - Temperatura de pré-aquecimento recomendada x Ceq

Carbono equivalente	Temperatura de pré-aquecimento recomendada
<0,30	Opcional
0,31 – 0,45	100 ºC – 200 ºC
0,45 – 0,60	200 ºC – 250 ºC
>0,60	250 ºC – 300 ºC
Aços ferramenta, aços mola, aços de composição desconhecida	~ 300 °C

Fonte: FORTES, 2005.

Além do pré-aquecimento, o pós-aquecimento pode ser requerido para alguns aços, geralmente para aqueles possuindo carbono equivalente superior a 0,45%. Esses tratamentos são especialmente recomendados para a soldagem de seções espessas. Entretanto, para a maioria dos aços carbono e de baixa liga, apenas o pré-aquecimento é necessário de um modo geral (PEREZ, 2007).

O pré-aquecimento a 120 – 150 °C é geralmente empregado na soldagem multipasse em seções de espessura maior que 25 mm para reduzir a susceptibilidade da solda à fissuração. Após determinada é essencial que a temperatura de pré-aquecimento seja medida e mantida durante a operação de soldagem (FORTES, 2005).

3.3 ZONA TÉRMICAMENTE AFETADA

Durante o aquecimento dos metais pelos processos de soldagem por fusão, há a união dos metais onde, a microestrutura original e as propriedades do metal na região próxima do metal de solda são modificadas devido a fusão localizada destes materiais, seguido por um rápido resfriamento sob condições de restrição imposta pela geometria da junta. Esta parte transformada do metal de base, que não chega a ser fundida, é usualmente conhecida como zona termicamente afetada (ZTA) (SILVA, 2010). A zona termicamente afetada (ZTA) também é conhecida como zona afetada pelo calor (ZAC).

De acordo com o processo e procedimento de soldagem e tipo de metal de base, a ZTA pode apresentar diversas características, pois são influenciadas por esses fatores, isto é, dos ciclos térmicos da repartição térmica. De acordo com o tipo de metal que está sendo soldado, os efeitos dos ciclos térmicos poderão ser os mais variados (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2005).

O aumento da temperabilidade dos aços ocorre devido a um crescimento de grão na Zona Termicamente Afetada, favorecendo os microconstituintes formados em temperaturas baixas, inferiores a 500°C. Adjacente à zona de crescimento de grão existe uma outra região onde ocorre o refino de grão, diminuindo em uma região a temperabilidade do mesmo aço (WAINER, BRANDI, MELLO, 1992).

3.4 METAL BASE

Buscando resolver problemas na indústria a escolha do material adequado para uma determinada aplicação é sempre um problema complexo, cuja solução depende principalmente da pressão e temperatura de trabalho, do fluido conduzido (aspectos de corrosão e contaminação), do custo, do maior ou menor grau de segurança necessário, das sobrecargas externas que existirem, e também, em certos casos, da resistência ao escoamento (perdas de carga). Empregam-se hoje em dia uma variedade muito grande de materiais para a fabricação de tubos. Só a A.S.T.M. especifica mais de 500 tipos diferentes de materiais. (TELLES, 2001).

Na indústria de geração de energia e na indústria petroquímica os tubos em Aço Liga são muito utilizados em diversas aplicações, não somente pelo seu limite de resistência à tração, resistência à corrosão e resistência a altas temperaturas, mas também pela sua rentabilidade econômica (TUBOS ABC, 2017).

Todos os aços que possuem qualquer quantidade de outros elementos, além dos que entram na composição dos aços carbono são denominados "aços-liga" (alloy-steel). Dependendo da quantidade total de elementos de liga, distinguem-se os aços de baixa liga (low alloy-steel), com até 5% de elementos de liga, aços de liga intermediária (intermediate alloy-steel), contendo entre 5% e 10%, e os aços de alta liga (high alloy-steel), com mais de 10% (TELLES, 2001).

Os elementos de liga são adicionados para melhorar a resistência mecânica e a tenacidade, para diminuir ou aumentar a resposta ao tratamento térmico e para retardar os processos de formação de carepa e corrosão. Os aços de baixa liga, como o nome já diz, contêm pequenas quantidades de elementos de liga que produzem consideráveis melhorias em suas propriedades. Os elementos de liga mais comuns são o manganês, silício, cromo, níquel, molibdênio e vanádio. Aços de baixa liga podem conter quatro ou cinco desses elementos de liga em diversos teores. (FORTES, 2005).

Todos os tubos de aços-liga são bem mais caros do que os de aço-carbono, além disso, a montagem e soldagem desses tubos é também mais difícil e mais cara,

sendo de um modo geral o custo tanto mais alto quanto maior for a quantidade de elementos de liga. (TELLES, 2001).

Como os aços de baixa liga apresentam altas razões resistência-peso, é possível reduzir o peso de carros, caminhões, equipamentos pesados, entre outras aplicações, pois eles possuem maior limite de escoamento e de resistência que aços doces ou aços carbono estruturais. (FORTES, 2005).

Serviços de altas temperaturas, acima dos limites de uso dos aços-carbono é os principais casos em que se justifica a aplicação dos aços ligas, ou mesmo abaixo desses limites, quando seja exigida grande resistência mecânica, resistência à fluência ou resistência à corrosão (TELLES, 2001).

Os aços Cr-Mo são grandemente difundidos nas termoelétricas, sendo utilizados na fabricação de componentes críticos das indústrias de geração de energia, sendo os principais: tubos para caldeiras, tubulações para torres de craqueamento e coletores (ASM METALS HANDBOOK, 1990).

Os tubos de aço ligado ferrítico, sem costura, para serviços com alta temperatura seguem as normas internacionais ASTM A-335 (Graus P5, P9, P11, P22, P91 e P92). Os Tubos em Aço Liga graus P11, P22, P91 e P92 são graduações predominantes para a indústria de energia, enquanto os graus P5 e P9 são mais usados nos processos de refinaria (TUBOS ABC, 2017).

“O aço ligado ASTM A335 P11 (1,0%Cr – 0,5%Mo) (Figura 03) é muito utilizado em tubulações por ter bom desempenho quando em uso em alta temperatura, e pode apresentar diferentes comportamentos quando se aplicam diferentes tipos de tratamentos térmicos” (FONSECA, 2013 apud BOSQUETTI et. al, 2015).

Figura 03 - Aço ligado ASTM A335 P11

Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

A tabela 03 apresenta a composição química padronizada desse aço.

Tabela 03 – Composição química do aço ASTM A335 Grau P11

C	Mn	P≤	S≤	Si	Cr	Mo
0.05-0.15	0.30-0.60	0.025	0.025	0.50-1.00	1.00-1.50	0.44-0.65

Fonte: Norma ASTM A335/A335M, 2015.

Se comparado a outros aços da especificação A-335, o P11 se mostra inferior nas propriedades mecânicas, no entanto tem enorme uso, pois possui baixo coeficiente de expansão térmica e alta condutividade térmica, se tornando a melhor opção para a presença de ciclos térmicos, equipamentos e componentes a vapor pressurizado, aliado ao baixo custo comparativo do material (ASTM A 335, 2014, apud AZEVEDO, DOMINGOS e ALVARENGA, 2014). A tabela 04 mostra as propriedades mecânicas dos aços com especificação A-335

Tabela 04 - Propriedades mecânicas dos aços com especificação A-335

AÇO	Lim.Escoamento (MPa)	Lim. Ruptura (MPa)	Alongamento (%)	Dureza
P11	≥ 205	≥ 415	≥ 22	≤ 163 HB
P12	≥ 220	≥ 415	≥ 22	≤ 163 HB
P22	≥ 205	≥ 415	≥ 22	≤ 163 HB
P9	≥ 205	≥ 415	≥ 22	≤ 172 HB
P91	≥ 415	585 ~760	≥ 20	≤ 250 HB

Fonte: Adap. de ASTM A-335, 2005.

4 METODOLOGIA

4.1 METAL BASE

O metal base utilizado é o aço ASTM A335 P11, em perfil de tubo, com diâmetro externo de 219,10 mm, diâmetro interno de 182,58mm, 18,26 mm de espessura, SCHEDULE: 120 e 6000 mm de comprimento. Uma parte do tubo foi cedida pela empresa IMETAME, que posteriormente foi retirado 11 amostras da mesma (Figura 04).

Figura 04 - Aço ligado ASTM A335 P11 já cortado

Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

A tabela 05 apresenta a composição química do aço utilizado conforme o fabricante (ANEXO A).

Tabela 05 – Composição química do aço ASTM A335 Grau P11 conforme o CERTIFICADO DE INSPEÇÃO do fabricante

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Cu
0,11	0,42	0,011	0,004	0,58	1,06	0,45	0,010

Fonte: CERTIFICADO DE INSPEÇÃO DA VALLOUREC & MANNESMANN TUBES, 2016.

4.2 METAL DE ADIÇÃO

O metal de adição utilizado foi a vareta ER 80S-B2, indicada para soldagem de aços baixa liga, ligados ao cromo e molibdênio, sendo estas varetas especialmente indicadas para aços que poderão atingir em condições de trabalho, temperaturas de até 550°C ou ficar submetidos a atmosferas ricas em gases sulfurosos (BOSQUETTI et. al, 2015). A tabela 06 apresenta a composição química da vareta de acordo com o fabricante.

Tabela 06 – Composição química do eletrodo ER80S-B2

C	Cr	Ni	S	P	Si	Mo	Mn	Cu
0,08	1,33	0,03	0,006	0,025	0,48	0,46	0,46	0,22

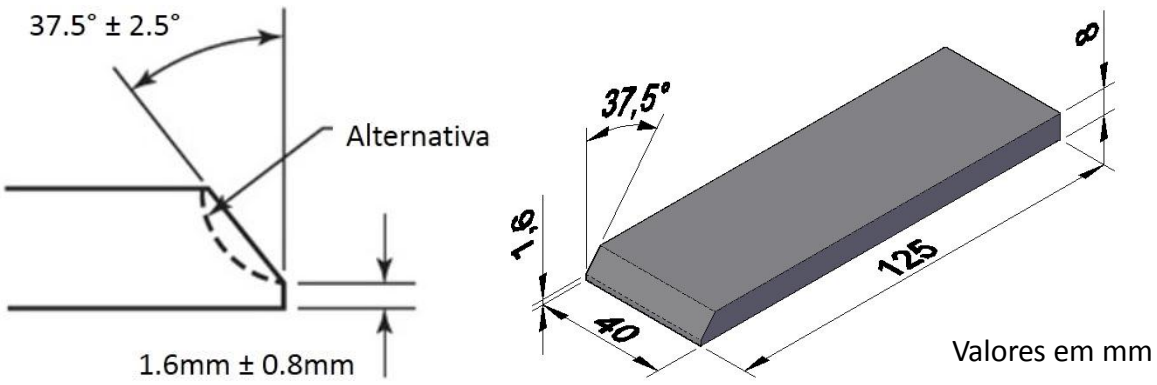
Fonte: Certificado do fabricante, 2016.

4.3 PREPARAÇÃO E SOLDAGEM DAS AMOSTRAS

4.3.1 Corpo de prova

A partir das 11 amostras foram confeccionados 18 corpos de prova em formato de barras com o tamanho 125 mm X 40 mm X 8 mm, chanfradas com ângulo de 37,5°; conforme norma ASME B16.25, ilustrado na figura 05:

Figura 05 – Detalhe ilustrativo do chanfro



Fonte: ASME B16.25

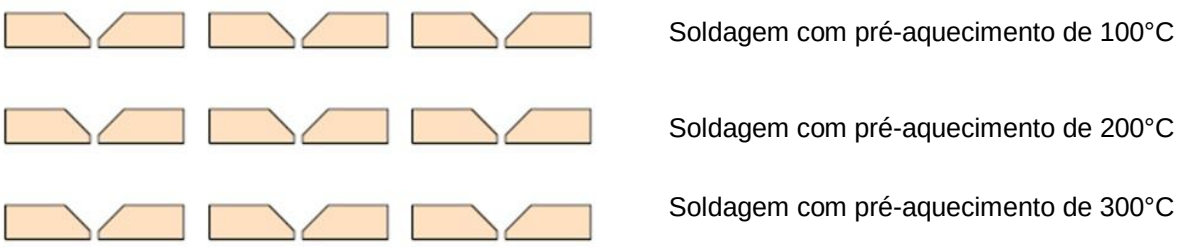
Para deixar os corpos de prova com as dimensões conforme a norma, foi utilizada a fresadora modelo “CLEVER VH-1” (Figura 06), cedida pelo laboratório de mecânica da FAACZ.

Figura 06 – Fresadora CLEVER VH-1

Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Após chanfradas as juntas, os corpos de prova foram separados em 9 pares, sendo que 3 pares foram usados para soldagem a temperatura de pré-aquecimento de 100ºC, 3 pares foram usados para soldagem a temperatura de pré-aquecimento de 200ºC e 3 pares foram usados para soldagem a temperatura de pré-aquecimento de 300ºC, conforme a figura 07.

Figura 07 – Esquema de separação das juntas



4.3.2 Pré-aquecimento

Para determinar a temperatura de pré-aquecimento indicada para o aço estudado, foi utilizada a equação do Ceq. ora citada (Equação 1, p. 21):

$$Ceq = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

e obteve-se o resultado de:

$$Ceq = 0{,}48$$

De acordo com a Tabela 2, o valor do Ceq (Carbono Equivalente) calculado, encontra-se no intervalo de 0,45 – 0,60, deste modo optou-se pela temperatura de pré-aquecimento de 200 °C.

A temperatura escolhida atende a norma ASME B31.1 (Tubulação de Geração de Energia) a qual sugere a temperatura de pré-aquecimento maior que 120 °C.

Para a escolha das outras duas temperaturas de pré-aquecimento, optou-se por utilizar a temperatura mínima (100 °C) e a temperatura máxima (300 °C) de acordo com a tabela 2, visto que o intervalo de 100 ºC foi usado por outros autores como ROSALINO, SFALSIN JUNIOR E SIQUEIRA, 2014 onde também foi avaliada a influência da temperatura de pré-aquecimento em seus estudos.

Para a aplicação do pré-aquecimento, todas as juntas foram aquecidas com auxílio de um maçarico (Figura 08), o qual é composto por um cilindro de gás combustível, no caso o acetileno a uma pressão de 0,8 kgf/cm², um cilindro de oxigênio a uma pressão de 2,50 kgf/cm², dois reguladores de gás, duas mangueiras, um punho com o misturador de gases e o bico n°8.

Figura 08 – Maçarico utilizado para aplicação do pré-aquecimento

Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Para o controle da temperatura foi utilizado um Termômetro infravermelho modelo MT-360 (Figura 09), o qual tem uma faixa de medida de temperatura de -30ºC a 550°C, apresentando resolução de 0,5°C/1°C, mudança de faixa automática, resposta espectral de 6 a 14 µm, alcance de 1,20 m, campo de visão de 10:1 e exatidão básica de 2% da indicação ou 2°C o que for maior.

Figura 09 – Termômetro infravermelho modelo MT-360

Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

4.3.3 Processo de soldagem TIG

O equipamento utilizado para soldagem TIG foi uma máquina directivas retificadora 425 A, modelo GS-425 do fabricante EUTETIC, tensão 440V, pertencente a empresa IMETAME, conforme apresentado na figura 10.

Figura 10 – Máquina de Solda

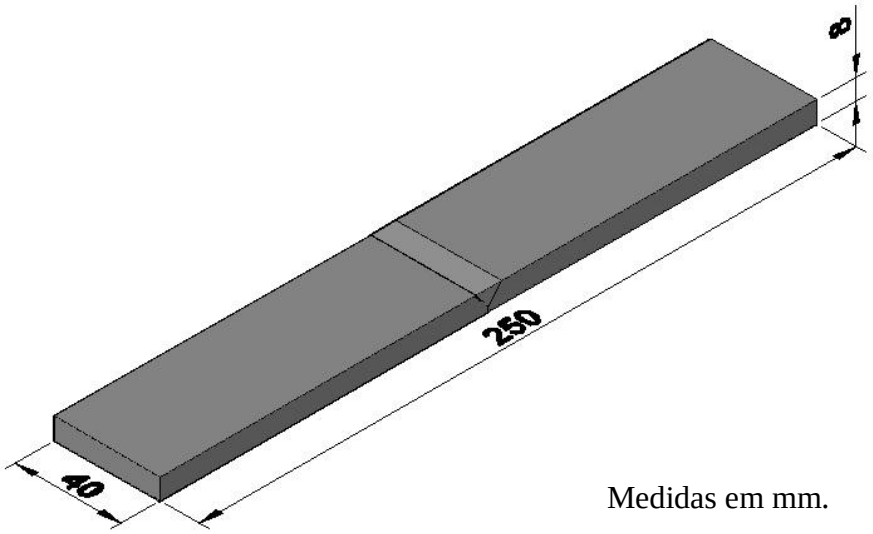
Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

A soldagem dos corpos de prova foi realizada seguindo as condições descritas na EPS E-001 (ANEXO B).

Após o processo de soldagem, as juntas foram resfriadas moderadamente ao ar, sendo posteriormente, eliminada as laterais das juntas soldadas, a fim de eliminar possíveis reforços da solda, também foi eliminado o reforço na parte superior da solda, evitando que o mesmo influencie no ensaio de tração, tais operações foram novamente realizadas na fresadora CLEVER VH-1.

Após todos os processos, cada junta ficou com as dimensões de 250 mm de comprimento, 40 mm de largura e 8 mm de espessura (Figura 11).

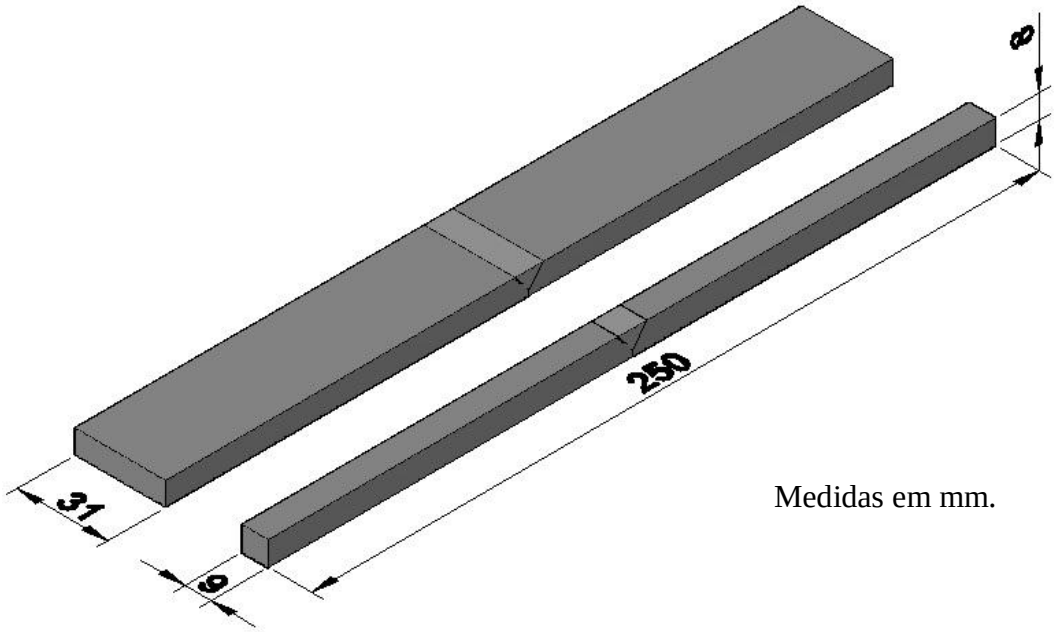
Figura 11 – Ilustração da junta soldada



Medidas em mm.

Para realização de ensaios de dureza, tração e micrografia cada junta foi dividida em dois corpos de prova (Figura 12), um destinado ao ensaio de tração e outro ao ensaio de microdureza e micrografia.

Figura 12 – Ilustração dos corpos de prova divididos

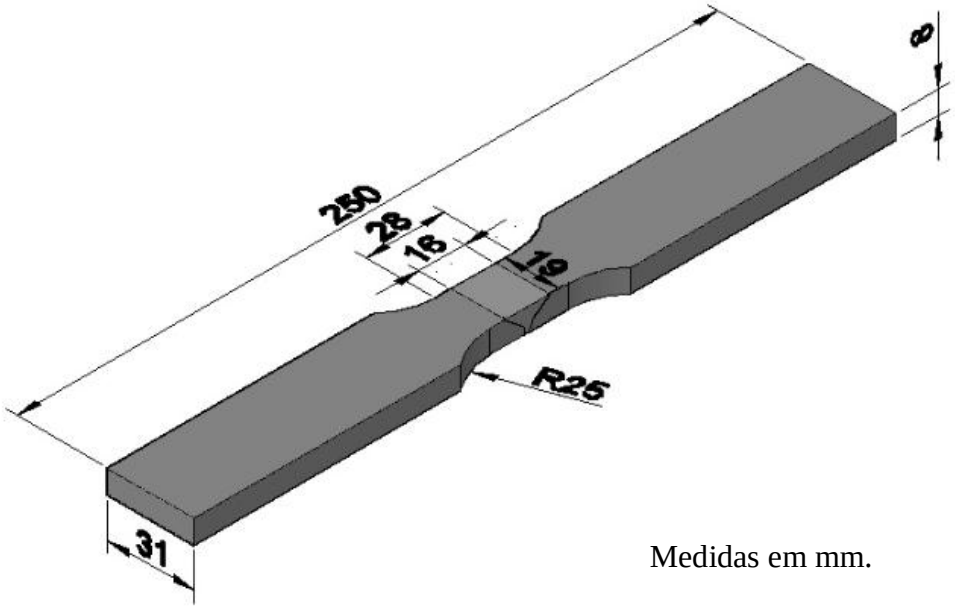


Medidas em mm.

4.6 ENSAIO DE TRAÇÃO

Para a realização dos ensaios de tração foi utilizada a norma ASME IX, onde os corpos de prova foram usinados de acordo com as dimensões da figura 13. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica do IFES, Campus Aracruz.

Figura 13 – Ilustração do corpo de prova para ensaio de tração



Medidas em mm.

O equipamento utilizado foi máquina de tração modelo EMIC DL - 60000, eletromecânica (Figura 14).

Figura 14 – Máquina de ensaio de tração EMIC DL-60000

Fonte: Disponível em http://www.emic.com.br.

4.7 MICROGRAFIA

Para o ensaio de micrografia, as amostras foram lixadas, polidas e atacadas quimicamente (Figura 15) com Nital 2% por 5 segundos a fim de que revelasse a microestrutura da junta.

Figura 15 – Lixamento, polimento e ataque das amostras

Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

O microscópio que foi utilizado para obter a microestrutura é o Microscópio Metalográfico Trinocular Invertido TNM-07T-PL – Opton (Figura 16) com capacidade de aumento de 100 a 1000X e a identificação das microestruturas feitas por meio de um sistema de captura de imagens integrado, que permitiu o registro das análises realizadas, os equipamentos utilizados foram cedidos pelo laboratório de metalografia da FAACZ.

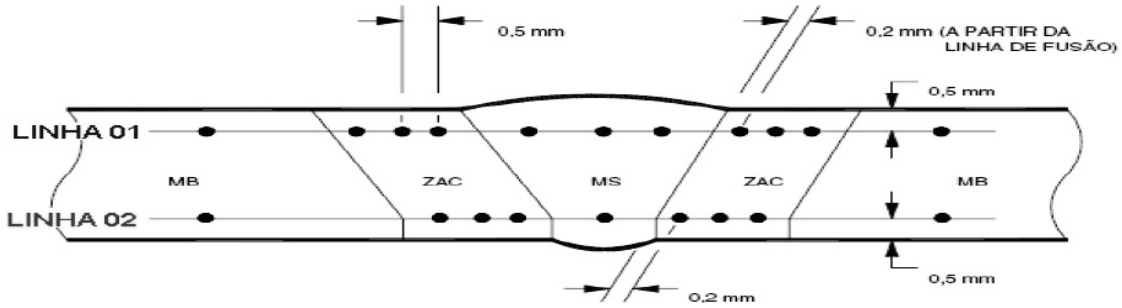
Figura 16 - Microscópio Óptico

Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

4.8 ENSAIO DE MICRODUREZA

Seguindo o mesmo procedimento que BOSQUETTI, et. al, 2015, foi realizado ensaio de microdureza Vickers, carga de aplicação de 0,49 Kgf por 15s, penetrador cônico de diamante, na secção transversal à soldagem seguindo o perfil de dureza para chanfro em “V” da norma Petrobrás N-0133 (Figura 17).

Figura 17 - Perfil de microdureza especificado pela norma N-0133



Fonte: BOSQUETTI, et. al, 2015.

Para o ensaio de microdureza, as amostras que foram utilizadas no ensaio de micrografia, também foram utilizadas neste ensaio.

O equipamento que foi utilizado para este ensaio é um microdurômetro digital modelo HM112 Mitutoyo, com indentador Vickers do laboratório de materiais do IFES - Aracruz, apresentado na figura 18.

Figura 18 – Microdurômetro digital HM112

Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

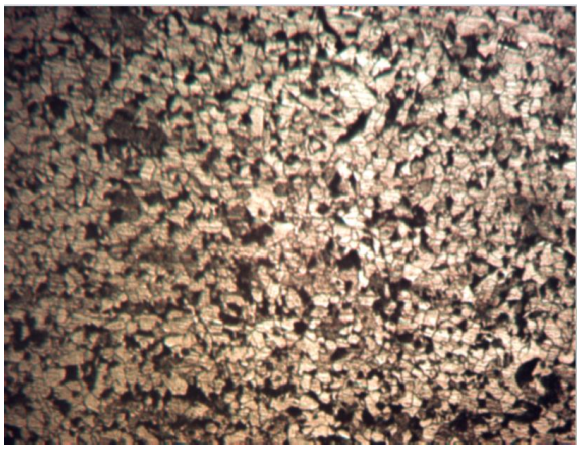
5.1 MICROGRAFIA

A figura 19 apresenta a microestrutura do aço ASTM A335 P11 sem receber o procedimento de soldagem. Nota-se uma estrutura ferrítica refinada (partes claras) típica do aço P11, com pequenos grãos de perlita (partes escuras). As figuras 20, 21 e 22 apresentam a microestrutura do metal de base após o processo de soldagem com pré-aquecimento de 100 °C, 200 °C e 300 °C respectivamente. Pode-se observar que não houve uma diferença significativa entre os metais de base pré-aquecidos, pois essas regiões encontram-se mais afastadas da solda, não sendo alteradas pelo ciclo térmico, mantendo as propriedades características do metal base (MODENESI, MARQUES e SANTOS, 2012).

Figura 19 – MB sem receber pré-aquecimento, 250X.

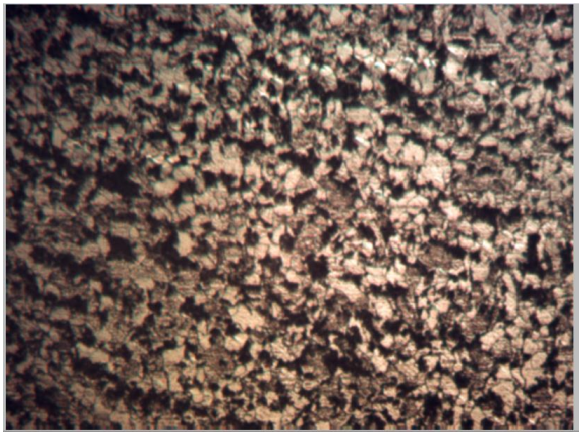
Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Figura 20 – MB com pré-aquecimento de 100 °C, 250X.



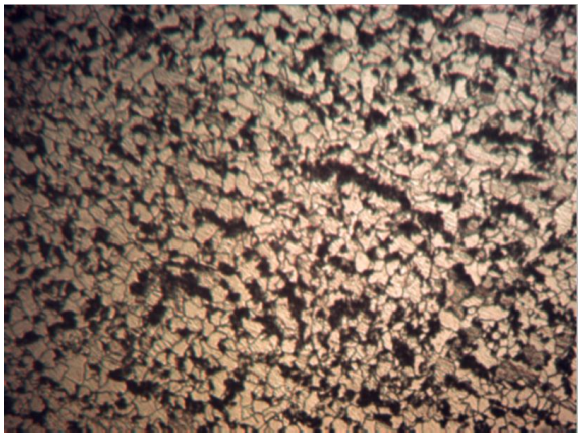
Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Figura 21 – MB com pré-aquecimento de 200 °C, 250X.



Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Figura 22 – MB com pré-aquecimento de 300 °C, 250X.

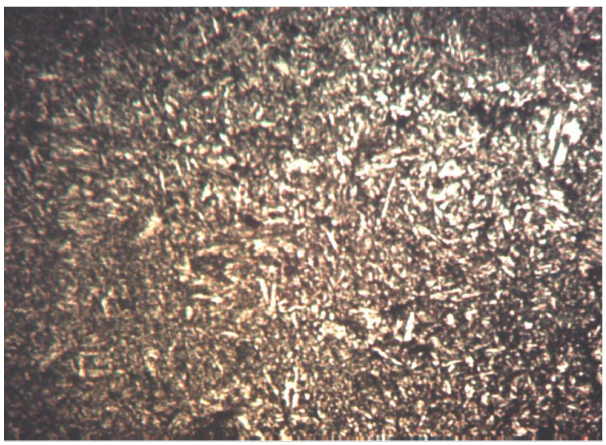


Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

As figuras 23, 25 e 26 referem-se ao MS pré-aquecido a 100 °C, 200 °C e 300 °C respectivamente, as quais apresentam uma textura bruta de fusão, ou seja, textura do aço no estado em que se solidificou e se esfriou normalmente, sem qualquer tratamento térmico ou mecânico posterior. Nesse estado, a microestrutura apresentou uma distribuição irregular, onde os grãos de perlita (partes escuras) são penetrados por agulhas de ferrita (partes claras), resultando em perda de ductilidade, o que tende a aumentar a fragilidade, este tipo de microestrutura é conhecida por textura acicular (COLPAERT, 1974), isso também foi encontrado por Azevedo, Domingos e Alvarenga, 2014 em seus estudos.

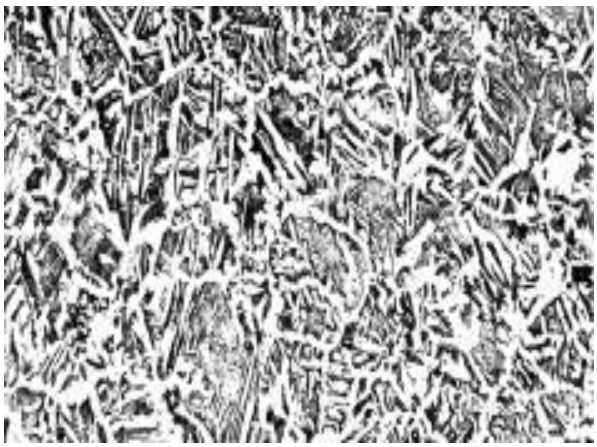
A figura 24 apresenta uma textura acicular de acordo com Colpaert, 1974.

Figura 23 – MS - 100 °C, 250X.



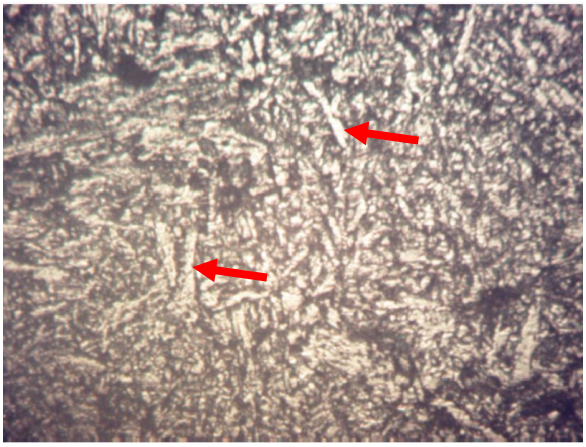
Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Figura 24 – Textura acicular.



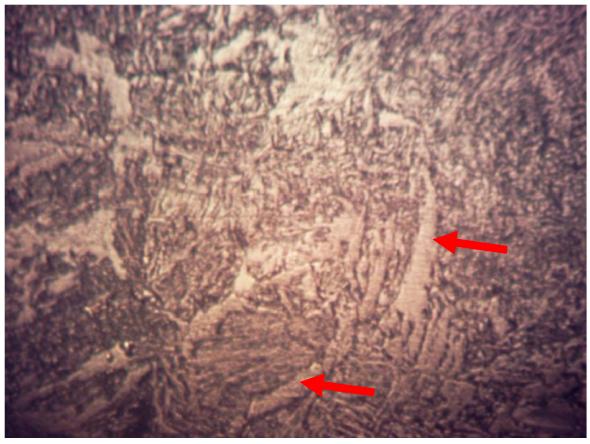
Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Figura 25 – MS com pré-aquecimento de 200 °C, 400X.



Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Figura 26 – MS com pré-aquecimento de 300 °C, 400X.



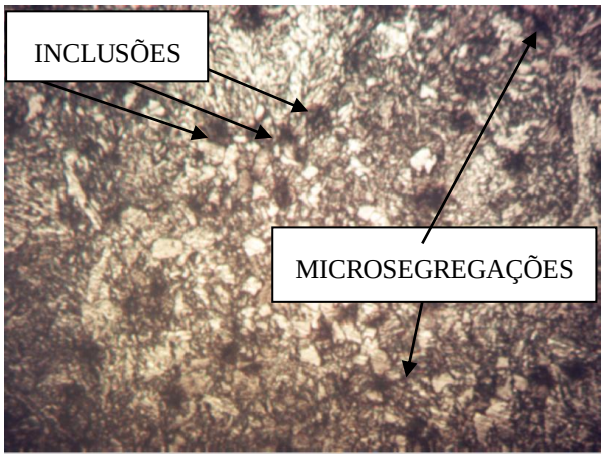
Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Pode-se observar que houve um aumento das lamelas de ferrita (seta vermelha) na microestrutura de acordo com o aumento da temperatura de pré-aquecimento, onde a taxa de resfriamento influenciou diretamente na diminuição da dureza do material, proporcionando uma região soldada menos frágil, pois de acordo com Colpaert, 1974, a ferrita é pouco dura e muito dúctil e de acordo com Wainer, Brandi e Mello, 1992, a ferrita acicular tem grande efeito nas propriedades mecânicas, sendo o limite de resistência aumentado devido ao tamanho da ripa de ferrita acicular, a quantidade ideal de ferrita acicular deve estar na faixa de 65 a 80%.

As figuras 27, 28 e 29 apresentam a microestrutura da ZTA da junta soldada com pré-aquecimento de 100 °C, 200 °C e 300 °C respectivamente, onde pode-se verificar que houve um refino de grãos em comparação ao material de base apresentado na figura 19, onde de acordo com Modenesi, Marques e Santos, 2012, à medida que a velocidade de resfriamento é aumentada, as transformações tendem a se afastar do equilíbrio e a granulação se torna mais fina, onde as lamelas de perlita ficam menos espaçadas entre si.

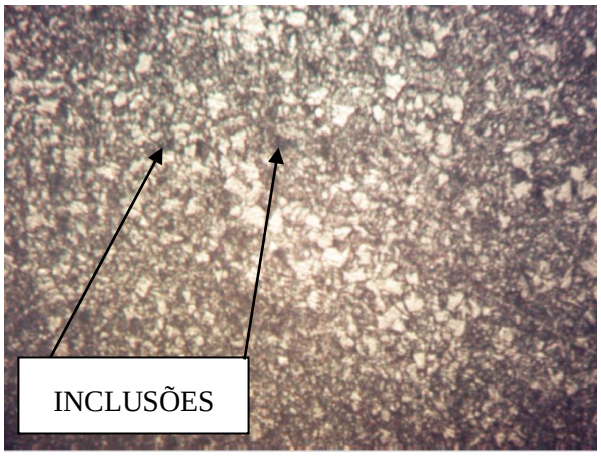
De acordo com Wainer, Brandi e Mello, 1992, essa pequena deformação, associada a uma temperatura e tempo menores, acabam por ser insuficientes para que ocorra a cristalização primária. A austenita obtida é recuperada antes de sua transformação, no resfriamento, produzindo ferrita e ou perlita com pequeno tamanho de grão (ou colônia).

Figura 27 – ZTA com pré-aquecimento de 100 °C, 400X.



Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Figura 28 – ZTA com pré-aquecimento de 200 °C, 250X.



Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Figura 29 – ZTA com pré-aquecimento de 300 °C, 250X.

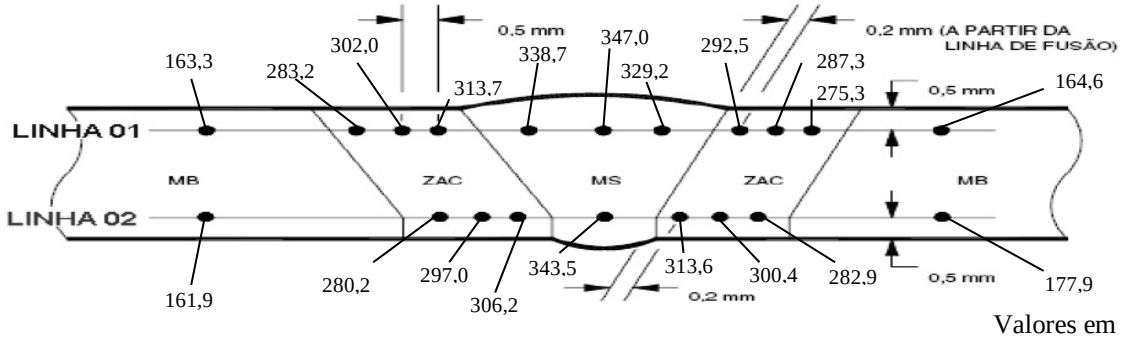
Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Na figura 27 nota-se a presença de muitas inclusões e algumas microsegregações, na figura 28 também foi encontrado inclusões, porém em uma quantidade relativamente menor. A presença de inclusões e micro segregações também foi encontrada por Azevedo, Domingos e Alvarenga, 2014, em seu estudo, as quais tendem a diminuir a dureza da região e ser um grande ponto de concentração de tensões.

5.2 ENSAIO DE MICRODUREZA

A figura 30 mostra a média dos resultados obtidos do perfil de dureza da junta soldada do aço ASTM A335 P11, através do processo soldagem com pré-aquecimento de 100 °C.

Figura 30 – Perfil de dureza da junta com pré-aquecimento de 100 °C



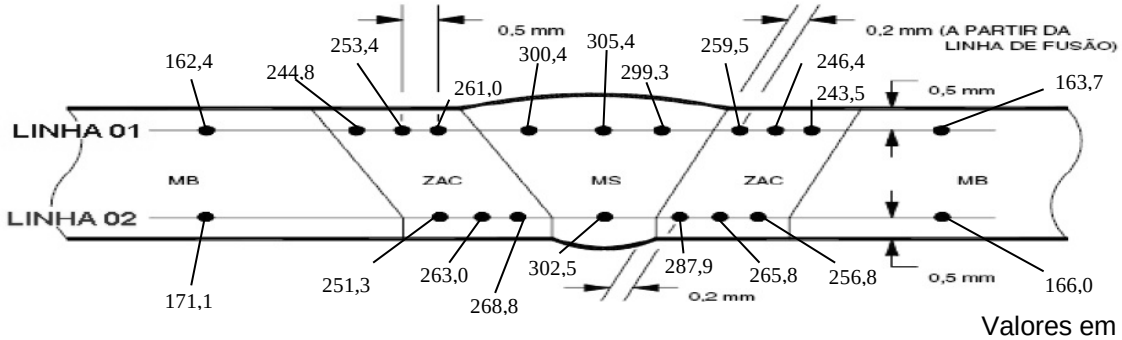
Valores em HV.

Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Pode-se observar uma dureza máxima de 177,9 HV no metal base, 313,7 HV na ZTA e 347,0 HV no metal de solda. A ZTA e o MS, apresentaram valores muito autos, não atendendo a norma ASME B31.3, onde é estabelecido um valor de dureza máximo de 237 HV (225 HB).

A figura 31 mostra a média dos resultados obtidos do perfil de dureza da junta soldada do aço ASTM A335 P11, obtido através do processo soldagem com pré-aquecimento de 200 °C.

Figura 31 – Perfil de dureza da junta com pré-aquecimento de 200 °C



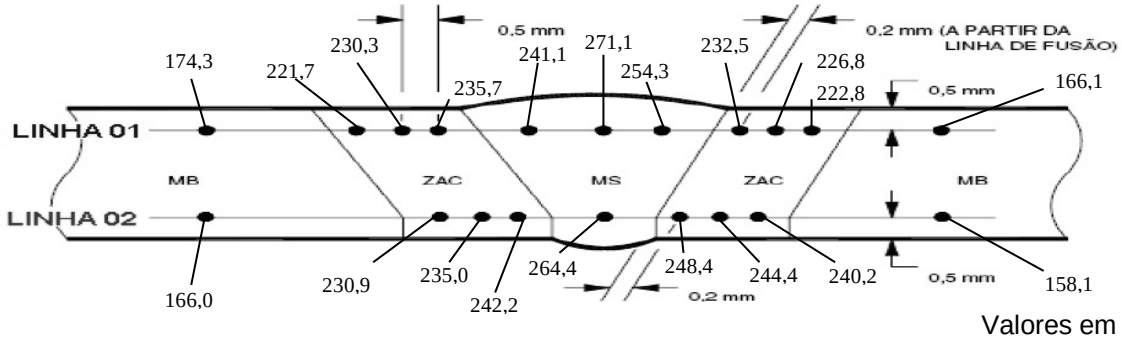
Valores em HV.

Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Pode-se observar uma dureza máxima de 171,1 HV no metal base, 287,9 HV na ZTA e 305,4 HV no metal de solda. A dureza no metal de base não sofreu uma variação significativa, já a dureza da ZTA e do metal de solda diminuíram em relação a junta soldada a 100 °C, porém os valores de dureza ainda estão bem acima da norma.

A figura 32 mostra a média dos resultados obtidos do perfil de dureza da junta soldada do aço ASTM A335 P11, obtido através do processo soldagem com pré-aquecimento de 300 °C.

Figura 32 – Perfil de dureza da junta com pré-aquecimento de 300 °C



Valores em HV.

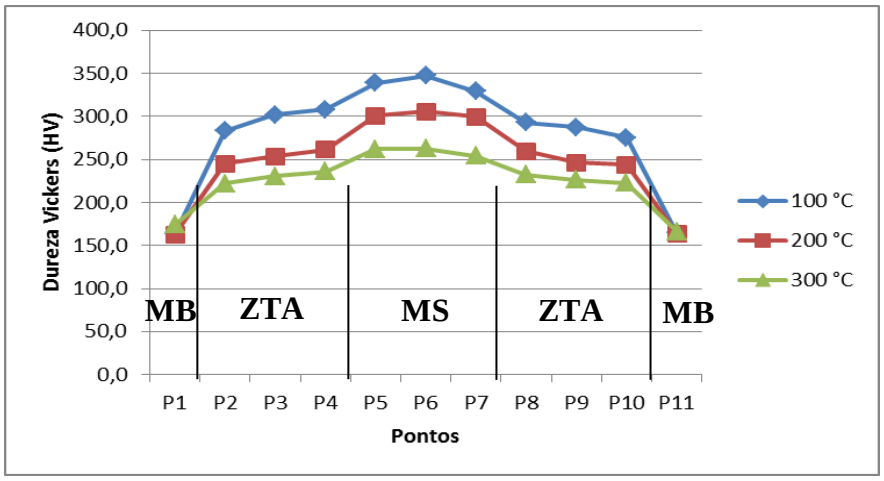
Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Pode-se observar uma dureza máxima de 174,3 HV no metal base, 248,4 HV na ZTA e 271,1 HV no metal de solda. A dureza no metal de base não sofreu uma variação significativa, já dureza na ZTA e no metal de solda, tiveram uma redução significativa, chegando a ficarem próximo ao valor aceitável pela norma, mas ainda um pouco acima.

Todos os valores dos ensaios podem ser consultados no ANEXO C.

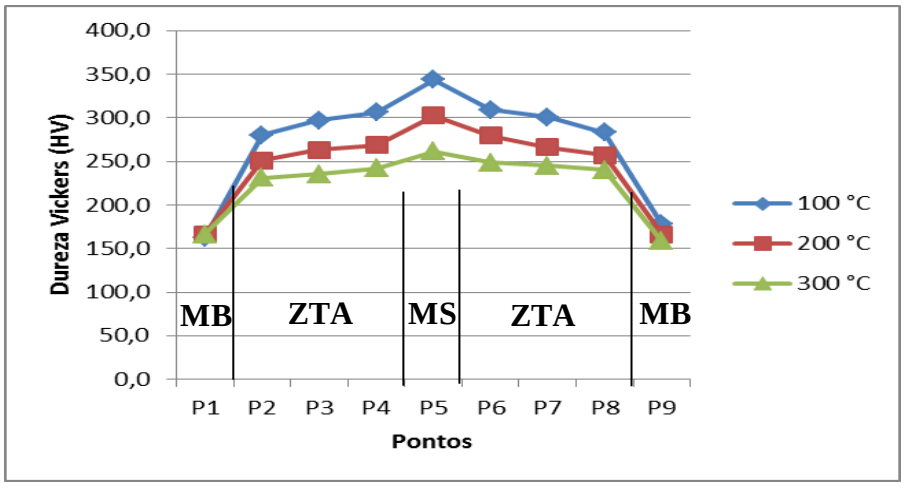
A figura 33 mostra a comparação entre as durezas da linha 1 (linha superior) e a figura 34 mostra a comparação entre as durezas da linha 2 (linha inferior).

Figura 33 – Comparação entre as durezas da linha 1



Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Figura 34 – Comparação entre as durezas da linha 2



Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

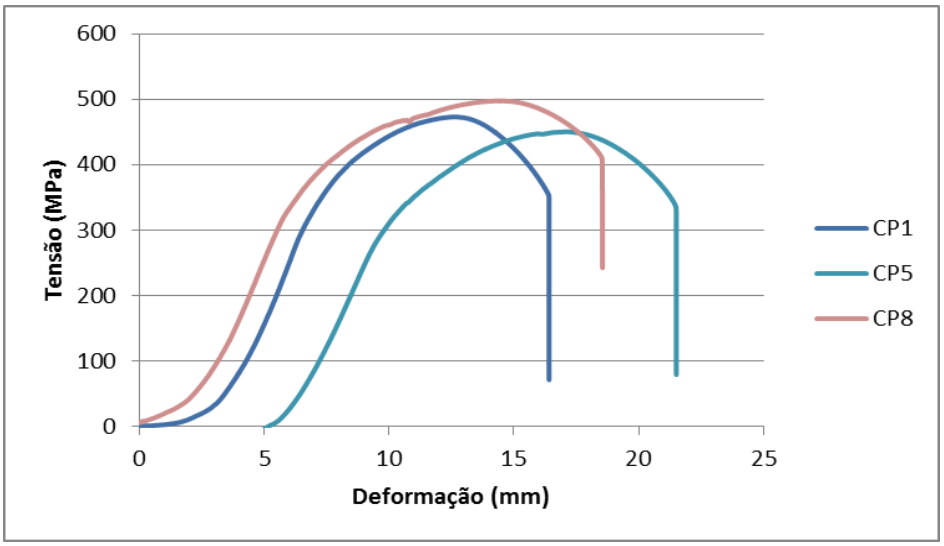
Comparando as três temperaturas de pré-aquecimento aplicadas no processo de soldagem, verifica-se a partir dos perfis de dureza que, com o aumento da temperatura de pré-aquecimento obteve-se uma menor taxa de resfriamento, proporcionando o aumento das lamelas de ferrita no MS, causando a diminuição na dureza como era esperado, pois de acordo com Colpaert, 1974, a ferrita é pouco dura e muito dúctil. Já a maior taxa de resfriamento proporcionou uma granulometria

mais fina na ZTA, onde de acordo com Lundin, 2000 apud Azevedo, Domingos e Alvarenga, 2014 uma granulometria muito fina fragiliza o material e eleva a dureza.

5.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

A figura 35 apresenta os resultados dos 3 ensaios de tração com as juntas soldadas com temperatura de pré-aquecimento de 100 °C, o relatório dos ensaios encontram-se no ANEXO D.

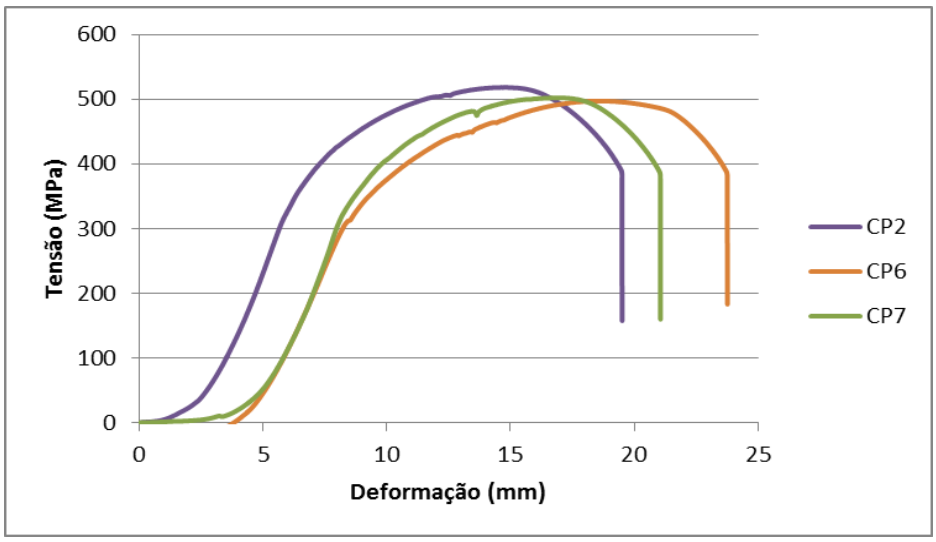
Figura 35 – Ensaio de tração 100 °C



Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

A figura 36 apresenta os resultados dos 3 ensaios de tração com as juntas soldadas com temperatura de pré-aquecimento de 200 °C.

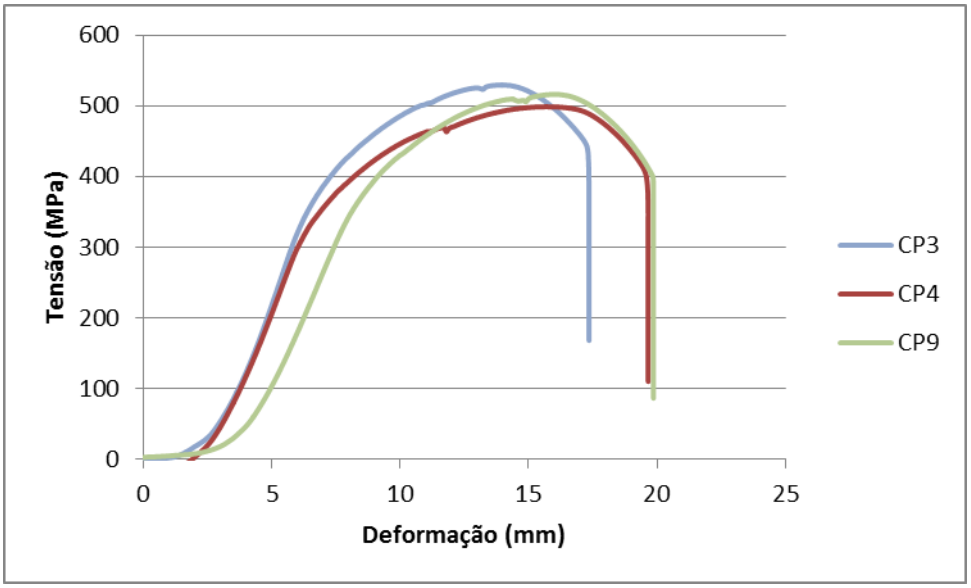
Figura 36 – Ensaio de tração 200 °C



Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

A figura 37 apresenta os resultados dos 3 ensaios de tração com as juntas soldadas com temperatura de pré-aquecimento de 300 °C.

Figura 37 – Ensaio de tração 300 °C



Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Pode-se observar através da tabela 07 a média dos resultados dos ensaios de tração do aço ASTM A 335 P11, onde pode-se notar um aumento do limite de resistência a tração conforme o aumento da temperatura de pré-aquecimento. A presença das inclusões e microsegregações na microestrutura da junta soldada a 100 ºC e as inclusões na microestrutura da junta soldada a 200 ºC contribuíram para que a região da ZTA apresentasse pontos fracos, de maneira a facilitar o aparecimento de pequenas fissuras locais quando submetido a algum tipo de tensão, tendo seu limite de resistência a tração reduzido (COLPAERT, 1974).

Tabela 07 – Ensaio de tração do aço ASTM A335 P11

Ensaio de Tração (MPa)		
Corpo de Prova	**Tensão de Escoamento**	**Tensão Limite de Tração**
Pré-Aquecimento 100°C	363,25	473,47
Pré-Aquecimento 200°C	370,43	505,88
Pré-Aquecimento 300°C	384,56	514,77

Fonte: Arquivo dos Autores (2017).

Pode-se observar que a junta soldada a temperatura de pré-aquecimento de 100 ºC teve uma perda de aproximadamente 6% na tensão limite de tração em relação a junta soldada a temperatura recomendada (200 ºC) de acordo com a equação do carbono equivalente.

Já a junta soldada a temperatura de pré-aquecimento de 300 ºC teve um ganho de aproximadamente 2% em relação a temperatura recomendada (200 ºC).

6 CONCLUSÕES

Com os testes realizados pode-se considerar que a microestrutura do MB não sofreu alterações significativas, enquanto que no MS e ZTA, notou-se um aumento de ferrita de acordo com a diminuição da taxa de resfriamento.

Essa diminuição da taxa de resfriamento, ocasionada pela temperatura de pré-aquecimento de 300º C proporcionou uma junta soldada com menor dureza em relação as juntas soldadas a 100 ºC e 200 °C, porém com valores um pouco acima da norma.

As juntas soldadas com pré-aquecimento de 100 ºC e 200 ºC apresentaram inclusões em sua microestrutura, enquanto que a junta soldada a 300 ºC manteve sua microestrutura semelhante ao MB, não perdendo suas propriedades e apresentando um ganho de aproximadamente 2% em resistência mecânica em relação a temperatura de 200 °C e um ganho de aproximadamente 8% em relação a temperatura de 100 ºC

Pode-se concluir que o uso de diferentes temperaturas de pré-aquecimento influenciou diretamente na microestrutura, dureza e resistência mecânica da junta soldada, onde a temperatura de 300 ºC, apresentou melhores propriedades, sendo dentre as temperaturas analisadas, a mais indicada para aplicações.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o comportamento das juntas soldadas do aço ASTM A 335 P11, produzidas pelo processo de soldagem TIG com temperaturas de pré-aquecimento de 100 ºC, 200 ºC e 300 °C com resfriamento lento após a soldagem.
- Avaliar o comportamento das juntas soldadas do aço ASTM A 335 P11, produzidas por diferentes processos de soldagem com temperaturas de pré-aquecimento de 100 ºC, 200 ºC e 300 °C.
- Analisar o comportamento das juntas soldadas do aço ASTM A 335 P11 com temperaturas de pré-aquecimento superiores a 300 °C.

REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook**, vol.1, 8ª Ed., Miami, USA, 1987.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais 2º trimestre de 2017.** 2017. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+2%C2%BA+trimestre+de+2017/6f1fac17-8146-4a17-508a-567419d35fae>. Acesso em: 30 out. 2017.

ASM METALS HANDBOOK. "**Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys**", V.1, 10ª ed. ASM International. 1990.

ASME AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, B31.1: Power Piping, American National Standard Institute, EUA, 2008;

ASME AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, IX: Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures; Welders; Brazers; and Welding, Brazing, and Fusing Operators, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, EUA, 2013;

ASTM AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. A335/A335M – 11: Standard Specification for Seamless Ferritic Alloy-Steel Pipe for High-Temperature Service, ASTM International, USA, 2015;

ATKINS, G., THIESSEN, D., NISSLEY, N., ADONYI, Y. Welding Process Effects in Weldability Testing of Steels. **Welding Journal Research Supllement**, p. 61-68, 2002.

AZEVEDO, B. P.; DOMINGOS, E. V.; ALVARENGA, M. A. **Influência do tratamento térmico de alívio de tensões, em junta soldada do aço ASTM A-335 Gr.P11**. FAACZ, Aracruz, ES, 2014.

BOSQUETTI P. et. al, **Produção da Junta Soldada do Aço ASTM A335 P11 para Tubulação de Vapor em Caldeiras:** Caracterização por Análise Microestrutural e Microdureza, 2015. Disponível em: < http://www.revistaacademus.com.br/revista/index.php/revistaacademus/article/view/19/24>. Acesso em: 9 abr. 2017.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns** 3ª ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1974.

DAVIDSON, J. L., 1995, - **"Hydrogen-induced cracking of low carbon – Low alloy steel weldments**", Materials Forum, 19, pp. 35-51. Development Activities, EPRI, Charlotte, NC: 2003. 1002943. Developments, Technical Report, December 2003.

FONSECA, A. S. **Soldagem TIG**. Centro de Formação Profissional "Aloysio Ribeiro de Almeida" - SENAI Varginha – MG. [s.d.]. Disponível em: <http://www.elitemaquinas.com.br/site/images/pdf_files/Soldagem_TIG.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2013.

FORTES, C. **Metalurgia da Soldagem**. Apostila ESAB, 25/01/2005.

GASPAR, N. J. **Potencial uso do passe de revenimento no reparo de soldas: Avaliação via mapeamento de durezas**. Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA, SANTOS, SP, 2013.

GIMENES JUNIOR L. **Tratamento Térmico em Juntas Soldadas**. 1997. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/metal/tratamento-termico-em-juntas-soldadas.pdf>. Acesso em: 2 out. 2016.

KEEHAN, E.; KARLSSON, L.; ANDRÉN, H. O.; BHADESHIA, H.K.D.H. Influence of carbon, manganese and nickel on microstructure and properties of strong steel weld metals Part 3 – Increased strength resulting from carbon additions. **Science and Technology of Welding and Joining**, vol. 11, 2006.

MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: processos.** Porto Alegre, RS: Ed. do Autor, 1996.

MARQUES, P.V. MODENESI, P.J.; SANTOS, D.B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. UFMG, Belo Horizonte, MG, 2012.

MARQUES, P.V. MODENESI, P.J.; SANTOS, D.B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. UFMG, Belo Horizonte, MG, 2004.

MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V.; BRACARENCE, A.Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte, MG: Editora UFMG, 2005. 363 p.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, RJ, 1982.

PEREZ F. R. C. - **A influência da temperatura de pré-aquecimento e tecimento na microestrutura e propriedades mecânicas na soldagem MIG/MAG robotizada de aços SAE 8620 com ABNT LN28.** Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus de Bauru, SP, 2007.

PETROBRAS, N-133, “Soldagem”, Rev. H, 2010.

ROSALINO, A. L.; SFALSIN, L. M. J.; SIQUEIRA, T. R. **Análise da influência do pré-aquecimento em uma junta soldada com eletrodo revestido – aço sae1045**. FAACZ, Aracruz, ES, 2014.

SANTOS A.S.F. dos. **Análise das regiões de uma junta soldada com e sem adição de calor através do Pré e Pós–aquecimento.** 2014. Disponível em: http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/metal/Anlise%20das%20regies%20de%20uma%20junta%20soldada.pdf. Acesso em: 2 out. 2016.

SILVA, R.F. **Caracterização da zona termicamente afetada de aço produzido via resfriamento acelerado.** Belo Horizonte, MG: UFMG, 2010.

TELLES, P.C.S. **Tubulações industriais materiais, projetos, montagem.10ª ed.** Rio de Janeiro, UFRJ, 2001.

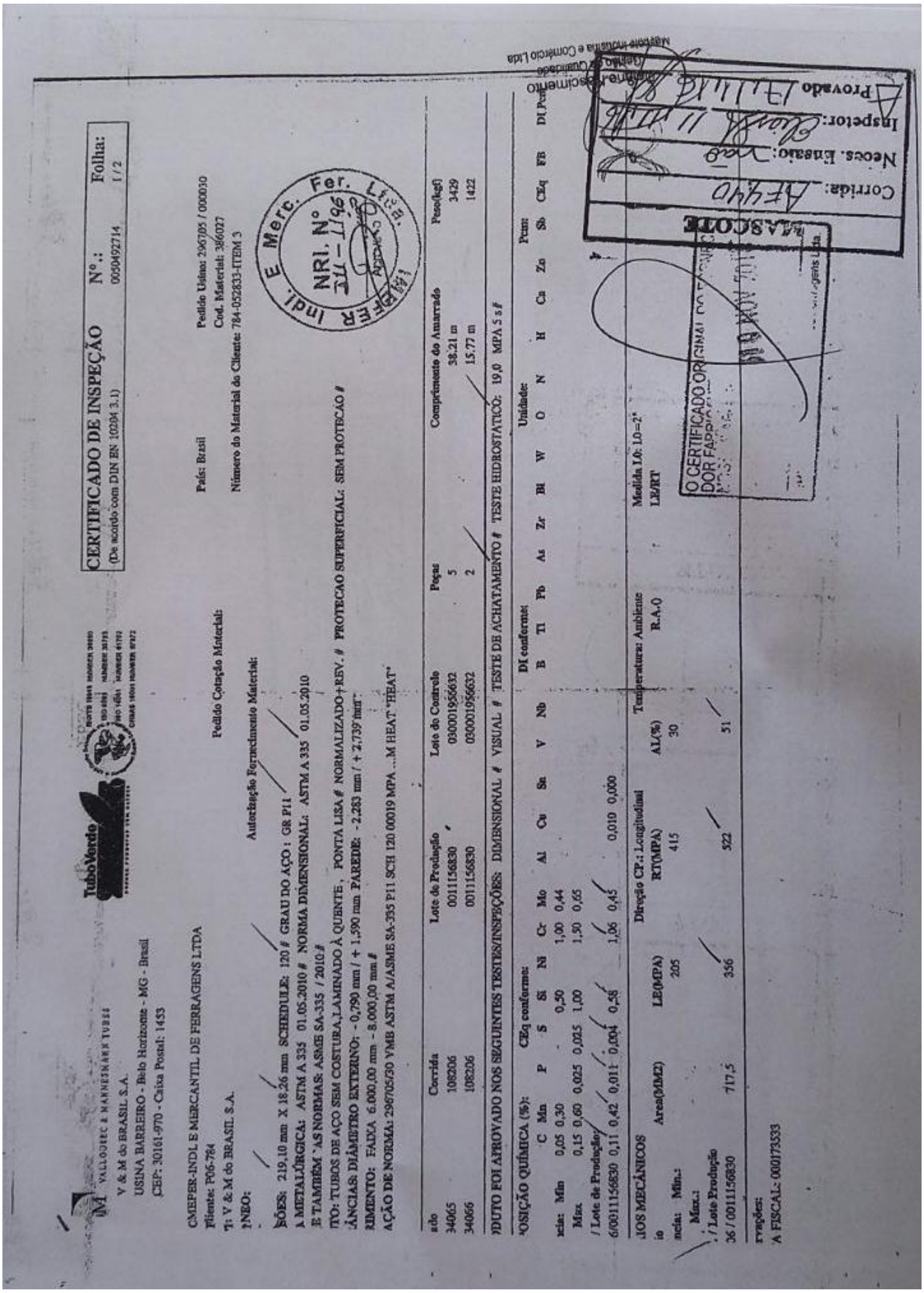
TSAI, C. L. Heat flow in fusion welding – engineering solution and empirical correlation. ASM Handbook, vol. 06, p. 29-45, 1993.

TUBOS ABC. Disponível em:<http://www.tubosabc.com.br/tubos/tubos-em-aco-liga-astm-a-335/>. Acesso em: 12 maio 2017.

WAINER, E.; BRANDI, S.D.; MELLO, F.D.H. **Soldagem Processos e Metalurgia**. São Paulo, SP: Editora Edgard Blucher Ltda, 1992. 494 p.

ZAMPIERI C. R. J. **Determinação da tenacidade a fratura da região da solda de um tubo de aço ferrítico ASTM A335 Gr. P22 através do deslocamento da abertura da ponta da trinca (CTOD).** Escola de engenharia de São Carlos da universidade de São Paulo, 2014.

ANEXO A



V & M do BRASIL S.A.
USINA BARREIRO - Belo Horizonte - MG - Brasil
CEP: 30161-970 - Caixa Postal: 1453

CERTIFICADO DE INSPEÇÃO (De acordo com DIN EN 10204 3.1) — Nº.: 0050492714 — Folha: 1/2

CMEPER-INDL E MERCANTIL DE FERRAGENS LTDA
Cliente: P06-784
T: V & M do BRASIL S.A.
NEO:

País: Brasil
Pedido Cotação Material:
Pedido Usina: 296705 / 000030
Cod. Material: 386027
Número do Material do Cliente: 784-052833-ITEM 3
Autorização Fornecimento Material:

SÕES: 219,10 mm X 18,26 mm SCHEDULE: 120 # GRAU DO AÇO : GR P11
A METALÚRGICA: ASTM A 335 01.05.2010 # NORMA DIMENSIONAL: ASTM A 335 01.05.2010
E TAMBÉM AS NORMAS: ASME SA-335 / 2010 #
TO: TUBOS DE AÇO SEM COSTURA,LAMINADO À QUENTE , PONTA LISA # NORMALIZADO+REV. # PROTECAO SUPERFICIAL: SEM PROTECAO #
ÂNCIAS: DIÂMETRO EXTERNO: - 0,790 mm / + 1,590 mm PAREDE: - 2,283 mm / + 2,739 mm
RIMENTO: FAIXA 6.000,00 mm - 8.000,00 mm #
AÇÃO DE NORMA: 296705/30 VMB ASTM A/ASME SA-335 P11 SCH 120 00019 MPA ...M HEAT "HEAT"

ado	Corrida	Lote de Produção	Lote de Controle	Peças	Comprimento do Amarrado	Peso(kgf)
34065	108206	0011156830	030001956632	5	38.21 m	3429
34066	108206	0011156830	030001956632	2	15.77 m	1422

DUTO FOI APROVADO NOS SEGUINTES TESTES/INSPEÇÕES: DIMENSIONAL # VISUAL # TESTE DE ACHATAMENTO # TESTE HIDROSTATICO: 19,0 MPA 5 s #

OSIÇÃO QUÍMICA (%): CEq conforme: DI conforme: Unidade: Pcm:

	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	Sn	V	Nb
ncia: Min	0,05	0,30			0,50		1,00	0,44					
Max	0,15	0,60	0,025	0,025	1,00		1,50	0,65					
/ Lote de Produção													
6/0011156830	0,11	0,42	0,011	0,004	0,58		1,06	0,45		0,010	0,000		

B Ti Pb As Zr Bi W O N H Ca Zn Sb CEq FB DI Pcm

IOS MECÂNICOS — Direção CP.: Longitudinal — Temperatura: Ambiente — Medida L0: L0=2"

io	Area(MM2)	LE(MPA)	RT(MPA)	AL(%)	R.A.()	LE/RT
ncia: Min.:		205	415	30		
Max.:						
/ Lote Produção						
36 / 0011156830	717,5	356	522	51		

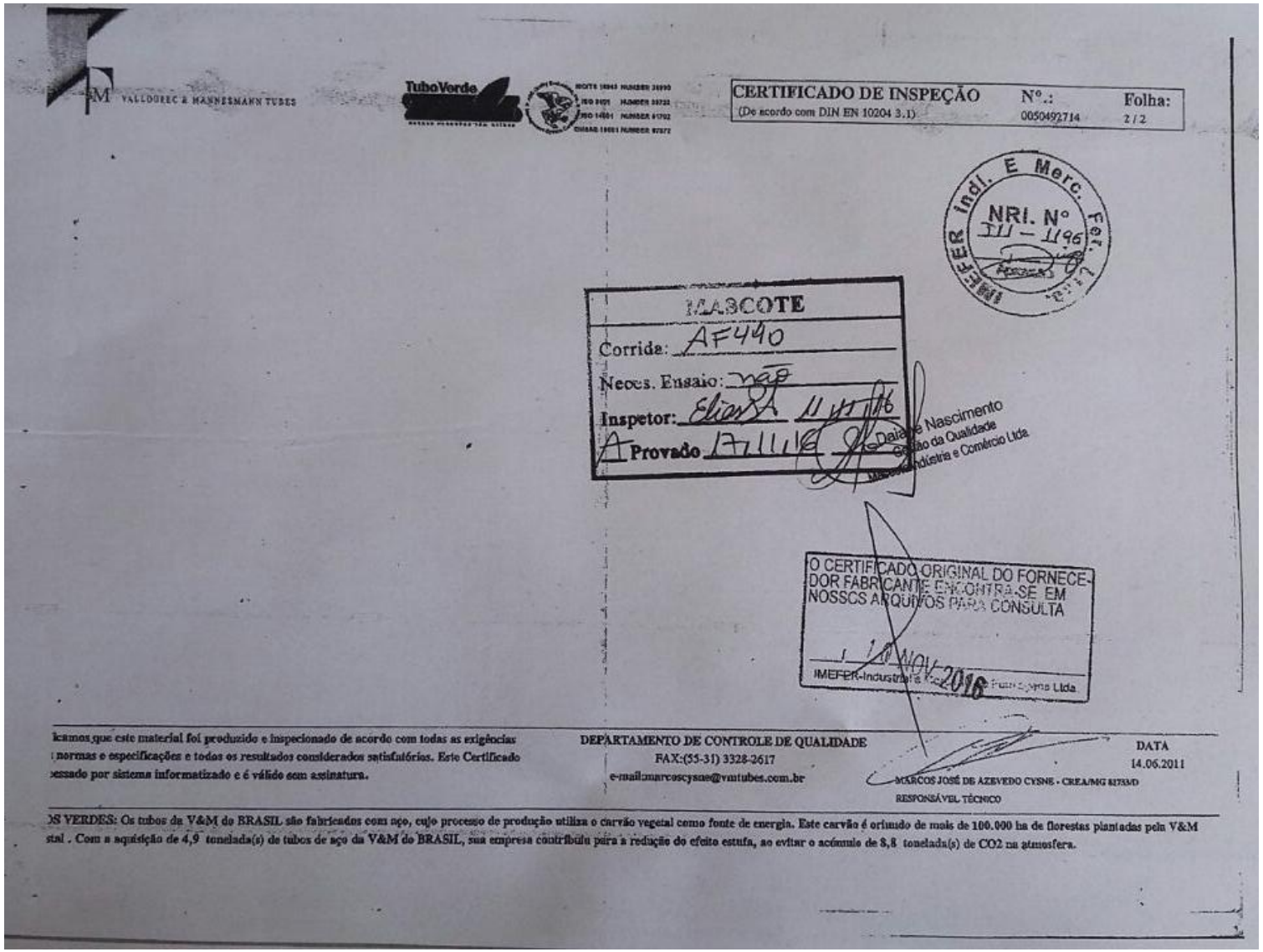
rvações:
A FISCAL: 000173533

Indl. E Merc. Fer. NRI. Nº 311 – 1196 Aprovado — Mafer Ltda.

O CERTIFICADO ORIGINAL DO FABRICANTE... 10 NOV 2011

MASCOTE
Corrida: AF440
Neces. Ensaio: não
Inspetor:
Provado 17/11/11

Gestão da Qualidade — Mafer Industrial e Comércio Ltda



VALLOUREC & MANNESMANN TUBES

TuboVerde

CERTIFICADO DE INSPEÇÃO (De acordo com DIN EN 10204 3.1) | Nº.: 0050492714 | Folha: 2 / 2

IMEFER Ind. E Merc. Fer. LTDA. NRI. Nº III – 1196

MASCOTE
Corrida: AF440
Neces. Ensaio: não
Inspetor: Elias A 11/05/16
Provado 17/11/16
Daiane Nascimento
Gestão da Qualidade
Indústria e Comércio Ltda

O CERTIFICADO ORIGINAL DO FORNECEDOR FABRICANTE ENCONTRA-SE EM NOSSOS ARQUIVOS PARA CONSULTA
17 NOV 2016
IMEFER Indústria e Comércio Ltda

icamos que este material foi produzido e inspecionado de acordo com todas as exigências normas e especificações e todos os resultados considerados satisfatórios. Este Certificado essado por sistema informatizado e é válido sem assinatura.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DE QUALIDADE
FAX:(55-31) 3328-2617
e-mail:marcoscysne@vmtubes.com.br

DATA 14.06.2011

MARCOS JOSÉ DE AZEVEDO CYSNE - CREA/MG 81733/D
RESPONSÁVEL TÉCNICO

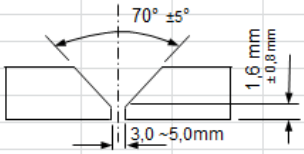
OS VERDES: Os tubos da V&M do BRASIL são fabricados com aço, cujo processo de produção utiliza o carvão vegetal como fonte de energia. Este carvão é oriundo de mais de 100.000 ha de florestas plantadas pela V&M stal . Com a aquisição de 4,9 tonelada(s) de tubos de aço da V&M do BRASIL, sua empresa contribuiu para a redução do efeito estufa, ao evitar o acúmulo de 8,8 tonelada(s) de CO2 na atmosfera.

ANEXO B

	Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) Welding Procedure Specification (WPS)						**NºEPS: E-001** WPS Nº **Folha Nº 01/02** Sheet Nº
Norma de referência:	ASME IX - 2017	RQPS Nº:	N/A	Revisão:	0	**Data:**	20/06/2017
Code	ASME B31.1 - 2016	PQS Nº.:		Review		Date:	
Processo de Soldagem:	TIG (GTAW)			**Tipo:**	MANUAL		
Welding Process				Type:			

Juntas (Joints) -**QW 402**

Tipo de Chanfro:	TOPO			**Detalhes** (Details)	
Joint Type					
Cobre-junta	**Sim**		**Não**	X	
Backing					
Material do mata junta	Metal de solda, metal de base, cerâmica, etc...				
Backing Type					
Observações:	Detalhe das juntas conforme desenho de fabricação				
Remarchs	Inserto consumível não-aplicável				



Metais de Base (Base Metals) - **QW 403**

P Nº:	4	**Grupo Nº:**	1	**com P Nº:**	4	**Grupo Nº:**	1
P Nr.		Group Nr.		to P Nr.		Group Nr.	
Especificação-Tipo e Grau:	SA 335 Gr P11						
Specification-Type and Grade							
com Especificação- Tipo e Grau:	SA 335 Gr P11						
to Specification-Type and Grade							
ou Análise Química e Propriedades Mecânicas:	N/A						
or Chemical Analysis and Mechanical Properties							
com Análise Química e Propriedades Mecânicas:	N/A						
to Chemical Analysis and Mechanical Properties							

Faixa de Espessura (Thickness Range)

Metal de Base:	**Chanfro:**	1,5 à 12,7 mm	**Filete:**	TODAS	
Base Metal	Groove		Fillet		
Metal de Solda Depositado:	**Chanfro:**	≤ 12,7 mm	**Filete:**	ILIMITADA	
Deposited Weld Metal	Groove		Fillet		
Faixa de Diâmetro de Tubo:	**Chanfro:**	TODAS	**Filete:**	TODAS	
Pipe Range Diameter	Groove		Fillet		
Outros:					
Others					

Metais de Adição (Filler Metals) - **QW 404**

F Nº:	6	**Outros:**	N/A
F Nr.		Others	
A Nº:	3	**Outros:**	N/A
A Nr.		Others	
Especificação SFA Nº:	5.28	**Classificação AWS**	ER 80S-B2
Specification SFA Nr.		Classification AWS Nr.	
Dimesões dos Metais de Adição:	**Eletrodo:**	Ø 2,5 - 3,25mm	
Size of Filler Metals	Electrode		
	Arame:	N/A	
	Wire		
Classificação Arame-Fluxo:	N/A	**Marca Comercial do Fluxo:**	N/A
Wire-Flux Classification		Flux Trade Name	
Mata Junta Consumível:	N/A		
Consumable Insert			
Outros:	N/A		
Others			

Posições (Positions) - **QW 405**

Posição do Chanfro:	Todas
Groove Positions	
Progressão de Soldagem:	Vertical Ascendente
Welding Progression	
Posições do Filete:	Todas
Fillet Positions	

Pré-Aquecimento (Preheat) - **QW 406**

Temp.Pré-Aquecimento(mím.):	≥ 100°C
Precheat Temperature	
Temper. Interpasses (máx.):	≤ 300°C
Interpass Temperature	
Outros:	N/A
Others	

Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) Welding Procedure Specification (WPS)	NºEPS: E-001 WPS Nº Folha Nº: 02/02 Sheet Nº

Tratamento Térmico Pós Solda (Postweld Heat Treatment)- **QW 407**

Faixa de Temperatura: Temperature Range	N/A	**Tempo de Permanência:** Holding Time	N/A

Gás (Gas) - **QW 408**

Gás de Proteção: Shielding Gas	ARGÔNIO (GTAW)
Composição de Mistura: Mixture Composition	99,996%
Vazão: Flow Rate	10 a 15 l/min
Gás de Proteção (Raiz): Gas Baking	N/A

Características Elétricas (Electrical Characteristics) - **QW 409**

Tipo e Diâmetro do Eletrodo de Tungstênio: Type and Size of Tungsten Electrode	NA
Modo de Transferência do Metal para GMAW: Mode of Transfer Metal for GMAW	N/A
Faixa de Velocidade de Alimentação do Arame: Wire Feed Speed Range	N/A

Camadas de Solda Weld Layers	**Processo** Process	**Metal de Adição** Filler Metal		**Corrente** Current		**Tensão** Tension	**Velocidade** Speed
		Classe AWS AWS Class	**Diam.** Dia.	**Polaridade** Polarity	**Faixa(A)** Range	**V**	**cm/minuto**
INICIAL	TIG (GTAW)	ER 80S-B2	2,50 - 3,25 mm	CCPD(-)	100 a 180	15 a 25	N/A
E							
SUB-							
SEQUENTES							

Outros: Others	N/A

Técnica (Techinique) - **QW 410**

Cordão Filetado ou Oscilado: String or Weave Bead	OSCILANTE		
Diâmetro do Orifício ou Bocal de Alimentação de Gás: Orifice or Gas Cup Size	QUALQUER		
Limpeza Inicial e Entrepasses: Initial and Interpass Cleaning	ESCOVAMENTO E/OU ESMERILHAMENTO		
Método de Goivagem: Method of Back Gouging	N/A		
Distância entre o Bico de Contato e a Peça: Stickout	N/A		
Passe Múltiplo ou Simples: Multiple or Simple Pass	MÚLTIPLO	**Oscilação:** Oscilation	N/A
Eletrodo Simples ou Múltiplo: Multiple or Simple Electrode	SIMPLES		
Outros: Others	N/A		

ANEXO C

Valores de dureza Vickers da junta soldada a 100 °C (HV)

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
CP1	Linha 1	150,9	282,7	300,7	304,1	326,3	348,4	324,6	295,2	286,8	279,2	157,3
	Linha 2	163,4	276,4	294,6	297,7	329,8	294,6	291,3	275,4	165,3	###	###
CP2	Linha 1	165,7	261,4	289,4	295	321,3	327,3	313,5	284,9	279,9	271,6	169
	Linha 2	153,9	262,8	291,6	303,4	328,4	311,1	293,4	281,9	187,3	###	###
CP3	Linha 1	173,2	305,5	315,9	324,2	368,4	365,4	349,6	297,4	295,1	275,1	167,5
	Linha 2	168,4	301,5	304,9	317,5	372,3	321,8	316,4	291,5	181,2	###	###

Valores de dureza Vickers da junta soldada a 200 °C (HV)

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
CP1	Linha 1	172,3	241,1	261,2	263,4	291,3	298,6	294,6	248,1	239,4	238,4	171,4
	Linha 2	175,9	243,4	248,4	255,4	275,6	265,8	248,2	230,4	159,5	###	###
CP2	Linha 1	165,3	241	245,6	255,4	284,4	291,3	286,6	261,6	248,7	245,6	157,2
	Linha 2	154,9	248	262,2	265,6	295,4	286,6	269,9	263,4	174,8	###	###
CP3	Linha 1	149,6	252,4	253,4	264,2	325,4	326,4	316,8	268,7	251,1	246,6	162,4
	Linha 2	167,3	262,4	278,4	285,4	336,4	286,1	279,4	276,7	163,8	###	###

Valores de dureza Vickers da junta soldada a 300 °C (HV)

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
CP1	Linha 1	170,3	221,1	234,9	237	254,6	258,4	239,6	223,8	221,1	216,4	164,6
	Linha 2	169,8	218,3	215,4	228,4	240,3	230,4	231,1	222,6	154,3	###	###
CP2	Linha 1	187,5	225,4	224,6	231,8	257,9	262,8	256,1	239	231,4	230,8	168,4
	Linha 2	159,9	231,1	235,4	241,7	260,4	252,8	243,3	238,9	157,2	###	###
CP3	Linha 1	165,2	218,6	231,4	238,4	273,4	265,4	267,1	234,8	225,4	221,1	165,4
	Linha 2	168,3	243,3	254,3	256,4	284	262,6	260,3	259,1	162,9	###	###

Média dos valores de dureza Vickers da junta soldada a 100 °C (HV)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Linha 1	163,3	283,2	302,0	307,8	338,7	347,0	329,2	292,5	287,3	275,3	164,6
Linha 2	161,9	280,2	297,0	306,2	343,5	309,2	300,4	282,9	177,9	###	###

Média dos valores de dureza Vickers da junta soldada a 200 °C (HV)

Linha 1	162,4	244,8	253,4	261,0	300,4	305,4	299,3	259,5	246,4	243,5	163,7
Linha 2	166,0	251,3	263,0	268,8	302,5	279,5	265,8	256,8	166,0	###	###

Média dos valores de dureza Vickers da junta soldada a 300 °C (HV)

Linha 1	174,3	221,7	230,3	235,7	262,0	262,2	254,3	232,5	226,0	222,8	166,1
Linha 2	166,0	230,9	235,0	242,2	261,6	248,6	244,9	240,2	158,1	###	###

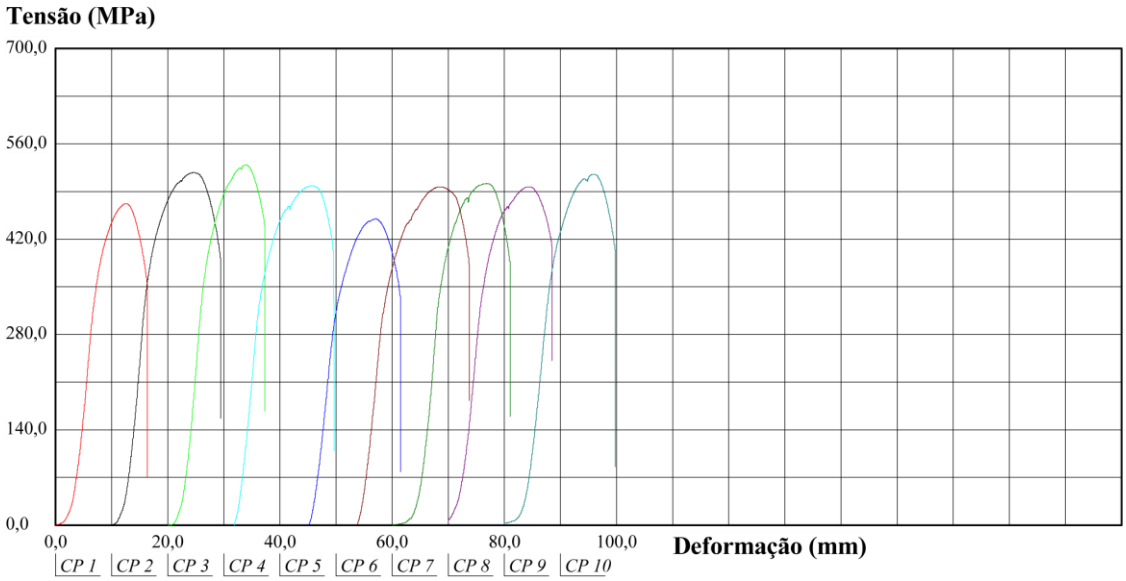
ANEXO D

IFES - ARACRUZ
LABORATÓRIO

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL60000** Célula: **Trd 13** Extensômetro: - Data: **11/10/2017** Hora: **14:27:56** Trabalho n° **0367**
Programa: **Tesc versão 3.04** Método de Ensaio: **Tracao aco generico retang sem extensometro**
Ident. Amostra: >>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>> Material: **ASTM A 335 - P11** Identificação: **FAACZ** Operador: **Operador**

Corpo de Prova	Seção (mm2)	Força no Escoamento (kgf)	Força Máxima (N)	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento na Ruptura (%)
CP 1	152,00	5860,11	71878,08	378,08	472,88	4,65
CP 2	152,00	6033,44	78760,70	389,26	518,16	6,51
CP 3	152,00	6147,32	80486,61	396,61	529,52	5,58
CP 4	160,00	5884,60	79792,04	360,68	498,70	6,05
CP 5	160,00	5474,57	72025,41	335,54	450,16	5,58
CP 6	160,00	5671,85	79560,51	347,64	497,25	6,98
CP 7	152,00	5803,11	76340,20	374,40	502,24	6,05
CP 8	152,00	5829,72	75603,53	376,12	497,39	6,98
CP 9	152,00	6144,17	78444,98	396,40	516,09	7,91
Número CPs	9	9	9	9	9	9
Média	154,7	5872	76990	372,7	498,0	6,253
Mediana	152,0	5860	78440	376,1	498,7	6,047
Desv.Padrão	4,000	218,2	3261	21,23	24,15	0,9620
Coef.Var.(%)	2,586	3,715	4,235	5,695	4,849	15,38
Mínimo	152,0	5475	71880	335,5	450,2	4,651
Máximo	160,0	6147	80490	396,6	529,5	7,907



Onde:

CP 1, CP 5 e CP 8 refere-se à junta soldada a 100 °C.

CP 2, CP 6 e CP 7 refere-se à junta soldada a 200 °C

CP 3, CP 4 e CP 9 refere-se à junta soldada a 300 °C.