UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CARLOS ROBERTO ZAMPIERI JÚNIOR

Titulo: Determinação da tenacidade à fratura da região da solda de um tubo de aço ferrítico ASTM A 335 Gr.P22 através do Deslocamento da Abertura da Ponta da Trinca (CTOD).

São Carlos
2014

CARLOS ROBERTO ZAMPIERI JÚNIOR

Titulo: Determinação da tenacidade à fratura da região da solda de um tubo de aço ferrítico ASTM A 335 Gr.P22 através do Deslocamento da Abertura da Ponta da Trinca (CTOD).

Versão Corrigida
(original na unidade)

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais.

Orientador(a): Dirceu Spinelli

**São Carlos
2014**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

ZAMPIERI, Carlos Roberto Júnior.

Z26d Determinação da tenacidade à fratura da região da solda de um tubo de aço ferrítico ASTM A 335 Gr.P22 através do deslocamento da abertura da ponta da trinca (CTOD)/ Carlos Roberto Zampieri Júnior ; orientador Dirceu Spinelli. São Carlos, 2014.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação de Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais e Área de Concentração em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais)-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Tenacidade à fratura. 2. Juntas soldadas. 3. Zona Termicamente Afetada. 4. CTOD. 5. Pre-aquecimento. 6. Alívio de tensões. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **CARLOS ROBERTO ZAMPIERI JUNIOR.**

Título da dissertação: "Determinação da tenacidade à fratura da região da solda de um tubo de aço ferrítico ASTM A 335 Gr.P22 através do deslocamento da abertura da ponta da trinca (CTOD)".

Data da defesa: 26/09/2014

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Cassius Olivio Figueiredo Terra Ruchert**
(Presidente designado)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Ruis de Camargo Tokimatsu**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Ilha Solteira)

Dr. **Marcelo Tadeu Milan**
(Instituto de Materiais Tecnológicos do Brasil Ltda/MIB)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais:

Prof. Associado **Antonio José Felix de Carvalho**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Resultado:

Aprovado

***À minha família, em gratidão à
presença e apoio em todos os grandes
momentos de minha vida e a minha
namorada Caroline.***

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares, amigos e namorada que estão apoiaram e incentivaram a realização deste trabalho, e que exigiu a compreensão de cada um deles nas noites e finais de semanas necessários para o desenvolvimento do mesmo.

Ao Emerson Pinto Bento e ao Helder de Paiva Marques, disponibilizaram a matéria prima, os consumíveis necessários para a soldagem a e a mão-de-obra para a confecção das amostras.

Ao Prof. Dr. Dirceu Spinelli pela orientação e paciência durante o processo, e que mostrou todos os caminhos necessários para a realização dos estudos, cuidados necessários para a confecção dos corpos de prova e elaboração dos procedimentos dos ensaios mecânicos, contribuindo para meu crescimento científico, intelectual e profissional.

À Welding Inspeções, Engenharia e Análises de Materiais LTDA. que, através de Edson Munhoz e Msc. Márcio Roberto Peticarrari, incentiva o desenvolvimento intelectual do quadro de colaboradores, e que disponibilizou o tempo necessário para a elaboração e acompanhamento dos trabalhos, além de todos os equipamentos necessários para as análises e ensaios realizados neste trabalho.

À Escola de Engenharia de São Carlos, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Enfim, a todos que de uma forma ou outra estiveram envolvidos na realização desde trabalho e na participação desta etapa da minha vida, os meus sinceros agradecimentos.

Muito obrigado a todos!

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

RESUMO

ZAMPIERI, C. R. J. **Determinação da tenacidade à fratura da região da solda de um tubo de aço ferrítico ASTM A 335 Gr.P22 através do Deslocamento da Abertura da Ponta da Trinca (CTOD).** 92p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Aços ferríticos ligados ao cromo e molibdênio, como o ASTM A335 P22, são largamente utilizados nos geradores de vapor em plantas termoelétricas ao redor do mundo e podem apresentar trincas por fadiga durante sua operação. A montagem dos componentes dos geradores de vapor em campo é realizada através de técnicas manuais de soldagem e tem sido apontada como um fator crítico para a qualidade destes equipamentos quando algum parâmetro de soldagem é negligenciado durante o processo. A região soldada de um aço ligado sofre grande influência do ciclo térmico durante a soldagem, cujos elementos de liga mesmo em pequenas quantidades presentes no aço e metal da solda aumentam a temperabilidade, e que dessa forma favorece a formação de microestruturas bainíticas ou martensíticas na região soldada. Neste estudo, uma solda realizada de acordo com o procedimento qualificado, com pré-aquecimento e alívio de tensões pós-soldagem, foi comparada com uma solda realizada sem os tratamentos de pré-aquecimento e alívio de tensões, e foi comparada ainda com uma solda realizada sem os tratamentos térmicos de pré-aquecimento e alívio de tensões e com aporte de calor acima do determinado pelo procedimento. Para isto, o desempenho de cada solda foi analisado quanto ao desempenho nos ensaios de tração, dobramento lateral (requisitos de qualificação de procedimento pelo código ASME IX), e nos ensaios complementares de resistência ao impacto charpy e tenacidade à fratura de cada região principal da solda (Material base, ZTA e Metal de adição). A tenacidade à fratura de cada uma das regiões foi determinada através da técnica da mecânica da fratura elasto-plástica do Deslocamento da Abertura da ponta da trinca, “Crack Tip Open Displacement” (CTOD), aplicada a materiais dúcteis. O resultado deste estudo comparativo mostra que mesmo negligenciando os limites dos parâmetros do procedimento de soldagem especificado para o aço ASTM A335 P22, com espessura de 21mm e 304,8mm de diâmetro, o procedimento teria sido aprovado nos ensaios de qualificação estabelecidos pela norma (tração e dobramento lateral). Contudo, os resultados dos ensaios de Impacto charpy e CTOD realizados nas regiões da solda, mostraram que o metal de adição apresentou tenacidade bem a baixo do que foi observado para a ZTA e para o material base. Desta forma a realização do pré-aquecimento e tratamento de alívio pós-soldagem produziu microestruturas de menor dureza, mas que não refletiu em um aumento da tenacidade do metal de adição.

Palavras Chave: Tenacidade à fratura. Juntas soldadas. ZTA. CTOD. Pré-aquecimento. Alívio de tensões.

ABSTRACT

ZAMPIERI, C. R. J. **Determination of fracture toughness in welds in a ferritic ASTM A 335 Gr.P22 steel pipe by Crack Tip Open Displacement (CTOD) method.** 92p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Ferritic alloy steels with chromium and molybdenum, as ASTM A335 P22, are widely used in steam generators in power plants around the world and may have broken fatigue during operation. The assembly of the components of the steam generators in the field is performed by manual welding techniques and has been identified as a critical factor for the quality of these devices when some parameter is ignored during the welding process. The welded region of an alloy is influenced thermal cycle during welding, alloying elements present in the steel and weld metal increases hardenability, and thus favors the formation of bainíticas or martensitic microstructures in the welded region. In this study, a weld made according to the procedure qualified, pre-heating and post-weld relief of stress was compared with a weld treatments performed without preheating and relieving stress, and was further compared with a solder heat treatments performed without preheating and stress relief heat input and determined by the above procedure. For this, the performance of each weld was analyzed for performance in tensile tests, lateral bending (qualification requirements of ASME IX by procedure code), and testing of Charpy impact resistance and toughness of each major region of the fracture weld (base material, HAZ and weld metal). The fracture toughness of each region was determined by fracture mechanics technique of elastic-plastic fracture Crack Tip Open Displacement (CTOD) applied to ductile materials. The result of this comparative study shows that even neglecting the parameters limits of the welding procedure specified for ASTM A335 P22 with thickness of 21mm and diameter of 304.8 mm, the procedure would have passed in qualification tests established by ASME IX (tensile and lateral bending). However, the results of Charpy impact and the CTOD tests performed in weld regions showed that the weld metal had a very low tenacity than was observed in the HAZ and the base material. Thus the realization of pre-heating and post-weld treatment relief produced microstructures with lower hardness but that was not reflected in an increase in the toughness of weld metal.

Keywords: Fracture toughness. Welding. ZTA. CTOD. Pre -heating. Stress relief.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de uma caldeira de geração de vapor aquatubular.....	4
Figura 2: Esquema de soldagem GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) – TIG	8
Figura 3: Esquema de Soldagem SMAW (Shielded Metal Arc Welding) – Eletrodo Revestido Fonte: Blog Tim Engenharia – Soldagem Industrial ²⁶	9
Figura 4: Perfil de temperatura ao longo de uma junta soldada. As linhas representam o ciclo térmico e o corte y-y' mostra as temperaturas máximas atingidas pelos pontos em relação a linha central da solda. Fonte: COLPAERT ²⁷	12
Figura 5: Representação das regiões da zona termicamente afetada (esquerda) a partir da distribuição de temperaturas indicadas na Figura 4 corte y-y', para um aço com 0,15% de carbono representado pelo diagrama de equilíbrio (direita). Fote: COLPAERT ²⁷	13
Figura 6: Gráfico de transformação em resfriamento contínuo de um aço com composição similar ao ASTM A 335 P22, indicando as fases e microestruturas que se obtém em diferentes taxas de resfriamento a partir do campo austenítico. Fonte: Atlas de tratamento térmico ³⁴	14
Figura 7: Microestruturas obtidas para um aço similar ao ASTM P22 em taxas de resfriamento decrescentes (a) resfriamento mais rápido (d) resfriamento mais lento. Fonte: Atlas de tratamento térmico ³⁴	15
Figura 8: Regiões de transformação devido ao calor de soldagem em juntas multipasse. Fonte COLPAERT ²⁷	16
Figura 9: Esquema de tratamento térmico de uma tubulação por aquecimento resistivo (técnica utilizada em campo). Fonte: GIMENES ³²	18
Figura 10: Os três modos de carregamento que podem ser aplicados a uma trinca. Fonte: ANDERSON ¹	20
Figura 11: Estimativa de CTOD pela deslocamento efetivo da trinca pela correção plástica de Irwin. Fonte: ANDERSON ¹	22
Figura 12: Estimativa de do raio plástico r_y e r_p considerando a redistribuição de tensões. Fonte: ANDERSON ¹	23
Figura 13: Abertura da ponta da trinca (CTOD). um trinca inicialmente aguda com a ponta arredondada até um finito. ANDERSON ¹	24
Figura 14: Estimativa do CTOD a partir do modelo da zona de escoamento. ANDERSON ¹	24
Figura 15: Definições de CTOD. a) deslocamento na ponta da trinca original. b) deslocamento da interseção de um vertice de 90° com os flancos da trinca.....	25
Figura 16: Modelo “ponto de giro” de medição de CTOD em corpo de prova de flexão em três pontos Single Edge Notch Bend (SEN(B)). Fonte: ANDERSON ¹	25
Figura 17: Determinação do componente plástico da abertura da ponta da trinca. Fonte:	

ANDERSON ¹	26
Figura 18: Perfil do bisel utilizado para soldagem das amostras.	27
Figura 19: Soldagem de enchimento com eletrodo E9018-B3 armazenado no cochicho aquecido (seta).	28
Figura 20: chanfro de 30° para a preparação do bisel.	29
Figura 21: Processo de preparo do chanfro antes da soldagem.	29
Figura 22: montagem do gabarito entre dois segmentos de tubulação.	30
Figura 23: Seguimentos de tubulação com os guias soldadas antes da retirada do gabarito de 6mm.	30
Figura 24: Solda de raiz com processo GTAW e retirada dos guias.	31
Figura 25: Soldagem de preenchimento das amostras através do rotacionamento dos tubos.	32
Figura 26: a) Lápis de solda e b) pirômetro ótico infravermelho portátil, equipamentos utilizados para o controle e medição de temperatura durante o processo.	32
Figura 27: Cronômetro (a) e trena (b) utilizados para as medições de velocidade de soldagem.	33
Figura 28: Máquina de solda utilizada para realizar a soldagem de todas as amostras.	33
Figura 29: monitoramento da temperatura de interpasse com lápis térmico para amostra do Tubo 1.	34
Figura 30: Pré-aquecimento realizado através de maçarico com chuveiro espalhador da chama na amostra de Tubo 1.	34
Figura 31: Processo de limpeza da escória realizada entre os passes de enchimento.	35
Figura 32: Amostra Tubo 1 após os passes de acabamento.	35
Figura 33: Instalação dos indutores e termopares na amostra Tubo 1.	36
Figura 34: Amostra Tubo 1 após preparada para a realização do tratamento térmico pós-soldagem.	36
Figura 35: Gráfico do ciclo térmico do tratamento térmico pós-soldagem retirado do registrador acoplado a maquina de tratamento térmico portátil.	37
Figura 36: Esquema de orientação dos entalhes dos corpos de prova de impacto Charpy e tenacidade a fratura CTOD em relação ao comprimento do tubo.	38
Figura 37: Spectrômetro de emissão ótica SpectroMAXx utilizado para as análises químicas	38
Figura 38: Recomendação ASME IX para preparação de especimes para ensaio de tração de juntas soldadas. Fonte: ASME IX QW-462-1(d) ¹⁶	39

Figura 39: Máquina de ensaios mecânicos universal hidráulica MTS.	40
Figura 40: esquema do ensaio de dobramento de corpos soldados.	41
Figura 41: Especificação de preparação de corpos de prova para dobramento lateral de soldas.	41
Figura 42: Especificação do dispositivo para dobramento lateral.	42
Figura 43: Dispositivo utilizado para realização dos dobramentos laterais.	42
Figura 44: Desenho das dimensões dos espécimes utilizados para a realização dos ensaios de Impacto Charpy. Fonte: ASTM E23.	43
Figura 45: Esquema de um corpo de prova de teste de impacto fraturado para a determinação da parcela dúctil da fratura. Fonte ASTM E23.	44
Figura 46: Esquema de medições de dureza Vickers no perfil de juntas soldadas.	45
Figura 47: Microdurômetro Zwick utilizado para os ensaios de dureza Vickers.	46
Figura 48: Orientações de planos de trincas para espécimes de tenacidade a fratura soldados.	47
Figura 49: Especificação de geometria para espécimes SE(B) para CTOD em soldas.	48
Figura 50: Especificação de orientação e posição de entalhe para a condução de ensaios de tenacidade à fratura CTOD na ZTA da junta soldada. Fonte: BS 7448 Part 2 1997 ²²	48
Figura 51: Posição do entalhe, segundo a orientação e geometria recomendada para confecção dos espécimes. Fonte: BS 7448 Part 2 1997 ²²	49
Figura 52: Gráficos típicos obtidos nos ensaios de tenacidade à fratura e obtenção dos pontos de interesse utilizados para os cálculos. Fonte: Tradução da norma BS 7448-1 ²¹	50
Figura 53: desenho dos espécimes SE(B) usinados para o ensaio CTOD.	50
Figura 54: Foto de um "jogo" representativo de espécimes com entalhe no Material Base (MB), Zona Térmicamente Afetada (ZTA) e Metal de Adição (MA).	51
Figura 55: Todos os espécimes de tenacidade à fratura usinados para realização dos ensaios CTOD.	52
Figura 56: Altimetro traçador utilizado para as marcações de referência de propagação das pré-trincas e alinhamento dos corpos de prova polidos.	53
Figura 57: Corpo de prova alinhado no dispositivo de propagação das pré-trincas e realização dos ensaios, o extensômetro foi utilizado apenas para a medição do COD durante o carregamento contínuo.	53
Figura 58: Tela do gerador de funções no programa de gerenciamento da estação de ensaio MTS.	54
Figura 59: Estereoscópio Olympus SZ61 utilizado para a qualificação das pré trincas.	55

Figura 60: Fotomacrografia representativa do CP com maior ângulo de desvio do plano da pré-trinca.	56
Figura 61: Medição do angulo de desvio do plano da pré-trinca, com software Image-Pro Plus.....	56
Figura 62: Medição do comprimento da pré trinca utilizando software Image-Pro Plus 4.5. .	57
Figura 63: Perfil de composição química do metal de adição até o metal base da amostra do Tubo 1.....	62
Figura 64: Perfil de composição química do metal de adição até o metal base da amostra do Tubo 2.....	63
Figura 65: Perfil de composição química do metal de adição até o metal base da amostra do Tubo 3.....	63
Figura 66: Imagem BSE da região de propagação da pré-trinca representativa do MA das amostras dos Tubos 1, 2 e 3 onde verificaram-se alta densidade de inclusões.	64
Figura 67: Caracterização qualitativa das fases. As inclusões são representadas pela cor azul e o metal base pela cor vermelha.....	65
Figura 68: Gráfico de Dureza vs Distância (Perfil de Dureza).	67
Figura 69: Micrografia representativa do material base dos tubos 1, 2 e 3. Ataque Nital 2%	68
Figura 70: Micrografia da região da ZTA da solda de união do tubo 1. Ataque Nital 2%.....	69
Figura 71: Microestrutura do metal de adição do tubo 1 com pré-aquecimento e tratamento após soldagem. Ataque Nital 2% Aumento 100X.	69
Figura 72: Micrografia da ZTA da Solda do tubo 2 sem pré aquecimento e sem tratamento após soldagem. Ataque Nital 2% Aumento 100X.	70
Figura 73: Micrografia da solda do tubo 2 sem pré aquecimento e sem tratamento após soldagem. Ataque Nital 2% Aumento 100X.....	70
Figura 74: Micrografia da ZTA no tubo 3. Ataque Nital 2%	71
Figura 75: Micrografia da solda do tubo 3 sem pré aquecimento e sem tratamento após soldagem. Ataque Nital 2% Aumento 100X.....	71
Figura 76: Montagem sequencial de micrografias para visualização das regiões da solda do tubo1.....	72
Figura 77: Montagem sequencial de micrografias para visualização das regiões da solda do tubo2.....	72
Figura 78: Montagem sequencial de micrografias para visualização das regiões da solda do tubo3.....	72
Figura 79: Micrografia do material base Tubo 1 com grãos de ferrita da região homogênea, e grãos de bainita na região “mesclada”. Ataque Nital 2% 8 segundos.	73
Figura 80: Micrografia do material base Tubo 2 com grãos de ferrita da região homogênea, e	

grãos de bainita na região “mesclada”. Ataque Nital 2% 8 segundos.....	74
Figura 81: Micrografia do material base Tubo 3 com grãos de ferrita da região homogênea, e grãos de bainita na região “mesclada”. Ataque Nital 2% 8 segundos.....	74
Figura 82: Micrografia do metal de adição do Tubo 1 onde se evidenciam uma grande quantidade de inclusões de formato arredondado. Ataque Nital 2% 8 segundos.	75
Figura 83: Micrografia do metal de adição do Tubo 2 onde se evidenciam uma grande quantidade de inclusões de formato arredondado. Ataque Nital 2% 8 segundos.	75
Figura 84: Micrografia do metal de adição do Tubo 3 onde se evidenciam uma grande quantidade de inclusões de formato arredondado. Ataque Nital 2% 8 segundos.	76
Figura 85: Micrografia da ZTA do Tubo 1. Ataque Nital 2% 8 segundos.	76
Figura 86: Micrografia da ZTA do Tubo 2. Ataque Nital 2% 8 segundos.	77
Figura 87: Micrografia da ZTA do Tubo 3. Ataque Nital 2% 8 segundos.	77
Figura 88: Instalação do extensômetro na região de solda.	78
Figura 89: a) Espécimes A, B e C de tração, retirados do CP1 antes do ensaio de tração. b) Espécimes A, B e C de tração, retirados do CP1 após ensaio de tração da região soldada.	79
Figura 90: Espécimes A, B e C de tração, retirados do CP2 antes do ensaio de tração. b) Espécimes A, B e C de tração, retirados do CP2 após ensaio de tração da região soldada.	79
Figura 91: Espécimes A, B e C de tração, retirados do CP3 antes do ensaio de tração. b) Espécimes A, B e C de tração, retirados do CP3 após ensaio de tração da região soldada.	80
Figura 92: Espécimes para dobramento lateral atacadas e marcadas para alinhamento no dispositivo de ensaio.....	80
Figura 93: Ensaio de dobramento guiado segundo ASME IX ainda em andamento.....	81
Figura 94: a) Especime do ensaio de dobramento do lado marcado indicando que os espécimes foram dobrados alinhados com o centro das soldas. b) região externa dos espécimes sem indicações de defeitos nas soldas.	81
Figura 95: Região de embotamento do CP MB 1A, aproximadamente 2,5mm.....	85
Figura 96: Detalhe do micro mecanismo da região de embotamento do CP MB 1A predominância de dimples.	86
Figura 97: Região de embotamento do CP ZTA 1A, aproximadamente 1,4 mm.....	86
Figura 98: Detalhe do micro mecanismo da região de embotamento do CP ZTA 1A, região com presença de dimples.	87
Figura 99: Região de embotamento do CP MA 1A, aproximadamente 0,04mm.....	87
Figura 100: Detalhe do micro mecanismo da região de embotamento do CP MA 1A, região de predominância de dimples com inclusões nos centros dos dimples.....	88

Figura 101: Detalhe do micro mecanismo da região de ensaio do CP MA 1A, região de predominância de clivagem com inclusões nos centros dos planos de clivagem.	89
Figura 102: Região de embotamento do CP ZTA 2A, aproximadamente 0,50 mm.	89
Figura 103: Detalhe do micro mecanismo da região de embotamento do CP ZTA 2A, região com presença de dimples.	90
Figura 104: Região de embotamento do CP MA 2B, aproximadamente 0,070 mm.	91
Figura 105: Detalhe do micro mecanismo da região de embotamento do CP MA 2B, região de predominância de dimples com inclusões nos centros dos dimples.	91
Figura 106: Região de embotamento do CP ZTA 3A, aproximadamente 3,0mm.	92
Figura 107: Detalhe do micro mecanismo da região de embotamento do CP ZTA 3A, região de predominância de dimples.	92
Figura 108: Região de embotamento do CP MA 3A., aproximadamente 1,5mm.	93
Figura 109: Detalhe do micro mecanismo misto da região de embotamento do CP MA 3A evidenciando dimples e planos de clivagem coexistindo na região de ensaio.	94
Figura 110: Detalhe do micro mecanismo misto da região de embotamento do CP MA 3A..	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química especificada pela ASTM A335 Grau P22. Fonte: ASTM A335 ³	6
Tabela 2: Relação entre as microestruturas e a dureza HV obtidas em diferentes graus de resfriamento (modificada de: Atlas de tratamento térmico ³⁴).	15
Tabela 3: Campo de tensões a frente da trinca para os modos I e II em um material isotropico linear elástico. Fonte: ANDERSON ¹	21
Tabela 4: Identificação dos corpos de prova para ensaio de impacto Charpy.....	43
Tabela 5: Tabela de calculo do percentual de deformação lateral (dúctil). Fonte ASTM E23.44	
Tabela 6: Identificação dos espécimes do ensaio de tenacidade à fratura CTOD.	51
Tabela 7: Eficiências térmicas dos processos de soldagem.	58
Tabela 8: Parâmetros de soldagem e energia de soldagem média do Tubo 1.	59
Tabela 9: Parâmetros de soldagem e energia de soldagem média do Tubo 2.	59
Tabela 10: Parâmetros de soldagem e energia de soldagem média do Tubo 3.....	60
Tabela 11: Resultados das análises química do metal base das amostras dos Tubos 1, 2 e 3.61	
Tabela 12: Resultados das análises química do metal de adição das amostras dos Tubos 1, 2 e 3.	61
Tabela 13: Resultados EDX realizado na inclusão	65
Tabela 14: Microdureza Vickers da Região de Solda dos Tubos 1, 2 e 3.	66
Tabela 15: Resultados das medidas de dureza HV ₁₀ na ZTA e Solda de cada uma das amostras para a estimativa das tensões de escoamento.	68
Tabela 16: Resultados do ensaio de impacto Charpy a temperatura ambiente.	82
Tabela 17: Medições do % de fratura dúctil dos corpos de prova do ensaio de Impacto Charpy.	82
Tabela 18: Resultados do ensaio de dureza utilizados como referência para estimar as propriedades das regiões da junta soldada.....	83
Tabela 19: Tensão de escoamento estimada a partir da dureza das regiões ZTA e MA das amostras, pelas Eq.9 e 10.	83
Tabela 20: Resultados das medições de CTOD de carga máxima das amostras do Material Base (MB) distante das soldas.	84
Tabela 21: Resultados das medições de CTOD de carga máxima das amostras do Tubo 1 nas regiões da ZTA e do MA.....	84
Tabela 22: Resultados das medições de CTOD de carga máxima das amostras do Tubo 2	

nas regiões da ZTA e do MA. 84

Tabela 23: Resultados das medições de CTOD de carga máxima das amostras do Tubo 3
nas regiões da ZTA e do MA. 84

LISTA DE SIGLAS

ASM	- American Society of Methalurgy
ASTM	- American Society of Testing Materials
CTOD	- Crack Tip Open Displacement (Deslocamento da Abertura da Ponta da Trinca)
ARBL	- Aço de Alta Resistência Baixa Liga
ZFL	- Zona Frágil Localizada
API	- American Petroleum Institute
FFS	- Fitness For Service
NR13	- Norma Regulamentadora número 13
SMAW	- Shielded Metal Arc Welding
SAW	- Submerged Arc Welding
GTAW	- Gas Tungsten Arc Welding
GMAW	- Gas Metal Arc Welding
AWS	- American Welding Society
TTT	- Transformação Tempo Temperatura
TRC	- Transformação em Resfriamento Contínuo
MFLE	- Mecânica da Fratura Linear Elástica
MFEP	- Mecânica da Fratura elasto-plástica
SEN(B)	- Corpo de prova Single Edge Notch Bend
RQS	- Registro de Qualificação de Soldador
EPS	- Especificação de Procedimento de Soldagem
MB	- Material Base
MA	- Metal de Adição
ZTA	- Zona Termicamente Afetada.
MEV	- Microscópio Eletrônico de Varredura
EDS	- Espectroscopia de Energia Dispersiva
BS	- British Standard
CP	- Corpo de Prova

LISTA DE SÍMBOLOS

H = energia de soldagem;

η = eficiência térmica do processo;

V = Tensão no arco(V);

I = Corrente (A) e

v = Velocidade de soldagem (mm/s).

u_y = distância do centro da trinca até o plano de abertura (Figura 11)

K_I = Fator de intensidade de tensão no modo I

K_{II} = Fator de intensidade de tensão no modo II

K_{III} = Fator de intensidade de tensão no modo III

r_y = raio deformado da ponta da trinca na região “elástica” (não considera a redistribuição de cargas ao atingir o limite de escoamento, Figura 12).

μ = Módulo de cisalhamento

k = $3 - 4 \nu$ p/ estado plano de deformação, ou $(3 - \nu)/(1 + \nu)$ p/ estado plano de tensões

ν = coeficiente de Poisson

δ = abertura da ponta da trinca (CTOD)

E = Módulo de elasticidade do material.

σ_{YS} = Tensão de escoamento.

a_i = é o comprimento trinca no momento da medição

W = Largura do corpo de prova (Figura 49).

b_0 = $(W - a_0)$

B = Espessura do corpo de prova (Figura 49).

B_N = Espessura do corpo de prova no entalhe lateral, caso não existir $B_N = B$.

S = Distância entre os apoios (Span) corresponde a $4 \cdot W$.

F_f = Carga máxima na execução da pré trinca.

F_i = Carga obtida no gráfico do ensaio, F_Q , F_C , F_u ou F_m (Figura 52)

K = Fator intensidade de tensão definido com $a=a_0$.

= Razão de Poisson

γ_S = Escoamento ou 0,2% deslocado da tensão de escoamento à temperatura de interesse

E = Módulo elástico à temperatura de teste

V_{pl} = Componente plástica da abertura da boca da trinca no ponto de avaliação da curva Carga-Deslocamento, v_c , v_i , v_u , ou v_m (Figura 52).

z = distância da lâmina de ponto de medição do canto do entalhe no corpo de prova “Single Edge Bend”

r_p = fator de rotação plástica = 0,44 (ASTM) ou 0,40 (BS)

Sumário

1.	Introdução.....	1
1.1.	Objetivo	2
2.	Revisão Bibliográfica.....	3
2.1.	Caldeiras	3
2.1.1.	Materiais para Caldeiras.....	4
2.1.2.	Aços para trabalho em alta temperatura.....	5
2.1.3.	Aço ligado ao Cromo e Molibdênio.....	5
2.2.	Soldagem.....	7
2.2.1.	Processo de Soldagem GTAW (TIG)	7
2.2.2.	Processo de Soldagem SMAW (Eletrodo Revestido).....	8
2.2.3.	Ciclo Térmico e Microestrutura das Regiões Soldadas	11
2.2.3.1.	Soldagem Multipasse.....	15
2.2.3.2.	Pré-Aquecimento.....	16
2.2.3.3.	Tratamento térmico pós-soldagem em campo	17
2.3.	Mecânica da Fratura	18
2.3.1.	Evolução da Mecânica da Fratura	18
2.3.2.	Fator intensidade de tensão (K).....	20
2.3.3.	Crack Tip Open Displacement (CTOD).....	21
3.	Materiais e Métodos.....	27
3.1.	Materiais.....	27
3.2.	Confecção das Amostras	28
3.2.1.	Processo de Soldagem.....	31
3.2.2.	Tratamento pós-soldagem da Amostra Tubo1.	35
3.3.	Retirada de espécimes e corpos de prova	37
3.4.	Análise Química.....	38
3.5.	Ensaio de Tração.....	39
3.6.	Ensaio de Dobramento Guiado	40
3.7.	Ensaio de Impacto Charpy	42
3.8.	Ensaio de Dureza Vickers.....	44
3.9.	Ensaio de tenacidade à fratura CTOD em corpos soldados	46
3.9.1.	Corpos de prova (CPs) de juntas soldadas Single Edge Notch Bend SE(B).47	
4.	Resultados e Discussão	57
4.1.	Energia de Soldagem.	58

4.2.	Análise química do Metal de Adição e Metal Base.	61
4.3.	Ensaio de Micro Dureza Vickers	66
4.4.	Análise Metalográfica	68
4.5.	Ensaio de Tração.....	78
4.6.	Ensaio de Dobramento Guiado	80
4.7.	Ensaio de Impacto Charpy	82
4.8.	Ensaio de Tenacidade à Fratura CTOD.....	83
5.	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	95
5.1.	Conclusões	95
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros	97
	REFERÊNCIAS.....	98
	ANEXO 1 – Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS)	101
	ANEXO 2 – Registro de Qualificação de Soldador (RQS)	103
	ANEXO 3 – Instrução de tratamento térmico pós soldagem P22	105
	ANEXO 4 – Certificado de qualidade de metal de adição (TIG)	106
	ANEXOS 5 – Certificados de qualidade dos lotes dos eletrodos revestidos	107
	ANEXOS 6 – Gráficos do ensaio de CTOD para obtenção de F_m e V_p de carga máxima.	111
	ANEXOS 7 – Planilhas de cálculos de CTOD.....	151
	ANEXOS 8 – Ensaio de Tração do Material Base.	175

1. Introdução

Com a crescente busca de eficiência dos processos de geração de energia, onde se procura a melhor relação entre o menor custo operacional (consumo de combustível e manutenção) e a maior geração de potência, exige que os geradores de vapor trabalhem cada vez mais próximos de seus limites operacionais.

A aplicação próxima do limite do material faz com que defeitos e alterações metalúrgicas, tanto na etapa de produção quanto na etapa de união de metais, sejam responsáveis por uma considerável parte das falhas mecânicas.

Com o advento da cogeração de energia a partir da queima do bagaço de cana, os geradores de vapor vêm ganhando espaço cada vez maior na indústria sucroalcooleira que aumentam a sua lucratividade através da comercialização da energia excedente.

Em geradores de vapor como caldeiras, as consequências destas falhas são em geral catastróficas:

- Estruturas podem ser interditadas ou mesmo destruídas e a produção pode ser interrompida por tempo indeterminado;
- Vidas de operadores são colocadas em risco durante uma eventual falha deste tipo de equipamento.

Segundo Anderson¹ a causa da maioria das falhas estruturais geralmente cai dentro de uma das categorias:

- Negligência durante o projeto, construção ou operação da estrutura.
- Aplicação de um novo projeto ou material, que produz um resultado inesperado/indesejado.

As regiões de união de materiais geralmente são as regiões mais críticas, pois estas regiões estão mais sujeitas a descontinuidades, defeitos, alterações estruturais. Dentre outros problemas gerados, principalmente em processos manuais como a soldagem realizada em campo, tais descontinuidades não são, em geral, previstas em um projeto baseado apenas na análise de tensões.

Estudos sobre aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) soldados, demonstram que valores de CTOD (Crack Tip Opening Displacement) obtidos de microestruturas simuladas termicamente podem apresentar valores inferiores a 0,1 mm. Essa diminuição da tenacidade à fratura foi associada à formação de zonas frágeis. As regiões da junta soldada onde o material apresenta baixos valores de

tenacidade são chamadas de Zonas Frágeis Localizadas (ZFL)².

Através das técnicas da mecânica da fratura elasto-plástica tornou-se possível avaliar a tenacidade à fratura de materiais dúcteis como o aço ASTM A 335 P22³ através da técnica Crack Tip Open Displacement (CTOD), que, por estar relacionada com a ponta da trinca, é uma metodologia sensível a pequenas zonas frágeis, ideal para o estudo da Zona Termicamente Afetada (ZTA) de juntas soldadas.

As técnicas de avaliação de integridade modernas como, por exemplo, API RP 579/ASME FFS-1 (Fitness for Service)^{4,5} são importantes ferramentas da engenharia moderna, onde os profissionais responsáveis avaliam se a presença de um defeito, degradação ou mesmo uma falha no processo de soldagem, comprometem o funcionamento do equipamento. Conhecer as propriedades de tenacidade à fratura do aço ASTM A 335 P22 e das regiões de solda do mesmo, são de extrema importância tanto para a fabricação e montagem, quanto para a manutenção e reparos de caldeiras.

Com isso, a maior compreensão do comportamento das regiões soldadas destes aços, sob a ótica da mecânica da fratura, torna-se de grande valia para os setores produtivos e normativos⁶, além dos códigos de projeto e inspeção.

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é comparar a tenacidade à fratura das principais regiões de uma tubulação ASTM A 335 P22, soldadas por procedimentos de soldagem de acordo com o especificado em norma, com a mesma tubulação soldada infringindo as especificações de ciclo térmico e energia de soldagem, que por serem realizados em campo e por processos manuais, são mais susceptíveis a falhas durante o procedimento (inclusive pela negligência do próprio soldador).

2. Revisão Bibliográfica

A seguir são apresentados todos os conceitos e metodologias utilizados para a realização do estudo analítico da tenacidade à fratura das juntas soldadas do aço ferrítico ASTM A 335 P22 utilizado na fabricação de componentes de caldeira que trabalham em alta pressão e temperatura.

2.1. Caldeiras

Caldeira é o nome popular dado aos geradores de vapor, que queimam algum tipo de combustível como fonte de calor e são utilizados no meio industrial e na geração de energia elétrica nas centrais termo elétricas⁷.

Por trabalhar em pressões acima da pressão atmosférica podendo chegar até 250 vezes a pressão atmosférica²⁹, as caldeiras constituem um risco grave e iminente segundo a classificação da norma NR13³⁰.

Durante a revolução industrial, incidentes e acidentes com caldeiras eram corriqueiros, e após um dos acidentes mais catastróficos envolvendo caldeiras, que ocorreu em Massachussets – EUA em 1905, a sociedade se alertou para a necessidade de normas e procedimentos para a construção, manutenção e operação de caldeiras. Desta forma foram criados os códigos da Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME), que constitui no principal código de referência normativa sobre caldeiras de vasos de pressão no mundo²⁹.

Existem diversos tipos de caldeiras que podem ser classificados de forma genérica em fumotubulares e aquatubulares. As caldeiras de geração de vapor aquatubulares (Figura 1) são mais utilizadas na indústria em geral, pois possuem vasos pressurizados internamente e menor dimensão, isso viabiliza a utilização de materiais de maior espessura e consequentemente pressões mais elevadas, como consequência a produção de vapor destas caldeiras é maior. Neste tipo de caldeira a água e vapor de água circulam no interior dos tubos e os gases quentes da combustão estão em contato com sua superfície externa dos tubos⁸.

Figura 1: Esquema de uma caldeira de geração de vapor aquatubular.
Fonte: MARTINELLI, L. C. J. Geradores de Vapor⁸.

Estes tipos de caldeira são empregados quando se interessa obter pressões e rendimentos elevados, pois os esforços desenvolvidos nos tubos pelas altas pressões são de tração ao invés de compressão, e também pelo fato dos tubos estarem fora do corpo da caldeira obtemos superfícies de aquecimento praticamente ilimitadas, ou seja, caldeiras aquatubulares possuem elevada eficiência energética⁸.

2.1.1. Materiais para Caldeiras

As características operacionais das caldeiras exigem a utilização de materiais que apresentem boa resistência mecânica em altas temperaturas. A capacidade de produção de vapor de uma caldeira é limitada pela pressão de operação que por sua vez é limitada pelas dimensões (espessura) e propriedades metalúrgicas do material.

O desenvolvimento de materiais para construção de caldeiras tem sido considerado de maior importância para o funcionamento e eficiência de centrais termelétricas, sendo que os pilares da seleção destes materiais estão relacionados com as propriedades mecânicas, propriedades físicas, disponibilidade e preços dos materiais⁹.

Os materiais devem possuir quer resistência à fluência, quer resistência à corrosão quando sujeitos à ação dos gases de combustão e/ou às condições de oxidação do vapor, resistência aos ciclos termo-mecânicos e serem adequados ao fabrico e soldagem de secções espessas⁹.

Para obter as propriedades necessárias, principalmente tenacidade e resistência mecânica, o teor de carbono foi progressivamente reduzido e o teor de elementos de liga como Ti, Mo, Cr, Al e V, foram adicionados¹⁰.

2.1.2. Aços para trabalho em alta temperatura

O desenvolvimento de materiais aplicados em painéis da fornalha, superaquecedores, e componentes com secções espessas e linhas de vapor, são de grande relevância no aumento da eficiência de caldeiras⁹.

A família dos aços ferríticos se destaca pelo seu baixo coeficiente de dilatação térmica, que, para a operação em altas temperaturas é uma propriedade fundamental. A partir dos anos 40, os aços ferríticos Cr-Mo vêm sendo empregados na maioria das plantas termelétricas ao redor do mundo, desde os 2,25Cr-1Mo até os 9Cr-1Mo. Os aços com baixo teor de elementos de liga como P22 (da família 2,25Cr-1Mo) podem falhar devido à fadiga térmica causada pelos ciclos de operação mesmo nas caldeiras convencionais^{9,11}.

As pequenas trincas geradas durante o ciclo térmico podem constituir defeitos relevantes para a manutenção dos parâmetros de operação das caldeiras que trabalham pressurizados, comprometendo sensivelmente a eficiência dos mesmos.

2.1.3. Aço ligado ao Cromo e Molibdênio

Os aços Cromo Molibdênio são largamente utilizados em indústrias químicas, estações de geração de energia, tubos superaquecidos, caldeiras, trocadores de calor e vasos de pressão.

O Cromo é um elemento que forma carbonetos estáveis e muito duros nos aços. Os carbonetos de cromo conferem grande resistência mecânica e ao desgaste aos aços sem perda de tenacidade devido à substituição do carboneto de ferro por carboneto de cromo¹².

No caso do aço utilizado na fabricação dos tubos ASTM A335 P22 com

concentrações da ordem de 2%, o cromo não altera a temperatura de austenitização e aumenta moderadamente a temperabilidade. Durante ao resfriamento do aço austenitizado, o Cr na concentração entre 2 e 5% irá favorecer a formação de constituintes mais duros (bainita)¹². A maior temperabilidade influencia a soldagem destes aços, principalmente no que tange ao ciclo térmico a que são expostos durante o processo, exigindo um melhor controle do ciclo térmico com pré-aquecimento e alívio de tensões pós-soldagem para que a Zona Termicamente Afetada (ZTA) apresente boa tenacidade.

O molibdênio (Mo) é o principal elemento responsável pelo aumento da resistência à fluência em aços Cr-Mo quando está presente em solução sólida ou em precipitados. Os átomos de Mo têm afinidade com os elementos de liga intersticiais mais forte que o Cr resultando, então, em um maior endurecimento por solução sólida. Em aços ferríticos, a presença de 1% em peso de Mo em solução é suficiente para reduzir o movimento de discordâncias¹¹, o que gera um aumento da tensão necessária (energia) para a deformação plástica.

O molibdênio é um elemento de liga efetivo para aumentar a resistência e dureza do aço em altas temperaturas e que junto ao cromo, também é útil para reduzir o ataque do aço pelo hidrogênio em altas temperaturas¹².

Os tubos sem costura ASTM A335 Grau P22 são confeccionados a partir de um aço baixa liga Cr-Mo, (menos de 5% de elementos de liga)¹³, a especificação de composição química foi retirada da norma ASTM A 335 e transcrita na Tabela 1 a baixo³.

Tabela 1: Composição química especificada pela ASTM A335 Grau P22. Fonte: ASTM A335³.

Elementos (% em peso)		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
ASTM A335 P22	mínimo	0,05	-	0,30	-	-	1,90	-	0,87
	máximo	0,15	0,50	0,60	0,025	0,025	2,60	-	1,13

A combinação de baixos teores de Cr e Mo no material ASTM A335 Grau P22 conferem ao material com resistência mecânica superior nas aplicações em altas temperaturas.

2.2. Soldagem

A maior parte dos desenvolvimentos de tubos de aços ferríticos são destinados às aplicações de secções espessas⁹. Desta forma, a montagem das tubulações de condução em campo, só se torna possível no caso da utilização de soldagem multipasse.

Introduzidos no final do século XIX, os processos a arco elétrico permanecem como a técnica de soldagem mais usada. 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 7000°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)¹⁴.

Em geral, as soldagens de montagem dos componentes de caldeira, em campo ou mesmo na maior parte das fábricas, são realizadas de forma manual. Isto se deve à dificuldade de se transportar e utilizar processos automatizados ou semiautomáticos (Gas Metal Arc Welding – GMAW), principalmente devido a fatores ambientais como vento e poeira.

Desta forma, os processos mais indicados para a soldagem destes componentes em campo são o processo Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) também conhecido como TIG, e o processo Shielded Metal Arc Welding (SMAW) também conhecido como eletrodo revestido.

2.2.1. Processo de Soldagem GTAW (TIG)

A soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (GTAW) é um processo no qual a união de metais é produzida pelo aquecimento até a fusão dos materiais a serem unidos através de um arco elétrico estabelecido entre o eletrodo de tungstênio não consumível e as peças a serem unidas. Neste processo o arco elétrico, assim como a poça de fusão, é protegido pela purga de um gás inerte ou uma mistura de gases inertes, onde se pode ou não adicionar um metal de adição¹⁵ O processo de soldagem TIG está esquematizado na Figura 2 a seguir.

Figura 2: Esquema de soldagem GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) – TIG
 Fonte: Traduzido de Wikipédia²⁵.

Devido ao excelente controle de energia transferida para peça através do controle independente da fonte de calor e da adição de metal de enchimento, o processo é bastante adequado à soldagem de peças de pequena espessura. Além disso, a eficiente proteção contra contaminação permite a soldagem de materiais de difícil soldabilidade com ótimos resultados¹⁵.

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. No entanto, o processo é relativamente caro, lento e de baixa produtividade¹⁵.

Este conjunto de características é aproveitado no passe de raiz da soldagem de tubulações P22, pois permite um melhor acabamento da raiz da solda, importante para uma melhor eficiência do fluxo de fluidos que são transportados no interior destas tubulações.

2.2.2. Processo de Soldagem SMAW (Eletrodo Revestido)

A soldagem a arco com eletrodos revestidos (SMAW) é um processo no qual a união dos metais é realizada pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo (consumível) e a peça soldada.

Neste processo, o eletrodo composto pela alma metálica que conduz corrente elétrica e o revestimento são consumidos para formar o metal de adição, desta forma elementos de liga podem ser adicionados ao metal da alma do eletrodo quando estes estiverem adicionados no revestimento (que pode ter inúmeras

formulações), conferindo uma grande versatilidade ao processo, e barateando custos de produção do eletrodo consumível¹⁵.

A mistura do metal utilizado para a fabricação da alma metálica do eletrodo e o seu revestimento produz o metal de adição com composição adequada, uma camada de escória e diversos gases, estes últimos, exercem função de proteção do cordão de solda contra a ação da atmosfera em elevadas temperaturas quando a velocidade das reações químicas é maior, prevenindo a degradação do cordão de solda.

As principais funções dos revestimentos são:

- Proteção do metal de solda;
- Estabilização do arco;
- Adições de elementos de liga no metal de adição;
- Direcionar o arco elétrico;
- Gerar escória (proteção adicional a solda, purifica e absorve impurezas, reduzir a velocidade de resfriamento do metal de adição);
- Define as posições possíveis para soldagem;
- Controle da integridade do metal de adição (controle de porosidade e gases aprisionados);
- Propriedades mecânicas do metal de adição e
- Isolamento da alma do eletrodo.

O processo de soldagem SMAW está esquematizado na Figura 3 a seguir:

Figura 3: Esquema de Soldagem SMAW (Shielded Metal Arc Welding) – Eletrodo Revestido
Fonte: Blog Tim Engenharia – Soldagem Industrial²⁶.

O processo de soldagem com eletrodo revestido foi o principal processo de soldagem usado industrialmente até os anos 60, desde então sua importância vem decrescendo principalmente em países mais desenvolvidos¹⁵.

As principais limitações do processo SMAW são:

- Baixa produtividade quando comparado com outros processos como: Gas Metal Arc Welding (GMAW) – Metal Inert Gás (MIG) e Metal Active Gás (MAG); Submerged Arc Welding (SAW) – Arco Submerso.
- Baixo tempo de ocupação do soldador (em geral 40%) e
- Altamente dependente da habilidade e técnica do soldador
- Alta necessidade de cuidados com consumíveis (principalmente os hidroscópicos).
- Grande volume de gases e fumos gerados que podem ser prejudiciais à saúde.

No entanto, o processo pode ser facilmente aplicado em campo, o que é extremamente necessário quando se fala em montagem e/ou reparos de equipamentos como o caso das caldeiras utilizadas na indústria sucroalcooleira, fazendo com que o processo SMAW seja primordial para o setor.

O revestimento do eletrodo utilizado no processo de soldagem SMAW tem grande importância nas propriedades da junta soldada, a composição do revestimento deve ser definida de acordo com o conjunto de exigências da solda. Como consequência, existem diversos tipos de eletrodos que requerem cuidados operacionais específicos de acordo com a composição do seu revestimento. Os principais tipos de eletrodos revestidos são:

- Revestimentos oxidantes: constituído de óxido de ferro e manganês, produzem escória oxidante fácil de destacar e aparência boa do cordão de solda, no entanto não produz soldas com boas propriedades mecânicas.
- Revestimentos ácidos: constituído de óxido de ferro, manganês e sílica, produzem escória ácida porosa de fácil remoção e boa aparência do cordão, no entanto o cordão é susceptível à formação de trincas de solifificação.
- Revestimento rutilico: possui grandes quantidades de rutilo (TiO_2), produzem escória densa e fácil de se destacar, não requer muito

controle no manuseio, no entanto os cordões são susceptíveis à trincas a quente.

- Revestimentos básicos: contem grande quantidade de carbonato de cálcio e fluorita para o controle da basicidade da escória que além de proteger o metal de adição, tem papel dessulfurante que reduz a formação de trincas de solidificação. São altamente hidrocópicos e por isso requerem cuidados especiais de manuseio. Se forem mantidos ressecados em estufas durante o seu manuseio, produz soldas com baixo teor de hidrogênio. Este tipo de eletrodo é indicado para soldas de alta responsabilidade mecânica.
- Revestimentos celulósicos: possui grande quantidade de material orgânico que produz pouca escória e grande quantidade de gases para proteção do metal de solda. Estes eletrodos apresentam maior humidade e não podem ser ressecados, o que o torna susceptível à fragilização por hidrogênio.

A classificação dos eletrodos segundo a American Welding Society (AWS) utiliza uma série de letras e números que fornece informações a respeito dos eletrodos:

AWS E XXYY – CC

E = eletrodo para soldagem a arco

XX = resistência mínima do metal de adição em Ksi

YY = indica a posição de soldagem, tipo de revestimento e tipo de corrente

CC = complemento da identificação que pode indicar: ductilidade, teor de hidrogênio difundível, requisitos de absorção de humidade, código de composição química em eletrodos baixa liga.

2.2.3. Ciclo Térmico e Microestrutura das Regiões Soldadas

A aplicação de uma fonte de calor (eletrodo) sob um aço gera variações de temperatura relacionadas com o tempo em cada um dos pontos da peça²⁷. O primeiro modelo matemático para a transferência de calor através do eletrodo para a peça foi proposto por Rosenthal onde o campo de temperaturas se mantém constante. A solução do modelo matemático proposto por Rosenthal está

apresentada na Figura 4, que mostra a distribuição de temperatura em torno da fonte que se move²⁸.

Figura 4: Perfil de temperatura ao longo de uma junta soldada. As linhas representam o ciclo térmico e o corte y-y' mostra as temperaturas máximas atingidas pelos pontos em relação a linha central da solda. Fonte: COLPAERT²⁷.

Durante o processo de soldagem o calor é fornecido pelo eletrodo e dissipado principalmente por condução pela peça. A quantidade de calor fornecido está relacionada com a energia de soldagem (aporte térmico ou heat input) que na soldagem a arco pode ser expressa por:

$$H = \frac{\eta * V * I}{v} \quad \text{Eq.1}$$

Onde:

H = energia de soldagem;

η = eficiência térmica do processo;

V = Tensão no arco(V);

I = Corrente (A) e

v = Velocidade de soldagem (mm/s).

As temperaturas nas adjacências da região soldada atingem temperaturas próximas da temperatura de fusão na interface metal base/metal de adição e regridem gradativamente à medida que a distância do cordão de solda aumenta. Este fenômeno, no caso dos aços-C, gera regiões que podem ultrapassar a temperatura de fusão e consequentemente ultrapassa a temperatura de transformação austenítica nas proximidades do cordão, passando por uma região de transformação intermediária (parcialmente transformada) e uma região que não atinge a temperatura de transformação de fase (Figura 5). Em outras palavras, o ciclo térmico de soldagem irá fazer com que cada ponto do material nos arredores da junta experimente uma variação de temperatura diferente.

Figura 5: Representação das regiões da zona termicamente afetada (esquerda) a partir da distribuição de temperaturas indicadas na Figura 4 corte y-y', para um aço com 0,15% de carbono representado pelo diagrama de equilíbrio (direita). Fote: COLPAERT ²⁷

Os diferentes ciclos térmicos sofridos nas regiões afetadas pelo calor de soldagem, também conhecida por Zona Termicamente Afetada (ZTA), são semelhantes aos ciclos térmicos aplicados nos tratamentos térmicos dos aços, e que como comentado no item 2.1.3, a adição de Cr e Mo como elementos de liga no P22 aumenta a temperabilidade e favorecem a formação de microestruturas mais duras

possíveis fases e microestruturas para este material após o resfriamento são: Ferrita (F), Perlita (P), Bainita (Zw), Martensita (M), Ferrita e carbonetos precipitados (K) e eutetóide não lamelar (F+K) em quantidades que irão depender da taxa de resfriamento e podem ser estimadas pela Figura 7 e Tabela 2 a seguir que relaciona a dureza HV com o percentual de cada constituinte.

Figura 7: Microestruturas obtidas para um aço similar ao ASTM P22 em taxas de resfriamento decrescentes (a) resfriamento mais rápido (d) resfriamento mais lento. Fonte: Atlas de tratamento térmico³⁴.

Tabela 2: Relação entre as microestruturas e a dureza HV obtidas em diferentes graus de resfriamento (modificada de: Atlas de tratamento térmico³⁴).

	a	b	c	d
Ferrita (F)..... in%	-	-	-	-
Ferrita e Carbonetos precipitados (K)..... in%	-	-	67	83
Eutetóide não Lamelar F + K..... in%	-	-	10	17
Perlita (P)..... in%	-	-		
Bainita (Zw)..... in%	1	70	20	-
Martensita (M)..... in%	99	30	3	-
Dureza in HV	416	371	185	164

2.2.3.1. Soldagem Multipasse

A soldagem de materiais com espessuras superiores à penetração de um único passe de solda pode ser realizada por processos multipasse onde passes de solda subsequentes fazem a união de toda a espessura da peça a ser soldada.

O primeiro passe de união de materiais com grande espessura é chamado de raiz e os passes subsequentes são chamados de passes de enchimento. Quando se utiliza técnicas de soldagem que geram escória, como a técnica de soldagem por eletrodo revestido (SMAW), é necessário realizar uma boa limpeza, seguida de esmerilhamento do cordão antes de se realizar um novo passe de enchimento.

A limpeza da junta previne a formação de inclusões de escória macroscópicas no interior da solda, que é um fator agravante para a resistência mecânica da junta, visto que devido à baixa aderência na interface metal-escória, estas inclusões atuam como uma descontinuidade no metal.

A aplicação de passes de solda subsequentes em uma soldagem multipasse gera um novo ciclo térmico que provoca uma nova transformação da microestrutura da ZTA formada pelo passe anterior “cruzando” as regiões de aquecimento (Figura 8). Com isso, parte da microestrutura frágil (martensita) gerada durante a soldagem será reaquecida, provocando o revenimento ou mesmo a reaustenitização da mesma.

Figura 8: Regiões de transformação devido ao calor de soldagem em juntas multipasse. Fonte COLPAERT²⁷

2.2.3.2. Pré-Aquecimento

O pré-aquecimento das peças antes da soldagem é utilizado para reduzir a diferença de temperatura da junta soldada e da peça. A menor diferença de temperaturas entre o cordão e o material base reduz a taxa de resfriamento, o que para os aços, previne a formação de microestruturas de alta dureza na ZTA (geralmente mais frágeis e com menor tenacidade), além de reduzir tensões residuais e aumentar a difusão de hidrogênio evitando a fragilização por hidrogênio.

O aumento do volume de material facilita a transmissão de calor por condução e por isso, reduzir o gradiente de temperatura por meio do processo de pré-

aquecimento se torna mais crítico à medida que o módulo das partes a serem soldadas (espessura) aumenta, como é o caso das tubulações de grande espessura envolvidas na fabricação de caldeiras e reatores de alta responsabilidade mecânica.

Em geral, o pré-aquecimento é realizado em uma faixa que varia de 6 a 12 vezes a espessura da peça, e no caso de operações de soldagem em campo, este aquecimento normalmente é realizado com a utilização de um maçarico tipo “chuveiro” para espalhar o calor fornecido.

2.2.3.3. Tratamento térmico pós-soldagem em campo

Nas operações de soldagem os materiais são aquecidos até o seu ponto de fusão. As regiões aquecidas sofrem dilatação que é limitada pelas regiões adjacentes submetidas a temperaturas menores o que causa deformações elásticas e plásticas na região da solda. O processo de contração da zona fundida durante a solidificação também é uma fonte de deformações da região soldada.

Como consequência dos processos de dilatação e contração, as juntas soldadas desenvolvem tensões residuais internas e distorções não uniformes que podem afetar o desempenho de uma peça soldada. Tensões residuais de compressão tendem a contribuir com a resistência a nucleação de trincas por fadiga, por outro lado, tensões residuais de tração, podem ter efeito negativo no comportamento em fadiga do material.

A existência de tensões residuais de tração excessivas em uma junta soldada pode levar à fratura frágil da região soldada, o que é uma situação indesejável, principalmente em equipamentos de alta responsabilidade mecânica.

Segundo Okumura e Taniguchi³¹ após a soldagem, as tensões residuais podem ser aliviadas por métodos térmicos ou mecânicos como: Martelamento, Encruamento, Vibração, Recozimento para alívio de tensões, recozimento a alta temperatura e Alívio de tensões a baixas temperaturas.

Dentre os métodos citados, os mais efetivos são os métodos térmicos de recozimento em altas temperaturas (900 a 950°C) e revenimento para alívio de tensões (600 a 700°C). Nos aços ligados onde ocorre formação de microestruturas duras e frágeis (martensita), o processo térmico tende a provocar uma melhora da tenacidade, o que é essencial para viabilizar a soldagem destes aços.

Para viabilizar a realização de tratamentos térmicos das juntas soldadas em campo, é necessário utilizar um conjunto de resistências elétricas envolvidas em uma cobertura de cerâmica, termopares e mantas de isolamento térmico (Figura 9).

Figura 9: Esquema de tratamento térmico de uma tubulação por aquecimento resistivo (técnica utilizada em campo). Fonte: GIMENES³²

A realização dos tratamentos térmicos de grandes peças em campo não é tão eficaz quanto os tratamentos realizados em fornos específicos. No caso de tubulações, por melhor que seja o isolamento da região a ser tratada, não é possível isolar a superfície interna do tubo, além disso, é inviável fazer o isolamento de todo o comprimento da tubulação durante o tratamento, o que faz com que os tratamentos térmicos realizados em campo, sejam menos controlados e consequentemente mais irregulares quando comparados com os tratamentos realizados em fornos.

2.3. Mecânica da Fratura

2.3.1. Evolução da Mecânica da Fratura

A mecânica da fratura é a área da engenharia que estuda a evolução da falha de corpos trincados. A motivação para o desenvolvimento dos conceitos da mecânica da fratura foi a observação da ocorrência de falhas em carregamentos muito menores do que os previstos em projeto. Na época, a solução adotada pelos

engenheiros foi utilizar fatores de segurança de projeto muito elevados.

Os primeiros conceitos da mecânica da fratura foram publicados em 1920 por Griffith³⁸, que relacionou a tensão de fratura com o tamanho de uma trinca existente em materiais frágeis utilizando a primeira lei da termodinâmica para a propagação instável de uma trinca através de um balanço de energia simples¹.

O modelo de Griffith conseguiu prever corretamente a relação entre a força e o tamanho da trinca para vidros, no entanto, ao ser aplicado em materiais em condições dúcteis, o modelo não obteve o mesmo sucesso. Tal modelo foi baseado apenas na energia superficial do material e não considerava a energia absorvida durante a propagação da falha, ou seja, o modelo de Griffith só era aplicado a metais cuja fratura fosse virtualmente frágil.

A mecânica da fratura aplicada aos materiais frágeis é chamada de mecânica da fratura linear elástica (MFLE), pois a fratura do material se dá ainda no regime elástico.

A mecânica da fratura só voltou a se desenvolver após os naufrágios dos navios Liberty utilizados na segunda guerra, quando tais navios se partiam ao meio, principalmente ao navegar em águas geladas. As falhas foram atribuídas à combinação de dois fatores, as soldas realizadas por mão de obra pouco qualificada e trincas iniciadas em concentradores de tensões ao longo do casco.

Após a segunda guerra Irwin³⁹ introduziu os conceitos de taxa de alívio de energia para poder aplicar os conceitos de Inglis e Griffith a materiais mais dúcteis como os metais.

Entre 1960 e 1980 os desenvolvimentos da mecânica da fratura voltaram se para a plasticidade da ponta da trinca. Neste período foram desenvolvidas as técnicas de CTOD (Crack Tip Open Displacement), onde Wells⁴⁰ propôs que o deslocamento da ponta da trinca antes da propagação era um critério alternativo quando uma plasticidade significativa ocorresse antes da falha, e o critério integral J proposto por Rice⁴¹ que utilizou o cálculo da integral de linha em torno da trinca para calcular a energia na ponta da trinca.

A proposta de adaptar os conceitos da MFLE para materiais dúcteis considerando a deformação na ponta da trinca ou o critério integral J, deram origem ao chamado de Mecânica da Fratura Elasto-plástica (MFEP).

Wells fazia parte da associação inglesa de solda, e por isso a técnica CTOD foi

extensivamente utilizada em materiais soldados, primeiramente nas plantas de geração de energia nuclear e na indústria de produção de óleo e gás.

2.3.2. Fator intensidade de tensão (K)

Cada modo de carregamento produz um efeito singular na ponta da trinca que depende do modo de carregamento¹. O fator de intensidade de tensão K geralmente é seguido do modo de carregamento subscrito, podendo ser: K_I , K_{II} ou K_{III} , de acordo com o modo de carregamento (Figura 10).

Figura 10: Os três modos de carregamento que podem ser aplicados a uma trinca. Fonte: ANDERSON¹

O cálculo das tensões na ponta da trinca podem ser calculadas pelas expressões na Tabela 3¹

Tabela 3: Campo de tensões a frente da trinca para os modos I e II em um material isotropico linear elástico. Fonte: ANDERSON¹.

	Mode I	Mode II
σ_{xx}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]$	$-\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[2 + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]$
σ_{yy}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]$	$\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)$
τ_{xy}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)$	$\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]$
σ_{zz}	0 (Plane stress) $\nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ (Plane strain)	0 (Plane stress) $\nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ (Plane strain)
τ_{xz}, τ_{yz}	0	0

Note: ν is Poisson's ratio.

Considerando que o modo I representa um campo onde o ângulo () entre os planos das superfícies da trinca é igual a 0, as tensões nos planos X e Y são iguais e podem ser representadas por:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

K_I = Fator de intensidade de tensão no modo I

r = comprimento do defeito ou trinca.

O fator de intensidade de tensão define a amplitude da singularidade da ponta da trinca. Ou seja, a tensão perto da ponta da trinca aumento na proporção de K . Além disso, o fator de intensidade de tensão define as condições ponta da trinca, se K é conhecido, é possível resolver o problema para todos os componentes de tensão, deformação, e deslocamento em função de r e θ . Este parâmetro descreve de condições ponta da trinca é um dos conceitos mais importantes da mecânica da fratura.

2.3.3. Crack Tip Open Displacement (CTOD)

A tentativa de medir o K_{IC} de aços estrututais, Wells⁴⁰ verificou que estes metais eram muito tenazes para serem caracterizados pela Mecânica da Fratura Elástica Linear. A alta tenacidade é uma característica desejada pelos engenheiros,

no entanto ele percebeu que a mecânica da fratura desenvolvida até o momento (elástica linear) não podia ser aplicada aos aços, uma das classes de materiais mais importantes da engenharia.

Wells percebeu então, que os corpos de prova haviam sofrido deformações plásticas que arredondaram a ponta da trinca que era inicialmente afiada, aumentando a tenacidade do material (Figura 13), o que levou Wells a propor o conceito de deformação da ponta da trinca como uma medida de tenacidade de materiais dúcteis.

A abertura da ponta da trinca para materiais isotrópicos solicitados no modo I pode ser definida pela seguinte equação:

$$u_y = \frac{k+1}{2} K_I \sqrt{\frac{r_y}{2\pi}} \quad \text{Eq 3}$$

Onde:

u_y = distância do centro da trinca até o plano de abertura (Figura 11)

K_I = Fator de intensidade de tensão no modo I

r_y = raio deformado da ponta da trinca na região “elástica” (não considera a redistribuição de cargas ao atingir o limite de escoamento, Figura 12).

μ = Módulo de cisalhamento

k = $3 - 4 \nu$ p/ estado plano de deformação, ou $(3 - \nu)/(1 + \nu)$ p/ estado plano de tensões

ν = coeficiente de Poisson

Figura 11: Estimativa de CTOD pela deslocamento efetivo da trinca pela correção plástica de Irwin.
Fonte: ANDERSON¹

Figura 12: Estimativa de do raio plástico r_y e r_p considerando a redistribuição de tensões. Fonte: ANDERSON¹

Pela aproximação da deformação na ponta da trinca de Irwin³⁹ o raio de deformação na ponta da trinca r_y é dado por:

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_Y} \right)^2 \quad \text{Eq. 4}$$

K_I = Fator de intensidade de tensão no modo I

σ_Y = Tensão de escoamento

Substituindo a Eq.4 em Eq.3 temos a definição do CTOD por:

$$\delta = 2u_y = \frac{4}{\pi} \frac{K_I^2}{\sigma_Y E} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

δ = abertura da ponta da trinca (CTOD)

K_I = Fator de intensidade de tensão no modo I

E = Módulo de elasticidade do material.

σ_Y = Tensão de escoamento.

Figura 13: Abertura da ponta da trinca (CTOD). um trinca inicialmente aguda com a ponta arredondada até um finito. ANDERSON¹

O modelo da faixa de escoamento é uma forma alternativa de analisar CTOD. O tamanho da faixa de escoamento é definido pela tensão requerida na ponta da trinca, CTOD pode ser definido como a abertura da ponta da trinca no final da zona de escoamento (Figura 14).

Figura 14: Estimativa do CTOD a partir do modelo da zona de escoamento. ANDERSON¹

A solução do modelo da zona de escoamento chega na seguinte relação:

$$\delta = \frac{K_I^2}{m_Y E} \quad \text{Eq.6}$$

Dentre as definições alternativas de CTOD, as mais comuns são o deslocamento na trinca original e o deslocamento no ponto de intercepção do ângulo de 90° com os flancos da trinca. Um detalhe interessante é que quando a região de arredondamento é um semi-círculo, as duas definições mais usadas se equivalem (Figura 15).

Figura 15: Definições de CTOD. a) deslocamento na ponta da trinca original. b) deslocamento da interseção de um vértice de 90° com os flancos da trinca.

A maioria das medições de CTOD em laboratório é realizada com corpos de prova de flexão em três pontos do tipo Single Edge Notch Bend (SEN(B)). Nestes corpos de prova, quando a trinca é aberta, o corpo de prova sofre um movimento de rotação plástica num ponto de giro dentro da região $(W-a)$ que deve ser levado em conta no cálculo de CTOD (Figura 16).

Figura 16: Modelo “ponto de giro” de medição de CTOD em corpo de prova de flexão em três pontos Single Edge Notch Bend (SEN(B)). Fonte: ANDERSON¹.

Através da semelhança de triângulos, temos:

$$\frac{\delta}{r(W-a)} = \frac{V}{r(W-a)+a} \quad \text{ou} \quad \delta = \frac{r(W-a)V}{r(W-a)+a} \quad \text{Eq.7}$$

O modelo descrito pela Eq.6 sozinho, não é acurado quando a deformação é primeiramente elástica. Desta forma os métodos padronizados para calculo de CTOD em corpos de prova de flexão em três pontos, considera o modelo “ponto de giro” modificado. O deslocamento pode ser separado em componentes elástico e plástico pela construção de uma linha paralela à linha de carregamento elástico linear (Figura 17).

Figura 17: Determinação do componente plástico da abertura da ponta da trinca. Fonte: ANDERSON¹.

A partir desta observação, DAWES⁴³ propôs uma expressão que combinasse as equações 6 e 7 para o calculo de CTOD de corpos de prova de flexão em três pontos:

$$\delta = \delta_e + \delta_p = \frac{K_I^2}{m_Y E} + \frac{r_p(W-a)V_p}{r_p(W-a)+a} \quad \text{Eq.8}$$

Onde: “e” e “p” denotam respectivamente os componentes elástico e plástico. O fator de rotação plástico r_p , é considerado 0,4 pela norma BS 7448 e 0,44 pela norma ASTM E 1280.

3. Materiais e Métodos

A seguir são listados todos os materiais e métodos utilizados para a confecção das amostras e espécimes para a realização dos trabalhos experimentais desta dissertação.

3.1. Materiais

Utilizou-se 6 tubos de material ASTM A 355 Grade P22 conforme composição química da Tabela 1 do item 2.1.3 desta dissertação, com 304,8mm de diâmetro (12in) com espessura de parede de 21mm e 250mm de comprimento soldados de 2 em 2, dando origem à 3 amostras distintas sendo:

- Tubo 1 – Foi soldado seguindo o procedimento de soldagem, com pré aquecimento, controle de temperaturas de interpasse, aporte térmico controlado e tratamento pós soldagem.
- Tubo 2 – Foi soldado seguindo as especificações de aporte térmico, no entanto não foi realizado nem o pré aquecimento, nem controle de temperatura de interpasse, nem tratamento pós soldagem.
- Tubo 3 – Foi soldado sem qualquer especificação de aporte térmico, tratamento térmico e temperatura de interpasse, utilizando apenas o consumível especificado pelo procedimento.

As soldas foram realizada seguindo o procedimento especificado pela própria empresa, EPS 56/1rev1 de 2006 (ANEXO 1), que forneceu os tubos e que trabalha com o material em questão para a construção dos vasos de pressão e caldeiras, que são produtos de seu portfólio.

Para a união é utilizado um chanfro com ângulo em V a 60° com abertura de 6mm conforme a Figura 18 a seguir.

Figura 18: Perfil do bisel utilizado para soldagem das amostras.

A soldagem foi realizada em múltiplos passes, onde a raiz foi soldada pelo processo GTAW com metal de adição com composição química de acordo com a especificação ASME SFA 5.28 ER90S-B3³⁶ e o enchimento foi soldado pelo processo SMAW com eletrodo com composição ASME SFA 5.5 E9018-B3³⁵, ambos produzem metal de adição com composição química compatível com o metal base, aço baixa liga com 2,25% de Cr e 1% de Mo.

O eletrodo revestido ASME SFA 5.5 E9018-B3 tem revestimento tipo “baixo hidrogênio com potássio e pó de ferro”, este tipo de eletrodo precisa ser ressecado, e mantido em cochicho aquecido para manter o eletrodo seco (Figura 19).

Figura 19: Soldagem de enchimento com eletrodo E9018-B3 armazenado no cochicho aquecido (seta).

Todo o processo foi realizado por soldador devidamente qualificado para soldagem com processo GTAW e SMAW em todas as posições (6G) conforme Registro da Qualificação de Desempenho de Soldadores (RQS) (ANEXO 2), seguindo uma Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) também qualificada. (ANEXO 1)

3.2. Confecção das Amostras

Inicialmente todos os seis segmentos de tubo ASTM P22 foram preparados com chanfro de 30° (Figura 20) para a preparação do bisel com 60°, a limpeza foi realizada com ponteira abrasiva adequada para excluir sujidades momentos antes da soldagem (Figura 21).

Figura 20: chanfro de 30° para a preparação do bisel.

Figura 21: Processo de preparo do chanfro antes da soldagem.

Após o preparo dos chanfros, os tubos foram unidos de dois em dois, espaçados por 6mm (abertura para raiz). O espaçamento foi realizado através de um gabarito com 6mm de espessura como mostra a Figura 22 a seguir.

Figura 22: montagem do gabarito entre dois segmentos de tubulação.

Para a retirada do gabarito foram ponteados quatro guias na região externada tubulação (Figura 23), que foram retiradas uma a uma após a soldagem do primeiro filete de raiz (Figura 24), com o processo GTAW (TIG) com metal de adição ASME SFA 5.28 ER90S-B3.

Figura 23: Seguintos de tubulação com os guias soldadas antes da retirada do gabarito de 6mm.

Figura 24: Solda de raiz com processo GTAW e retirada dos guias.

3.2.1. Processo de Soldagem

Foram realizados dois filetes com o processo GTAW sendo raiz e reforço da raiz, em seguida, todos os demais passes de enchimento foram realizados com o processo SMAW (eletrodo revestido) utilizando eletrodo ASME SFA 5.5 E 9018-B3.

As soldagens das amostras foram realizadas através do rotacionamento dos tubos (Figura 25) que não ocorre na prática, no entanto foi definido realizar ao longo do tubo na mesma direção para reduzir o número de variáveis envolvidas no estudo, o rotacionamento dos tubos durante a soldagem gera uma amostra com propriedades e característica mais homogêneas, visto que a posição de soldagem é aproximadamente a mesma ao longo de todos os passes. Esta particularidade permite com que o fator “posição de soldagem” não tenha influência nos resultados das análises.

Figura 25: Soldagem de preenchimento das amostras através do rotacionamento dos tubos.

As temperaturas de pré-aquecimento (Tubo 1) e temperatura de interpasse de todas as amostras foram monitoradas através de lápis térmicos e pirômetro ótico (Figura 26 a e b).

Figura 26: a) Lápis de solda e b) pirômetro ótico infravermelho portátil, equipamentos utilizados para o controle e medição de temperatura durante o processo.

Embora os requisitos de temperatura não tenham sido controlados nas amostras 02 e 03, a temperatura foi medida por pirômetro ótico, Figura 26 b, pois o ciclo térmico (aquecimento e resfriamento), mesmo que aleatório, é o parâmetro que influencia nas microestruturas e propriedades mecânicas das ZTAs das amostras, que é um dos alvos deste estudo.

A medição da velocidade de soldagem foi realizada através de uma trena e um cronômetro, Figuras 27a e 27b, onde foi medido o comprimento total do passe de solda dividido pelo tempo total de cada passe de solda.

(a)

(b)

Figura 27: Cronômetro (a) e trena (b) utilizados para as medições de velocidade de soldagem.

Para os controles de tensão e corrente elétricas durante a soldagem foi utilizado o display da própria máquina de solda, Figura 28.

Figura 28: Máquina de solda utilizada para realizar a soldagem de todas as amostras.

Optou-se por utilizar o lápis térmico para monitoramento da amostra Tubo1, pois este método é o utilizado em campo, desta forma, os resultados obtidos para esta amostra seriam mais próximos das propriedades das peças que são utilizadas em campo (Figura 29).

Figura 29: monitoramento da temperatura de interpasse com lápis térmico para amostra do Tubo 1.

Para o controle da temperatura de interpasse, utilizou-se um maçarico com “chuveiro” como mostra a Figura 30 quando a temperatura estava abaixo do permitido, e quando a temperatura estava acima do permitido o soldador esperou o resfriamento da amostra ao ar. Vale salientar que toda a soldagem foi realizada dentro de uma sala protegida de intempéries que podem ocorrer em campo.

Figura 30: Pré-aquecimento realizado através de maçarico com chuveiro espalhador da chama na amostra de Tubo 1.

Após cada um dos passes, utilizou-se um martelo “picão” para retirada grosseira da escória e um disco de desbaste para terminar de realizar a limpeza e preparo antes do próximo passe de solda para evitar defeitos nas soldas (Figura 31).

Figura 31: Processo de limpeza da escória realizada entre os passes de enchimento.

Após o término do processo de enchimento foi dado um passe de acabamento por filetes como mostra a Figura 32 após o término de todo o procedimento.

Figura 32: Amostra Tubo 1 após os passes de acabamento.

3.2.2. Tratamento pós-soldagem da Amostra Tubo1.

O tratamento térmico pós-soldagem foi realizado de acordo com o procedimento elaborado pela própria empresa que forneceu as amostras, e seguiu o mesmo processo aplicado nas soldas realizadas em campo, através de equipamento de tratamento térmico portátil com aquecimento por indução controlado por termopares instalados na amostra (Figura 33), mantidos na temperatura de

tratamento com auxílio de manta térmica (Figura 34).

Figura 33: Instalação dos indutores e termopares na amostra Tubo 1.

Figura 34: Amostra Tubo 1 após preparada para a realização do tratamento térmico pós-soldagem.

O aquecimento foi realizado a uma taxa de $200^{\circ}\text{C}/\text{h}$ até atingir a faixa de temperaturas entre $675^{\circ}\text{C} \sim 700^{\circ}\text{C}$ (temperatura de encharque). O tubo foi mantido na temperatura de encharque por 71 minutos e então resfriada lentamente até a temperatura ambiente a uma taxa máxima $260^{\circ}\text{C}/\text{h}$, os dados que foram captados pelos quatro termopares instalados na amostra são apresentados no gráfico da Figura 35.

Figura 35: Gráfico do ciclo térmico do tratamento térmico pós-soldagem retirado do registrador acoplado a máquina de tratamento térmico portátil.

3.3. Retirada de espécimes e corpos de prova

As análises metalográficas e perfil de microdureza das juntas soldadas foram realizadas em um dos seguimentos do perfil de cada uma das soldas do tubo 1, 2 e 3, utilizando como referência a superfície externa da solda, que é onde as trincas geralmente ocorrem durante o serviço.

Após os ensaios de tenacidade a fratura pela metodologia CTOD, foram analisadas as microestruturas de cada um dos corpos de prova na região da pré-trinca, para conhecer a microestrutura que foi ensaiada, visto a complexidade de microestruturas das juntas soldadas em múltiplos passes.

Para os ensaios de dobramento lateral foram realizados em dois corpos de prova de cada tubo, sendo retirados em aproximadamente 180° do diâmetro do tubo (lados opostos da amostra).

Para os ensaios de tração foram retirados três corpos de prova a cada 120° (A, B e C) na região da solda para avaliar o procedimento de soldagem. Da mesma forma os corpos de prova para os ensaios de tenacidade a fratura e impacto charpy também foram retirados três corpos de prova a cada 120° (A, B e C) de cada uma das regiões sendo: Material Base (MB), Zona termicamente afetada (ZTA) e Metal de Adição (MA), para avaliar as principais regiões das juntas soldadas. As orientações dos entalhes seguem o esquema da Figura 36 a seguir.

Figura 36: Esquema de orientação dos entalhes dos corpos de prova de impacto Charpy e tenacidade a fratura CTOD em relação ao comprimento do tubo.

O ponto de referência para retirada das amostras foi aleatório, pois devido ao processo de rotacionamento dos tubos durante a soldagem, não se espera influências devido à posição de retirada de amostras.

3.4. Análise Química

As análises químicas foram realizadas no material base de cada amostra e nos respectivos metais de adição, usando espectrômetro de emissão ótica SpectroMAXx (Figura 37).

Também foram realizadas análises semi-quantitativas e qualitativas com auxílio de MEV/EDS para verificar o gradiente de composição química entre o metal de adição e o metal base, além de verificar os elementos presentes das inclusões não metálicas encontradas.

Figura 37: Espectrômetro de emissão ótica SpectroMAXx utilizado para as análises químicas.

3.5. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados em espécimes retirados das regiões soldadas de acordo com o previsto para qualificação dos procedimentos de soldagem previstos pelo ASME IX seguido orientação do QW-152 e QW 153¹⁶ utilizada como referência para construção de vasos de pressão.

Os corpos de prova foram preparados segundo orientação do ASME IX QW-462.1(d)¹⁶ espécime (a) conforme mostrado na Figura 38, onde a região da solda deve ser posicionada bem ao centro da seção reduzida do corpo de prova. A seção reduzida do corpo de prova deve possuir um comprimento de 2 vezes o seu diâmetro além da região soldada.

Figura 38: Recomendação ASME IX para preparação de espécimes para ensaio de tração de juntas soldadas. Fonte: ASME IX QW-462-1(d)¹⁶.

Os ensaios de tração, bem como a propagação das pré-trincas e os ensaios de tenacidade à fratura, foram realizados na máquina de ensaios universal hidráulica MTS (Figura 39).

Figura 39: Máquina de ensaios mecânicos universal hidráulica MTS.

3.6. Ensaio de Dobramento Guiado

O ensaio de dobramento guiado de juntas soldadas consiste em uma variação do ensaio de flexão em três pontos, onde um corpo de prova com solda é alinhado com um cutelo que dobra o centro do corpo de prova até o ângulo especificado, sem preocupação com a carga de ensaio.

Desta forma o ensaio de dobramento tem caráter qualitativo e serve para detectar defeitos metalúrgicos como poros e inclusões não metálicas, onde durante o dobramento, a deformação plástica tende a “abrir” os defeitos pré-existent.

O ensaio de dobramento em corpo de prova soldado pode ser dividido em: dobramento lateral, dobramento de face e dobramento de raiz (Figura 40)¹⁷ de acordo com a espessura da chapa ou tubo soldado.

Figura 40: esquema do ensaio de dobramento de corpos soldados.

Fonte: INFO SOLDA¹⁷

Os ensaios de dobramento guiado foram realizados de acordo com a orientação do código ASME seção IX QW-162 e QW 163, com os espécimes para dobramento lateral, preparados de acordo com a orientação QW-462.2 (Figura 41) do mesmo código.

Figura 41: Especificação de preparação de corpos de prova para dobramento lateral de soldas.
Fonte: ASME IX QW-462-2.

O dobramento foi realizado com dispositivo de dobramento de acordo com a especificação QW-466.1 ASME IX conforme a Figura 42.

Figura 42: Especificação do dispositivo para dobramento lateral.
Fonte: ASME IX QW-466-1.

Para a realização dos ensaios de dobramento, foi utilizada uma prensa hidráulica com capacidade de 20 toneladas, com dispositivo para dobramento lateral construído conforme ASME IX QW-466-1 como mostra a Figura 43.

Figura 43: Dispositivo utilizado para realização dos dobramentos laterais.

3.7. Ensaio de Impacto Charpy

Os espécimes de ensaio de Impacto Charpy foram confeccionados segundo orientação da norma ASTM E23¹⁸, e BS EN 875:1995¹⁹ para o posicionamento dos entalhes nas regiões soldadas.

As dimensões e entalhe seguiram as especificações Tipo A segundo a Figura 44 retirada da ASTM E23.

Figura 44: Desenho das dimensões dos espécimes utilizados para a realização dos ensaios de Impacto Charpy. Fonte: ASTM E23

Os corpos de prova para ensaio de impacto Charpy foram retirados na região da superfície externa dos tubos, com o entalhe orientado segundo a Figura 36 do item 3.3 nos pontos A, B e C espaçados em 120° (Figura 26 do item 3.3) em cada um dos tubos seguindo o mesmo padrão utilizado para a retirada dos CPs do ensaio de tenacidade à fratura CTOD. Foi retirado um CP de cada região da solda (Material Base, ZTA e Solda) de cada um dos pontos citados.

Os ensaios foram executados em condições de temperatura ambiente controlada de 25°C e as identificações de cada um dos corpos de prova seguiram o esquema da Tabela 4 a seguir.

Tabela 4: Identificação dos corpos de prova para ensaio de impacto Charpy.

		MB	ZTA	MA
Tubo 1	CP A	1A - MB	1A - ZTA	1A - MA
	CP B	1B - MB	1B - ZTA	1B - MA
	CP C	1C - MB	1C - ZTA	1C - MA
Tubo 2	CP A	2A - MB	2A - ZTA	2A - MA
	CP B	2B - MB	2B - ZTA	2B - MA
	CP C	2C - MB	2C - ZTA	2C - MA
Tubo 3	CP A	3A - MB	3A - ZTA	3A - MA
	CP B	3B - MB	3B - ZTA	3B - MA
	CP C	3C - MB	3C - ZTA	3C - MA

O percentual de deformação plástica das bordas deve ser determinado através da medição da fratura central “plana” (Flat Fracture) esquematizado pela Figura 45 a seguir.

Figura 45: Esquema de um corpo de prova de teste de impacto fraturado para a determinação da parcela dúctil da fratura. Fonte ASTM E23

Os valores da parcela de fratura dúctil podem ser calculados a partir da Tabela 5, onde a parcela de fratura dúctil está relacionada com as medições de espessura e largura da fratura.

Tabela 5: Tabela de calculo do percentual de deformação lateral (dúctil). Fonte ASTM E23.

NOTE 1—100 % shear is to be reported when either *A* or *B* is zero.

Dimension <i>B</i> , mm	Dimension <i>A</i> , mm																		
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10
1.0	99	98	98	97	96	96	95	94	94	93	92	92	91	91	90	89	89	88	88
1.5	98	97	98	95	94	93	92	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81
2.0	98	96	95	94	92	91	90	89	88	86	85	84	82	81	80	79	77	76	75
2.5	97	95	94	92	91	89	88	86	84	83	81	80	78	77	75	73	72	70	69
3.0	96	94	92	91	89	87	85	83	81	79	77	75	74	72	70	68	66	64	62
3.5	96	93	91	89	87	85	82	80	78	76	74	72	69	67	65	63	61	58	56
4.0	95	92	90	88	85	82	80	77	75	72	70	67	65	62	60	57	55	52	50
4.5	94	92	89	86	83	80	77	75	72	69	66	63	61	58	55	52	49	46	44
5.0	94	91	88	85	81	78	75	72	69	66	62	59	56	53	50	47	44	41	37
5.5	93	90	86	83	79	76	72	69	66	62	59	55	52	48	45	42	38	35	31
6.0	92	89	85	81	77	74	70	66	62	59	55	51	47	44	40	36	33	29	25
6.5	92	88	84	80	76	72	67	63	59	55	51	47	43	39	35	31	27	23	19
7.0	91	87	82	78	74	69	65	61	56	52	47	43	39	34	30	26	21	17	12
7.5	91	86	81	77	72	67	62	58	53	48	44	39	34	30	25	20	16	11	6
8.0	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0

3.8. Ensaio de Dureza Vickers

Os ensaios de dureza Vickers, foram realizados em um espécime de cada um dos Tubos 1, 2 e 3, para levantar o perfil de durezas próxima da superfície da solda. Para isso, realizou-se ensaios de dureza na região do material base, ZTA e metal de adição.

O procedimento foi baseado na norma Petrobras N133 revisão J²⁰, onde deve-se utilizar o método de medição de dureza Vickers com carga 10kgf (HV₁₀), para levantar o perfil de dureza como mostra a Figura 46.

Figura 46: Esquema de medições de dureza Vickers no perfil de juntas soldadas.
Fonte: Petrobras N133 revisão J

As medições foram realizadas a aproximadamente 1mm de profundidade em relação ao topo, onde o perfil de durezas foi obtido apenas topo das amostras, e que corresponde à região onde é realizado o ultimo passe, ou seja, corresponde à região que não sofre influência de passes de soldagem subsequente. Foram realizadas diversas medições espaçadas de 0,5 em 0,5 mm nas proximidades da ZTA, de 1,0 em 1,0mm no MA e bem distantes da solda (5,0 e, 5,0mm) no MB de cada umas das amostras.

Para manter um parâmetro de comparação, o centro da solda foi usado como referência para alinhamento das amostras na base milimétrica do microdurômetro. Em seguida, os valores foram plotados para que a diferença de durezas entre as amostras pudessem ser visualizadas em forma de curvas.

Além da curva levantada na superfície, foram realizadas medições de dureza Vickers a aproximadamente 10mm de profundidade, que corresponde à região ensaiada pelo CTOD, permitindo estimar os dados de tensão do material nas regiões ensaiadas a partir das Eq. 9 e 10.

Para a realização dos ensaios de dureza Vickers foi utilizado um microdurômetro de marca Zwick (Figura 47), com penetrador constituído de uma pirâmide de base quadrada de diamante, com ângulo de 136° e carga de 10 kgf (HV₁₀).

Figura 47: Microdurômetro Zwick utilizado para os ensaios de dureza Vickers.

3.9. Ensaio de tenacidade à fratura CTOD em corpos soldados

Os ensaios de tenacidade à fratura de corpos soldados foram realizados segundo as orientações das normas BS 7448 Part1 1991²¹, BS 7448 Part2 1997²² e pelo relatório de pesquisa “Recommended procedures for the crack tip open displacement (CTOD) Testing of Weldments – The Welding Institute”²³.

Uma das dificuldades antes da realização dos ensaios é determinar a tensão de escoamento da Zona Termicamente Afeta (ZTA) e do Material Base (MB), as bibliografias consultadas recomendam a estimativa da tensão através das equações:

- Material Base:

$$\sigma_{0,2} = 3,28 \cdot HV_{10} - 221 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Eq 9}^{22}$$

- Metal de Solda:

$$\sigma_{0,2} = 3,15 \cdot HV_{10} - 168 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Eq 10}^{23}$$

Desta forma, é possível estimar os valores de tensão para os cálculos de CTOD, quando não for possível realizar ensaios de tração específicos para cada região da solda (ZTA e/ou Metal de solda).

Para a realização de ensaio de tenacidade a fratura em juntas soldadas, a norma BS 7448 Part2 especifica corpos de prova do tipo Single Edge Notch Bend

(SEN(B) ou SE(B)), que podem ser retirado sobre diversas orientações segundo a Figura 48 retirada da norma.

Figura 48: Orientações de planos de trincas para espécimes de tenacidade a fratura soldados.
Fonte: BSi 7448 Part 2 1997²².

Embora não seja a orientação de maior tensão (considerando apenas a pressão interna dos tubos), optou-se por realizar os ensaios na direção “NQ”, que corresponde à orientação das trincas (alinhadas com o cordão de solda) comumente encontradas nas caldeiras e vasos de pressão confeccionados com aço CrMo, e que em geral apresentam defeitos metalúrgicos como poros, inclusões, microestrutura com grande percentual de martensita (não submetidos aos tratamentos de pré-aquecimento e alívio pós-soldagem).

3.9.1. Corpos de prova (CPs) de juntas soldadas Single Edge Notch Bend SE(B).

Os espécimes para o ensaio de tenacidade a fratura foram confeccionados a partir da orientação da norma BS 7448 Part2 de acordo com o especificado pela Figura 49, com $B=W$ (BXB). O ensaio poderia ter sido realizado no padrão ASTM utilizando a norma E 1820. Ambas as normas utilizam equações similares, diferindo apenas pelo fator de rotação plástica (r_p), definido em 0,4 pela BS e 0,44 pela ASTM. Outra diferença é o limite de carregamento máximo durante a propagação da pré-trinca. Por se tratar de uma técnica mais utilizada para juntas soldadas, inclusive com especificações voltadas exclusivamente para corpos soldados, a norma BS foi considerada mais representativa para análise.

Figura 49: Especificação de geometria para espécimes SE(B) para CTOD em soldas.
Fonte: BS 7448 Part 2 1997²².

A orientação e posição do entalhe na ZTA e Solda, foram definidas a partir das Figuras 50 e 51 sob orientação da norma BS 7448 Part2, especifica para condução de ensaios de tenacidade à fratura de juntas soldadas.

Figura 50: Especificação de orientação e posição de entalhe para a condução de ensaios de tenacidade à fratura CTOD na ZTA da junta soldada. Fonte: BS 7448 Part 2 1997²².

Figura 51: Posição do entalhe, segundo a orientação e geometria recomendada para confecção dos espécimes. Fonte: BS 7448 Part 2 1997²².

Para a etapa de pré-trinca do corpo de prova SE(B) devemos assumir que:

$$F_f = \frac{0.5 B b_0^2 \dagger_y}{S}$$

Para o corpo de prova SEN(B) devem-se utilizar as seguintes equações para os cálculos:

$$K_{(i)} = \left[\frac{F_i S}{(B B_N)^{1/2} W^{3/2}} \right] f(a_i / W)$$

Onde:

$$f(a_i / W) = \frac{3(a_i / W)^{1/2} [1,99 - (a_i / W)(1 - a_i / W) \times (2,15 - 3,93(a_i / W) + 2,7(a_i / W)^2)]}{2(1 + 2a_i / W)(1 - a_i / W)^{3/2}}$$

Calculo do CTOD:

$$u = \frac{K^2 (1 - \nu^2)}{2 \dagger_{ys} E} + \frac{r_p (W - a_i) v_{pl}}{[r_p (W - a_i) + a_i + z]}$$

Onde:

a_i = é o comprimento trinca no momento da medição

W = Largura do corpo de prova (Figura 49).

$b_0 = (W - a_0)$

B = Espessura do corpo de prova (Figura 49).

B_N = Espessura do corpo de prova no entalhe lateral, caso não existir $B_N = B$.

S = Distância entre os apoios (Span) corresponde a $4 \cdot W$.

F_f = Carga máxima na execução da pré trinca.

F_i = Carga obtida no gráfico do ensaio, F_Q , F_C , F_u ou F_m (Figura 52)

K = Fator intensidade de tensão definido com $a = a_0$.

= Razão de Poisson

$\dagger_{ys}$ = Escoamento ou 0,2% deslocado da tensão de escoamento à temperatura de interesse

E = Módulo elástico à temperatura de teste

V_{pl} = Componente plástica da abertura da boca da trinca no ponto de avaliação da curva Carga-Deslocamento, v_c , v_i , v_u , ou v_m (Figura 52).

z = distância da lâmina de ponto de medição do canto do entalhe no corpo de prova "Single Edge Bend"

r_p = fator de rotação plástica = 0,44 (ASTM) ou 0,40 (BS)

Figura 52: Gráficos típicos obtidos nos ensaios de tenacidade à fratura e obtenção dos pontos de interesse utilizados para os cálculos. Fonte: Tradução da norma BS 7448-1 ²¹

A geometria dos espécimes retirados da parede do tubo (21mm) foram definidos como $B=W=19\text{mm}$ pois esta geometria representa quase a totalidade da espessura do tubo seguindo o desenho da Figura 53.

Figura 53: desenho dos espécimes SE(B) usinados para o ensaio CTOD.

Os espécimes de tenacidade à fratura receberam identificações similares às identificações dos espécimes de ensaio de Impacto Charpy (Tabela 5).

Tabela 6: Identificação dos espécimes do ensaio de tenacidade à fratura CTOD.

		MB	ZTA	MA
Tubo 1	CP A	1A - MB	1A - ZTA	1A - MA
	CP B	-	1B - ZTA	1B - MA
	CP C	-	1C - ZTA	1C - MA
Tubo 2	CP A	2A - MB	2A - ZTA	2A - MA
	CP B	-	2B - ZTA	2B - MA
	CP C	-	2C - ZTA	2C - MA
Tubo 3	CP A	3A - MB	3A - ZTA	3A - MA
	CP B	-	3B - ZTA	3B - MA
	CP C	-	3C - ZTA	3C - MA

Para o alinhamento do entalhe usinado nas regiões do MA e da ZTA, os corpos de prova foram usinados sem o entalhe e então foram atacados com nital 2% revelando a macroestrutura da solda, para que pudessem ser marcados com altímetro traçador, indicando a posição dos entalhes para que após a propagação das pré-trincas, o ensaio fosse realizado no início da ZTA, no caso dos corpos de prova do MA, o entalhe foi alinhado com o centro da solda. Após a usinagem dos entalhes, cada região de retirada de espécimes do tubo, por exemplo, 1A MB; 1A ZTA e 1A MA, deu origem a um conjunto de espécimes similar ao da Figura 54.

Figura 54: Foto de um "jogo" representativo de espécimes com entalhe no Material Base (MB), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Metal de Adição (MA).

Figura 55: Todos os espécimes de tenacidade à fratura usinados para realização dos ensaios CTOD.

Os CPs foram novamente lixados e polidos, mesmo os que já haviam sido preparados para o ataque da macrografia, pois o ataque dificulta a visualização da propagação da pré-trinca de fadiga. Após o polimento eles foram marcados de 1,0 em 1,0 mm no sentido perpendicular à direção do entalhe, com auxílio de um altímetro traçador (Figura 56), para o monitoramento da propagação das pré-trincas de fadiga. Para o alinhamento dos CPs no dispositivo utilizado para as pré-trincas e para realização do ensaio, foram feitas três marcações para orientar a posição dos pontos de apoio, utilizando o mesmo altímetro traçador da Figura 57, sendo a primeira marcação no centro do CP alinhada com o entalhe (lado oposto) e outras duas marcas posicionadas a 38mm da marca central (2W).

Figura 56: Altímetro traçador utilizado para as marcações de referência de propagação das pré-trincas e alinhamento dos corpos de prova polidos.

Figura 57: Corpo de prova alinhado no dispositivo de propagação das pré-trincas e realização dos ensaios, o extensômetro foi utilizado apenas para a medição do COD durante o carregamento contínuo.

As pré-trincas foram propagadas na máquina de ensaios universal hidráulica MTS em controle de carga, utilizando o gerador de funções “Function Generator” do software de gerenciamento “Station Manager” (Figura 58), tomando cuidado para que as cargas seleccionadas (target e setpoint) gerassem sempre uma condição de compressão no CP (fadiga compressão-compressão).

Figura 58: Tela do gerador de funções no programa de gerenciamento da estação de ensaio MTS.

Para a captura de imagens das análises de desvio do plano de propagação das pré-trincas e das imagens da superfície de fratura para medição do tamanho da pré-trinca pós ensaio, foi utilizado um microscópio estereoscópio Olympus SZ61 com baixo aumento (Figura 59).

Figura 59: Estereoscópio Olympus SZ61 utilizado para a qualificação das pré trincas.

Após a propagação, as pré-trincas por fadiga precisam ser avaliados para verificar o desvio sofrido durante a propagação, que segundo a norma BS 7448 1, o desvio não pode ser superior a 10° para que o corpo de prova seja considerado qualificado (Figura 60), as medições para verificar o desvio do plano de propagação das pré-trincas foram realizadas com auxílio do software Image-Pro Plus 4.5 (Figura 61)

Figura 60: Fotomicrografia representativa do CP com maior ângulo de desvio do plano da pré-trinca.

Figura 61: Medição do ângulo de desvio do plano da pré-trinca, com software Image-Pro Plus.

A trinca do corpo de prova, fraturado após o ensaio de tenacidade, deve ser medida em nove pontos (ao longo da largura do corpo de prova) e realizar o seguinte cálculo para determinação de “a”.

$$a_{\text{médio}} = \frac{\left(\frac{a_1 + a_2}{2} \right) + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + a_8 + a_9}{8}$$

Onde cada “a” é uma das medidas do comprimento da trinca, sendo a_1 e a_2 as duas medidas mais próximas das extremidades da pré-trinca. O cálculo de CTOD deve ser realizado utilizando o $a_{\text{médio}}$

Para realizar as medições no corpo de prova fraturado, também foi utilizado o software de análise de imagens Image-Pro Plus 4.5 (Figura 62).

Figura 62: Medição do comprimento da pré trinca utilizando software Image-Pro Plus 4.5.

4. Resultados e Discussão

A seguir são apresentados todos os resultados dos ensaios de análise química, ensaio de dureza, metalografia, ensaio de tração, ensaio de dobramento lateral, ensaio de impacto charpy e ensaio de tenacidade à fratura CTOD.

Para os ensaios onde é necessário realizar uma análise da fratura mais aprimorada, no caso do ensaio charpy e do ensaio de tenacidade à fratura, utilizou-se de técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) possibilitando o detalhamento do micro mecanismo envolvido na fratura.

4.1. Energia de Soldagem.

A energia de soldagem foi medida através dos parâmetros de soldagem: Tensão, corrente e velocidade de soldagem. Esta última foi medida durante a soldagem dos tubos, utilizando o comprimento da solda e o tempo de soldagem.

A eficiência térmica da soldagem TIG (raiz) e Eletrodo revestido (enchimento e acabamento) foram retirados da Tabela 7. Definiram-se os valores 0,6 para TIG e 0,9 para eletrodo revestido.

Tabela 7: Eficiências térmicas dos processos de soldagem.

Processo	Eficiência térmica (%)
Laser, feixe de elétrons	5-20
TIG	30-60
Plasma	50-60
MIG	70-80
Eletrodo revestido	90
Arco submerso	90

Como o ensaio de tenacidade à fratura é realizado a aproximadamente 10mm de profundidade, a região avaliada está compreendida dentro da região de enchimento. Vale salientar que as soldas de enchimento foram realizadas em toda a espessura do chanfro seguindo o procedimento utilizado pelos soldadores no dia a dia, onde apenas a raiz e o acabamento são feito por filetes. Este fato reduz a velocidade de soldagem que de acordo com a Eq.1, provoca um aumento da energia de soldagem.

Os parâmetros de soldagem e a energia de soldagem média na região de enchimento para os Tubos 1, 2 e 3 são apresentados nas Tabelas 8, 9 e 10 respectivamente.

Tabela 9: Parâmetros de soldagem e energia de soldagem média do Tubo 2.

		Corrente (A)	Tensão (V)	Comp (mm)	Tempo (s)	Vel (mm/s)	Energia de soldagem kJ/mm	Temp ini(C)	Temp fin(C)
Raiz	Raiz	94,0	9,2	915,0	1273,2	0,72	0,72	26,0	47,5
	Reforço	118,0	10,0	910,0	667,8	1,36	0,52	46,0	55,0
Enchimento	Passe 1	118,0	21,6	255,0	174,0	1,47	1,57	79,0	95,0
	Passe 2	118,0	21,6	180,0	133,2	1,35	1,70	93,5	118,0
	Passe 3	158,0	21,8	960,0	744,0	1,29	2,40	116,0	132,5
	Passe 4	158,0	21,8	990,0	901,8	1,10	2,82	131,0	184,5
	Passe 5	158,0	21,8	1030,0	1045,2	0,99	3,15	182,0	212,0
	Passe 6	158,0	22,5	1100,0	1621,8	0,68	4,72	211,5	212,5
	Passe 7	158,0	22,5	1190,0	1908,0	0,62	5,13	211,0	214,5
	Acabamento	Filete 1	90,0	21,9	1200,0	520,2	2,31	0,77	131,5
Filete 2	90,0	21,9	1200,0	446,4	2,69	0,66	117,5	138,5	
Filete 3	89,0	21,6	1200,0	421,2	2,85	0,61	135,0	130,0	
Filete 4	90,0	21,6	1200,0	460,2	2,61	0,67	126,5	132,0	
Filete 5	90,0	21,9	1200,0	511,8	2,34	0,75	130,0	120,5	
Filete 6	90,0	22,0	1200,0	456,0	2,63	0,68	119,0	122,0	
Filete 7	91,0	22,2	1200,0	490,2	2,45	0,74	120,0	131,0	
energia de soldagem de enchimento média (kJ/mm)		3,07							

Tabela 10: Parâmetros de soldagem e energia de soldagem média do Tubo 3.

		Corrente (A)	Tensão (V)	Comp (mm)	Tempo (s)	Vel (mm/s)	Energia de soldagem kJ/mm	Temp ini(C)	Temp fin(C)
Raiz	Raiz	106,0	9,5	915,0	1055,4	0,87	0,70	27,0	47,5
	Reforço	204,0	10,6	920,0	357,0	2,58	0,50	45,5	60,0
Enchimento	Passe 1	114,0	21,5	930,0	723,0	1,29	1,71	40,0	79,0
	Passe 2	158,0	22,5	945,0	810,0	1,17	2,74	76,5	104,0
	Passe 3	178,0	22,6	965,0	849,0	1,14	3,19	101,5	158,0
	Passe 4	194,0	23,5	995,0	996,0	1,00	4,11	153,0	194,5
	Passe 5	194,0	23,7	1050,0	1474,8	0,71	5,81	190,0	247,5
	Passe 6	194,0	23,3	1180,0	1887,0	0,63	6,51	244,5	269,0
Acabamento	Filete 1	84,0	21,9	1200,0	562,8	2,13	0,78	215,0	187,0
	Filete 2	98,0	22,5	1200,0	491,4	2,44	0,81	184,5	163,5
	Filete 3	98,0	22,5	1200,0	499,8	2,40	0,83	160,5	146,5
	Filete 4	98,0	22,5	1200,0	460,8	2,60	0,76	140,5	140,5
	Filete 5	98,0	22,6	1200,0	475,2	2,53	0,79	135,5	138,5
	Filete 6	98,0	22,6	1200,0	475,2	2,53	0,79	129,0	136,5
energia de soldagem de enchimento média (kJ/mm)		4,01							

Pelos resultados dos cálculos de energia de soldagem médio do enchimento de cada um dos tubos, verificou-se que a energia de soldagem de enchimento média do Tubo 1 foi de 3,4 kJ/mm, para o Tubo 2 a energia de soldagem foi 3,07 kJ/mm e para o Tubo 3 a energia de soldagem foi de 4,01 kJ/mm.

Como as temperaturas do Tubo 1 foram medidas com lápis térmico, só se pode dizer que a temperatura estava dentro da faixa de soldagem de 120 a 350°C. Para os Tubos 2 e 3, após o passe 3, ambos atingiram temperaturas próximas de 120°C, que foi a temperatura de pré-aquecimento mínima especificada no procedimento de soldagem (ANEXO 1).

4.2. Análise química do Metal de Adição e Metal Base.

Os resultados das análises químicas do metal base e do metal de adição via espectrômetro ótico estão apresentados nas Tabelas 11 e 12:

Tabela 11: Resultados das análises química do metal base das amostras dos Tubos 1, 2 e 3.

Elementos (% em peso)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
MB 1	0,124	0,223	0,375	0,019	0,005	1,97	0,020	0,953
MB 2	0,129	0,222	0,376	0,019	0,005	1,97	0,019	0,949
MB 3	0,126	0,222	0,375	0,019	0,005	1,98	0,020	0,954

Tabela 12: Resultados das análises química do metal de adição das amostras dos Tubos 1, 2 e 3.

Elementos (% em peso)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
MA 1	0,062	0,619	0,693	0,022	0,010	1,93	0,045	0,960
MA 2	0,054	0,636	0,640	0,022	0,014	1,73	0,049	0,920
MA 3	0,050	0,610	0,59	0,022	0,012	1,75	0,04	0,947

Observou-se que as composições químicas de todos os materiais de adição são similares com uma pequena redução do teor de Cr para os metais de adição dos Tubos 2 e 3. As amostras foram soldados com varetas (AWS A5.28/5.28M: 05 ER 90S-B3) e eletrodos de mesma especificação (AWS A5.5-96 E 9018 B3). No caso dos eletrodos de enchimento, foram usados três lotes diferentes com composições químicas similares entre si, mas que pode ter influenciado na redução do percentual de Cr das amostras MA 2 e MA 3.

As composições químicas do metal de adição apresentaram maior teor de Si e Mn da ordem de 0,6 a 0,7% de cada um destes elementos, e estão de acordo com a composição típica destes eletrodos, inclusive são muito próximas das composições informadas nos certificados dos lotes dos eletrodos (ANEXOS 4 e 5).

Segundo Souza¹², a adição de Mn em um aço de baixo carbono previne a formação de filmes de cementita nos contornos de grãos, aumentando a tenacidade do mesmo. No caso do Si quando adicionados em porcentagens de 0,4 a 2,4% em aços com 0,05 a 0,07% de C (composição do metal de adição), provocam aumento de resistência e dureza sem perda de ductilidade, no entanto o teor de Si compromete a tenacidade.

O perfil de composição química do metal de adição até a região do metal base não alterado determinado via EDS (semi-quantitativo) das amostras do Tubo 1, 2 e 3 estão apresentados nos gráficos nas Figuras 63 a 65.

Figura 63: Perfil de composição química do metal de adição até o metal base da amostra do Tubo 1.

Figura 64: Perfil de composição química do metal de adição até o metal base da amostra do Tubo 2.

Figura 65: Perfil de composição química do metal de adição até o metal base da amostra do Tubo 3.

Verificou-se que em todas as amostras, o teor de Cr e Mo, que são os principais elementos de liga do aço ASTM A335 P22, se mantiveram praticamente iguais no metal de adição, ZTA e metal base. No entanto observou-se um percentual de Si e Mn ligeiramente mais elevados na região do metal de adição.

Durante as análises das fraturas após o ensaio CTOD (4.7) foi observada uma grande quantidade de inclusões não metálicas ao longo de toda a superfície de fratura das amostras retiradas dos materiais de adição (MA) de todas as condições ensaiadas (Tubos 1, 2 e 3).

Para ter uma referência de composição química das inclusões, realizou-se análise qualitativa varrendo uma área do material de adição, onde foram identificados os seguintes elementos nas inclusões: Si, Mo, Mn, Al e O (Figuras 66 e 67 e Tabela 13). A fonte mais provável de tais elementos é o revestimento do eletrodo utilizado para o enchimento da junta soldada.

Figura 66: Imagem BSE da região de propagação da pré-trinca representativa do MA das amostras dos Tubos 1, 2 e 3 onde verificaram-se alta densidade de inclusões.

Figura 67: Caracterização qualitativa das fases. As inclusões são representadas pela cor azul e o metal base pela cor vermelha.

Tabela 13: Resultados EDX realizado na inclusão

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	2.86	8.90	33.6	14.38	0.01	1.34	0.87	0.30	1.00
O K	13.22	30.86	425.5	7.89	0.09	1.27	0.89	0.53	1.00
FeL	25.37	16.96	242	8.00	0.12	0.95	1.03	0.52	1.00
AlK	2.11	2.92	92.4	9.37	0.02	1.12	0.94	0.73	1.01
SiK	9.24	12.28	410.4	5.78	0.09	1.14	0.95	0.81	1.00
MoL	14.19	5.52	241.6	6.77	0.11	0.82	1.11	0.97	1.01
CrK	3.31	2.38	19.7	25.91	0.03	0.95	1.01	0.99	1.11
MnK	29.69	20.18	109.9	10.82	0.28	0.92	1.01	1.00	1.01

4.3. Ensaio de Micro Dureza Vickers

Os resultados do ensaio de dureza Vickers (HV_{10}) realizados para determinar o perfil de dureza das soldas dos Tubos 1, 2 e 3 estão apresentados na Tabela 13 a seguir. As durezas foram medidas na região da superfície das amostras, que corresponde com a região.

Tabela 14: Microdureza Vickers da Região de Solda dos Tubos 1, 2 e 3.

Distância (mm)	Dureza em HV10			Distância (mm)	Dureza em HV10		
	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3		Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3
0,00	156	165	169	40,00	241	313	358
5,00	161	172	167	46,00	221	336	332
10,00	162	174	174	53,50	244	332	332
10,50	167	183	187	54,00	246	336	321
11,00	165	197	216	54,50	236	336	332
11,50	197	332	332	55,00	221	345	332
12,00	232	396	386	55,50	219	358	376
12,50	225	396	381	56,00	221	391	367
13,00	232	367	336	56,50	219	358	325
13,50	223	358	336	57,00	182	193	232
14,00	241	358	345	57,50	158	180	190
14,50	244	362	345	58,00	161	174	190
15,00	241	353	345	58,50	158	174	185
21,00	246	313	362	59,00	161	162	169
28,00	232	336	341	65,00	156	172	171
34,00	248	321	329	70,00	158	165	167

Legenda: AZUL = Material Base. ROXO = ZTA. LARANJA = Metal de Adição

Nota-se que as durezas observadas para a solda e ZTAs do Tubo1 (pré-aquecimento e alívio pós-soldagem), são bem menores quando comparadas com os Tubos 2 e 3 (não tratados). A diferença pode ser visualizada no gráfico da Figura 68 a seguir.

Figura 68: Gráfico de Dureza vs Distância (Perfil de Dureza).

Pelo do gráfico da Figura 68, é possível visualizar que a região termicamente afetada das amostras dos Tubos 2 e 3 apresenta um pico próximo de 400 HV₁₀, aproximadamente 380 HB utilizando a norma de conversão de escalas de dureza ASTM E140-05²⁴, enquanto a amostra do Tubo 1, que passou por todo o processo de pré-aquecimento e alívio pós soldagem, não apresentou diferenças significativas se comparada com a dureza da solda, por volta de 230 HV₁₀.

Como em geral, ao aumentar a dureza de um material, temos uma redução dos valores de tenacidade, esperava-se que os ensaios de impacto e tenacidade à fratura, apresentassem valores maiores para as amostras do Tubo 1 em relação à demais amostras dos Tubos 2 e 3 o que na prática não ocorreu.

Para estimar as tensões envolvidas nos cálculos de tenacidade à fratura CTOD, foram realizadas medições à profundidade de 10mm que corresponde com a região ensaiada da solda. Os resultados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 15: Resultados das medidas de dureza HV_{10} na ZTA e Solda de cada uma das amostras para a estimativa das tensões de escoamento.

	ZTA Tubo 1 (HV10)	ZTA Tubo 2 (HV10)	ZTA Tubo 3 (HV10)	Solda Tubo 1 (HV10)	Solda Tubo 2 (HV10)	Solda Tubo 3 (HV10)
1	220	264	224	228	254	230
2	210	256	224	233	242	221
3	218	262	245	230	251	215
Média	216	261	231	230	249	222

4.4. Análise Metalográfica

O material base dos Tubos 1, 2 e 3 apresentaram microestrutura com matriz composta por bainita em decomposição (revenida) e ferrita (Figura 69), microestrutura típica de aço carbono baixa liga, coerente com o material ASTM A335 P22, com a dureza de aproximadamente $160 HV_{10}$ (~150HB) e está de acordo com a microestrutura prevista pela Figura 7c do item 2.2.3.

Figura 69: Micrografia representativa do material base dos tubos 1, 2 e 3. Ataque Nital 2% Aumento 100X.

As micrografias das ZTA e soldas dos Tubos 1, 2 e 3, que serão apresentadas a seguir, foram realizadas na região da solda no meio da espessura do Tubo, que corresponde a microestrutura da região do ensaio CTOD. As metalografias das regiões isoladas foram realizadas nos próprios corpos de prova, a fim de verificar a microestrutura das regiões de interesse exatamente onde foram ensaiadas.

A ZTA do Tubo 1 apresentou microestrutura composta por bainita em decomposição revenida (Figura 70), microestrutura típica de aço carbono baixa liga

com taxa de resfriamento moderada (tempera branda) e revenido, coerente com o material ASTM A335 P22 na região que passou por tempera branda e com tratamento térmico de revenimento.

Figura 70: Micrografia da região da ZTA da solda de união do tubo 1. Ataque Nital 2% Aumento 100X.

A solda do Tubo 1 apresentou microestrutura composta por bainita em decomposição revenida disposta em grãos colunares parcialmente decompostos (Figura 71) microestrutura típica de solda de aço carbono baixa liga, coerente com eletrodo revestido E9018-B3 com tratamento de alívio de tensões após a soldagem.

Figura 71: Microestrutura do metal de adição do tubo 1 com pré-aquecimento e tratamento após soldagem. Ataque Nital 2% Aumento 100X.

A ZTA do tubo 2 apresentou microestrutura composta por bainita com crescimento de grãos austenítico próxima da solda (Figura 72), microestrutura típica de aço carbono baixa liga temperado e revenido, coerente com o material ASTM A335 P22 na ZTA com tratamento térmico de revenimento.

Figura 72: Micrografia da ZTA da Solda do tubo 2 sem pré aquecimento e sem tratamento após soldagem. Ataque Nital 2% Aumento 100X.

A solda do tubo 2 apresentou microestrutura composta por bainita revenida disposta em grãos colunares (Figura 73), microestrutura típica de solda de aço carbono baixa liga, temperado e revenido.

Figura 73: Micrografia da solda do tubo 2 sem pré aquecimento e sem tratamento após soldagem. Ataque Nital 2% Aumento 100X.

A ZTA do tubo 3, assim como observado na ZTA do Tubo 2, apresentou microestrutura composta por bainita revenida, microestrutura típica de aço carbono baixa liga temperado, e revenido.

**Figura 74: Micrografia da ZTA no tubo 3. Ataque Nital 2%
Aumento 100X.**

A solda do Tubo 3 apresentou microestrutura composta por bainita e ferrita disposta em grãos colunares bem definidos (Figura 75) microestrutura típica de solda de aço carbono baixa liga recristalizado.

Figura 75: Micrografia da solda do tubo 3 sem pré aquecimento e sem tratamento após soldagem. Ataque Nital 2% Aumento 100X.

As metalografias realizadas na profundidade onde o CTOD foi medido, indicou que a energia de soldagem (aumento da temperatura) dos passes de enchimento, foram suficientes para reverter as microestruturas da solda e ZTA no caso do Tubo 2 e no Tubo 3 a energia de soldagem foi suficiente para recrystalizar a microestrutura do metal de adição, levando a valores de dureza mais baixos do que os encontrados para a amostra que passou por tratamento de revenimento pós soldagem. Este fenômeno contribui com o aumento dos valores de tenacidade à fratura da amostra do MA do Tubo 3 em relação ao demais MA dos Tubos 1 e 2.

Para visualizar o perfil de microestruturas das regiões das soldas dos Tubos 1, 2 e 3 foi utilizado um software de edição de fotos (Zoombrowser EX da Canon) para a montagem de uma sequência de 7 micrografias realizadas no mesmo aumento para tentar manter uma proporção entre as fotomicrografias das diferentes amostras. A montagem gera uma distorção dos tamanhos de grão e altera o aumento original das micrografias, invalidando análises quantitativas, no entanto possibilitou a visualização de todas as regiões das soldas dos Tubos 1, 2 e 3 como apresentado nas Figuras 76, 77 e 78.

**Figura 76: Montagem sequencial de micrografias para visualização das regiões da solda do tubo1.
Ataque Nital 2%**

**Figura 77: Montagem sequencial de micrografias para visualização das regiões da solda do tubo2.
Ataque Nital 2%**

**Figura 78: Montagem sequencial de micrografias para visualização das regiões da solda do tubo3.
Ataque Nital 2%**

Devido a maior qualidade de imagem, as análises metalográficas das amostras atacadas com maior aumento foram realizadas no MEV, onde foi possível verificar as semelhanças microestruturais entre as amostras.

Como já era esperado, as microestruturas do material base são iguais para as amostras do Tubo 1, 2 e 3 (Figuras 79, 80 e 81), ambas compostas predominantemente por ferrita e bainita.

Figura 79: Micrografia do material base Tubo 1 com grãos de ferrita da região homogênea, e grãos de bainita na região “mesclada”. Ataque Nital 2% 8 segundos.

Figura 80: Micrografia do material base Tubo 2 com grãos de ferrita da região homogênea, e grãos de bainita na região “mesclada”. Ataque Nital 2% 8 segundos.

Figura 81: Micrografia do material base Tubo 3 com grãos de ferrita da região homogênea, e grãos de bainita na região “mesclada”. Ataque Nital 2% 8 segundos.

Todas as micrografias realizadas no MA (Tubos 1, 2 e 3) apresentaram uma grande quantidade de inclusões não metálicas de formato arredondado (Figuras 82, 83 e 84). O metal de adição da amostra do Tubo 1 apresentou microestrutura uniforme composta predominantemente por bainita em decomposição, com contornos de grão bem pronunciados e inclusões (pontos pretos redondos).

Figura 82: Micrografia do metal de adição do Tubo 1 onde se evidênciam uma grande quantidade de inclusões de formato arredondado. Ataque Nital 2% 8 segundos.

As amostras dos Tubos 2 e 3, também apresentaram microestrutura bainítica revenida (Figuras 83 e 84). Notam-se ainda as inclusões representadas pelos pontos pretos.

Figura 83: Micrografia do metal de adição do Tubo 2 onde se evidênciam uma grande quantidade de inclusões de formato arredondado. Ataque Nital 2% 8 segundos.

Figura 84: Micrografia do metal de adição do Tubo 3 onde se evidênciam uma grande quantidade de inclusões de formato arredondado. Ataque Nital 2% 8 segundos.

A microestrutura da ZTA do Tubo 1 apresentou microestrutura composta de bainita em decomposição, similar à microestrutura encontrada no metal de adição porém sem a presença das inclusões (Figura 85).

Figura 85: Micrografia da ZTA do Tubo 1. Ataque Nital 2% 8 segundos.

Assim como na amostra da ZTA do Tubo 1, as amostras dos Tubos 2 e 3, também apresentaram microestrutura bainita revenida (Figuras 86 e 87).

Figura 86: Micrografia da ZTA do Tubo 2. Ataque Nital 2% 8 segundos.

Figura 87: Micrografia da ZTA do Tubo 3. Ataque Nital 2% 8 segundos.

4.5. Ensaio de Tração

No ensaio de tração do material base, foi encontrado 403 MPa de limite de escoamento e 596 MPa de limite de resistência, dados utilizados para o cálculo de CTOD. O certificado do ensaio de tração pode ser visualizado no Anexo 8.

Para obter valores de módulo de elasticidade e escoamento diretamente das regiões de solda, que junto com as respectivas ZTAs, que são as regiões onde as propriedades mecânicas mais sofrem com os ciclos térmicos dos procedimentos de soldagem, utilizou-se um extensômetro posicionado dentro da região compreendida pela solda durante estes ensaios (Figura 88).

Figura 88: Instalação do extensômetro na região de solda.

Para o ASME IX, o ensaio de tração tem caráter “passa não passa” a ruptura dos espécimes devem se dar no material base ou se a ruptura se der na solda, o limite de resistência (da solda) deve ser superior ao limite de resistência especificado para o material base.

As fraturas dos espécimes ocorreram no material base, para os três espécimes do Tubo1 (CPs A, B e C) como podem ser visto nas Figuras 89 a e b. Para os três espécimes do Tubo2 (CPs A, B e C) como podem ser visto nas Figuras 90 a e b e para os três espécimes do Tubo3 (CPs A, B e C) como podem ser visto nas Figuras 91 a e b.

Figura 89: a) Espécimes A, B e C de tração, retirados do CP1 antes do ensaio de tração. b) Espécimes A, B e C de tração, retirados do CP1 após ensaio de tração da região soldada.

Figura 90: Espécimes A, B e C de tração, retirados do CP2 antes do ensaio de tração. b) Espécimes A, B e C de tração, retirados do CP2 após ensaio de tração da região soldada.

Figura 91: Espécimes A, B e C de tração, retirados do CP3 antes do ensaio de tração. b) Espécimes A, B e C de tração, retirados do CP3 após ensaio de tração da região soldada.

4.6. Ensaio de Dobramento Guiado

Todos os espécimes de dobramento lateral foram dobrados de acordo com a orientação do código ASME seção IX QW-162 e QW 163. Os espécimes foram atacados para que os centros das soldas das amostras pudessem ser marcados para o alinhamento no dispositivo (Figura 92). Em seguida foram dobrados até o ângulo de 180° (Figura 93).

Figura 92: Espécimes para dobramento lateral atacadas e marcadas para alinhamento no dispositivo de ensaio.

Figura 93: Ensaio de dobramento guiado segundo ASME IX ainda em andamento.

Nenhum dos espécimes apresentou defeitos relevantes após os ensaios de dobramento lateral (Figura 94 a e b). Desta forma, para os ensaios de dobramento lateral, as soldas realizadas, com ou sem tratamentos térmicos, foram consideradas aprovadas no ensaio de dobramento.

(a)

(b)

Figura 94: a) Espécime do ensaio de dobramento do lado marcado indicando que os espécimes foram dobrados alinhados com o centro das soldas. b) região externa dos espécimes sem indicações de defeitos nas soldas.

4.7. Ensaio de Impacto Charpy

Os resultados dos ensaios de Impacto Charpy são apresentados na Tabela 15, onde se observou que a energia absorvida nos ensaios de impacto Charpy das amostras do Tubo 1, 2 e 3 são similares. Para todas as amostras a energia absorvida no material base foi entre 170 e 195 J, para a ZTA a energia absorvida foi entre 134 e 166 J, e no metal de adição a energia absorvida foi entre 12 e 26J.

Os resultados indicaram que a tenacidade da junta soldada está muito mais relacionada com o consumível do que com o pré aquecimento e tratamento térmico pós soldagem.

Tabela 16: Resultados do ensaio de impacto Charpy a temperatura ambiente.

	Ponto	MB (J)	ZTA (J)	MA (J)
Tubo 1	A	194	138	26
	B	192	156	14
	C	174	164	16
	Média	187	153	19
Tubo 2	A	172	158	16
	B	174	134	20
	C	174	166	14
	Média	173	153	17
Tubo 3	A	194	158	12
	B	172	156	16
	C	182	138	14
	Média	183	151	14

As medições da fratura do corpo de prova foram comparadas com a Tabela 5 do item 3.7 para determinar o percentual de fratura com deformação lateral (dúctil). Os resultados são apresentados na Tabela 16:

Tabela 17: Medições do % de fratura dúctil dos corpos de prova do ensaio de Impacto Charpy.

	MB	ZTA 1	ZTA 2	ZTA 3	MA 1	MA 2	MA 3
% de deformação	84%	55%	63%	60%	34%	25%	21%

4.8. Ensaio de Tenacidade à Fratura CTOD

Para o cálculo da tenacidade à fratura é necessário conhecer as seguintes propriedades do material:

- Limite de resistência;
- Limite de escoamento;
- Coeficiente de Poisson ν ;
- Módulo de elasticidade.

Para obter os dados de escoamento e módulo de elasticidade da região do metal de adição, foi utilizado um extensômetro posicionado na região do metal de adição do corpo de prova do ensaio de qualificação do procedimento de soldagem.

Como as regiões que compõem a ZTA são da ordem de 1 a 2 milímetros (dependendo do aporte térmico e da taxa de resfriamento durante a soldagem), e o metal depositado segue a circunferência dos tubos, a retirada de corpos de prova para realizar ensaios de tração específicos destas regiões foi considerada inviável. Desta forma, as propriedades que não puderam ser obtidas através do ensaio de tração foram estimadas pelas equações 9 e 10, apresentadas no item 3.8. As durezas utilizadas para estimar a tensão de escoamento, assim como a própria tensão de escoamento estimada são apresentadas nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 18: Resultados do ensaio de dureza utilizados como referência para estimar as propriedades das regiões da junta soldada.

	ZTA Tubo 1	ZTA Tubo 2	ZTA Tubo 3	Solda Tubo 1	Solda Tubo 2	Solda Tubo 3
1	220	264	224	228	254	230
2	210	256	224	233	242	221
3	218	262	245	230	251	215
Média	216	261	231	230	249	222

Tabela 19: Tensão de escoamento estimada a partir da dureza das regiões ZTA e MA das amostras, pelas Eq.9 e 10.

	Região	Dureza (média) HV₁₀	Sys (Estimado) MPa
TUBO 1	ZTA	216	487
	MA	230	557
TUBO 2	ZTA	261	635
	MA	249	616
TUBO 3	ZTA	231	537
	MA	222	531

O módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν) são propriedades da região elástica e estas tem maior dependência da força de ligação química, é esperado que os aços carbono não ligados ou de baixa liga, apresente valores similares para estas propriedades. Para a realização dos cálculos de CTOD, o Módulo de Elasticidade foi considerado como 207 GPa, e o coeficiente de Poisson foi considerado como 0,3 (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson típico de aços carbono) ³³.

Segundo as orientações da norma BS 7448-2 o tamanho nominal das pré-trincas (entalhe + propagação) para o ensaio de CTOD devem estar entre 0,45W e 0,70W onde W é a dimensão do corpo de prova definida no item 3.8.1. No caso deste trabalho a dimensão W é de aproximadamente 19 mm, logo para que as pré-trincas sejam válidas, o comprimento deve ficar entre 8,55 mm e 13,3 mm.

Os resultados dos ensaios CTOD das amostras são apresentados nas Tabelas 19 a 22.

Tabela 20: Resultados das medições de CTOD de carga máxima das amostras do Material Base (MB) distante das soldas.

	CP Tubo 1	CP Tubo 2	CP Tubo 3
MB	0,52 mm	0,46 mm	0,39 mm
	Média	0,46 mm	

Tabela 21: Resultados das medições de CTOD de carga máxima das amostras do Tubo 1 nas regiões da ZTA e do MA.

	CP A	CP B	CP C	Média
Tubo 1 ZTA	0,42 mm	0,32 mm	0,38 mm	0,37 mm
Tubo 1 MA	0,05 mm	0,03 mm	0,02 mm	0,04 mm

Tabela 22: Resultados das medições de CTOD de carga máxima das amostras do Tubo 2 nas regiões da ZTA e do MA.

	CP A	CP B	CP C	Média
Tubo 2 ZTA	0,39 mm	0,47 mm	0,36 mm	0,41 mm
Tubo 2 MA	-	0,04 mm	-	-

Tabela 23: Resultados das medições de CTOD de carga máxima das amostras do Tubo 3 nas regiões da ZTA e do MA.

	CP A	CP B	CP C	Média
Tubo 3 ZTA	0,40 mm	0,40 mm	0,52 mm	0,44 mm
Tubo 3 MA	0,09 mm	0,09 mm	0,09 mm	0,09 mm

Para complementar as análises de tenacidade à fratura foram realizadas análises da fratura com auxílio de microscópio eletrônico de varredura (MEV), para caracterizar o micro mecanismo de fratura na região de ensaio.

As análises de fraturas foram realizadas em um corpo de prova representativo de cada condição sendo: MB 1A, ZTA 1A, MA 1A, ZTA 2A, MA 2B, ZTA 3A e MA 3A.

A amostra representativa do material base (MB) apresentou 2,5mm de propagação dúctil durante o ensaio, esta região é caracterizada pela predominância de dimples e deformação plástica (Figuras 95 e 96).

Figura 95: Região de embotamento do CP MB 1A, aproximadamente 2,5mm.

Figura 96: Detalhe do micro mecanismo da região de embotamento do CP MB 1A predominância de dimples.

A amostra da ZTA do tubo 1 apresentou cerca de 1,4mm de propagação dúctil durante o ensaio, caracterizado pela presença de dimples. Comparado com o material base, a ZTA apresentou região de área dúctil 1,0mm menor (Figuras 97 e 98)

Figura 97: Região de embotamento do CP ZTA 1A, aproximadamente 1,4 mm.

Figura 98: Detalhe do micro mecanismo da região de embotamento do CP ZTA 1A, região com presença de dimples.

A amostra do MA do Tubo 1 praticamente não apresentou propagação dúctil (0,04mm) durante o ensaio (Figuras 99).

Figura 99: Região de embotamento do CP MA 1A, aproximadamente 0,04mm.

A pequena área de propagação “dúctil” foi seguida de uma região onde se observa planos de clivagem. Os dimples observados na fratura da amostra do MA do Tubo 1 possuem inclusões que contribuíram com a redução da tenacidade da amostra (Figura 100). A região de clivagem também apresenta pontos de inclusões no centro dos planos de clivagem que atuam como pontos de iniciação de propagação da fratura (Figura 101).

Estas características estão coerentes com os resultados dos ensaios CTOD, onde o material praticamente não apresentou abertura da ponta da trinca.

Figura 100: Detalhe do micro mecanismo da região de embotamento do CP MA 1A, região de predominância de dimples com inclusões nos centros dos dimples.

Figura 101: Detalhe do micro mecanismo da região de ensaio do CP MA 1A, região de predominância de clivagem com inclusões nos centros dos planos de clivagem.

A amostra da ZTA do Tubo 2 apresentou cerca de 0,50mm de propagação dúctil durante o ensaio, caracterizado pela presença de dimples. Comparado com o material base, a ZTA apresentou região de área dúctil 2,0mm menor (Figura 102).

Figura 102: Região de embotamento do CP ZTA 2A, aproximadamente 0,50 mm.

Figura 103: Detalhe do micro mecanismo da região de embotamento do CP ZTA 2A, região com presença de dimples.

A amostra do MA do Tubo 2 praticamente não apresentou propagação dúctil (0,07mm) durante o ensaio (Figura 104). Assim como as demais amostras do MA, com ou sem tratamentos térmicos pós soldagem, os poucos dimples observados apresentam inclusões não metálicas que contribuíram com a redução da tenacidade da amostra (Figuras 105).

Figura 104: Região de embotamento do CP MA 2B, aproximadamente 0,070 mm.

Figura 105: Detalhe do micro mecanismo da região de embotamento do CP MA 2B, região de predominância de dimples com inclusões nos centros dos dimples.

A amostra da ZTA do Tubo 3 apresentou cerca de 3,0mm de propagação dúctil durante o ensaio, caracterizado pela presença de dimples. Comparado com o material base, a ZTA apresentou região de área dúctil 0,5mm maior (Figuras 106 e 107).

Figura 106: Região de embotamento do CP ZTA 3A, aproximadamente 3,0mm.

Figura 107: Detalhe do micro mecanismo da região de embotamento do CP ZTA 3A, região de predominância de dimples.

A amostra do MA do Tubo 3 apresentou cerca de 1,5mm de propagação mista dúctil e frágil durante o ensaio (Figuras 108, 109 e 110), caracterizado pela presença de dimples e planos de clivagem. Embora o comprimento da propagação durante o ensaio tenha sido maior do que o comprimento das amostras do MA dos Tubos 1 e 2, o resultado do CTOD do MA Tubo 3A também foi considerado baixo.

Figura 108: Região de embotamento do CP MA 3A., aproximadamente 1,5mm.

Figura 109: Detalhe do micro mecanismo misto da região de embotamento do CP MA 3A evidenciando dimples e planos de clivagem coexistindo na região de ensaio.

Figura 110: Detalhe do micro mecanismo misto da região de embotamento do CP MA 3A.

5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

5.1. Conclusões

Foi possível verificar que a realização dos tratamentos de pré-aquecimento e alívio de tensões nas condições de soldagem de corpos de prova em ambiente fabril não influenciaram os resultados dos ensaios de tração e dobramento, previstos pelo código ASME Seção IX ¹⁶, sendo que todos os corpos de prova foram considerados aprovados nestes ensaios, o que não era esperado, já que as amostras dos Tubos 2 e 3 foram intencionalmente soldadas por um procedimento irregular.

Considerando os ensaios e as inspeções recomendadas pela norma Petrobras N-0133 foi possível detectar um aumento significativo de dureza nas ZTAs e Metal de Adição na superfície das amostras não tratadas. Estes aumentos fizeram com que as durezas medidas alcançassem valores superiores aos especificados pela norma de fabricação do material, o que poderia causar a reprovação do mesmo.

Os resultados dos ensaios de impacto Charpy, de corpos de prova retirados na superfície dos Tubos, apresentaram resultados surpreendentes, pois se esperava um melhor desempenho das amostras do Tubo 1 que na prática não aconteceu. A energia absorvida pela região do metal de solda foi considerada baixa para todas as condições de soldagem, apresentando valores que variaram de 12 a 26 Joules, independente da condição de tratamento térmico, enquanto o Material Base e ZTA apresentaram valores de resistência ao impacto muito superiores, da ordem de mais de 150 Joules. Este resultado indica que a qualidade do Metal de Adição (eletrodo) tem um papel fundamental na tenacidade de juntas soldadas.

Os resultados dos ensaios de tenacidade à fratura pelo método do Deslocamento da Abertura da Ponta da Trinca (CTOD) foram similares aos resultados obtidos no ensaio de Impacto Charpy, onde o metal de adição MA apresentou valores muito menores do que as demais regiões.

As metalografias das regiões ensaiadas indicaram que a energia de soldagem do Tubo 3 nos passes de enchimento foi suficiente para recrystalizar o metal de adição, fazendo com que ele apresentasse microestrutura composta por bainita e ferrita, similar ao material base. Para o Tubo 2 a energia de soldagem levemente menor do que no Tubo 3 foi suficiente para revenir o metal de adição gerando microestrutura bainita revenida. A microestrutura recrystalizada do Tubo 3 apresenta dureza inferior às durezas do metal de adição do Tubo 1, o que fez com que o CTOD

do metal de adição apresentasse valores maiores do que do Tubo 1.

Mesmo que o MA do Tubo 3 tenha apresentado valores de CTOD maiores do que o MA do Tubo 1, todos os valores de CTOD medidos no MA das amostras dos Tubos 1, 2 e 3, apresentaram valores muito inferiores ao CTOD do MB e das ZTA, ou seja, o MA representa um ponto de baixa tenacidade e pode representar um alto risco de falha independente do processo que for seguido.

A análise das fraturas dos corpos de prova com auxílio de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) mostrou que o metal de adição de todas as amostras no MA possuem uma grande quantidade de inclusões não metálicas, de aspecto arredondado que apresentaram os elementos Si, Al, Mo, Mn. Tais elementos podem estar presentes na composição do revestimento do eletrodo utilizado para o enchimento e não se solubilizaram de forma correta no metal de adição.

É provável que se os ensaios CTOD fossem realizados na região da superfície da solda, os resultados seriam diferentes, no entanto, devido à geometria dos corpos de prova, o teste da condição “não revenida” só é possível em corpos de prova com ciclo térmico simulado, o que foge da proposta deste trabalho que foi de avaliar na prática como a tenacidade à fratura do material se comporta quando o processo de soldagem não é seguido pelos soldadores.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Para melhorar a compreensão dos fatores que influenciaram as propriedades de tenacidade dos metais de adição sugere-se realizar os seguintes estudos:

- Comparar a tenacidade de metais de adição utilizando eletrodos de mesma classificação (ASME SFA 5.5 E9018-B3) e diferentes fabricantes.
- Comparar a influência de diferentes movimentos de tecimento (movimentação lateral durante a soldagem) com eletrodos de um mesmo lote para verificar a influência do aporte térmico na formação das inclusões
- Testar uma maior gama de materiais e com maior amostragem para verificar as deficiências da bateria de ensaios proposta pelo código ASME IX (Tração e dobramento) em detectar soldas de baixa tenacidade.
- Realizar ensaios com corpos-de-prova com ciclo térmico simulado do ultimo passe do processo de soldagem sem tratamento de alívio para verificar qual seria a tenacidade na ZTA mais próxima da superfície (não alterada pelos passes de solda subsequentes)

REFERÊNCIAS

- [1] ANDERSON, T. L. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 2nd. Ed. 1995 CRC Press Inc. pp 3 - 23
- [2] SILVA, M. C. *Determinação experimental da tenacidade à fratura de zona termicamente afetada de junta soldada de aço API 5L X80* / M.C. Silva. -- ed.rev. -- São Paulo, 2009. 114 p.
- [3] ASTM 2010. A335/A335M-06 *Standard Specification for Seamless Ferritic Alloy-Steel Pipe for High-Temperature Service*. In: Annual Book of ASTM Standards. Baltimore, MD, USA, ASTM. Vol. 01.01.
- [4] API RP 579 *Recommended Practice for Fitness-for-Service*, published 01/01/2000 by American Petroleum Institute
- [5] API 579-1/ASME FFS-1 *Fitness for Service*, June 5, 2007 (API 579 second edition)
- [6] SHIGLEY, J.E.; MISCHEKE, C.R.; BUDYNAS, R.G. *Projeto de Engenharia Mecânica*. 7^a Ed. Bookman, 2005. pp 280 - 448.
- [7] FLÔRES, L. F. Valadão. *Sistemas Térmicos I* – Apostila EFEI, Itajubá, MG.
- [8] MARTINELLI, L. C. J. *Geradores de Vapor* – Apostila UERGS, Rio Grande do Sul disponível em <http://www.saudeetrabalho.com.br/download/gera-vapor.pdf> acessado dia 18/01/2012.
- [9] SANTOS D. *Materiais para Caldeiras e Turbinas de Centrais Termoeletricas Avançadas* - Ciência & Tecnologia dos Materiais, Vol. 23, n.º 1/2, 2011.
- [10] BRAZ, M. H. P. (1999). *Propriedades de fadiga de soldas de alta resistência e baixa liga com diferentes composições microestruturais*. São Carlos, 1999. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- [11] LISBOA, M. B. *Nova Geração de Aços Ferríticos Fe-Cr-W(V) – Análise da Evolução Microestrutural e Comportamento Mecânico Sob Condições de Fluência*, Rio de Janeiro, 2007 VIII, 213 p. Disponível em: <http://teses.ufrj.br/COPPE_D/MauricioBarretoLisboa.pdf>. Acesso em 21 de abril. de 2013.
- [12] SOUZA, S. A. *Composição Química dos Aços* São Paulo, Edgard Blücher 1989.
- [13] Apostila SENAI *Tubulação Industrial e Estrutura Metálica*, página 23, disponível no site <http://www.abraman.org.br/Arquivos/51/51.pdf> dia 11/01/2014
- [14] *Soldagem e Qualidade*. Núcleo Tecnológico de Soldagem & Qualidade. São Paulo, 2002. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM354/Manual%20de%20Soldagem.pdf>. Acesso em 20 de nov. de 2013, módulo I capítulo 6-8].
- [15] MARQUES, P. V. MODENESI, J. QUEIROZ, A. B. *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*, 3^a edição atualizada – Belo Horizonte, UFMG 2009.

- [16] ASME 2004. *Boiler and Pressure Vessel Code and International Code section IX Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators*. 2004 Ed., NY. USA.
- [17] INFOSOLDA. *Ensaio Mecânico: dobramento. Soldagem* – Coleção tecnológica SENAI – 1. ed. 1997. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/213-ensaio-mecanico-dobramento.html>>.).
- [18] ASTM 2013. E23 12c *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. In: Annual Book of ASTM Standards. Baltimore, MD, USA, ASTM. Vol. 03.01
- [19] BS EN 875:1995 - *Destructive tests on welds in metallic materials. Impact tests. Test specimen location, notch orientation and examination*, December, 1995.
- [20] Norma Petrobras N-0133 Rev.J “**Soldagem**”. Set 2002
- [21] BS 7448-1:1991 – Part 1: *Method for determination of K_{IC} , critical CTOD and critical J values in metallic materials*.
- [22] BS 7448-2:1997 – Part 2: *Method for determination of K_{IC} , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials*.
- [23] SQUIRRELL. S.J., PISARSKI H.G., DAWES M.G. “**Recommended procedures for the crack tip open displacement (CTOD) testing of Weldments**” – The Welding Institute – Research Report 1986.
- [24] ASTM 2004. *E 140-05 Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness*. In: Annual Book of ASTM Standards. CD ROM ASTM. Vol. 03.01.
- [25] Wikipédia *Soldagem TIG*. Disponível em http://pt.wikipedia.org/wiki/Soldagem_TIG Visitado na data: 10/11/2011
- [26] Blog Tim Engenharia – *Soldagem Industrial*. Disponível em <http://soldassis-tim.blogspot.com.br/>.
- [27] COLPAERT, H. *Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns*. São Paulo. Editora Edgard Blucher Ltda, 4º edição 2008.
- [28] ROSENTHAL, D. *The theory of moving source of heat and its application to metal transfer*. Transactions ASME, 1946, v 68.
- [29] ALTAFINI, Carlos R. *Apostila sobre caldeiras Curso de Engenharia Mecânica Disciplina Máquinas Térmicas* - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia – Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade de Caxias do Sul 2002.
- [30] Norma Regulamentadora 13 do Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil - Disponível em http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812BE914E6012BEF2695817E43/nr_13.pdf

- [31] OKUMURA, T., TANIGUCHI, C. *Engenharia de Soldagem e Aplicações*. São Paulo, Editora LTC, 1982.]
- [32] GIMENES, L. Jr. *Tratamento Térmico em Juntas Soldadas*. Edição 1997.
- [33] CALLISTER, W.D.Jr. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. Quinta Edição. LTC. Rio de Janeiro 2002 pág 83.
- [34] ROSE, A. RADEMACHER, L. *Atlas zur Wärmebehandlung der stähle*. Aço 10 CrMo 9 10, código II-322 A
- [35] ASME, SFA 5.5/SFA5.5M *Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*. In ASME Section II, Part C 2013.
- [36] ASME, SFA 5.28/SFA5.28M *Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding*. In ASME Section II, Part C 2013.
- [37] Site infosolda “O portal brasileiro da soldagem” <http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/metalurgia/120-eficiencia-termica.html> acessado em 04/06/2014.
- [38] GRIFFITH, A. A. *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. Philosophical Transactions, Séries A, Vol. 221, 1920 pp. 163-198.
- [39] IRWIN, G. R. *Fracture Dynamics*. Fracture of Metals, American Society for Metals, Cleaveland, 1948, pp. 147-166.
- [40] WELLS, A. A., *Unstable Crack Propagation in Metals: Cleavage and Fast Fracture*. Proceedings of the Crack Propagation Symposium, Vol. 1, Paper 84, Cranfield, UK, 1961.
- [41] RICE, J. R. *A Path Independent Integral and the Aproximate analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks*. Journal of Applied Mechanics, Vol. 1, 1966, pp. 145-153.
- [42] ASTM 2013. E1820 13 *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*. In: Annual Book of ASTM Standards. Baltimore, MD, USA, ASTM. Vol. 03.01
- [43] DAWES, M. G.; PISARSKI, H. G.; SQUIRRELL, S. J. *Fracture Mechanics Tests on Welded Joints* in: “Non Linear Fracture: Volume II – Elastic-plastic fracture, ASTM STP 995 J. D. LANDES; A. SAXENA and J. MERKLE ed’s p. 191-213.
- [44] FALCÃO, C. A. J., *Avaliação da tenacidade à fratura da zona termicamente afetada de soldas múltiplos passes em um aço ARBL*. Dissertação Universidade São Paulo USP. São Carlos 1997.

ANEXO 1 – Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS)

ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (EPS) (WELDING PROCEDURE SPECIFICATION - WPS)				Pág. 1/2 (Page)	
EPS n°: (WPS n°)	56/1	Data (Date)	04/09/02	RQPS suporte n°: (Supporting PQR n°)	56
Revisão no.: (Revision no.)	1	Data (Date)	21/11/06		
Processo(s) de soldagem: (Welding process(es))	GTAW / SMAW		Tipo(s) (Type(s))	MANUAL Automático, manual, máquina ou semi-automático (Automatic, manual, machine or semi-automatic)	
JUNTAS (QW-402): (Joints)				Detalhe (Detail)	
Tipo de chanfro: (Joint design)				Conforme Desenho (According to Drawing)	
Cobre junta (Backing)				☒ (sim) SMAW (yes) ☒ (não) GTAW (no)	
Material do cobre junta (Backing material & type)				Conforme Desenho (According to Drawing)	
Metal (Metal)				☐	
Metal não fusível (Nonfusing metal)				☐	
Não metálico (Nonmetallic)				☐	
Outro (Other)				☐	
Metal de Solda (Weld Metal)				☐	
Retentor (Retainer)				☐ SIM (yes) ☒ NÃO (no)	
*METAL BASE (QW 403) (Base Metal)					
N° P: (P-N°)		5A Grupo n° (Group n°)		1 com n° P (to P n°)	
Especificação tipo e grau (Specification type and grade)		Conforme Desenho (According to Drawing)		com (to) Conforme Desenho (According to Drawing)	
Análise quim. e prop. mec. (Chem. Analysis and Mech. Prop.)		N/A		com (to) N/A	
Faixa de espessura:					
Metal base: (Base metal)		Chanfro - sem impacto (Groove) (without impact) 5 a 50,8 mm Filete - sem impacto (Fillet) (without impact) Ilimitado (Unlimited)		com impacto (with impact) N/A com impacto (with impact) N/A	
Posse de soldagem > 13 mm (Welding pass > 13 mm)		☐ (sim) (yes) ☒ (não) (no)			
Outro (Other)		N/A			
*METAIS DE ADIÇÃO (QW-404): (Filler Metals)				METAL DE SOLDA: (Weld metal)	
Especif. n°: (SFA) (Spec. n°:)		GTAW 5.28 / SMAW 5.5		Faixa de espessura (Thickness range)	
Classif. AWS n°: (AWS n° class.)		GTAW ER90S-83 / SMAW E9018-B3		Chanfro (Groove) Até GTAW 12 mm / SMAW 38,8 mm Filete (Fillet) Ilimitado (Unlimited)	
N° F (F n°:)		GTAW 6 / SMAW 4		Metal de adição suplementar (Supplemental filler metal)	
N° A (A n°:)		4		Tipo de fluxo (Flux type)	
Diâm. do metal de adição (Size of filler metals)		GTAW 2.5:3.25 mm / SMAW 2.5 a 4 mm		Escória remoída (Recrushed slag)	
				Eletrodo-fluxo (classif.) (Electrode-flux classification)	
				Nome comercial do fluxo (Flux trade name)	
				Inserto consumível (Consumable insert)	
				Outro (Other)	

EPS no: 56/1 (WPS no.)		Revis. 1 (Rev)		Pag 2/2 (Page)																												
POSIÇÕES - (QW-405): (Positions) Posições do chanfro: Todas (ALL) (Positions of groove) Sentido de soldagem: ☒ asc. ☐ desc. (Welding progression) (up) (down) Posições do filete: Todas (ALL) (Positions of fillet)			TRAT. TERM. APÓS SOLDAGEM (QW-407) (Postweld Heat Treatment) Faixa de temperatura: Conforme instrução (Temperature range) (instruction according) Faixa de tempo: Conforme instrução (Time range) (instruction according)																													
PRÉ-AQUECIMENTO (QW-406) (Preheat) Temperatura de Pré-Aquecimento Min. 120°C (Preheat Temperature Min.) Temperatura de Interpasse Máx. 350°C (Interpass Temp. Max.) Manutenção de Pré-aquecimento Sim. durante a soldagem (Preheat Maintenance) (yes, during the welding)			GÁS (QW-408) (GAS) <table border="1"> <thead> <tr> <th>Gás(es)</th> <th>%Mistura</th> <th>Vazão</th> </tr> <tr> <th>(Gas(es))</th> <th>(%Mixture)</th> <th>(Flow rate)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ARGÔNIO</td> <td>99.99%</td> <td>8 a 12 L/min</td> </tr> <tr> <td>Proteção</td> <td>ARGÔNIO</td> <td>99.99%</td> </tr> <tr> <td>(Shielding)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Prot. tras.</td> <td>N/A</td> <td>N/A</td> </tr> <tr> <td>(Trailing)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Prot. raiz</td> <td>N/A</td> <td>N/A</td> </tr> <tr> <td>(Backing)</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Gás(es)	%Mistura	Vazão	(Gas(es))	(%Mixture)	(Flow rate)	ARGÔNIO	99.99%	8 a 12 L/min	Proteção	ARGÔNIO	99.99%	(Shielding)			Prot. tras.	N/A	N/A	(Trailing)			Prot. raiz	N/A	N/A	(Backing)		
Gás(es)	%Mistura	Vazão																														
(Gas(es))	(%Mixture)	(Flow rate)																														
ARGÔNIO	99.99%	8 a 12 L/min																														
Proteção	ARGÔNIO	99.99%																														
(Shielding)																																
Prot. tras.	N/A	N/A																														
(Trailing)																																
Prot. raiz	N/A	N/A																														
(Backing)																																
CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (QW-409): (Electrical Characteristics) Corrente (CA ou CC) CONTÍNUA Polaridade GTAW NEGATIVA / SMAW POSITIVA (Current AC or DC) (Polarity) Amp (faixa) GTAW 75 a 140 / SMAW 80 a 195 Volts (faixa) GTAW 16 a 26 / SMAW 22 a 30 (Amp I range) (Volts I range) Aquecimento máximo N/A (Max. heat input) Diâmetro e tipo de eletrodo de tungstênio Ø2.4 mm - AWS EWTH-2 (Tungsten electrode size and type) Modo de transferência do metal para GMAW N/A (Mode of metal transfer for GMAW) Faixa de velocidade de avanço do arame N/A (Electrode wire feed speed range)																																
TÉCNICA (QW-410) (Technique) Cordão reto ou trançado Reto (String or weave bead) (String) Limpeza inicial e de interpassa Escovamento (Initial and interpass cleaning) (brushing) Distância do bico à peça N/A (Contact tube to work distance) Passe múltiplo ou simples (por lado) Múltiplo (Multiple or single pass I per side) (Multiple) Velocidade de avanço (faixa) N/A (Travel speed I range) Martelamento N/A (Peening)			Diâmetro do orifício ou bocal 6 a 12 (Difusor de gás / gas lens) (Orifice or gas cup size) Método de goivagem N/A (Method of back gouging) Fechado ou fora de câmara N/A (Closed or out chamber) Eletrodos múltiplos ou únicos Único (Multiple or single electrodes) (single) Oscilação N/A (Oscillation) Outro N/A (Other)																													
Camada(s) de solda (Weld layer(s))	Processo (Process)	Material de edição (Filler metal) Classe Diâmetro (Class) (Diameter)		Corrente (Current) Tipo / Polar. Faixa amp. (Type / Polar.) (Amp. range)	Faixa volt. (Volt range.)	Faixa de veloc. de avanço (Travel speed range)	Outro (Other)																									
1	GTAW	ER90S-B3	2.5 mm	CC-	75 a 100	16 a 20	N/A																									
2	GTAW	ER90S-B3	3.25 mm	CC-	90 a 140	20 a 26	N/A																									
Demais	SMAW	E9018-B3	2.5 mm	CC+	80 a 120	22 a 24	N/A																									
Demais	SMAW	E9018-B3	3.25 mm	CC+	110 a 150	24 a 28	N/A																									
Demais	SMAW	E9018-B3	4.0 mm	CC+	140 a 195	26 a 30	N/A																									
Data 21/11/06 (Date)	Tiago Alexandre de Souza Técnico de Solda			Data 21/11/06 (Date)	Eng. Rauler P. Marques																											
[Approved by]																																

ANEXO 2 – Registro de Qualificação de Soldador (RQS)

QW-484A REGISTRO DA QUALIFICAÇÃO DE DESEMPENHO DE SOLDADORES (RQS)			
QW-484A RECORD OF WELDER PERFORMANCE QUALIFICATION (WPQ)			
NOME DA EMPRESA COMPANY NAME	FAS: N° SWS N°	141/08	DATA: DATE
NOME DO SOLDADOR WELDER NAME	JOSÉ LUIZ SOUZA OLIVEIRA	PRONT. CLOCK N°	SINETE N° STAMP N°
DE ACORDO COM EPS N° ACCORDING WPS N°	30/1	REV. REV.	2
PROCESSO (S) DE SOLDAGEM USADO WELDING PROCESS (ES) USED	GTAW / SMAW	DATA DATE	20/10/2006
MATERIAL (AIS) BASE SOLDADO BASE MATERIAL (S) WELDED	SA106 GR B x SA106 GR B	TIPO TYPE	MANUAL
	ESPESSURA THICKNESS	18,3 mm	
VARIÁVEIS P/ PROCESSO MANUAL OU SEMI-AUTOMÁTICO (QW-350) VARIABLES FOR MANUAL OR SEMIAUTOMATIC PROCESS (QW-350)	VALORES REAIS ACTUAL VALUES	FAIXA QUALIFICADA RANGE QUALIFIED	
COBRE-JUNTA (QW-402) BACKING (QW-402)	SEM COBRE-JUNTA (GTAW) COM COBRE-JUNTA (SMAW)	SEM E COM COBRE-JUNTA (GTAW) COM COBRE-JUNTA (SMAW)	
P N° ou S N° (QW-403) P N° or S N° (QW-403)	P1 x P1	P1 a P11, P34, P41 a P49	
() CHAPA OU (X) TUBO (QW-403) PLATE OR PIPE (QW-403)	Ø 168,3 mm	Ø > 73,0 mm	
ESPECIF. METAL DE ADIÇÃO (SFA) CLASSIFICAÇÃO. (QW-404) FILLER METAL SPECIFICATION (SFA) CLASSIFICATION (QW-404)	SFA 5.18 / AWS E70S-3 SFA 5.1 / AWS E7018	TODOS DE MESMO FN°	
F N° (QW-404) F N° (QW-404)	GTAW 6 SMAW 4	GTAW 6 SMAW 1 a 4	
INSERTO CONSUMÍVEL P/ GTAW (QW-404) CONSUMABLE INSERT FOR GTAW (QW-404)	SEM	SEM	
ESPESSURA DO METAL DE SOLDA DEPOSITADO PARA CADA PROCESSO (QW-404) WELD DEPOSIT THICKNESS FOR EACH WELDING PROCESS (QW-404)	GTAW (4,5 mm) SMAW (13,0 mm)	GTAW (9 mm) SMAW (ILIMITADO)	
NÚMERO DE CAMADAS NUMBER OF LAYERS	GTAW 3 CAMADAS MÍNIMO SMAW 3 CAMADAS MÍNIMO	☐ SIM ☒ NÃO	
POSIÇÃO DE SOLDAGEM (QW-404) WELDING POSITION (QW-404)	6 G	TODAS	
PROGRESSÃO [ASCENDENTE / DESCENDENTE (QW-405)] PROGRESSION [UPHILL/DOWNHILL (QW-405)]	ASCENDENTE	ASCENDENTE	
GÁS DE PROTEÇÃO DA RAIZ P/ GTAW OU GMAW (QW-408) BACKING GAS FOR GTAW OR GMAW (QW-408)	SEM GÁS DE PROTEÇÃO	SEM E COM GÁS DE PROTEÇÃO	
MODO DE TRANSFERÊNCIA P/ GMAW / FCAW (QW-409) GMAW/FCAW TRANSFER MODE (QW-409)	N/A	N/A	
TIPO DE CORRENTE DE SOLDAGEM / POLARIDADE (QW-409) WELDING CURRENT TYPE/POLARITY (QW-409)	GTAW (CC-) SMAW (CC+)	GTAW (CC-) SMAW (CC+)(CC-)(CA)	
RESULTADO DOS TESTES DE DOBRAMENTO GUIADO GUIDED BEND TESTS RESULTS			
TIPO E FIGURA N° TYPE AND FIGURE N°	RESULTADO RESULT	TIPO E FIGURA N° TYPE AND FIGURE N°	RESULTADO RESULT
INSPEÇÃO VISUAL (QW-302.4) VISUAL EXAMINATION (QW-302.4)			
OBSERVAÇÃO REMARKS	N/A		
ENSAIOS RADIOGRÁFICOS (QW-304 E QW-305) RADIOGRAPHIC TEST (QW-304 and QW-305)			
RESULTADO DO EXAME RADIOGRÁFICO RADIOGRAPHIC TEST RESULTS (QW 304 AND QW 305)	APROVADO APPROVED	RELATÓRIO N° REPORT N°	325/08
		EMITIDO POR ISSUED BY	JLM
RESULTADO TESTE DE FRATURA FRACTURE TEST RESULTS	N/A	TESTE PARA SOLDA EM ÂNGULO [QW-462.4(b) E QW-462.4(c)] FILLET WELD TEST [QW-462.4 (b) and QW-462.4 (C)]	N/A
RESULTADO DA MACROGRAFIA MACROTEST RESULTS	N/A	COMPRIMENTO E % DOS DEFEITOS LENGTH AND PERCENT OF DEFECTS	N/A
DIMENSÃO DO CORDÃO (PERNA) FILLET SIZE (LEG)	N/A	CONVEXIDADE / CONCAVIDADE CONVEXITY / CONCAVITY	N/A
SOLDAGEM DA PEÇA DE TESTE CONDUZIDA POR WELDING TESTS CONDUCTED BY	SEBASTIÃO JOSÉ SANTOS MEIRA		
TESTE MECÂNICOS CONDUZIDO POR MECHANICAL TESTS CONDUCTED BY	N/A		
NOS CERTIFICAMOS QUE AS DECLARAÇÕES FEITAS NESTE REGISTRO SÃO CORRETAS E QUE OS CORPOS DE PROVA FORAM WE CERTIFY THAT THE STATEMENTS IN THIS RECORD ARE CORRECT AND THAT THE TEST COUPONS WERE PREPARED, WELDED AND TESTED PREPARADOS, SOLDADOS E TESTADOS DE ACORDO COM OS REQUISITOS DA SEÇÃO IX DO CÓDIGO ASME. IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF SECTION IX OF THE ASME CODE			
ELABORADO POR PREPARED BY	APROVADO POR APPROVED BY	ENTIDADE CERTIFICADORA CERTIFYING ENTITY	
Eng.º Helger P. Marques	Eng.º Helger P. Marques		
DATA DATE	DATA DATE	DATA DATE	

**QW-484A REGISTRO DA QUALIFICAÇÃO DE DESEMPENHO
DE SOLDADORES (RQS)**

QW-484A RECORD OF WELDER PERFORMANCE QUALIFICATION (WPQ)

NOME DA EMPRESA COMPANY NAME		JA		FAS: N° BWS N°	140/08	DATA: DATE	5/3/2008
NOME DO SOLDADOR WELDER NAME		JOSÉ LUIZ SOUZA OLIVEIRA		FRONT. CLOCK N°		SINETE N° STAMP N°	S-322
DE ACORDO COM EPS N° ACCORDING WPS N°		41/1		REV. REV.	2	DATA DATE	25/10/2006
PROCESSO (S) DE SOLDAGEM USADO WELDING PROCESS (ES) USED		GTAW		TIPO TYPE		MANUAL	
MATERIAL (AIS) BASE SOLDADO BASE MATERIAL (S) WELDED		SA178 GRA x SA178 GRA		ESPESSURA THICKNESS		4,2 mm	
VARIÁVEIS P/ PROCESSO MANUAL OU SEMI-AUTOMÁTICO (QW-350) VARIABLES FOR MANUAL OR SEMIAUTOMATIC PROCESS (QW-350)				VALORES REAIS ACTUAL VALUES		FAIXA QUALIFICADA RANGE QUALIFIED	
COBRE-JUNTA (QW-402) BACKING (QW-402)				SEM COBRE JUNTA		COM E SEM COBRE-JUNTA	
P N° ou S N° (QW-403) P N° or S N° (QW-403)				P1 x P1		P1 a P11, P34, P41 a P49	
() CHAPA OU (X) TUBO (QW - 403) PLATE OR PIPE (QW-403)				Ø 50,8 mm		Ø > 25 mm	
ESPECIF. METAL DE ADIÇÃO (SFA) CLASSIFICAÇÃO. (QW-404) FILLER METAL SPECIFICATION (SFA) CLASSIFICATION (QW-404)				SFA 5.18 / AWS ER70S-3		TODOS DE MESMO FN°	
F N° (QW-404) F N° (QW-404)				6		6	
INSERTO CONSUMÍVEL P/ GTAW (QW-404) CONSUMABLE INSERT FOR GTAW (QW-404)				SEM		SEM	
ESPESSURA DO DEPÓSITO DE SOLDA PARA CADA PROCESSO (QW-404) WELD DEPOSIT THICKNESS FOR EACH WELDING PROCESS (QW-404)				4,2 mm		8,4 mm	
NÚMERO DE CAMADAS NUMBER OF LAYERS				GTAW 3 CAMADAS MÍNIMO		☒ SIM ☐ NÃO	
POSIÇÃO DE SOLDAGEM (QW-404) WELDING POSITION (QW-405)				6 G		TODAS	
PROGRESSÃO [ASCENDENTE / DESCENDENTE (QW-405)] PROGRESSION [UPHILL/DOWNHILL (QW-405)]				ASCENDENTE		ASCENDENTE	
GÁS DE PROTEÇÃO DA RAIZ P/ GTAW OU GMAW (QW-408) BACKING GAS FOR GTAW OR GMAW (QW-408)				SEM GÁS PROTEÇÃO		COM OU SEM GÁS DE PROTEÇÃO	
MODO DE TRANSFERÊNCIA P/ GMAW / FCAW (QW-409) GMAW/FCAW TRANSFER MODE (QW-409)				N/A		N/A	
TIPO DE CORRENTE DE SOLDAGEM / POLARIDADE (QW-409) WELDING CURRENT TYPE/POLARITY (QW-409)				GTAW (CC-)		GTAW (CC-)	
RESULTADO DOS TESTES DE DOBRAMENTO GUIADO GUIDED BEND TESTS RESULTS							
TIPO E FIGURA N° TYPE AND FIGURE N°		RESULTADO RESULT		TIPO E FIGURA N° TYPE AND FIGURE N°		RESULTADO RESULT	
-		-		-		-	
INSPEÇÃO VISUAL (QW-302.4) VISUAL EXAMINATION (QW-302.4)							
OBSERVAÇÃO REMARKS							
N/A							
ENSAIOS RADIOGRÁFICOS (QW-304 E QW-305) RADIOGRAPHIC TEST (QW-304 and QW-305)							
RESULTADO DO EXAME RADIOGRÁFICO RADIOGRAPHIC TEST RESULTS (QW 304 AND QW 305)		APROVADO		RELATÓRIO N° REPORT N°		321/08	
				EMITIDO POR ISSUED BY		JLM	
TESTE PARA SOLDA EM ÂNGULO [QW-462.4(b) e QW-462.4(c)] FILLET WELD TEST (QW-462.4 (b) and QW-462.4 (C)]							
RESULTADO TESTE DE FRATURA FRACTURE TEST RESULTS		N/A		COMPRIMENTO E % DOS DEFECTOS LENGTH AND PERCENT OF DEFECTS		N/A	
RESULTADO DA MACROGRAFIA MACRO TEST RESULTS		N/A					
DIMENSÃO DO CORDÃO (PERNA) FILLET SIZE (LEG)		N/A		CONVEXIDADE / CONCAVIDADE CONVEXITY / CONCAVITY		N/A	
SOLDAGEM DA PEÇA DE TESTE CONDUZIDA POR WELDING TESTS CONDUCTED BY				SEBASTIÃO JOSE SANTOS MEIRA			
TESTE MECANICOS CONDUZIDO POR MECHANICAL TESTS CONDUCTED BY				N/A			
NOS CERTIFICAMOS QUE AS DECLARAÇÕES FEITAS NESTE REGISTRO ESTÃO CORRETAS E QUE OS CORPOS DE PROVA FORAM WE CERTIFY THAT THE STATEMENTS IN THIS RECORD ARE CORRECT AND THAT THE TEST COUPONS WERE PREPARED, WELDED AND TESTED PREPARADOS, SOLDADOS E TESTADOS DE ACORDO COM OS REQUISITOS DA SEÇÃO IX DO CÓDIGO ASME. IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF SECTION IX OF THE ASME CODE							
ELABORADO POR PREPARED BY		APROVADO POR APPROVED BY		ENTIDADE CERTIFICADORA CERTIFYING ENTITY			
DATA DATE		5/3/2008		DATA DATE		5/3/2008	
				DATA DATE			

ANEXO 3 – Instrução de tratamento térmico pós soldagem P22

		<p align="center">Engenharia Industrial Instrução de Tratamento Térmico</p>						Data: 27/12/11	Nº: _____ Rev.: 00
								Local: Terceiro	OP.: TESTE
								Cliente: ESTUDO	
Tipo de Tratamento Térmico: Alívio de Tensões									
Norma Aplicável: ASME SEC.I - PW-39 EDIÇÃO 2010.									
Método de Execução:									
Forno Sermatec		Localizado Sermatec		Forno Terceiro		Localizado Terceiro		X	
Equipamento:	Estudo p/ Tratamento Térmico								
Sub-conjunto:									
Desenho / Rev.	Descrição			Dimensões			Quantidade	Peso (kg)	
N/A	N/A	Tipo	Material	Grau	Diâmetro (ø)	Espessura	Comprimento	n/a	
		Tubo	ASTM A335 P22		323,8	21,4	n/a	n/a	
Parâmetros do Tratamento Térmico									
Temperatura de Controle durante o Aquecimento / Resfriamento						425 °C			
Variação Máxima durante o Aquecimento						120 °C			
Máxima Taxa de Aquecimento						200 °C/h			
Temperatura do Patamar						675 a 700 °C			
Tempo de Patamar						71 minutos			
Diferença Máxima de Temperatura durante o Tempo de Patamar						83 °C			
Máxima Taxa de Resfriamento						260 °C/h			
Distância Máxima entre os Termopares						1,6 metros			
Documentos Requeridos:									
1 - Gráfico do Tratamento Térmico									
2 - Registros dos Certificados de Calibração									
3 - Certificados de Calibração dos Termopares									
4 - Mapeamento dos Termopares (Número dos Termopares x Cor Correspondente no Gráfico de Tratamento Térmico)									
Observações:									
1 - Os suportes para fixação dos Termopares deverão ser soldados pela Sermatec de acordo com a EPS Aplicável.									
2 - Os suportes de fixação dos Termopares devem ser de materiais rastreados e localizados conforme desenho (quando aplicável)									
3 - É proibido qualquer tipo de soldagem pelo fornecedor do Tratamento Térmico no equipamento									
4 - Os suportes de fixação serão removidos através de lixamento, e na região deverá ser executado ensaio de líquido penetrante.									
<p>Temperatura (°C)</p> <p>Tempo (min)</p>									
Elaborado	Aprovado				Inspetor do Cliente				
Bruno Barbieri									

ANEXO 4 – Certificado de qualidade de metal de adição (TIG)

CERTIFICADO DA QUALIDADE
WERKSZEUGNIS / WORKS CERTIFICATE

Certificado emitido por processamento de dados conforme EN 10.204-2.2

Certificado Werkszeugnis Certificate	340.542	Pedido No Auftrag Nr Order No.		Corrida Charge Heat No.	247.676
--	---------	--------------------------------------	--	-------------------------------	---------

Empresa Firma Firm					
Material Werkstoff Material	BOEHLER	CM 2 IG-B	3,2	Fatura Rechnungs - Nr Invoice No.	29.750
	AWS	A5.28/5.28M:05	ER 90S-B3		
	ASME	5.28/5.28M:07	ER 90S-B3		60,000
			A:2008		

ANÁLISE QUÍMICA %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu						
0,090	0,490	0,460	0,009	0,013	0,090	2,400	0,970	0,210	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ENSAIOS MECÂNICOS

Limite Elástico Streckgrenze Yield Strength	Resistencia à Tração Zugfestigkeit Tensile Strength	Alongamento Dehnung Elongation
540 MPa	620 MPa	17 %
Resistencia ao Impacto Kerbschlagarbeit Impact	Dureza Härte Hardness	

Sao Paulo, 21 de JANEIRO de 2.011

Inspecionado em...: AGOSTO /2.010

Outros elementos: O total não excede 0,50 por cento.

RADIOGRAFIA: O produto atende aos requisitos da norma.

Em 59429

Impresso por computador, válido sem assinatura

CQ-063/REV.04-09/2007

00021 00000

Sistema de garantia da qualidade certificado para ISO 9001-2000 pelo BRTUV

ANEXOS 5 – Certificados de qualidade dos lotes dos eletrodos revestidos

*Recebemos certificado em anexo
Bom trabalho.*

CERTIFICADO DE QUALIDADE
TEST REPORT

NUMERO
NUMBER
5670

CLIENTE / CUSTOMER
FENIX COM E DISTRIBUIDORA DE FERRAGENS LTDA EPP

QUANTIDADE
QUANTITY
40,000

NOTA FISCAL
DISPATCH LIST OF
402,707

DESCRIÇÃO DO MATERIAL
DESCRIPTION OF MATERIAL
ELETRODO ABR 1100S - 4,00

SÉRIE Nº
SERIES Nº
941393

NORMA
SPECIFICATION
AWS A 5.0-10 E 7018-B3 / ASME SFA 3.3
AB 1007 E 7018-B3

ANÁLISE QUÍMICA / CHEMICAL ANALYSIS

	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Al
C	0,08	0,75	2,21	0,029	0,35	0,015	0,010	0,017
Fe								
RESTD								
Si								
Al								

Em 57115

PROPRIEDADES MECÂNICAS / MECHANICAL PROPERTIES

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO TENSILE STRENGTH MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO YIELD POINT MPa	ALONGAMENTO ELONGATION (%)	DUREZA HARDNESS	RESIST. AO IMPACTO CHARPY V JOULE °C
620	520	37		

RESULTADOS CONFORME NORMA AWS/ASME SFA-5-01-98 SCHEDULE F X OUTROS.

OBSERVAÇÕES / OBSERVATION:
NOVO ENDEREÇO: RUA APOSTOLADO SOARES, 92 - JARDIM LINDA - SÃO PAULO - SP - CEP 04070-070
O SITE ELETRONIC NAO CONTEM EVIDÊNCIAS LABORATORIAIS EM 208 COMPROVADO

LOCAL / DATA
PLACE / DATE
SÃO PAULO, 25/05/2019

CONTROLE DE QUALIDADE
QUALITY CONTROL
DORLENE APARECIDO ELETROFARMACIA

SISTEMA DE NOTAS CERTIFICADO

AV

Ambrosio Engenharia

ENR

NBR-13270/2003-2008

CERTIFICADO DE QUALIDADE TEST REPORT

NÚMERO
NUMBER

31012

CLIENTE / CUSTOMER

QUANTIDADE
QUANTITY

49.000

NOTA FISCAL
DISPATCH LIST OF

001587

DESCRIÇÃO DO MATERIAL
DESCRIPTION OF MATERIAL

SÉRIE Nº
SERIES Nº

020087

NORMA
SPECIFICATION

AWSD # 3.3-TB e 7.02D-BL PWDR ENCL. 2
AC 1.0007 e 9.019-BL

ANÁLISE QUÍMICA / CHEMICAL ANALYSIS

C	Si	Mn	P	S	Fe	F	Al	Cu
0,009	0,32	0,80	0,008	0,012	0,15	0,020	0,012	0,010
B	V	Cr	Co	Ni	Mo	As	Se	Ag
-	-	0,010	-	-	-	-	-	-
Ca	Zr	Ti	Hf	Nb	Sn	Pb	In	Te
-	-	-	-	-	-	-	-	-

EM 57114

PROPRIEDADES MECÂNICAS / MECHANICAL PROPERTIES

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO TENSILE STRENGTH MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO YIELD POINT MPa	ALONGAMENTO ELONGATION (%)	DUREZA HARDNESS	RESIST. AO IMPACTO CHARPY V JOULE °C
520	320	12	-	-

RESULTADOS CONFORME NORMA AWS/ASME SFA-5-01-98 SCHEDULE P X OUTROS.

OBSERVAÇÕES / OBSERVATION:

NOTA: EXEMPLO DE COMO DEVERIA SER O RESULTADO - NÃO FAZER - SE LIT. 0407-970
"SE ELENTRO DO LOTE FOR ENCONTRADA APLICANDO EM SEU COMISSÃO"

LOCAL / DATA
PLACE / DATE

SABOIA, 26/08/2010

CONTROLE DE QUALIDADE
QUALITY CONTROL

POSICIONAMENTO ELETROMECÂNICO

CERTIFICADO DE QUALIDADE
TEST REPORT

NÚMERO
NUMBER
 33996

CLIENTE / CUSTOMER

RENIOR COM E DISTRIBUIDORA DE FERRAGENS LTDA EPP

QUANTIDADE
QUANTITY

440.000

NOTA FISCAL
DISPATCH LIST OF

000669

DESCRIÇÃO DO MATERIAL
DESCRIPTION OF MATERIAL

SÉRIE Nº
SERIES Nº
 045220

ELETRODO BGR 91803 - 3.25

NORMA
SPECIFICATION

AWS A 5.5-P6 E 9018-B3 / ASME SFA5.1
 AB.2007 E 9018-B3

ANÁLISE QUÍMICA / CHEMICAL ANALYSIS

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Cu
0.002	0.35	0.76	2.35	0.015	0.98	0.025	0.015	0.012
W	V	Fe	Al	Ti	Co	Sb	As	Se
		RESTO						
Cd	Zn	Pb	H	Ag				

PROPRIEDADES MECÂNICAS / MECHANICAL PROPERTIES

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO TENSILE STRENGTH MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO YIELD POINT MPa	ALONGAMENTO ELONGATION (%)	DUREZA HARDNESS	RESIST. AO IMPACTO CHARPY V JOULE °C
820	530	17		

RESULTADOS CONFORME NORMA AWS/ASME SFA-5-01-98 SCHEDULE F X OUTROS.

OBSERVAÇÕES / OBSERVATION:

NOVO ENDEREÇO: RUA AGOSTINHO TOSNERI, 92 - JARDIM BOTANICA - SÃO PAULO - SP - CEP 04690-070

ESTE ELETRODO NÃO CONTEM SUBSTÂNCIAS CANCERÍGENAS EM SUA COMPOSIÇÃO

Em 59551

LOCAL / DATA
PLACE / DATE

SÃO PAULO, 30/06/2010

CONTROLE DE QUALIDADE
QUALITY CONTROL

DOCUMENTO APROVADO ELETRONICAMENTE

ANEXOS 6 – Gráficos do ensaio de CTOD para obtenção de F_m e V_p de carga máxima.

Força VS COD - 1A MA

Força VS COD - 1A MB

Força VS COD - 1A ZTA

Força VS COD - 1B MA

Força VS COD - 1B ZTA

Força VS COD - 1C ZTA

Força VS COD - 1C MA

Força VS COD - 2A MB

Força VS COD - 2A ZTA

Força VS COD - 2B MA

Força VS COD - 2B ZTA

Força VS COD - 2C ZTA

Força VS COD - 3A MA

Força VS COD - 3A MB

Força VS COD - 3A ZTA

Força VS COD - 3B MA

Força VS COD - 3B ZTA

Força VS COD - 3C MA

Força VS COD - 3C ZTA

ANEXOS 7 – Planilhas de cálculos de CTOD.

LABORATÓRIO DE ENSAIOS E ANÁLISES DE MATERIAIS
CERTIFICADO DE ENSAIO DE TENACIDADE A FRATURA
FRACTURE TOUGHNESS CERTIFICATE

CERTIFICADO N°
Certificate nr.
TUBO 01

Equipamento	MTS 810 250kN	Data Inicio	06/04/2014	Operador	Carlos Zampieri
Tipo de CP	SEN(B) / SE(B)	Data Fim		Responsável	Carlos Zampieri

Id do C.P	Geometria e Fator Geométrico							Condição Geométrica do CP			Propriedades			Pré Trinca	
	S (mm)	B (mm)	W (mm)	a (mm)	a _i * (mm)	a _i /W	f(a _i /W)	1<W/B<4	0,45W<a _i <0,55W	Situação	S _{ys} (MPa)	S _{ts} (MPa)	E (Gpa)	F ₀ (N)	F _i (N)
MB 1	76,00	19,08	19,09	7,75	10,00	0,52	2,87608	OK	OK	Liberado	402,97	596,35	207,00	8065,58	5182,47
ZTA 1A	76,00	18,97	19,02	7,67	10,00	0,53	2,89449	OK	OK	Liberado	487,00	487,00	207,00	7829,69	4944,99
ZTA 1B	76,00	18,91	18,92	7,65	10,00	0,53	2,92135	OK	OK	Liberado	487,00	487,00	207,00	7695,29	4820,66
ZTA 1C	76,00	18,97	18,99	7,48	10,00	0,53	2,90248	OK	OK	Liberado	487,00	487,00	207,00	8051,99	4912,16
MA 1A	76,00	19,03	19,04	7,74	10,00	0,53	2,8892	OK	OK	Liberado	557,00	557,00	207,23	8904,45	5698,85
MA 1B	76,00	18,91	18,94	7,65	10,00	0,53	2,91593	OK	OK	Liberado	557,00	557,00	207,23	8832,65	5538,32
MA 1C	76,00	18,95	18,97	7,51	10,00	0,53	2,90784	OK	OK	Liberado	557,00	557,00	207,23	9119,90	5587,35
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!

Obs: Planilha válida para Cps com W_{máx} de 50mm e pré trinca por fadiga maior que 1,5mm

*af estimado para cálculos de carga final Fi de propagação da pré trinca.

LABORATÓRIO DE ENSAIOS E ANÁLISES DE MATERIAIS
CERTIFICADO DE ENSAIO DE TENACIDADE A FRATURA
 FRACTURE TOUGHNESS CERTIFICATE

CERTIFICADO N°
 Certificate nr.
TUBO 01

Equipamento	MTS 810 250kN	Data Inicio	06/04/2014	Operador	Carlos Zampieri
Tipo de CP	SEN(B) / SE(B)	Data Fim	00/01/1900	Responsável	Carlos Zampieri

		Passos de propagação da Pré-Trinca														Qualificação			
F R		F ₀ (kN)		F _{15%} (kN)		F _{30%} (kN)		F _{45%} (kN)		F _{60%} (kN)		F _{75%} (kN)		F _i (kN)		K _{máx} MPaVm	ΔK MPaVm	ΔK/E MPaVm	Qual.
		Target	Ampli	Target	Ampli	Target	Ampli	Target	Ampli	Target	Ampli	Target	Ampli	Target	Ampli				
MB 1	0,1	-4,436	3,630	-4,198	3,435	-3,960	3,240	-3,722	-3,046	-3,485	2,851	-3,247	2,656	-2,850	2,332	26,80	24,12	1,17E-04	OK
ZTA 1A	0,1	-4,306	3,523	-4,068	3,329	-3,830	3,134	-3,592	-2,939	-3,354	2,744	-3,116	2,550	-2,720	2,225	27,35	24,62	1,19E-04	OK
ZTA 1B	0,1	-4,232	3,463	-3,995	3,269	-3,758	3,075	-3,521	-2,881	-3,284	2,687	-3,047	2,493	-2,651	2,169	24,87	22,38	1,08E-04	OK
ZTA 1C	0,1	-4,429	3,623	-4,170	3,411	-3,911	3,200	-3,651	-2,988	-3,392	2,776	-3,133	2,564	-2,702	2,210	27,04	24,34	1,18E-04	OK
MA 1A	0,1	-4,897	4,007	-4,633	3,791	-4,369	3,574	-4,104	-3,358	-3,840	3,141	-3,575	2,925	-3,134	2,564	30,75	27,67	1,34E-04	OK
MA 1B	0,1	-4,858	3,975	-4,586	3,752	-4,314	3,530	-4,043	-3,308	-3,771	3,085	-3,499	2,863	-3,046	2,492	26,92	24,23	1,17E-04	OK
MA 1C	0,1	-5,016	4,104	-4,725	3,866	-4,433	3,627	-4,142	-3,389	-3,850	3,150	-3,559	2,912	-3,073	2,514	26,72	24,05	1,16E-04	OK
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####

Este relatório não pode ser cedido ou copiado sem prévia autorização da Welding

FR-LAB-XXX-XX

LABORATÓRIO DE ENSAIOS E ANÁLISES DE MATERIAIS
CERTIFICADO DE ENSAIO DE TENACIDADE A FRATURA
 FRACTURE TOUGHNESS CERTIFICATE

CERTIFICADO N°
 Certificate nr.
TUBO 01

Equipamento	MTS 810 250kN	Data Inicio	06/04/2014	Operador	Carlos Zampieri
Tipo de CP	SEN(B) / SE(B)	Data Fim	00/01/1900	Responsável	Carlos Zampieri

Medições da Trinca (mm)	a	Medições da Trinca da Amostra Após o Teste													
		MB 1	ZTA 1A	ZTA 1B	ZTA 1C	MA 1A	MA 1B	MA 1C	0	0	0	0	0	0	0
	L ₁	2,5689	2,6968	2,1714	3,6133	3,1419	2,2829	2,8739							
	L ₂	2,6606	3,1082	2,7595	2,8003	2,9142	2,2829	1,8411							
	L ₃	3,3487	3,7024	3,3476	3,7488	3,4607	2,9677	3,2332							
	L ₄	3,3946	3,5653	3,0309	3,9747	3,5062	2,8764	3,3679							
	L ₅	3,3487	3,7938	3,2571	3,5230	3,3696	2,8764	2,4698							
	L ₆	3,1652	3,3367	2,8499	3,9747	3,4607	2,7851	3,2781							
	L ₇	3,3946	3,6567	3,2118	3,9747	3,5062	2,9677	3,3230							
	L ₈	3,3487	3,7481	3,3023	3,7037	3,4151	2,8764	2,8290							
	L ₉	3,0735	3,6110	3,2118	3,2972	3,2785	2,6481	2,1555							

Cálculos da Pré Trinca Pós Teste (mm)	$a_1+a_2/2$	10,365	10,573	10,115	10,687	10,768	9,9329	9,8675	0	0	0	0	0	0	0	0
	a_0	10,961	11,210	10,735	11,155	11,118	10,435	10,387	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	$a_{\max}$	11,1446	11,4638	10,9976	11,4547	11,2462	10,6177	10,8779	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	$a_{\min}$	10,3189	10,3668	9,8214	10,2803	10,6542	9,9329	9,3511	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	$a_{\max} - a_{\min}$	0,8257	1,0970	1,1762	1,1743	0,5920	0,6849	1,5268	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	20% a_0	2,1922	2,2419	2,1469	2,2311	2,2236	2,087	2,0773	0	0	0	0	0	0	0	0
Calculos Fatores	a_f/W	0,5742	0,5894	0,5674	0,5874	0,5839	0,551	0,5475	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
	$f(a_f/W)$	3,4242	3,6219	3,3409	3,5959	3,5493	3,1528	3,1157	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Validação	$a_0 - a > 1,3$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
	$\Delta a \leq 10\% a$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	$0,45 \leq a_f/W \leq 0,70$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Este relatório não pode ser cedido ou copiado sem prévia autorização da Welding

FR-LAB-XXX-XX

LABORATÓRIO DE ENSAIOS E ANÁLISES DE MATERIAIS
CERTIFICADO DE ENSAIO DE TENACIDADE A FRATURA
FRACTURE TOUGHNESS CERTIFICATE

CERTIFICADO N°
Certificate nr.
TUBO 01

Equipamento	MTS 810 250kN	Data Inicio	06/04/2014	Operador	Carlos Zampieri
Tipo de CP	SEN(B) / SE(B)	Data Fim	00/01/1900	Responsável	Carlos Zampieri

Id do C.P	Geometria e Fator Geométrico						Propriedades do Material				Dados do Ensaio e Resultados						
	S (mm)	B (mm)	W (mm)	a _f (mm)	a _f /W	f(a _f /W)	σ _{ys} (MPa)	σ _{ts} (MPa)	E (Gpa)	ν	z (mm)	F _q (kN)	F (kN)	V _p (mm)	K _q (MPa√m)	K _q =K _{IC} ?	δ (μm)
MB 1	76,00	19,08	19,09	10,96	0,57	3,42	402,97	596,35	207,00	0,30	0,00		15,75	2,12	0,00	Sim	521,88
ZTA 1A	76,00	18,97	19,02	11,21	0,59	3,62	487,00	487,00	207,00	0,30	0,00		15,07	1,77	0,00	Sim	416,92
ZTA 1B	76,00	18,91	18,92	10,73	0,57	3,34	487,00	487,00	207,00	0,30	0,00		15,99	1,24	0,00	Sim	320,06
ZTA 1C	76,00	18,97	18,99	11,16	0,59	3,60	487,00	487,00	207,00	0,30	0,00		14,49	1,62	0,00	Sim	383,79
MA 1A	76,00	19,03	19,04	11,12	0,58	3,55	557,00	557,00	207,23	0,30	0,00		13,39	0,14	0,00	Sim	52,36
MA 1B	76,00	18,91	18,94	10,44	0,55	3,15	557,00	557,00	207,23	0,30	0,00		14,56	0,04	0,00	Sim	29,09
MA 1C	76,00	18,95	18,97	10,39	0,55	3,12	557,00	557,00	207,23	0,30	0,00		9,74	0,07	0,00	Sim	24,96
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Este relatório não pode ser cedido ou copiado sem prévia autorização da Welding

FR-LAB-XXX-XX

LABORATÓRIO DE ENSAIOS E ANÁLISES DE MATERIAIS
CERTIFICADO DE ENSAIO DE TENACIDADE A FRATURA
FRACTURE TOUGHNESS CERTIFICATE

CERTIFICADO Nº
Certificate nr.
TUBO 02

Equipamento	MTS 810 250kN	Data Inicio	06/04/2014	Operador	Carlos Zampieri
Tipo de CP	SEN(B) / SE(B)	Data Fim		Responsável	Carlos Zampieri

Id do C.P	Geometria e Fator Geométrico							Condição Geométrica do CP			Propriedades			Pré Trinca	
	S (mm)	B (mm)	W (mm)	a (mm)	a _i * (mm)	a _i /W	f(a _i /W)	1<W/B<4	0,45W<a _i <0,55W	Situação	S _{ys} (MPa)	S _{ts} (MPa)	E (Gpa)	F ₀ (N)	F _i (N)
MB 2	76,00	18,71	18,94	7,56	10,00	0,53	2,91593	OK	OK	Liberado	402,97	596,35	207,00	7965,06	4915,64
ZTA 2A	76,00	18,96	18,98	7,51	10,00	0,53	2,90516	OK	OK	Liberado	635,00	635,00	207,00	10420,66	6387,36
ZTA 2B	76,00	18,97	19,00	7,51	10,00	0,53	2,89981	OK	OK	Liberado	635,00	635,00	207,00	10462,55	6419,22
ZTA 2C	76,00	18,94	18,95	7,56	10,00	0,53	2,91323	OK	OK	Liberado	635,00	635,00	207,00	10264,97	6338,06
MA 2A	76,00	18,96	19,00	7,74	10,00	0,53	2,89981	OK	OK	Liberado	616,00	616,00	206,01	9742,09	6223,87
MA 2B	76,00	18,96	18,99	7,75	10,00	0,53	2,90248	OK	OK	Liberado	616,00	616,00	206,01	9707,52	6210,05
MA 2C	76,00	18,97	19,01	7,66	10,00	0,53	2,89715	OK	OK	Liberado	616,00	616,00	206,01	9903,67	6241,00
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!

Obs: Planilha válida para Cps com W_{máx} de 50mm e pré trinca por fadiga maior que 1,5mm

*af estimado para cálculos de carga final Fi de propagação da pré trinca.

LABORATÓRIO DE ENSAIOS E ANÁLISES DE MATERIAIS
CERTIFICADO DE ENSAIO DE TENACIDADE A FRATURA
 FRACTURE TOUGHNESS CERTIFICATE

CERTIFICADO N°
 Certificate nr.
TUBO 02

Equipamento	MTS 810 250kN	Data Inicio	06/04/2014	Operador	Carlos Zampieri
Tipo de CP	SEN(B) / SE(B)	Data Fim	00/01/1900	Responsável	Carlos Zampieri

		Passos de propagação da Pré-Trinca														Qualificação			
	F R	F ₀ (kN)		F _{15%} (kN)		F _{30%} (kN)		F _{45%} (kN)		F _{60%} (kN)		F _{75%} (kN)		F _i (kN)		K _{máx} MPaVm	ΔK MPaVm	ΔK/E MPaVm	Qual.
		Target	Ampli	Target	Ampli	Target	Ampli	Target	Ampli	Target	Ampli	Target	Ampli	Target	Ampli				
MB 2	0,1	-4,381	3,584	-4,129	3,378	-3,878	3,173	-3,626	-2,967	-3,374	2,761	-3,123	2,555	-2,704	2,212	25,14	22,62	1,09E-04	OK
ZTA 2A	0,1	-5,731	4,689	-5,399	4,417	-5,066	4,145	-4,733	-3,873	-4,400	3,600	-4,068	3,328	-3,513	2,874	34,90	31,41	1,52E-04	OK
ZTA 2B	0,1	-5,754	4,708	-5,421	4,435	-5,087	4,162	-4,754	-3,889	-4,420	3,616	-4,087	3,344	-3,531	2,889	29,17	26,26	1,27E-04	OK
ZTA 2C	0,1	-5,646	4,619	-5,322	4,354	-4,998	4,089	-4,674	-3,824	-4,350	3,559	-4,026	3,294	-3,486	2,852	33,56	30,20	1,46E-04	OK
MA 2A	0,1	-5,358	4,384	-5,068	4,146	-4,778	3,909	-4,487	-3,672	-4,197	3,434	-3,907	3,197	-3,423	2,801	19,27	17,34	8,42E-05	OK
MA 2B	0,1	-5,339	4,368	-5,051	4,132	-4,762	3,896	-4,474	-3,660	-4,185	3,424	-3,896	3,188	-3,416	2,795	32,92	29,62	1,44E-04	OK
MA 2C	0,1	-5,447	4,457	-5,145	4,209	-4,843	3,962	-4,541	-3,715	-4,238	3,468	-3,936	3,220	-3,433	2,808	19,06	17,15	8,33E-05	OK
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####

Este relatório não pode ser cedido ou copiado sem prévia autorização da Welding

FR-LAB-XXX-XX

LABORATÓRIO DE ENSAIOS E ANÁLISES DE MATERIAIS
CERTIFICADO DE ENSAIO DE TENACIDADE A FRATURA
 FRACTURE TOUGHNESS CERTIFICATE

CERTIFICADO N°
 Certificate nr.
TUBO 02

Equipamento	MTS 810 250kN	Data Inicio	06/04/2014	Operador	Carlos Zampieri
Tipo de CP	SEN(B) / SE(B)	Data Fim	00/01/1900	Responsável	Carlos Zampieri

Medições da Trinca (mm)	a	Medições da Trinca da Amostra Após o Teste													
		MB 2	ZTA 2A	ZTA 2B	ZTA 2C	MA 2A	MA 2B	MA 2C	0	0	0	0	0	0	0
	L ₁	2,3443	2,8257	2,1227	2,1645		2,0497								
	L ₂	2,3894	3,0080	2,3486	3,1566		3,2608								
	L ₃	3,2911	3,8740	2,8454	3,6075		3,3074								
	L ₄	3,2460	3,5094	2,4389	3,2468		2,9813								
	L ₅	3,1558	3,8284	2,8002	3,6977		3,6801								
	L ₆	3,1107	3,3271	2,3937	2,8409		2,6087								
	L ₇	3,2911	3,7373	2,7099	3,4722		3,2143								
	L ₈	3,2911	3,9651	2,8905	3,6526		3,5403								
	L ₉	2,9755	3,6005	2,7099	3,6075		3,6801								

Cálculos da Pré Trinca Pós Teste (mm)	a ₁ +a ₂ /2	9,9269	10,427	9,7456	10,221	7,74	10,405	7,66	0	0	0	0	0	0	0	0
	a ₀	10,651	11,105	10,138	10,908	7,740	10,958	7,660	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	a _{máx}	10,8511	11,4751	10,4005	11,2577	7,7400	11,4301	7,6600	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	a _{min}	9,9043	10,3357	9,6327	9,7245	7,7400	9,7997	7,6600	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	a _{máx} - a _{min}	0,9467	1,1394	0,7678	1,5332	0,0000	1,6304	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	20% a ₀	2,1302	2,221	2,0276	2,1816	1,548	2,1917	1,532	0	0	0	0	0	0	0	0
Calculos Fatores	a _f /W	0,5624	0,5851	0,5336	0,5756	0,4074	0,5771	0,4029	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
	f(a _f /W)	3,2816	3,5644	2,971	3,4424	2,0228	3,4604	1,9981	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Validação	a ₀ - a>1,3	OK	OK	OK	OK	Não	OK	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
	Δa ≤ 10%a	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	0,45≤a _f /W≤0,70	OK	OK	OK	OK	NÃO	OK	NÃO	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Este relatório não pode ser cedido ou copiado sem prévia autorização da Welding

FR-LAB-XXX-XX

LABORATÓRIO DE ENSAIOS E ANÁLISES DE MATERIAIS
CERTIFICADO DE ENSAIO DE TENACIDADE A FRATURA
FRACTURE TOUGHNESS CERTIFICATE

CERTIFICADO N°
Certificate nr.
TUBO 02

Equipamento	MTS 810 250kN	Data Inicio	06/04/2014	Operador	Carlos Zampieri
Tipo de CP	SEN(B) / SE(B)	Data Fim	00/01/1900	Responsável	Carlos Zampieri

Id do C.P	Geometria e Fator Geométrico						Propriedades do Material				Dados do Ensaio e Resultados						
	S (mm)	B (mm)	W (mm)	a _f (mm)	a _f /W	f(a _f /W)	σ _{ys} (MPa)	σ _{ts} (MPa)	E (Gpa)	ν	z (mm)	F _q (kN)	F (kN)	V _p (mm)	K _q (MPa√m)	K _q =K _{IC} ?	δ (μm)
MB 2	76,00	18,71	18,94	10,65	0,56	3,28	402,97	596,35	207,00	0,30	0,00		15,72	1,81	0,00	Sim	464,91
ZTA 2A	76,00	18,96	18,98	11,10	0,59	3,56	635,00	635,00	207,00	0,30	0,00		15,01	1,68	0,00	Sim	394,32
ZTA 2B	76,00	18,97	19,00	10,14	0,53	2,97	635,00	635,00	207,00	0,30	0,00		18,78	1,72	0,00	Sim	471,85
ZTA 2C	76,00	18,94	18,95	10,91	0,58	3,44	635,00	635,00	207,00	0,30	0,00		14,98	1,50	0,00	Sim	362,69
MA 2A	76,00	18,96	19,00	7,74	0,41	2,02	616,00	616,00	206,01	0,30	0,00				0,00	Sim	0,00
MA 2B	76,00	18,96	18,99	10,96	0,58	3,46	616,00	616,00	206,01	0,30	0,00		15,18	0,06	0,00	Sim	37,03
MA 2C	76,00	18,97	19,01	7,66	0,40	2,00	616,00	616,00	206,01	0,30	0,00				0,00	Sim	0,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Este relatório não pode ser cedido ou copiado sem prévia autorização da Welding

FR-LAB-XXX-XX

LABORATÓRIO DE ENSAIOS E ANÁLISES DE MATERIAIS
CERTIFICADO DE ENSAIO DE TENACIDADE A FRATURA
FRACTURE TOUGHNESS CERTIFICATE

CERTIFICADO N°
Certificate nr.
TUBO 03

Equipamento	MTS 810 250kN	Data Inicio	06/04/2014	Operador	Carlos Zampieri
Tipo de CP	SEN(B) / SE(B)	Data Fim		Responsável	Carlos Zampieri

Id do C.P	Geometria e Fator Geométrico							Condição Geométrica do CP			Propriedades			Pré Trinca	
	S (mm)	B (mm)	W (mm)	a (mm)	a _i * (mm)	a _i /W	f(a _i /W)	1<W/B<4	0,45W<a _i <0,55W	Situação	S _{ys} (MPa)	S _{ts} (MPa)	E (Gpa)	F ₀ (N)	F _i (N)
MB 3	76,00	19,00	19,02	7,64	10,00	0,53	2,89449	OK	OK	Liberado	402,97	596,35	207,00	8088,52	5081,57
ZTA 3A	76,00	18,96	18,98	7,68	10,00	0,53	2,90516	OK	OK	Liberado	635,00	635,00	207,00	10114,06	6387,36
ZTA 3B	76,00	18,95	19,01	7,50	10,00	0,53	2,89715	OK	OK	Liberado	635,00	635,00	207,00	10487,94	6426,71
ZTA 3C	76,00	18,96	19,02	7,50	10,00	0,53	2,89449	OK	OK	Liberado	635,00	635,00	207,00	10511,71	6444,39
MA 3A	76,00	18,95	19,00	7,69	10,00	0,53	2,89981	OK	OK	Liberado	616,00	616,00	243,64	9823,62	6220,59
MA 3B	76,00	18,93	19,00	7,70	10,00	0,53	2,89981	OK	OK	Liberado	616,00	616,00	243,64	9795,91	6214,02
MA 3C	76,00	18,97	18,99	7,62	10,00	0,53	2,90248	OK	OK	Liberado	616,00	616,00	243,64	9938,60	6213,32
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!
						#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				#DIV/0!	#DIV/0!

Obs: Planilha válida para Cps com W_{máx} de 50mm e pré trinca por fadiga maior que 1,5mm

*af estimado para cálculos de carga final Fi de propagação da pré trinca.

LABORATÓRIO DE ENSAIOS E ANÁLISES DE MATERIAIS
CERTIFICADO DE ENSAIO DE TENACIDADE A FRATURA
 FRACTURE TOUGHNESS CERTIFICATE

CERTIFICADO N°
 Certificate nr.
TUBO 03

Equipamento	MTS 810 250kN	Data Inicio	06/04/2014	Operador	Carlos Zampieri
Tipo de CP	SEN(B) / SE(B)	Data Fim	00/01/1900	Responsável	Carlos Zampieri

		Passos de propagação da Pré-Trinca														Qualificação			
F R		F ₀ (kN)		F _{15%} (kN)		F _{30%} (kN)		F _{45%} (kN)		F _{60%} (kN)		F _{75%} (kN)		F _i (kN)		K _{máx} MPaVm	ΔK MPaVm	ΔK/E MPaVm	Qual.
		Target	Ampli	Target	Ampli	Target	Ampli	Target	Ampli	Target	Ampli	Target	Ampli	Target	Ampli				
MB 3	0,1	-4,449	3,640	-4,201	3,437	-3,953	3,234	-3,704	-3,031	-3,456	2,828	-3,208	2,625	-2,795	2,287	25,39	22,85	1,10E-04	OK
ZTA 3A	0,1	-5,563	4,551	-5,255	4,300	-4,948	4,048	-4,640	-3,797	-4,333	3,545	-4,025	3,294	-3,513	2,874	32,66	29,40	1,42E-04	OK
ZTA 3B	0,1	-5,768	4,720	-5,433	4,445	-5,098	4,171	-4,763	-3,897	-4,428	3,623	-4,093	3,349	-3,535	2,892	28,73	25,86	1,25E-04	OK
ZTA 3C	0,1	-5,781	4,730	-5,446	4,456	-5,110	4,181	-4,775	-3,907	-4,439	3,632	-4,104	3,358	-3,544	2,900	32,11	28,90	1,40E-04	OK
MA 3A	0,1	-5,403	4,421	-5,106	4,177	-4,808	3,934	-4,511	-3,691	-4,214	3,448	-3,917	3,205	-3,421	2,799	31,02	27,92	1,15E-04	OK
MA 3B	0,1	-5,388	4,408	-5,092	4,166	-4,797	3,925	-4,501	-3,683	-4,206	3,441	-3,910	3,199	-3,418	2,796	29,70	26,73	1,10E-04	OK
MA 3C	0,1	-5,466	4,472	-5,159	4,221	-4,852	3,969	-4,544	-3,718	-4,237	3,467	-3,930	3,215	-3,417	2,796	28,15	25,33	1,04E-04	OK
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####
0	0,1	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#####

Este relatório não pode ser cedido ou copiado sem prévia autorização da Welding

FR-LAB-XXX-XX

LABORATÓRIO DE ENSAIOS E ANÁLISES DE MATERIAIS
CERTIFICADO DE ENSAIO DE TENACIDADE A FRATURA
FRACTURE TOUGHNESS CERTIFICATE

CERTIFICADO N°
Certificate nr.
TUBO 03

Equipamento	MTS 810 250kN	Data Inicio	06/04/2014	Operador	Carlos Zampieri
Tipo de CP	SEN(B) / SE(B)	Data Fim	00/01/1900	Responsável	Carlos Zampieri

Medições da Trinca (mm)	a	Medições da Trinca da Amostra Após o Teste														
		MB 3	ZTA 3A	ZTA 3B	ZTA 3C	MA 3A	MA 3B	MA 3C	0	0	0	0	0	0	0	0
	L ₁	2,3523	2,5462	2,1719	2,6243	3,0447	2,2932	2,1277								
	L ₂	2,2618	2,8190	2,2172	2,6243	2,3176	2,4280	2,6710								
	L ₃	3,3023	3,2736	2,5792	3,3482	2,9993	2,8777	2,3088								
	L ₄	3,2118	3,0463	2,7149	3,1672	3,3628	2,7428	2,2636								
	L ₅	3,1666	3,2282	2,5339	3,3482	2,7266	2,7878	2,9426								
	L ₆	2,9404	2,8644	2,6697	2,9862	3,3174	2,4730	2,1730								
	L ₇	3,2118	3,1372	2,6697	3,3030	3,1811	2,7428	2,2183								
	L ₈	3,3023	3,2282	2,5792	3,3934	2,8630	2,8327	2,5805								
	L ₉	2,9404	3,1827	2,4434	3,1220	2,4994	2,8327	3,0332								

Cálculos da Pré Trinca Pós Teste (mm)	$a_1+a_2/2$	9,9471	10,363	9,6946	10,124	10,371	10,061	10,019	0	0	0	0	0	0	0	0
	a_0	10,688	10,760	10,048	10,662	10,644	10,406	10,110	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	$a_{\max}$	10,9423	10,9536	10,2149	10,8934	11,0528	10,5777	10,6532	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	$a_{\min}$	9,9018	10,2262	9,6719	10,1243	10,0076	9,9932	9,7477	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	$a_{\max} - a_{\min}$	1,0405	0,7275	0,5430	0,7692	1,0452	0,5845	0,9054	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	20% a_0	2,1376	2,1521	2,0096	2,1323	2,1288	2,0813	2,022	0	0	0	0	0	0	0	0
Calculos Fatores	a_f/W	0,5619	0,5669	0,5286	0,5605	0,5602	0,5477	0,5324	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
	$f(a_f/W)$	3,2766	3,3357	2,9216	3,2606	3,2567	3,1174	2,9591	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Validação	$a_0 - a > 1,3$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
	$\Delta a \leq 10\% a$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	$0,45 \leq a_f/W \leq 0,70$	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Este relatório não pode ser cedido ou copiado sem prévia autorização da Welding

FR-LAB-XXX-XX

LABORATÓRIO DE ENSAIOS E ANÁLISES DE MATERIAIS
CERTIFICADO DE ENSAIO DE TENACIDADE A FRATURA
FRACTURE TOUGHNESS CERTIFICATE

CERTIFICADO N°
Certificate nr.
TUBO 03

Equipamento	MTS 810 250kN	Data Inicio	06/04/2014	Operador	Carlos Zampieri
Tipo de CP	SEN(B) / SE(B)	Data Fim	00/01/1900	Responsável	Carlos Zampieri

Id do C.P	Geometria e Fator Geométrico						Propriedades do Material				Dados do Ensaio e Resultados						
	S (mm)	B (mm)	W (mm)	a _f (mm)	a _f /W	f(a _f /W)	σ _{ys} (MPa)	σ _{ts} (MPa)	E (Gpa)	ν	z (mm)	F _q (kN)	F (kN)	V _p (mm)	K _q (MPa√m)	K _q =K _{IC} ?	δ (μm)
MB 3	76,00	19,00	19,02	10,69	0,56	3,28	402,97	596,35	207,00	0,30	0,00		15,88	1,48	0,00	Sim	385,66
ZTA 3A	76,00	18,96	18,98	10,76	0,57	3,34	635,00	635,00	207,00	0,30	0,00		15,46	1,61	0,00	Sim	398,89
ZTA 3B	76,00	18,95	19,01	10,05	0,53	2,92	635,00	635,00	207,00	0,30	0,00		17,84	1,43	0,00	Sim	398,55
ZTA 3C	76,00	18,96	19,02	10,66	0,56	3,26	635,00	635,00	207,00	0,30	0,00		16,14	2,08	0,00	Sim	518,46
MA 3A	76,00	18,95	19,00	10,64	0,56	3,26	616,00	616,00	243,64	0,30	0,00		13,44	0,31	0,00	Sim	88,66
MA 3B	76,00	18,93	19,00	10,41	0,55	3,12	616,00	616,00	243,64	0,30	0,00		12,25	0,32	0,00	Sim	88,86
MA 3C	76,00	18,97	18,99	10,11	0,53	2,96	616,00	616,00	243,64	0,30	0,00		13,47	0,29	0,00	Sim	86,69
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0,00	0,00	0,00	0,00	#####	#DIV/0!	0,00	0,00	0,00						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Este relatório não pode ser cedido ou copiado sem prévia autorização da Welding

FR-LAB-XXX-XX

ANEXOS 8 – Ensaio de Tração do Material Base.

Relatório de Ensaio de Tração

Tension Test Report

Sample ID: MB P22.mss
 Method: Simples_Redondo_Welding.msm
 Equipamento: Máquina Universal de Ensaios.
 Certificado de Calibração: n° 477r/2009

Test Date: 8/5/2012
 Operator: MTS
 Modelo: MTS 250 kN
 Número de Patrimônio: 644

Informações:

Cliente: Welding
 Material: ASTM A 335 Gr P22
 Ensaio: Tração

Resultados da Amostra:

Corpo de Prova	Diameter mm	Area mm ²	Limite Resistencia MPa	Tensao Escoamento MPa	Carga Max. kN	Tensao@Ruptura MPa	Carga@Ruptura kN
1	9.70	73.90	596.35	402.97	44.069	308.91	22.828

Comentários da Amostra:

Corpo de Prova	Comentários
1	