

EDGARD HENRIQUE SOARES BALTAR

**ESTUDO DAS ALTERAÇÕES DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM
AÇO A-516 GRAU 70 SOLDADO E SUBMETIDO A TRATAMENTO
TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES**

EDGARD HENRIQUE SOARES BALTAR

ESTUDO DAS ALTERAÇÕES DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM
AÇO A-516 GRAU 70 SOLDADO E SUBMETIDO A TRATAMENTO
TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Zirpoli Simões

Guaratinguetá
2015

Baltar, Edgard Henrique Soares

B197e Estudo das alterações das propriedades mecânicas em aço A-516 grau 70 soldado e submetido a tratamento térmico de alívio de tensões / Edgard Henrique Soares Baltar. - Guaratinguetá , 2014

93 f .: il.

Bibliografia: f. 92 - 93

Trabalho de Graduação em Engenharia de Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Zirpoli Simões

1. Vasos de pressão 2. Tensões térmicas 3. Aço -- Tratamento térmico I. Título

CDU 621.643.2

Estudo das Alterações das Propriedades Mecânicas em Aço A-516 grau 70
soldado e submetido a Tratamento Térmico de Alívio de Tensões

EDGARD HENRIQUE SOARES BALTAR

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE GRADUADO
EM ENGENHARIA MECÂNICA

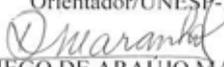
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ALEXANDRE ZIRPOLI SIMÕES
Orientador/UNESP-FEG


DIEGO DE ARAUJO MARANHÃO
Engenheiro Mecânico


CÁSSIA CAVALCANTI DA SILVA
Doutoranda em Engenharia Mecânica UNESP-FEG

Janeiro de 2015

DADOS CURRICULARES

EDGARD HENRIQUE SOARES BALTAR

NASCIMENTO	18.02.1987 – GUARULHOS/SP
FILIAÇÃO	Luzia da Penha Soares Gomes da Silva Elzio Fernandes Baltar
2006-2014	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Aos meus filhos Lorena e Bernardo, meus
maiores tesouros e a razão do meu viver;
A minha mãe Luzia e ao meu pai Elzio
que me deram a vida e um amor
incondicional.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu inteligência, saúde e competência para alcançar minhas metas e realizar meus sonhos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alexandre Zirpoli Simões que contribuiu grandemente para a conclusão do presente Trabalho de Graduação com seus conhecimentos e experiências.

A toda minha família que sempre me apoiou e incentivou durante todos os momentos bons e ruins da minha vida e do Curso de Graduação.

Aos meus “irmãos” das Repúblicas Jurupinga, WCKzona, e Iglu que sempre estiveram comigo nos momentos ruins e bons durante toda a graduação.

À empresa Ferlex Viaturas e Equipamentos Ltda. que me proporcionou um ambiente de trabalho e aprendizado sem igual, em especial ao Gerente de Projetos Sr. Rodrigo Marson por me sugerir o tema de trabalho por suas orientações que me fizeram o profissional que sou hoje.

Aos técnicos da FEG-UNESP que me auxiliaram na preparação dos Corpos de Prova e realização dos ensaios.

Ao Sr. João Marcelo Monteiro pelo seu auxílio com a elaboração dos Corpos de Prova.

“Há homens que lutam um dia e são bons. Há outros que lutam um ano e são melhores. Há os que lutam muitos anos e são muito bons. Mas há os que lutam toda a vida e estes são imprescindíveis.”

Bertolt Brecht

Baltar, E. H. S. **Estudo das Alterações das Propriedades Mecânicas em Aço A-516 grau 70 soldado e submetido a Tratamento Térmico de Alívio de Tensões.** 2014. 93 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

RESUMO

Vasos de pressão são equipamentos que requerem muitos cuidados devido ao seu alto custo e ao risco de vida humana no caso de falha e seu processo de fabricação varia entre cada fabricante. Normalmente, vasos de pressão e seus componentes são fabricados por soldagem, que pode alterar propriedades locais dos metais. O tampo de um vaso de pressão é um componente estrutural de extrema importância fabricado por soldagem e conformação mecânica. Devido às suas excelentes propriedades mecânicas, o aço A-516 Grau 70 é muito utilizado na fabricação de vasos de pressão de grande porte sujeitos a alta pressão e temperatura, embora apresente diminuição de sua resistência mecânica quando submetido a tratamento térmico de alívio de tensões após a soldagem. Por experiência foi definido que antes da conformação de tampos de vasos de grande porte, o aço deve ser submetido a tratamento térmico de alívio de tensões para facilitar a conformação, embora uma análise quantitativa para comprovar esse método e analisar seus possíveis riscos não tenha sido inferida. No presente trabalho aço A-516 Grau 70 apresentou redução de sua resistência mecânica quando submetido a tratamento térmico de alívio de tensões, mas não ficando abaixo do limite mínimo definido na literatura. Por outro lado a sua capacidade de deformação apresentou um aumento considerável, sendo possível concluir que o tratamento térmico de alívio de tensões antes de realizar conformação mecânica é uma técnica viável e recomendável, porém com ressalvas. Com os dados colhidos durante a fabricação e preparação dos corpos de prova e dos resultados dos ensaios, foi possível elaborar um procedimento de soldagem que tornará possível a reprodução dos mesmos resultados obtidos no presente trabalho.

PALAVRAS CHAVE: Tratamento térmico de Alívio de Tensões. Tratamento Térmico. Tensão de Projeto. Ensaio de Tração. Ensaio de Dobramento. Conformação Mecânica. Aço A-516 Gr.70. Microscopia Eletrônica de Varredura.

Baltar, E. H. S. **Studies of the changes in mechanical properties of carbon steel A-516 Grade 70 welded and heat treated for stress relief.** 2014. 93 f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

ABSTRACT

Pressure vessels are equipments that require a great care because of their high cost and human life risk in case of fail, and its fabrication methods are different for each manufacturer. Normally, pressure vessels and its parts are fabricated by welding, which may change local properties of metals. The head of a pressure vessel is a very important structural component and it is fabricated by welding and mechanical conformation. Because its excellent mechanical properties, de steel A-516 Grade 70 is often used in manufacturing of large pressure vessels that are subjected to high pressure and temperature, but was verified that its mechanical resistance is decreased when submitted to a tension relief heat treatment. By experience it was defined that before mechanical conformation of the head of a large pressure vessel, the steel should be submitted to a stress relief heat treatment in order to facilitate the mechanical conformation, but there is no quantitative analysis to prove this method and study its possible risks. In the present work the steel A-516 Grade 70 demonstrated a decrease of its mechanical resistance when submitted to a stress relief heat treatment, but keeping above the minimum limit defined in the literature. By other side its ductility was substantially increased, being possible to deduce that the stress relief heat treatment before mechanical conformation is a viable e recommended technique, but with reservations. With the data acquired during the fabrication e preparation of the specimen and the result of the tests, it was possible to elaborate a welding procedure that provides the same results obtained in this present work.

KEYWORDS: Tension Relief heat treatment. Heat Treatment. Design Stress. Tension Test. Bending Test. Mechanical Conformation. Steel A-516 Grade 70. Scanning Electron Microscopy.

LISTA DE SIGLAS

ASME - American Society of Mechanical Engineers

AWS – American Welding Society

NR13 – Norma Regulamentar 13

FCAW – Flux Cored Arc Welding (Arame Tubular)

EPS – Especificação de Procedimento de Soldagem

RQPS – Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem

CQS – Certificado de Qualificação de Soldador

CP – Corpo de Prova

PWHT – Post Weld Heat Treatment (Tratamento Térmico Pós-Soldagem)

[] – Valor entre colchetes indica unidade ou grandeza dimensional

CP – Corpo de Prova

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de vasos de pressão: (a) Foto de vaso de pressão cilíndrico horizontal; (b) Foto de vaso de pressão cilíndrico inclinado; (c) Foto de vaso de pressão esférico; (d) Tanque Vertical de Armazenamento de Fluido pressurizado; (e) Foto de Reator para indústria alimentícia; (f) Imagem de Autoclave para colagem de placas de Vidro;.....	19
Figura 2– Representação dos principais componentes de um vaso de pressão.....	20
Figura 3 – Exemplos de Tampos: (a) Tampo Torisférico; (b) Tampo Somente Abaulado; (c) Tampo Hemisférico; (d) Tampo Difusor.....	21
Figura 4– Tampo semi-elíptico (torisférico)	22
Figura 5 – Dimensões comerciais para chapas laminadas a quente.	24
Figura 6– Detalhe da soldagem de um disco para conformação do tampo.	25
Figura 7 – Foto de máquina de abaular	26
Figura 8– Exemplo de máquina de Abaular e Rebordear.....	27
Figura 9- Curva de tratamento térmico para alívio de tensões recomendado para aços carbono.	31
Figura 10 – Comportamento Curva Temperatura x Tensões	34
Figura 11 – Microestrutura do aço A-516 Gr.70 (ampliação 100x) na condição de laminado a quente.....	36
Figura 12 – Microestrutura do aço A-516 Gr.70 (ampliação 100x) na condição de laminado a quente e normalizado por austenitização a 899°C.	37
Figura 13 – Microestrutura do aço A-516 Gr.70 (ampliação 100x) na condição de laminado a quente e normalizado por austenitização a 1127°C.	37
Figura 14– Formatos de Arames para soldagem FCAW.....	38
Figura 15– Esquema da poça de fusão de soldagem em FCAW.....	39
Figura 16 – Embalagem comercial de eletrodo para soldagem FCAW	39
Figura 17 – Equipamento para soldagem em arame tubular	41
Figura 18 – Seção transversal de uma poça de fusão soldada com Mata-junta.....	43
Figura 19 – Ilustração da aplicação de Gás Inerte no interior de um tubo.....	43
Figura 20 – Modos de Transferência do metal de adição: (a) Curto-circuito; (b) Globular; (c) Spray ou Aerossol.....	44
Figura 21 – Foto da chapa de as inscrições da usina.....	49
Figura 22 – Certificado de Qualidade da Usina	50

Figura 23 – Perfil da junta a ser soldada.	52
Figura 24–Corpos de prova:(a) Antes da soldagem;(b) Após a soldagem	53
Figura 25 – Corpos de prova com o excesso de metal de solda removido.....	54
Figura 26 – Curva de Tratamento térmico aplicado aos corpos de prova	55
Figura 27 – Forno utilizado para tratamento térmico pós soldagem	56
Figura 28 – Dimensões do Corpo de Prova para dobramento lateral.....	57
Figura 29 – Foto dos Corpos de Prova antes dos ensaios de dobramento: (a) CP sem tratamento térmico; (b) CP com tratamento térmico.	58
Figura 30 – Foto do Equipamento utilizado para executar os ensaios de dobramento lateral	60
Figura 31 - Esquema de ensaio de dobramento	60
Figura 32 – Fotos dos Corpos de prova após serem submetidos aos ensaios de dobramento: (a) CP com tratamento térmico; (b) CP sem tratamento térmico.	61
Figura 33 – Dimensões do Corpo de Prova para Ensaio de Tração	63
Figura 34 – Fotos dos CP antes dos ensaios de Tração: (a) CP com tratamento térmico; (b) CP sem tratamento térmico.....	64
Figura 35 – Medidor de carregamento.	66
Figura 36 – Fotos dos Corpos de Prova após o rompimento: (a) Corpos de Prova sem Tratamento Térmico; (b) Corpos de Prova com Tratamento Térmico.....	67
Figura 37 – Gráficos Tensão x Deformação para cada Corpo de prova: (a) Corpos de prova sem PWHT; (b) Corpos de Prova com PWHT.....	73
Figura 38 – Comparativo entre as deformações	74
Figura 39 – Gráficos comparativos das tensões: (a) Tensão Máxima; (b) Tensão de Escoamento; (c) Tensão de Ruptura.....	77
Figura 40 – Foto em MEV das amostras que não foram submetidas a PWHT: (a) Metal Base; (b) Transição Metal Base-Solda; (c) Solda.....	80
Figura 41- Foto em MEV das amostras que foram submetidas a PWHT: (a) Metal Base; (b) Transição Metal Base-Solda; (c) Solda.....	81
Figura 42 – RQPS Gerada: (a) Folha 01; (b) Folha 02.....	86
Figura 43 – EPS com tratamento térmico de alívio de tensões pós soldagem (a) Folha 1; (b) Folha 2	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo médio de fabricação de um tampo torisférico em aço A-516 Gr.70 sem tratamento térmico	28
Tabela 2 - Tempo e custo médios para fabricação de tampo torisférico em aço A-516 Gr.70 com alívio de tensões	29
Tabela 3 – Dados de soldagem em FCAW dos corpos de prova	54
Tabela 4 – Dados de Operação do Forno	56
Tabela 5 – Ensaio Mecânicos requeridos para qualificação de EPS.....	57
Tabela 6 – Dimensões dos CP antes dos ensaios de dobramento.....	59
Tabela 7 – Limites máximos de descontinuidades em ensaios de dobramentos	61
Tabela 8 – Resultado da inspeção visual dos CP após o ensaio de dobramento	62
Tabela 9 – Dimensões iniciais dos corpos de prova sem apenas soldados.....	64
Tabela 10 – Dimensões iniciais dos corpos de prova sem tratamento térmico	65
Tabela 11 – Carregamentos registrados dos corpos de prova apenas soldados.....	67
Tabela 12 – Carregamentos registrados dos corpos de prova soldados e submetidos a tratamento térmico.....	68
Tabela 13 – Dimensões finais dos Corpos de Prova apenas soldados	68
Tabela 14 – Dimensões finais dos Corpos de Prova soldados e submetidos a tratamento térmico.....	68
Tabela 15 – Variação da deformação	74
Tabela 16 – Resumo das tensões dos corpos de prova somente soldados.....	75
Tabela 17 – Resumo das tensões dos corpos de prova soldados e submetidos a tratamento térmico de alívio de tensões	75
Tabela 18 - Variação percentual da resistência mecânica do Aço A-516 Gr.70	76
Tabela 19 - Resumo dos resultados obtidos	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1– Classificação de vasos de pressão conforme sua função.....	17
Quadro 2– Classificação de vasos de pressão conforme pressão de operação.....	17
Quadro 3– Classificação de Vasos de Pressão conforme dimensões e posicionamento.	18
Quadro 4 - Condições de aplicação de tratamento térmico para alívio de tensões ao tempo.	27
Quadro 5– Soldabilidade dos aços conforme carbono equivalente.....	31
Quadro 6 – Propriedades mecânicas do Aço A-516 Grau 70.....	33
Quadro 7 – Propriedades mecânicas do Aço A-516 Grau 70.....	33
Quadro 8 – Faixa de composição química para aços da Norma A-516 Gr.70	35
Quadro 9 – Dados do Metal de Adição	40
Quadro 10 – Vantagens, limitações e aplicações da soldagem do processo FCAW.....	41
Quadro 11 - Variáveis Essenciais para qualificação de soldador em FCAW	42
Quadro 12– Descrição das variáveis para EPS para soldagem em FCAW	46

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	VASOS DE PRESSÃO	17
2.1.1	CLASSIFICAÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO	17
2.1.2	PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM VASO DE PRESSÃO	20
2.2	CÁLCULOS DA ESPESSURA DO TAMPO TORISFÉRICO.....	21
2.2.1	DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS.....	22
2.2.2	PROCESSO DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA DO TAMPO	25
2.3	TRATAMENTO TÉRMICO PARA ALÍVIO DE TENSÕES	29
2.4	PROPRIEDADES DO AÇO A-516 GRAU 70.....	32
2.4.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO A-516 GR.70.....	33
2.4.2	PROPRIEDADES QUÍMICAS DO AÇO A-516 GRAU 70.....	34
2.4.3	FORNECIMENTO	35
2.4.4	MICROESTRUTURA DO AÇO A-516 GR. 70	36
2.5	PROCESSO DE SOLDAGEM FCAW (FLUX CORED ARC WELDING) ...	38
2.6	CERTIFICADO DE QUALIFICAÇÃO DE SOLDADOR (CQS).....	42
2.7	ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (EPS)	45
3	JUSTIFICATIVA	47
4.	OBJETIVOS:	48
5.	METODOLOGIA.....	48
5.1	FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	48
5.2	CARBONO EQUIVALENTE DOS CORPOS DE PROVA	51
5.3	PREPARAÇÃO E DOS CORPOS DE PROVA ANTES DA SOLDAGEM..	51
5.4	SOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	52
5.4	TRATAMENTO TÉRMICO PÓS SOLDAGEM (PWHT)	54
5.5	ENSAIOS MECÂNICOS	56
5.5.1	ENSAIOS DE DOBRAMENTO.....	57
5.5.1.1	Preparação dos corpos de prova para ensaio de dobramento	57
5.5.1.3	Resultados dos ensaios de dobramento	60
5.5.2	ENSAIOS DE TRAÇÃO	63
5.5.2.1	Preparação dos corpos de prova para os ensaios de tração.....	63
5.5.2.2	Realização dos ensaios de tração.....	65

5.5.2.3	Análise dos corpos de prova após ensaios de tração.	66
5.5.2.4	Cálculo das tensões máximas e de ruptura	67
5.5.2.5	Análise dos gráficos tensão x deformação	71
5.6	ESTUDO DA MICROESTRUTURA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	78
5.6.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA MEV	78
5.6.2	REALIZAÇÃO DO ENSAIO POR MEV	79
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
6.1	ENSAIO DE DOBRAMENTO	82
6.2	ENSAIOS DE TRAÇÃO	82
6.3	ELABORAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM	84
7	CONCLUSÕES.....	89
8	DIFICULDADES ENCONTRADAS NA EXECUÇÃO DO TRABALHO	90
9	PROPOSTAS FUTURAS	91
	REFERÊNCIAS :	92

1. INTRODUÇÃO

Segundo a NR13 (Norma Regulamentadora 13), Vasos de Pressão são equipamentos de qualquer tipo, dimensões e finalidades, que não estão sujeitos a chama, contendo um fluido à pressão manométrica superior a 103 kPa, ou submetidos à pressão externa. Sua fabricação, instalação e manutenção devem seguir uma série de requisitos que são definidos detalhadamente em Normas nacionais e internacionais.

É necessário que o fabricante desse tipo de equipamento tenha condições de executar as fases do processo de fabricação obedecendo às especificações de projeto definidas pela American Society of Mechanical Engineers sem comprometer a integridade do equipamento e a definição dos parâmetros de projeto é vital para a melhoria e agilidade da fabricação, bem como da confiabilidade do vaso de pressão.

Como os vasos de pressão de grande porte são fabricados por meio de soldagem, é importante definir muito bem os parâmetros de soldagem para possibilitar a reprodução de bons resultados, e para isso é necessário ter um procedimento adequado contendo esses parâmetros.

A definição do material de fabricação do Vaso de Pressão é um fator muito importante, pois definirá os processos de soldagem e possíveis tratamentos térmicos a serem aplicados em sua fabricação. O aço A-516 Grau 70 é muito utilizado para fabricação de vasos de pressão e merece atenção durante a fase de projeto e planejamento de fabricação.

A combinação de soldagem e tratamentos térmicos altera algumas propriedades mecânicas dos materiais e o processo de conformação de tampos de grande diâmetro interno exige um Tratamento Térmico para Alívio de Tensões do mesmo a fim de torná-lo mais dúctil e facilitar o processo de conformação mecânica. Nesse sentido o presente trabalho de graduação busca avaliar o aço A-516 Grau 70 nesses quesitos.

1. Fundamentação Teórica

1.1 Vasos de Pressão

2.1.1 Classificação de vasos de pressão

Podem ser classificados conforme sua função, pressão de operação, dimensões e posicionamento em relação ao solo, conforme indicado no Quadro 1, no Quadro 2 e no Quadro 3 (Santiago, 2014).

Quadro 1– Classificação de vasos de pressão conforme sua função
(Santiago, 2014).

Classificação	Função
Vasos não sujeitos a Chama	Vasos de Armazenamento e de acumulação Torres de destilação fracionária, retificadora e absorvedora Reatores Esferas de armazenamento de gases Trocadores de Calor Autoclaves
Vasos Sujeitos a Chama	Caldeiras Fornos

Quadro 2– Classificação de vasos de pressão conforme pressão de operação
(Santiago, 2014).

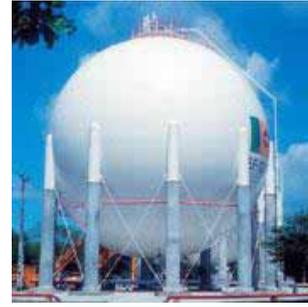
Classificação	Faixa de Pressão
Vasos Atmosféricos	0 a 0,035 kgf/cm ² (0 a 0,033 atm)
Vasos de Baixa Pressão	0,035 a 1,054 kgf/cm ² (0,033 a 0,1020 atm)
Vasos de Alta Pressão	1,054 a 210,81 kgf/cm ² (1,020 a 205,7 atm)

Quadro 3– Classificação de Vasos de Pressão conforme dimensões e posicionamento (Santiago, 2014).

Classificação	Descrição
Cilíndrico vertical	Diâmetros interno e externo paralelos em relação ao solo.
Cilíndrico inclinado	Diâmetros interno e externo inclinados em relação ao solo.
Cilíndrico horizontal	Diâmetros interno e externo perpendiculares em relação ao solo.
Esférico	-



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 1 – Exemplos de vasos de pressão: (a) Foto de vaso de pressão cilíndrico horizontal (Catalogo Jemp, 2014); (b) Foto de vaso de pressão esférico (Tenaris Confab, 2015); (c) Foto de vaso de pressão cilíndrico inclinado (Catálogo Ferlex, 2014); (d) Tanque Vertical de Armazenamento de Fluido pressurizado (Catálogo Ferlex, 2014); (e) Foto de Reator para indústria alimentícia (Site Biasinox, 2014); (f) Imagem de Autoclave para colagem de placas de Vidro (Ferlex, 2014);

2.1.2 Principais componentes de um vaso de pressão

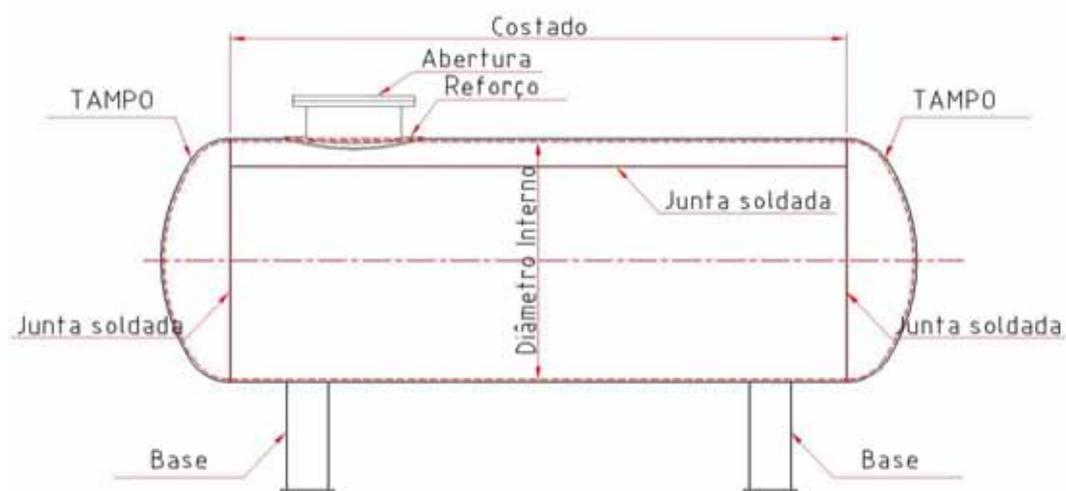


Figura 2– Representação dos principais componentes de um vaso de pressão (Santiago, 2014).

Na Figura 2 estão indicados os principais componentes de um vaso de pressão.

Casco ou costado (em inglês *shell*): Normalmente possui formato de superfície de revolução. Na sua maioria possuem formatos cilíndricos, cônicos ou esféricos (Santiago, 2014).

Tampo (*head* em inglês): são as partes de fechamento do costado, sendo os mais usuais os tipos semi-elíptico, torisféricos, cônicos, hemisféricos e planos. A escolha do tipo de tampo dependerá da aplicação do vaso de pressão e das condições de operação (Santiago, 2014). Durante o projeto é comum calcular a espessura para diferentes tipos de tampos com a finalidade de definir o perfil de tampo que apresente melhor custo benefício. A escolha do tipo de tampo dependerá da experiência de cada fabricante. Na Figura 3 estão indicados exemplos de tampos de vasos de pressão

Base ou berço (*saddle* em inglês): proporciona a sustentação e alinhamento do vaso de pressão sobre o solo.

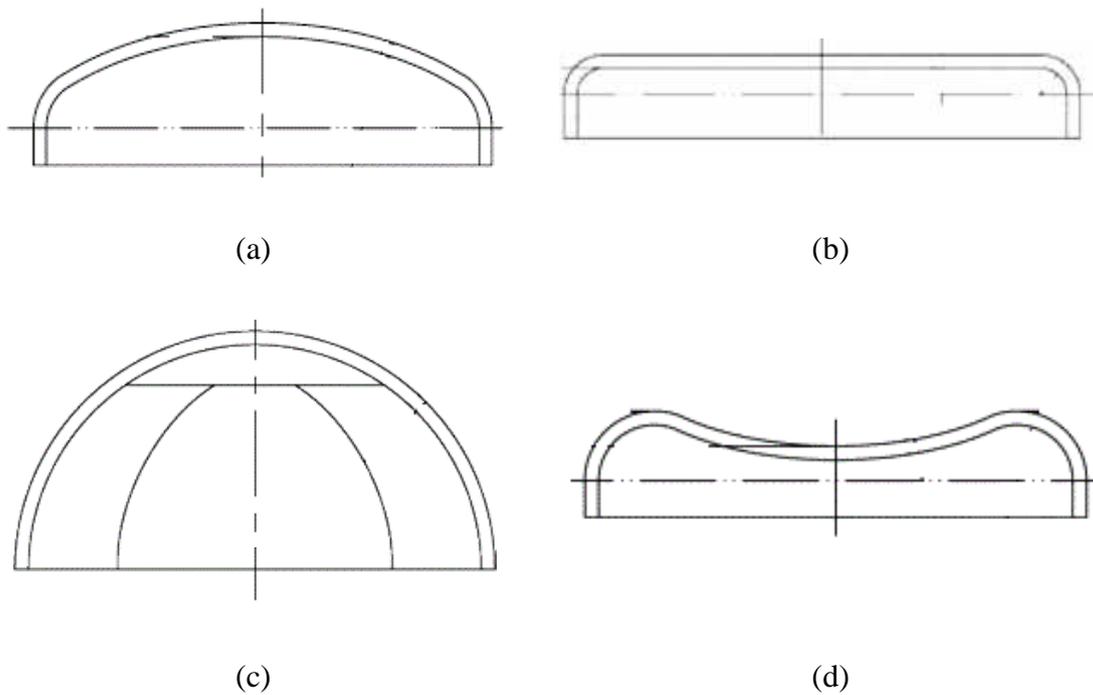


Figura 3 – Exemplos de Tampos (Catálogo Metal Tampos, 2015): (a) Tampo Torisférico; (b) Tampo Somente Abaulado; (c) Tampo Hemisférico; (d) Tampo Difusor

Aberturas: Qualquer vaso de pressão terá aberturas, utilizadas para ligação em tubulações, instalação de válvulas e instrumentos de medição e conexões de dreno e respiro (Santiago, 2014). As dimensões e quantidades das conexões dependerão da aplicação do vaso.

2.2 Cálculos da espessura do tampo torisférico

Os cálculos das espessuras do costado e do tampo são feitos conforme o livro ASME Volume VIII Divisão 1, utilizado para cálculo de vasos de pressão e seu componentes sujeitos a pressões internas entre 103kPa(1,05 kgf/cm²) e 20685kPa(210,93 kgf/cm²). Os cálculos para a espessura do tampo de um vaso de pressão devem ser feitos em conformidade com o livro ASME Volume VIII Divisão 1, Apêndice 1-4. O caso considerado será de um tampo de diâmetro interno de 3050 mm:

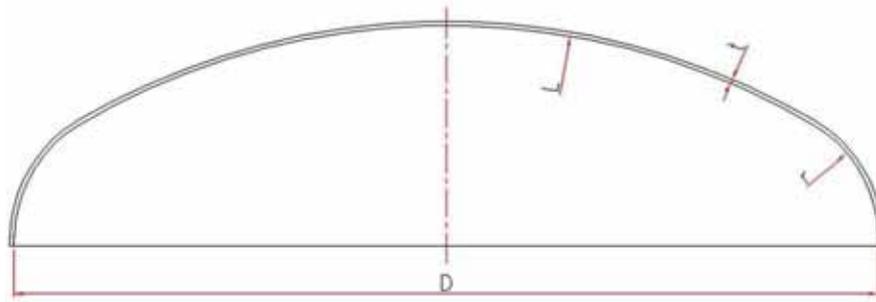


Figura 4– Tampo semi-elíptico (torisférico) (ASME VIII, Divisão 1, Ed. 2013)

$$t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2S \cdot E - 0,2 \cdot P} + A \quad (1)$$

Sendo (Unidades entre colchetes):

S – Máxima tensão admissível para o aço SA-516 Gr.70 (ASME II Parte D, 2013)
[MPa];

P: Pressão de Projeto [MPa]

D: Diâmetro interno do Tampo [mm]

L: Raio de Abaulamento ($0,825 \times D$) [mm]

r: Raio de Bordeamento ($0,154 \times D$) [mm]

t: Espessura mínima para o tampo conformado [mm]

A: Possível amassamento na conformação [mm]

M: Fator de multiplicação [adimensional]

2.2.1 Descrição dos Parâmetros

- Máxima Tensão Admissível para o material (S): Este parâmetro é definido conforme Norma ASME II, Parte D, Tabela 1A, considerando a temperatura de projeto que dependerá da aplicação do vaso de pressão. Para o caso estudado será considerada

uma temperatura de projeto de 150°C (302°F) que levará a um valor de tensão de projeto de 20 KPSI (138MPa).

- Diâmetro interno (D): Será o diâmetro interno do tampo.

- Raio de abaulamento (L) e raio de bordamento (r): São calculados conforme estabelecido na norma ASME VIII, Divisão 1, Edição 2013 para o tampo semi-elíptico.

- Espessura mínima (t): Calculada conforme especificado no Apêndice 1-4 da Norma ASME VIII, Divisão 1, Edição 2013.

- Amassamento máximo (A): indica (em mm) a redução da espessura do tampo no processo de conformação (valor definido empiricamente e é fornecido pela empresa que realiza a estampagem). Para o caso estudado o valor é de 6,0mm.

- Fator multiplicativo (M): esse fator é calculado pela equação (2) (Norma ASME VIII, Divisão 1, Edição 2013).

$$M = 1/4 \left(3 + \sqrt{\frac{L}{R}} \right) \quad (2)$$

Cálculo da espessura

$$P = 1,57 \text{ MPa (16,0 kgf/cm}^2\text{)}$$

$$S = 138 \text{ MPa}$$

$$D = 3500 \text{ mm}$$

$$L = 0,825 \times D = 0,825 \times 3500 = 2888 \text{ mm}$$

$$R = 0,154 \times D = 0,154 \times 3500 = 539 \text{ mm}$$

$$A = 6,0 \text{ mm}$$

$$M = 1/4 \left(3 + \sqrt{\frac{2888}{539}} \right) = 1,33 \quad (3)$$

Substituindo valores na Equação (1):

$$t = \frac{1,59 \times 2888 \times 1,33}{(2 \times 138) - (0,2 \times 1,59)} + 6,0 = 28,2 \text{ mm} \quad (4)$$

A fim de se obter um projeto mais econômico é selecionada uma chapa comercial de espessura superior mais próxima da espessura calculada. Conforme o catálogo de chapas (Gerdau, 2014) a espessura selecionada será de 31,5mm.



ESPESSURAS PADRÃO (mm)		
6.30	19.00	44.50
8.00	22.40	50.00
9.50	25.00	63.00
12.50	31.50	75.00
16.00	37.50	100.00

LARGURAS PADRÃO (mm)		
1000	1500	2440
1200	2000	

COMPRIMENTOS PADRÃO (mm)	
6000	12000

Figura 5 – Dimensões comerciais para chapas laminadas a quente (Catálogo de aços planos Gerdau, 2014).

O diâmetro do disco a ser conformado deverá ser de $\varnothing 3860\text{mm}$ (estimado em simulação em AutoCAD, 2013), mas por experiência foi constatado que se deve utilizar um disco de diâmetro aproximadamente 50 mm maior que o calculado devido ao escoamento de metal que ocorre durante a conformação mecânica, e portanto será utilizado um disco de $\varnothing 3900\text{mm}$.

Comercialmente as chapas de aço da usina são fabricadas com largura máxima de 2500 mm (Figura 5 – Dimensões comerciais para chapas laminadas a quente (Catálogo de aços planos Gerdau, 2014)), portanto é necessário soldar duas chapas de aço para

obter-se o disco (Figura 6– Detalhe da soldagem de um disco para conformação do tampo.).

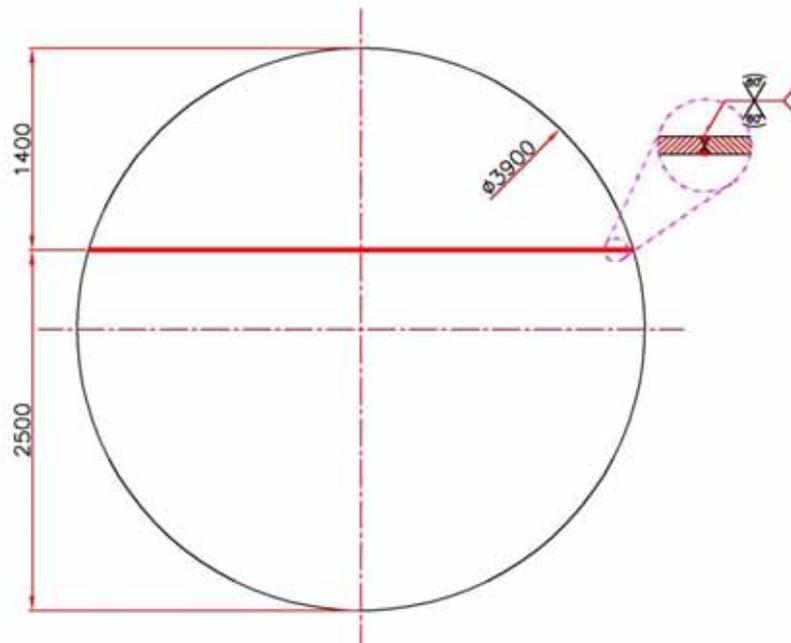


Figura 6– Detalhe da soldagem de um disco para conformação do tampo.

2.2.2 – Processo de Conformação Mecânica do Tampo

Na maioria dos materiais metálicos, quando submetidos a um carregamento que gera uma tensão abaixo da sua tensão de escoamento, haverá uma deformação elástica, proporcional à tensão gerada pelo carregamento, e se esse carregamento for retirado o metal voltará a sua forma inicial. Mas se o metal é submetido a um carregamento que gera uma tensão acima da sua tensão de escoamento, então ocorrerá uma deformação permanente no metal, chamada deformação plástica (Callister, 2002). O processo de conformação mecânica de um metal consiste em modificar a sua forma pela aplicação de tensões externas, geralmente inferiores ao limite de resistência e acima da tensão de escoamento do metal, causando uma deformação permanente ou plástica (Bresciani, Silva, Batalha e Button, 2011). O processo de conformação pode ser um trabalho mecânico a frio ou um trabalho mecânico a quente (Bresciani, Silva, Batalha e Button, 2011). Um trabalho mecânico a frio é a conformação plástica realizada em temperaturas abaixo da temperatura de cristalização do metal (Bresciani, Silva, Batalha e Button, 2011). O trabalho mecânico a quente é a conformação plástica realizada em

temperaturas acima da temperatura de recristalização (Bresciani, Silva, Batalha e Button, 2011).

O presente trabalho de graduação foi inspirado num tampo do tipo torisférico e seu processo de fabricação. Como o tratamento térmico aplicado ao disco de aço ocorre antes da conformação do tampo, esse processo é considerado trabalho mecânico a frio. O processo de fabricação de um tampo de vaso de pressão de grandes dimensões ou grandes espessuras normalmente envolve dois equipamentos: a Máquina de Abaular (ou Abauladeira) e a Máquina de Rebordear (ou Rebordeadeira) (Haeusler, 2014). A primeira etapa da conformação do tampo consiste em proporcionar uma deformação plástica de um grande raio no disco plano, tornando-o côncavo por intermédio de um processo no qual o disco é fixado no seu centro e é girado em torno do seu eixo axial e duas ferramentas proporcionam a prensagem seqüencial do tampo, obtendo assim o raio de abaulamento (Haeusler, 2014).



Figura 7 – Foto de máquina de abaular (Catálogo Haeusler, 2014)

A segunda etapa é realizada na máquina de rebordear. É o mesmo procedimento aplicado para a conformação do raio de abaulamento, porém são utilizadas ferramentas de dimensões diferentes na extremidade do disco de aço. Ao final do processo é obtido o raio de rebordamento do tampo, concluindo o processo de conformação (Haeusler, 2014).



Figura 8– Exemplo de máquina de Abaular e Rebordear (Haeusler,2014)

Antes de realizar a conformação mecânica é necessário avaliar se há a necessidade de submeter o tampo já conformado a um tratamento térmico de alívio de tensões, conforme especificado na Figura 4– Tampo semi-elíptico (torisférico) (ASME VIII, Divisão 1, Ed. 2013) (ASME VII, Divisão 1, 2013). Não há relação técnica entre o alívio de tensões aplicado ao tampo já conformado e o alívio de tensões aplicado para viabilizar a conformação mecânica do tampo. Para avaliar a necessidade de se submeter o tampo já conformado a um alívio de tensões utiliza-se a Equação 5 (ASME VII, Divisão 1, 2013):

$$e = \frac{75 \times t}{r} \quad (5)$$

Quadro 4 - Condições de aplicação de tratamento térmico para alívio de tensões ao tampo (ASME VII, Divisão 1, 2013).

Condição	Aplicação de tratamento térmico para alívio de tensões
$e < 5$	Não é necessário
$e \geq 5$	É necessário
Espessura acima de 50 mm	É necessário

Para o caso estudado nesse Trabalho de Graduação:

$$e = \frac{75 \times 31,5}{539} = 4,38 < 5 \quad (\text{Não há necessidade de realizar alívio de tensões após a}$$

conformação do disco).

Mesmo não havendo a necessidade de realizar alívio de tensões no tampo conformado, é necessário submeter o disco, já soldado e cortado no diâmetro de $\varnothing 3900\text{mm}$, a um tratamento térmico de alívio de tensões para facilitar o processo de conformação, pois a conformação do tampo é feita através da deformação plástica do metal, processo no qual há altas tensões envolvidas na conformação dos Raios de Abaulamento e de Bordeamento.

Na Tabela 1, está indicado o tempo médio para fabricação de um tampo torisférico em aço A-516 Grau 70 sem tratamento térmico e na Tabela 2 está indicado o tempo e custo médio do mesmo processo utilizando-se tratamento térmico de alívio de tensões, para um tampo de dimensões indicadas na Figura 4 de diâmetro 3050mm. Nota-se que há uma redução considerável no tempo de conformação do tampo após submetê-lo ao tratamento térmico, bem como no seu custo final, mesmo acrescentando-se o custo do tratamento térmico

Tabela 1 - Tempo médio de fabricação de um tampo torisférico em aço A-516 Gr.70 sem tratamento térmico

Processo	Tempo Aproximado
Raio de Abaulamento	12 horas
Custo médio de Abaulamento	R\$ 600,00/hora
Raio de Rebordeamento	25 horas
Custo médio de Abaulamento	R\$ 1300,00/hora
Tempo total	37 horas
Custo total	$10 \times 600 + 20 \times 1300 = \text{R\$ } 39700,00$

Tabela 2 - Tempo e custo médios para fabricação de tampo torisférico em aço A-516 Gr.70 com alívio de tensões

Processo	Tempo Aproximado
Tratamento térmico	7 horas
Custo médio de uso do forno	R\$ 200,00/hora
Raio de Abaulamento	8 horas
Custo médio de Abaulamento	R\$ 600,00/hora
Raio de Rebordeamento	15 horas
Custo médio de Abaulamento	R\$ 1300,00/hora
Tempo Total	30 horas
Custo total	$7 \times 200 + 8 \times 600 + 15 \times 1300 = \text{R\$ } 25700,00$

2.3 Tratamento Térmico para Alívio de Tensões

O Processo de Recozimento é um tratamento térmico em que um material é exposto a uma temperatura elevada por um determinado período de tempo prolongado e depois resfriado lentamente (Callister, 2002). O Tratamento térmico para alívio de tensões é um tipo de recozimento aplicado em materiais, com a finalidade de eliminar tensões residuais originadas por processos de deformação plástica ou por resfriamento não uniforme de peça fabricada em temperatura elevada como soldagem ou fundição, que podem causar empenamento e distorção (Callister, 2002). O tratamento térmico para alívio de tensões consiste em aquecer uma peça até uma temperatura relativamente baixa, por um tempo suficiente até que a peça atinja uma temperatura uniforme. Depois a peça é resfriada lentamente ao ar até atingir a temperatura ambiente. Como a temperatura é relativamente baixa, não afeta os efeitos de deformações plásticas a frio e de outros tratamentos térmicos (Callister, 2002). Durante a soldagem do calor gerado causa o surgimento tensões residuais devido ao fenômeno da dilatação térmica. Em uma junta soldada a região mais próxima do arco elétrico está fundida e conforme aumenta distância do arco elétrico, a temperatura máxima diminui, causando um aquecimento heterogêneo, que origina tensões de contração e expansão na peça soldada, pois numa região de alta temperatura o metal tende a expandir e suas adjacências resistem a essa expansão. E quando a junta soldada resfria o metal se contrai nessa

região causando tensões de tração na interface entre a solda e o metal base. Se a resultante dessas tensões de tração e compressão não é nula haverá tensões residuais no metal, que podem causar distorções e falhas prematuras na peça (ESAB, 2014). As tensões de expansão e contração causadas pela soldagem não provocam deformação em aços de alta espessura devido à sua rigidez, causando um tipo de travamento, gerando tensões residuais próximas à junta soldada. A dissipação de calor favorece o resfriamento rápido, aumentando a tendência à formação de microestruturas frágeis (ESAB, 2014). Para minimizar, ou seja, aliviar essas tensões residuais a peça pode ser submetida a um tratamento térmico alívio de tensões pós-soldagem (ESAB, 2014). O tratamento térmico para alívio de tensões em uma junta soldada pode ser aplicado em aços que apresentam baixa soldabilidade, espessura elevada ou sujeitos a carregamentos cíclicos (ESAB, 2014).

A soldabilidade de um aço é determinada pelo teor de carbono equivalente Carbono Equivalente (C_{eq}). Quanto menor o teor de carbono equivalente melhor a soldabilidade do aço (ESAB, 2014). A fórmula mais amplamente utilizada é a sugerida pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW), (ESAB, 2014):

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

Onde:

$\%C$: Porcentagem de Carbono Existente no Aço;

$\%Mn$: Porcentagem de Manganês Existente no Aço;

$\%Mo$: Porcentagem de Molibdênio Existente no Aço;

$\%V$: Porcentagem de Vanádio Existente no Aço;

$\%Ni$: Porcentagem de Níquel Existente no Aço;

$\%Cu$: Porcentagem de Cobre Existente no Aço.

Quadro 5– Soldabilidade dos aços conforme carbono equivalente (INFOSOLDA, 2014)

Teor de Carbono Equivalente	Classificação
$C_{eq} < 0,40$	Boa soldabilidade
$0,40 \leq C_{eq} \leq 0,60$	Média Soldabilidade
$C_{eq} > 0,40$	Baixa Soldabilidade

O alto teor de carbono equivalente não é um indicador de que o aço não é soldável, mas sim de que são necessários maiores cuidados (ESAB, 2014). No Quadro 5 está indicada a relação entre soldabilidade e teor de carbono equivalente.

Para a conformação do tampo indicado na Figura 4 é aplicado ao disco indicado na Figura 6 (antes da conformação), um tratamento térmico para alívio de tensões conforme especificado no livro ASME VII, Divisão I, Edição 2014, Seção UCS-56 para aços carbono.

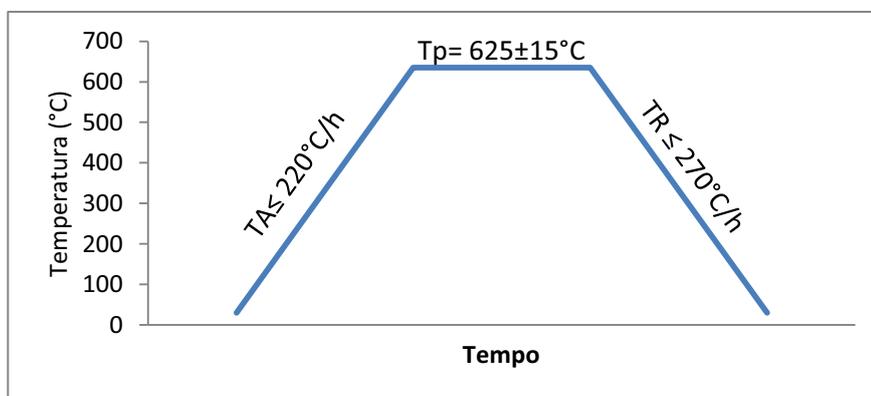


Figura 9- Curva de tratamento térmico para alívio de tensões recomendado para aços carbono (ASME VIII, Divisão I, Edição 2013).

Onde:

TA: Taxa de Aquecimento;

Tp: Temperatura de Patamar;

TR: Taxa de Resfriamento.

Após a conformação o tampo é inspecionado para avaliar as dimensões e depois submetido a ensaio radiográfico para avaliar a integridade da solda (ASME VIII, Divisão 1, Edição 2013). Para a soldagem do disco do tampo de um vaso de pressão é necessário seguir uma Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS), e de um soldador qualificado conforme a Norma ASME IX (ASME VIII, Divisão 1, Edição 2013).

2.4 Propriedades do Aço A-516 Grau 70

A especificação da Norma ASME SA-516 Gr.70 ou A-516 Gr.70 (Grau 70), abrange chapas de aço carbono destinadas principalmente à fabricação de vasos de pressão fabricados por soldagem e sujeitos a moderadas e baixas temperaturas de serviço, nos quais a melhoria da ductilidade é importante (ASME II, Parte A, SA-516, Edição 2013). Podem ser aplicados na fabricação de vasos de pressão com exigências de média e alta pressão (Catálogo de Chapas Grossas Usiminas, 2014). A espessura máxima para aços da Norma SA-516 Gr.70 é limitada apenas pela capacidade de sua composição química manter as propriedades mecânicas indicadas no Quadro 6 – **Propriedades mecânicas do Aço A-516 Grau 70 (ASME II, Parte A, Edição 2013)** e no Quadro 7(ASME II, Parte A, SA-516, 2013).

2.4.1 Propriedades mecânicas do Aço A-516 Gr.70

Quadro 6 – Propriedades mecânicas do Aço A-516 Grau 70 (ASME II, Parte A, Edição 2013)

Resistência a Tração	485 a 620 MPa
Tensão de Escoamento mínima	260 MPa
Alongamento mínimo para espessura 200 mm	17%
Alongamento mínimo para espessura 50 mm	21%

Quadro 7 – Propriedades mecânicas do Aço A-516 Grau 70 (KSME International Journal, Volume 14, nº 1, 2000)

Temperatura (°C)	Resistência a Tração (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)
0	618	412	19
10	598	402	20
20	569	383	22
100	559	373	26
200	549	373	29
300	540	363	31
400	579	363	27
500	520	304	34
600	441	265	37

Na Figura 10 está indicado o gráfico do comportamento da tensão de escoamento e da resistência a tração do Aço A-516 Grau 70 com a variação da temperatura.

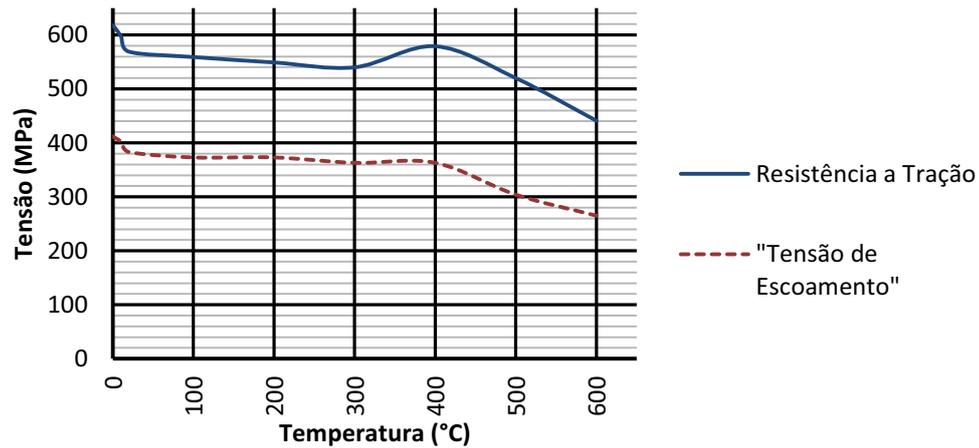


Figura 10 – Comportamento Curva Temperatura x Tensões (KSME International Journal, Volume 14, nº 1, 2000).

2.4.2 Propriedades Químicas do Aço A-516 Grau 70

Segundo a Norma ASME II, Parte A, os aços enquadrados na Norma ASME A-516 Gr.70 devem ter composição química dentro da faixa de composição de cada elemento, definidos pela própria Norma ASME A-516 Gr.70 e pela especificação da seção A-20 da Norma ASME II, Parte A. As faixas de composição química para cada elemento estão indicadas no Quadro 8.

Quadro 8 – Faixa de composição química para aços da Norma A-516 Gr.70 (ASME II, Parte A, Especificação A-20 e A-516 Gr.70 2013).

Elemento	Espessura	Composição (%)
C (Carbono)	$e \leq 13$ mm	Máximo 0,27
	$13 \text{ mm} < e \leq 50$ mm	Máximo 0,28
	$50 \text{ mm} < e \leq 100$ mm	Máximo 0,30
	$e > 200$	Máximo 0,31
Mn (Manganês)	-	0,85 a 1,20
P (Fósforo)	-	Máximo 0,035
S (Enxofre)	-	Máximo 0,035
Si (Silício)	-	0,15 a 0,40
Cu (Cobre)	-	Máximo 0,40
Ni (Níquel)	-	Máximo 0,40
Cr (Cromo)	-	Máximo 0,30
Mo (Molibdênio)	-	Máximo 0,12
V (Vanádio)	-	Máximo 0,03
Co (Colômbio)	-	Máximo 0,02
Ti (Titânio)	-	Máximo 0,03
Al (Alumínio)	-	Mínimo 0,02
C _{eq} (Carbono Equivalente)	$e \leq 50$ mm	Máximo 0,47
	$e > 50$ mm	0,48 a 0,50
Legenda: e = Espessura		

2.4.3 Fornecimento

Aços da Norma ASME A-516 Gr.70 são fornecidos na condição de chapas planas fabricadas por processo de laminação (ASME II, Parte A, Especificação A-20, 2013). Chapas de espessura igual ou inferior a 40 mm normalmente são fornecidas na condição como laminado, podendo passar por tratamento térmico de Normalização de alívio de tensões caso solicitado pelo comprador (ASME II, Parte A, Especificação A-516, 2013). Chapas de espessura maior que 40 mm devem receber tratamento térmico de

normalização (ASME II, Parte A, Especificação A-516, 2013). As chapas de aço A-516 Gr. 70 são fornecidas com largura de 2500 mm e comprimento de até 12000 mm (Catálogo Gerdau, 2014).

2.4.4 Microestrutura do Aço A-516 Gr. 70

O Aço A-516 Gr.70 apresenta microestrutura ferrítica (parte clara na Figura 11) e perlítica (parte escura na Figura 11) quando fornecido na condição laminado a quente .



Figura 11 – Microestrutura do aço A-516 Gr.70 (ampliação 100x) na condição de laminado a quente (Atlas of Microstructures of Industrial Alloys, 1972)

Quando fornecido na condição de laminado a quente e normalizado por austenitização a 899°C sua microestrutura consiste em ferrita e perlita (Figura 12).



Figura 12 – Microestrutura do aço A-516 Gr.70 (ampliação 100x) na condição de laminado a quente e normalizado por austenitização a 899°C (Atlas of Microstructures of Industrial Alloys, 1972).

Se o fornecimento for à condição de laminado e normalizado por austenitização a 1127°C sua microestrutura apresentará ferrita, perlita (parte escura na Figura 13) e provavelmente bainita (Figura 13).



Figura 13 – Microestrutura do aço A-516 Gr.70 (ampliação 100x) na condição de laminado a quente e normalizado por austenitização a 1127°C (Atlas of Microstructures of Industrial Alloys, 1972).

2.5 Processo de Soldagem FCAW (Flux Cored Arc Welding)

A soldagem por FCAW (Flux Cored Arc Welding) conhecido no Brasil como Arame Tubular, é um processo de soldagem a arco elétrico, na qual a coalescência do metal é obtida através do seu aquecimento por um arco entre o eletrodo e o metal (Modenesi, Villani, 2000). O eletrodo para soldagem FCAW possui um fluxo metálico em seu interior que tem como função a estabilização do arco, ajuste de composição da solda e proteção da solda (Modenesi, Villani, 2000). A soldagem utilizando eletrodo do tipo arame tubular proporciona uma maior taxa de deposição se comparado ao eletrodo do tipo arame sólido. Utilizando arame sólido toda a seção conduz corrente, mas com arame tubular com fluxo metálico a maior parte da corrente é conduzida pelo invólucro tubular (Figura 14), proporcionando uma maior densidade corrente aumentando a taxa de deposição do metal de solda e uma maior fusão na poça de solda (Fortes, 2004).

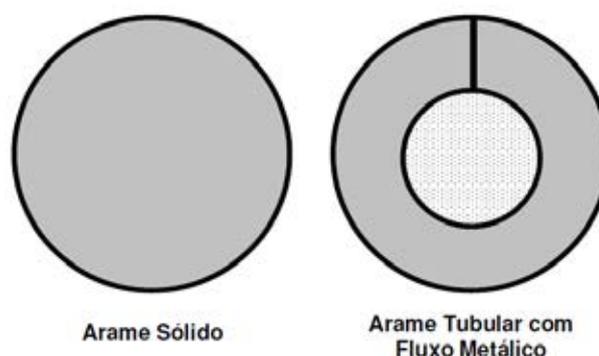


Figura 14– Formatos de Arames para soldagem FCAW (Fortes, 2004).

Na Figura 15 é possível ver o esquema de soldagem por Arame Tubular onde está indicada a poça de fusão. A proteção da junta é feita por gases inertes (CO_2 , O_2 ou a mistura dos dois) externamente e pelo fluxo interno que tem a função de fazer parte da junta soldada, melhorando suas propriedades mecânicas e formar a escória de proteção na parte externa da junta (Fortes, 2004).

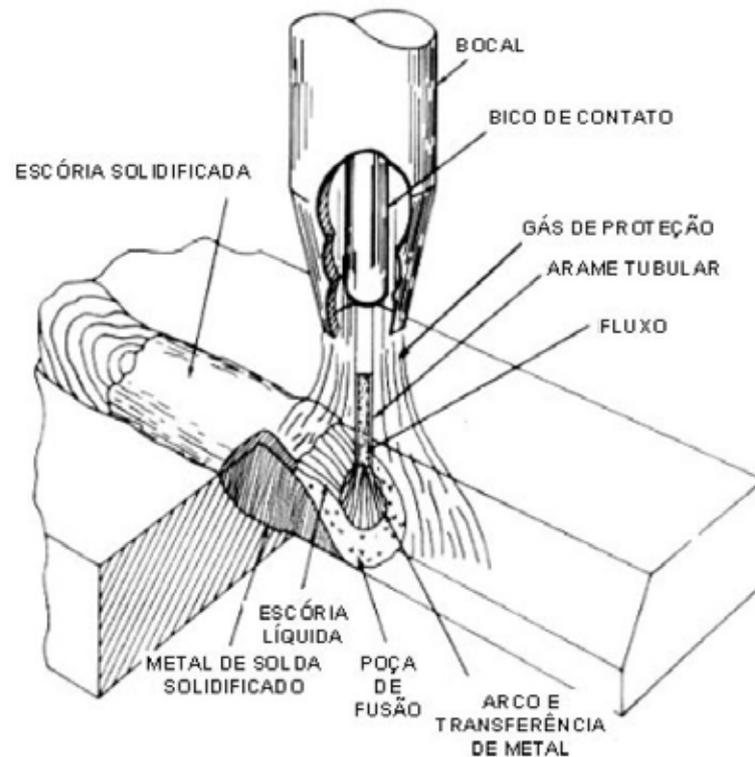


Figura 15– Esquema da poça de fusão de soldagem em FCAW (Fortes, 2004)

Os eletrodos para soldagem FCAW são fornecidos no formato de bobinas, carretéis ou tambores (ASME II, Parte C, Especificação SFA-5.20, Edição 2013) conforme Figura 16.



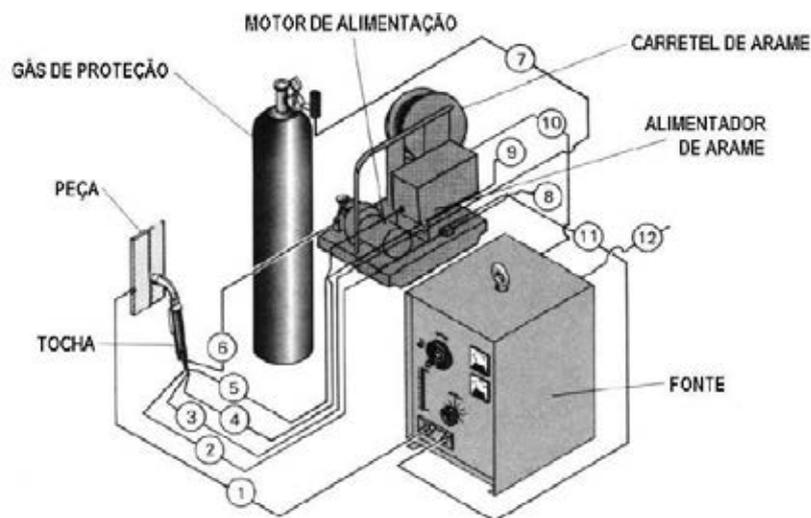
Figura 16 – Embalagem comercial de eletrodo para soldagem FCAW (ESAB, 2014)

Existem diversos tipos de eletrodos (ou metal de solda) para soldagem em FCAW, com composições químicas, propriedades mecânicas e aplicações diferentes. A escolha do metal de solda dependerá principalmente do tipo de metal a ser soldado, do processo de fabricação e da experiência de cada empresa em soldagem. No presente trabalho de graduação foi utilizado o eletrodo de arame tubular ESAB OK® TUBROD 71 Ultra, de especificação ASME SFA-5.20, e classificações AWS E71T-1C (M), E491T-1C(M), E71T-9C (M), E491T-9C (M), destinado a soldagem de aço de baixo e médio teor de Carbono (até 0,5% de Carbono), soldagem estrutural e construção mecânica pesada em geral (Catálogo de Consumíveis ESAB, 2014).

Quadro 9 – Dados do Metal de Adição (Catálogo de Consumíveis ESAB, 2014)

Gás de Proteção	Propriedades Mecânicas	Diâmetro Comercial (mm)	Corrente/Tensão
100% CO ₂	LR: 600MPa LE: 580MPa Al: 26%	1,00	90A/18V a 280A/34V
		1,20	90A/18V a 280A/34V
75%-80% Ar + 20%-25% CO ₂	LR 670MPa LE: 630MPa Al: 24%	1,60	90A/18V a 280A/34V
Legenda:	CO ₂ : Gás Carbônico Si : Silício Mn: Manganês	LR: Limite de Ruptura LE: Limite de Escoamento Al: Alongamento	

Na Figura 17 está demonstrado o equipamento utilizado para a soldagem por processo de Arame Tubular.



1. CABO DE SOLDA (NEGATIVO)
2. REFRIGERAÇÃO DA TOCHA (ÁGUA)
3. GÁS DE PROTEÇÃO
4. GATILHO DA TOCHA
5. ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO PARA A TOCHA
6. CONDUÍTE DO ARAME
7. GÁS DE PROTEÇÃO VINDO DO CILINDRO
8. SAÍDA DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO
9. ENTRADA DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO
10. ENTRADA DE 42 V (CA)
11. CABO DE SOLDA (POSITIVO)
12. CONEXÃO PARA A FONTE PRIMÁRIA (220/380/440 V)

Figura 17 – Equipamento para soldagem em arame tubular (FORTES, 2004)

Quadro 10 – Vantagens, limitações e aplicações da soldagem do processo FCAW (Modenesi, Villani, 2000)

Vantagens	Limitações	Aplicações
Elevada produtividade e eficiência; Soldagem em todas as posições; Custo relativamente baixo,	Equipamento relativamente caro; Pode gerar elevada quantidade de fumos; Necessita de limpeza pós soldagem.	Soldagem de aços carbono e ligados; Soldagem em fabricação, manutenção e em montagem em campo; Soldagem de parte de veículos.

2.6 Certificado de Qualificação de Soldador (CQS)

Conforme o código ASME IX, Edição 2013, a elaboração do certificado de qualificação de soldador para vasos de pressão deve obedecer às variáveis essenciais para soldagem em FCAW descritas no Quadro 11 - **Variáveis Essenciais para qualificação de soldador em FCAW (ASME IX, Ed. 2013, QW-355)**.

Quadro 11 - Variáveis Essenciais para qualificação de soldador em FCAW
(ASME IX, Ed. 2013, QW-355)

Variáveis essenciais para o soldador		
Parágrafo ASME IX		Descrição da Variável
QW-402 – Juntas (Joints)	.4	- Backing (Mata-Junta)
QW-403 – Metais Base (Base Metals)	.16	ϕ Diâmetro do Tubo
	.18	Φ P-Number (Número P)
QW-404 – Metais de Adição (Filler Metals)	.15	Φ F-Number (Número F)
	.30	ϕ Espessura “t” de metal de solda depositado
QW-405 – Posições (Positions)	.1	+ Posição
	.3	ϕ $\uparrow\downarrow$ Solda vertical
QW-408 – Gás	.8	- Gás Inerte
QW-409 – Elétrico (Electrical)	.2	ϕ Modo de Transferência
Legenda	- Exclusão + Adição ϕ Alteração	\uparrow Ascendente \downarrow Descendente

Cobre-Junta, Mata-junta ou backing é uma peça colocada na raiz da solda para conter o metal fundido na poça de fusão (Figura 18). O mata-junta pode ser de material cerâmico ou metal, podendo ser removido ou não após o término da soldagem (Villani; Modenesi; Queiroz, 2009).

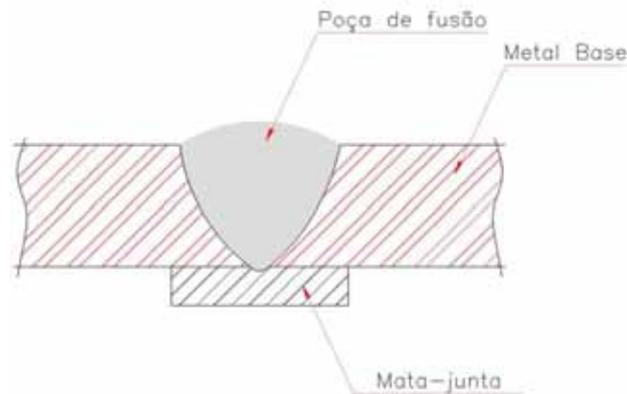


Figura 18 – Seção transversal de uma poça de fusão soldada com Mata-junta
(Villani; Modenesi; Queiroz, 2009)

Gás Inerte: Ao soldar dois tubos, pode-se inserir um gás inerte, normalmente (Argônio ou Hélio) no interior da raiz a fim de possibilitar uma maior velocidade durante o processo de soldagem e diminuir porosidades e possíveis oxidações (Soldas Brasil, 2014). Sua montagem é feita conforme indicado na Figura 19.

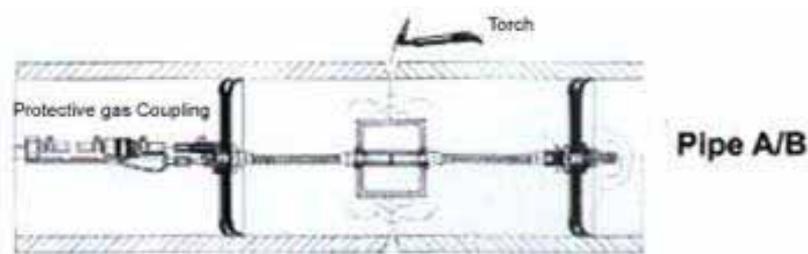


Figura 19 – Ilustração da aplicação de Gás Inerte no interior de um tubo (Soldas Brasil, 2014)

Os fatores que determinam o modo de transferência do metal de solda são: corrente de soldagem, diâmetro do arame, tensão, características da fonte e o gás de proteção (Fortes, 2004). O modo de transferência pode ser do tipo Globular, Aerossol (ou Spray) ou curto-circuito.

O modo de transferência globular ocorre quando o metal de adição é depositado na poça de fusão na forma de bolhas (glóbulos) grandes que se movem do eletrodo em direção a poça de fusão por ação da força da gravidade. É ideal para a soldagem de grandes espessuras possibilitando maior penetração da solda no metal base e velocidade de soldagem. Sua maior desvantagem é que esse modo de transferência é indicado para soldagem na posição plana, sendo que nas posições vertical e sobre cabeça diminui a

confiabilidade do cordão de solda e gera respingos durante a soldagem (Fortes, 2004). Na transferência do tipo Aerossol, pequenas gotas de metal de adição fundido se desprendem do eletrodo indo em direção à poça de fusão por ação de forças eletromagnéticas, portanto a ação da força de gravidade é desprezível, tornando possível a soldagem em qualquer posição (Fortes, 2004). A soldagem por transferência do tipo curto-circuito ocorre para baixas tensões e correntes, utilizando-se arames de diâmetros entre 0,8mm e 1,2mm, gerando uma pequena poça de fusão de rápida solidificação, sendo que o arame chega a tocar a poça de fusão diretamente entre 20 a 200 vezes por segundo. Esse modo de transferência propicia a soldagem de materiais de pequena espessura ou em aberturas largas em metais de grande espessura (muito utilizado para realizar passes de raiz) em qualquer posição. É indicado quando se pretende ter uma linearidade entre os metais base e a junta soldada (Fortes, 2004).

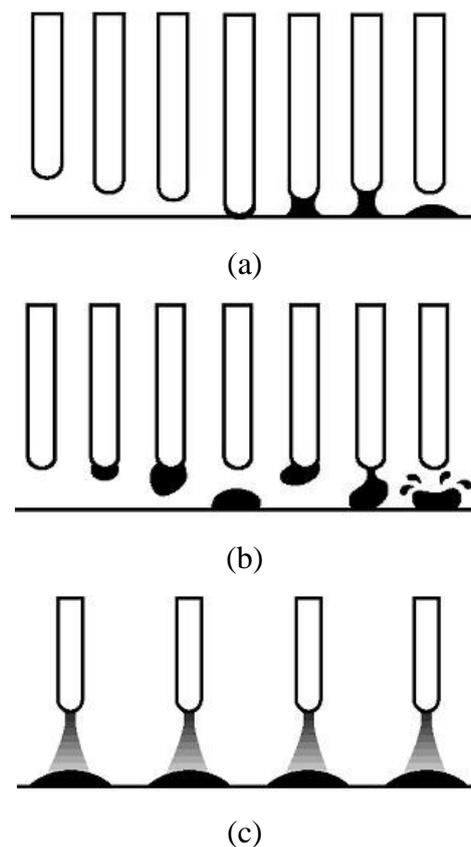


Figura 20 – Modos de Transferência do metal de adição: (a) Curto-circuito; (b) Globular; (c) Spray ou Aerossol (FORTES, 2004).

2.7 Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS)

A EPS é um formulário elaborado e programado seguindo-se Variáveis Essenciais, Variáveis Suplementares e a Variáveis Não Essenciais (ASME IX, Ed. 2013). A elaboração da EPS requer ensaios mecânicos, sendo que todos os parâmetros de soldagem utilizados na fabricação do CP (Corpo de Prova) de qualificação da EPS deverão se registrados em um Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem (RQPS), um documento que deve usado para gerar a EPS (ASME IX, Ed. 2013). A EPS possibilita padronização e reprodutividade de um determinado processo de soldagem, uma vez que indica todos os parâmetros de soldagem e de preparação da peça a ser soldada.

Quadro 12– Descrição das variáveis para EPS para soldagem em FCAW (ASME IX, Edição 2013)

Descrição das variáveis					
Parágrafo		Descrição das variáveis	Essencial	Suplementar	Não-Essencial
QW-402 Juntas	.1	φ Design da Junta			X
	.4	- Mata junta			X
	.11	± Retentor			X
QW-403 Metais Base	.6	Limites de espessura		X	
	.8	φ Espessura qualificada	X		
	.9	Passe > ½" (13 mm)	X		
	.10	Limite de espessura (Curto-circuito)	X		
	.11	P-Number qualificado	X		
QW-404 Metais de Adição	.4	φ F Number	X		
	.5	φ A-Number	X		
	.12	φ Classificação AWS		X	
	.23	φ Forma do metal de adição	X		
	.27	φ Elementos de Liga	X		
	.30	φ Espessura	X		
	.32	Limites de Espessura (Curto circuito)	X		
	.33	φ Classificação			X
QW-405 Posições	.1	+ Posição			X
	.3	φ ↑↓ Solda Vertical			X
QW-406 Pré- Aquecim ento	.1	Decréscimo >55°C	X		
	.2	φ Manutenção do pré-aquecimento			X
	.3	Acréscimo > 55°C		X	
QW-407 (PWHT)	.1	φ PWHT	X		
QW-408 Gás	.1	φ Composição			X
	.2	φ Único, mistura ou %	X		
	.3	φ Vazão			X
	.5	± φ Gás de proteção na raiz			X
Legenda:	+ Adição > Acréscimo / Maior que ↑ Ascendente φ Alteração PWHT – Post Weld Heat Treatment - Exclusão < Decréscimo / Menor que ↓ Descendente				

PWHT (Post Weld Heat Treatment), é qualquer tratamento térmico aplicado a um metal após a soldagem (ASME IX, Edição 2013).

3 Justificativa

Já foi verificado por experiência de trabalho, que ao soldar um corpo de prova de aço ASTM A-516 Grau 70 (que apresenta tensão de ruptura 485 a 620MPa) e submetê-lo a Tratamento Térmico de Alívio de Tensões, o mesmo apresentou redução do seu limite de resistência a tração, abaixo do limite mínimo especificado pela Norma ASME II, Parte C. A Norma ASME VII, Divisão 1 define apenas o método de cálculo de espessura de tampos para vasos de pressão, mas as variáveis do processo de fabricação dos tampos são desconsideradas pela norma, ficando a cargo de cada fabricante definir e controlar o seu processo de fabricação. O processo de conformação mecânica de um tampo de diâmetro grande e elevada espessura envolve tensões acima da tensão de escoamento do metal de fabricação, podendo causar a formação de trincas ou descontinuidades na microestrutura do metal. As alterações nas propriedades mecânicas do aço A-516 Grau 70 quando submetido à soldagem pelo processo arame tubular e depois a tratamento térmico de alívio de tensões, pode gerar a necessidade de redefinir o projeto de tampos a serem conformados, tornando-o mais confiável, pois vasos de pressão são equipamentos que exigem um cuidado especial devido ao risco a vida humana no caso de falha e ao seu alto valor agregado. Ainda no sentido de tornar o processo mais confiável será possível definir os parâmetros que devem ser adotados durante o processo de soldagem de forma que seja possível reproduzir uma junta soldada de qualidade.

4. Objetivos:

O presente trabalho tem como objetivo geral:

- Avaliar e definir a tensão máxima admissível para a fabricação de um tampo em aço A-516 Grau 70 para um vaso de pressão;
- Avaliar o efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas e na microestrutura do aço A-516 Grau 70 aplicado na fabricação de tampos vasos de pressão;
- Analisar as alterações nas propriedades mecânicas do Aço A-516 Grau 70 soldado e submetido a tratamento térmico de alívio de tensões.
- Definir um Procedimento de Soldagem que definirá os parâmetros de soldagem a serem aplicados na fabricação dos tampos que serão submetidos a tratamento térmico;

5. Metodologia

5.1 Fabricação dos Corpos de Prova

Para atingir os objetivos do presente Trabalho de Graduação foram avaliadas as alterações propriedades mecânicas do aço A-516 Gr.70 soldado e submetido a tratamento térmico. Para comprovar a validade do estudo foi obtido o certificado da chapa de aço junto ao fornecedor. O certificado foi avaliado e as composições químicas e propriedades mecânicas estão de acordo com a especificação do aço A-516 Gr.70 indicada na Norma ASME II, Parte A, Edição 2013. Na Figura 21 e na Figura 22 podem ser verificados respectivamente, a inscrição da usina na chapa de origem dos corpos de prova e seu certificado de qualidade

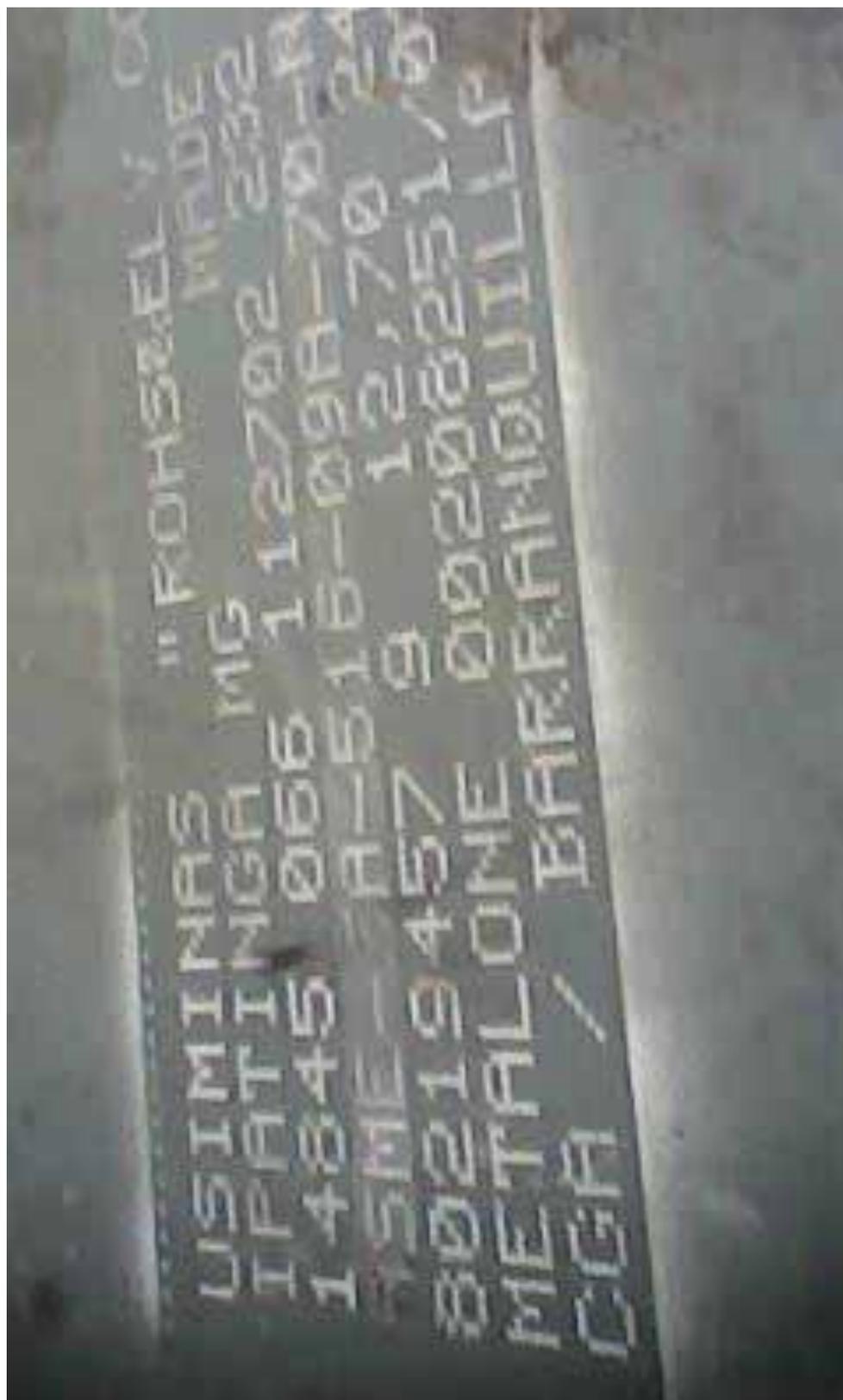


Figura 21 – Foto da chapa com as inscrições da usina

USIMINAS
USIMINAS SIDERÚRGICAS DE MINAS GERAIS S.A.
USINA INTEGRANTE CAMAQUI (PA. BRAS. 301)
SEDE: BELO HORIZONTE - MG - BRASIL
BARRIO ENGENHEIRO NOGUEIRA - CP 064 - CEP: 31190-200
INSCRIÇÃO ESTADUAL: 311.02022.9120

CERTIFICADO DE INSPEÇÃO
INSPECTION CERTIFICATE
CHAPA GROSSA DO LCG
STEEL PLATE

Cliente-Customer: LAPEFER COMERCIO INDUSTRIA DELAMINADOS
Tolerâncias - Tolerances
Espessura-Thickness
Largura-Width

Nota Fiscal
Commercial Invoice
3 000165088 1

Ordem de Venda
Sale Order

Nº
Item

00224992 11

Data de Emissão
Date of Issue
30/07/2011

Nº Certificado
Certificate N°
2617224

Folha - Sheet = 1

APARÊNCIA SUPERFÍCIE - SURFACE APPEARANCE
SUPERFICIE COMERCIAL
COMMERCIAL SURFACE

Dimensões Nominais - Nominal Dimensions
12,70 X 2440 X 6100 mm
CUT EDGE AND DRY

Bordas - Edge / Oleamento - Oiled
APARADA E NAO OLEADA
COMMERCIAL SURFACE

Placa Volume
Slab

Amostra Sample	Pecas por Volume Pieces per Packages	Peso Líquido Net Weight	Peso Bruto Gross Weight	Corrida Heat
242 802170232	1	1530	35450662	1
242 802170236	1	1530	35450662	1
242 802170256	1	1530	35450662	1
212 802194580	1	1530	35453129	1
222 802194395	1	1530	35453130	1
231 802194475	1	1530	35453129	1

Peso Líquido Real Total-Actual Net Weight = 18.100 Tonelagem Métrica-Metric Ton
Peso Bruto Real Total-Actual Gross Weight = 18.100 Tonelagem Métrica-Metric Ton

Ensaio de Tracção - Tensile Test

Amostra Sample	Pos	Dir	IE	YS	TS	IR	YS/TS (%)	Al (%)
35450662	BB	C	359	563	64	64	22,5	
35453117	BB	C	328	512	64	29,0		
35453129	BB	C	316	513	62	25,0		
35453130	BB	C	325	513	63	25,5		
35453142	BB	C	329	520	63	24,0		
35453154	BB	C	320	515	62	26,5		
35461326	BB	C	376	579	65	23,5		

Unidade-Unit = MPa
Método de Ensaio IE-Test Method YS = 0,2%
BN = 200 mm Larg = 40 mm S = Retangular-Rectangular

Composição Química (% Peso) - Chemical Composition (% Weight)

Corrida Heat	C	SI	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	OK Ni	As	B			
112702 P	0,21	0,24	1,09	0,018	0,009	0,043	0,02	0,002	0,004	0,003	0,02	0,01	0,001	0,0027	0,0002	0,0003	0,00
211574 P	0,22	0,23	1,03	0,021	0,008	0,041	0,02	0,002	0,005	0,003	0,02	0,01	0,001	0,0038	0,0002	0,0006	0,00
566406 P	0,25	0,23	1,06	0,019	0,004	0,036	0,01	0,001	0,003	0,003	0,02	0,01	0,001	0,0027	0,0002	0,0017	0,00
566416 P	0,27	0,22	1,12	0,016	0,004	0,036	0,01	0,003	0,004	0,002	0,02	0,02	0,001	0,0043	0,0003	0,0015	0,00

Ensaio por Ultrassom - Ultrasonic Test

A(s) chapa(s) foi (foram) aprovada(s) em ensaio por ultrassom com resultados satisfatórios de acordo com a especificação EN-10160:1999 TAB. 3 CL.S1 E TABS CL E1. The plate(s) was (were) approved by ultrasonic test with satisfactory results in accordance with specification EN-10160:1999 TAB. 3 CL.S1 E TABS CL E1.

Tratamento Térmico - Heat Treatment

Tratamento Treatment
Normalização-Normalizing

Unidade de Temperatura-Temperature Unit = °C
Tempo de Anaqueamento-Heating Time = minutos-minutes
Tempo de Encharque-Soaking Time = minutos-minutes
Tempo total de forno-Furnace Time = minutos-minutes

Temp Tol TA TE TT
910 +/-10°C 20 10 30

Observações - Remarks
SET/2010-309606
FDS - Ficha de Dados de Segurança do Produto número 03, disponível na Extranet das Usiminas
MSDS - Material Safety Data Sheet N° 03 available at Usiminas Extranet

Observações - Remarks
Tempo da Forja = 21.5355
CA
JOÃO LUIZ BARRIOS ANTUNES
SUPERINTENDÊNCIA DE GARANTIA DA QUALIDADE
QUALITY ASSURANCE MANAGEMENT

Continuar na Folha - Continued on Sheet. 2

VISTORADOR SURVEYOR

Figura 22 – Certificado de Qualidade da Usina

5.2 Carbono equivalente dos corpos de prova

A partir do certificado do CP é possível obter a composição dos componentes químicos e calcular seu teor de carbono equivalente utilizando a equação (6):

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

No certificado do CP (Figura 22 – Certificado de Qualidade da Usina), a chapa do CP utilizada para os ensaios do presente trabalho de graduação corresponde a Corrida (*Heat*) 566416, de onde são obtidas as seguintes composições químicas:

$$\%C = 0,27\%$$

$$\%Mn = 1,12 \%$$

$$\%Cr = 0,02\%$$

$$\%Mo = 0,01\%$$

$$\%V = 0,004\%$$

$$\%Ni = 0,02\%$$

$$\%Cu = 0,01\%$$

$$C_{eq} = 0,27 + \frac{1,12}{6} + \frac{0,02 + 0,01 + 0,004}{5} + \frac{0,02 + 0,01}{15} = 0,47\%$$

O aço A-516 Gr.70 utilizado como CP apresenta porcentagem de carbono equivalente 0,47% (acima de 0,40% e abaixo de 0,60%), portanto possui média soldabilidade, o que indica que requer atenção quanto a sua utilização em juntas soldadas (Infosolda, 2014).

5.3 Preparação dos corpos de prova antes da soldagem

Antes da soldagem corpos de prova foi feito um duplo chanfro de com ângulo 60° (Figura 23) na espessura ao longo do da face de 12,5mm x 300 mm.

A região que recebeu a soldagem recebeu limpeza por esmerilhamento com lixadeira e escovamento com escova de aço. Momentos antes da soldagem, a região dos CP que terá a junta soldada foi submetido a uma chama de maçarico com a finalidade de remover a umidade da junta soldada. Entre cada passe de solda foi feita uma limpeza por esmerilhamento com lixadeira e escovamento com escova de aço, para remover a escória gerada no processo de soldagem.

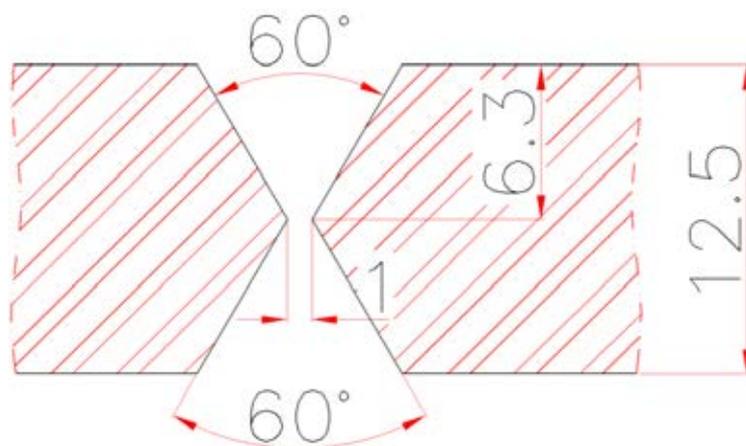


Figura 23 – Perfil da junta a ser soldada.

5.4 Soldagem dos corpos de prova

Foram soldados pelo processo FCAW 2 conjuntos de 2 peças de dimensões 12,5mm x 150 mm x 300 mm (Espessura x Largura x Comprimento) com uma junta de topo chanfrada de seção perfil “X” ou duplo “V”, resultando em dois Corpos de Prova com dimensões finais de 12,5mm x 300 mm x 300 mm (Espessura x Largura x Comprimento). Todos os dados durante a soldagem dos dois CP (Corpos de Prova) indicados na Tabela 3 foram registrados em uma RQPS e em uma EPS. Na figura Figura 24 pode-se verificar os corpos de prova antes e depois da soldagem.



(a)



(b)

Figura 24–Corpos de prova:(a) Antes da soldagem;(b) Após a soldagem

Tabela 3 – Dados de soldagem em FCAW dos corpos de prova

Seqüência de passes	Diâmetro do eletrodo	Classificação	Corrente	Tensão
Raiz	Ø1,2 mm	E-71T1	180 A	25 v
Preenchimento			220 A	28 V

Após a soldagem os CP tiveram o excesso de solda removido por esmerilhamento com lixadeira (Figura 25), para evitar o empenamento e facilitar o corte e preparação para os ensaios mecânicos. Depois do esmerilhamento do excesso de metal de solda foi feita uma inspeção visual em todos os CP com auxílio de uma lupa para verificar a presença de descontinuidades na superfície.

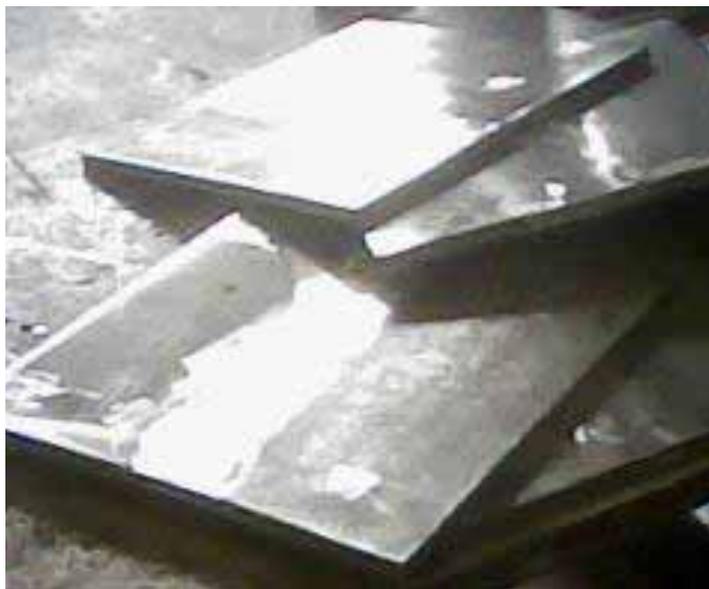


Figura 25 – Corpos de prova com o excesso de metal de solda removido.

5.4 Tratamento térmico pós soldagem (PWHT)

Após soldado, apenas um dos CP foi submetido a tratamento térmico de alívio de tensões, seguindo a curva indicada na Figura 26.

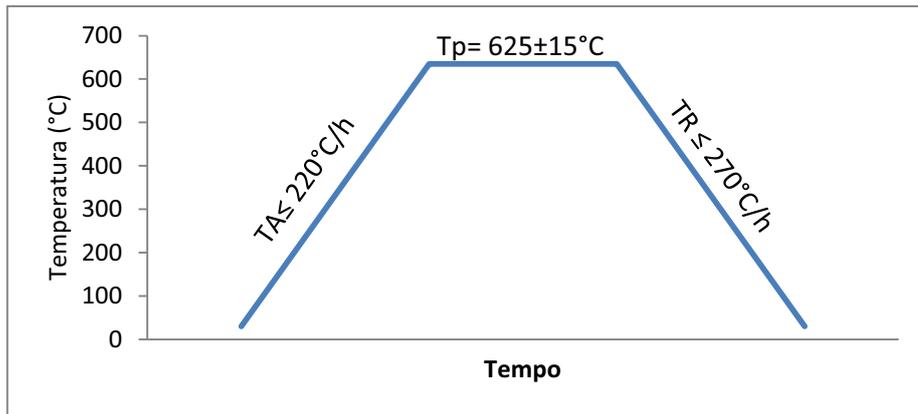


Figura 26 – Curva de Tratamento térmico aplicado aos corpos de prova

Devido às dimensões do forno o CP submetido a tratamento térmico foi cortado em processo de corte a frio em dimensões compatíveis com as dimensões internas do forno. O tratamento térmico foi realizado em um forno EDG 3P-S indicado na Figura 27 e a programação do forno para realização do tratamento térmico está indicada na Tabela 4. O resfriamento foi feito lentamente em temperatura ambiente. Como o forno EDG 3P-S não possui controle de resfriamento automatizado, após atingir o tempo máximo de patamar a porta do forno foi aberta parcialmente, deixando uma pequena fresta para evitar o contato repentino da peça com a temperatura ambiente, evitando o resfriamento rápido da peça para não comprometer o ciclo de tratamento térmico.



Figura 27 – Forno utilizado para tratamento térmico pós soldagem

Tabela 4 – Dados de Operação do Forno

Dados de Operação do Forno	
Temperatura Inicial	30 °C
Temperatura de Patamar	625 °C
Velocidade de Aquecimento	3,67° C/min
Tempo de Patamar	120 min

5.5 Ensaios mecânicos

Para validar a qualificação da EPS (Especificação de Procedimento de Soldagem) os CP foram submetidos aos ensaios requeridos pela Norma ASME IX, Seção QW-451.2, Edição 2013, como indicado na Tabela 5.

Tabela 5 – Ensaio Mecânicos requeridos para qualificação de EPS (ASME IX, Edição 2013)

Ensaio Mecânicos requeridos para qualificação de EPS				
Espessura “e” do CP	Tipo e quantidades de ensaios requeridos para qualificação			
	Tração	Dobramento Lateral	Dobramento de Face	Dobramento de Raiz
$e \leq 3/8$ ” (10mm)	2	-	2	2
$e \geq 3/8$ ” (10 mm)	2	4 ⁽¹⁾	2	2
(1) - 2 dobramentos de face e 2 dobramentos podem ser substituídos por 4 dobramentos laterais				

5.5.1 Ensaio de Dobramento

5.5.1.1 Preparação dos corpos de prova para ensaio de dobramento

Foi escolhida a opção de executar apenas ensaios de dobramento lateral, portanto todos CP para os ensaios de dobramento, foram feitos conforme especificado Figura 28.

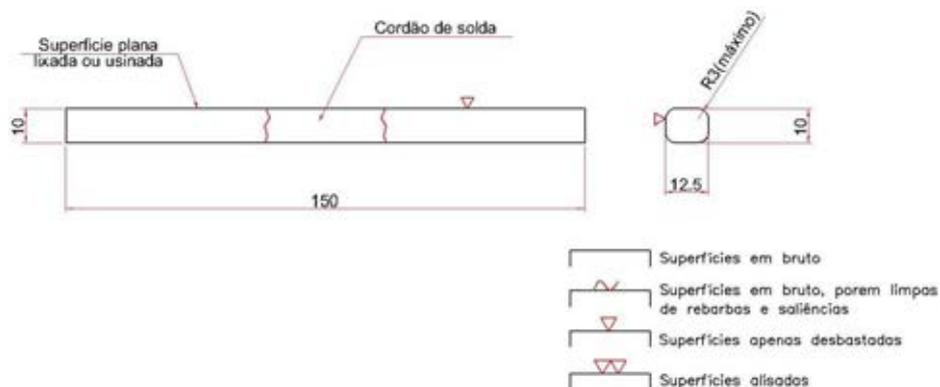


Figura 28 – Dimensões do Corpo de Prova para dobramento lateral (ASME IX, Ed. 2013).

O corpo de prova que foi soldado submetido a tratamento térmico de alívio de tensões e o corpo de prova somente originaram 4 peças cada, com as dimensões indicadas na Figura 28 – Dimensões do Corpo de Prova para dobramento lateral (ASME IX, Ed. 2013). para realização do ensaio de dobramento. O corte foi feito a frio por serra de fita vertical marca Starret, Modelo S2020 e o acabamento das dimensões foi feito em fresadora marca Besser, modelo STI-5 – 1370 x 250 mm. Antes de realizar o ensaio de dobramento todos os corpos de prova foram medidos com paquímetro digital Coolant Proof Absolut Escala 0-150 mm e precisão 0,01mm.

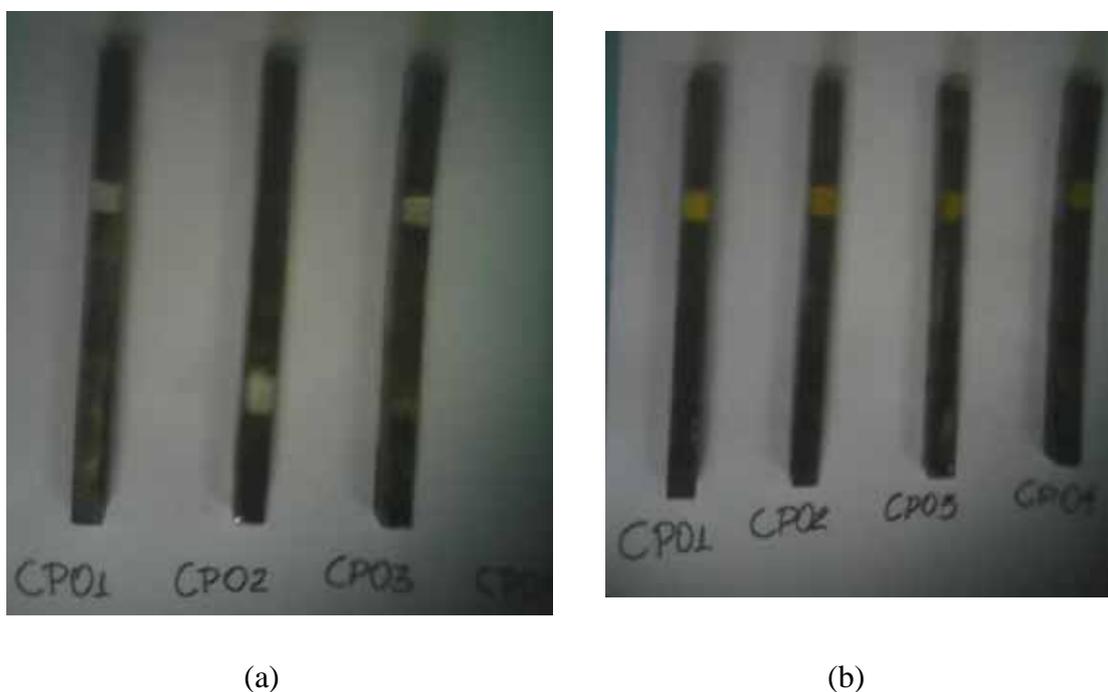


Figura 29 – Foto dos Corpos de Prova antes dos ensaios de dobramento: (a) CP sem tratamento térmico; (b) CP com tratamento térmico.

Tabela 6 – Dimensões dos CP antes dos ensaios de dobramento

Dimensões em dos CP antes dos ensaios de dobramento	
Corpos de Prova com Tratamento Térmico	
Descrição	Dimensões (Espessura x Largura x Comprimento) [mm]
CP01	10,20 x 12,77 x 150
CP02	10,18 x 12,71 x 150
CP03	10,21 x 12,75 x 150
CP04	10,15 x 12,70 x 150
Corpos de Prova sem Tratamento Térmico	
Descrição	Dimensões (Espessura x Largura x Comprimento) [mm]
CP01	10,06 x 12,76 x 150
CP02	10,07 x 12,76 x 150
CP03	10,05 x 12,49 x 150
CP04	10,08 x 12,64 x 150

5.5.1.2 – Realização dos ensaios de dobramento.

Todos os Ensaios foram realizados em uma Máquina Universal para Ensaios, marca Mohr-Federhaff-Losenhaun (Figura 30), Carga 40 toneladas originalmente utilizada para ensaios de tração adaptada para receber os Corpos de Prova e realizar os ensaios de dobramento.



Figura 30 – Foto do Equipamento utilizado para executar os ensaios de dobramento lateral

O ensaio de dobramento consistiu em posicionar os CP na posição horizontal sobre 2 rolos cilíndricos e pressioná-los verticalmente por outro rolo cilíndrico, até que ficasse as duas extremidades ficassem quase paralelas como indicado na Figura 31.

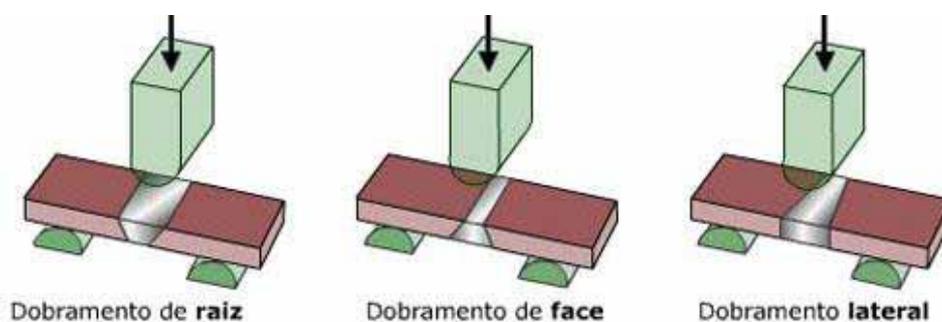


Figura 31 - Esquema de ensaio de dobramento (CIMM , 2010)

5.5.1.3 Resultados dos ensaios de dobramento

Os CP foram analisados em toda a sua superfície utilizando lente de aumento e através de fotografia (Figura 32), com a finalidade de verificar a presença ou não de descontinuidades (pequenas fissuras). Nos CP avaliados no presente trabalho de graduação não foi encontrada nenhuma descontinuidade, portanto, todos estão isentos de descontinuidades.



Figura 32 – Fotos dos Corpos de prova após serem submetidos aos ensaios de dobramento: (a) CP com tratamento térmico; (b) CP sem tratamento térmico.

Caso fossem verificadas descontinuidades, todas deveriam ser medidas, e os valores das medições registrados, para serem avaliados conforme os limites indicados na Tabela 7 estabelecidos pela Norma ASME IX, Seção QW-163, Edição 2013. Caso ocorra ruptura no CP submetido a ensaio de dobramento, o mesmo deverá ser reprovado e deverá ser fabricado outro corpo de prova para realizar um novo ensaio de dobramento. O resultado da avaliação dos corpos de prova após os ensaios de dobramento estão indicados na Tabela 8.

Tabela 7 – Limites máximos de descontinuidades em ensaios de dobramentos

Limites de descontinuidades para um Corpo de Prova	
Tipo de descontinuidade	Limites permitidos
Descontinuidades Individuais	3 mm
Soma das descontinuidades no mesmo corpo de prova	10 mm
Trincas ou rachaduras	Nenhuma

Tabela 8 – Resultado da inspeção visual dos CP após o ensaio de dobramento

Resultado da inspeção visual dos CP após o ensaio de dobramento		
Corpos de Prova com Tratamento Térmico		
Descrição	Resultado da inspeção visual da junta soldada	Conclusão
CP01	Isento de descontinuidades	Aprovado
CP02	Isento de descontinuidades	Aprovado
CP03	Isento de descontinuidades	Aprovado
CP04	Isento de descontinuidades	Aprovado
Corpos de Prova sem Tratamento Térmico		
Descrição	Resultado da inspeção visual da junta soldada	Conclusão
CP01	Isento de descontinuidades	Aprovado
CP02	Isento de descontinuidades	Aprovado
CP03	Isento de descontinuidades	Aprovado
CP04	Isento de descontinuidades	Aprovado

Comparando visualmente os CP soldados submetidos a tratamento térmico de alívio de tensões, com os CP apenas soldados, não foi verificada nenhuma alteração. Como o ensaio de dobramento é um ensaio principalmente qualitativo (Zolin, 2011), os dados mais importantes obtidos nos ensaios de dobramento foram a verificação de isenção de descontinuidades e o fato de não ocorrer fratura em nenhum CP. Estes resultados indicam que o tratamento térmico provavelmente não alterou negativamente as propriedades mecânicas do aço A-516 Gr.70, tanto na região do metal base, quanto na junta soldada. Portanto, considerando os resultados obtidos nos ensaios de dobramento lateral todos os corpos de prova estão aprovados, mas ainda é necessário estudar quantitativamente as alterações causadas pelo tratamento térmico de alívio de tensões nos corpos de prova.

5.5.2 Ensaio de tração

5.5.2.1 – Preparação dos corpos de prova para os ensaios de tração

O corpo de prova que foi soldado e submetido a tratamento térmico para alívio de tensões e o corpo de prova que foi apenas soldado a originaram 3 pedaços cada um, que foram utilizados para a realização do ensaio de tração. O corte de cada peça foi feito a frio por em de serra de fita vertical para aço carbono marca Starret, Modelo S2020 e a usinagem das dimensões e acabamento final foi feito em fresadora marca Besser, modelo STI-5 – 1370 x 250 mm.

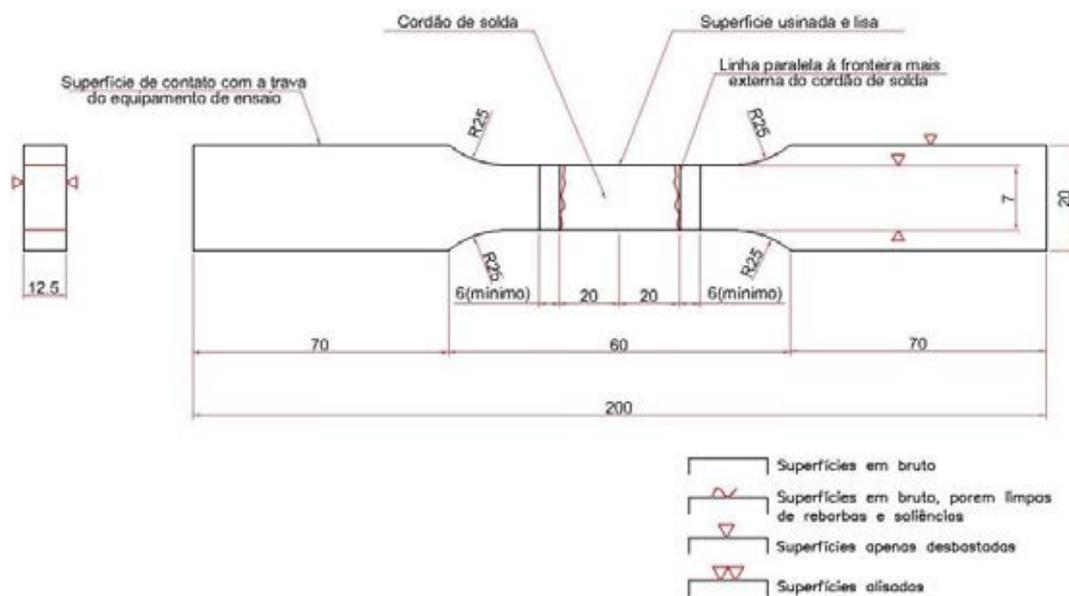


Figura 33 – Dimensões do Corpo de Prova para Ensaio de Tração

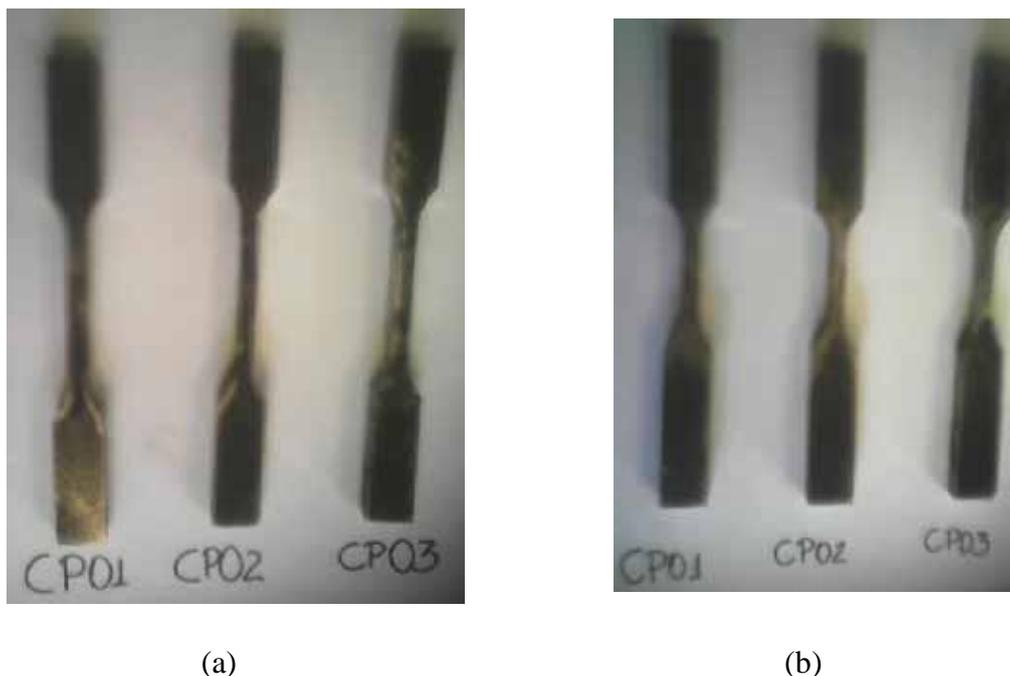


Figura 34 – Fotos dos CP antes dos ensaios de Tração: (a) CP com tratamento térmico; (b) CP sem tratamento térmico.

Antes de realizar os ensaios foram feitas medidas da seção reduzida de todos os CP, com paquímetro digital modelo Coolant Proof Absolut Escala 0-150 mm e precisão 0,01mm.

Tabela 9 – Dimensões iniciais dos corpos de prova sem apenas soldados

Dimensões iniciais dos corpos de prova sem apenas soldados					
CP01		CP02		CP03	
Medida	Dimensões [mm]	Medida	Dimensões [mm]	Medida	Dimensões [mm]
1	6,81 x 12,35	1	6,74 x 12,46	1	6,74 x 12,34
2	6,73 x 12,27	2	6,75 x 12,72	2	6,74 x 12,36
3	6,66 x 12,35	3	6,69 x 12,50	3	6,75 x 12,36
Média	6,733 x 12,323	Média	6,727 x 12,560	Média	6,743 x 12,353
Área	82,977mm ²	Área	84,487mm ²	Área	83,303mm ²

Tabela 10 – Dimensões iniciais dos corpos de prova sem tratamento térmico

Dimensões iniciais dos corpos de prova com tratamento térmico de alívio de tensões					
CP01		CP02		CP03	
Medida	Dimensões [mm]	Medida	Dimensões [mm]	Medida	Dimensões [mm]
1	7,40 x 12,55	1	7,69 x 12,70	1	7,22 x 12,64
2	7,32 x 12,53	2	7,38 x 12,56	2	7,27 x 12,66
3	7,24 x 12,65	3	7,27 x 12,42	3	7,20 x 12,41
Média	7,32 x 12,577	Média	7,313 x 12,56	Média	7,23 x 12,57
Área	92,061mm ²	Área	91,855mm ²	Área	90,881mm ²

5.5.2.2 Realização dos ensaios de tração

Para validar o ensaio de tração, a ruptura de todos os CP deve ocorrer fora da região soldada, ou seja, o metal base deve romper enquanto que o metal de adição deve manter-se intacto, e a tensão máxima e de ruptura não deve estar abaixo de 5% da tensão especificada para o metal, nesse caso o aço A-516 Gr.70, caso contrário será necessário produzir um novo CP e executar novamente o ensaio (ASME IX, Seção QW-153, Edição 2013). Segundo a Norma ASME IX, Edição 2013, os valores de tensão de ruptura e dimensões da seção mínima do CP ser registrados juntamente com uma observação indicando o local onde ocorreu a ruptura. Essa indicação pode ser no metal base ou no metal de adição. Os ensaios foram realizados na mesma máquina em que foram realizados os ensaios de dobramento Máquina Universal para Ensaios, marca Mohr-Federhaff-Losenhaun, Carga 40 toneladas. Foi aplicada uma carga tração perpendicular à face da menor seção do CP, até ocorrer a ruptura do metal. Os carregamentos máximos e de ruptura foram registrados no leitor analógico mostrado na Figura 35. Foi gerado pelo equipamento um gráfico de Tensão x Deformação em um papel milimetrado para cada CP (Figura 37).



Figura 35 – Medidor de carregamento.

5.5.2.3 - Análise dos corpos de prova após os ensaios de tração.

Após a ruptura foram medidas novamente as dimensões da seção reduzida onde ocorreu a fratura e foi feita uma inspeção visual a fim de verificar a região onde ocorreu a fratura. Na Tabela 9 e na Tabela 10 estão indicadas as dimensões iniciais dos corpos de prova, na Tabela 13 e Tabela 14 estão indicadas as dimensões finais dos corpos de prova. Foi verificado que em todos os corpos de prova a fratura ocorreu no metal base, ou seja, fora da região soldada, que se manteve intacta. Na Figura 36 pode ser verificado o local de rompimento.

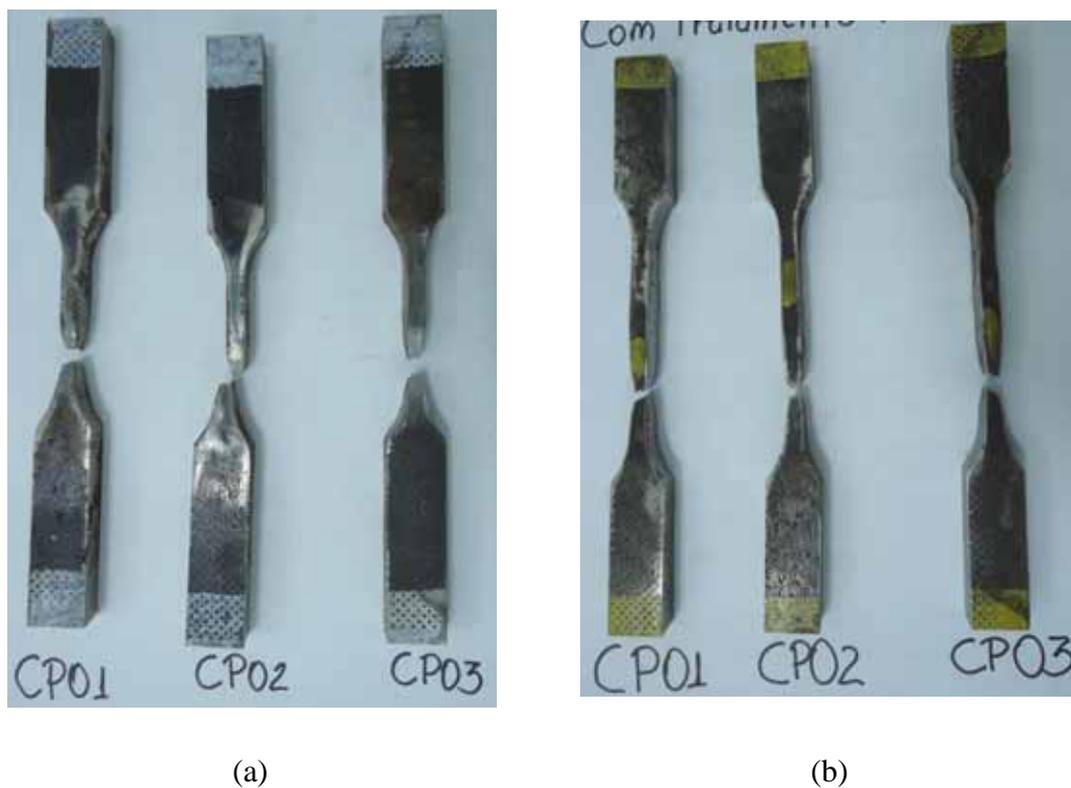


Figura 36 – Fotos dos Corpos de Prova após o rompimento: (a) Corpos de Prova sem Tratamento Térmico; (b) Corpos de Prova com Tratamento Térmico.

5.5.2.4 Cálculo das Tensões Máximas e de Ruptura

Os valores de carregamento máximo e de ruptura indicados no equipamento onde foram realizados os ensaios de tração foram registrados para determinação da tensão máxima e da tensão de ruptura. Os valores estão indicados na Tabela 11 e na Tabela 12.

Tabela 11 – Carregamentos registrados dos corpos de prova apenas soldados

Carregamentos máximo e de ruptura			
Corpos de prova sem Tratamento Térmico			
Corpo de Prova	Carregamento máximo [kgf]	Carregamento de ruptura [kgf]	Local de Ruptura
CP01	4840	3660	Ruptura no metal base
CP02	4940	3810	Ruptura no metal base
CP03	4840	3700	Ruptura no metal base

Tabela 12 – Carregamentos registrados dos corpos de prova soldados e submetidos a tratamento térmico

Corpos de prova com Tratamento Térmico			
Corpo de Prova	Carregamento máximo [kgf]	Carregamento de ruptura [kgf]	Local de Ruptura
CP01	4860	3460	Ruptura no metal base
CP02	4960	3540	Ruptura no metal base
CP03	4860	3460	Ruptura no metal base

Tabela 13 – Dimensões finais dos Corpos de Prova apenas soldados

Dimensões finais dos CP apenas soldados					
CP01		CP02		CP03	
Medida	Dimensões [mm]	Medida	Dimensões [mm]	Medida	Dimensões [mm]
1	4,52 x 8,31	1	4,65 x 8,51	1	4,58 x 8,24
Área	37,561mm ²	Área	39,572mm ²	Área	37,739mm ²

Tabela 14 – Dimensões finais dos Corpos de Prova soldados e submetidos a tratamento térmico.

Dimensões finais dos CP soldados e submetidos a tratamento térmico					
CP01		CP02		CP03	
Medida	Dimensões [mm]	Medida	Dimensões [mm]	Medida	Dimensões [mm]
1	4,72 x 7,82	1	5,28 x 7,49	1	4,72 x 7,82
Área	36,910mm ²	Área	39,547mm ²	Área	36,910mm ²

Conforme a Norma ASME IX, Seção QW-152, Edição 2013, a resistência a tração deve ser calculada dividindo o carregamento máximo pela menor área da seção do CP, que deve ser medida antes de ser aplicado o carregamento.

Com os valores de carregamento máximo e carregamento de ruptura obtidos no ensaio de tração foi possível calcular as tensões máximas e de ruptura do aço utilizando as equações 6 a 9.

Para o cálculo da tensão máxima:

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_i} \quad (6)$$

$$F_m = C_m \times g \quad (7)$$

Substituindo (7) em (6) Tem-se:

$$\sigma_m = \frac{C_m \times g}{A_i} \quad (8)$$

Da mesma maneira, para a tensão de rupturas temos:

$$\sigma_r = \frac{C_r \times g}{A_i} \quad (9)$$

Sendo:

σ_m – Tensão máxima [MPa];

F_m – Força Máxima [N];

A_i – Área Inicial [m²] (Valores indicados na Tabela 9 e Tabela 10);

C_m – Carregamento Máximo [kgf];

σ_r – Tensão de Ruptura [MPa];

F_r – Força de Ruptura [N];

C_r – Carregamento de Ruptura [kgf];

g – Aceleração da Gravidade 9,81m/s².

Os resultados dos cálculos da tensão máxima e da tensão de ruptura dos corpos de prova somente soldados indicados na Tabela 16.

Para o Corpo de Prova 01 as tensões máxima e de ruptura serão respectivamente:

$$\sigma_m = \frac{C_m \times g}{A_i} = \frac{(4840)}{82,977} \frac{(9,81)}{10^{-6}} = 572,2MPa$$

$$\sigma_r = \frac{C_r \times g}{A_i} = \frac{(4840)}{82,977} \frac{(9,81)}{10^{-6}} = 432,7MPa$$

Para o Corpo de Prova 02 as tensões máxima e de ruptura serão respectivamente:

$$\sigma_m = \frac{C_m \times g}{A_i} = \frac{(4940)}{84,487} \frac{(9,81)}{10^{-6}} = 573,6MPa$$

$$\sigma_r = \frac{C_r \times g}{A_i} = \frac{(3810)}{84,487} \frac{(9,81)}{10^{-6}} = 442,4MPa$$

Para o Corpo de Prova 03 as tensões máxima e de ruptura serão respectivamente:

$$\sigma_m = \frac{C_m \times g}{A_i} = \frac{(4840)}{83,303} \frac{(9,81)}{10^{-6}} = 570,0MPa$$

$$\sigma_r = \frac{C_r \times g}{A_i} = \frac{(3700)}{83,303} \frac{(9,81)}{10^{-6}} = 435,7MPa$$

Para os corpos de prova soldados e submetidos a tratamento térmico de alívio de tensões os cálculos foram os mesmos, e os valores calculados estão indicados na Tabela 16.

Para o Corpo de Prova 01 as tensões máxima e de ruptura serão respectivamente:

$$\sigma_m = \frac{C_m \times g}{A_i} = \frac{(4860)}{92,061} \frac{(9,81)}{10^{-6}} = 517,9MPa$$

$$\sigma_r = \frac{C_r \times g}{A_i} = \frac{(3460)}{368,7} \frac{(9,81)}{10^{-6}} = 368,7MPa$$

Para o Corpo de Prova 02 as tensões máxima e de ruptura serão respectivamente:

$$\sigma_m = \frac{C_m \times g}{A_i} = \frac{(4960) (9,81)}{91,855 \cdot 10^{-6}} = 529, MPa$$

$$\sigma_r = \frac{C_r \times g}{A_i} = \frac{(3540) (9,81)}{91,855 \cdot 10^{-6}} = 378,1 MPa$$

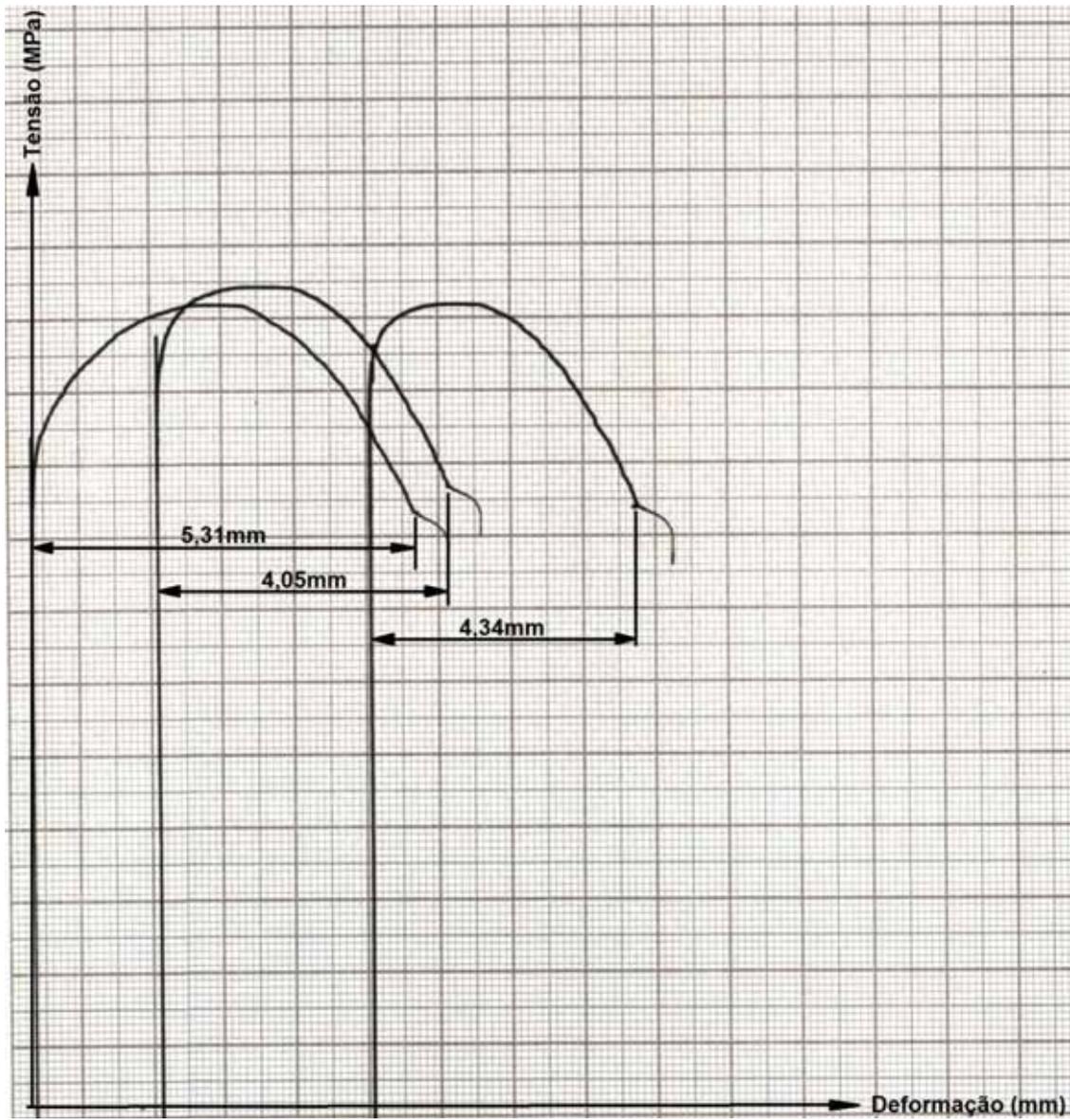
Para o Corpo de Prova 03 as tensões máxima e de ruptura serão respectivamente:

$$\sigma_m = \frac{C_m \times g}{A_i} = \frac{(4860) (9,81)}{90,881 \cdot 10^{-6}} = 524,6 MPa$$

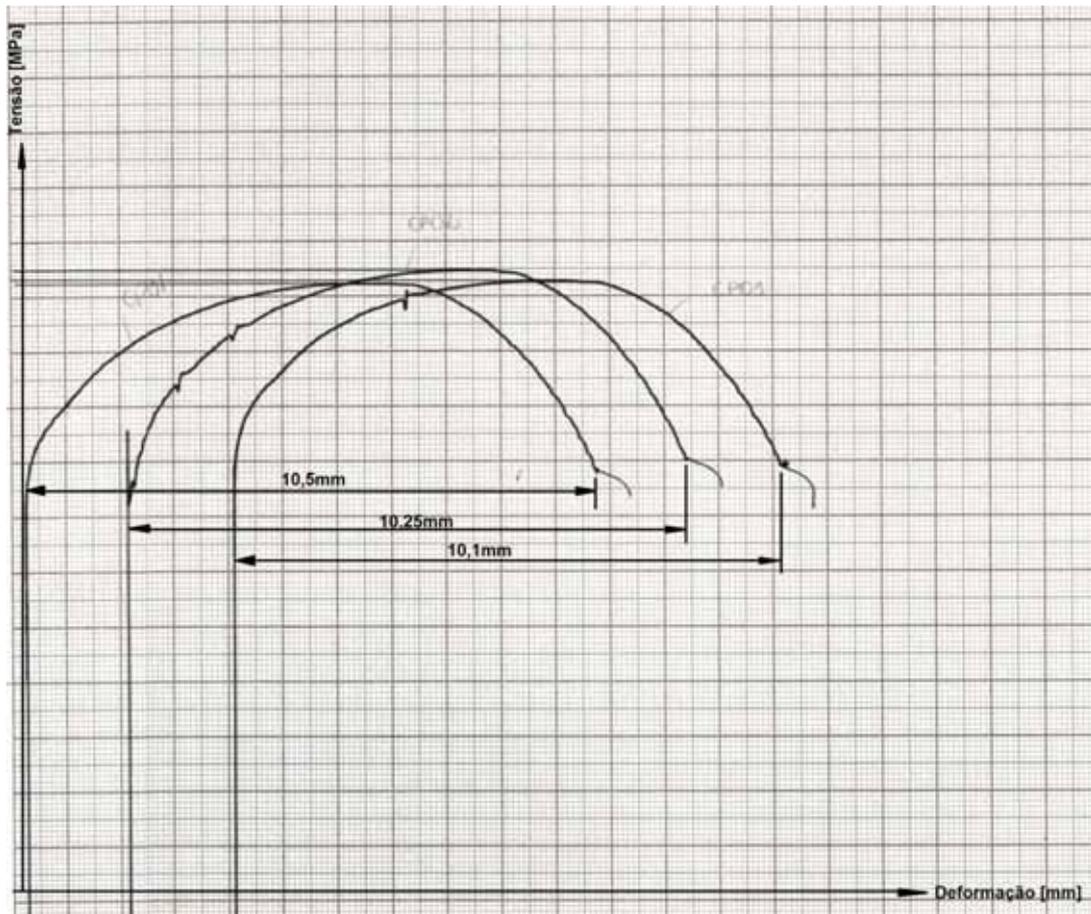
$$\sigma_r = \frac{C_r \times g}{A_i} = \frac{(3700) (9,81)}{83,303 \cdot 10^{-6}} = 373,5 MPa$$

5.5.2.5 Análise dos gráficos Tensão x Deformação

O equipamento em que os ensaios de tração foram realizados forneceu as curvas de Tração x Deformação em uma folha de papel milimetrado. Os gráficos estão indicados na Figura 37 – Gráficos Tensão x Deformação para cada Corpo de prova: (a) Corpos de prova sem PWHT; (b) Corpos de Prova com PWHT.



(a)



(b)

Figura 37 – Gráficos Tensão x Deformação para cada Corpo de prova: (a) Corpos de prova sem PWHT; (b) Corpos de Prova com PWHT

Analisando os gráficos (Figura 37) é possível verificar visualmente que os corpos de prova submetidos a tratamento térmico apresentaram uma deformação maior do que os corpos de prova que não foram submetidos ao tratamento térmico.

Para cada gráfico de cada corpo de prova foi medida a deformação entre o ponto de transição do regime elástico para o regime plástico até o ponto de ruptura, para avaliar a alteração da deformação com o tratamento térmico de alívio de tensões.

Tabela 15 – Variação da deformação

Variação da deformação			
Sem tratamento térmico [mm]		Com tratamento térmico [mm]	
CP01	5,31	CP01	10,50
CP02	4,05	CP02	10,25
CP03	3,65	CP03	10,10
Média (M ₁)	4,34	Média (M ₂)	10,28
Variação Percentual Média		$\left[\left(\frac{10,28 - 4,34}{4,34} \right) \right] * 100 = 137,87\%$	

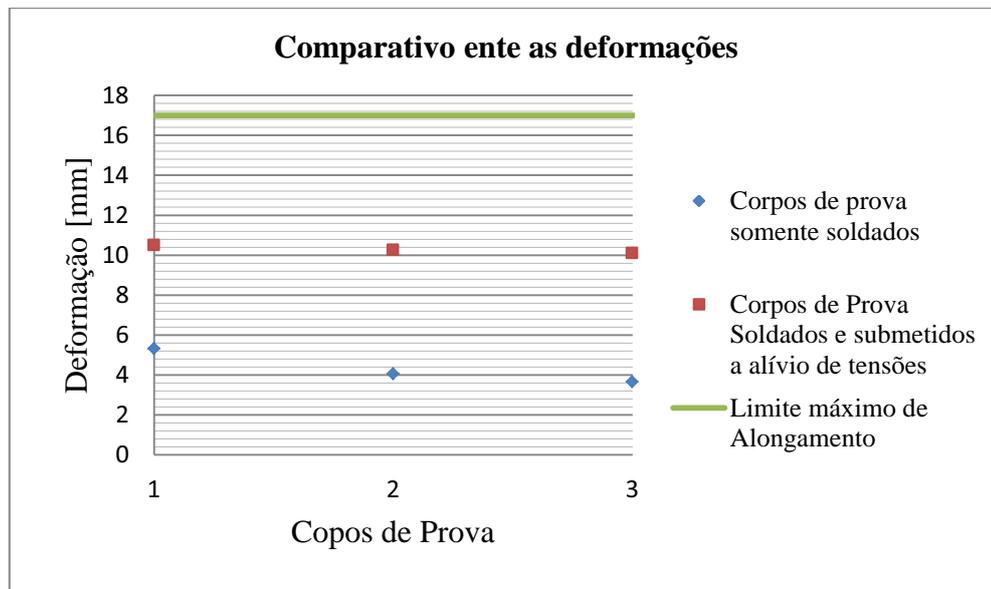


Figura 38 – Comparativo entre as deformações

Tabela 15 e do gráfico na Figura 38 houve um aumento na deformação plástica dos CP soldados e submetidos a tratamento térmico de alívio de tensões em relação aos CP somente soldados, tendo um aumento médio de 137,87% na deformação plástica a partir do ponto de escoamento até o ponto de ruptura do corpo de prova.

Esse resultado indica que o corpo de prova submetido ao tratamento térmico de alívio de tensões sofreu maior deformação plástica antes da ruptura, mesmo submetido a tensões menores, ou seja, o tratamento térmico tornou o CP mais dúctil, mas também causou a diminuição da sua resistência mecânica.

Tabela 16 – Resumo das tensões dos corpos de prova somente soldados

Corpo de Prova	Tensão de Escoamento [MPa]	Tensão Máxima [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]
CP01	430	572,2	432,7
CP02	460	573,6	442,4
CP03	455	570,0	435,7
Média	448,3	571,9	436,9

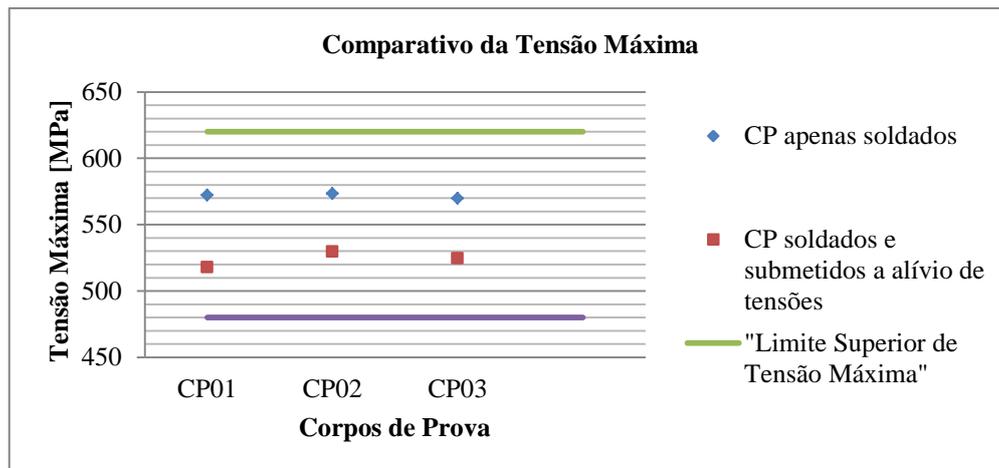
Tabela 17 – Resumo das tensões dos corpos de prova soldados e submetidos a tratamento térmico de alívio de tensões

Corpo de Prova	Tensão de Escoamento [MPa]	Tensão Máxima [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]
CP01	365	517,9	368,7
CP02	355	529,7	378,1
CP03	375	524,6	373,5
Média	365	524,1	373,4

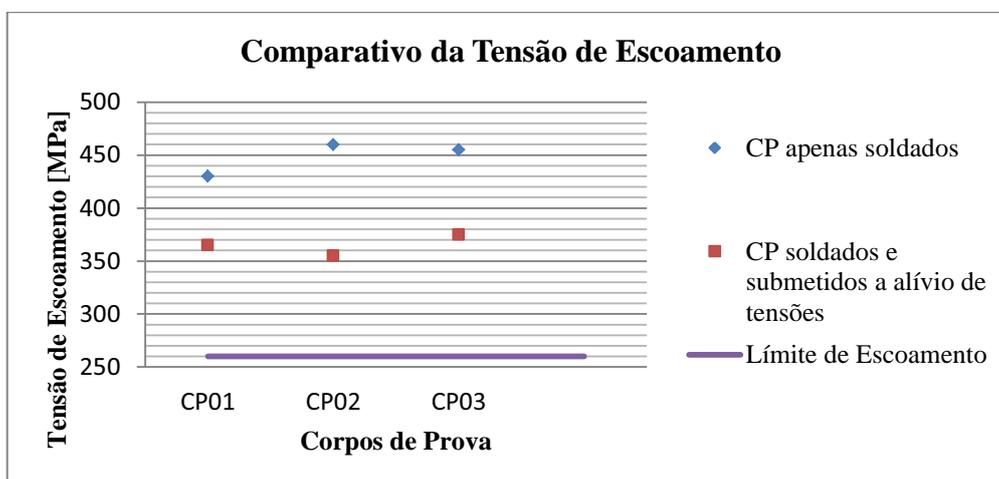
Tabela 18 - Variação percentual da resistência mecânica do Aço A-516 Gr.70

Parâmetro	Varição Média
Tensão de Escoamento	$\left[\left(\frac{365 - 448,3}{448,3} \right) \right] * 100 = -18,58\%$
Tensão Máxima	$\left[\left(\frac{524,1 - 571,9}{571,9} \right) \right] * 100 = -8,35\%$
Tensão de Ruptura	$\left[\left(\frac{373,4 - 436,9}{436,9} \right) \right] * 100 = -14,53\%$

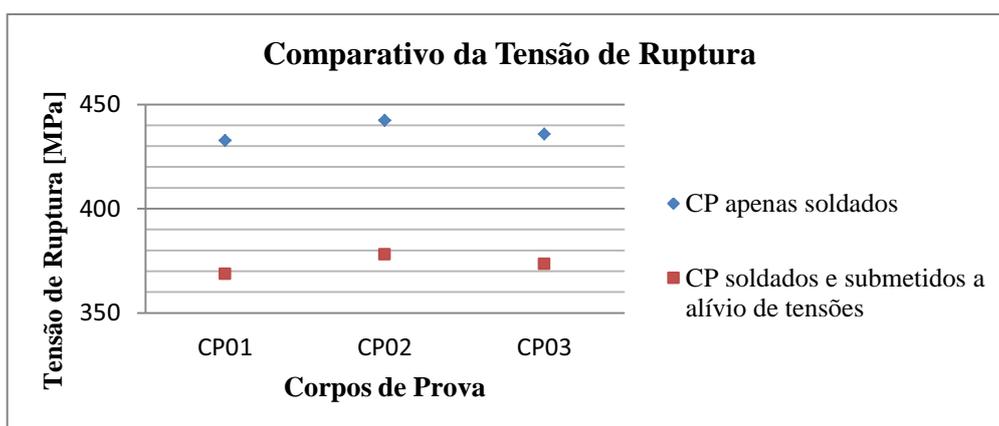
Analisando os valores de tensão de escoamento obtidos nota-se que houve uma diminuição de 18,58% na tensão de escoamento dos CP que foram soldados e submetidos ao tratamento térmico em relação aos CP que foram somente soldados, ou seja, com a aplicação do tratamento térmico de alívio de tensões é necessário um esforço externo menor sobre as peças para atingir o regime de deformação elástica do material. Apesar de haver uma redução no valor da tensão de escoamento dos CP submetidos ao tratamento térmico de alívio de tensões, esses valores ainda continuam acima do limite mínimo de escoamento do aço A-516 Gr.70 de 260MPa, como é possível verificar no gráfico comparativo entre as tensões de escoamento dos CP (Figura 39b). A tensão máxima dos CP submetidos ao tratamento térmico para alívio de tensões também apresentou redução na resistência máxima a tração dos CP soldados e submetidos ao tratamento térmico de alívio de tensões de 8,35% em relação aos CP somente soldados. Mesmo havendo uma diminuição na tensão máxima dos corpos de prova, esses valores se mantiveram dentro do limite inferior e superior da máxima resistência a tração definidas para o aço A-516 Gr.70, como é possível verificar no gráfico “Comparativo da Tensão Máxima” (Figura 39a). Assim como a tensão de escoamento e a tensão máxima, a tensão de ruptura dos corpos de prova submetidos ao tratamento térmico para alívio de tensões também apresentou redução, sendo nesse caso de 14,53%. Considerando o comportamento apresentado nas tensões de escoamento, máxima e de ruptura, pode-se concluir que houve diminuição da resistência mecânica dos corpos de prova soldados e submetidos ao tratamento térmico para alívio de tensões.



(a)



(b)



(c)

Figura 39 – Gráficos comparativos das tensões: (a) Tensão Máxima; (b) Tensão de Escoamento; (c) Tensão de Ruptura

5.6 Estudo da Microestrutura por Microscopia Eletrônica de Varredura

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um dos instrumentos mais versáteis para o estudo de características microestruturais de materiais sólidos (Dedavid, Gomes, Machado, 2007). A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica na qual a superfície de uma amostra pode ser explorada ponto a ponto por linhas sucessivas utilizando um feixe de elétrons de pequeno diâmetro normalmente gerado por um filamento de Tungstênio operando numa faixa de tensão de aceleração de 1 a 50kV. O sinal do detector é transmitido para uma tela catódica que possui varredura perfeitamente sincronizada com a varredura do feixe incidente. Esse feixe é guiado por um sistema de bobinas de deflexão para varrer a superfície da amostra (Dedavid, Gomes, Machado, 2007). O feixe de elétrons refletido é coletado, então exibido em uma mesma taxa de varredura em um tubo de raio catódico (similar a uma tela de TV). A imagem que aparece na tela, a qual pode ser fotografada, representa a superfície característica da amostra. A superfície pode ou não ser polida, mas deve ser eletricamente condutiva; um recobrimento extremamente fino da superfície metálica deve ser aplicado para materiais não condutivos. Os equipamentos possibilitam ampliações que variam de 10 a 50.000 vezes.

5.6.1 Preparação das amostras para MEV

Foi retirado um pedaço de dois corpos de prova (com e sem PWHT), com o objetivo de comparar possíveis alterações na microestrutura causadas pelo tratamento térmico. De cada pedaço foram retirados 3 amostras de dimensões de aproximadamente 5,0mm x 10 mm x 10 mm (espessura x largura x comprimento), sendo cada uma de uma região dos CP, sendo elas: Metal Base, Transição Metal base-Solda e Solda. Todas as amostras tiveram todas as suas faces limpas em água corrente e secadas em jato de ar. Logo após a secagem cada amostra foi armazenada em recipientes adequados para evitar contato com o ar ambiente.

5.6.2 Realização do ensaio por MEV

Todas as amostras foram visualizadas em um microscópio eletrônico de varredura marca FEG-VP Zeiss Supra 35 que forneceu fotos das microestruturas de cada amostra.

As micrografias permitem distinguir diferentes regiões do corpo de prova com alteração significativa em termos de distribuição da forma das placas. A Figura 40a ilustra a região do metal base, enquanto a Figura 40b a região de transição e a Figura 40c a região de solda a qual pode ser evidenciada uma maior alteração microestrutural devido a fusão do aço com o metal de solda (arame tubular E71T1). Após tratamento térmico de alívio de tensões nota-se uma mudança pronunciada na microestrutura dos corpos de prova indicando que durante a exposição dos CPs sob 625 °C por 180 minutos aumenta a difusão dos elementos de liga, alterando a solubilidade na região de contorno morfotrópico e como consequência minimizando tensões residuais com inibição do crescimento das placas. Do ponto de vista de propriedade mecânica estas alterações substanciais irão alterar a resistência do aço e a capacidade de deformação. Portanto, é de fundamental importância a realização de tratamento térmico visando alterar a microestrutura e como consequência o processo de conformação, vide Figura 41a-c. Devido a dificuldade na preparação das amostras após tratamento térmico, fica complexo observar diferenças significativas entre as distintas regiões do CDP.

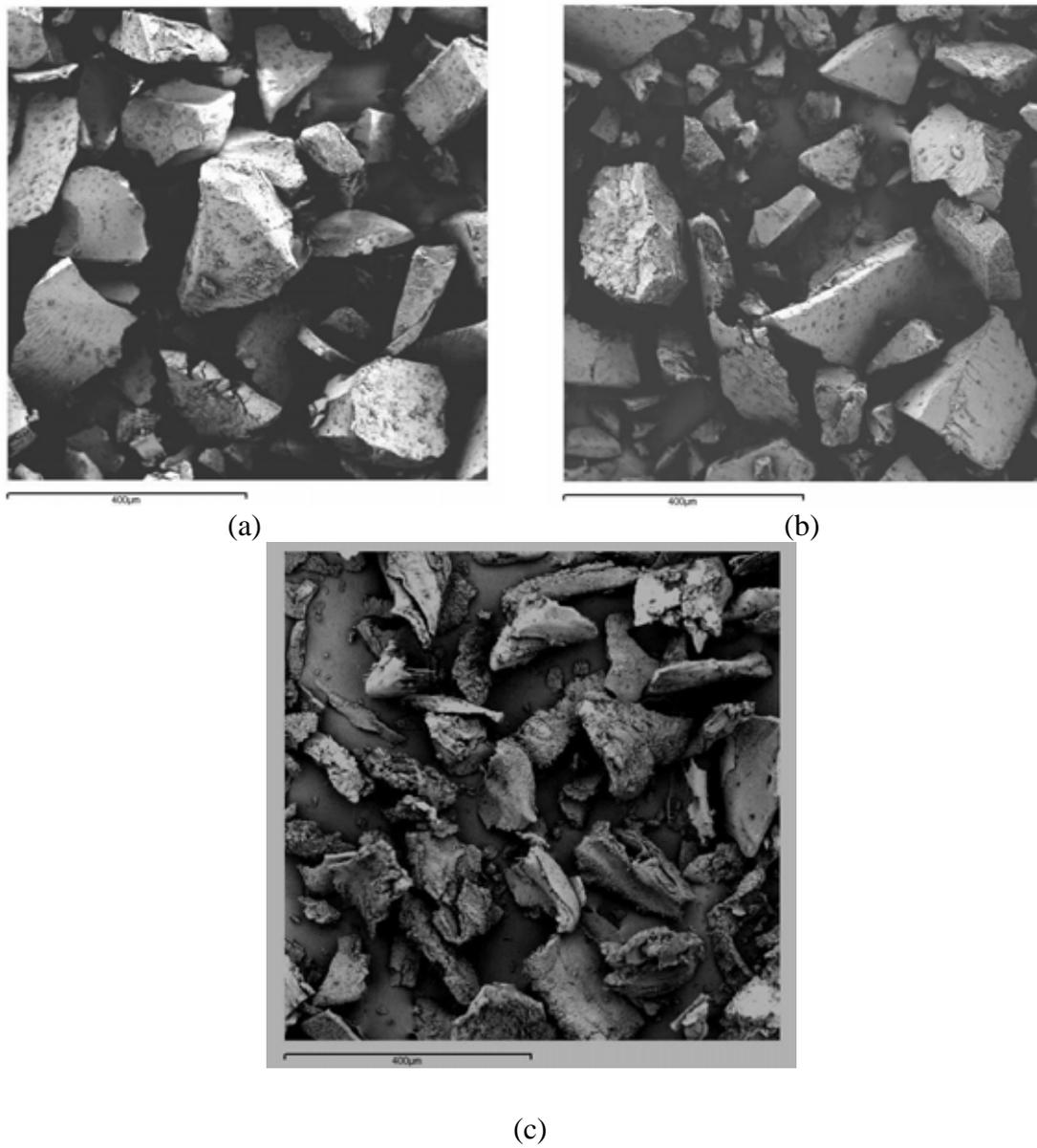
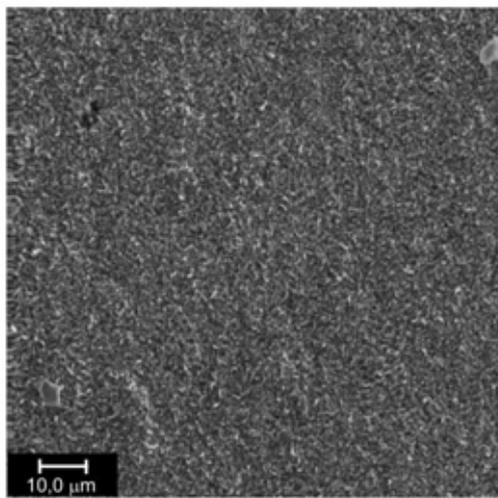
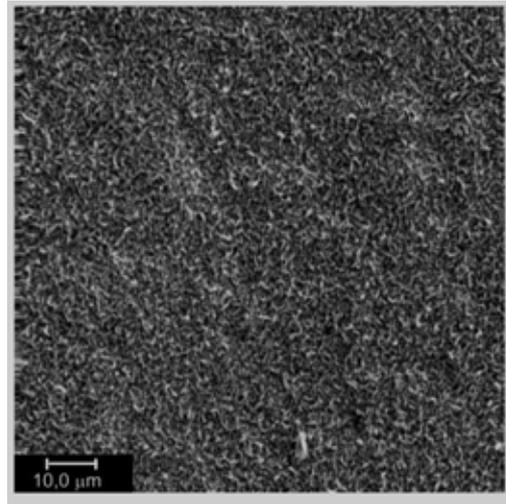


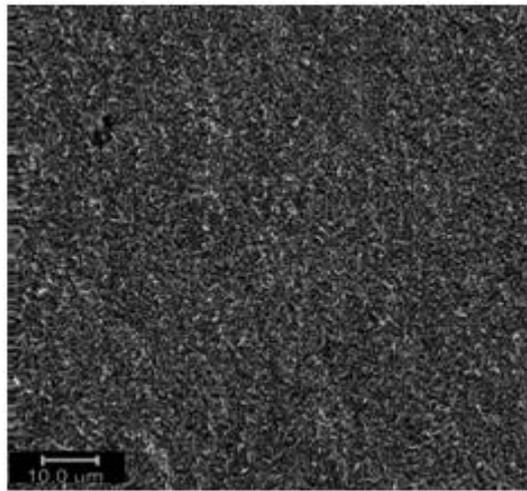
Figura 40 – Foto em MEV das amostras que não foram submetidas a PWHT: (a) Metal Base; (b) Transição Metal Base-Solda; (c) Solda.



(a)



(b)



(c)

Figura 41- Foto em MEV das amostras que foram submetidas a PWHT: (a) Metal Base; (b) Transição Metal Base-Solda; (c) Solda.

6 Resultados e Discussões

6.1 Ensaio de dobramento

Todos os corpos de prova submetidos a ensaios de dobramento não apresentaram descontinuidades, trincas ou rupturas, tanto no metal base, quanto na junta soldada e na transição, o que indica que os parâmetros de soldagem foram bem definidos e que o processo de soldagem foi realizado corretamente em ambos os corpos de prova. Também indica que provavelmente o tratamento térmico de alívio de tensões não causou nenhuma alteração negativa nas propriedades mecânicas do aço A-516 Gr.70, mas como o ensaio de dobramento é principalmente qualitativo, é necessário avaliar os resultados dos ensaios de tração para chegar a uma conclusão mais sólida.

Pelos critérios estabelecidos pela Norma ASME IX, Edição 2013, os ensaios de dobramento estão aprovados, ou seja, o tratamento térmico para alívio de tensões após a soldagem do aço A-516 Gr.70 é possível de ser realizado, mas para que a EPS tenha validade é necessário que os resultados dos ensaios de tração também sejam satisfatórios.

6.2 Ensaios de Tração

Analisando visualmente todos os corpos de prova foi possível verificar que a ruptura ocorreu no metal base, o que significa que a junta soldada não possuía descontinuidades ou defeitos no seu interior que comprometeriam a sua resistência mecânica, e que as alterações que o tratamento térmico para alívio de tensões causou na junta soldada não fizeram com que o limite de resistência a tração do metal de solda ficasse abaixo do limite de resistência a tração do metal base (aço A-516 Gr.70).

Visualmente foi possível verificar que em todos os corpos de prova não houve estricção plástica na região da junta soldada, o que indica que provavelmente a tensão de escoamento do metal de solda ficou acima da tensão de ruptura do metal base.

O aumento do alongamento dos corpos de prova submetidos ao tratamento térmico indica que o aço A-516 Gr.70 teve um considerável aumento de ductilidade principalmente em deformação plástica, o que significa que poderá sofrer maiores

deformações com esforços externos de menor intensidade, tornando-se mais suscetível à processos de conformação mecânica.

Apesar de diminuição da resistência mecânica dos CP soldados e submetidos a tratamento térmico em relação aos CP somente soldados, os seus valores de tensão de escoamento, tensão de ruptura, e tensão máxima ainda ficaram dentro da faixa estabelecida para o Aço A-516 Gr.70 de 485MPa a 620MPa.

A diminuição de tensão de escoamento indica que o aço A-516 Gr.70 submetido a tratamento térmico de alívio de tensões poderá ser conformado com carregamentos menores do que sem tratamento térmico, pois será mais fácil atingir o regime de deformação plástica do metal.

Como todos os corpos de prova soldados e submetidos a tratamento térmico não apresentaram alteração das propriedades mecânicas fora dos limites estabelecidos para o aço A-516 Gr.70 e a ruptura não ocorreu na junta soldada, os ensaios de tração estão aprovados conforme critérios da norma ASME IX, Edição 2013 para qualificação de procedimentos de soldagem.

Tabela 19 - Resumo dos resultados obtidos

Propriedade do Aço	Valores médios para os corpos de prova		Variação
	Somente soldados	Soldados e submetidos a tratamento térmico	
Tensão de Escoamento	448,3 MPa	365 MPa	-18,58 %
Tensão Máxima	571,9 MPa	524,1 MPa	-8,35 %
Tensão de Ruptura	436,9 MPa	373,4 MPa	-14,53 %
Alongamento	4,34 mm	10,28 mm	+137,87 %

6.3 Elaboração do procedimento de soldagem

Todos os corpos de prova foram aprovados nos ensaios mecânicos, portanto é possível qualificar o procedimento de soldagem abrangendo o tratamento térmico de alívio de tensões. Todos os dados de regulagem da máquina de solda, metal base, metal de adição, limites de espessura e demais itens indicados na Tabela 3e no Quadro 12, juntamente com as informações do Quadro 9 foram registrados em uma RQPS de suporte e em uma EPS de forma que seja possível reproduzir durante a fabricação o mesmo tipo de soldagem com a mesma qualidade dos corpos de prova.

REGISTRO DE QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM(RQPS) (PROCEDURE QUALIFICATION RECORD - POR)				RQPS N°:	folha:												
				01	1 / 2												
EPS (WPS)	01	PROCESSO DE SOLDAGEM (Welding process)	FCAW	TIPO (Type)	SEMIAUTOMATIC												
JUNTA (QW-402) (Joints) <p style="text-align: center;">DETALHES:</p> 																	
METAIS DE BASE (QW403) (Base Metals) <p>ESPECIFICAÇÃO, TIPO E GRAU: A-516 - 70 PN° 1 Gr. N° 1 COM (Weld)</p> <p>ESPECIFICAÇÃO, TIPO E GRAU: A-516 - 70 PN° 1 Gr. N° 1</p> <p>PEÇA DE TESTE: ESPESSURA (mm) 1/2" (13,0mm) DIÂMETRO (mm) NA(Plate)</p> <p>CERTIFICADO DE QUALIDADE:</p> <p>OUTROS:</p>																	
METAIS DE ADIÇÃO (QW-404) (Filler Metals) <p>ESPECIFICAÇÃO AWS: (A5.20) CLASSIFICAÇÃO AWS: E-71T1 FN.º 6 AN.º 1</p> <p>ESPESSURA DE METAL SOLDA: 1/2" (13,0mm)</p> <p>ELETRODO-FLUXO-CLASSIF. AWS: Filler Metal Product Form – Flux Cored</p> <p>MARCA COMERCIAL: ELETRODO: N/A FLUXO: N/A</p> <p>OUTROS: T < 1/2" / Suplementar Filler Metal = N/A</p>																	
POSICÕES (QW-405) (Positions) <p>DE CHANFRO: IG (Flat)</p> <p>PROGRESSÃO: (Progression) <input type="checkbox"/> ASCENDENTE <input type="checkbox"/> DESCENDENTE</p> <p>DE SOLDA EM ÂNGULO: N/A</p>			PREAQUECIMENTO (QW-406) (Pre heat) <p>TEMPERATURA DE PREAQUECIMENTO MIN.: (°C) 25</p> <p>TEMPERATURA DE INTERPASSE MÁX.: (°C) 250</p> <p>MANUTENÇÃO DE PREAQUECIMENTO: (°C) Durante soldagem</p> <p>METODO DE CONTROLE: Pirômetro</p> <p>MÉTODO DE AQUECIMENTO: Maçarico</p>														
TRATAMENTO TÉRMICO APÓS SOLDAGEM (QW-407) (Post weld heat treatment) <p>TAXA DE AQUECIMENTO (°C/min): 3,67</p> <p>FAIXA DE TEMPERATURA (°C): 15</p> <p>TEMPO (MINUTOS): 120</p> <p>TAXA DE RESFRIAMENTO (°C/h): -</p> <p>MÉTODO DE TRATAMENTO Forno</p>			GÁS (QW-408) (Gas) <p style="text-align: center;">COMPOSIÇÃO (%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>GÁS</th> <th>TIPO</th> <th>MISTURA</th> <th>VAZÃO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PROTEÇÃO</td> <td>CO2</td> <td></td> <td>15,5 l/min</td> </tr> <tr> <td>PROTEÇÃO RAIZ</td> <td>N/A</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			GÁS	TIPO	MISTURA	VAZÃO	PROTEÇÃO	CO2		15,5 l/min	PROTEÇÃO RAIZ	N/A		
GÁS	TIPO	MISTURA	VAZÃO														
PROTEÇÃO	CO2		15,5 l/min														
PROTEÇÃO RAIZ	N/A																
CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (QW-409) (Electrical characteristics) <p>TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE: <input checked="" type="checkbox"/> CCEP <input type="checkbox"/> CCEN <input type="checkbox"/> CA</p> <p>TIPO DE ELETRODO DE TUNGSTÊNIO: CLASSIFICAÇÃO AWS: Ø (mm)</p> <p>MODO DE TRANSFERENCIA FCAW: Globular / Spray / Arco Pulsado</p> <p>FAIXA DE VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO PARA:</p> <p>ELETRODO NU (cm/min.): N/A</p> <p>CALOR IMPOSTO (KJ/cm): N/A</p>			TÉCNICA (QW-410) (Technique) <p>PREPARAÇÃO: INICIAL: Lixamento</p> <p>LIMPEZA - INTERPASSE: Lixamento / Limpeza</p> <p>METODO DE REMOÇÃO DA RAIZ: Lixamento</p> <p>PASSES SIMPLES OU MULTIPLO POR LADO: Multiple</p> <p>PASSE: <input checked="" type="checkbox"/> RETILINIO <input type="checkbox"/> OSCILANTE</p> <p>DISTANCIA BICO-PEÇA (mm): - Ø BOCAL(mm): 16</p> <p>ELETRODO: <input checked="" type="checkbox"/> SIMPLES <input type="checkbox"/> MULTIPLO</p>														
SEQUENCIA DE PASSES	PROCESSO	CONSUMIVEL			LARGURA DO PASSE	CORRENTE	TENSÃO	VELOCIDADE DE SOLDAGEM	CALOR IMPOSTO								
(Passes Sequence)	(Process)	Ø (mm)	CLASSIFICAÇÃO AWS	MARCA COMERCIAL	(mm)	(A)	(V)	(CM/MIN.)	(Heat Input)								
Raiz	FCAW	1,2	E-71T1	-	-	180	25	-	-								
Other	FCAW	1,2	E-71T1	-	-	220	28	-	-								

(a)

ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (EPS) (WELDING PROCEDURE SPECIFICATION - WPS)		EPS N°: 01	REV.: 00 23/06/2014	folha: 1 / 2
ROPS DE SUPORTE: 01 <small>(Supporting PQR)</small>				
PROCESSO DE SOLDAGEM : FCAW <small>(Welding Process)</small>		TIPO: SEMI - AUTO <small>(Type)</small>		
JUNTA (QW-402) <small>(Joint)</small>	COBRE JUNTA: YES <small>(Backing)</small>			
PROJETO DE JUNTA ACC. THE DRAWING <small>(Joint Design)</small>	MATERIAL: WELD METAL/BASE METAL <small>(Material)</small>			
DETALHES <small>(Details)</small> SEE TO FABRICATION DRAWING				
METAIS DE BASE (QW403) <small>(Base Metals)</small>				
ESPECIFICAÇÃO, TIPO E GRAU: -		PN* 1	Gr. N° N/A	COM
ESPECIFICAÇÃO, TIPO E GRAU: -		PN* 1	Gr. N° N/A	
FAIXA DE ESPESSURA (mm):	PARA JUNTA: COM CHANFRO:	5,0 < t < Ilimitado		
	PARA JUNTA: (DE ÂNGULO, SOBREPOSTA, DE ARESTA):	Fillet = Ilimitado		
OUTROS:	t _{max} < 13,0mm			
METAIS DE ADIÇÃO (QW-404) <small>(Filler Metals)</small>				
ESPECIFICAÇÃO AWS: 5.20	CLASSIFICAÇÃO AWS: E 71T1	FN* 6	AN* 1	
ESPESSURA DE METAL DE SOLDA (mm):	EM CHANFRO Ilimitado	EM ÂNGULO UNLIMITED		
ELETRODO-FLUXO-CLASSIF. AWS:	N/A			
MARCA COMERCIAL: ELETRODO:	N/A	FLUXO:	N/A	
OUTROS:	SUPPLEMENTAL FILLER METAL=NO / FLUX CORED (FILLER METAL PRODUCT FORM) / ALLOY ELEMENTS=NO			
POSIÇÕES (QW-405) <small>(Positions)</small>		PREAQUECIMENTO (QW-406) <small>(Preheat)</small>		
DE CHANFRO: TODAS AS POSIÇÕES <small>(Groove)</small>	TEMPERATURA DE PREAQUECIMENTO MIN.: (°C) 10°C <small>(Preheat)</small>			
PROGRESSÃO: <input checked="" type="checkbox"/> ASCENDENTE <input type="checkbox"/> DESCENDENTE <small>(Progression) (Upkill) (Downhill)</small>	TEMPERATURA DE INTERPASSE MÁX.: (°C) 250 <small>(Interpass Temperature)</small>			
DE SOLDA EM ÂNGULO: TODAS AS POSIÇÕES <small>(Weld Fillet)</small>	MANUTENÇÃO DE PREAQUECIMENTO: (°C) NO <small>(Preheat Maintenance)</small>			
	METODO DE AQUECIMENTO: Maçarico <small>(Heating Method)</small>			
	METODO DE CONTROLE: Pirômetro <small>(Control Method)</small>			

(a)

ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (EPS) (WELDING PROCEDURE SPECIFICATION - WPS)				EPS N.º:	REV.:	folha: 2 / 2		
				01	00	23/06/2014		
TRATAMENTO TÉRMICO APÓS SOLDAGEM (QW-407) (Postweld Heat Treatment)				GÁS (QW-408) (Gas)				
TAXA DE AQUECIMENTO (°C/MIN): 3,67 (Heating Rate)				COMPOSIÇÃO (%)				
TEMPERATURA DE TRATAMENTO (°C): 625 (Treatment Temperature)				GÁS (Gas):	TIPO (Type):	MISTURA (Mixture):	VAZÃO (l/min) (Flow Rate):	
TEMPO DE TRATAMENTO (MINUTOS): 120 (Treatment Time)				PROTEÇÃO (Shielding):	CO2	-	10-20 l/min	
TAXA DE RESFRIAMENTO (°C/H): - (Cooling Rate)				PROTEÇÃO RAIZ (Backing):	N/A	-	-	
MÉTODO DE TRATAMENTO: Forno (Treatment Method)								
CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (QW-409) (Electrical Characteristics)				TÉCNICA (QW-410) (Technique)				
TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE: (Polarity, Current Type)				PREPARAÇÃO: Lixamento (Preparation)				
<input checked="" type="checkbox"/> CCEP (DCSP) <input type="checkbox"/> CCEN (DCEN) <input type="checkbox"/> C-A (CA)				LIMPEZA - INICIAL: Lixamento (Cleaning - Initial)				
TIPO DE ELETRODO DE TUNGSTÊNIO: (Tungsten Electrode Type)				INTERPASSE: Lixamento (Interpass)				
CLASSIFICAÇÃO AWS: - Ø (mm) -				METODO DE REMOÇÃO DA RAIZ: Lixamento / Goivagem (Back Gouging)				
MODO DE TRANSFERÊNCIA FCAW: Globular / Spray / Arco Pulsado (Mode of metal transfer GMAW)				PASSES SIMPLES OU MÚLTIPLO POR LADO: Múltiplo (Multiple or single pass - per side)				
FAIXA DE VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO PARA: (Spool feed range)				PASSE: <input checked="" type="checkbox"/> RETILÍNIO <input checked="" type="checkbox"/> OSCILANTE, MÁX. (mm)				
ELETRODO NU (CM/MIN.): N / A (Electrode)				DISTÂNCIA BICO-PEÇA (mm): - Ø BOCAL(mm): 16,0 (Contact tube to work distance) (Nozzle)				
CALOR IMPOSTO (KJ/CM): N / A (Heat Input)				ELETRODO: <input checked="" type="checkbox"/> SIMPLES <input type="checkbox"/> MÚLTIPLO (Electrode) (Single) (Multiple)				
SEQUÊNCIA DE PASSES (Passes Sequence)	PROCESSO (Process)	CONSUMÍVEL (Consumable)			CORRENTE (A) (Current)	TENSÃO (V) (Voltage)	VELOCIDADE DE SOLDAGEM (CM/MIN.) (Spool Welding)	CALOR IMPOSTO (KJ/CM) (Heat Input)
		Ø (mm)	CLASSIFICAÇÃO AWS (Classification)	MARCA COMERCIAL (Trade Mark)				
RAÍZ	FCAW	1,2	E 71T1	-	150-250	23-30	-	-
OUTROS	FCAW	1,2	E 71T1	-	180-250	25-32	-	-
EPS QUALIFICADA CONFORME: ASME IX - ED. 2010 (Qualified WPS according)								
OBS.: Peening: No								
ELABORADO POR (ELABORATED BY):					APROVADO POR (APPROVED BY):			
								
WELDING ENGINEER					QUALITY CONTROL MANAGER			

(b)

Figura 43 – EPS com tratamento térmico de alívio de tensões pós soldagem (a)

Folha 1; (b) Folha 2

7 Conclusões

Os ensaios de dobramento e tração permitem inferir que o tratamento térmico de alívio de tensões após a soldagem é um método viável e recomendável para peças fabricadas com aço A-516 Gr.70 e soldadas pelo processo FCAW que futuramente serão submetidas a processo de conformação, desde que sejam obedecidos os parâmetros de soldagem e a curva de tratamento térmico especificado na EPS.

O aumento da ductilidade dos corpos de prova indica que o processo de conformação mecânica exigirá carregamentos menores e maior deformação sobre as peças conformadas, reduzindo o esforço requerido pelo equipamento de conformação do tampo.

Com os valores das alterações das propriedades mecânicas causadas pelo tratamento térmico de alívio de tensões é possível saber qual deverá limite mínimo e máximo de controle de carregamento do equipamento de conformação mecânica tornando o processo mais controlado e confiável.

Antes de realizar a conformação do tampo é recomendável que se tenha as informações de tensão de escoamento e tensão máxima da chapa de aço utilizada para a fabricação do tampo para que os esforços sobre a peça sejam definidos e controlados para que o limite de tensão máxima seja ultrapassado, evitando danos à peça conformada.

8 Dificuldades encontradas na execução do trabalho

Por se tratar de um setor da indústria bastante específico, é muito difícil obter informações técnicas sobre a conformação de tampos, como cálculos de esforços e tensões, pois essas informações são guardadas sob sigilo pelos fabricantes de tampos, uma vez que a literatura a respeito de tampos não abrange especificamente a parte de conformação.

Assim como a conformação de tampos, a técnica soldagem de aços fica restrita às empresas que detém o conhecimento e a experiência sobre o material a ser soldado, o metal de solda e o comportamento de juntas soldadas.

O forno que foi utilizado para realizar o tratamento térmico de alívio de tensões nos corpos de prova não possuía aquisição de dados informatizada, o que impossibilitou a elaboração da curva real de tratamento térmico. O forno não possuía controle da rampa de resfriamento, sendo necessário deixar a porta do forno entreaberta com a peça dentro para fazer o resfriamento e fazer um acompanhamento periódico durante o resfriamento.

Os corpos de prova dos ensaios de tração possuíam dimensões incompatíveis com o equipamento de ensaios mais avançado e informatizado que forneceria mais dados, sendo necessário utilizar um equipamento mais antigo e analógico. Ainda assim os resultados foram satisfatórios, mas poderiam ser obtidas mais informações sobre o comportamento do aço A-516 Gr.70.

9 Propostas Futuras

O presente trabalho de graduação demonstrou que o tratamento térmico de alívio de tensões pode ser um forte aliado aos processos de conformação, mas para obtenção de dados mais precisos sobre o processo de conformação de tampos, o mesmo trabalho poderia ser desenvolvido dentro de uma empresa fabricante de tampos, onde há mais informações e controle do processo de conformação mecânica.

O mesmo trabalho poderia ser desenvolvido para outros tipos de metais, pois irá alterar não somente o material, mas também o metal de solda, trazendo resultados diferentes. Uma primeira sugestão seria para aços inoxidáveis, que normalmente apresentam maior dureza que os aços carbono, e são muito utilizados em vasos de pressão utilizados na indústria alimentícia.

Pode ser estudado o comportamento do aço A-516 Gr.70, ou outros aços, para o mesmo tratamento térmico, mas utilizando-se outros processos de soldagem.

O tema abordado teve seu foco em vasos de pressão estacionários e sujeitos a pressão constante em fluido não corrosivo, mas poderia ser utilizado como base para projetos de diversos tipos de equipamento.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Metals Handbook Vol.7: Atlas of Microstructures of Industrial Alloys, 8 ed. New York. Ed. 1972.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiler & Pressure Vessel Code VIII an International Code, Division I, Rules for Construction of Pressure Vessels, New York. ed. 2013.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiler & Pressure Vessel Code II Part D an International Code, ASME Boiler and Pressure Vessel Committee Subcommittee on Materials, New York. ed. 2013.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiler & Pressure Vessel Code II Part A an International Code, Ferrous Material Specifications, New York. ed. 2013.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiler & Pressure Vessel Code II Part C an International Code, Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals, New York. ed. 2013.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiler & Pressure Vessel Code IX an International Code, Welding and Brazing Qualifications, New York. ed. 2013.

BIASINOX REATORES. Catálogo Virtual. São Paulo/SP, 2014, disponível em <<http://www.biasinoxreatores.com.br/>>. Acesso em 02, Dez. 2014.

BRASIL. Portaria GM n.º 3.214, de 08 de junho de 1978. Norma Regulamentadora 13: Caldeiras e Vasos de Pressão. 17 p, 1978.

CALLISTER Jr, Willian D.; SOARES, Sérgio Murilo Stamile; DE MIRANDA, Paulo Emílio Valadão. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5 ed. Rio de Janeiro/RJ, 2002. 589p.

ESAB INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. Tratamento Térmico de Alívio de Tensões na soldagem. Contagem/MG, 2014, disponível em:<<http://www.esab.com.br/>>, Acesso em 15, Nov. 2014.

FERLEX VIATURAS E EQUIPAMENTOS LTDA. Catálogo Virtual. São Paulo/SP, 2014, disponível em <<http://www.ferlex.com.br>>. Acesso em 30, Nov. 2014.

FILHO, Ettore Bresciani et al. Conformação Plástica Dos Metais. 6 Ed. São Paulo: EPUSP, 2011. 254 p.

FORTES, Cleber; ARAÚJO, Welerson. Arames Tubulares OK. 1ª ed. Contagem/MG, 2004. 101p.

HAEUSLER AG. Catálogo Virtual. 2014, disponível em <<http://www.haeusler.com/pt>>. Acesso em 27, Nov. 2014.

INFOSOLDA-PORTAL BRASILEIRO DE SOLDAGEM. Carbono Equivalente. OSASCO/SP, 2014, disponível em:< <http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/metalurgia/130-carbono-equivalente.html>>, Acesso em 17, Nov. 2014.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; QUEIROZ BRACARENSE, Alexandre. Soldagem Fundamentos da Tecnologia. 3ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009. Volume I. 363p.

MONDENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Villani; SANTOS, Dagoberto B.. Metalurgia da Soldagem. 1ª ed. Belo Horizonte/MG, 2009. Volume I. 363p.

SANTIAGO, Eduardo Ferrer. Vasos de Pressão. 1ª ed. São Paulo/SP, 2014. Volume I, 35p.

SEOK, Chang-Sung. Effect of Temperature on the Fracture Toughness of A516 Gr70 Steel. KSME International Journal, Sungkyunkwan, Vol XIV, n.1, P 11-22, Jan. 2000. Sistema de gás inerte “purga”, 2014, Soldas Brasil, São Paulo/SP, disponível em <<http://www.soldasbrasil.com.br/sistema-gas-inerte-purga.php>>. Acesso em 30 Jul. 2014.

ZOLIN, Ivan. Ensaio Mecânicos e Análises de Falhas. 3ª ed. Santa Maria: EFSM, 2011. Volume I. 102p.