

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA – CAMPUS GERALDO WERNINGHAUS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA**

**INFLUÊNCIA DO PREAQUECIMENTO NA SOLDAGEM DE CHAPAS
DE GRANDES ESPESSURAS DE AÇO ASTM A572**

FELIPE BRONDANI

**JARAGUÁ DO SUL
2016**

FELIPE BRONDANI

**INFLUÊNCIA DO PREAQUECIMENTO NA SOLDAGEM DE CHAPAS
DE GRANDES ESPESSURAS DE AÇO ASTM A572**

Monografia apresentada ao
Curso Superior de
Tecnologia em Fabricação
Mecânica do Geraldo
Werninghaus do Instituto
Federal de Santa Catarina
para a obtenção do diploma
de Tecnólogo em
Fabricação Mecânica.

Orientador: Fernando Henrique Gruber Colaço

**JARAGUÁ DO SUL
2016**

B869i Brondani, Felipe

Influência do preaquecimento na soldagem de chapas de grandes espessuras de aço ASTM A572 / Felipe Brondani ; orientador Fernando Henrique Gruber Colaço. – Jaraguá do Sul, SC, 2016.
72 f.

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Santa Catarina.
Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica. 2. Preaquecimento. 3. ASTM A572. 4. Resistência à tração. I. Colaço, Fernando Henrique Gruber. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica. IV. Título.

CDD 620.1

Catalogado por: Karla Viviane Garcia Moraes – CRB14/1002

**INFLUÊNCIA DO PREAQUECIMENTO NA SOLDAGEM DE CHAPAS DE
GRANDES ESPESSURAS DE AÇO ASTM A572**

FELIPE BRONDANI

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Jaraguá do Sul, 21 de setembro de 2016.

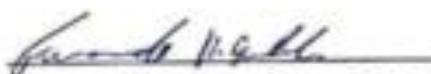
Banca Examinadora:



Miriam Hennig

Mestre em Letras

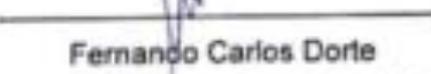
Orientadora Geral



Fernando Henrique Gruber Colaço

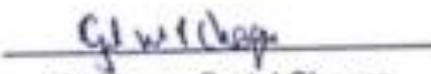
Mestre em Engenharia Mecânica e de Materiais

Orientador Específico



Fernando Carlos Dorte

Pós Graduado em Gestão Industrial



Gil Magno Portal Chagas

Doutor em Engenharia Mecânica

*Dedico
a meu pai Darci e minha mãe Ilda
aos meus irmãos Alberto e Mateus
pelo amor e carinho*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado saúde, força e tranquilidade nos momentos em que necessitei.

À minha família que sempre apoiou as minhas decisões e sempre me incentivou a jamais desistir de um objetivo.

À minha namorada Luciane pela paciência e apoio na elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Fernando Henrique Gruber Colaço pela orientação e colaboração no desenvolvimento deste trabalho, fundamentalmente pelo apoio nesta etapa final de conclusão do curso.

À empresa WEG Equipamentos Elétricos que forneceu todos os recursos necessários para realização deste trabalho.

Aos demais professores, funcionários e alunos do Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Geraldo Werninghaus que colaboraram de forma direta e indireta nesta etapa de minha formação.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar cientificamente a realidade encontrada no chão de fábrica de uma empresa que produz máquinas industriais pesadas, comparando aos requisitos normativos internacionais solicitados em projetos na soldagem manual com processo MAG, do aço ASTM A572. A norma AWS D1.1 (2010) recomenda que na soldagem deste aço entre outros, de espessura entre 38 mm e 65 mm seja realizado o preaquecimento da região em torno da junta a ser soldada. Dessa forma será então analisada influência da temperatura de preaquecimento na resistência mecânica e ductilidade da junta soldada. Foram soldadas duas chapas de espessura 63 mm em condições diferentes de preaquecimento, uma delas preaquecida a temperatura mínima de 65°C mantendo a mesma taxa de preaquecimento entre passes e outra foi soldada em temperatura ambiente, sem realizar o preaquecimento, deixando a peça resfriar a temperatura ambiente no final de cada passe de solda. O aporte térmico utilizado foi em torno de 1600J/mm, valor médio para uma soldagem manual de chapa grossa em modo de transferência spray, comumente utilizado na indústria com o processo MAG. Na análise foram considerados os valores de resistência à tração, limite de escoamento, ductilidade ao dobramento a 180°, análise macroestrutural da seção soldada e dureza da zona termicamente afetada. Os resultados dos ensaios mecânicos e metalográficos atenderam aos critérios de aceitação da norma AWS D1.1 (2010), com valores de resistência à tração e limite de escoamento superiores ao do metal de base. O dobramento dos corpos de prova a 180° mostraram-se satisfatórios por mais que algumas descontinuidades foram observadas, podendo também ser considerados satisfatórios de acordo com os critérios de aceitação da norma AWS D1.1 (2010). A análise macrográfica da seção transversal à solda também não apresentou defeitos que pudessem reprovar o ensaio.

Com base na análise dos resultados obtidos foi possível concluir que o não preaquecimento da chapa de espessura 63 mm a uma temperatura de 65°C antes da soldagem pode não influenciar as características de resistência e ductilidade da união soldada.

Palavras-Chave: Preaquecimento. ASTM A572. Resistência à tração.

ABSTRACT

The objective of this work is scientifically analyze the reality found on the shop floor of a company that produces heavy industrial machinery, compared to international regulatory requirements requested in projects in manual welding with MAG process, steel ASTM A572. The standard AWS D1.1 (2010) recommends that the welding of the steel among others, of a thickness between 38 mm and 65 mm preheating is carried out in the region around the joint to be welded. Thus it will then be analyzed influence of preheating temperature on strength and ductility of the welded joint. two thick plates were welded 63 mm in different conditions of preheating, one preheated to minimum temperature of 65 ° C while maintaining the same preheat rate between passes and the other is welded at room temperature without performing preheating, leaving the part cool to room temperature the end of each welding pass. The heat input used was around 1600J / mm, average value for a manual welding plate spray transfer mode, commonly used in the industry with the MAG process. In the analysis were considered the tensile strength values, yield strength, ductility folding to 180, macro-structural analysis of the welded section and hardness of the heat affected zone. The results of mechanical tests and metallographic met the acceptance criteria of AWS D1.1 (2010), with tensile strength values and yield strength higher than the base metal. The folding of the specimens to 180 were satisfactory for more than a few discontinuities were observed, also can be considered satisfactory according to the criteria of acceptance of AWS D1.1 (2010). The macrographic analysis of the cross section to the weld did not show defects that could fail the test.

Based on the analysis of the results obtained it was concluded that no preheating of the plate thickness 63 mm at 65 ° C temperature before welding can not influence the characteristics of strength and ductility of the welded joint.

Keywords: Preheating. ASTM A572. Tensile strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Poça de fusão e proteção gasosa.....	18
Figura 2 - Identificação do eletrodo ER70S-6.....	20
Figura 3 - Denominação do gás de SG-ACO-8/2.....	22
Figura 4 - Efeito do gás de proteção e sentido de soldagem na largura do cordão de solda.....	23
Figura 5 – Transformação sólido – líquido, ferro puro.....	25
Figura 6 – Transformação sólido – líquido, liga metálica.....	25
Figura 7 – Diagrama Fe-C, Constituintes em equilíbrio nos aços.....	26
Figura 8 – Diagrama esquemático da microestrutura de um aço em função da velocidade de resfriamento após austenitização.....	27
Figura 9 - Microestrutura do aço ASTM A572.....	28
Figura 10 - Ciclo térmico de soldagem.....	30
Figura 11 – Curva de repartição térmica: A – Zona fundida, B – ZAC e C – Material de base.....	31
Figura 12 - Zona afetada pelo calor.....	32
Figura 13 - Região de refino de grão.....	33
Figura 14 - Trinca a frio na ZAC.....	34
Figura 15 - Modelo de fragilização por hidrogênio durante a soldagem proposto por Granjon.....	35
Figura 16 - Teores típicos de hidrogênio por processos de soldagem.....	36
Figura 17 – Célula de soldagem.....	40
Figura 18 – Diagrama esquemático da máquina de soldagem Kemppi.....	41
Figura 19 - Máquina de ensaios universal - a) tração, b) dobramento.....	42
Figura 20 – Microscópio estereoscópio Stemi 2000-C.....	43
Figura 21 – Microdurômetro Future – Tech, FM 800.....	43
Figura 22 – Fluxograma da metodologia.....	44
Figura 23 - Desenho do chanfro dos corpos de prova.....	45
Figura 24 – Corte do chanfro por oxicorte.....	45
Figura 25 - Transferidor de grau.....	46
Figura 26 - Chapa teste.....	46
Figura 27 - Identificação dos corpos de prova.....	47
Figura 28 - Termômetro Fluke 561.....	48

Figura 29 - Bocal cônico.....	48
Figura 30 - Chanfro parcialmente preenchido	49
Figura 31 - Ensaio por líquido penetrante a) Líquido penetrante, b) Revelador	50
Figura 32 - Sequência de passes realizados nas chapas teste.....	50
Figura 33 - Dimensões dos corpos de prova.....	51
Figura 34 – Identificação dos corpos de prova para ensaio de tração	52
Figura 35 – Esquemático das amostras	52
Figura 36 - Geometria do corpo de prova	53
Figura 37 – Identificação dos corpos de prova para ensaio de dobramento	53
Figura 38 - Corpo de prova para dobra lateral a 180°	54
Figura 39 - a) Corpo de prova posicionado, b) Dobramento a 180°	54
Figura 40 – Representação esquemática das endentações da microdureza na ZAC	55
Figura 41 – Resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova	57
Figura 42 – Valores médios de tração.....	58
Figura 43 – Dobramento lateral dos corpos de prova sem preaquecimento	59
Figura 44 – Dobramento lateral dos corpos de prova com preaquecimento	61
Figura 45 – Macrografia do corpo de prova CP 205 - sem preaquecimento	62
Figura 46 - Inclusões de escórias encontradas no CP 205	63
Figura 47 – Macrografia do corpo de prova CP 105 - com preaquecimento	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química para arames de aços doces e de baixa liga.....	19
Tabela 2 - Propriedades mecânicas para arames de aços doces e de baixa liga.....	20
Tabela 3 - Gases de proteção para a soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito.....	21
Tabela 4 – Gases de proteção para soldagem MIG/MAG com transferência por aerossol e aerossol pulsado.....	22
Tabela 5 – Composição química do aço ASTM A572 grau 50.....	39
Tabela 6 – Resultados obtidos nos ensaios de tração.....	56
Tabela 7 – Dureza média da ZAC.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRL – Aços de Baixa Liga e Alta Resistência

Ar – Argônio

ASTM – American Standard of Test and Materials

AWS – American Welding Society, Sociedade Americana de Soldagem

C – Carbono

CC+ - Corrente Contínua com Polaridade Reversa

Ce – Carbono equivalente

CO₂ – Dióxido de Carbono

Cr – Cromo

Cu – Cobre

ea – Rendimento do processo

EPS – Especificação do Procedimento de Soldagem

ER – Eletrodo revestido

H1 – Aporte de Calor

He - Hélio

MAG – Metal Active Gas

MIG – Metal Inert Gas

Mn – Manganês

Mo – Molibidênio

Ni – Níquel

O₂ – Oxigênio

°C – Celcius

P – Fósforo

S – Enxofre

SG – Sigle gas

Si – Silício

V – Vanádio

v- Velocidade de soldagem

ZAC – Zona Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Questão central de pesquisa	16
1.2	Justificativa	16
1.3	Objetivos	17
1.3.1	Objetivo geral	17
1.3.2	Objetivos específicos	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Processo de soldagem MIG/MAG	18
2.1.1	Arames	19
2.1.2	Gases de proteção	21
2.2	Metalurgia de soldagem	23
2.2.1	Classificação dos aços-liga	23
2.2.2	Estrutura cristalina dos metais	24
2.2.3	Aço ASTM A 572	28
2.2.4	Energia de soldagem	29
2.2.5	Ciclo térmico de soldagem	30
2.2.6	Transformação na zona fundida	31
2.2.7	Transformação na zona afetada pelo calor (ZAC)	32
2.2.8	Trinca a frio induzida por hidrogênio	34
2.2.9	Microestrutura favorável	36
2.2.10	Preaquecimento	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Materiais	39
3.1.1	Consumíveis	39
3.2	Equipamentos	39
3.2.1	Célula de soldagem	39
3.2.2	Equipamentos utilizados na caracterização	42
3.3	Procedimento experimental	44
3.3.1	Fluxograma da metodologia	44
3.3.2	Preparação da junta a ser soldada	44
3.3.3	Regulagem do equipamento de soldagem	47
3.3.4	Preaquecimento da chapa teste	47

3.3.5	Aplicação dos cordões de solda	48
3.3.6	Preparação dos corpos de prova	51
3.3.7	Ensaio de Tração	52
3.3.8	Ensaio de Dobramento	53
3.3.9	Ensaio metalográfico	55
3.3.10	Ensaio de microdureza Vickers	55
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	56
4.1	Análise dos ensaios de tração	56
4.2	Análise dos ensaios de dobramento	58
4.3	Análise macroestrutural da ZAC	62
4.4	Análise da microdureza da ZAC do cordão de raiz	65
5	CONCLUSÃO	67
6	REFERÊNCIAS.....	68
	ANEXO A - DESENHO TÉCNICO DO DISPOSITIVO PARA DOBRAMENTO A 180° (AWS D1.1, 2010).....	72

1 INTRODUÇÃO

A Sociedade Americana de Soldagem (AWS) define a soldabilidade como “a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço”. Esta definição responsabiliza os projetos de estruturas soldadas e fabricantes a seguirem procedimentos e condições adequadas à realização das soldas para obter resultados satisfatórios (AWS D1.1, 2010).

A maioria dos aços são soldáveis, porém, alguns são mais difíceis devidos as suas particularidades de acordo com suas propriedades químicas. O desempenho esperado de uma união soldada depende principalmente da aplicação a que se destina. Deste modo, para determinar a soldabilidade de um material, é necessário considerar o processo e procedimento de soldagem e a sua aplicação (MODENESI, 2011).

Os problemas de soldabilidade de aços de baixo carbono e alta resistência estão ligados à formação de trincas induzidas pelo hidrogênio, que ocorrem principalmente na zona afetada pelo calor (ZAC), além de outros problemas que podem ocorrer como: porosidades, inclusões de escória, mordeduras, falta de fusão, etc. (MODENESI, 2011).

Miller (1998) em um estudo sobre o terremoto magnitude 6.8 em escala Richter, ocorrido em Los Angeles em 1994 que danificou construções onde foram utilizadas vigas do aço ASTM A572, foram encontradas evidências de baixa ductilidade em algumas amostras e enfatizou que o elevado aporte térmico e temperaturas altas entre os passes de solda podem danificar a ZAC, reduzindo o limite de escoamento e limite de resistência do aço.

Para contornar este problema, o preaquecimento é um dos requisitos da norma AWS D1.1 (2010), que determina temperaturas mínimas de pré-aquecimento e entre passes, para a soldagem do aço ASTM A572 e outros aços de similar propriedades mecânicas, de modo que o tempo de resfriamento da junta soldada aumente, facilitando assim, a saída do hidrogênio e prevenindo o problema de rachaduras e/ou trincas por hidrogênio.

Dentre todos os processos de soldagem o processo MIG/MAG é que apresenta os menores teores típicos de hidrogênio presentes na solda em relação à quantidade de metal depositado e é um dos mais utilizados na fabricação de

componentes na indústria metal mecânica, pela sua alta produtividade (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Para a soldagem de aços de baixa liga e alta resistência, é recomendado o preaquecimento do material, porém, em certas aplicações como o ambiente externo e grandes dimensões dos produtos, o controle da temperatura é dificultoso, fazendo com que a peça perca seu pré-aquecimento para o ambiente, podendo colocar em risco a qualidade da solda, fazendo com que este pré-requisito não seja mantido durante toda a soldagem.

Por essa razão, serão feitas as comparações das propriedades mecânicas e as análises macroscópicas resultantes das uniões soldadas, por meio do experimento, sem o preaquecimento e com preaquecimento, conforme recomendado pela norma AWS D1.1 (2010), de modo a quantificar os resultados na soldagem de chapas de aço ASTM A572 laminada a quente e normalizada, com espessura de 63 mm, na posição plana, seguindo as condições e parâmetros utilizados em ambiente industrial.

1.1 Questão central de pesquisa

Diante dessa situação, estas áreas onde possivelmente houve perda de temperatura, a união soldada atenderá os requisitos mínimos de resistência mecânica?

1.2 Justificativa

A norma AWS D1.1 (2010) é conservadora e qualitativa, por esta razão este trabalho busca obter informações mais precisas, de modo que a diferença das propriedades mecânicas e macroestrutural nas duas condições de soldagem, com e sem preaquecimento seja evidenciada quantitativamente.

Na soldagem de componentes e/ou estruturas de aço ASTM A572 de grandes dimensões e espessuras grossas, o preaquecimento torna-se dificultoso. Manter a temperatura do aço preaquecido durante toda a extensão da soldagem e espessura da peça poderá gerar variações de temperatura, até mesmo o resfriamento total da peça igualando a temperatura ambiente, isto é, com valores menores em relação ao parâmetro mínimo estabelecido pela norma AWS D1.1 (2010) de 65°C .

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo deste estudo é analisar de forma experimental os efeitos do preaquecimento na soldagem de chapas de aço ASTM A572, grau 50, de espessura de 63 mm, com temperatura mínima de preaquecimento de 65°C e soldagem em temperatura ambiente, avaliando assim a influência das propriedades mecânicas de forma comparativa em ambas as condições.

1.3.2 Objetivos específicos

Verificar o efeito da soldagem com preaquecimento mínimo de 65°C nas propriedades mecânicas como resistência ao dobramento e tração, além da dureza na ZAC.

Verificar o efeito da soldagem sem preaquecimento com temperatura média de 20°C, nas propriedades mecânicas como resistência ao dobramento e tração, além da dureza na ZAC.

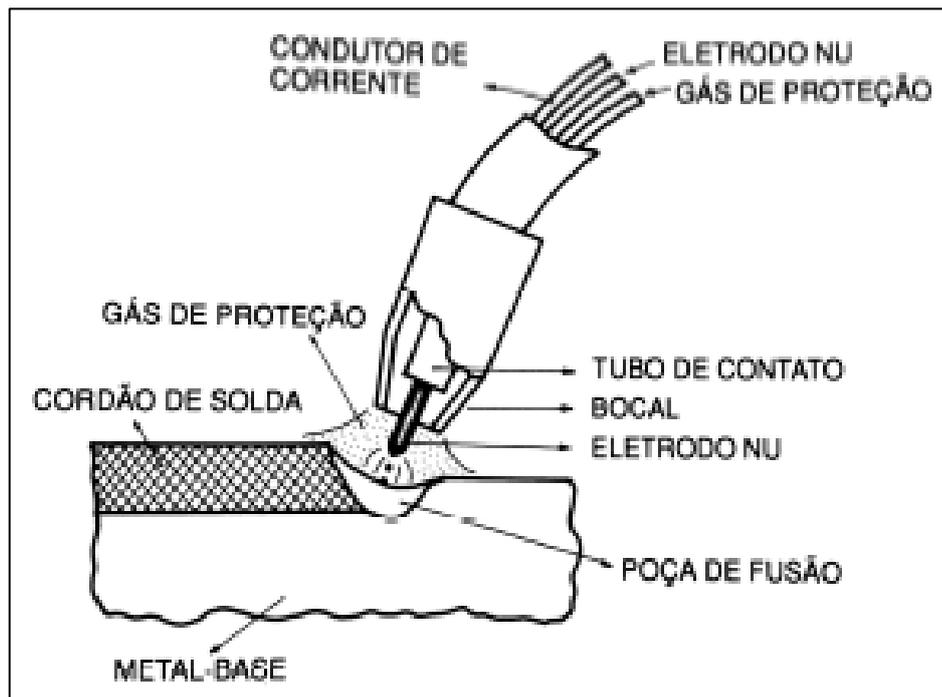
Verificar o tamanho e a quantidade das descontinuidades da soldagem com e sem preaquecimento.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Processo de soldagem MIG/MAG

A soldagem a arco com proteção gasosa (Gas Metal Arc Welding - GMAW) é um processo de união entre peças metálicas através de um arco elétrico estabelecido entre o eletrodo nu, consumível e o metal de base, como pode ser visto no esquemático da Figura 1. A região da solda é protegida da contaminação de gases presentes na atmosfera por um gás ou mistura de gases, podendo ser eles inertes, conhecido como processo MIG (Metal Inert Gas) ou o processo conhecido como MAG (Metal Active Gas), que utiliza gás ativo ou a mistura rica em gases ativos (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 1 - Poça de fusão e proteção gasosa



Fonte: WAINER; BRANDI; MELLO (1992, p.100)

Neste tipo de soldagem existem basicamente quatro tipos de transferência metálica no processo MIG/MAG: globular, curto-circuito, pulverização axial e rotacional mais conhecido como spray e por arco pulsado (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Os diâmetros dos eletrodos utilizados variam entre 0,8 e 2,4mm. Para

soldagem de materiais ferrosos utiliza-se o processo MAG e para soldagem de materiais ferrosos e não ferrosos o processo MIG (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

O processo de soldagem MIG/MAG é considerado um processo semi-automático, por se tratar de uma atividade de controle manual com equipamento mecânico e/ou eletrônico programável que controla automaticamente pelo menos uma das condições de soldagem, neste caso, a alimentação do arame (FELIZARDO, 2006).

Os principais consumíveis utilizados na soldagem MIG/MAG são os arames eletrodos bobinados, podendo ser sólidos ou tubulares, os gases de proteção puros (Ar, He e CO₂) e/ou mistura de gases, e quase sempre, um gel para proteção da tocha contra a adesão de respingos (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

2.1.1 Arames

Para a seleção do arame para a soldagem de aços carbono, devem ser levados em consideração alguns aspectos que influenciam na escolha correta do consumível, como composição química do metal de base e suas propriedades mecânicas, gás de proteção, tipo de serviço ou especificação aplicável e tipo de junta. Diante de diversos fatores a norma AWS A5.18 (2005) simplificou de forma padronizada a composição química destes consumíveis, apresentados na Tabela 1 (FORTES, 2005).

Tabela 1 - Composição química para arames de aços doces e de baixa liga

AWS	ESAB	C	Mn	Si	S	P	Mo	Outros
ER70S-2	65	0,07	0,90-1,40	0,40-0,70	≤0,035	≤0,025	---	0,05-0,15 Ti 0,02-0,12 Zr 0,05-0,15 Al
ER70S-3	29S ou 82	0,06-0,15	0,90-1,40	0,45-0,75	≤0,035	≤0,025	---	
ER70S-4	85	0,07-0,15	1,00-1,50	0,65-0,85	≤0,035	≤0,025	---	
ER70S-5	---	0,07-0,19	0,90-1,40	0,30-0,60	≤0,035	≤0,025	---	0,50-0,90 Al
ER70S-6	OK 12.51	0,07-0,15	1,40-1,80	0,80-1,15	≤0,035	≤0,025	---	
ER70S-7	87HP	0,07-0,15	1,50-2,00	0,50-0,80	≤0,035	≤0,025	---	
ER80S-D2	83 ou Hi84	0,07-0,12	1,60-2,10	0,50-0,80	≤0,035	≤0,025	0,40-0,60	
ER70S-G	não especificado – requisitos a serem acordados entre o cliente e o fornecedor							

Fonte: FORTES (2005, p.24)

As propriedades mecânicas, apresentadas na Tabela 2, em relação a todos os aspectos citados anteriormente são baseados em testes e procedimentos e vasta experiência na indústria da soldagem AWS A5.18 (2005).

Tabela 2 - Propriedades mecânicas para arames de aços doces e de baixa liga

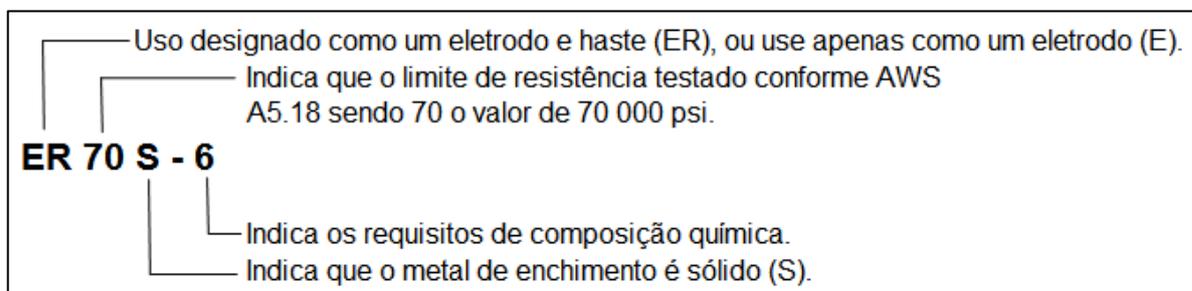
AWS	ESAB	Gás de Proteção	Corrente e polaridade	L.R. (min.) (MPa)	L.E. (min.) (MPa)	Al. (min.) (%)	Impacto ChV (J)		
ER70S-2	65	Al 1,5% O ₂ CO ₂ ¹	CC+	480	400	22	27J @ -29 °C		
ER70S-3	82						27J @ 0 °C		
ER70S-4	85	não requerido							
ER70S-5	---	CO ₂ ¹				480	400	22	27J @ -29 °C
ER70S-6	OK 12.51								
ER70S-7	87HP								
ER80S-D2	83 ou Hi84	não especificado				não especificado	480	400	17
ER70S-G	---		não requerido						

1 Ar-CO₂ pode ser usado para todos os arames.

Fonte: FORTES (2005, p.25)

O arame sólido ER70S-6 destina-se para a soldagem por simples passe e também por múltiplos passes, possui característica visual de cordões lisos na soldagem de aços estruturais e em chapas com moderadas quantidades de oxidação, podendo suportar altas correntes com proteção de CO₂. O sistema de identificação do eletrodo segue os padrões normais definidos para especificações de metal de adição, apresentado na Figura 2 (AWS A5.18, 2005).

Figura 2 - Identificação do eletrodo ER70S-6



Fonte: Adaptado da norma AWS A5.18 (2005, p.20)

O arame tubular possui um invólucro de aço de baixo carbono, podendo ser também de aço inoxidável ou ligas de níquel, recheados com desoxidantes

formadores de escória e estabilizadores de arco na forma de um fluxo ou recheados com pó metálico, que complementam as suas propriedades mecânicas. Os arames tubulares com fluxo não metálico são utilizados para a soldagem de aços de baixo carbono usando como gás de proteção dióxido de carbono puro (CO₂), ou misturas com argônio e dióxido de carbono (QUITES, 2002).

2.1.2 Gases de proteção

Os gases de proteção Argônio, Hélio e Dióxido de Carbono, podem ser empregados puros, porém, são limitados a algumas aplicações nas quais não é possível obter todos os modos de transferências. O arco elétrico pode ser instável e ainda podem ser distintos pela aplicação somente na soldagem de materiais não ferrosos (MIG – Ar e He) e/ou ferrosos (MAG - CO₂) (FORTES, 2005).

Geralmente na soldagem MAG, o gás puro utilizado é o CO₂, porém, ele não permite o modo de transferência em aerossol (spray), sendo restrito somente aos modos curto-circuito e globular, apresentando na maioria dos casos uma superfície fortemente oxidada. O Argônio é frequentemente utilizado misturado ao CO₂ para balancear este desempenho indesejável. Existe sempre um gás de proteção que melhor se adequará à necessidade. As Tabelas 3 e 4 apresentam os gases e misturas de acordo com a aplicabilidade (FORTES, 2005).

Tabela 3 - Gases de proteção para a soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito

Metal	Ar	He	Ar-He	Ar-CO ₂	Ar-He-CO ₂	Ar-O ₂ -CO ₂	CO ₂
Alumínio	X	X	(25-75)				
Aços-Carbono				(75-25) (50-50) (92-8) (85-15)		(>90-<5-<10)	X ⁽¹⁾
Aços de alta Resistência					(2,5-96-1,5) ACIMA DE 14 MSG	(>90-<5-<10) ATÉ 14 MSG	
Cobre			(25-75)				
Aços Inoxidáveis				(75-25) ⁽¹⁾	(7,5-90-2,5)	(>90-<5-<10)	
Ligas de Níquel	X		(10-90) (25-75)		(7,5-90-2,5)		
Metais reativos	X	X	(25-75)				

(1) É necessário um arame desenvolvido para a soldagem com CO₂.

Fonte: FORTES (2005, p.22)

Tabela 4 – Gases de proteção para soldagem MIG/MAG com transferência por aerossol e aerossol pulsado

Metal	Ar	He	Ar-O ₂	Ar-CO ₂	Ar-He	Ar-He-CO ₂	Ar-O ₂ -CO ₂ ⁽²⁾	Ar-CO-H ₂	CO ₂ ⁽³⁾
Alumínio	X	X			(10-90) (25-75)				
Aços-Carbono			(98-2) (95-5)	(85-15) (92-8) (75-25) ⁽¹⁾ PULSADO 95-5			(>90-<5-<10) (95-2,5-7,5)		X
Aços de baixa liga			(98-2)	(92-8)		(2,5-96-1,5)	(>90-<5-<10) ACIMA DE 2,4 mm (95-2,5-7,5)		
Cobre e bronze ao silício	X	X			(10-90) (25-75)				
Aços Inoxidáveis			(99-1) (98-2)					H ₂ -1 CO ₂ -2	
Ligas de Níquel	X	X			(25-75)				
Metais reativos	X	X							

(1) Soldas monopasse

(2) Alta qualidade em chapas com carepa de usina quando são usados os arames L-TEC 83 e 87 HP

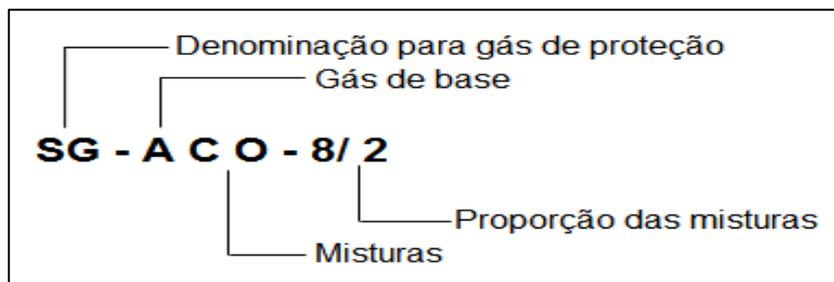
(3) Usado com arame tubular e para a soldagem de alta velocidade com arame sólido

(4) Materiais de pequena espessura

Fonte: FORTES (2005, p.22)

O sistema de classificação dos gases é baseado em porcentagens volumétricas seguindo os padrões do sistema internacional de medidas. A denominação dos gases de proteção puros e/ou mistura, são identificados pelas letras iniciais (SG), conforme apresentado na Figura 3. A próxima denominação se dá pela letra inicial da composição química do maior volume de gás puro e/ou mistura, considerado gás de base e letras iniciais dos gases utilizados na mistura em ordem decrescente de porcentagem (AWS A5.32, 1997).

Figura 3 - Denominação do gás de SG-ACO-8/2



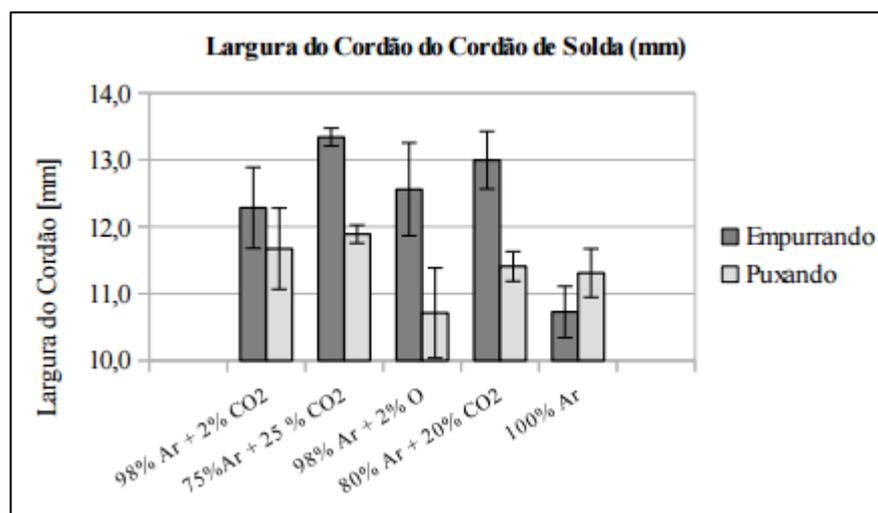
Fonte: Adaptado da norma AWS A5.32 (1997, p.6)

Na soldagem MAG, a adição de pequenas quantidades de gases ativos (CO₂ e O₂) aos gases inertes (Ar e He) melhora sensivelmente a estabilidade do arco e contorno do cordão, diminui a incidência de respingos e mordeduras e também

ocorre um aumento na penetração (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Cardoso *et al.* (2015) em um estudo sobre a influência dos gases de proteção na geometria do cordão de solda, utilizando o processo MIG/ MAG com eletrodo sólido ER70S-6, observou que a influência da adição dos gases ativos (CO_2 e O_2) misturados com Argônio, resultaram em maior largura dos cordões de solda utilizando a técnica “empurrando” em relação à utilização do gás inerte (Ar) puro, conforme apresentados na Figura 4.

Figura 4 - Efeito do gás de proteção e sentido de soldagem na largura do cordão de solda



Fonte: CARDOSO *et al.* (2015, p.6).

2.2 Metalurgia de soldagem

O processo de soldagem geralmente realiza uma aplicação localizada de calor e/ou deformação plástica, alterando as propriedades do material de base, sendo essas alterações nem sempre desejáveis ou aceitáveis ao conjunto soldado. Grande parte dessas alterações depende das reações ocorridas durante a solidificação e o resfriamento do cordão de solda, por isso é importante comentar sobre os tipos de liga e seus cuidados, além dos efeitos térmicos gerados na soldagem (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

2.2.1 Classificação dos aços-liga

O aço é uma liga de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples, visto que os aços comerciais não são ligas binárias. De fato, apesar dos

seus principais elementos de liga serem o ferro e carbono, eles contêm sempre outros elementos secundários presentes, devido aos processos de fabricação (CHIAVERINI, 1996).

Os aços-liga podem ser classificados de acordo com o teor de elementos de liga presentes em sua composição química, podendo ser subdivididos em aços de baixa liga (teor de liga inferior a 5%), em aços de média liga (com teor de liga entre 5 e 10%) e aços de alta liga (com teor de liga acima de 10%) (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

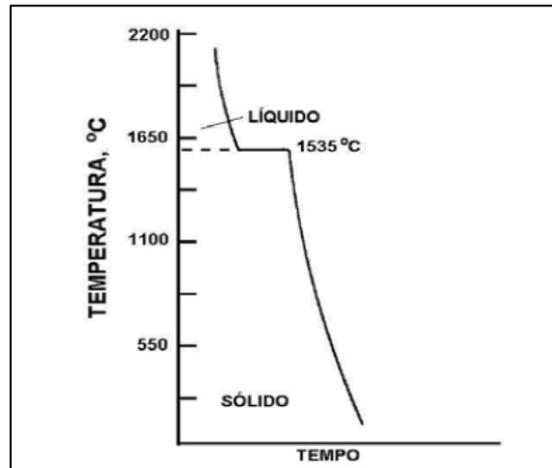
Os aços-liga contêm porcentagens mais elevadas de vários elementos químicos, tais como: cromo, níquel, molibdênio, tungstênio, manganês, silício e cobre. Existem outros elementos que são incorporados, mesmo em pequenos teores para melhorar ainda mais a qualidade do aço, como vanádio, boro, nióbio, titânio e em alguns é adicionado o cobalto. Entretanto, o carbono é o elemento principal para o ferro, pois as propriedades mecânicas da liga dependem essencialmente desse elemento (SOUZA, 1989).

Segundo Silva e Mei (2010), a classificação dos aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) é bastante genérica, levando a maus entendimentos, devido ao conceito do aço ARBL e sua empregabilidade. Esses aços são empregados como aços estruturais na indústria automobilística, vasos de pressão, além de alguns aços serem agrupados devido a alguma característica comum: aços bifásicos, aços de perlita reduzida, aços laminados controladamente, etc. (SILVA; MEI, 2010).

2.2.2 Estrutura cristalina dos metais

Os metais solidificam em forma de cristal, composto por átomos ou moléculas agrupadas, formando uma rede denominada rede cristalina. Ao absorver energia térmica, calor, os átomos ou moléculas se agitam e afastam-se uns dos outros, desfazendo essa rede e o cristal se funde. Se essa rede for composta de apenas um tipo de átomo, como no ferro puro, as condições serão as mesmas em qualquer ponto da rede, onde o cristal irá fundir-se a uma determinada temperatura conforme Figura 5 (FORTES, 2005).

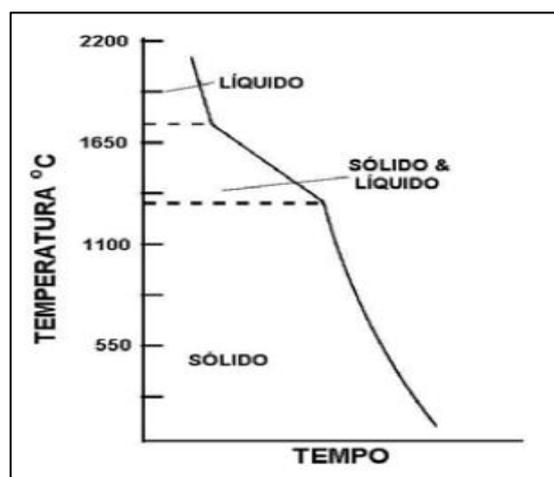
Figura 5 – Transformação sólido – líquido, ferro puro



Fonte: FORTES (2005, p.7)

Para os aços-liga que contêm dois ou mais tipos de átomos ou moléculas, o ponto de fusão pode iniciar a uma temperatura mais elevada, não ocorrendo dessa forma a fusão completa, podendo existir uma combinação de líquido e sólido dentro de uma faixa de temperatura, conforme a Figura 6. Cada metal possui estrutura cristalina característica em temperatura ambiente até o momento em que absorve energia na forma de calor, vindo a alterá-la e em consequência, ocorrendo a denominada mudança de fase (FORTES, 2005).

Figura 6 – Transformação sólido – líquido, liga metálica

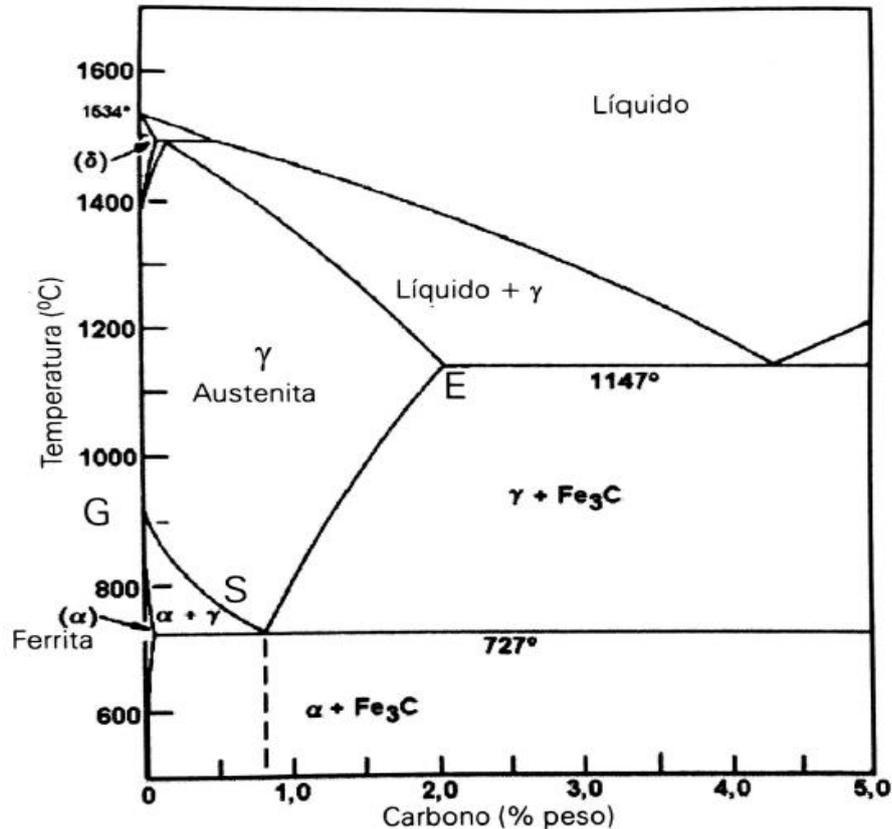


Fonte: FORTES (2005, p.7)

O diagrama ferro-carbono Fe-C pode ser utilizado para entendimento da estrutura e ligas de ferro, relacionando-as à temperatura, teor de carbono e fases

que podem existir e às reações entre elas em condições de equilíbrio, mostradas na Figura 7 (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 7 – Diagrama Fe-C, Constituintes em equilíbrio nos aços



Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE (2009, p.84)

As fases representadas no diagrama Fe-C são: Líquido, austenita (γ), ferrita (α e δ) e cementita (Fe_3C). A ferrita é praticamente ferro puro com uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), podendo conter traços de carbono em solução sólida. A cementita é um carboneto de ferro de estrutura ortorrômbica, ambas presentes no aço carbono abaixo da temperatura de 727° C. Acima dessa temperatura a estrutura cristalina do ferro passa a ser cúbica de corpo centrado (CFC), conhecida como austenita que é capaz de dissolver maiores quantidades de carbono (CALLISTER, 1991).

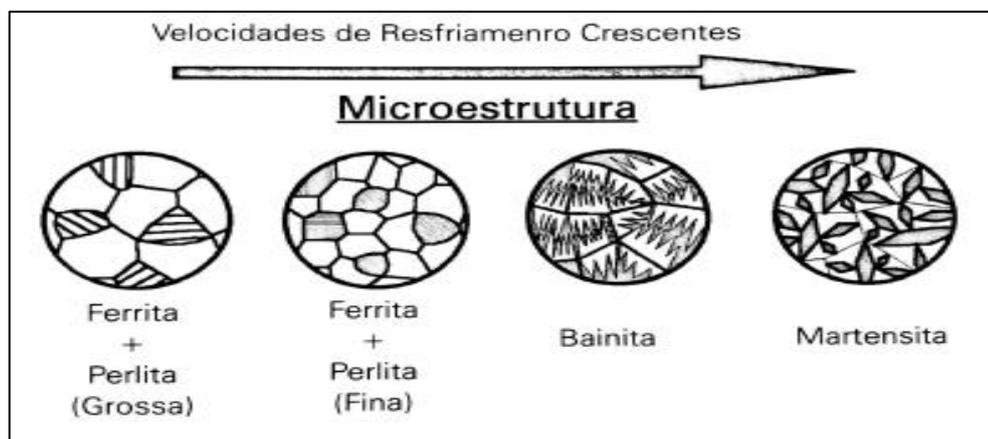
Em velocidades baixas de resfriamento, abaixo de 727°C, ocorre a reação eutetóide, formando o constituinte típico dos aços com menos de 0,8% de carbono denominado perlita, que é a austenita remanescente em forma de mistura entre ferrita e cementita, em forma de grãos ou “colônias”. Dentro de cada colônia as

camadas estão orientadas praticamente na mesma direção, de dureza relativamente elevada (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Com menores temperaturas de transformação, em torno de 500°C, a estrutura lamelar típica da perlita não é mais possível, podendo aparecer no aço um novo constituinte conhecido como bainita, formado por grãos alongados de ferrita com uma fina dispersão de carbonetos elevando a resistência mecânica do aço (CALLISTER, 1991).

Para temperaturas de resfriamento suficientemente elevadas é possível uma outra nova fase não prevista no diagrama Fe-C, a martensita. Em forma de agulhas ou lâminas, ela apresenta elevada dureza, que aumenta consideravelmente com o seu teor de carbono, apresentando característica extremamente frágil. A Figura 8 mostra de uma forma esquemática a evolução da microestrutura do aço em relação à sua velocidade de resfriamento a partir da condição autênica (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 8 – Diagrama esquemático da microestrutura de um aço em função da velocidade de resfriamento após austenitização



Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE (2009, p.86)

A microestrutura de uma junta soldada de um aço de alta resistência e baixa liga (ARBL) deve apresentar propriedades similares ao metal de base, isto é, a zona fundida e a zona afetada pelo calor (ZAC) devem ter propriedades similares a uma chapa que sofreu um tratamento termomecânico apropriado para desenvolver as propriedades mecânicas desejadas, porém, são diferentes quando se tem o material como soldado (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

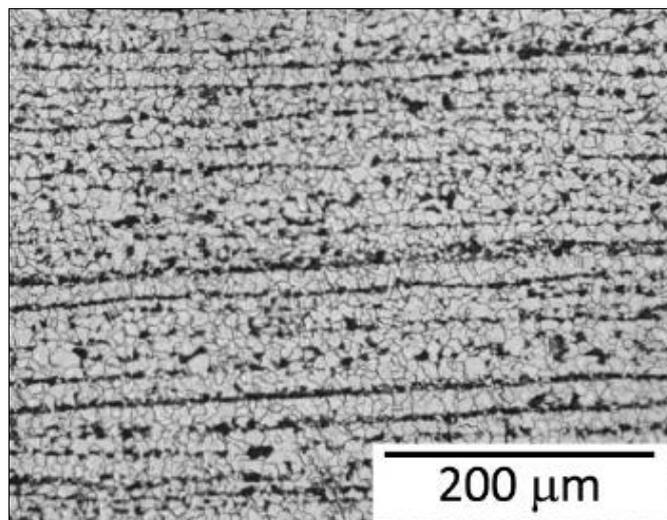
2.2.3 Aço ASTM A 572

A designação A572 especifica esse aço como estrutural Nióbio-Vanádio de alta resistência e baixa liga. Porém, a adição do Nióbio é restrita para o grau 50 [345MPa] em chapas de espessuras acima de 20 mm (ASTM A572, 2007).

Os aços ASTM A572 são especificados pela sua resistência mecânica, mas não por sua composição química. Todos os cinco graus de resistência são fabricados a partir de aços de baixo carbono com adições de pequenas quantidades de Manganês e outros elementos em teores muito baixos. Esses aços possuem maior resistência mecânica quando comparados aos aços com o mesmo teor de carbono, possuindo boa soldabilidade e ductilidade (PADONNONI, 2007).

A microestrutura do aço ASTM A572, apresentada na Figura 9, é composta de ferrita e perlita (FERREIRA, 2015).

Figura 9 - Microestrutura do aço ASTM A572



Fonte: FERREIRA (2015, p.12)

Essa especificação do aço ASTM A572 abrange cinco graus de alta resistência e baixa liga de aço estrutural, usados na fabricação de chapas, perfis e barras. A classe de cada grau é especificada pelo seu limite mínimo de escoamento, abrangendo os requisitos da norma. As classes 42 [290 MPa], 50 [345 MPa], e 55 [380 MPa] destinam-se a estruturas rebitadas, aparafusadas e/ou estruturas soldadas. As classes 60 [415 MPa] e 65 [450 MPa] são destinadas a construções

rebitadas e aparafusadas de pontes, ou rebitadas, aparafusadas e soldadas em outras aplicações (ASTM A572, 2007).

2.2.4 Energia de soldagem

Nem toda a energia gerada no processo de soldagem é realmente utilizada na execução da soldagem. Existem as perdas durante a deposição metálica do consumível através do arco elétrico: parte da energia disponível é dissipada para a atmosfera, outra pequena parte perde-se por convecção no meio gasoso que protege a poça de fusão, e o restante é realmente usado na execução do processo. Segundo Wainer et al. (1992) a energia que realmente está disponível para a soldagem é dada pelo cálculo do aporte de calor (H_1), que calcula a quantidade de energia fornecida ao arco elétrico relacionando a tensão (V), a corrente aplicada (I), rendimento do processo (e_a) e velocidade de execução da solda (v), apresentada na equação 1.

Equação 1 - Equação do aporte de energia

$$H_1 = \frac{e_a \cdot 60 \cdot V \cdot I}{v} \quad (\text{J/cm})$$

Fonte: WAINER; BRANDI; MELLO (1992, p.361)

Costa (2015) realizou um estudo sobre a influência da energia de soldagem nas propriedades mecânicas do aço AISI 304, aço inoxidável austenítico, utilizando somente ensaio de tração para avaliar as diferentes energias de soldagem (10,5 KJ/mm e 9,9 KJ/mm) e observou a redução do limite de escoamento da ZAC em relação ao material de base para ambas as situações. Ele percebeu que com a menor energia de soldagem obteve melhores resultados.

Um estudo realizado por Dermanque (2015) na soldagem de Vergalhões CA-50 da classe dos aços SAE 1026, utilizados na indústria civil, soldados pelo processo MIG/MAG com arame sólido ER70S-6 com aportes térmicos de 1,3 e 1,8KJ/mm, mostraram que os ensaios de tração, juntamente aos resultados da análise microestrutural realizados nos corpos de prova soldados, aprovaram para aporte térmico de 1,3KJ/mm e reprovaram para o aporte de 1,8KJ/mm. Segundo ele, o

crescimento de grãos da ZAC favoreceu a redução da resistência nesta área e o corpo de prova rompeu no começo da solda nos corpos de prova soldados com aporte de 1,8KJ/mm.

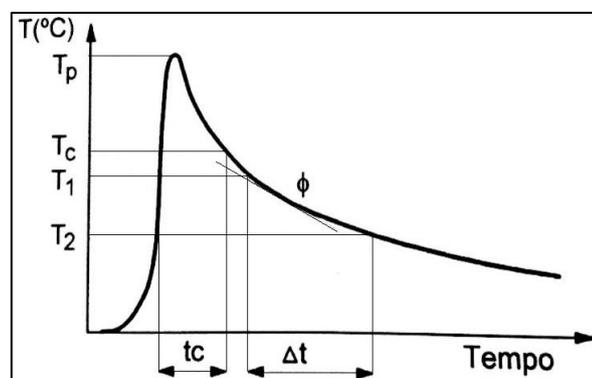
Borba (2015) fez um estudo na soldagem de aço naval EH36TMCP por arco submerso com aporte térmico elevado, obtendo juntas soldadas aceitáveis de acordo com os ensaios de tração realizados, estando os valores de limites de resistência aceitáveis, uma vez, que eles são maiores que o do metal de base utilizado (BORBA, 2015).

Ferreira (2015) realizou um estudo na soldagem do aço ASTM A527 em chapas de 25 mm de espessura com o processo de arco submerso em passe único, com valores de energia de soldagem elevados, variando entre 7,8 KJ/mm e 14 KJ/mm, utilizando preaquecimento de 80°C, e pôde observar através de ensaios de impacto Charpy-V que a tenacidade na região da ZAC teve maiores valores de energia absorvida em relação ao metal de solda, superando os valores mínimos esperados para a validação do processo.

2.2.5 Ciclo térmico de soldagem

Durante a soldagem, os pontos mais próximos à junta sofrerão um aumento de temperatura devido à passagem da fonte de calor. A variação dessa temperatura pode ser estimada na forma de uma curva denominada ciclo térmico de soldagem, conforme mostra a Figura 10.

Figura 10 - Ciclo térmico de soldagem



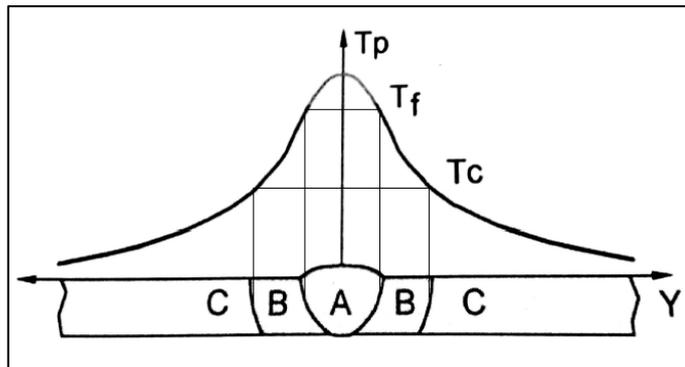
Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE (2009, p.89).

A temperatura máxima atingida (T_p) determina a extensão da ZAC, indicando a

possibilidade de ocorrência de mudanças microestruturais até que atinja a temperatura crítica (T_c), que indica mínima temperatura em que ainda pode ocorrer uma alteração relevante, como uma transformação de fase. O tempo de permanência (t_c) indica o tempo em que o ponto fica submetido a temperaturas acima da temperatura crítica e a velocidade de resfriamento (ϕ) é definida por $(T_1 - T_2)/\Delta t$. Para soldagem de aços, as temperaturas críticas geralmente consideradas são 800°C e 500°C (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Considerando o ciclo térmico de cada ponto próximo à junta soldada é possível definir a curva de gradiente térmico através da região na qual o material fundiu-se (T_f) e solidificou-se durante a operação de soldagem. Podemos dizer que a temperatura de máxima (T_p) de cada ponto varia com a sua distância ao centro do cordão de solda, mostrado abaixo na Figura 11. A temperatura crítica (T_c) define o tamanho da ZAC (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 11 – Curva de repartição térmica: A – Zona fundida, B – ZAC e C – Material de base



Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE (2009, p.92)

2.2.6 Transformação na zona fundida

A microestrutura final do metal de solda depende do teor de elementos de liga, concentração, composição química e distribuição de tamanhos de inclusões não-metálicas, microestrutura de solidificação, tamanho de grão da austenita, e ciclo térmico de soldagem. Essas transformações no metal de solda durante o resfriamento ocorrem em condições fora do equilíbrio e com velocidade de resfriamento bem alta (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Na soldagem com passe único, a microestrutura da zona fundida é formada pela transformação da austenita em ferrita, durante o ciclo de resfriamento contínuo; já em soldagem multipasses a microestrutura é ainda mais complexa, pois cada

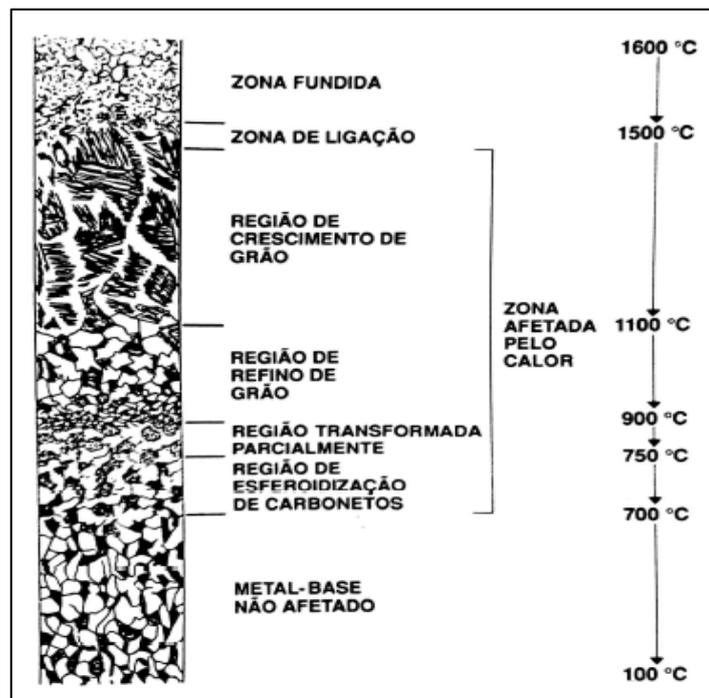
passe de solda pode afetar os passes inferiores, causando a reaustenitização e nova transformação no resfriamento, refinando parcialmente essa área e formando uma estrutura secundária (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

2.2.7 Transformação na zona afetada pelo calor (ZAC)

Em aços essa região torna-se austenítica durante o aquecimento e pode conter o constituinte duro conhecido como martensita quando se resfria. Essa região desenvolve grãos grosseiros (região de crescimento de grão), porém um pouco mais além, onde a temperatura não foi tão alta, entrando na faixa acima da temperatura de transformação, mas não atingindo a região austenítica, o tamanho de grão é menor (região de refino de grão) (PEREZ, 2007).

A ZAC de um aço carbono possui as seguintes regiões: de crescimento de grão, refino de grão, transformação parcial, e de esferoidização de carbonetos, além do metal-base não afetado, conforme pode ser visto na Figura 12 (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Figura 12 - Zona afetada pelo calor



Fonte: WAINER; BRANDI; MELLO (1992, p.420)

a) Região de crescimento de grão

O crescimento de grão ocorre na faixa de temperatura de 1100 a 1500°C e alguns autores acreditam que essa região é influenciada pela transformação de fase da ferrita para austenita, durante o aquecimento (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

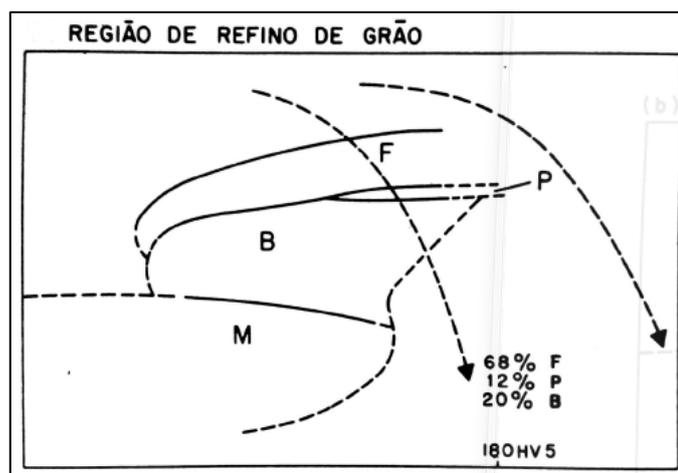
A região também é caracterizada pela presença de ferrita com morfologia em placas e também presente a bainita, em aços ligados ou com teor mais elevado de carbono esta região pode apresentar estrutura martensítica. Esta região tende a ser a mais susceptível a trincas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

b) Região de refino de grão

A região de refino de grão ocorre em uma faixa de temperatura (de 900°C até aproximadamente 1200°C) próxima à temperatura de normalização, essa região é caracterizada normalmente por uma estrutura fina de ferrita e perlita (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

A Figura 13 mostra a curva de resfriamento contínuo da região de refino de grão em relação à curva de resfriamento do metal de base, que possui resistência e ductilidade elevadas, sendo esse efeito marcante nos aços microligados (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Figura 13 - Região de refino de grão



Fonte: WAINER; BRANDI; MELLO (1992, p.418)

c) Região parcialmente transformada

Na região parcialmente transformada, gerada por temperaturas entre 900 e

750°C, a perlita é austenitizada. As propriedades mecânicas nessa região podem ser piores que o metal de base (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Na soldagem multipasses nessa área podem se formar constituintes de elevada dureza e baixa tenacidade (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

d) Região de esferoidização de carbonetos

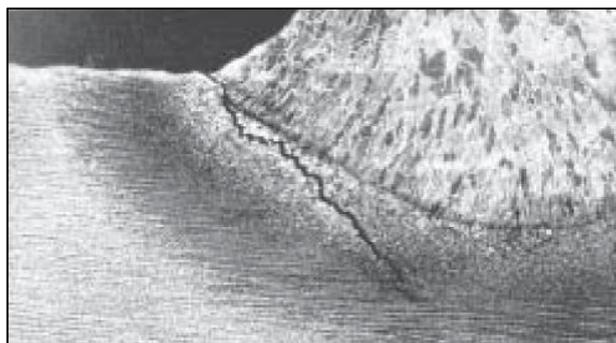
Na região de esferoidização de carbonetos na faixa de 750 a 700°C a resistência mecânica diminui, ainda que não seja fácil comprovar o resultado através de um ensaio de tração convencional, devido à estreita faixa dessa região da ZAC (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

2.2.8 Trinca a frio induzida por hidrogênio

A trinca a frio é uma das mais críticas, podendo ocorrer alguns dias após o término da soldagem. Por essa razão são recomendados ensaios não-destrutivos somente 48h após a execução da soldagem em aços com teor mais elevado de carbono e microestruturas susceptíveis a trincas (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Para soldagens com metal de adição com baixos teores de carbono, normalmente o hidrogênio pode migrar para ZAC, região onde normalmente ocorrem trincas a frio, conforme mostra a Figura 14, porém, em casos onde a temperabilidade da solda seja superior a da ZAC, o hidrogênio pode ficar retido na zona fundida (SILVA, 2003).

Figura 14 - Trinca a frio na ZAC

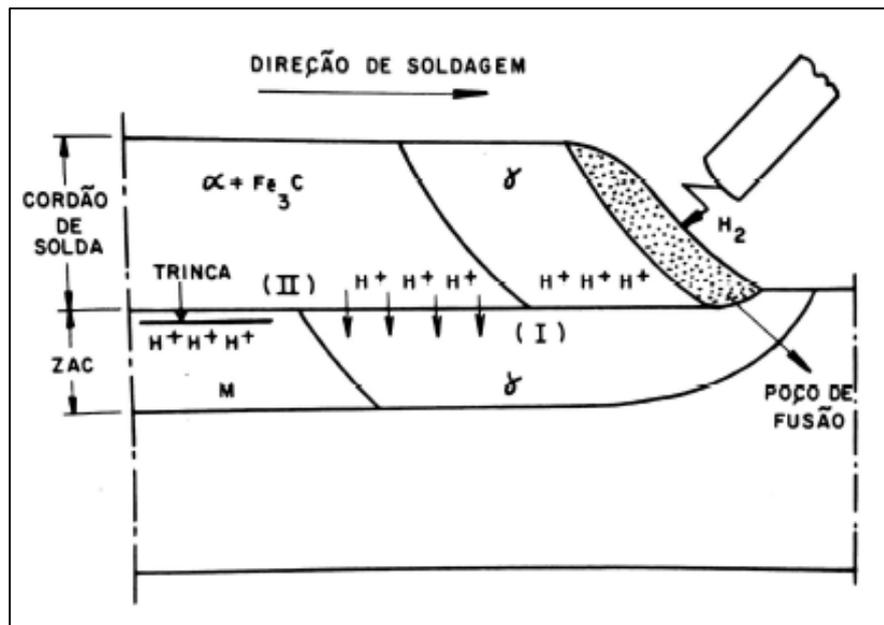


Fonte: SILVA (2003, p.1)

Segundo Signes e Backer (1979), o efeito do preaquecimento na difusão do hidrogênio indicou que a maior taxa de preaquecimento, acima de 230° C, na soldagem de aços de alta resistência e baixa liga, aceleraria a taxa de difusão do hidrogênio, em consequência, os valores de temperatura facilitariam a saída do hidrogênio, porém, por si só concluíram que o hidrogênio não é o principal fator que causa a falha por trincas na ZAC, ele interage com a tensão residual característica do processo de soldagem.

O hidrogênio pode ser introduzido pela atmosfera do arco elétrico para a poça de fusão. Ao solidificar-se, a solubilidade do hidrogênio cai e se difunde para a região austenitizada da ZAC, apresentada na Figura 15, tornando essa região frágil e susceptível a trincas (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

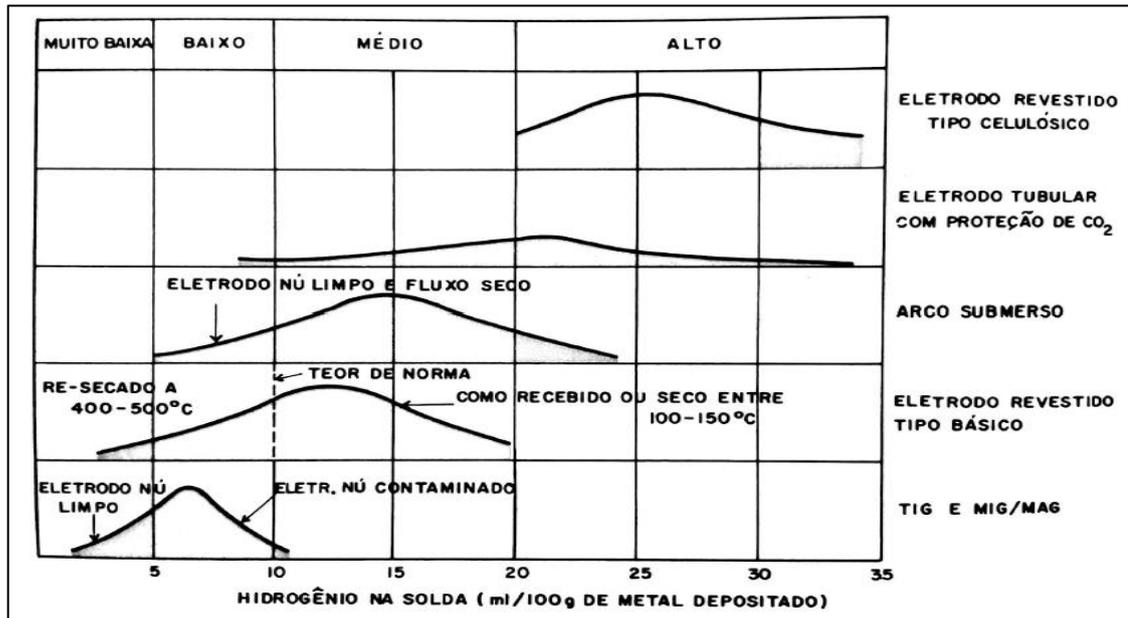
Figura 15 - Modelo de fragilização por hidrogênio durante a soldagem proposto por Granjon



Fonte: WAINER; BRANDI; MELLO (1992, p.422)

As fontes de hidrogênio podem ser geradas na soldagem com eletrodos revestidos úmidos, fluxos de arco submerso não aquecidos, contaminação dos gases de proteção, oxidações na superfície dos arames sólidos, superfícies contaminadas, e processos de soldagem com teores típicos, conforme Figura 16.

Figura 16 - Teores típicos de hidrogênio por processos de soldagem



Fonte: WAINER; BRANDI; MELLO (1992, p.422)

2.2.9 Microestrutura favorável

Aços com teores mais elevados de carbono, com resistência mais elevada, são mais susceptíveis a trincas induzidas por hidrogênio (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Após a soldagem, na fase final do resfriamento, com temperaturas baixas, a martensita apresentará regiões frágeis saturadas em hidrogênio, somadas as tensões residuais com intensidades próximas ao limite de escoamento da zona fundida e também na ZAC (SILVA, 2003).

A dureza e microestrutura da ZAC de aços estruturais estão relacionadas aos efeitos de seus elementos de liga, na tendência à fissuração pelo hidrogênio e para determinar temperaturas de preaquecimento. Geralmente, é empregada a fórmula do carbono equivalente, representada pela equação 2. São considerados aços pouco sensíveis à fissuração aqueles com teores de carbono equivalente (em peso) abaixo de 0,40% e altamente sensíveis aqueles com carbono equivalente acima de 0,60% (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Equação 2 - Expressão adotada pelo Instituto Internacional de Soldagem

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

Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE (2009, p.110)

2.2.10 Preaquecimento

Os aços em sua maioria são bons condutores de calor, conseqüentemente, o calor gerado pela solda é escoado por toda a região adjacente a ela, ocorrendo um resfriamento rápido, principalmente em espessuras grossas quando não preaquecido. O objetivo do preaquecimento é reduzir a velocidade de resfriamento da região soldada, isto é, a velocidade de resfriamento é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura entre as áreas quente e fria (QUITES, 2002).

O preaquecimento da chapa a ser soldada é importante para prevenção da formação de trincas induzidas por hidrogênio. Realizando-se o preaquecimento do metal de base, a velocidade de resfriamento diminui e é possível reduzir a quantidade de martensita na ZAC em alguns aços, e favorecer o escape do hidrogênio do metal de base para a atmosfera (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

O aço ASTM A572, dentre outros, faz parte de uma listagem de aços da norma AWS D1.1 (2010), que determina que o preaquecimento do metal a ser soldado e a temperatura entre passes deve ser a uma temperatura mínima de 65°C para espessuras entre 38 e 65mm. A temperatura elevada retarda o resfriamento da união soldada, o que permite a saída mais rápida do hidrogênio difuso e reduz a tendência a rachaduras (AWS D1.1, 2010).

Um estudo realizado por Moojen (2015) para soldagem do aço API 5L-X80, é um aço microligado de baixo carbono, utilizou diferentes taxas de preaquecimento, inclusive temperaturas negativas de -30°C e preaquecimentos de 40, 100, 150 e 200°C. Ele utilizou diferentes energias de soldagem entre 1,1KJ/mm e 1,8KJ/mm, realizando também o controle de temperaturas entre os passes, de modo a manter a temperatura na mesma faixa do preaquecimento e obter diferentes taxas de resfriamento. O autor pôde observar que as propriedades mecânicas das soldagens

com preaquecimento e temperaturas entre os passes de 150°C foram similares à soldagem a temperaturas negativas. (MOOJEN, 2015).

Este estudo busca utilizar os diversos conceitos e recomendações citadas pelos autores e normas aplicáveis na metalurgia da soldagem, de modo a desenvolver o experimento, seguindo uma metodologia padronizada e utilizada na indústria metal mecânica.

Os parâmetros utilizados na soldagem foram seguidos conforme especificação do procedimento de soldagem (EPS) qualificado, em concordância com a norma AWS D1.1 (2010) utilizados na fabricação de componentes soldados pela empresa WEG Equipamentos Elétricos S/A onde o experimento foi realizado.

A confecção dos corpos de prova e ensaios realizados seguem os métodos de qualificação de procedimentos de soldagem e qualificação de soldadores conforme determina a norma AWS D1.1 (2010), sendo os soldadores testados anualmente para validação de suas habilidades nas posições de soldagem que se fazem necessárias para execução dos projetos em chão de fábrica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Consumíveis

O material de base utilizado para o experimento foi o aço ASTM A572 de grau 50, laminado a quente e normalizado, com número de corrida 505162, fabricado pela Usiminas. Cada corpo de prova foi formado por duas chapas chanfradas em duplo “V” à 30°, formando um chanfro de 60° entre as partes.

As dimensões das chapas cortadas são de 63 x 100 x 200 mm. O carbono equivalente (Ce) do aço ASTM A572 utilizado é de 0,43% e sua composição química é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição química do aço ASTM A572 grau 50

Composição química do aço ASTM A572 (% Peso)											
	C	Mn	P	S	Si	V	Cu	Al	B	Ti	Cr
Grau 50	0,18	1,51	0,017	0,011	0,33	0,003	0,01	0,037	0,04	0,028	0,01

Fonte: Certificado de inspeção – Usiminas (2015)

O arame utilizado foi o arame sólido de aço carbono ER70S-6, revestido de cobre com diâmetro de 1,2 mm da marca Kiferro, e a mistura de gases utilizada foi a SG-ACO, contendo os três componentes, Argônio (90%), Dióxido de Carbono (8%) e Oxigênio (2%), fabricado e distribuído pela White Martins.

3.2 Equipamentos

3.2.1 Célula de soldagem

Os corpos de prova foram soldados em ambiente fabril, tendo a célula de soldagem isolada por biombos com cortinas de PVC flexível com proteção contra raios ultravioleta e livre de correntes de ventos que pudessem causar defeitos na soldagem.

Foi utilizado um cavalete com altura de 80 cm para o soldador realizar a soldagem na posição plana, como pode ser visto na Figura 17 o soldador realizando a limpeza do chanfro.

Figura 17 – Célula de soldagem



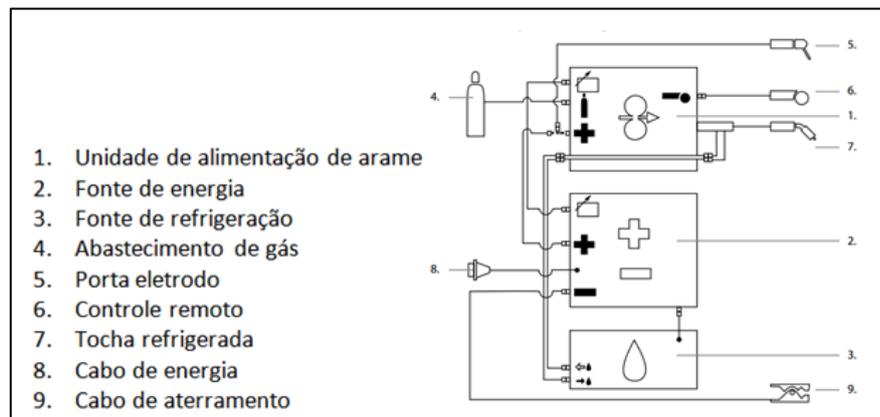
Fonte: Weg Equipamentos Elétricos S/A (2016)

A célula de soldagem possui ponto de distribuição de gás, proveniente de uma central de gases instalada na parte externa da fábrica, disponibilizando uma mistura de gases, na proporção de 90% de Argônio, 8% de CO₂ e 2% de O₂.

A fonte utilizada é da marca KEMPPPI, modelo FASTMIG PULSE 450 Amperes, representada pelo diagrama esquemático da Figura 18, de corrente contínua e tensão constante. O alcance mínimo e máximo de corrente e tensão de trabalho do equipamento são: corrente entre 10 a 450 Amperes e tensão entre 10 a 50 Volts.

O cabeçote alimentador utilizado estava equipado com roldanas lisas para tracionar o arame sólido ER70S-6 de diâmetro 1,2mm.

Figura 18 – Diagrama esquemático da máquina de soldagem Kemppi



Fonte: Manual de operação FastMig Pulse 450, Kemppi (2009, p.7)

A tocha manual utilizada foi da marca SUMIG, modelo SU 601, refrigerada a água deionizada, ideal para soldagens pesadas, podendo ser utilizada com arames de diâmetro entre 0,8 e 2,4 mm, equipada com acessórios da mesma marca, bico de contato para arame 1,2 mm, guia em espiral de aço, difusor de gás e bocal cônico.

Um multímetro calibrado da marca ICEL, modelo AD – 9901A foi utilizado para verificar se os parâmetros programados do equipamento de soldagem estavam condizentes com os valores de saída nos terminais do equipamento. A capacidade de verificação do multímetro é de tensão DC de 1000V.

O controle do gás de proteção foi realizado com auxílio de um fluxômetro para controle de vazão da marca Oximaq, com capacidade de medição de 3 a 25 litros por minuto.

Para aquecimento das chapas teste foi utilizado um maçarico manual a gás oxiacetileno, da marca Harris, equipado com bico modelo 1H, com vazão entre 4000 e 7000 litros por hora de oxigênio e entre 1000 e 2000 litros por hora de gás.

O controle da temperatura de pré-aquecimento e entre passes foi realizado com auxílio de um termômetro infravermelho da marca Fluke 561 com mira laser e gama de temperatura de -40°C a 550°C.

Para verificação do passe de raiz foi utilizado líquido penetrante da marca Metal-Check VP 30, embalagem aerossol lavável com água para aplicações em chapas de aço com temperatura de trabalho entre 10°C e 52°C e revelador da mesma marca tipo D70, indicados para revelações de defeitos de soldagens como porosidades e trincas.

3.2.2 Equipamentos utilizados na caracterização

Os ensaios de tração e dobramento foram realizados no laboratório de ensaios do IFSC, na máquina de ensaios universal da marca EMIC, modelo DL-10000, que pode ser vista na Figura 19 (a), com capacidade de 100KN, equipada com extensômetro para evitar que desvios por escorregamentos nas garras de fixação dos corpos de prova e desgastes do equipamento possam influenciar os resultados.

A máquina de ensaios universal não possuía o acessório para o dobramento a 180°, fazendo-se necessário realizar a fabricação de um dispositivo específico que pode ser visto na Figura 20 (b), (matriz de dobra e punção) de modo a atender o requisito da norma AWS D1.1 (2010).

A norma AWS D1.1 (2010) disponibiliza em seu conteúdo o desenho técnico (ANEXO A) do dispositivo de dobramento para que seus critérios de aceitação sejam validados.

Figura 19 - Máquina de ensaios universal - a) tração, b) dobramento



Fonte: Laboratório de Ensaios – IFSC (2016)

A preparação das amostras para macrografia foram lixadas na politriz e lixadeira metalográfica da marca Fortel, modelo PLFDV, com prato de alumínio de diâmetro 200 mm e rotação variável baixa de 125 e 250RPM e velocidade alta de 300 e 600RPM.

As imagens macroscópicas foram obtidas com auxílio do microscópio estereoscópio Stemi 2000-C da marca Zeiss, que pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 – Microscópio estereoscópio Stemi 2000-C



Fonte: Laboratório de Ensaio – IFSC (2016)

Os ensaios de microdureza vickers foram realizados com auxílio do microdurômetro automático e motorizado da marca Future-Tech, modelo FM-800, com capacidades de carga de 1gf a 2Kgf, equipado com lentes óticas de 20, 50 e 100 x de ampliação, mesa de coordenadas x e y em escala decimal, com saída de dados RS232 C, apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Microdurômetro Future – Tech, FM 800



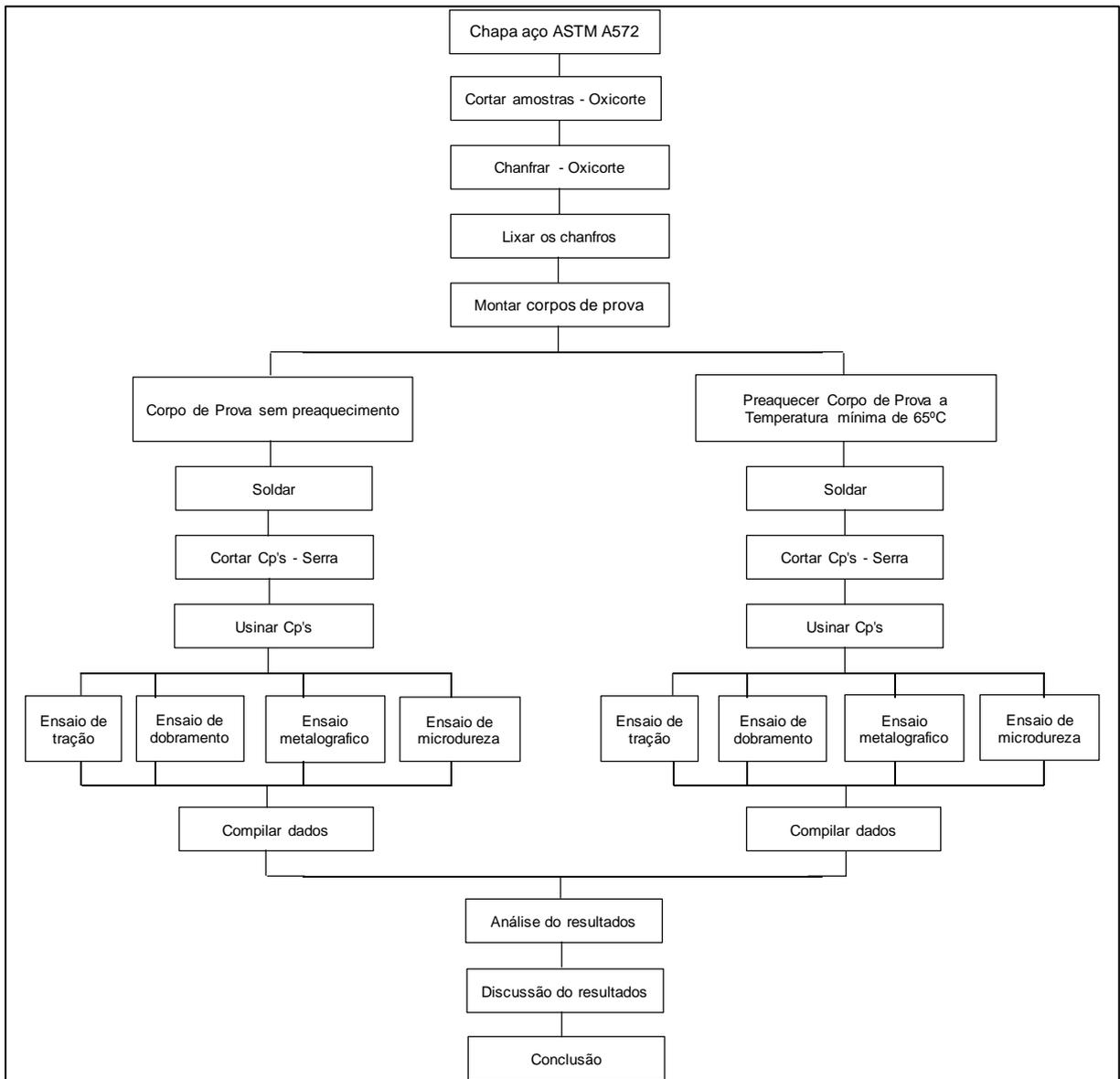
Fonte: Laboratório de Ensaio – IFSC (2016)

3.3 Procedimento experimental

3.3.1 Fluxograma da metodologia

O fluxograma abaixo, na Figura 22, apresenta o fluxograma da metodologia adotada para realização do procedimento experimental.

Figura 22 – Fluxograma da metodologia



Fonte: O próprio autor (2016)

3.3.2 Preparação da junta a ser soldada

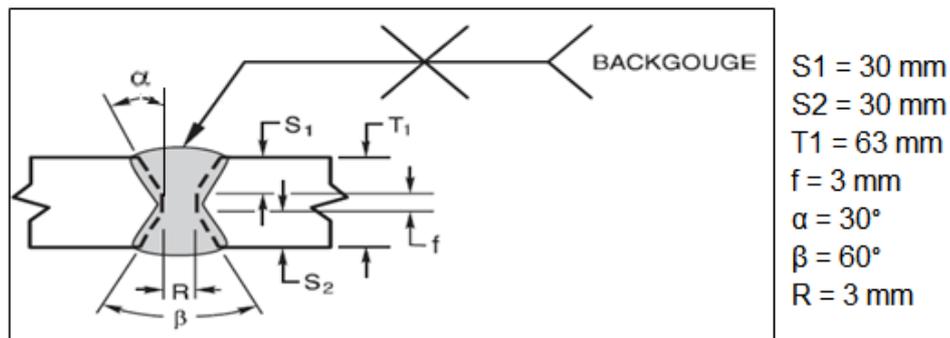
Os corpos de prova foram coletados de uma única chapa de aço ASTM A 572

com espessura 63 mm, nas dimensões de 100 x 200 mm, cortados por oxicorte na máquina de corte da marca White Martins, modelo Autocut HD 3000 CNC.

A velocidade de corte utilizada foi de 50 mm/min.

O chanfro realizado foi do tipo duplo “V”, como pode ser visto na Figura 23, com abertura de 60° (β) entre ambas as chapas teste, isto é, 30° (α) em cada bisel e face da raiz de 3 mm (f).

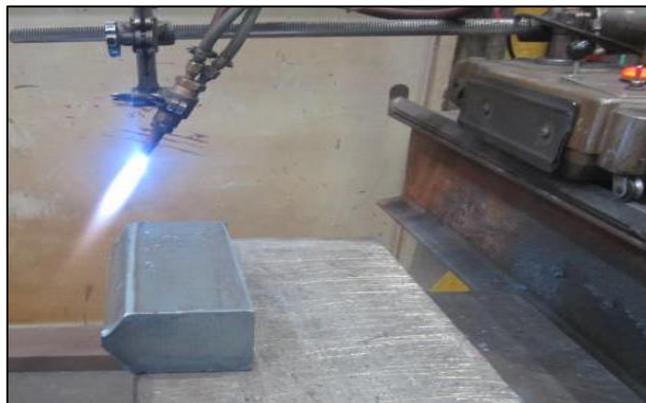
Figura 23 - Desenho do chanfro dos corpos de prova



Fonte: Adaptado da norma AWS D1.1 (2010, p.110)

Para a realização do chanfro foi utilizado o processo oxicorte com auxílio de um trator semiautomático para realização do corte, da marca CIG, modelo Trolley Cut CG 30, equipado com um maçarico com bico da marca Vortech 1502, numero 8 para corte de espessuras acima de 25 mm, conforme mostra a Figura 24.

Figura 24 – Corte do chanfro por oxicorte



Fonte: Weg Equipamentos Elétricos S/A (2016)

A limpeza da área do chanfro foi realizada com auxílio de esmerilhadeira

equipada com disco de lixa abrasivo de diâmetro 180 mm, grana 36 da marca Norton.

O aspecto de acabamento resultante foi ao metal brilhante, de modo a remover a oxidação resultante do processo de corte para que não contaminasse a união por solda entre as chapas.

Com o auxílio do transferidor de graus foi possível verificar se os ângulos dos chanfros não foram alterados pelo lixamento e permaneceram com 30 graus em cada lado da junta, conforme Figura 25.

Figura 25 - Transferidor de grau

Fonte: Weg Equipamentos Elétricos S/A (2016)

Os corpos de prova foram montados com auxílio de outras duas chapas de aço de 12,5 mm em uma das faces da união. Foram soldados transversalmente ao chanfro para travar as partes de modo a evitar a distorção gerada pela tensão residual durante o processo de soldagem, deixando um intervalo entre as chapas de 3 mm, conforme Figura 26.

Figura 26 - Chapa teste

Fonte: Weg Equipamentos Elétricos S/A (2016)

3.3.3 Regulagem do equipamento de soldagem

O equipamento de soldagem foi regulado conforme a especificação do procedimento de soldagem (EPS) de acordo com os requisitos especificados pela norma AWS D1.1 (2010).

A seguir são apresentados os parâmetros utilizados:

- Material de Base: Aço ASTM A572, grau 50 - espessura 63 mm
- Metal de Adição: ER 70S-6 – Ø 1,2 mm
- Posição de Soldagem: Plana
- Proteção Gasosa: (Mistura em %): 90Ar + 8CO₂ + 2O₂
- Vazão: 15 litros/ minuto (+- 1 litro)
- Preaquecimento: CP100 (Temp. média 87°C) / CP200 (Temp. média 20°C)
- Tipo de Corrente: CC+
- Polaridade: Inversa
- Fonte de Energia: Tensão Constante
- Modo de Transferência: Pulverização (Spray)
- Tensão: 30 Volts (+- 1 volts)
- Corrente: 295 Amperes (+- 5 amperes)
- Cordões: Retilíneos e múltiplos passes
- Sentido de soldagem: Empurrando
- Velocidade de soldagem média manual: 4,5 mm/s
- Energia média de soldagem: 1600 J/mm (+- 100J)

3.3.4 Preaquecimento da chapa teste

Os corpos de prova foram nomeados para as duas condições de soldagem, com preaquecimento e sem preaquecimento conforme apresentados na Figura 27.

Figura 27 - Identificação dos corpos de prova

Corpos de prova	Temperatura entre passes
CP 100	Temp. média 87°C
CP 200	Temp. média 20°C

Fonte: O próprio autor (2016)

O corpo de prova CP 100 foi preaquecido com auxílio de maçarico manual até atingir temperatura homogênea em torno de 80°C para que no momento do início da soldagem estivesse a temperatura mínima de 65°C, conforme mostra a Figura 28.

Figura 28 - Termômetro Fluke 561



Fonte: Weg Equipamentos Elétricos S/A (2016)

O controle de temperatura do preaquecimento foi verificado com o termômetro infravermelho, sempre instantes antes do início de cada passe de solda.

3.3.5 Aplicação dos cordões de solda

Foi necessário utilizar bocal cônico de 15 mm para ter melhor acesso à abertura do chanfro de 60° e realização do passe de raiz, mostrado na Figura 29.

Figura 29 - Bocal cônico



Fonte: Weg Equipamentos Elétricos S/A (2016)

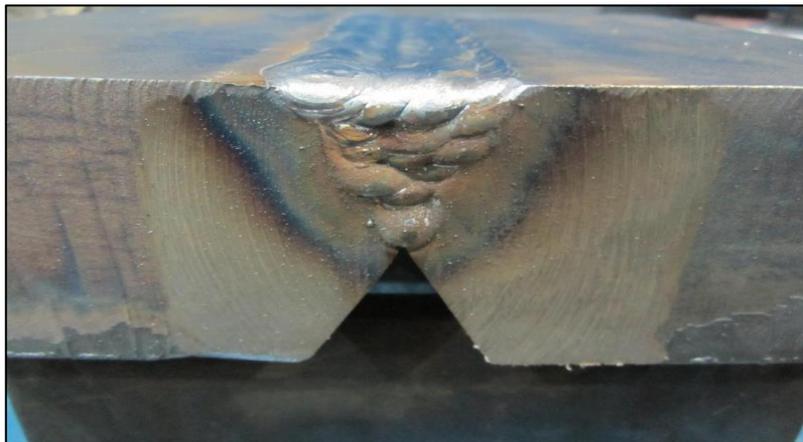
Para preenchimento da primeira metade do chanfro a técnica utilizada foi “empurrando”, com a tocha na posição a 90° em relação ao chanfro. Os cordões foram depositados da direita para a esquerda do chanfro com sobreposição de 50% do cordão anterior.

Ao final de cada passe foi realizada a limpeza do cordão com auxílio da lixadeira equipada com escova de aço e rotativa e disco de desbaste para remoção de respingos e mordeduras que poderiam causar defeitos entre os passes.

Antes do início do cordão seguinte foi realizado o monitoramento da temperatura com termômetro infravermelho para verificar se o corpo de prova ainda mantinha a temperatura mínima a 65°C.

Após o preenchimento parcial do chanfro duplo “V”, apresentado na Figura 30, a chapa foi deixada resfriando até atingir temperatura ambiente em torno de 25°C.

Figura 30 - Chanfro parcialmente preenchido

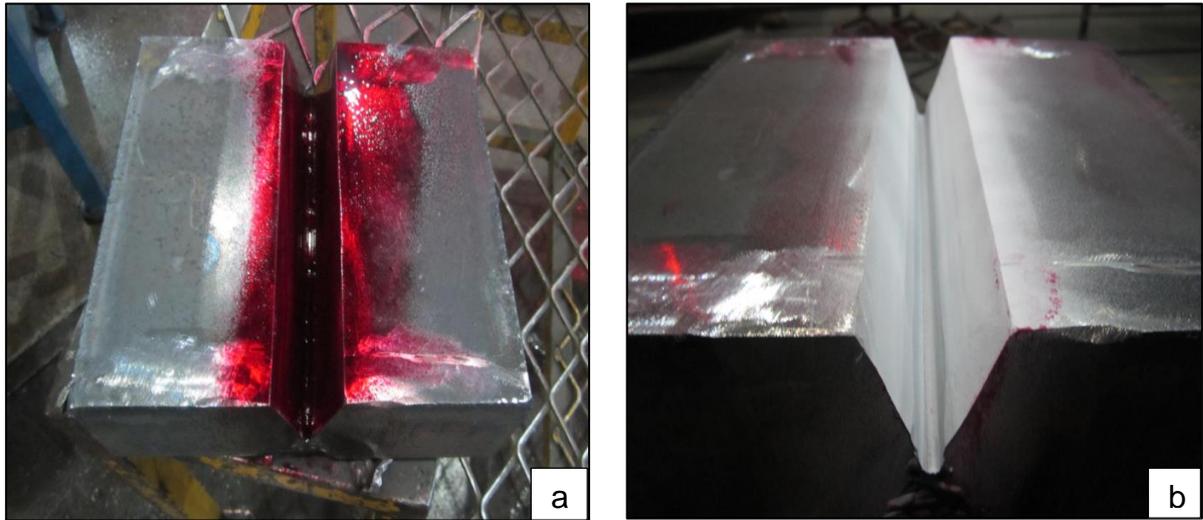


Fonte: Weg Equipamentos Elétricos S/A (2016)

Após o resfriamento do corpo de prova CP 100, as chapas utilizadas para o travamento foram removidas e com auxílio de lixadeira equipada com disco de corte e desbaste, foi realizada a limpeza do lado oposto à solda até chegar ao passe de raiz.

Foi realizado ensaio por líquido penetrante e revelador para garantir que qualquer defeito proveniente do passe de raiz prejudicasse a homogeneidade da solda, conforme mostra a Figura 31.

Figura 31 - Ensaio por líquido penetrante a) Líquido penetrante, b) Revelador

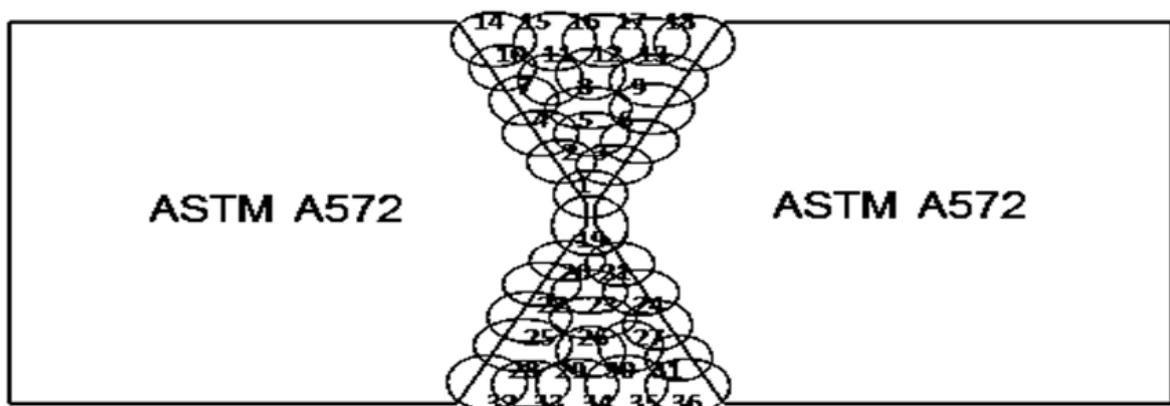


Fonte: Weg Equipamentos Elétricos S/A (2016)

Após limpeza e preaquecimento do corpo de prova foi realizado o preenchimento total do chanfro, seguindo os mesmos passos descritos anteriormente e controlando a temperatura para que não ficasse abaixo dos 65°C. A temperatura média de preaquecimento foi de 87°C.

A Figura 32 mostra a sequência de passes de solda realizados no corpo de prova CP 100, totalizando 36 cordões de solda realizados para preenchimento total do chanfro.

Figura 32 - Sequência de passes realizados nas chapas teste



Fonte: O próprio autor (2016)

Para o corpo de prova sem preaquecimento CP-200, o mesmo procedimento de soldagem, parâmetros e cuidados com a limpeza e remoção de defeitos que

pudessem prejudicar a homogeneidade da solda foram utilizados, conforme soldagem da chapa teste CP-100, porém não foi realizado o preaquecimento.

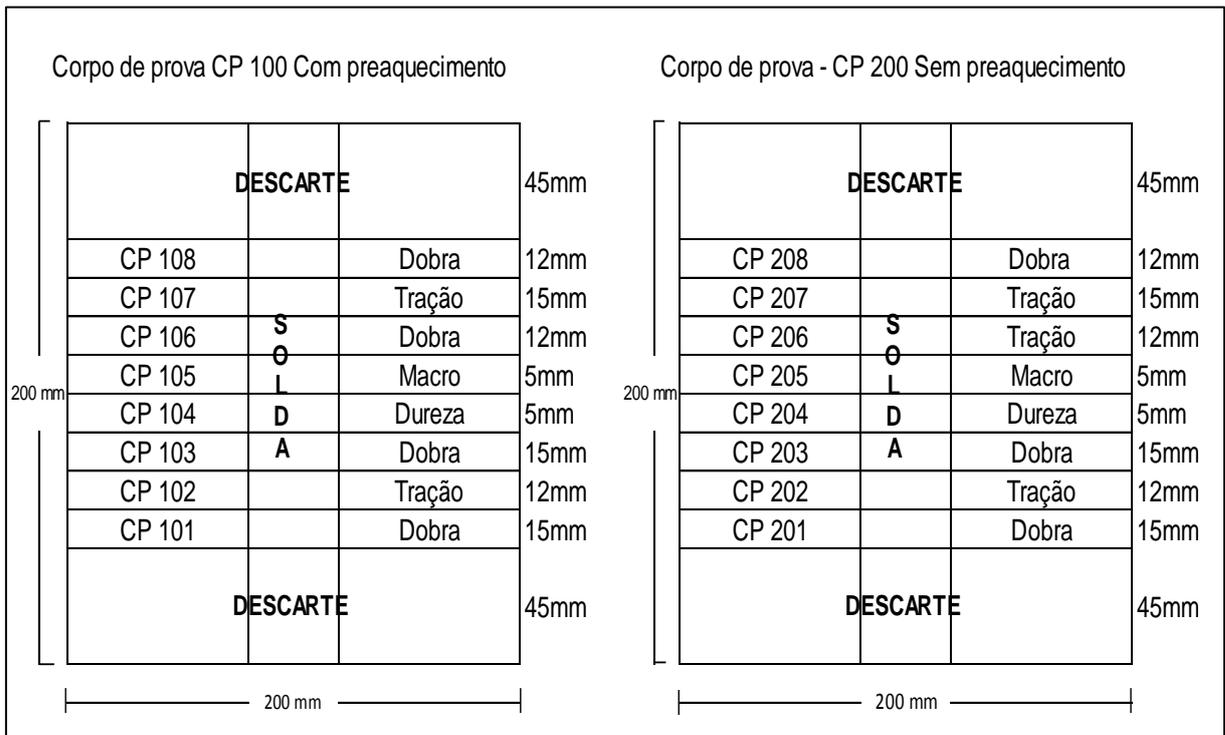
A chapa teste CP-200 foi soldada a temperatura ambiente, e resfriada livremente à temperatura ambiente ao final de cada passe. O controle da temperatura entre os passes foi feito de modo a garantir que estivesse a temperatura ambiente a cada passe de solda, sempre verificado com o termômetro infravermelho.

A temperatura média da chapa foi de 20°C e foram necessários 36 cordões de solda para preencher totalmente o chanfro.

3.3.6 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram cortados em serra de fita horizontal hidráulica, conforme orienta a norma AWS D1.1 (2010), intercalando a remoção das amostras com descarte das extremidades, para confecção dos corpos de prova, conforme esquemático apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Dimensões dos corpos de prova



Fonte: O próprio autor (2016)

3.3.7 Ensaio de Tração

O esquemático mostrado na Figura 34, apresenta em destaque a fração dos 8 corpos de prova retirados das fatias cortadas do CP 100 e CP 200, para realização do ensaio de tração, mais três corpos de prova do metal de base.

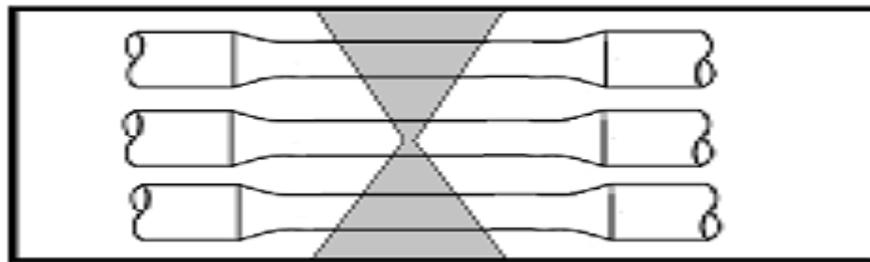
Figura 34 – Identificação dos corpos de prova para ensaio de tração

Fração das amostras para ensaio de tração					
Com preaquecimento		Sem preaquecimento		Material de base	
CP 100	CP 107	CP 1073	CP 200	CP 202	CP 2021
		CP 1021			CP 2061
	CP 102	CP 1022		CP 206	CP 2062
		CP 1023		CP 2063	
					CP 001
					CP 002
					CP 003

Fonte: O próprio autor (2016)

A Figura 35 representa o posicionamento das amostras retiradas das fatias para ensaios de tração.

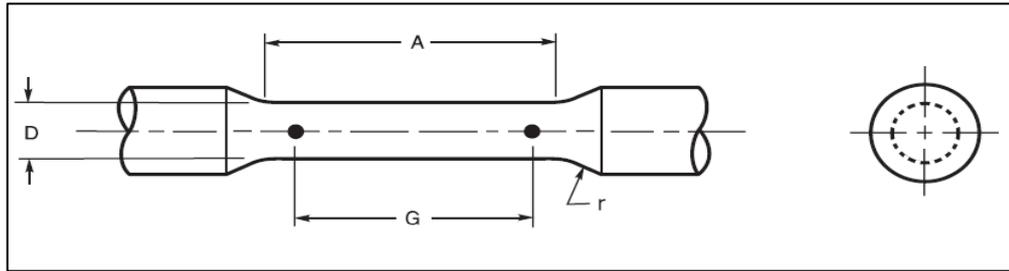
Figura 35 – Esquemático das amostras



Fonte: O próprio autor (2016)

Todos os corpos de prova foram usinados de acordo com a norma AWS D1.1 (2010), que padroniza os métodos de ensaios em materiais metálicos. Normalmente utilizam-se corpos de prova com seção circular ou retangular. Foram adotados corpos de prova cilíndricos com dimensões ($G=80\text{mm}$, $D=6\text{mm}$, $r=6\text{mm}$, $A=90\text{mm}$, $L=200\text{mm}$), conforme mostra a Figura 36.

Figura 36 - Geometria do corpo de prova



Fonte: AWS D1.1 (2010, p.173)

Os corpos de prova foram submetidos a um esforço, sendo alongados até antes da sua ruptura para remoção do extensômetro, e posteriormente, os ensaios foram conduzidos até romper os corpos de prova.

3.3.8 Ensaio de Dobramento

O esquemático mostrado abaixo na Figura 37, apresenta em destaque a fração dos 6 corpos de prova retirados das fatias cortadas do CP 100 e CP 200 para realização dos ensaios de dobramento.

Figura 37 – Identificação dos corpos de prova para ensaio de dobramento

Fração das amostras para ensaio de dobramento			
Com preaquecimento		Sem preaquecimento	
CP 100	CP 101	CP 200	CP 201
	CP 103		CP 203
	CP 106		CP 208

Fonte: O próprio autor (2016)

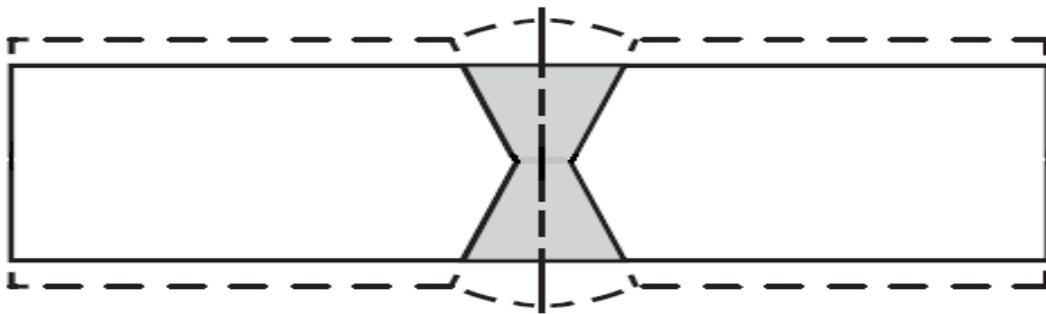
Foram realizados os ensaios de dobramento em seis corpos de prova, três para cada condição de soldagem e sendo todos usinados de acordo com a norma de AWS D1.1 (2010), que padroniza os métodos de ensaios em corpos de prova soldados, determinando que para ensaios de dobra em chapas soldadas com espessuras acima de 38mm. Segundo a norma citada, os corpos de prova devem ser usinados em altura máxima de 38mm, com espessura de 10mm e comprimento de 150mm e a dobra deve ser realizada a 180°.

Os ensaios de dobramento podem ser realizados de três maneiras, todos eles

com dobramento a 180°, porém são distintos de acordo com o objetivo desejado, sendo eles: dobramento na face da solda, dobramento na face da raiz e dobramento lateral. O dobramento lateral foi escolhido devido à espessura das chapas serem de 63 mm e também pelo chanfro escolhido, neste caso o duplo “V”.

A Figura 38 mostra a vista lateral do corpo de prova e o sobremetal que deve ser removido tracejado. As dimensões especificadas pela norma para confecção dos corpos de prova foram respeitadas e a usinagem foi realizada em ambas as faces da solda.

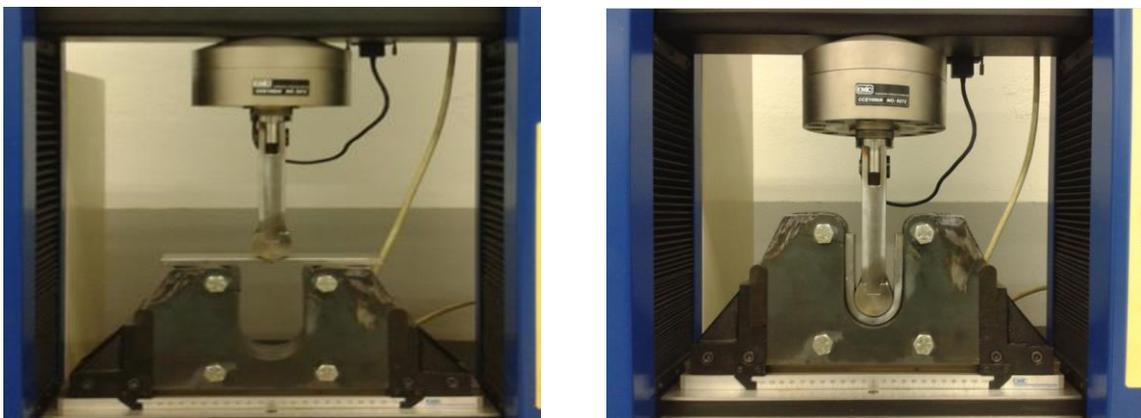
Figura 38 - Corpo de prova para dobra lateral a 180°



Fonte: Adaptado da norma AWS D1.1, (2010, p.169)

O dispositivo de dobramento (punção e dispositivo de apoio) foram fabricados nas dimensões especificadas pela norma AWS D1.1 (2010), onde na figura 39 (a) mostra o corpo de prova posicionado para o ensaio e (b) mostra o corpo de prova dobrado a 180°.

Figura 39 - a) Corpo de prova posicionado, b) Dobramento a 180°



Fonte: O próprio autor (2016)

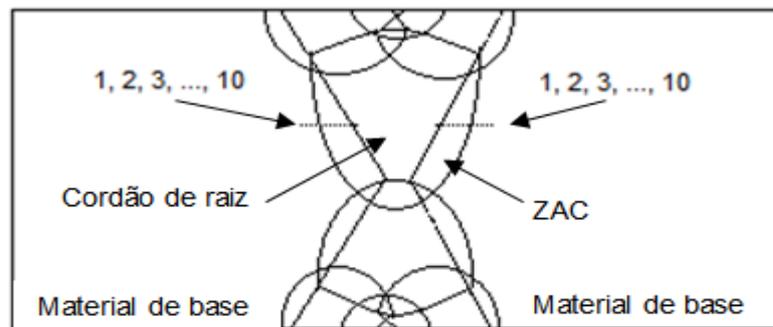
3.3.9 Ensaio metalográfico

O ensaio metalográfico foi realizado no laboratório do IFSC, onde, foi realizada a preparação metalográfica por lixamento das amostras com e sem preaquecimento para análise e mapeamento da zona afetada pelo calor. O embutimento em baquelite não foi realizado devido às dimensões da seção transversal das amostras que posteriormente foram submetidas a ataque químico com nital a 2%.

3.3.10 Ensaio de microdureza Vickers

A avaliação da microdureza da ZAC foi realizada no cordão de raiz das amostras, com preaquecimento (CP 105) e sem preaquecimento (CP 205), onde foram efetuadas 10 medições alinhadas com distância entre os pontos de 0,5 mm, conforme apresentados na Figura 40. A posição das endentações forão realizadas no passe de raiz. Para isto foi utilizado o microdurômetro Future-Tech, modelo FM-800 no padrão de dureza HV 0,1 (carga nominal de 0,9806 N) com tempo de aplicação de 10 segundos.

Figura 40 – Representação esquemática das endentações da microdureza na ZAC



Fonte: O próprio autor (2016)

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Análise dos ensaios de tração

Através da leitura feita pelo software Tesc, versão 3.04, utilizado na máquina de ensaios universal, foi possível identificar as propriedades mecânicas dos corpos de prova soldados e do metal de base, como o limite de escoamento e limite de resistência, sendo eles apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados obtidos nos ensaios de tração

Propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração			
Amostras		Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)
MATERIAL DE BASE	CP 001	396,1	534,1
	CP 002	379,2	550,8
	CP 003	376,9	546,5
CP COM PREAQUECIMENTO	CP 1073	353,2	541,6
	CP 1021	458	546,6
	CP 1022	377,1	532,1
	CP 1023	405	527
CP SEM PREAQUECIMENTO	CP 2021	348,7	534
	CP 2061	468,1	548,7
	CP 2062	346,6	530,4
	CP 2063	458	562,1

Fonte: O próprio autor (2016)

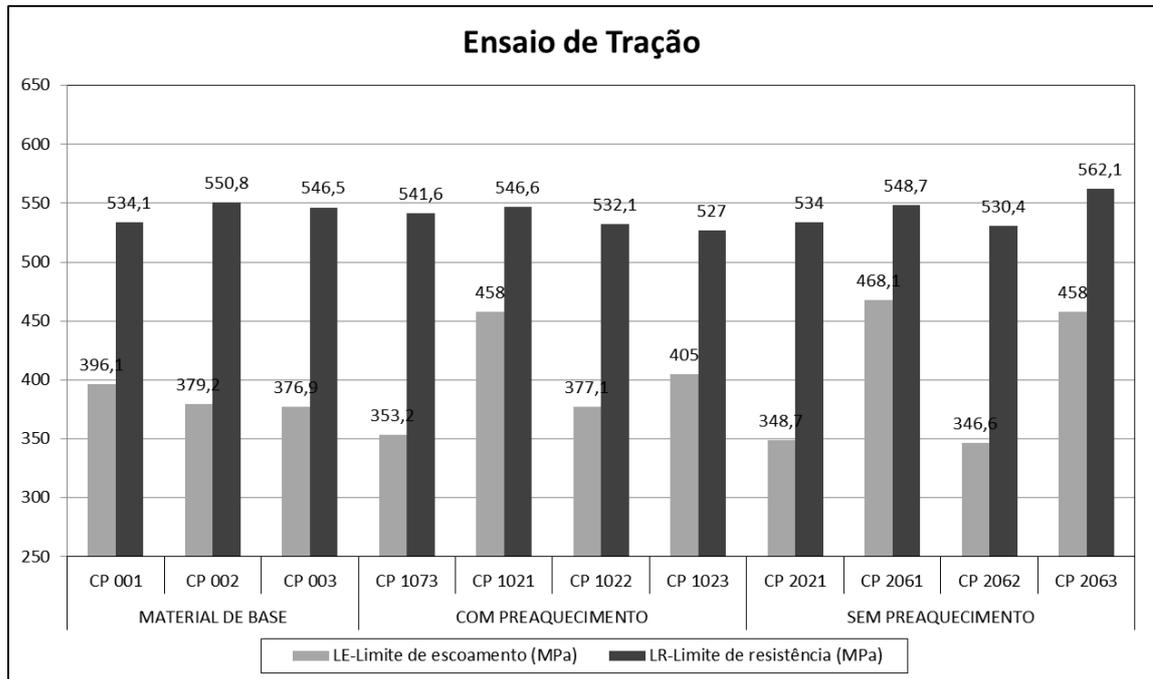
Para ambos os experimentos de soldagem com e sem preaquecimento, os valores de limites de escoamento e limites de resistência resultantes dos ensaios de tração estão acima dos valores mínimos de escoamento de 345 MPa e limite de resistência de 450 MPa do metal de base. Nesse caso o aço ASTM A572 grade 50 (ASTM A572, 2007).

Segundo Wainer (1992), os valores obtidos nos ensaios de tração devem apresentar propriedades similares ao metal de base, embora diferentes quando se tem o material como soldado.

A norma AWS D1,1 (2010) determina que o limite de resistência e resultante do ensaio de tração não deve ser menor que o especificado para o metal de base (AWS D1.1, 2010).

O gráfico apresentado na Figura 41 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de tração, relacionando os limites de escoamento e resistência dos corpos de prova.

Figura 41 – Resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova



Fonte: O próprio autor (2016)

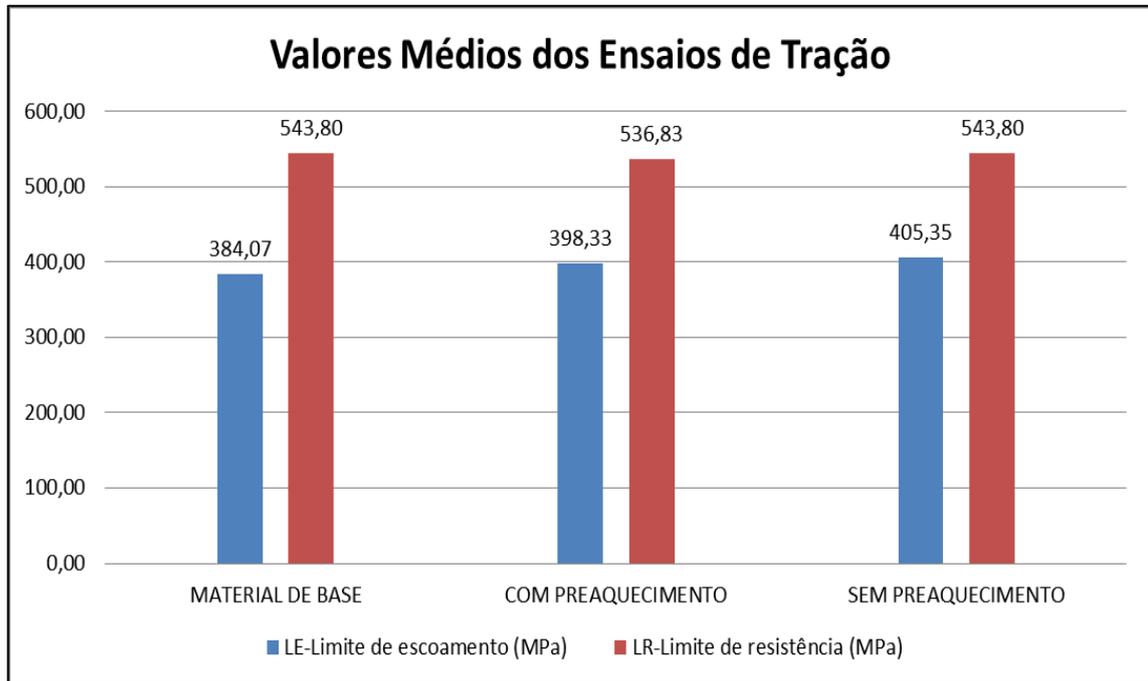
Os resultados mostram que para ambas as condições de soldagem, com e sem a realização do preaquecimento das chapas com espessura grossa de 63 mm, os limites mínimos de tração e escoamento atenderam os critérios da norma AWS D1.1 (2010).

Os corpos de prova sem preaquecimento CP 2021 e CP 2062 apresentaram valores de limite de escoamento próximos ao limite mínimo de 345 MPa e os corpos de prova CP 2061 e CP 2063 apresentaram valores bem acima. Conforme Wainer (1992), os valores obtidos devem apresentar propriedades similares ao metal de base, embora diferentes quando se tem o material como soldado.

Possivelmente estes menores valores de limite de escoamento estão relacionados à fração com menor comprimento de solda, já que foram coletados da região que compreende o passe de raiz, e também, possivelmente o efeito do revenido nesta região que sofreu ciclos térmicos diversos pelos múltiplos passes.

Comparando os valores médios da condição de soldagem sem preaquecimento com a condição com preaquecimento apresentados na Figura 42, é possível verificar que os valores médios de limite de resistência e limite de escoamento foram maiores que os valores do metal de base e não apresentaram diferenças significativas entre as duas condições de soldagem.

Figura 42 – Valores médios de tração



Fonte: O próprio autor (2016)

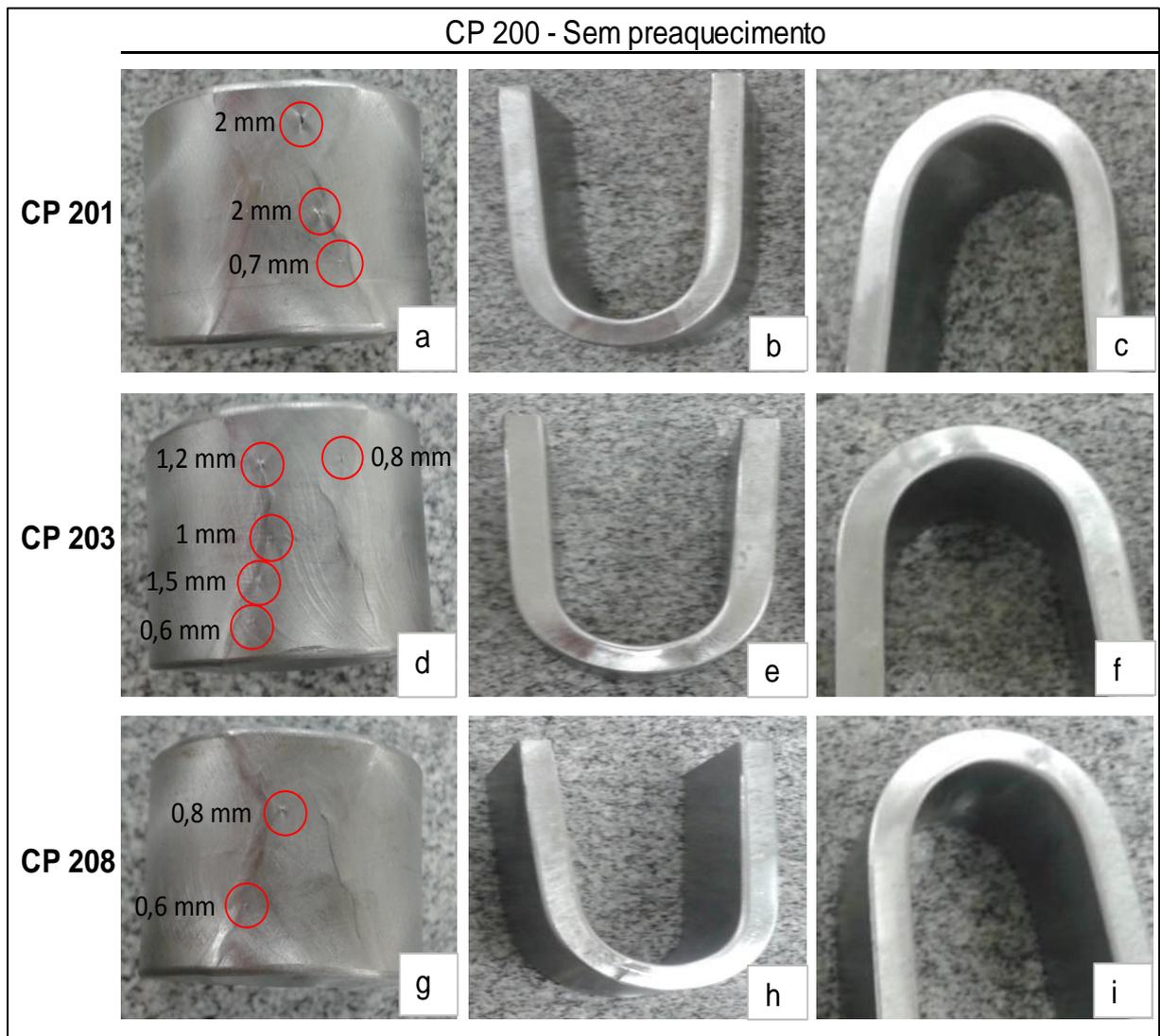
Para a condição de soldagem sem preaquecimento os valores de limite de resistência à tração ultrapassaram em média 93 MPa o limite mínimo tolerado de 450 MPa, já para o limite de escoamento, ultrapassaram em média 60 MPa acima do limite tolerado de 345 MPa, considerando que foram fracionados de uma união inteira. A soldagem sem preaquecimento apresentou resultados considerados satisfatórios.

Conforme Borba (2015), que através de ensaios mecânicos de tração com o material EH36LC soldado com elevado aporte térmico, obteve juntas soldadas aceitáveis, devido aos valores médios de limite de resistência a tração estarem acima dos valores especificados para o metal de base.

4.2 Análise dos ensaios de dobramento

A Figura 43 apresenta os corpos de prova soldados sem preaquecimento após o ensaio de dobramento.

Figura 43 – Dobramento lateral dos corpos de prova sem preaquecimento



Fonte: O próprio autor (2016)

Os corpos de prova na condição sem preaquecimento (Figura 43) apresentaram algumas descontinuidades (Figura 43(a) $2+2= 4$ mm / Figura 43(d) $1,2+1+1,5= 3,7$ mm).

Nenhuma das descontinuidades visíveis na superfície convexa são maiores que 3 mm e nem mesmo a soma das menores indicações de descontinuidades acima de 1 mm totalizou 10 mm, conforme especifica o critério de aceitação da norma AWS D1.1 (2010).

Todas as descontinuidades evidenciadas nas imagens da Figura 43 (a, d e g), na superfície convexa dos corpos de prova não ocorreram no metal de base, nem mesmo na ZAC; elas foram evidenciadas do metal de adição.

Possivelmente essas indicações na superfície convexa do metal de adição são pontos de concentração de tensões, que ao serem submetidos a tração nesta região acima da linha neutra da seção transversal causaram fissuras, possivelmente provenientes das indicações previstas na norma ASTM A5.18 (2005) que padroniza as indicações máximas toleradas nos cordões de solda com o eletrodo sólido ER70S-6. A norma ASTM A5.18 (2005), define como critério no máximo 30 indicações para pequenas dimensões entre 0,4 mm e 0,8 mm que são analisados através de ensaios radiográficos em um comprimento de cordão de 150 mm, não cabendo aqui discutir as dimensões destas, pois o ensaio é realizado em superfície plana e polida e também porque existem outros critérios para maiores indicações.

Outra possível causa destas indicações estão relacionadas a manipulação incorreta da tocha durante a soldagem e o chanfro muito estreito, segundo Marques et. All, (2009), estes motivos podem apresentar indicações entre os passes de solda ou entre os passes e o metal de base.

Todos os corpos de prova sem preaquecimento atenderam os critérios de aceitação definidos pela norma AWS D1.1 (2010), podendo ser considerados resultados satisfatórios para o ensaio de dobramento a 180°.

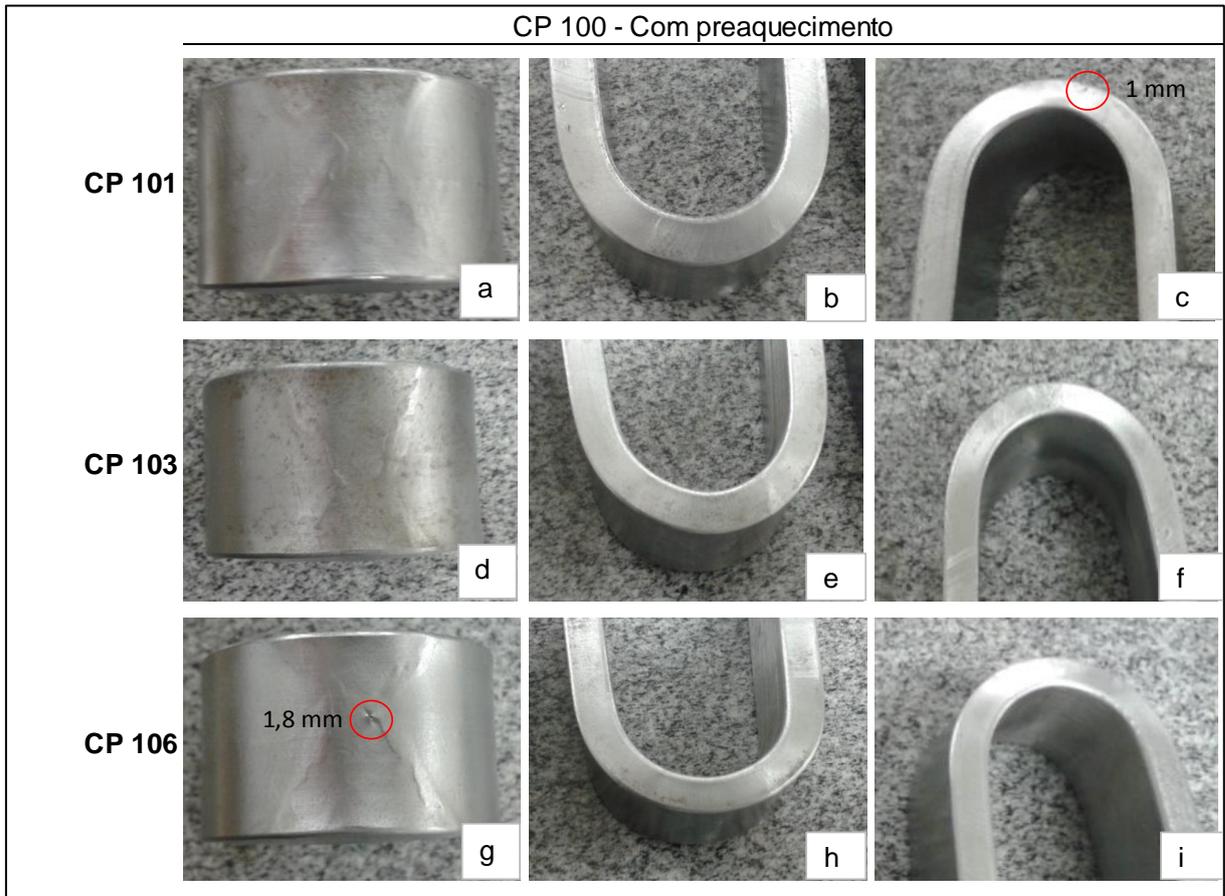
A Figura 44 apresenta os corpos de prova após o ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com preaquecimento mínimo de 65°C.

Os corpos de prova na condição com preaquecimento apresentados na Figura 44, apresentaram menos descontinuidades que os corpos de prova na condição sem preaquecimento (CP101(c) 1 mm / CP106(a) 1,8 mm), estando todos também considerados aprovados pelos resultados satisfatórios em concordância com os critérios de aceitação da norma AWS D1.1 (2010).

Comparando ambas as condições de soldagem a condição de soldagem sem preaquecimento apresentou maior número de indicações em relação à condição com preaquecimento, entretanto obteve resultados considerados satisfatórios.

Almeida (2010) avaliou a ductilidade na soldagem de chapas de aço ASTM A-36 de espessuras finas soldadas pelo processo MIG/ MAG, através de ensaios de dobramento a 180° dos corpos de prova, tendo resultados aprovados seguindo o critério de aceitação previsto na seção IX do código ASME que considera aprovado o corpo de prova neste ensaio se não apresentar descontinuidades maiores que 3 mm (ALMEIDA, 2010).

Figura 44 – Dobramento lateral dos corpos de prova com preaquecimento



Fonte: O próprio autor (2016)

A norma AWS D1.1 (2010) determina que para a aceitação por ensaio de dobramento, seja realizado uma inspeção visual no corpo de prova dobrado, examinando para que não possua descontinuidades na superfície convexa que excedam 3 mm em qualquer direção, que a soma das descontinuidades maiores que 1 mm não seja maior que 10 mm. Também é determinado que nos cantos não possua rachadura maior que 6mm, se proveniente de inclusões de escória ou qualquer outra descontinuidade como falta de fusão, deve ser considerado o critério que não exceda 3 mm e para rachaduras maiores que 6 mm nos cantos, provenientes de inclusões de escória, ou outras descontinuidades, os corpos de prova devem ser desconsiderados e outro corpo de prova da chapa teste utilizada deve ser testado (AWS D1.1, 2010).

4.3 Análise macroestrutural da ZAC

Após o mapeamento de toda a seção transversal da solda do CP 205 soldado sem preaquecimento apresentado na Figura 45, com ampliação de 50 x, foi possível analisar a ZAC entre os cordões de enchimento e o metal de base e entre os cordões no interior da junta.

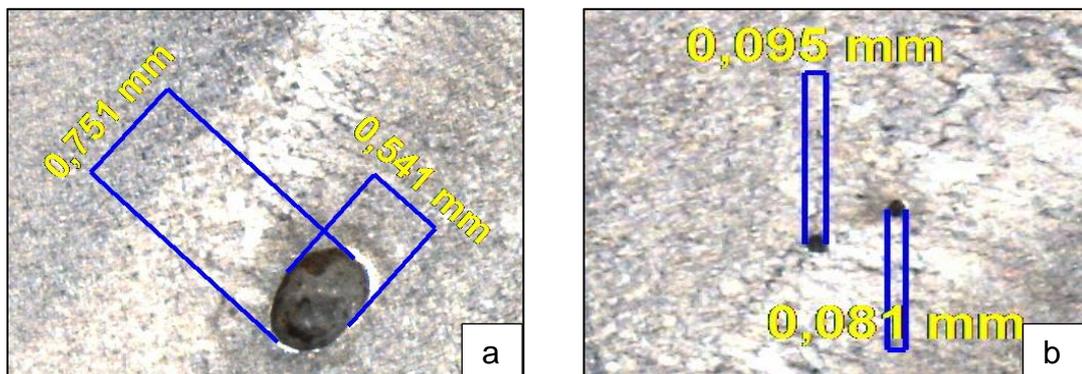
Figura 45 – Macrografia do corpo de prova CP 205 - sem preaquecimento



Fonte: O próprio autor (2016)

A Figura 46 (a, b), apresenta a presença de inclusões de escórias no CP 205, executado sem preaquecimento, próximas ao cordão de raiz, (a) 0,751mm, (b) 0,095 mm e 0,081 mm, sendo essas toleradas, já que não foram maiores que 1 mm, estando dentro dos critérios de aceitação determinados pela norma AWS D1.1 (2010).

Figura 46 - Inclusões de escórias encontradas no CP 205



Fonte: O próprio autor (2016)

Todas as inclusões evidenciadas na Figura 46 ocorreram no primeiro cordão de solda, após a conclusão parcial do chanfro, onde o corpo de prova foi submetido ao esmerilhamento com disco abrasivo para limpeza do cordão de raiz.

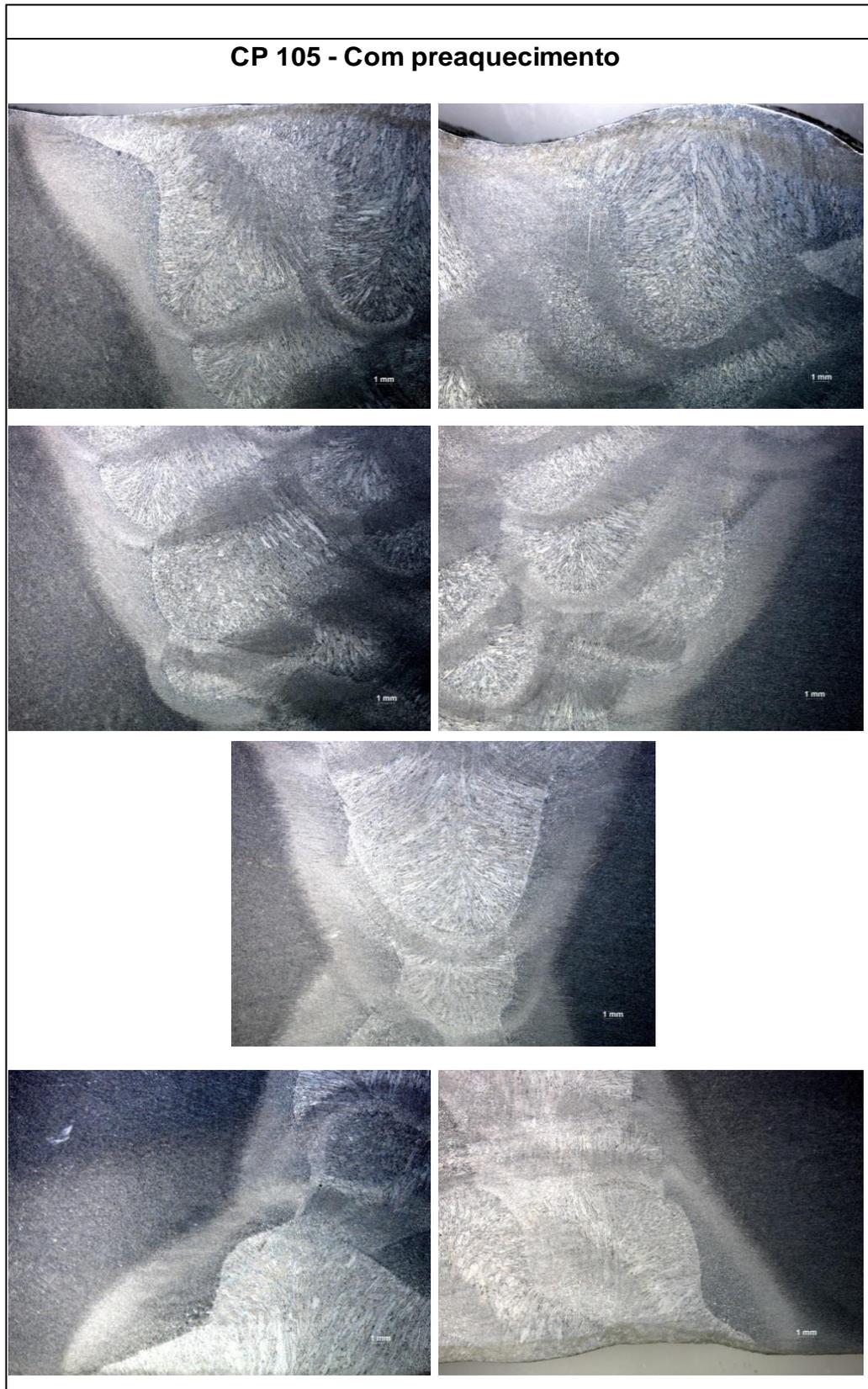
Devido à restrição do chanfro a 60° foi utilizado o bocal cônico, porém pode não ter sido suficiente para uma efetiva proteção gasosa ou até mesmo alguma contaminação dentro do bocal acabou ficando na extremidade do cordão.

Não foram evidenciadas trincas na ZAC no corpo de prova soldado sem preaquecimento e as descontinuidades atenderam os critérios de aceitação da norma AWS D1.1 (2010), sendo considerado resultados satisfatórios.

A norma AWS D1.1 (2010) determina como critério de aceitação que na inspeção visual não sejam evidenciadas rachaduras, falta de fusão entre o metal de base e a solda. Se houver porosidades maiores que 1 mm, não podem exceder 6mm no total e para inclusões de escória, que a soma das maiores delas não exceda 4 mm (AWS D1.1, 2010).

O CP 105 soldado com preaquecimento mostrado na Figura 47, não apresentou descontinuidades visíveis, nem mesmo trincas no ensaio macrográfico, sendo o resultado considerado satisfatório.

Figura 47 – Macrografia do corpo de prova CP 105 - com preaquecimento



Fonte: Do autor (2016)

4.4 Análise da microdureza da ZAC do cordão de raiz

A Tabela 7 apresenta os resultados de microdureza obtidos na ZAC de ambos os lados do cordão de raiz, lado esquerdo (LE), lado direito (LD), para ambos os corpos de prova, soldado sem preaquecimento (CP 205) e soldado com preaquecimento (CP 105).

As medições partiram da linha de fusão em direção ao metal de base com distância de 0,5 mm.

Tabela 7 – Dureza média da ZAC

Microdureza Vickers			
CP 205		CP 105	
LE	LD	LE	LD
234,5	315,6	215,7	287
255,3	278,6	273,7	290,1
259	252,4	323,8	297,3
242	208,8	310,5	336,5
225,1	244,5	280	313,3
255	202,3	242,1	384,9
188	196,2	215,3	283,1
185,4	183,1	208	235,2
179,8	192,3	225	223,3
186,2	192,6	168,2	189

Fonte: Do autor (2016)

As diferenças nos resultados para ambas as condições de soldagem, não apresentaram diferença significativa devido aos valores de microdureza estarem abaixo de 350 Hv na região da ZAC, havendo apenas uma indentação isolada que possivelmente ocorreu sobre um grão com dureza mais elevada, indicando uma maior dureza na condição com preaquecimento.

Os resultados de microdureza do corpo de prova soldado sem preaquecimento não apresentaram valores significativos que pudessem prejudicar a união soldada, já que foram semelhantes aos resultados encontrados na condição com preaquecimento.

Os menores resultados de microdureza encontrados são semelhantes aos encontrado por Cardoso J. (2012), em um estudo sobre a soldagem multipasses de chapas espessas de aço inoxidável UNS S32304 por diversos processos de soldagem, onde observou nos resultados do ensaio de microdureza, que a menor

dureza foi indicada no metal de base próximo a raiz da solda, região esta, reaquecida pelos demais passes, tendo resultados satisfatórios devidos aos valores encontrados não estarem acima da dureza máxima de 350Hv (CARDOSO JUNIOR, 2012).

Os resultados obtidos no ensaio de microdureza Vickers foram semelhantes aos encontrados por Farnese (2009), em um estudo comparativo na soldagem do aço ASTM A 36 com metais de adição distintos, eletrodo revestido e arame tubular, com e sem tratamento térmico de alívio de tensões, ele verificou que não há variação significativa entre os valores de dureza ao longo da junta entre as condições com e sem tratamento térmico para o processo com eletrodo revestido, porém evidenciou uma tendência para menores valores de dureza na raiz da junta soldada, o que pode ser atribuído ao ciclo de reaquecimento da soldagem multipasses.

5 CONCLUSÃO

Na prática industrial, nem sempre um processo de soldagem transcorre sem produzir discontinuidades. Embora seja possível, algumas discontinuidades poderão ser toleradas, se forem consideradas aceitáveis diante de critérios definidos; se não forem consideradas aceitáveis serão consideradas defeitos.

A indústria hoje busca aprimorar cada vez mais os processos tecnológicos em busca de maior produtividade e minimizar ao máximo a exposição do ser humano em processos considerados insalubres, porém o homem ainda é o fator fundamental para que qualquer condição que dependa dele aconteça e seja realizada.

Diante dos resultados dos ensaios de tração, dobramento e macrografia apresentados, onde todos os corpos de prova atenderam aos critérios de aceitação da norma AWS D1.1 (2010), os valores obtidos para ambos os experimentos de soldagem com e sem preaquecimento mostraram-se satisfatórios.

A condição de soldagem sem preaquecimento não apresentou resultados significativos que pudessem considerá-la inaceitável dentro das condições de execução do processo de soldagem apresentadas neste trabalho.

Para o processo de soldagem, onde a habilidade do soldador é uma dos fatores fundamentais para que seja executada, este deve seguir diversas etapas desde cursos de formação em soldagem industrial e qualificações para que seja instruído a realizar uma soldagem de qualidade que atenda os critérios e padrões de aceitação amplamente referenciados em normas e instruções de trabalho na indústria da soldagem.

Atendendo os objetivos deste trabalho é possível concluir por mais rigorosos os controles durante as mais diversas variáveis do processo de soldagem, principalmente do fator humano, a não realização do preaquecimento nas condições avaliadas não afetaram a resistência da união soldada entre as chapas de espessura 63 mm do aço ASTM A 572.

6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Luciana Lezira Pereira de et al . **Soldagem Unilateral com Suporte Cerâmico de Cordierita**. Soldag. insp., São Paulo , v. 15, n. 2, p. 84-93, June 2010.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX, Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators**. ASME IX, 2010.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel, A 572/A 572M – 2007**.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding**, AWS A5.18/A5.18M, 2005.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Specification for Welding Shielded Gases**, AWS A5.32/A5.32M, 1997.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Structural Welding Code Steel**, AWS D1.1/D1.1M, 2010.

BORBA, Tadeu Messias Donizete; FLORES, Wagner Duarte, Turani, Leonardo de Oliveira, CARDOSO J., Ronaldo. **Avaliação da Soldabilidade do Aço Naval EH36 TMCP Soldado por Arco Submerso com Elevado Aporte de Calor**. Soldag. insp., São Paulo , v. 20, n. 1, p. 92-104, mar. 2015.

BRANDI, Sérgio Duarte. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1992.

CALLISTER, William D. Jr. **Ciência e Engenharia dos Materiais, Uma Introdução – 7ª ed**: John Wiley & Sons, Inc., Nova York, 1991.

CARDOSO, Fabiano; MACHADO, Adriano Albino; COLAÇO, Fernando Henrique Gruber. **Avaliação da Geometria do Cordão de Solda Depositado com Diferentes Gases pelo Processo GMAW** In: Congresso Nacional de Soldagem, 2015. XLI CONSOLDA.

CARDOSO, Junior Ronaldo; BRACARENSE, Alexandre Queiroz; CAMPOS Frederico Rodrigues; SOUZA, Carla Soares; SILVEIRA, Dalila Moreira da; LINS, Vanessa de Freitas Cunha; **Avaliação da Soldagem Multipasse de Chapas Espessas de Aços Inoxidáveis Lean Duplex UNS S32304 Soldadas pelos Processos SMAW, GMAW e FCAW**: parte 1: propriedades mecânicas. Soldag. insp., São Paulo , v. 17, n. 4, p. 306-316, Dez. 2012 .

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalúrgica e Materiais ABM, ,1996.

COSTA, Ycaro Jorge Maia da. **A Influência da Energia de Soldagem nas Propriedades Mecânicas de Juntas de Aço Soldadas de Aço Inoxidável AISI 304**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, CONTECC, 2015.

DEMARQUE, Rudineli; CASTRO, José Adilson de; XAVIER, Carlos Roberto Xavier; ALMEIDA, Darlene Souza da Silva; MARCELO, Célio de Jesus; SANTOS, Ellem Patrícia dos; QUEIROZ, Anderson Vergílio de. **Estudo Numérico e Experimental da Evolução Microestrutural e das Propriedades de Juntas Soldadas de Vergalhões pelo Processo GMAW**. Soldag. insp., São Paulo , v. 20, n. 4, p. 434-445, dez. 2015.

FARNEZE, Humberto N.; CARLOS, Jorge Carlos F.; SOUZA, Luís Felipe G. de; BOTT, Ivaní de S.. **Estudo Comparativo de Cetais de Solda de Aço de Alta Resistência Obtidos pelos Processos Eletrodo Revestido e Arame Tubular para Aplicação em Equipamentos de Amarração Offshore**. Soldag. insp., São Paulo , v. 14, n. 2, p. 151-160, Jun. 2009.

FELIZARDO, Ivanilza. **Método de Aplicação da Soldagem: Manual, Mecanizado ou Automatizado**. In: CONSOLDA – CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 32., 2006, Belo Horizonte. Método de Aplicação da Soldagem: Manual, Mecanizado ou Automatizado. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Soldagem, 2006.

FORTES, Cleber. **Apostila Metalurgia da Soldagem** – ESAB, 2005.

FORTES, Cleber. **Apostila Soldagem MIG/MAG** – ESAB, 2005.

JORGE, Jorge Carlos Ferreira; SOUZA, Luis Felipe Guimarães de; MAROUÇO, Erick de Souza; FILHO, Olavo Ribeiro dos Santos; DINIZ, Jorge Luiz Coutinho. **Propriedades Mecânicas e Microestruturais de Juntas Soldadas pelo Processo a Arco Submerso com Elevado Aporte Térmico**. Soldag. insp., São Paulo , v. 20, n. 3, p. 347-358, set. 2015.

MARQUES, Paulo Villani. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

MEI, Paulo Roberto; SILVA, Paulo Luiz V. da Costa. **Aços e Ligas Especiais**. 3. Ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2010.

MILLER, Duane K. **Lessons learned from the Northridge Earthquake**. Engineering Structures, Vol. 20, Nos 4-6, pp. 249-260, 1998. Elsevier Science Ltd.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

MOOJEN, Roberto Gomes; MACHADO, Ivan Guerra; MAZZAFERRO, José Antônio Esmério; GONZALEZ, Arnaldo Ruben. **Efeitos da Taxa de Resfriamento na Soldagem do Aço API 5L-X80**. Soldag. insp., São Paulo , v. 20, n. 1, p. 68-80, mar. 2015.

PANNONI, Fábio Domingos. **Aços Estruturais**. Disponível em <www.cbcaibs.org.br/downloads/apostilas/Aços_estruturais.pdf>. Publicado em 2007.

PEREZ, Fabiano Ricardo da Costa. **A Influência da Temperatura de Pré-Aquecimento e Tecimento na Microestrutura e Propriedades Mecânicas na Soldagem MIG/MAG Robotizada de Aços SAE 8620 com ABNT LN28**, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2007.

QUITES, Almir Monteiro. **Introdução à Soldagem a Arco Voltaico**. 2. ed. Florianópolis: Soldasoft, 2002.

SIGNES E. G; BACKER J.C. **Effect of Columbium and Vanadium on the Weldability of HSLA Steels**. Documento apresentado na 60ª Reunião do Programa Nacional de Prêmios e Reconhecimentos da Sociedade Americana de Soldagem em Detroit, Michigan, durante 2-6 abril de 1979.

SILVA, Cláudio L. Jacintho da. **Fissuração pelo Hidrogênio “Trincas a Frio”** - Infosolda: 2003.

SOUZA, Sergio Augusto de. **Composição Química dos Aços**. 1.ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1989.

