

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

LUCIANO GOTARDO SOMMACAL

**ANÁLISE DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW, LASER E FRICÇÃO
APLICADOS NO REAPROVEITAMENTO DE TUBOS MECÂNICOS PARA
FABRICAÇÃO DE CILINDROS HIDRÁULICOS**

CAXIAS DO SUL

2015

LUCIANO GOTARDO SOMMACAL

**ANÁLISE DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW, LASER E FRICÇÃO
APLICADOS NO REAPROVEITAMENTO DE TUBOS MECÂNICOS PARA
FABRICAÇÃO DE CILINDROS HIDRÁULICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul como requisito
parcial para obtenção do grau de Engenheiro
Mecânico.

Área de conhecimento: Processos de
Fabricação.

Orientador: MSc. Victor Hugo Velazquez
Acosta Eng. Metalúrgico

CAXIAS DO SUL

2015

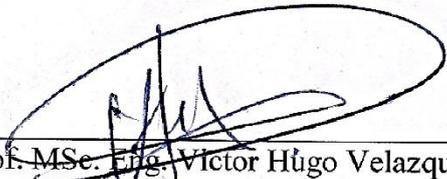
LUCIANO GOTARDO SOMMACAL

**ANÁLISE DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW, LASER E FRICÇÃO
APLICADOS NO REAPROVEITAMENTO DE TUBOS MECÂNICOS PARA
FABRICAÇÃO DE CILINDROS HIDRÁULICOS**

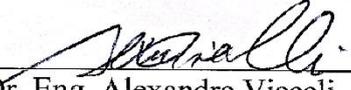
Trabalho de conclusão do curso apresentada à
Universidade de Caxias do Sul como requisito
parcial para à obtenção do grau de Engenheiro
Mecânico. Área de conhecimento: processos de
fabricação.

Aprovado em: 09/12/2015.

Banca Examinadora:



Prof. MSc. Eng. Victor Hugo Velazquez Acosta
Universidade de Caxias do Sul - UCS



Prof. Dr. Eng. Alexandre Vieceli
Universidade de Caxias do Sul - UCS



Prof. MSc. Eng. Ivandro Ceconello
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Dedico este trabalho principalmente aos meus pais, fontes de apoio nas grandes e pequenas coisas, e também, a minha namorada Caroline Borsoi e professores que tornaram esta trajetória possível, sendo sempre pacientes e atenciosos.

AGRADECIMENTOS

Existem situações na vida que é fundamental poder contar com o apoio e a ajuda de algumas pessoas. Para a realização deste trabalho de conclusão pude contar com várias. E a estas pessoas prestarei através de poucas palavras os mais sinceros agradecimentos:

Em especial a minha namorada Caroline Borsoi pelo amor, paciência nos diversos momentos de ausência, pelo apoio e sugestões dadas na realização deste trabalho.

Ao professor MSc. Victor Hugo Velazquez Acosta Eng. Metalúrgico, orientador deste trabalho, pelos seus conhecimentos, sua atenção e boa vontade.

A empresa Soprano Industria de Equipamentos Oleodinâmicos por fornecer a matéria prima utilizada para os ensaios, realizar o ensaio GMAW e confeccionar os corpos de prova para os ensaios de líquidos penetrantes, tração, dobramento e ensaios metalográficos.

A empresa Caldeiraria Cald laser pela realização do processo de soldagem *Laser Welding* (LW).

Ao Laboratório de Metalurgia Física (Lamef) da escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no qual realizaram os corpos de prova do processo de soldagem *Friction Welding* (FW). Em especial ao professor Dr. Telmo Roberto Strohaecker, professora Dra. Mariane Chludzinski e pesquisador Diogo Trento Buzzatti.

A Eng. Mecânico Adonis Pellin pela execução do ensaio de ultrassom nos corpos de prova deste estudo.

Ao Laboratório de Ensaio Mecânicos (LAMEC) da Universidade de Caxias do Sul, no qual realizaram os ensaios metalográficos.

Ao Laboratório de Metalografia (LAMET) da Universidade de Caxias do Sul, no qual realizaram os ensaios de tração e dobramento.

A todos aqueles que, de algum modo, contribuíram para a realização deste trabalho. Meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

Os processos produtivos das empresas são responsáveis pela geração de resíduos, estes colaboram com o aumento do custo final dos produtos. Além de representarem mais custos para as empresas no tratamento do material descartado e gerarem um baixo retorno financeiro pela sua venda, são prejudiciais ao meio-ambiente. Os cilindros hidráulicos telescópicos produzidos a partir de tubo mecânico ST52 BKW, produzem um volume elevado de descarte de matéria prima que é vendido a um valor extremamente baixo. Portanto, neste estudo foram analisadas e qualificadas as juntas soldadas pelos processos GMAW, LW, FW aplicados na fabricação destes tubos. Para tal, foram realizadas pesquisas bibliográficas sobre os processos de soldagem, construíram-se protótipos com os três processos de soldagem, analisando a aplicabilidade de cada um, e realizaram-se testes destrutivos e não destrutivos para a análise das juntas soldadas. Para que isso fosse possível, foram projetadas as juntas soldadas, confeccionados e codificados os corpos de prova para cada processo citado. Os resultados obtidos demonstraram que é possível a união de tubos mecânicos ST52 BKW por quaisquer dos três processos de soldagem. O processo que apresentou melhores resultados foi o processo de soldagem GMAW onde não foram evidenciados defeitos e obtiveram-se resultados satisfatórios nos ensaios de tração, dobramento e nos ensaios metalográficos.

Palavras-chave: cilindros hidráulicos, soldagem, sustentabilidade, GMAW, *Laser Welding* e *Friction Welding*.

Área de conhecimento: Engenharia Mecânica, Processos de Fabricação, Soldagem.

ABSTRACT

The manufacturing processes are responsible for the generation of waste. They collaborate with the increase of final cost of the products, besides representing more costs to the companies in relation to treatment of waste material. They also generate a low payback from their sale and are harmful for the environment. The telescopic hydraulic cylinders manufacturing from mechanical tube ST52 BKW, produce a high volume of disposal has materials that are at an extremely low cost. Joints welded by GMAW, LW, FW processes applied in the manufacture of these tubes were analyzed and qualified in this study. For this purpose, bibliographic research on the welding processes were carried out, ran up the testing of welding processes by analyzing applicability of each, as well as held destructive and non-destructive tests for the analysis of welded joints. To make it possible, the welded joints were manufacturing and the samples were coded for each mentioned process. The results showed that it is possible to join ST52 BKW mechanical tubing by the three welding processes. The process that presented better results was GMAW welding process, which did not show any defects and obtained more satisfactory results in tensile, bending and metallographic tests.

Key-words: hydraulic cylinder, welding, sustainability, GMAW, Laser Welding and Friction Welding.

Knowledge: Mechanical Engineering, Manufacturing Processes, Welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Caminhão basculante com cilindro telescópico.....	16
Figura 2 - Cilindro hidráulico telescópico de 6 estágios.	17
Figura 3 - <i>Container</i> de armazenamento de sucata pré-consumo.	17
Figura 4 - Processo de soldagem GMAW.....	21
Figura 5 - Equipamento para soldagem MIG/MAG.....	21
Figura 6 - Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência.	22
Figura 7 - Condições de soldagem para aços de baixo carbono, transferência por curto-circuito, arame ER70S-3.....	24
Figura 8 - Sistema básico de uma máquina de soldagem Laser.	26
Figura 9 - Escolha de equipamento para o processo LW.	27
Figura 10 - Passos característicos da soldagem por fricção.	30
Figura 11 - Emprego da soldagem por fricção em um conjunto haste do cilindro hidráulico.	30
Figura 12 - Equipamento para FW: (a) por arraste contínuo e (b) por acionamento inercial.	31
Figura 13 - Comportamento das principais variáveis do processo FW (a) por arraste contínuo e (b) por acionamento inercial.	32
Figura 14 - Ciclo térmico de soldagem.	33
Figura 15 - Macroestrutura esquemática da seção transversal de uma junta soldada.	35
Figura 16 - Regiões das ZAC e respectivas temperaturas.	36
Figura 17 - Projeto da junta para soldagem no processo GMAW.....	39
Figura 18 - Projeto da junta para soldagem no processo LW.....	39
Figura 19 - Geometrias utilizadas para soldagem no processo FW.	40
Figura 20 - Junta a serem soldadas no processo GMAW.....	41
Figura 21 - Junta a serem soldadas no processo FW: (a) tubos e (b) anel intermediário.	41
Figura 22 - (a) Equipamento para soldagem GMAW e (b) mesa automatizada.	43
Figura 23 - (a) Equipamento para soldagem LW e (b) mesa automatizada.	43
Figura 24 - Equipamento para soldagem FW.....	44
Figura 25 - Representação do posicionamento e fixação dos tubos e anel intermediário para soldagem FW.....	44
Figura 26 - Fases do processo de soldagem FW.	45
Figura 27 - Fases do processo de soldagem FW.	45
Figura 28 - Gráfico de dados coletados para a solda B1 no processo FW.	46
Figura 29 - Gráfico de dados coletados para a solda B2 no processo FW.	46

Figura 30 - Disposição dos CPs dos processos de soldagem GMAW, LW e FW.	47
Figura 31 - Geometria para os CPs dos ensaio de tração e ensaio de dobramento de face e raiz..	48
Figura 32 - CPs embutidos em baquelite dos processos de soldagem GMAW, LW e FW.	49
Figura 33 - Ensaio de ultrassom.	50
Figura 34 - Ensaio de líquidos penetrantes nos processos de soldagem GMAW, LW e FW. .	50
Figura 35 - Equipamento para ensaio de (a) tração e (b) dobramento.	51
Figura 36 - Corpo de prova (a) GMAW, (b) LW e (c) FW.	54
Figura 37 - Corpo de prova após usinagem (a) GMAW, (b) LW e (c) FW.	55
Figura 38 - Dados coletados dos CPs pré e pós usinagem.	55
Figura 39 - Localização da falha no processo FW: (a) profundidade de 2,6 mm e (b) profundidade de 1,6 mm.	56
Figura 40 - Ensaio de líquidos penetrantes no processo LW.	56
Figura 41 - Ensaio de líquidos penetrantes no processo FW.	57
Figura 42 - Resultados do ensaio de tração dos processos de soldagem GMAW, LW e FW. .	58
Figura 43 - Região em que ocorreram as fraturas nos CPs (a) GRT_1 e (b) GTR_2.	58
Figura 44 - Região em que ocorreu a fissura no CP FDF_1 do processo de soldagem FW. ...	59
Figura 45 - Macrografia do CP identificado por GM do processo de soldagem GMAW.	60
Figura 46 - Macrografia do CP identificado por LM do processo de soldagem LW.	60
Figura 47 - Macrografia do CP identificado por FM do processo de soldagem FW.	61
Figura 48 - Micrografia dos tubos e anel intermediário dos CP identificado por GM, LW e FW.	63
Figura 49 - Micrografia do CP identificado por GM do processo de soldagem GMAW.	64
Figura 50 - Micrografia do CP identificado por LM do processo de soldagem LW.	65
Figura 51 - Micrografia do CP identificado por FM do processo de soldagem FW.	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Gases de proteção para soldagem GMAW.	24
Quadro 2 - Orientações de superfície e borda para LW.	28
Quadro 3 - Quadro comparativo entre processos FW.	31
Quadro 4 - Codificação dos CPs dos processos de soldagem GMAW, LW e FW.	47
Quadro 5 – Matriz de avaliação dos processos GMAW, LW e FW.	52
Quadro 6 – Classificação de critérios por ordem de importância.....	53
Quadro 7 - Resultados dos ensaios de dobramento de face e raiz.	59
Quadro 8 – Dimensões de cada região dos CPs dos processos de soldagem GMAW, LW e FW.	61
Quadro 9 – Matriz de resultados da avaliação dos processos GMAW, LW e FW.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Retalhos resultantes da produção de um cilindro hidráulico 6 estágios.....	17
Tabela 2 - Tolerâncias da junta soldada no processo de soldagem LW.....	29
Tabela 3 - Propriedades mecânicas do material de base e material de adição.	37
Tabela 4 - Composição química do material de base e material de adição.	38
Tabela 5 - Propriedades mecânicas do material de adição.	38
Tabela 6 - Composição química do material de adição.....	38
Tabela 7 - Parâmetros utilizados e registrados durante a soldagem GMAW.....	42
Tabela 8 - Parâmetros utilizados e registrados durante a soldagem LW.....	42
Tabela 9 - Parâmetros utilizados e registrados durante a soldagem FW.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFC	Agregados de Ferrita Carbonetos
CP	Corpo de Prova
FA	Ferrita Acicular
FE	Ferrita
FE (A)	Ferrita de Segunda Fase Alinhada
FE (NA)	Ferrita de Segunda Fase Não Alinhada
FG	Ferrita de Contorno de Grão
FP	Ferrita Primária
FS (A)	Ferrita Secundária Alinhada
FW	<i>Friction Welding</i>
GMAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
HB	<i>Hardness Brinell</i>
LW	<i>Laser Welding</i>
M	Martensita
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MB	Metal de Base
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
P	Perlita
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZF	Zona Fundida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	18
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	18
1.3	OBJETIVOS.....	19
1.3.1	Objetivo geral	19
1.3.2	Objetivos específicos.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	PROCESSO DE UNIÃO POR SOLDAGEM.....	20
2.1.1	Processo de soldagem por arco elétrico GMAW	20
2.1.1.1	Transferência do metal e gás de proteção.....	22
2.1.1.2	Projeto da junta.....	24
2.1.2	Processo de soldagem Laser	25
2.1.2.1	Tipos de Laser	25
2.1.2.2	Caracterização do feixe de energia.....	26
2.1.2.3	Equipamento.....	26
2.1.2.4	Aplicação.....	28
2.1.3	Processo de soldagem por fricção	29
2.1.3.1	Tipos de soldagem fricção.....	31
2.1.3.2	Procedimentos de soldagem	32
2.1.4	Metalurgia da soldagem.....	33
2.1.4.1	Soldabilidade dos aços	33
2.1.4.2	Macroestruturas de soldas	34
2.1.4.3	Microestruturas de soldas	35
3	MATERIAIS E METODOS.....	37
3.1	MATERIAIS	37
3.1.1	Materiais do processo de soldagem GMAW	37
3.1.2	Materiais do processo de soldagem LW	38
3.1.3	Materiais do processo de soldagem FW	38
3.2	PROJETO DAS JUNTAS SOLDADAS.....	39
3.2.1	Projeto da junta para processo de soldagem GMAW	39
3.2.2	Projeto da junta para processo de soldagem LW.....	39

3.2.3	Projeto da junta para o processo de soldagem FW	40
3.3	PREPARAÇÃO DAS JUNTAS SOLDADAS	40
3.3.1	Execução da junta soldada para processo GMAW	41
3.3.2	Execução da junta soldada para processo LW	41
3.3.3	Execução da junta soldada para processo FW	41
3.4	PARÂMETROS DE SOLDAGEM	42
3.5	DISPOSITIVOS E PROCEDIMENTOS PARA SOLDAGEM	43
3.5.1	Soldagem GMAW	43
3.5.2	Soldagem LW	43
3.5.3	Soldagem FW	44
3.6	CODIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E ENSAIOS	47
3.7	GEOMETRIA DO CORPOS DE PROVA	48
3.8	ENSAIOS METALOGRÁFICOS.....	48
3.8.1	Análise macrográfica	49
3.8.2	Análise micrográfica	49
3.9	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	49
3.10	ENSAIO DESTRUTIVOS	51
3.10.1	Ensaio de tração	51
3.10.2	Ensaio de dobramento	52
3.11	FERRAMENTA PARA VALORAÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM	52
4	RESULTADOS E ANÁLISES	54
4.1	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	55
4.2	ENSAIOS DESTRUTIVOS.....	57
4.2.1	Ensaio de tração	57
4.2.2	Ensaio de Dobramento de Face e de Raiz	58
4.3	ENSAIOS METALOGRÁFICOS.....	60
4.3.1	Análise Macrográfica	60
4.3.2	Análise Micrográfica	62
4.4	RESULTADO DA FERRAMENTA DE VALORAÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	67
5	CONCLUSÕES	69
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS	72

APÊNDICE A.....	75
ANEXO A.....	76
ANEXO B.....	77
ANEXO C.....	78
ANEXO D.....	79
ANEXO E.....	80

1 INTRODUÇÃO

Os atuadores hidráulicos ou também chamados cilindros hidráulicos são aplicados em caminhões basculantes e estão diretamente vinculados a movimentação de materiais como pedras, rochas, minérios de ferro, grãos, terra, entre outros. Deste modo, o cilindro hidráulico tem como função transformar energia de pressão de fluido em energia mecânica para o conjunto e, com isso, possibilitar o basculamento da caixa de carga conforme observa-se na Figura 1.

Figura 1 - Caminhão basculante com cilindro telescópico.



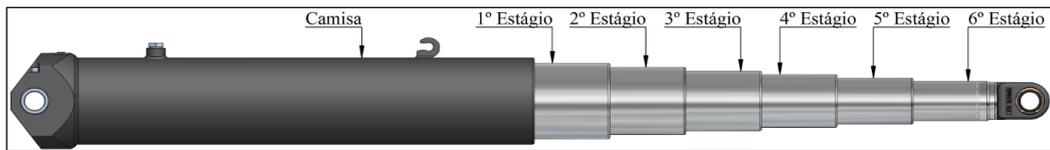
Fonte: SCANIA (2009)

Os cilindros utilizados atualmente no segmento são os de simples ação, dupla ação e telescópicos. Este último possui os componentes analisados neste estudo, isso porque são os utilizados no mercado de basculantes nos segmentos sobre chassi e semirreboque e por apresentarem melhor custo-benefício, ou seja, possuem baixa manutenção se comparados com outros cilindros disponíveis e utilizam materiais com melhores propriedades. Assim, podem trabalhar com pressões mais elevadas que possibilitam transportar cargas mais pesadas.

Os cilindros hidráulicos telescópicos são aqueles que possuem diversos estágios também chamados de hastes, podendo normalmente variar de dois a sete estágios. Em geral, possuem cursos diversos, fixações variadas e diâmetros de camisa conforme cada necessidade, o que os tornam muito versáteis quanto à sua aplicação.

Conforme já citado, são vários os componentes que constituem o produto. Porém, o foco deste estudo será a matéria-prima utilizada no processo produtivo da camisa e das hastes que geram quantidades elevadas de retalhos, resultantes do processo de corte dos componentes da Figura 2.

Figura 2 - Cilindro hidráulico telescópico de 6 estágios.



Fonte: autor (2015)

Verifica-se conforme a Tabela 1, que na produção de um cilindro hidráulico telescópico de seis estágios, cerca de 59% do custo total do produto corresponde à matéria-prima de tubo mecânico, representando assim a maior parcela do custo final do produto. Levando em conta que os comprimentos dos tubos mecânicos e barras utilizadas são de 12 metros, constata-se que uma grande quantidade de matéria-prima é descartada como sucata. Assim, a matéria-prima que representa uma grande porcentagem do custo do produto final acaba sendo, em partes, descartada.

Tabela 1 - Retalhos resultantes da produção de um cilindro hidráulico 6 estágios.

COMPONENTE DO CILINDRO (em mm)	PERCENTUAL DE MATÉRIA-PRIMA SOBRE O CUSTO TOTAL	COMPRIMENTO DOS RETAPOS DE TUBOS PARA CADA BARRA DE 12 m CORTADA
CAMISA Ø 219 x 1274	14,45 %	534 mm
HASTE Ø 213 x 1096	14,38 %	1040 mm
HASTE Ø 190 x 1096	8,07 %	1040 mm
HASTE Ø 168 x 1096	6,33 %	1040 mm
HASTE Ø 149 x 1096	6,32 %	1040 mm
HASTE Ø 130 x 1096	5,43 %	1040 mm
HASTE Ø 111 x 1096	4,38 %	1040 mm

Fonte: autor (2015)

Atualmente, estes retalhos são sucateados e vendidos pelas suas dimensões, divididos em duas classes: menores que 500 mm ou maiores que 500 mm, conforme Figura 3. Contudo, para ambas as classificações, o valor de venda é extremamente baixo se comparado ao valor de compra.

Figura 3 - Container de armazenamento de sucata pré-consumo.



Fonte: autor (2015)

O cenário mundial sinaliza cada vez mais que as organizações precisam direcionar suas práticas para o contexto da sustentabilidade. Percebe-se assim um novo panorama de mercado: instituições que não se preocupam com a questão ambiental estão destinadas à problemas de continuidade em suas operações. Assim, o contexto mundial direciona-se no sentido da preservação do meio ambiente e do uso sustentável dos recursos.

Os processos produtivos das empresas são responsáveis pela geração de resíduos, estes colaboram com o aumento do custo final dos produtos. Além de representarem mais custos para as empresas no tratamento da sucata e gerarem um baixo retorno financeiro pela sua venda, são prejudiciais ao meio-ambiente. Minimizar os desperdícios gera maior eficiência no processo industrial e menores investimentos para soluções de problemas ambientais e destino dos resíduos.

1.1 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A Soprano oferece soluções a diversos segmentos do mercado, produzindo uma variada linha de itens através de quatro divisões de negócios: Divisão da Construção Civil, Divisão Hidráulica, Divisão de Materiais Elétricos e Divisão de Utilidades. A Soprano Indústria de Equipamentos Oleodinâmicos Ltda. - Divisão Hidráulica está presente no mercado há 60 anos e se destaca pela diversidade e excelência em processos e produtos.

O estudo será desenvolvido no setor de Pós-vendas da empresa Soprano Indústria de Equipamentos Oleodinâmicos – Divisão Hidráulica em Caxias do Sul. Para a elaboração do trabalho terei contato direto com os setores de engenharia do produto, engenharia de processos e engenharia da qualidade.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Realizar a implementação deste processo de união de tubo mecânico utilizando retalhos de tubos implica em reduzir o custo final do produto de maneira significativa. Apresentar esta inovação irá trazer benefícios ímpares para a empresa e para o mercado, visto que o produto se tornará mais competitivo no mercado além de ser ecologicamente correto.

Conforme Fleury e Fleury (2003), do ponto de vista da competitividade da empresa, mudanças em processos podem ter impacto tão grande ou maior que inovações em produto/serviço. Isso mostra o quão importante é o estudo deste reaproveitamento tendo em vista que no mercado verificou-se a inexistência deste reaproveitamento de tubos.

Desta forma, além da justificativa financeira, pretende-se colaborar para a diminuição de sucata produzida, uma vez que 5,5% da matéria-prima é descartada no processo de corte dos tubos mecânicos. Conforme Ciuccio (2004, *apud* Reckziegel *et al.*, 2012) as siderúrgicas semi-integradas que utilizam aciaria elétrica precisam de 1.130 kg de sucata para produzir 1.000 kg de aço bruto. Estes 130 kg refletem diretamente na geração de material que é destinado para aterros industriais e que influenciam em questões ambientais importantes.

Conforme Donaire (2001), atitudes e medidas para não poluir ou poluir menos, se tornam condições fundamentais para bons negócios e para a sobrevivência da empresa no mercado, pois, para as empresas que desprezam a oferta de produtos ecologicamente corretos, as portas do mercado e do lucro se reduzem constantemente.

Dessa forma, o presente estudo faz-se necessário pelo fato de que as empresas, especialmente as do segmento metal-mecânico, precisam de atuações estratégicas para a redução do desperdício de matéria-prima, aumentando sua rentabilidade e, ao mesmo tempo, mantendo-se competitiva no atual mercado econômico de forma racional e sustentável.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar e qualificar as juntas soldadas pelos processos GMAW, LW, FW aplicados na fabricação de tubos mecânicos para cilindros hidráulicos telescópicos a partir de retalhos de tubos mecânicos.

1.3.2 Objetivos específicos

Em complementação ao objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) revisar bibliografia sobre os processos de soldagem GMAW, LW e FW;
- b) estudar as características dos tubos mecânicos ST52 BKW;
- c) analisar a aplicabilidade dos processos de soldagem estudados;
- d) executar experimentação dos processos de soldagem estudados;
- e) aplicar ferramenta de valoração para os processos de soldagem GMAW, LW e FW;
- f) caracterizar a junta soldada comparando as propriedades mecânicas/metalúrgicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tratou sobre os principais tópicos que envolvem a análise dos processos de soldagem GMAW, FW e LW, aplicados no reaproveitamento de tubos mecânicos utilizados na produção de cilindros hidráulicos. Foram descritos os processos a serem utilizados e após verificadas as propriedades do material tubo mecânico ST52 BKW. Para tanto, fez-se necessário esta revisão para facilitar o entendimento das metodologias utilizadas e também para facilitar a compreensão do problema proposto.

2.1 PROCESSO DE UNIÃO POR SOLDAGEM

A soldagem é amplamente utilizada na indústria pela versatilidade com que é aplicada, destacando-se no grupo de processos que se dedicam à união de materiais. Conforme Machado (1996), a união de dois materiais é realizada ou através da fusão de ambos e adição de outro material fundido, ou, ainda, por contato destes materiais, nas fases sólidas ou semissólidas.

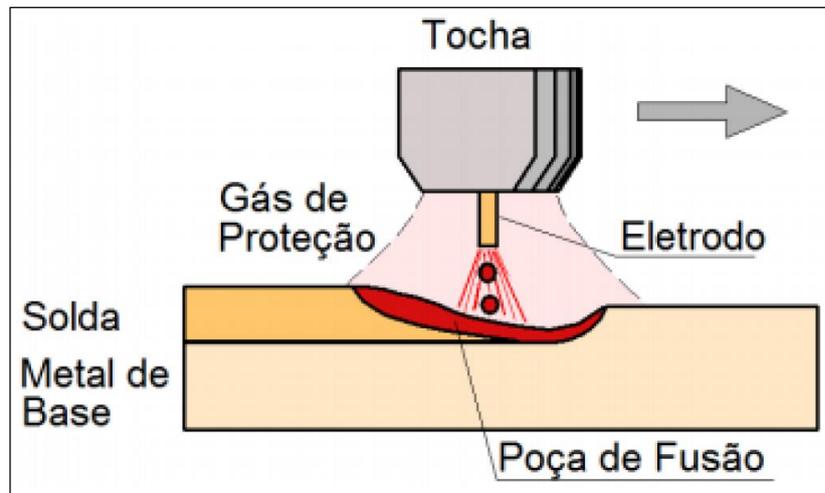
2.1.1 Processo de soldagem por arco elétrico GMAW

O processo de soldagem GMAW é largamente utilizado em pequenas e grandes indústrias, estas são responsáveis por volumes elevados de produção e alta qualidade de processo. Este processo é cada vez mais utilizado devido à versatilidade, a facilidade de operação, taxas elevadas de deposição de arames de solda, proteção no processo através dos gases e facilidade na adequação de um processo robotizado.

O processo de soldagem está fundamentado na formação do arco elétrico e gás de proteção, conhecido também pelas siglas GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), ou também conhecido como *Metal Inert Gas* (MIG) quando utiliza gases inertes e Metal Active Gas (MAG) quando se utiliza de gases ativos. Os gases geralmente utilizados são os inertes, sendo exemplos desta categoria, o argônio e hélio. Além destes, também são utilizados os gases ativos, tais como argônio + CO_2 , argônio + O_2 , ou a combinação dos três juntos.

O arco elétrico é formado entre a peça e o consumível em forma de arame, através de um alimentador contínuo que desencadeia a geração de calor possibilitando a fusão do material de solda e de base, conforme ilustra a Figura 4. A fusão ocorre de maneira contínua. Conforme o arame alimenta a poça de fusão, utiliza-se fluxo de gás de proteção que tem a função de bloquear as interferências do meio externo.

Figura 4 - Processo de soldagem GMAW.

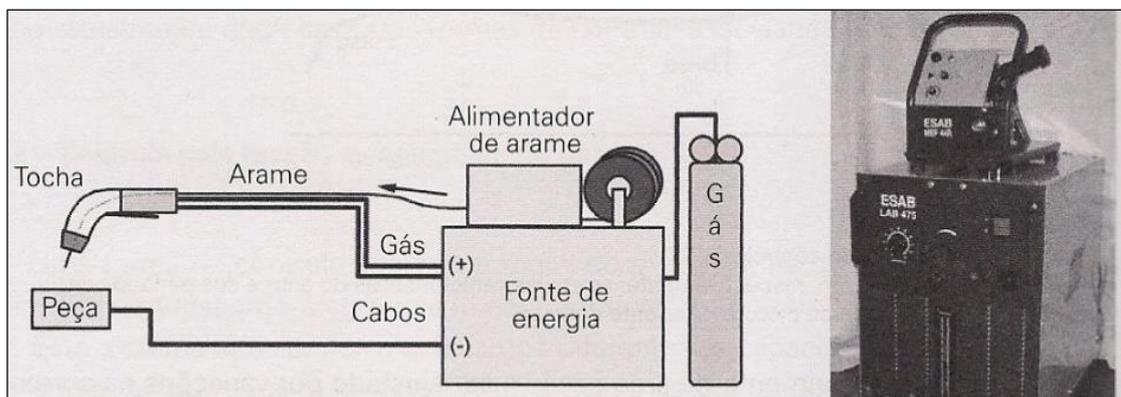


Fonte: Modenesi, Marques e Santos (2012)

A utilização deste processo de soldagem é possível em praticamente todas as ligas ferrosas, não ferrosas, alumínio, cobre, aços inoxidáveis entre outras mais reativas como, por exemplo, a liga de titânio. Considera-se que materiais com espessuras finas de 0,5 mm podem ser soldadas com sucesso em praticamente todas as posições. Contudo, apesar de, teoricamente, não haver limites superiores de espessuras, sugere-se que para chapas superiores a 15 mm utilizem outros processos de soldagem economicamente melhores.

A Figura 5 ilustra de maneira simplificada um equipamento de soldagem MIG/MAG. Conforme Modenesi, Bracarense e Marques (2014), os principais componentes que constituem o sistema são: a fonte de energia, que tem como função manter a tensão constante independente da corrente; o arame de solda, que é o material de soldagem; o cilindro de gás, que tem como função armazenar o gás de proteção utilizado no processo; e, o alimentador de arame de solda, que é responsável pela alimentação do consumível, entre outros.

Figura 5 - Equipamento para soldagem MIG/MAG.



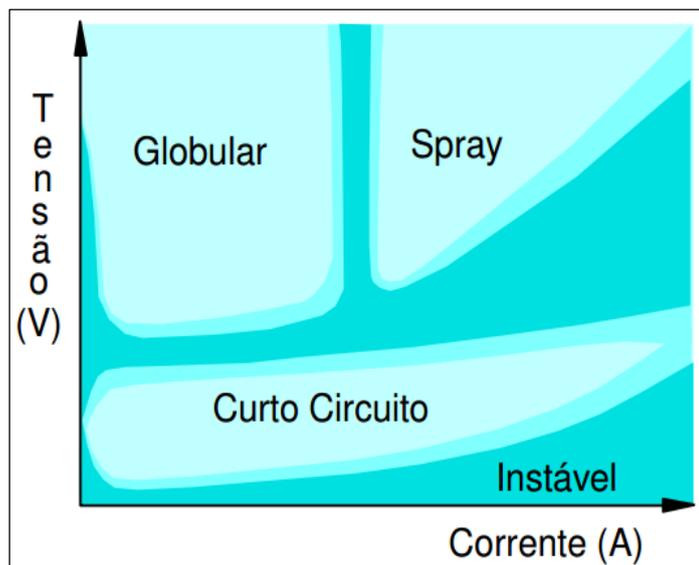
Fonte: Modenesi, Bracarense e Marques (2014)

Certamente, um dos componentes mais importantes deste mecanismo é o alimentador do consumível, pois de nada vale o ótimo ajuste das condições de soldagem, se o arame não for suprido de forma constante, como indicado por Machado (1996). Existem diversos tipos de sistema de tração empregados em tal equipamento, mas na grande maioria consistem de sistemas de pares de rolos tracionados que possibilitam o avanço do arame de solda. Um exemplo do sistema composto de dois rolos caracteriza-se quando um é tracionado e o outro apenas exerce compressão, vale lembrar a importância de garantir que o consumível não tenha distorção.

2.1.1.1 Transferência do metal e gás de proteção

No processo de soldagem GMAW a transferência do metal de solda se dá basicamente de três formas: transferência por curto circuito, transferência globular e transferência por gotículas. A Figura 6 apresenta esquematicamente a relação entre corrente e tensão de soldagem para as três formas básicas de transferência citadas, utilizando um gás de proteção rico em argônio, Modenesi (2007).

Figura 6 - Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência.



Fonte: Modenesi (2007)

Ao utilizar qualquer modo de transferência provocam-se implicações diretas nas características operacionais do processo GMAW como, por exemplo, a estabilidade, o nível de respingos, o formato do cordão e a regularidade e capacidade de fundir o metal de base. Neste processo, as principais características que influenciam o modo de transferência são a corrente

de soldagem, o comprimento do arco, a composição do gás de proteção e a composição, a bitola e o comprimento do eletrodo. Além disso, diversos outros fatores podem afetar o modo de transferência de metal de adição, especificadamente, a presença de contaminações tanto no metal de base como no eletrodo ou no gás de proteção podem prejudicar significativamente a transferência.

A transferência por curto-circuito ocorre no contato do arame com a peça em pequenos comprimentos de arco e é caracterizada pela baixa tensão de soldagem. Conforme Modenesi (2007), durante o curto-circuito a corrente tende a se elevar rapidamente, causando uma maior fusão do eletrodo através do efeito Joule. Então, surge a transferência de metal para a poça de fusão com a ruptura de uma parte do eletrodo e a reabertura do arco elétrico.

O aumento da corrente de maneira exponencial, causa a cada fim de curto circuito o rompimento do arame, porém, neste caso, de maneira explosiva causando elevada quantidade de respingos. Assim, o fator de ajuste necessário, deve ser a regulagem da indutância na máquina de solda.

A transferência globular, diferentemente da anterior, provoca o surgimento de gotas maiores que o diâmetro do arame de solda, isso acontece pois as tensões são elevadas e as correntes baixas. A geração das gotas maiores que o arame de solda em geral, aliada as forças da gravidade, ocasionam o surgimento de níveis de respingos relativamente elevados, Modenesi, Bracarense e Marques (2014).

A transferência por gotículas ou também conhecida como *Spray*, ocorre em correntes e tensões elevadas e de acordo com Iordachescu, Lucas e Ponomarev (2006, *apud* Lopera, Alfaro e Motta, 2012) é caracterizado pela formação de gotas menores que 1,25 vezes o diâmetro do eletrodo.

A função do gás de proteção em um processo GMAW é proteger a poça de fusão e o arco elétrico dos efeitos nocivos do oxigênio presente no meio externo. O gás utilizado afeta diretamente os seguintes fatores: forma e aspecto da junta soldada, propriedades metalúrgicas e mecânicas da junta soldada, modo de transferência do metal de transferência desde o consumível até a peça, além de influenciar na estabilidade do arco e operação.

Para escolher corretamente o gás a ser empregado, deve-se observar diversos parâmetros como a velocidade de soldagem, o comprimento do arco, tipo de junta, penetração desejada, espessura do material a ser soldado, entre outros.

O Quadro 1, abaixo indica qual gás de proteção deve ser utilizado para aços ao carbono e alguns baixa liga que se pretende unir utilizando o processo de soldagem GMAW. Além disso, fornece informações e cuidados que se deve levar em conta de acordo com cada gás de proteção.

Quadro 1 - Gases de proteção para soldagem GMAW.

MATERIAL BASE	GÁS	OBSERVAÇÕES
Aços ao carbono e alguns baixa liga	Ar + 3 à 5% O ₂	A tenacidade do metal de solda é menor do que com a mistura de gases anterior. Transferência em aerossol.
	Ar + 10 à 30% CO ₂	A tenacidade decai com o aumento de CO ₂ . Transferência possível em aerossol até 18% de CO ₂ e em curto circuito com qualquer proporção.

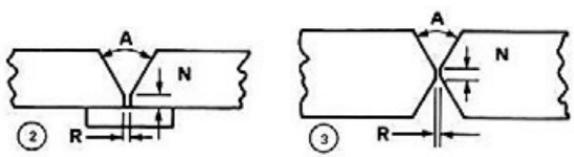
Fonte: adaptação de Machado (1996)

A escolha do gás de proteção é de extrema importância pois transpassa o processo em questão, além disso, está diretamente ligada a geração de fumos nocivos de acordo com cada emprego. Conforme Silva (2003) é preciso que o ar circulante esteja livre de gases e partículas e em temperatura que ofereça conforto na troca térmica do operador com o ambiente.

2.1.1.2 Projeto da junta

O projeto da junta ou ainda geometria a ser soldada, independentemente do material, necessita de atenção especial e deve ter condições específicas como é o exemplo da Figura 7 para aços de baixo carbono. Tal fato é considerado, por exemplo, na escolha do eletrodo que deve ser utilizado.

Figura 7 - Condições de soldagem para aços de baixo carbono, transferência por curto-circuito, arame ER70S-3.



Nota1 : A = 45° - 60°
Nota 2: Vazão do gás de proteção: 16 - 19 L/min

ESP. CHAPA	POSIÇÃO DE SOLDAGEM	PROJETO DE JUNTA	(R) ABERTURA DE RAIZ		(N) NARIZ		ARAME Ø		VEL. DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME		(4) TENSÃO (V)	CORRENTE (CC+)	VEL. DE SOLDAGEM		Nº DE PASSES
			pol.	mm	pol.	mm	pol.	mm	pol/min	mm/sec			pol/min	mm/sec	
1875	V ^o O	1	3/16	(4.8)			.045	(1.1)	180-190	76-80	18-20	175-185	12-17	5-7	2
		2	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.045	(1.1)	180-190	76-80	18-20	175-185	15-20	6-8	1
		2	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.035	(.89)	200-210	85-89	17-18	120-125	10-15	4-6	2
		4					.035	(.89)	240-250	102-106	17-19	140-145	13-18	5-8	1
250	V,O	2	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.045	(1.1)	235-245	99-104	20-21	220-225	12-17	5-7	2
		2	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.045	(1.1)	180-190	76-80	18-20	175-185	8-13	3-5	2
		4					.045	(1.1)	235-245	99-104	20-21	220-225	8-13	3-5	1
		4					.035	(.89)	200-210	85-89	17-18	120-125	6-8	2-3	2
375	V	4					.035	(.89)	240-250	102-106	18-19	140-145	11-16	5-7	2
		4					.035	(.89)	220-230	93-97	17-19	130-135	4-6	2-3	1
		2	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.045	(1.1)	180-190	76-80	18-20	175-185	12-17	5-7	4
		4					.045	(1.1)	235-245	99-104	20-21	220-225	8-13	3-5	2
	H	2	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.035	(.89)	270-280	114-118	19-20	150-155	13-18	5-8	2
		4					.035	(.89)	270-280	114-118	19-20	150-155	4-6	2-3	1
		4					.035	(.89)	270-280	114-118	19-20	150-155	4-6	2-3	2
		4 & 2	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.035	(.89)	290-300	123-127	19-21	165-175	9-14	4-6	3
		3	3/32	(2.4)	1/16	(1.6)	.045	(1.1)	180-190	76-80	18-20	175-185	8-13	3-5	4

Fonte: adaptado ESAB (2005)

2.1.2 Processo de soldagem Laser

Segundo Modenesi, Bracarense e Marques (2014), os fundamentos do processo de soldagem a laser iniciam em 1917, quando Einstein desenvolveu e publicou um estudo descrevendo o terceiro processo da integração da matéria. Este, tratava sobre a emissão estimulada de radiação e com isso forneceu a base teórica para uma nova forma de luz. Já em 1960, conforme os autores citados, Gold chamou-o de “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” (amplificação da luz por emissão estimulada de radiação), e o processo então ficou conhecido como Laser.

A radiação a Laser tem início quando uma energia externa atinge uma estrutura de átomos, induzindo-os a um estado de excitação superior e, para retornarem ao estado fundamental, necessitam liberar energia em forma de fótons. A diferença de energia gerada entre tais estados pode ser descrita como radiação eletromagnética, que por sua vez, é associada a luz visível.

2.1.2.1 Tipos de Laser

O processo de Laser evolui significativamente nos últimos anos com a utilização crescente em diversas aplicações como, por exemplo, a soldagem, os processos de corte e gravações nos mais diversos materiais. Conforme Modenesi, Bracarense e Marques (2014, pg.309), “Dois tipos de Laser estão sendo usados para soldagem: o de CO₂ e o Nd: YAG (“*Neodymium – Yttrium Aluminum Garnet*”). Ambos emitem radiação eletromagnética em comprimento de ondas entre as faixas do ultravioleta e infravermelho.”

O Laser tipo gás (CO₂) utiliza o dióxido de carbono como seu meio ativo, sendo adicionados outros gases como hélio (He) e nitrogênio (N₂) em maiores proporções e conservados em pressões mais baixas. Existem duas formas de excitação do Laser: através de gás, por correntes contínuas que se deslocam entre o anodo e catodo; e através de rádio frequência, ambos posicionados dentro da cavidade ressonante, como aponta Machado (1996).

O Laser Nd: YAG (“*Neodymium – Yttrium Aluminum Garnet*”), conhecido também como tipo sólido, é excitado por uma lâmpada de xenônio para baixas potências e criptônio para níveis de potências superiores. O estímulo pode ser de maneira contínua, quando se necessita reduzido tempo, ou pulsada, para ambas o feixe tem diâmetros reduzidos e dificuldades de dissipação.

O advento do laser de alta potência Nd: YAG no mercado atual busca flexibilidade

contínua. Além disso, existe uma tendência atual nas indústrias em trocar o laser CO₂ pelo Nd:YAG, devido a sua vantagem de transporte do feixe por fibras óticas, Wetter (2000, *apud* Filho *et al.*, 2009).

2.1.2.2 Caracterização do feixe de energia

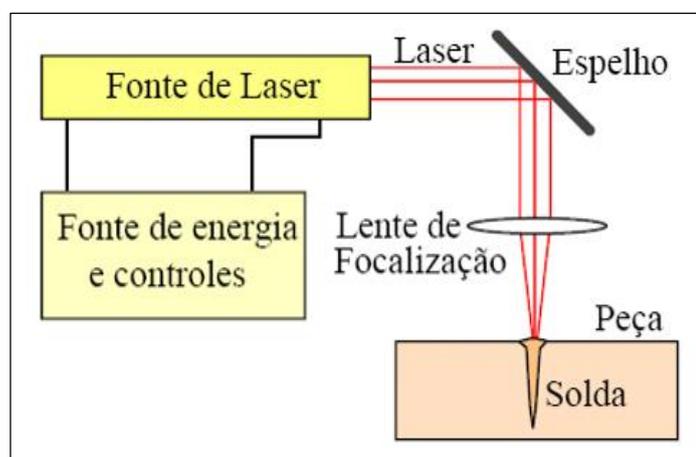
O processo de soldagem a Laser é caracterizado pela fusão da junta de materiais para fim de corte ou soldagem, independentemente de suas espessuras, materiais serem iguais ou diferentes, altas ou baixas velocidades. Conforme Modenesi, Bracarense e Marques (2014, pg.309), “Como a energia é fornecida de forma muito concentrada, os volumes de material afetados pelo calor da soldagem são reduzidos, bem como a energia total necessária para produzir a solda”.

A qualidade com que o feixe é transmitido pode variar de acordo com a alteração da difração que ocorre no equipamento, ou também devido ao calor, podendo variar a distribuição do feixe e com isso diminuir a qualidade. O feixe e a absorção são importantes de igual forma, sendo que conforme Machado (1996) a melhor qualidade é geralmente alcançada, quando a direção da solda/corte é paralela ao vetor de polarização do Laser.

2.1.2.3 Equipamento

Os equipamentos indispensáveis para soldagem a Laser são: uma fonte de Laser, uma fonte de energia e controles de seu sistema de refrigeração. A Figura 8 ilustra como é composto o equipamento de soldagem por Laser.

Figura 8 - Sistema básico de uma máquina de soldagem Laser.



Fonte: Modenesi, Bracarense e Marques (2014)

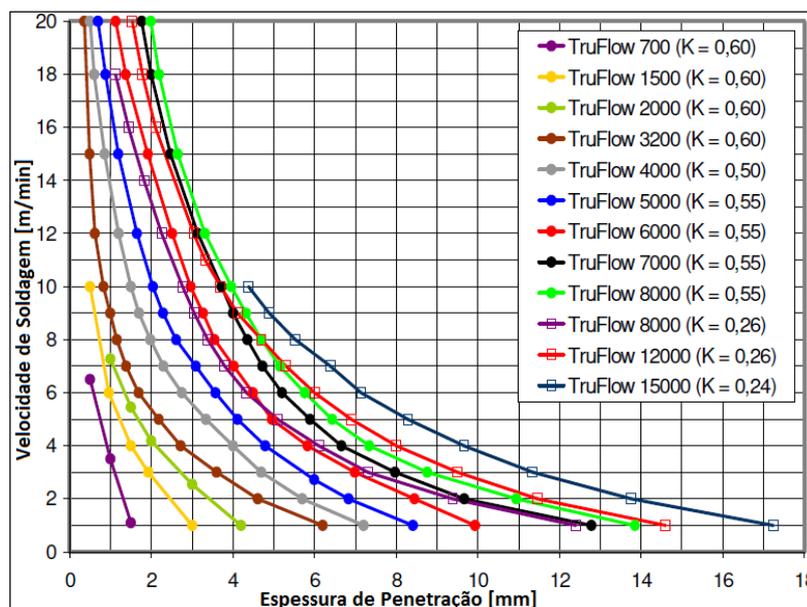
A fonte de Laser, chamada também de cavidade ressonante, é o local onde ocorre a amplificação da radiação. Tal cavidade possui espelhos que tem como função amplificar o feixe de Laser. Estes espelhos ficam posicionados um de frente para o outro e, em um deles, há um pequeno furo de aproximadamente 1% da área. Entre os dois, monta-se um meio ativo e a utilização de prismas faz com que se possa selecionar os comprimentos de onda desejados para cada tarefa.

Conforme Modenesi, Bracarense e Marques (2014, pg.310), “Uma característica fundamental da cavidade do Laser é o cuidado na sua construção, pois é necessário que o sistema seja livre de contaminação e que suas lentes sejam precisas para a aplicação desejada, a fim de aumentar sua eficiência”.

Para que o equipamento possa ter variação de potência e foco se faz necessário a utilização de gás CO_2 de maneira contínua, isso só é possível com a variação da densidade de energia na superfície do material.

A escolha do equipamento para cada processo de soldagem varia de acordo com a velocidade e também de acordo com a espessura do material que se busca unir. A Figura 9, representa um exemplo de equipamento encontrado no mercado de acordo com cada parâmetro mencionado.

Figura 9 - Escolha de equipamento para o processo LW.



Fonte: adaptado Keim (2012)

Por exemplo, para um processo de soldagem envolvendo uma peça de espessura de 9 milímetros de penetração e velocidade de 3 metros por minuto de velocidade de soldagem é

indicado a utilização do equipamento TruFlow 8000 ($K=0,55$) que possui potência de 8000 Watts e utiliza como meio ativo o gás CO_2 .

2.1.2.4 Aplicação

A utilização dos equipamentos a Laser para corte, soldagem e gravação vem tendo um aumento significativo. Tal aumento ocorre devido a versatilidade com que pode ser aplicado, precisão dimensional e qualidade. Atualmente, todos os metais e suas ligas são passíveis do processo de soldagem ou corte utilizando feixe de luz, desde de que o equipamento seja passível de variação de potência, possibilitando o início da fusão.

Pode-se citar como vantagem do processo de soldagem a Laser que a Zona Fundida e a Zona Afetada pelo Calor (ZAC) são muito pequenas, além disso, tem-se baixa distorção e tensão residual, facilidade para implementar automação, altíssima velocidade, nível de qualidade alto, não há necessidade material de adição, possibilita a soldagem de materiais distintos, entre outros. Em contrapartida, tem-se como pontos negativos a necessidade de robustez da junta (pois necessita de tolerâncias restritas), custo inicial alto comparado com outros processos, limitação de espessuras de entorno 20 mm.

As superfícies em que se deseja executar a solda devem estar basicamente limpas, secas e sem pintura, tais contaminações podem prejudicar as propriedades da solda. O Quadro 2 resume as diretrizes para uma correta limpeza da junta a ser soldada além de demonstrar como pode-se conseguir tais condições.

Quadro 2 - Orientações de superfície e borda para LW.

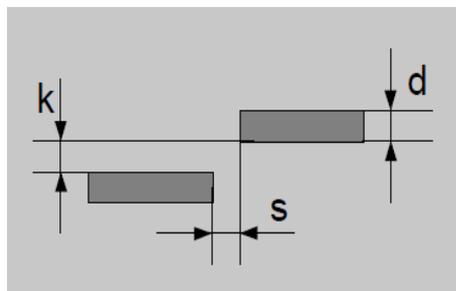
ORIENTAÇÕES	OBSERVAÇÕES
Limpeza superficial: não ter sujeira, ferrugem e óxidos	Banho de Ultrassom ou máquina de lavar
Sem gordura, ter óleo, lubrificantes a base de óleo	Banho de Ultrassom ou água Película fina de óleo é aceitável Lubrificantes a base de água são normalmente aceitáveis para aço
Sem revestimentos: pintura, cromo, zinco ou fosfato	Remover mecanicamente Superfícies revestidas podem ser soldadas com técnicas especiais
Endurecimento da camada	Remover mecanicamente
Sem resíduos de jato de areia	Resíduos de areia podem causar porosidade
Qualquer resíduo de sujeira	Pode causar porosidade

Fonte: adaptado Keim (2012)

A Tabela 2, abaixo, define através da espessura da peça como deve estar posicionada a junta em que se busca executar o processo de soldagem a laser (LW). Tais cuidados são necessários pelo fato de que o processo de soldagem a Laser não utiliza de metal de adição para preencher a lacuna que fica entre as peças.

Tabela 2 - Tolerâncias da junta soldada no processo de soldagem LW.

ESPESSURA DA CHAPA (d)	LARGURA DE ABERTURA MÁXIMA (s)	DESALINHAMENTO MÁXIMO (k)
0,5 – 3 mm	0,05 x d	0,15 x d
> 3 mm	0,03 x d	0,10 x d



Fonte: adaptado de Zefferer e Morris (2015)

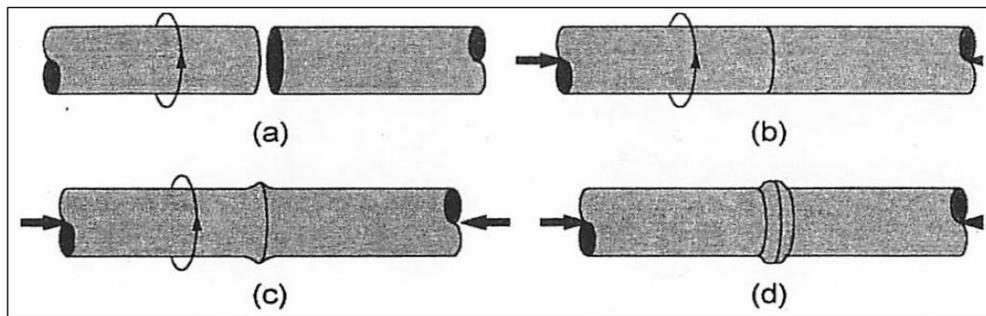
Em juntas de topo, filete ou de flange, divergências ou peças mal fixadas podem resultar em rebaixos não previstos ou até mesmo em casos mais extremos, ocasionar falta de fusão. Já o espaçamento entre peças fora do especificado e com diâmetros de foco muito pequenos podem possibilitar a passagem do feixe de Laser sem que haja o contato com a peça, Zefferer e Morris (2015).

2.1.3 Processo de soldagem por fricção

O processo de soldagem por fricção, também conhecido na literatura em inglês como FW (*Friction Welding*), vem sendo experimentado desde 1891 quando foi requerida sua patente nos Estados Unidos da América. De acordo com Modenesi, Bracarense e Marques (2014), a soldagem por fricção é um processo de união no estado sólido, no qual a coalescência entre peças metálicas é obtida por aquecimento através do atrito entre peças pela aplicação de pressão.

Na Figura 10 apresentam-se os passos característicos da soldagem por fricção, as quais são: (a) Uma das peças sofre rotação; (b) As superfícies são aproximadas e aplica-se uma pressão no sentido axial; (c) A temperatura se eleva e ocorre a deformação plástica; (d) Geração de uma rebarba e solidificação da união.

Figura 10 - Passos característicos da soldagem por fricção.



Fonte: Modenesi, Marques e Bracarense (2014)

A soldagem por fricção apresenta, como qualquer outra, benefícios e limitações. Dentre os benefícios destaca-se que não se faz necessário uso de metal de adição e necessita de gás de proteção apenas em ocasiões especiais, como indicam os estudos de Trommer *et al.* (2009). Além disso, a união soldada apresenta qualidade e altas propriedades mecânicas, a ZAC é extremamente reduzida, impurezas são expelidas no processo, não gera respingos, repetitividade, entre outras. Por outro lado, o investimento do equipamento é elevado, peças devem ter geometrias compatíveis, rigidez e alinhamento suficientes para suportar os esforços do processo e peças com geometrias não circulares necessitam de equipamentos especiais.

Conforme Modenesi, Marques e Bracarense (2014), “a maioria dos metais pode ser soldada por atrito, com exceção do ferro fundido, porque a grafite age lubrificante, e certas ligas que possuem baixo coeficiente de atrito, como bronze e latão com mais de 0,3% de chumbo”. Certos aços, com inclusões de sulfeto de manganês, também não podem ser soldados devido à formação das fases frágeis na solda.

A soldagem por fricção é empregada em diversas indústrias, principalmente onde se faz necessária alta qualidade e produtividade. Pode-se citar, por exemplo, a indústria automotiva que emprega tal processo para produção de eixos, válvulas e cilindros hidráulicos como ilustra a Figura 11 ou ainda na indústria aeroespacial, petrolífera, militar e agrícola.

Figura 11 - Emprego da soldagem por fricção em um conjunto haste do cilindro hidráulico.



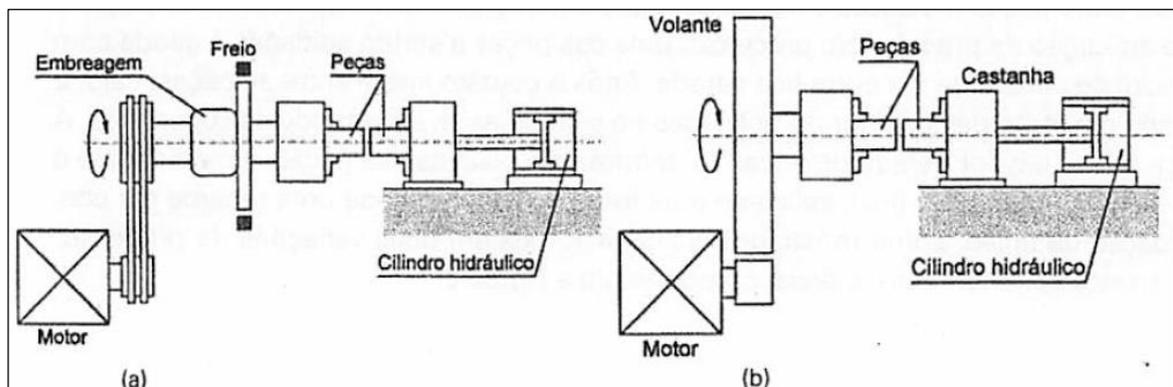
Fonte: THOMPSON (2015)

2.1.3.1 Tipos de soldagem fricção

Conforme Figura 12(a), no processo por arraste contínuo, as peças que se deseja unir são fixadas utilizando um mecanismo formado por castanhas, então uma das peças é posta na velocidade que se deseja. A peça que está parada é deslocada até a peça que está girando, este contato provoca aquecimento entre as duas superfícies pelo atrito e quando as superfícies atingirem a temperatura de forjamento dos materiais a unidade motora é desacoplada e é aplicado um freio. Após a parada completa, eleva-se a força axial afim de se obter o forjamento das peças, mantendo-se a força pelo igual período em que as peças estiverem resfriadas e estejam soldadas, Modenesi, Marques e Bracarense (2014).

Já no processo por acionamento inercial, Figura 12(b), uma das peças é fixada num sistema apropriado e a outra é fixa no girante que por sua vez está ligado ao volante, a unidade motora é acionada até atingir certa velocidade e quando alcançada, a unidade motora é desacoplada tornando a peça livre. Só então o membro que está com a peça fixa é deslocado em direção a peça girante, surge então a fricção que é concluída quando a energia da peça livre se esgota, finalizando a soldagem.

Figura 12 - Equipamento para FW: (a) por arraste contínuo e (b) por acionamento inercial.



Fonte: Modenesi, Marques e Bracarense (2014)

Abaixo, o Quadro 3 resume e confronta as características de ambos os métodos de acionamento descritos acima.

Quadro 3 - Quadro comparativo entre processos FW.

(continua)

PARÂMETROS DE PROCESSO	FW CONTÍNUO	FW INERCIAL
Parâmetros de solda	Velocidade de rotação	Momento de inércia do volante

(conclusão)

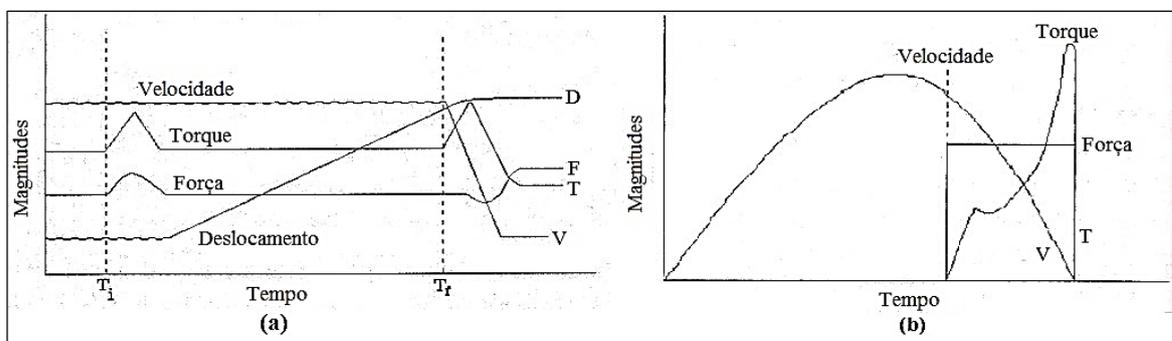
Parâmetros de solda	Duração da rotação ou distância de queima	Velocidade de rotação
	Força axial	Força axial
Conversão de energia em calor	Energia constante num tempo estabelecido	Energia armazenada no volante; durante determinada pelos parâmetros de solda
Aporte de energia	Baixo	Alto
Taxa de geração de calor	Baixo	Alta
Duração do ciclo	Similar	Similar
Largura da ZAC	Larga	Estreita
Rigidez do sistema	Menor rigidez	Maior rigidez e forças nas pinças de fixação

Fonte: adaptado de ASM Handbook (1994)

2.1.3.2 Procedimentos de soldagem

O comportamento das principais variáveis da soldagem por arraste contínuo e por acionamento inercial estão ilustradas Figura 13.

Figura 13 - Comportamento das principais variáveis do processo FW (a) por arraste contínuo e (b) por acionamento inercial.



Fonte: Machado (1996)

Conforme a norma DIN EM 15620 (2000), outros fatores que podem afetar o processo FW são: qualidade, distribuição e forma de inclusões não metálicas nos materiais de base, formação de fase intermediária na solda, formação de fase de baixo ponto de fusão na solda, porosidade no material de base, amolecimento térmico de materiais endurecidos, endurecimento do material soldado na zona afetada pelo calor e hidrogênio no material de base.

De acordo com Elmer e Kautz (1994, *apud* López, 2010), “No caso de soldas em tubos, não é necessária atenção especial com a limpeza superficial, pois a FW tende a remover películas de contaminantes e eliminá-las junto com a rebarba”.

Conforme Modenesi, Marques e Bracariense (2014), os defeitos mais comuns

encontrados são: cisalhamento na zona afetada pelo calor e defeitos centrais causados por pequenos orifícios no centro de uma das peças. Ainda conforme o autor, a variação de dureza ao longo da zona afetada pelo calor (ZAC) é muito pequena e a resistência à fadiga também não é muito afetada, principalmente quando o material for temperado e revenido após a soldagem.

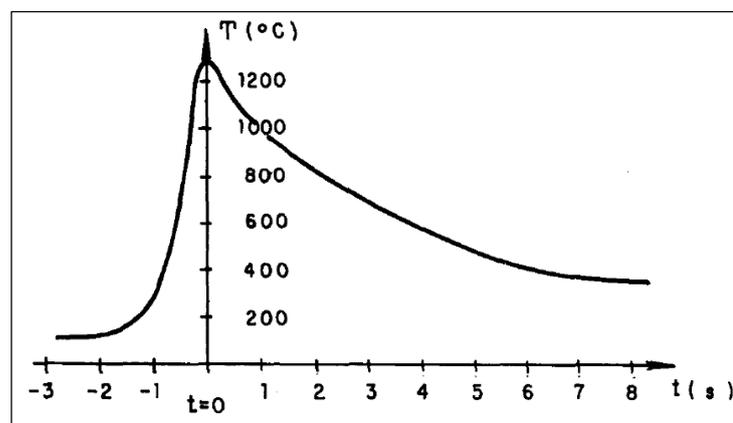
2.1.4 Metalurgia da soldagem

A metalurgia da soldagem consiste no estudo dos efeitos causados no processo de soldagem sobre a estrutura e propriedades do material que estão ligados aos fenômenos metalúrgicos da fusão, solidificação e transformações microestruturais e macroestruturais. A metalurgia da soldagem está inteiramente ligada a qualidade da junta soldada e não deve ser analisada exclusivamente pelo aspecto visual do cordão de solda.

2.1.4.1 Soldabilidade dos aços

Soldabilidade é o termo utilizado para definir a relativa facilidade com que uma junta soldada é fabricada utilizando processos convencionais. Contudo, quando as taxas de resfriamento associadas aos ciclos térmicos da soldagem, ilustradas na Figura 14, não são observadas, produzem microestruturas que são propícias à fratura frágil ou trinca induzida por hidrogênio.

Figura 14 - Ciclo térmico de soldagem.



Fonte: adaptado de Wainer, Brandi e Mello (1992)

O ciclo térmico de soldagem está esquematicamente representado por três fases básicas: a etapa de aquecimento inicial do material, a fase em que a temperatura do ciclo é máxima e a fase de resfriamento, ponto em que a temperatura retorna ao valor inicial, conforme

Wainer, Brandi e Mello (1992).

O método mais conhecido para analisar a propensão dos aços a formar microestruturas é a fórmula do carbono equivalente (CE), que permite definir a necessidade de utilização um tratamento térmico pré- ou pós-soldagem. Abaixo, apresenta-se a Equação (1) desenvolvida pelo American Welding Society (2010), para o cálculo do CE de aços,

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

O CE considera os elementos que interferem de forma determinante na soldabilidade dos aços num valor único e é calculado a partir dos elementos de liga mais comuns e do teor de carbono chamado de carbono equivalente. Os resultados dessa equação permitem prever o tratamento que será dado à junta soldada. Em resumo, quando o material tem baixo CE, em geral apresentará boa soldabilidade. Assim, se o CE for inferior a 0,45% é pouco provável que ocorra uma trinca por solda e nenhum tratamento térmico é requerido.

Conforme Modenesi, Marques e Santos (2012), para valores intermediários, entre 0,45 e 0,60%, existe a possibilidade de haver uma trinca, portanto é necessário o pré-aquecimento variando de 90 a 400 graus. E, para CE maior que 0,60 %, deverão ser realizados tanto pré-aquecimento quanto o tratamento pós-solda, pois a probabilidade de trinca é alta. Ou seja, um CE alto não indica necessariamente que o aço não é soldável, mas sim que são necessários cuidados cada vez maiores.

2.1.4.2 Macroestruturas de soldas

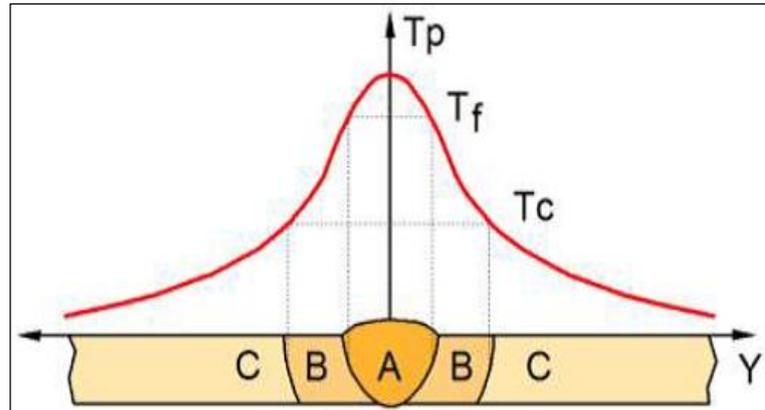
Durante o processo de soldagem, a solda e as áreas adjacentes do metal de base são expostas a ciclos térmicos cujas temperaturas máximas diminuem na proporção em que se afastam do eixo central da solda. Assim, são esperadas possíveis modificações microestruturais, em relação ao material original. Desta forma, em um processo de soldagem, pode-se levar em conta a existência de três regiões básicas, como ilustra Figura 15.

Zona fundida (ZF): indicada por A, conforme Wainer (1980) é a zona na qual, durante a execução de soldagem, foi obtido o estado líquido quer tenha havido ou não acréscimo de metal, com ou sem participação de material de base. De acordo com Modenesi, Marques e Santos, (2012) é a região em que as temperaturas de pico foram superiores à temperatura de fusão do material de base.

Zona Afetada pelo Calor (ZAC): indicada por B, corresponde à área do metal base que não é fundida mas é afetada pelo calor de soldagem, e, cuja microestrutura e/ou propriedades foram alteradas pelo ciclo térmico do processo de soldagem.

Metal Base (MB): indicada por C, são as áreas mais afastadas da solda e que não foram alteradas pelo ciclo térmico do processo de soldagem.

Figura 15 - Macroestrutura esquemática da seção transversal de uma junta soldada.



Fonte: Modenesi, Marques, Santos (2012)

2.1.4.3 Microestruturas de soldas

A soldagem causa modificações localizadas e bruscas nas microestruturas do material devido sua temperatura de soldagem, porém busca-se ter propriedades similares ao do material de base mesmo tendo estas influências. Estas alterações, ocorrem na zona fundida e zona afetada pelo calor (ZAC), podendo provocar mudanças estruturais tão significativas que podem comprometer a utilização da peça soldada.

Conforme Wainer, Brandi e Mello (1992) os microconstituintes da zona fundida, zona termicamente afetada e do material de base são diferentes quando se tem o material pós processo de soldagem, por isso, é importante o conhecimento das dependências entre a microestrutura final e algumas variáveis ligadas à soldagem.

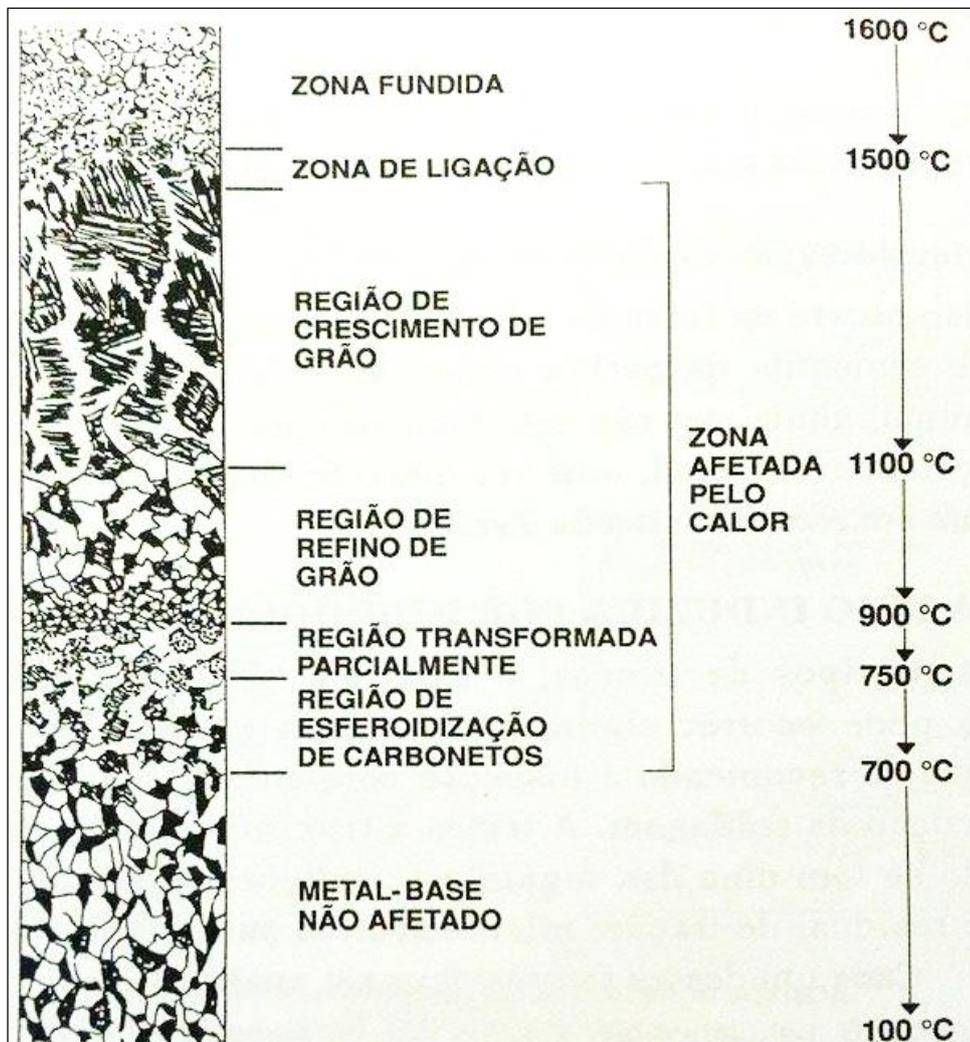
A microestrutura final do metal de solda em uma zona fundida pode variar de acordo com a concentração, composição química e volumes de inclusões não-metálicas, teor de elementos de liga, ciclo térmico de soldagem e tamanho de grão da austenita anterior. Conforme Wainer, Brandi e Mello (1992), “essas transformações do metal de solda durante o resfriamento ocorrem em condições fora do equilíbrio e com a velocidade de resfriamento bem alta”.

No período em que ocorre o resfriamento final na junta soldada, a austenita será decomposta em distintos agregados de ferrita carbonetos, podendo ainda apresentar alguma

quantidade de martensita a ser formada de acordo com a composição química e condições de resfriamento, Modenesi, Marques e Santos (2012). A quantidade de inclusões presente possibilita uma morfologia de ferrita acicular que por sua vez é causada pelo resfriamento rápido na zona fundida.

A microestrutura da zona termicamente afetada é resultado de modificações provenientes do material base e estas estão diretamente ligadas ao ciclo térmico de resfriamento do processo de soldagem. De acordo com Wainer, Brandi e Mello (1992) a ZAC de um aço carbono pode ser descrita pelas regiões de crescimento de grão, de refino de grão, de transformação parcial e de esferoidização de carbonetos, além do metal base não afetado, conforme ilustra a Figura 16.

Figura 16 - Regiões das ZAC e respectivas temperaturas.



Fonte: Wainer, Brandi e Mello (1992)

3 MATERIAIS E METODOS

Neste capítulo foram detalhados os materiais empregados nos corpos de prova submetidos aos processos de soldagem GMAW, LW e FW. Também, foram descritos os procedimentos de preparação dos corpos de prova, os parâmetros de soldagem, a execução da inspeção visual, a análise de líquidos penetrantes e ultrassom, ensaios metalográficos, e os ensaios de dobramento e tração, segundo normas de ensaio mecânico.

3.1 MATERIAIS

Verifica-se a seguir que, para todos os processos de soldagem, o material base é a matéria prima do processo de corte do tubo mecânico ST52 BKW sem costura, com diâmetros externo e interno de, respectivamente, 101,40 mm e 88,2 mm, ou seja, espessura de 6,6 mm. Segundo a norma técnica ABNT NBR 11889 e conforme certificado de matéria prima (Anexo A), um aço-carbono de alta resistência mecânica, pois possui um limite de escoamento igual ou superior a 280 MPa.

Ainda, conforme DIN 2391-2-1994-09, o tubo mecânico trefilado a frio chamado de BKW, recebe após o processo de tratamento térmico final um novo passe de trefilação de baixo grau de redução, segundo ISOTREF (2014). Este procedimento tem a finalidade de garantir melhores tolerâncias dimensionais e microestrutura mais refinada, permitindo a obtenção de propriedades mecânicas adequadas às aplicações desses produtos siderúrgicos.

3.1.1 Materiais do processo de soldagem GMAW

A soldagem foi realizada com material de adição arame de solda ESAB ER70S-6, com diâmetro de 1,2 mm com mistura de 82% Argônio (Ar) + 18% gás carbônico (CO₂). As características mecânicas e químicas dos materiais utilizados estão destacadas nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do material de base e material de adição.

MATERIAL	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	ALONGAMENTO (%)
ST52 BKW	480 – 670	565 – 770	12 - 15
ESAB ER70S-6	483	583	26

Fonte: VALLOUREC & MANNESMANN (2012) e ESAB (2015)

Tabela 4 - Composição química do material de base e material de adição.

MATERIAL	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V
ST52 BKW	0,18	1,48	0,0015	0,0013	0,24	0,01	0,16	0,02	0,014	0,01	0,005
ESAB ER70S-6	0,075	1,22	0,010	0,014	0,67	-	-	-	-	-	-

Fonte: VALLOUREC & MANNESMANN (2012) e ESAB (2015)

Com base na composição química do material de base utilizado, dada na Tabela 4, e através da Equação (1) obteve-se valor de carbono equivalente $CE_{(tubo)} = 0,46$.

3.1.2 Materiais do processo de soldagem LW

Este processo não necessita de material de adição, porém utiliza 100% Argônio (Ar) como meio ativo.

3.1.3 Materiais do processo de soldagem FW

Neste processo, um anel intermediário será utilizado como material de adição, obtido de um tubo de aço ASTM A513 com costura, conforme características mecânicas e químicas que estão destacadas nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do material de adição.

MATERIAL	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	ALONGAMENTO (%)
ANEL INTERMEDIÁRIO ASTM A513	590	678	27

Fonte: ARCELORMITTAL (2014)

Tabela 6 - Composição química do material de adição.

GRAU	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V
ANEL INTERMEDIÁRIO ASTM A513	0,16	1,43	0,012	0,002	0,25	0,01	0,04	0,01	0,034	0,03	0,006

Fonte: ARCELORMITTAL (2014)

Com base na composição química dos materiais de base e anel intermediário utilizados, dada na Tabela 4 e 7, e o uso da Equação (1) se obtiveram os valores de carbono equivalente segundo a *American Welding Society* $CE_{(anel)} = 0,41$.

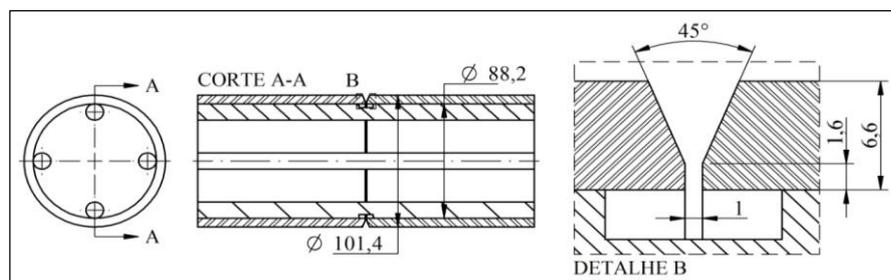
3.2 PROJETO DAS JUNTAS SOLDADAS

No que segue, traz-se o projeto das juntas soldadas para cada processo de soldagem descrito neste trabalho. Além disso, são detalhados os componentes utilizados em cada projeto.

3.2.1 Projeto da junta para processo de soldagem GMAW

Para o processo de soldagem GMAW, a junta soldada é constituída de dois tubos mecânico. Além disso, foram necessários reforços internos com alívios, afim de garantir o maior alinhamento possível dos tubos, garantir a abertura de nariz (abertura entre as geometrias) indicado e não permitir que ocorresse contato entre o reforço e o diâmetro interno do tubo durante a execução da união soldada. A região da junta possui um formato em “V”, constituindo uma solda com abertura de 45°, conforme representado na Figura 17.

Figura 17 - Projeto da junta para soldagem no processo GMAW.

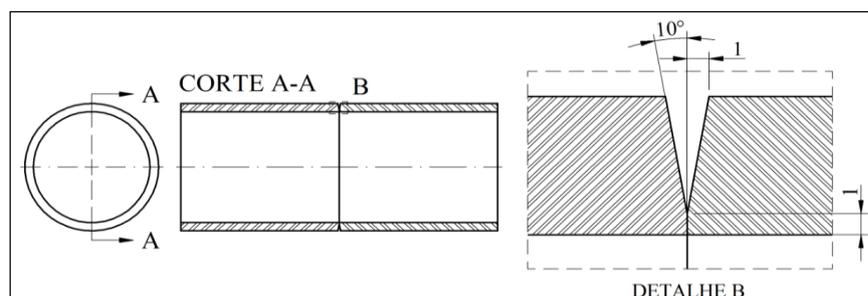


Fonte: autor (2015)

3.2.2 Projeto da junta para processo de soldagem LW

O processo de soldagem LW, foi necessário uma geometria que permitisse que o feixe de laser tivesse uma excelente penetração e com isso garantindo uma qualidade do cordão de solda desejado, demonstrado na Figura 18.

Figura 18 - Projeto da junta para soldagem no processo LW.

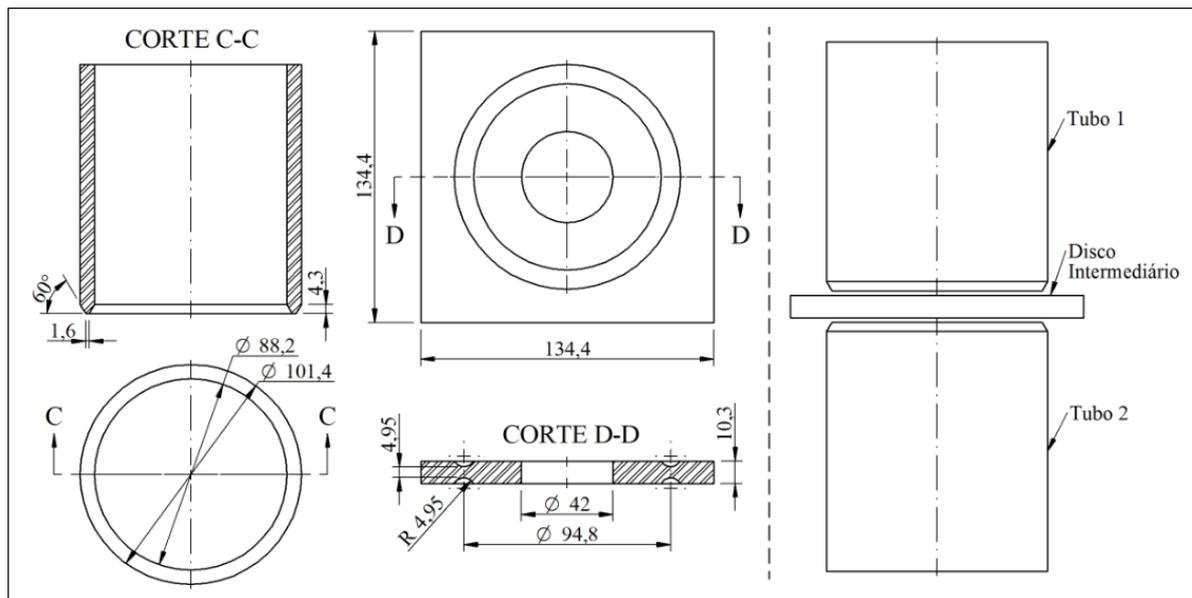


Fonte: autor (2015)

3.2.3 Projeto da junta para o processo de soldagem FW

A geometria do processo de soldagem FW foi desenvolvida mantendo as proporções obtidas na dissertação de Haupt (2013), na qual são apresentadas três geometrias em que foram executadas diversas análises. Destas, foi escolhida a geometria que se enquadrava em algumas características. Quanto ao tubo, observou-se a redução de área da secção transversal do tubo, afim de minimizar o torque inicial. E em relação ao anel, observou-se geometrias que garantissem fluidez do material plastificado e rigidez do conjunto, afim de reduzir distorções decorrentes da primeira solda e com isso garantir uma melhor qualidade das duas soldas, conforme Figura 19.

Figura 19 - Geometrias utilizadas para soldagem no processo FW.



Fonte: autor (2015)

3.3 PREPARAÇÃO DAS JUNTAS SOLDADAS

Para execução de cada processo de soldagem, foram separados quatro tubos mecânicos ST52 BKW de diâmetro 101,4 mm e de comprimentos de até 120 mm de acordo com o surgimento de retalhos no posto de trabalho onde são cortadas as barras de 12 metros, dois destinados aos ajustes de cada processo e os restantes correspondentes aos corpos de prova analisados. Após a execução dos procedimentos específicos a cada processo, foi executada a aferição dimensional dos componentes e posteriormente procedido com a remoção de impurezas (graxa, óleo, resíduos, entre outros) e rebarbas provenientes dos processos de corte, usinagem e fresamento.

3.3.1 Execução da junta soldada para processo GMAW

A preparação da junta soldada, ilustrada pela Figura 20, foi realizada com usinagem por torneamento de face e chanfro do tubo, além da utilização de serra para corte dos reforços e fresa para executar os alívios no meio das barras.

Figura 20 - Junta a serem soldadas no processo GMAW.



Fonte: autor (2015)

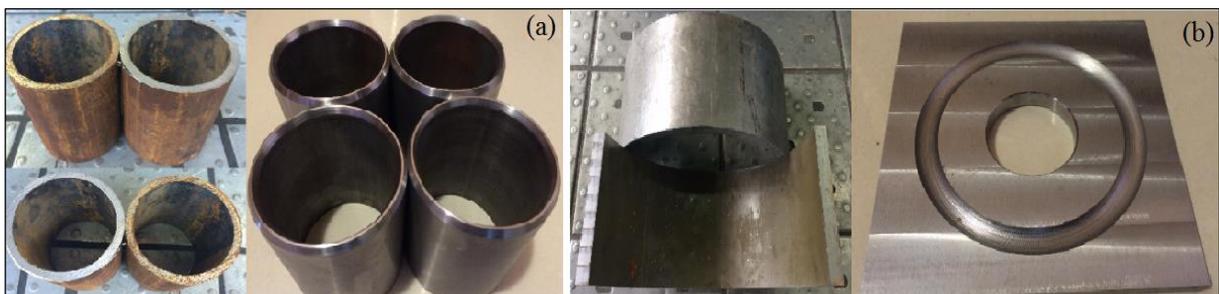
3.3.2 Execução da junta soldada para processo LW

A preparação da junta soldada neste processo foi realizada com usinagem por torneamento de face e chanfro do tubo, além da necessidade de quatro pontos de solda internos para possibilitar a execução da soldagem.

3.3.3 Execução da junta soldada para processo FW

Ainda, no processo de soldagem FW, foi utilizado um tubo de aço ASTM A513 com costura, de 120 mm de comprimento e com diâmetro externo de 297,51 mm, diâmetro interno de 268,91 mm, também proveniente de material de descarte. O tubo passou pelo processo de corte e planificação com o objetivo de resultar o anel intermediário de espessura 14,30 mm e dimensões externas de 134,4 mm por 134,4 mm, conforme Figura 21 (b).

Figura 21 - Junta a serem soldadas no processo FW: (a) tubos e (b) anel intermediário.



Fonte: autor (2015)

Assim, consideram-se no total quatro tubos e duas chapas, pois para execução utiliza-se dois tubos mais uma chapa destinada a ajustes de processo e as restantes são os corpos de prova analisados. A preparação da junta soldada foi realizada com usinagem por torneamento da face e chanfro do tubo além da utilização de fresa para faceamento e serra para corte do tubo de material de adição.

3.4 PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Os parâmetros de soldagem para cada processo, GMAW, LW e FW, são diferentes. Assim, os parâmetros de cada processo estão indicados nas Tabelas 7, 8 e 9. Os dados se baseiam em procedimentos já realizados por cada equipamento utilizado.

Tabela 7 - Parâmetros utilizados e registrados durante a soldagem GMAW.

PASSE	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	VELOCIDADE (cm/min)	ENERGIA DE SOLDAGEM (J/mm)	OSCILAÇÃO (mm)
Primeiro	21,7	175	35	651	0
Segundo	21,7	175	20	1139	2

Fonte: autor (2015)

Tabela 8 - Parâmetros utilizados e registrados durante a soldagem LW.

POTÊNCIA (W)	FREQUÊNCIA (Hz)	VELOCIDADE (cm/min)	ENERGIA DE SOLDAGEM (J/mm)	ALTURA BICO x MATERIAL (mm)
5000	40000	600	50	20

Fonte: autor (2015)

Tabela 9 - Parâmetros utilizados e registrados durante a soldagem FW.

TUBO	ROTAÇÃO (rpm)	CONSUMO DE MATERIAL (mm)	CONSUMO EFETIVO (mm)	CARGA DE FRICÇÃO (kN)	CARGA FORJA (kN)	ENERGIA MÁXIMA DE SOLDAGEM (MJ/mm)
Lado A	1000	12	14	150	190	121,29
Lado B	1000	12	13,3	150	190	120,18

Fonte: autor (2015)

Neste último, foram utilizados parâmetros proporcionais aos executados na pesquisa de Haupt (2013) e que apresentaram melhor resultado com relação a isenção de defeitos nas análises metalográficas.

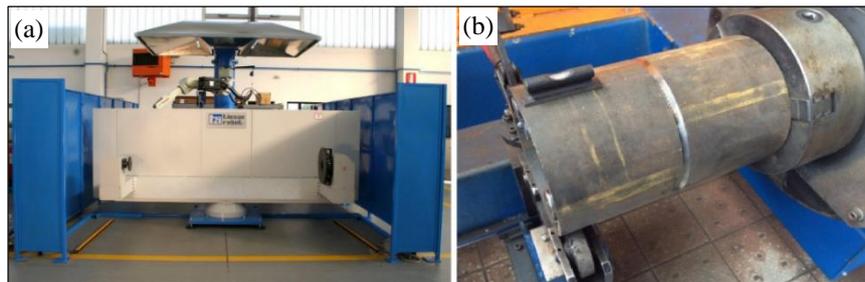
3.5 DISPOSITIVOS E PROCEDIMENTOS PARA SOLDAGEM

Tendo as peças separadas e preparadas para cada processo de soldagem, descreve-se abaixo os procedimentos e equipamentos utilizados para a execução.

3.5.1 Soldagem GMAW

Para a execução da soldagem GMAW foi utilizado um robô da marca Kawasaki, conforme Figura 22(a), munido de equipamento de soldagem já utilizado para produção de peças similares na empresa Soprano. Além disso, utilizou-se uma mesa automatizada na qual as peças giram e a tocha permanece fixa na posição vertical, possibilitando a junta soldada entre os tubos, ilustrados na Figura 22(b).

Figura 22 - (a) Equipamento para soldagem GMAW e (b) mesa automatizada.



Fonte: SOPRANO (2015)

3.5.2 Soldagem LW

Na execução do processo de soldagem LW, utilizou-se o equipamento Trumpf (modelo TRULASER CELL 7040), conforme Figura 23(a). Também é equipado com uma mesa automatizada na qual as peças giram e a lente de focalização permanece fixa na posição vertical, possibilitando a junta soldada entre os tubos, ilustrada na Figura 23(b).

Figura 23 - (a) Equipamento para soldagem LW e (b) mesa automatizada.



Fonte: CALDLASER (2015)

3.5.3 Soldagem FW

O processo de soldagem FW foi executado no Laboratório de Metalurgia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAMEF que possui equipamento o equipamento denominado MPF 1000, apresentado na Figura 24. Está máquina é equipada com um servo-hidráulico com capacidade de 10kN e motor com potência de 132 kW. Além de um sistema de controle MTS, realiza o controle e aquisição dos parâmetros durante a soldagem.

Figura 24 - Equipamento para soldagem FW.



Fonte: LAMEF (2015)

Para fixação e posicionamento das partes a serem unidas, o sistema de fixação do anel é composto por quatro fixadores laterais que permitem a correta centralização do anel com o tubo. O tubo que será soldado é fixado à placa que possui três castanhas espaçadas em 120° cada. A solda longitudinal, representada no tubo, tem como função evitar o escorregamento do mesmo com relação à placa de fixação, conforme Figura 25.

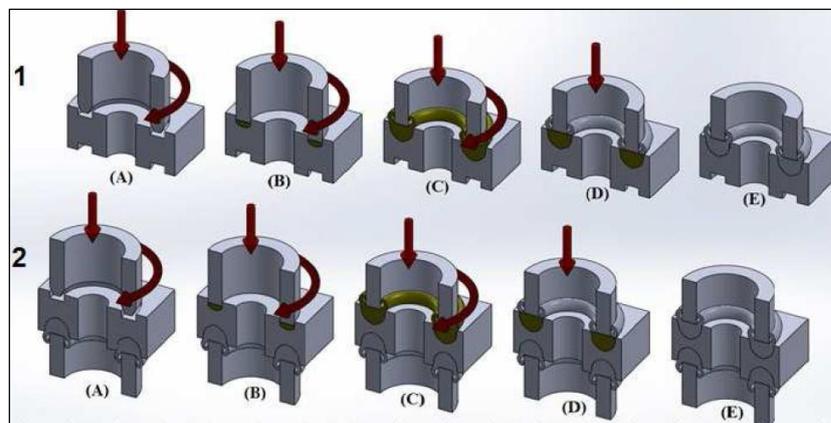
Figura 25 - Representação do posicionamento e fixação dos tubos e anel intermediário para soldagem FW.



Fonte: autor (2015)

A execução da solda segue procedimentos descritos a seguir, conforme estudo de Haupt (2013). Primeiramente, na fase (A) o tubo entra em contato e inicia sua aceleração e ciclo de pressão, (B) a pressão é mantida em níveis baixos cujo objetivo é aquecer e plastificar os materiais em contato, (C) a pressão é aumentada até o nível estabelecido para a soldagem e ao final desta fase a rotação é cessada, dando início a fase de forjamento, (D) nessa etapa a pressão é aumentada para garantir o contato íntimo dos materiais unidos e a fase (E) representa a solda finalizada e já resfriada. Após a realização da primeira solda (1), o conjunto é invertido e a segunda união é realizada na outra face do anel intermediário, seguindo as fases descritas na etapa (2) que é análoga à primeira, conforme ilustra a Figura 26.

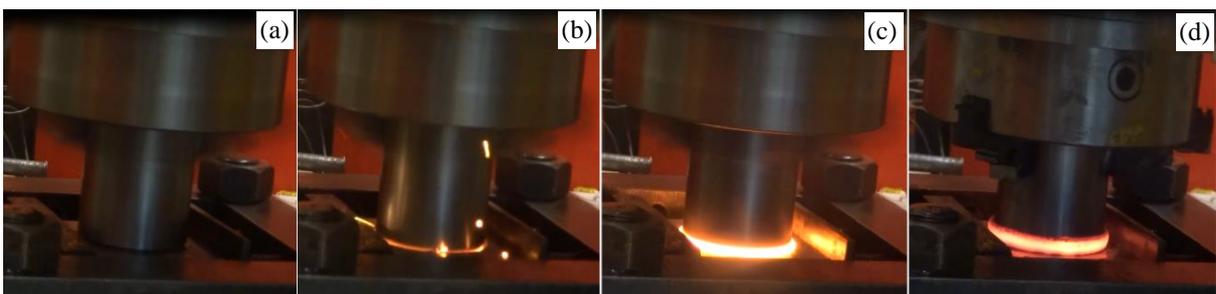
Figura 26 - Fases do processo de soldagem FW.



Fonte: Haupt (2013)

Para o acompanhamento da soldagem é possível detalhar as fases do processo de soldagem, conforme Figura 27, descrita a seguir: (A) o atingimento da rotação nominal de soldagem (B) com carga baixa e como consequência baixo torque se inicia a fricção com o contato entre superfícies, (C) verifica-se a expulsão do material aquecido proveniente da soldagem e (D) o forjamento onde a rotação já foi cessada e há um incremento de carga com o início do resfriamento da junta.

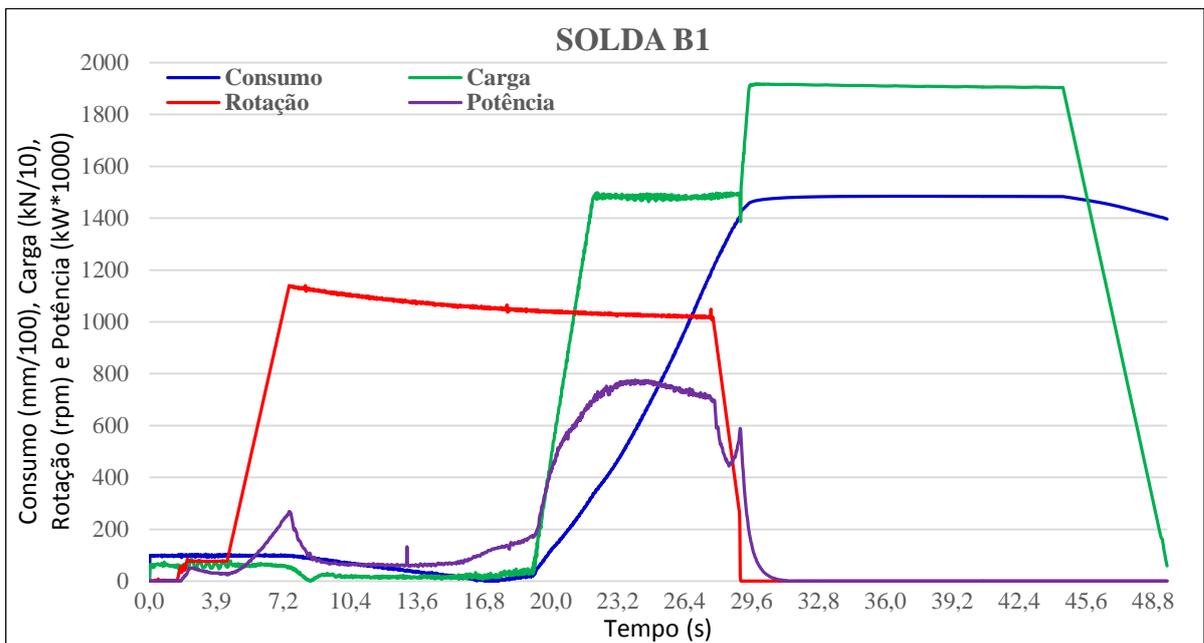
Figura 27 - Fases do processo de soldagem FW.



Fonte: autor (2015)

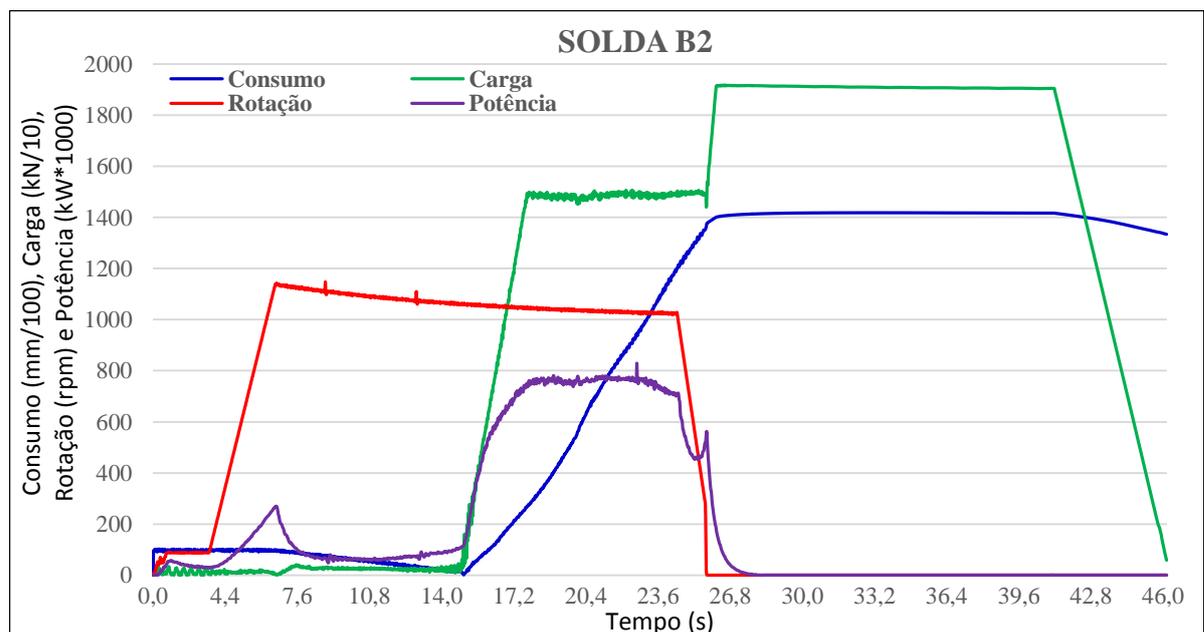
Posteriormente ao processo de soldagem, utilizando o sistema MTS de controle, é possível também obter dados reais do processo com informações de rotação (rpm), carga de fricção (kN), carga de forjamento (kN), consumo de material (mm) e variação da potência do motor durante a soldagem (kW) e, com isso, plotar um gráfico com a variação destes parâmetros em relação ao tempo transcorrido na soldagem, conforme Figuras 28 para a solda B1 e Figura 29 para a solda B2.

Figura 28 - Gráfico de dados coletados para a solda B1 no processo FW.



Fonte: autor (2015)

Figura 29 - Gráfico de dados coletados para a solda B2 no processo FW.



Fonte: autor (2015)

3.6 CODIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E ENSAIOS

Após realizados os processos de soldagem GMAW, LW e FW, adotou-se uma codificação para os CPs soldados. A primeira letra representa de qual processo de soldagem foi retirado os corpos de prova sendo eles G (processo GMAW), L (processo LW) e F (processo FW), as duas letras seguintes são referentes ao ensaio realizado naquele corpo de prova sendo TR (Tração), DF (Dobramento de Face) e DR (Dobramento de Raiz).

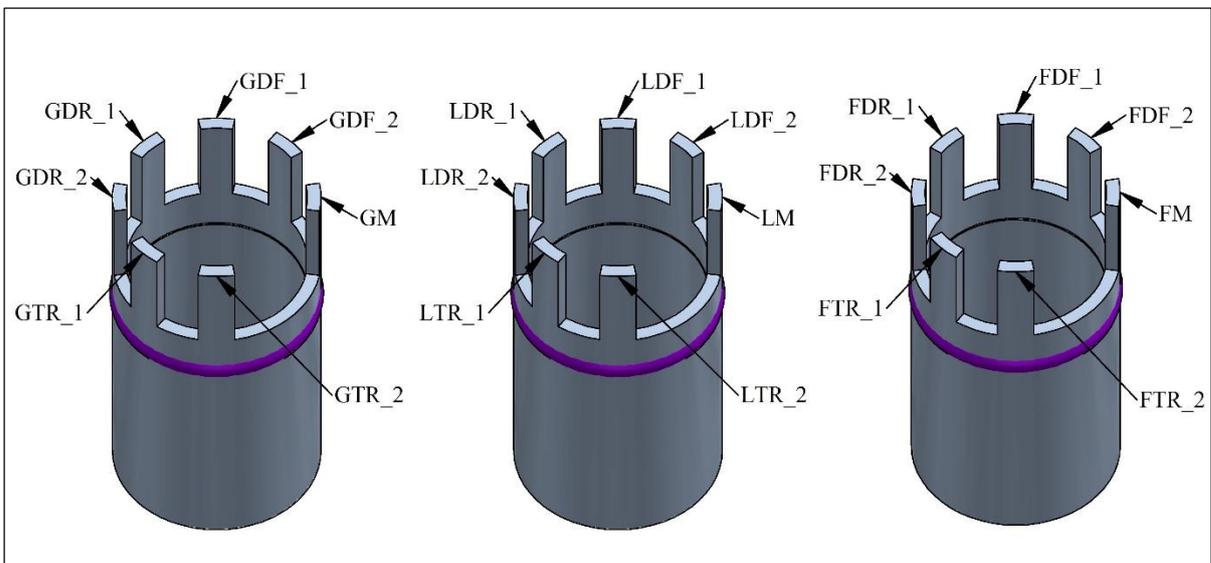
Além destes, foi retirado um corpo de prova de cada processo para análise metalográfica que foi dividida em análise macrográfica e análise micrográfica sendo identificado como GM quando retirado do tubo soldado no processo GMAW, LM quando retirado do tubo soldado no processo LW e FM quando retirado do tubo soldado no processo FW, conforme Quadro 4 e Figura 30.

Quadro 4 - Codificação dos CPs dos processos de soldagem GMAW, LW e FW.

ENSAIO	CORPO DE PROVA DO PROCESSO GMAW		CORPO DE PROVA DO PROCESSO LW		CORPO DE PROVA DO PROCESSO FW	
	GTR_1	GTR_2	LTR_1	LTR_2	FTR_1	FTR_2
DOBRAMENTO DE FACE	GDF_1	GDF_2	LDF_1	LDF_2	FDF_1	FDF_2
DOBRAMENTO DE RAIZ	GDR_1	GDR_2	LDR_1	LDR_2	FDR_1	FDR_2
MACROGRAFIA	GM		LM		FM	

Fonte: autor (2015)

Figura 30 - Disposição dos CPs dos processos de soldagem GMAW, LW e FW.

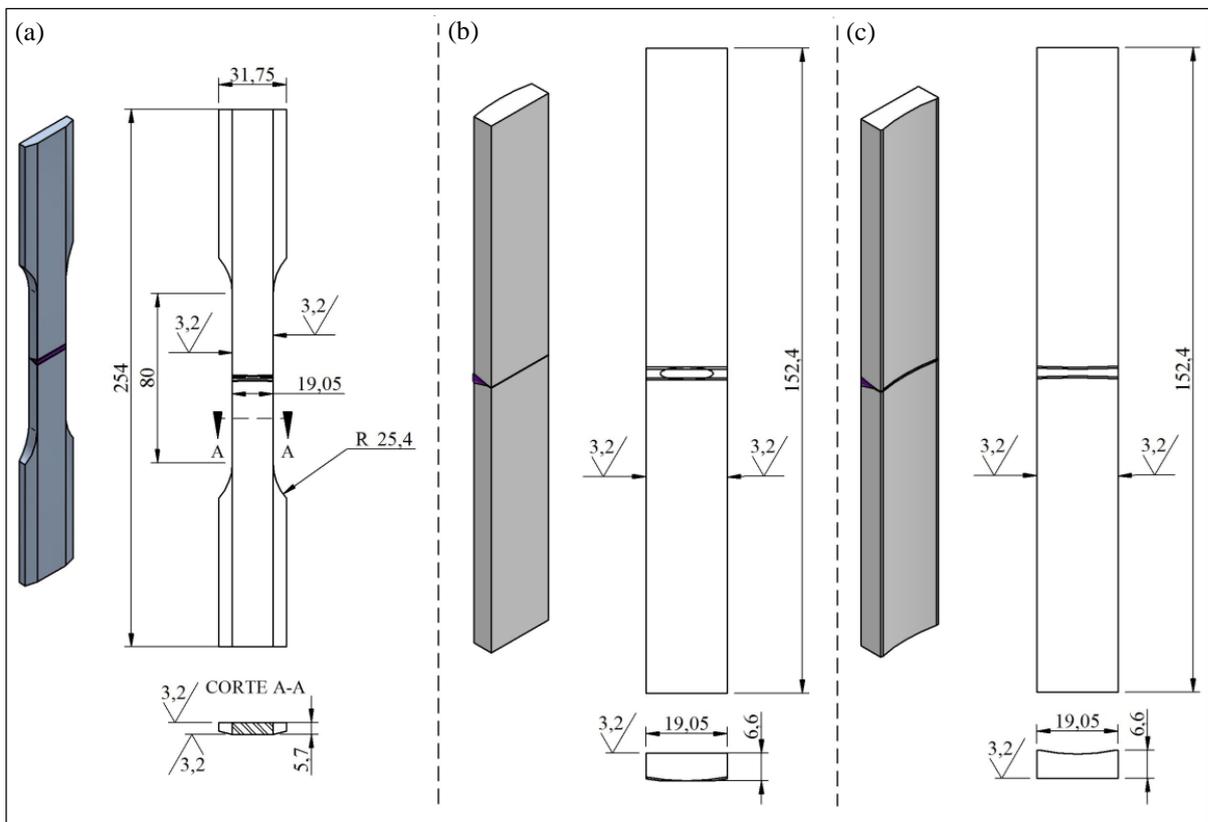


Fonte: autor (2015)

3.7 GEOMETRIA DO CORPOS DE PROVA

A geometria dos corpos de prova para ensaio de tração é apresentada na Figura 31(a). Nos corpos de prova de dobramento, tanto de face quanto de raiz, temos a geometria apresentada na Figura 31(b) e Figura 31(c) e suas dimensões seguem a especificação da ASME seção IX - QW-160.

Figura 31 - Geometria para os CPs dos ensaio de tração e ensaio de dobramento de face e raiz..



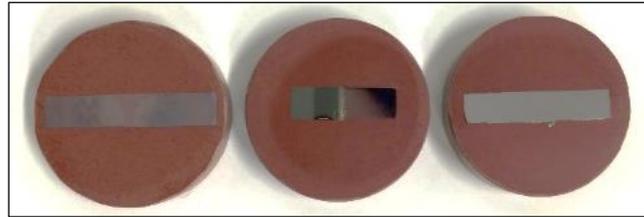
Fonte: autor (2015)

3.8 ENSAIOS METALOGRAFICOS

A análise metalográfica foi dividida em avaliações macrográficas e micrográficas, que foram realizadas no Laboratório de Metalografia - LAMET da Universidade de Caxias do Sul e conforme procedimentos a seguir.

Os corpos de prova foram extraídos conforme disposição do item 3.6 e foram embutidos com resina de baquelite, conforme Figura 32. Após o processo de embutimento, para análise macrográfica, foram utilizadas lixas a água com granulometria de 320, 400, 600 e 1200 lixadas em uma direção e a cada mudança de granulometria de lixa girado 90 graus afim de remover todas as marcas da lixa anterior.

Figura 32 - CPs embutidos em baquelite dos processos de soldagem GMAW, LW e FW.



Fonte: autor (2015)

Já a preparação da análise micrográfica foi realizada utilizando lixas a água com granulometria de 320, 400, 600 e 1200 da mesma maneira que na anterior e adicionando ao final um polimento manual com pasta de diamante de 3 μm .

3.8.1 Análise macrográfica

Na fase de análise macrográfica foram avaliadas a presença ou não de defeitos, descontinuidades existentes nas juntas soldadas, presença de impurezas e falta de fusão nas regiões de interface das soldas, falta de preenchimento na região de transição entre o material de base e material de adição se for o caso, chamadas neste trabalho de ZF, ZAC e MB da união soldada.

O procedimento de ataque químico dos corpos de prova embutidos foi realizado com o uso de uma solução de ácido nítrico (nital) 5% com o intuito de possuir maior contraste nas imagens efetuadas pelo microscópio óptico, após o ataque químico os corpos de prova foram limpos com álcool etílico e secados com o auxílio de um soprador térmico.

3.8.2 Análise micrográfica

Na análise micrográfica, foram obtidas imagens da superfície utilizando um microscópio óptico modelo Nikon DMX 1200 com qualidade de 200 dpi com aumento de até 1000x, buscou-se um mapeamento de todas as regiões de interface da união soldada, estruturas presentes nas regiões de material de base e ZAC. O procedimento de ataque químico foi semelhante ao da análise macrográfica porém com a solução de ácido nítrico (nital) 2%.

3.9 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Após os corpos de prova serem submetidos aos processos de soldagem já descritos, foi feita inspeção visual dos cordões de solda obtidos. Foram analisadas características tais como:

má formação do cordão de solda, falta de deposição ou reforços excessivos, mordeduras, existência de respingos e trincas ou rechupes de cratera.

O processo de ensaio não destrutivo, chamado ultrassom, foi desenvolvido pela GERTEC¹, apresentado na Figura 33. O ensaio em questão possui alta sensibilidade, o que possibilita a detecção de pequenas discontinuidades internas, como por exemplo trincas, fissuras ou outros defeitos de difícil detecção.

Figura 33 - Ensaio de ultrassom.



Fonte: GERTEC (2015)

O processo de líquidos penetrantes, ilustrado na Figura 34, foi executado na Soprano pelo setor de qualidade, com a finalidade de verificação de discontinuidades essencialmente superficiais, ou ainda que estão abertas na superfície, e, como exemplo, pode-se citar trincas e poros. Para o teste foram utilizados produtos da Magnaflux: para a limpeza dos corpos de prova, o Limpador SKC-S; o penetrante SKL-WR; após 15 minutos removeu-se o mesmo utilizando o Limpador inicial; e por fim, aplicou-se em toda a superfície o Revelador SKD-S2 com o objetivo de identificar defeitos.

Figura 34 - Ensaio de líquidos penetrantes nos processos de soldagem GMAW, LW e FW.



Fonte: autor (2015)

¹ Empresa de Condor/RS que atua em projeto de produtos, inspeção de solda e Ultrassom e treinamentos.

3.10 ENSAIO DESTRUTIVOS

Os ensaios destrutivos de tração, de dobramento face e raiz são caracterizados a seguir e foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos - (LAMEC) da Universidade de Caxias do Sul. Para o ensaio de tração foi utilizado uma máquina da marca EMIC modelo DL20000 com célula de carga ref. TRD 12 e software Tesc versão 3.01, conforme Figura 35(a) e para ensaio de dobramento de face e raiz foi utilizado uma máquina da marca WPM Werkstoffprüfsysteme Leipzig de fabricação 218/6, conforme Figura 35(b).

Figura 35 - Equipamento para ensaio de (a) tração e (b) dobramento.



Fonte: autor (2015)

3.10.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração caracteriza-se por submeter um corpo de prova, com geometria definida, a um esforço crescente de tração, aplicado continuamente levando-o a se romper e no simultâneo registro do alongamento em função da força aplicada. Os esforços ou cargas são medidos na própria máquina de ensaio. O mesmo fornece dados quantitativos das características mecânicas dos materiais e, também, relativos à capacidade de um sólido de suportar cargas aplicadas a sua estrutura, por isso é muito utilizado na indústria de componentes mecânicos.

Para efeito de avaliação, os corpos de prova devem romper fora do cordão de solda, o que é exigido pela norma ASME seção IX - QW-160, caso o corpo de prova rompa no cordão de solda a norma exige que isso deva ocorrer para uma tensão 5% maior que o limite de escoamento do aço sem solda, garantindo a confiabilidade da junção.

3.10.2 Ensaio de dobramento

O ensaio de dobramento foi executado conforme norma ASME seção IX - QW-160 e com a finalidade de uma análise qualitativa para verificar a sanidade do cordão e da ZAC. Conforme Madeira e Modenesi (2010), este ensaio é determinante no processo de qualificação do processo de soldagem, sendo capaz de aprovar ou não a qualidade da junta.

3.11 FERRAMENTA PARA VALORAÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM

A fim de colaborar para uma melhor escolha ao final deste estudo, o objetivo desta etapa foi montar uma matriz conforme Quadro 5, com objetivos obrigatórios e desejáveis referentes aos processos de soldagem GMAW, LW e FW. Primeiramente nos objetivos obrigatórios definimos requisitos que se não atendidos impossibilitam o andamento da avaliação do processo analisado, classificando-o em aprovado ou reprovado.

A seguir, caso o processo seja considerado aprovado quanto aos critérios de limite resistência do material base e ausência de defeitos, procede-se com a avaliação dos objetivos desejáveis (expectativas com relações a avaliação da viabilidade de cada processo).

Quadro 5 – Matriz de avaliação dos processos GMAW, LW e FW.

Critérios de Avaliação		Alternativa 1	Alternativa 2		Alternativa 3					
Objetivos obrigatórios		GMAW	LW		FW					
LR do Material Base	565 MPa	xxx MPa	xxx MPa		xxx MPa					
Defeitos	Porosidade, Trincas, Falta de Fusão									
		↓	↓		↓					
Objetivos desejáveis	Peso	Comentários	Pontos		Comentários	Pontos		Comentários	Pontos	
			Nota	Total		Nota	Total		Nota	Total
Consumo de Energia	W_i	_____	A	$A * W_i$	_____	A	$A * W_i$	_____	A	$A * W_i$
Material de Adição	W_i	_____	A	$A * W_i$	_____	A	$A * W_i$	_____	A	$A * W_i$
Volumes de Fabricação	W_i	_____	A	$A * W_i$	_____	A	$A * W_i$	_____	A	$A * W_i$
Geometrias	....	.....	....	....	.....	....	....	.....	....	....
Investimento	....	.....	....	....	.....	....	....	.....	....	....
Manutenção Equipamento	....	.....	....	....	.....	....	....	.....	....	....
Abertura de Novos Negócios	....	.....	....	....	.....	....	....	.....	....	....
Facilidade de Operação	....	.....	....	....	.....	....	....	.....	....	....
Pontuação Máxima	8 x 10	-	-		-		-		-	
Pontuação Total			$\sum A * W_i$			$\sum A * W_i$			$\sum A * W_i$	

Fonte: adaptado de Kepner e Tregoe (1972)

Em seguida, definiram-se critérios generalizados envolvidos no processo de união

soldada e encaminhou-se para avaliação à uma lista de contatos que tem experiência com o seguimento de soldagem através da ferramenta do Google Docs. Estes classificaram por ordem de importância a lista com os critérios, onde oito correspondia ao critério mais relevante e um ao menos relevante, conforme Quadro 6.

Quadro 6 – Classificação de critérios por ordem de importância.

Em uma escala de 1 a 8, sendo 1= menos importante e 8= mais importante, classifique em ordem de importância para a escolha do processo de soldagem os seguintes critérios:	Valor
Consumo de Energia	W_i
Material de Adição	W_i
Volumes de Fabricação	W_i
Geometrias	...
Investimento	...
Manutenção Equipamento	...
Abertura de Novos Negócios	...
Facilidade de Operação	...

Fonte: adaptado de Back *et al* (2008)

Posteriormente ao tratamento dos dados obtidos, foi calculada a média de cada critério e então montada a tabela de pesos correspondentes a cada um. No segundo momento, com os dados coletados através deste estudo e revisão bibliográfica foi utilizando uma escala de 1, 5 ou 10, sendo: 1 não atende as expectativas, 5 atende parcialmente as expectativas e 10 atende satisfatoriamente as expectativas.

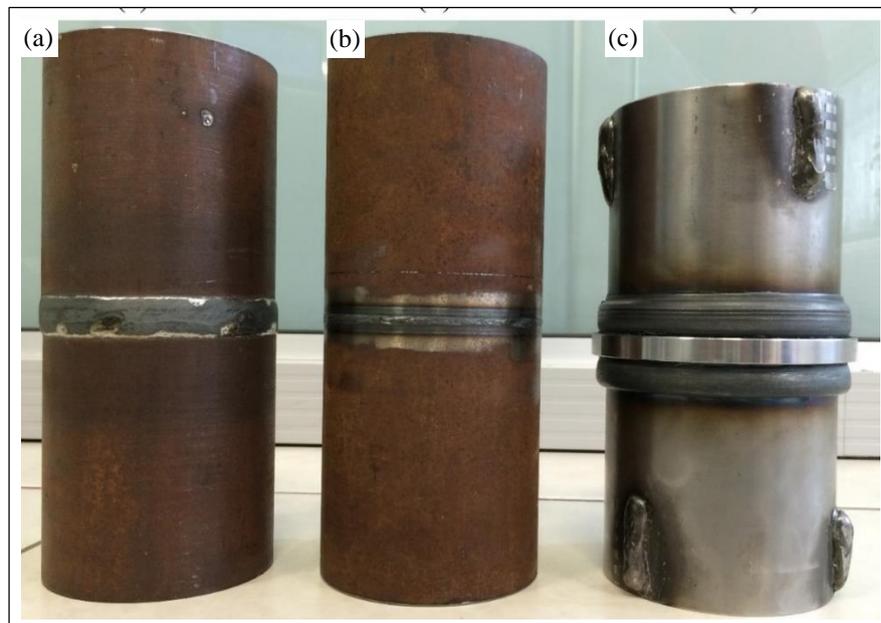
Concluído o processo de avaliação, aplicou-se a soma total dos oito critérios desejáveis e verificou-se qual obteve a pontuação mais elevada. Deste modo esta ferramenta orientaria na escolha do processo de soldagem mais qualificado, conforme os itens elencados nesta análise.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

O objetivo deste tópico é apresentar os resultados das análises obtidos através dos testes realizados, assim como validar os mesmos, com base nos referenciais teóricos abordados nos capítulos anteriores.

A Figura 36 mostra o registro dos CP soldados em cada um dos três processos de soldagem, podendo ser verificado (a) no CP do processo GMAW, o surgimento de escória de sílica e reforço no cordão de solda. Já em (b), no CP do processo LW, tem-se uma ZAC menor, porém com falta de material base no ponto final em que o feixe de Laser cessou. Por fim, em (c) no CP do processo de FW, observa-se uma ZAC muito maior quando comparada com as outras, além disso pode-se destacar a presença de rebarba em formato de fita semelhante ao do processo de usinagem, que por sua vez é proveniente do cisalhamento do anel intermediário ou material de base no processo inicial de contato entre as superfícies.

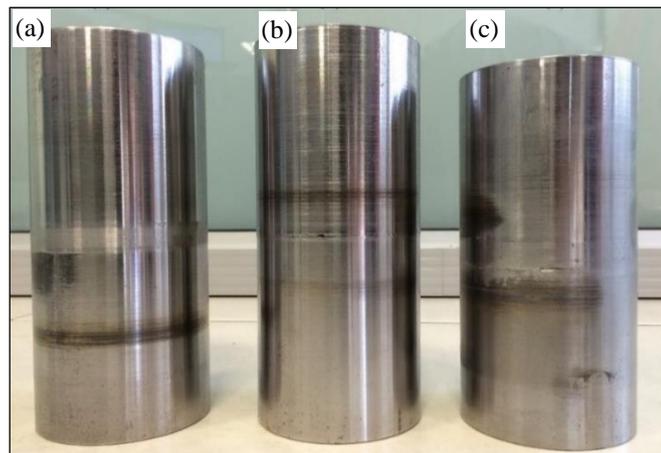
Figura 36 - Corpo de prova (a) GMAW, (b) LW e (c) FW.



Fonte: autor (2015)

Ainda observando os CP acima, pode-se verificar que não foram evidenciados respingos de solda ou porosidade, mordeduras e falta de fusão. Em seguida, foi executada a remoção dos reforços pelo processo de torneamento, conforme Figura 37, resultando em um desalinhamento em todos os CP. Além disso, através do processo de usinagem, ficou mais evidente a falta de material base no CP do processo LW, onde pode-se inclusive ver a existência de porosidade.

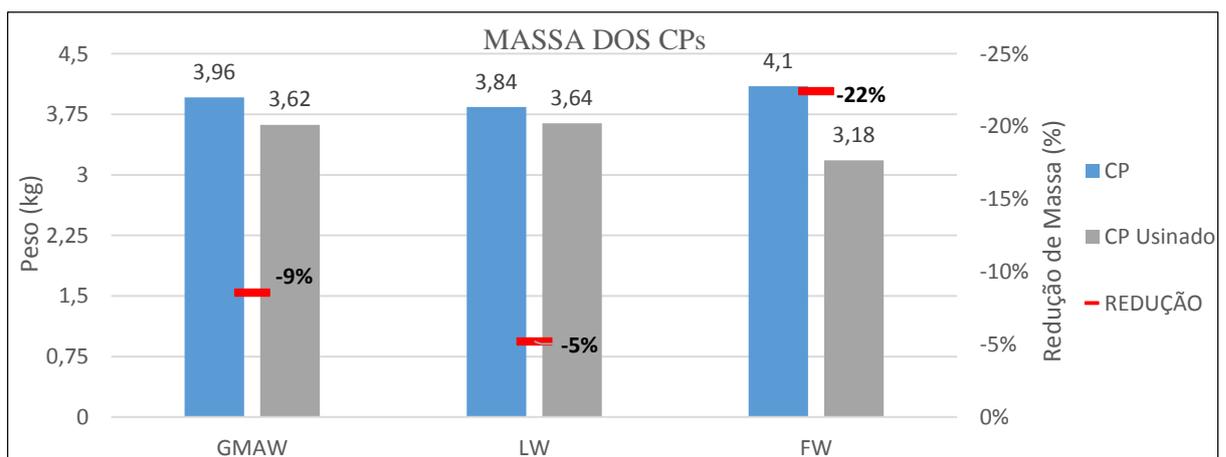
Figura 37 - Corpo de prova após usinagem (a) GMAW, (b) LW e (c) FW.



Fonte: autor (2015)

Após a remoção dos reforços pelo processo de torneamento, observou-se também que no CP do processo GMAW houve uma redução de massa de 9% o que representa 0,34 kg relativa ao peso inicial, já no LW a perda corresponde à 5% e representa 0,2 kg. Por fim, no processo FW, redução de 22% sendo 0,92 kg a menos, cujos dados podem ser visualizados na Figura 38. A massa removida em maior quantidade no processo FW deve-se ao alto recalque do tubo na execução do processo de soldagem. Esta análise teve por objetivo mensurar a perda de material, visto que o objetivo do estudo é reaproveitar ao máximo a matéria prima descartada.

Figura 38 - Dados coletados dos CPs pré e pós usinagem.



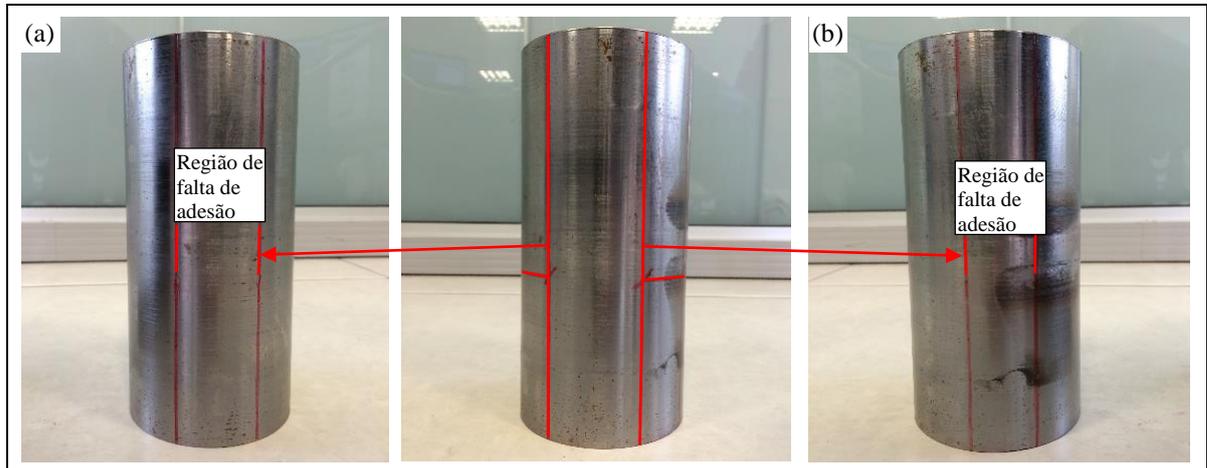
Fonte: autor (2015)

4.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os ensaios de ultrassom relativos aos processos GMAW e LW não apresentaram trincas longitudinais e transversais, nem falta de penetração e fusão, porosidade, mordedura,

sobreposição ou inclusão de escória. Conforme Figura 39, no FW verificou-se a falta de adesão em duas regiões, em 39(a) a uma profundidade de 2,6 mm e em 39(b) a uma profundidade de 1,6 mm da superfície.

Figura 39 - Localização da falha no processo FW: (a) profundidade de 2,6 mm e (b) profundidade de 1,6 mm.

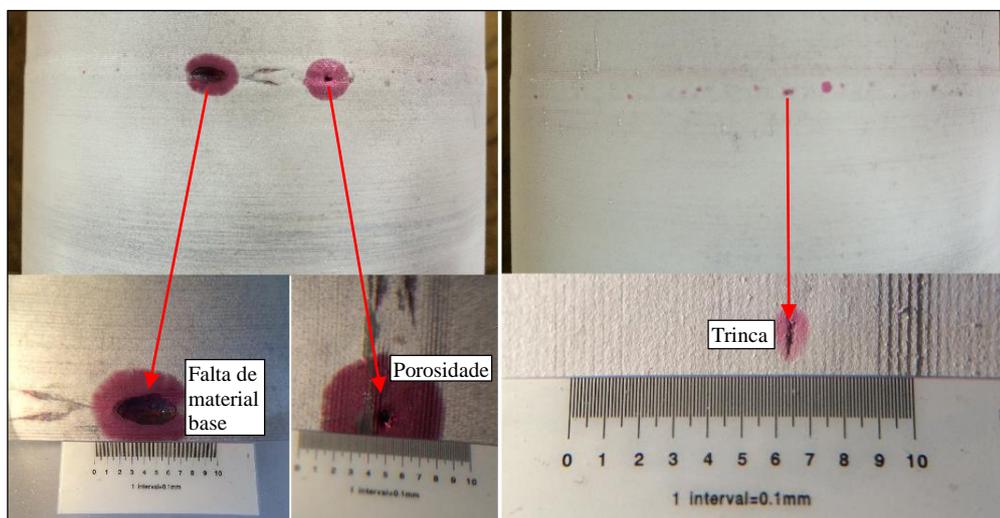


Fonte: autor (2015)

Demais características analisadas nos ensaios ultrassom estão anexadas ao final deste estudo (Anexos C, D e E).

No ensaio de líquidos penetrantes foi possível evidenciar a isenção de defeitos no CP do processo de soldagem GMAW. Já no CP do processo LW evidenciou-se presença de porosidade, trincas e a falta de material de base, conforme Figura 40. O defeito mais visível corresponde à região onde cessou o feixe de laser, percebe-se neste local o surgimento de uma cavidade grande no cordão de solda.

Figura 40 - Ensaio de líquidos penetrantes no processo LW.



Fonte: autor (2015)

No que diz respeito ao processo de soldagem FW, conforme Figura 41, identificou-se sobreposição de material base proveniente do processo de caldeamento que ocorre no momento da fricção.

Figura 41 - Ensaio de líquidos penetrantes no processo FW.



Fonte: autor (2015)

4.2 ENSAIOS DESTRUTIVOS

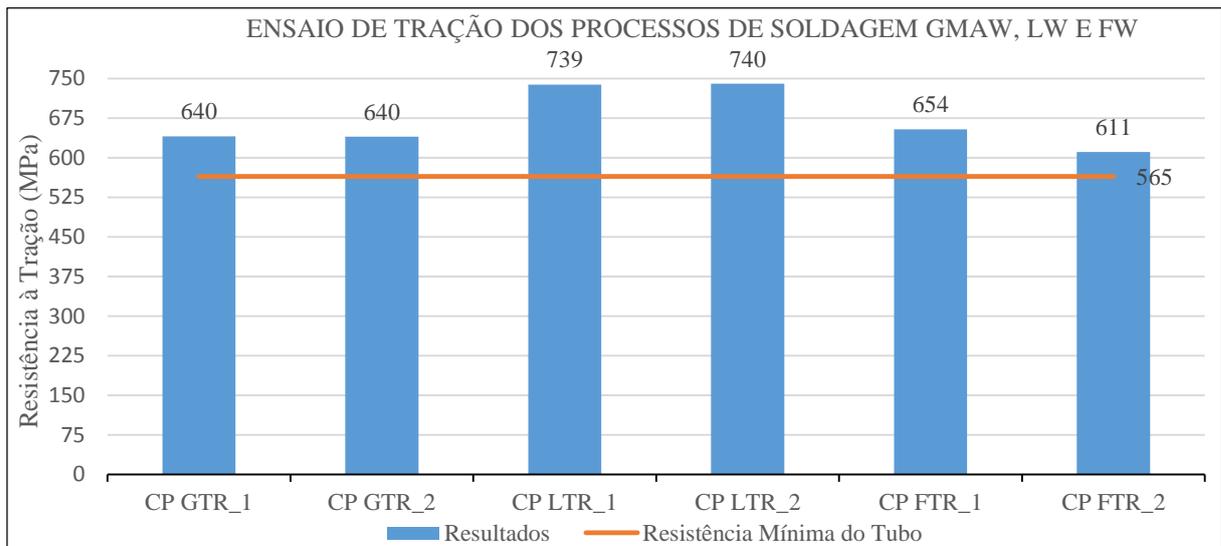
4.2.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração dos processos de soldagem GMAW, LW e FW foram realizados nos CPs GRT_1, GTR_2, LRT_1, LTR_2, FRT_1 e FTR_2 e apresentaram dispersão conforme pode-se verificar no Apêndice A (Gráficos Tensão x Deformação). O limite de resistência a tração de ambos os CPs identificados por GRT_1 e GTR_2 foi de 640 MPa, estando acima do limite de resistência a tração do arame de solda ER70S-6 que é de 583 MPa e também do limite de resistência mínima do material base. Fato que também ocorreu para os CPs LRT_1 e LTR_2 que apresentaram 739 e 740 MPa.

Já os CPs FRT_1 e FTR_2 tiveram como resultado 634 e 611 MPa, estando abaixo do limite de resistência a tração do anel intermediário que é de 678 MPa e acima da resistência mínima do material de base que é de 565 MP.

A dispersão do limite resistência mínima do material, bem como os resultados de todos os CPs dos processos de solda pós ensaio estão apresentados na Figura 42. Pode-se verificar, que para todos os CPs, os resultados apresentados estão acima da resistência mínima conforme certificado que acompanha o material do fornecedor. Assim sendo, conclui-se que ambos estariam atendendo as características de utilização da matéria prima mesmo após o processo de soldagem.

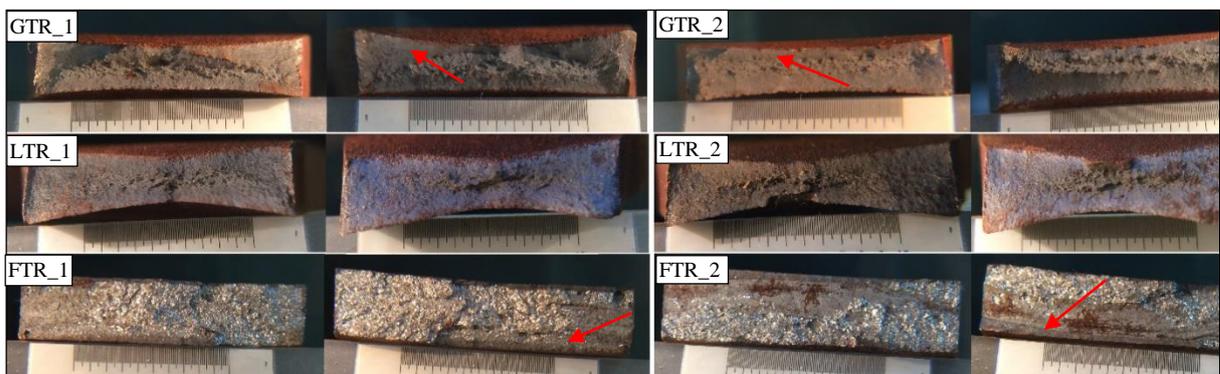
Figura 42 - Resultados do ensaio de tração dos processos de soldagem GMAW, LW e FW.



Fonte: autor (2015)

Para os CPs GTR_1, GTR_2, FTR_1 e FTR_2 as fraturas ocorreram na região de metal de adição e no CPs do processo de soldagem LW identificados por LTR_1 e LTR_2 as fraturas ocorreram na região de material de base. A Figura 43 mostra as fraturas presentes nos CPs de cada processo de soldagem e, além disso, pode-se verificar a presença de falta de adesão nos CPs GTR_1, GTR_2, FTR_1 e FTR_2 indicadas pelas setas.

Figura 43 - Região em que ocorreram as fraturas nos CPs (a) GRT_1 e (b) GTR_2.



Fonte: autor (2015)

4.2.2 Ensaio de Dobramento de Face e de Raiz

Os ensaios de dobramento de face e raiz foram executados nos CPs GRT_1, GTR_2, LRT_1, LTR_2, FRT_1 e FTR_2 tendo como resultado os dados apresentados no Quadro 7. O resultado para os CPs do processo de soldagem GMAW foram satisfatórios tanto para dobramento de face quanto raiz e não apresentaram nenhuma trinca e/ou fissura na região do

cordão de solda.

No CPs LDF_1 e LDF_2 houve o rompimento após o início do ensaio de dobramento de face e isso se deve a presença de porosidade causada pela falta de material de base. Tal porosidade está presente até a profundidade aproximada de 3 mm, resultando na reprovação deste processo neste quesito. Já no ensaio de dobramento de raiz, identificados por LDR_1 e LDR_2, tivemos um resultado satisfatório, sem a presença de defeitos na região de raiz da união soldada.

Quadro 7 - Resultados dos ensaios de dobramento de face e raiz.

CP	RESULTADO DO ENSAIOS
GDF_1	Não apresentou trincas e/ou fissuras
GDF_2	Não apresentou trincas e/ou fissuras
GDR_1	Não apresentou trincas e/ou fissuras
GDR_2	Não apresentou trincas e/ou fissuras
LDF_1	Rompeu
LDF_2	Rompeu
LDR_1	Não apresentou trincas e/ou fissuras
LDR_2	Não apresentou trincas e/ou fissuras
FDF_1	Apresentou defeito < 3 mm
FDF_2	Rompeu
FDR_1	Não apresentou trincas e/ou fissuras
FDR_2	Rompeu

Fonte: autor (2015)

No CP, FDF_1 surgiu uma fissura maior que 3 mm o que reprova o mesmo no teste conforme ilustra a Figura 44. Já nos FDF_2 e FDR_2 ocorreu o rompimento no cordão de solda e no CP FDR_1 não foi observado nenhum tipo de defeito. Assim, tem-se uma falta de repetitividade nos resultados, isso se deve, possivelmente, a falta de adesão e/ou um possível desalinhamento entre as geometrias ocasionando má homogeneidade da zona fundida.

Figura 44 - Região em que ocorreu a fissura no CP FDF_1 do processo de soldagem FW.



Fonte: autor (2015)

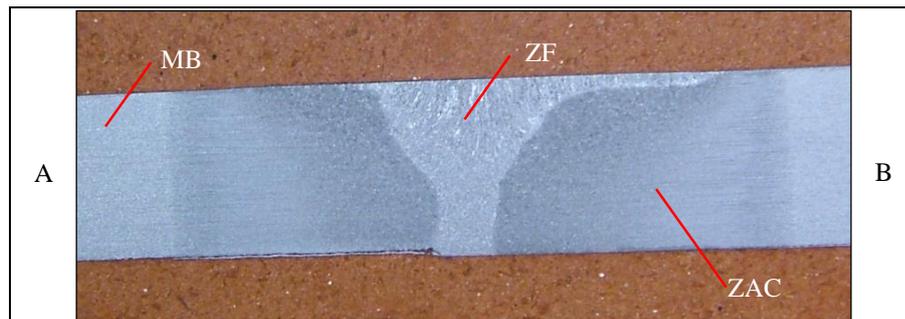
4.3 ENSAIOS METALOGRÁFICOS

4.3.1 Análise Macrográfica

Inicialmente foram verificadas as macrografias dos CPs de cada processo de soldagem, conforme Figura 45 para o processo GMAW, Figura 46 para o processo LW e Figura 47 para o processo FW.

Pode-se verificar na Figura 45, obtida no CP identificado por GM a presença de uma região de ZF pequena proveniente do primeiro passe e uma ZF muito maior no segundo passe causado pela oscilação inconstante que ocorreu na região do cordão de solda. Ainda na mesma imagem, observa-se uma ZAC significativa que foi causada por um aporte térmico maior que o do processo LW e menor que a do processo FW conforme veremos a seguir.

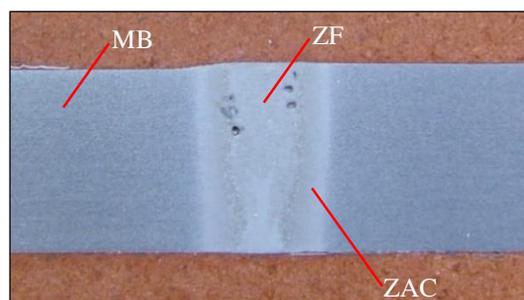
Figura 45 - Macrografia do CP identificado por GM do processo de soldagem GMAW.



Fonte: autor (2015)

Na Figura 46, apresenta-se a macrografia do CP LM com aporte térmico baixo, o que resulta em uma ZF muito pequena e menor que todos os outros processos de soldagem. Além disso, observa-se uma ZAC muito pequena. Ficou visível também a quantidade elevada de porosidade da face da junta soldada, consequência da falta de material em função do chanfro necessário para que houvesse a fusão de toda a espessura do tubo.

Figura 46 - Macrografia do CP identificado por LM do processo de soldagem LW.



Fonte: autor (2015)

Já na Figura 47 traz-se a macrografia do CP FM no qual a energia empregada é mais elevada resultando em uma ZAC muito maior que os processos anteriores. O processo de caldeamento do lado B2 é maior que o do lado B1, isso porque na solda do lado B1 o atingimento da temperatura de caldeamento é mais rápido em função da baixa condutividade do calor para B2. Já a solda B2 foi realizada com um tempo maior para o atingimento da temperatura pelo fato de que B1 já estava soldado, colaborando com a condução de calor entre o anel intermediário (material de adição) e material de base (tubo) do lado B1.

Figura 47 - Macrografia do CP identificado por FM do processo de soldagem FW.



Fonte: autor (2015)

As dimensões de cada região das análises macrograficas anteriores podem ser verificadas conforme Quadro 8. Pode-se constatar que nos processos GMAW e FW, devidos aos maiores níveis de energia as regiões de ZAC foram muito maiores, quando comparado com as do processo LW. Ainda, no processo GMAW uma ZF de face muito maior que o processo LW, já no processo FW não ocorreu ZF e sim o processo de caldeamento que foi maior no lado B2 em função do aporte de energia ter sido maior.

Quadro 8 – Dimensões de cada região dos CPs dos processos de soldagem GMAW, LW e FW.

CP GM	DIMENSÃO	CP LM	DIMENSÃO	CP FM	DIMENSÃO
ZF de Face	13,44 mm	ZF de Face	3 mm	Caldeamento (B1)	1,34 mm
ZF de Raiz	2,19 mm	ZF de Raiz	1,9 mm	Caldeamento (B2)	2,71 mm
ZAC de Face (A)	6,77 mm	ZAC da Face	1 mm	ZAC (B1)	2,28 mm
ZAC de Raiz (A)	9,23 mm	-	-	ZAC (B2)	3,78 mm
ZAC de Face (B)	2,24 mm	-	-	ZAC de Face Anel Intermediário	5,67 mm
ZAC de Raiz (B)	10,70 mm	-	-	ZAC no Meio Anel Intermediário	3,58 mm
-	-	-	-	ZAC de Raiz Anel Intermediário	10,31 mm

Fonte: autor (2015)

4.3.2 Análise Micrográfica

A seguir serão apresentadas as microestruturas das diferentes regiões de cada CP dos processos de soldagem GMAW, LW e FW. Na Figura 48 tem-se a superfície de MB dos tubos (a), (b) e (c) que passaram pelo processo de conformação mecânica (laminação) apresentando aspecto de textura alinhada em faixas paralelas. Além disso, pode-se observar que a região não foi alterada pelo processo de soldagem e que as microestruturas são caracterizadas basicamente por ferrita (FE) e perlita (PE). Já na ZAC do anel intermediário da Figura 48(d) tem-se os mesmos microconstituintes, porém com crescimento de grãos em função do aporte térmico.

Conforme Figura 49(c) na região de ZAC tem-se a presença de ferrita (FE) e perlita (PE). Mais próximo da região de interface, entre a ZF e ZAC, ilustrada na Figura 49(e), tem-se os mesmos microconstituintes, porém com grãos menores, ocasionados pelo resfriamento rápido após aquecimento. Já na Figura 49(b) tem-se a ZAC com a presença de ferrita (FE), ferrita de segunda fase não alinhada FE (NA) e ferrita segunda fase alinhada FE(A).

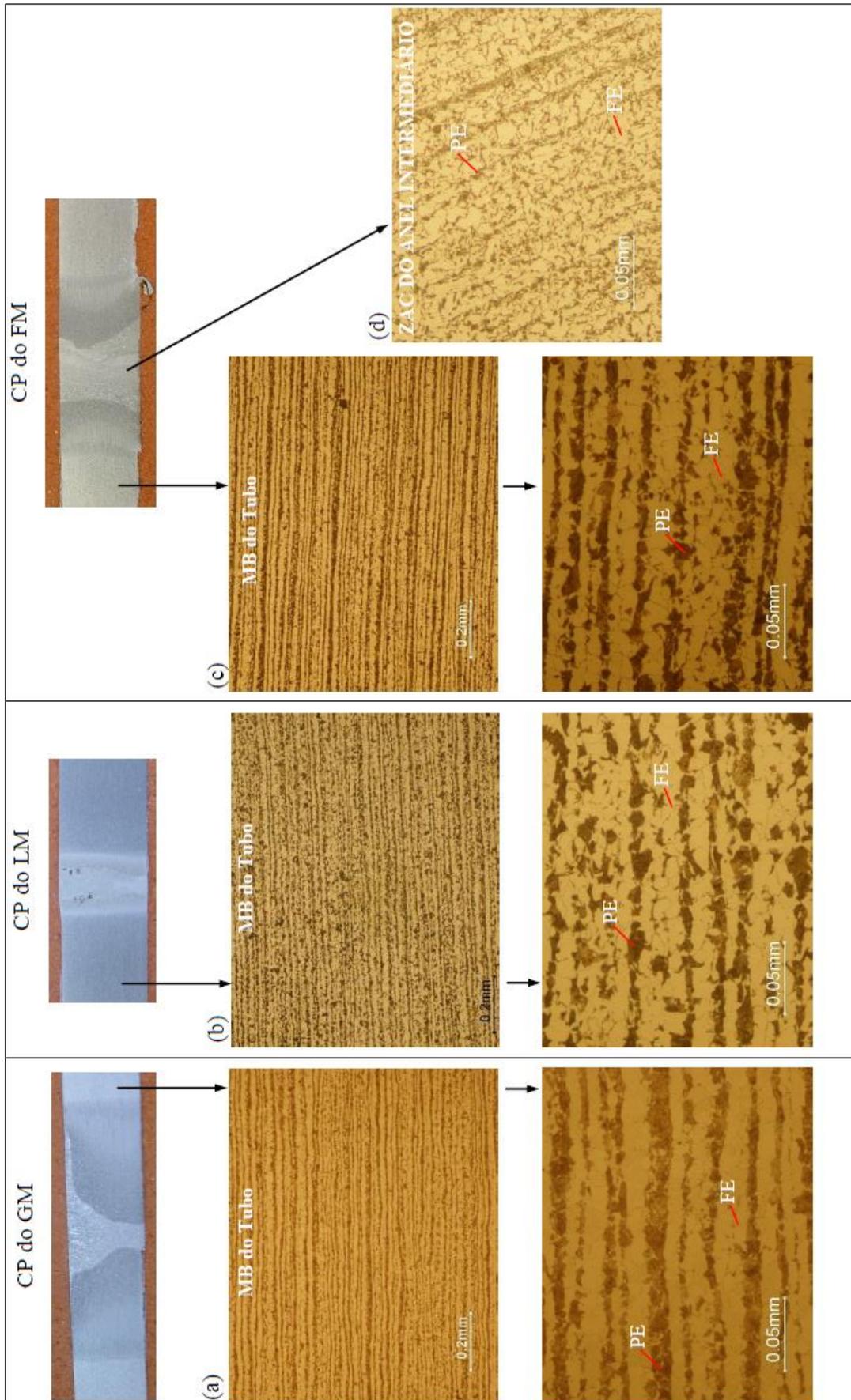
Na Figura 49(a) tem-se a ZF com passe de cobertura resultando em estrutura bruta de fusão com ferrita de contorno de grão (FG), perlita (PE) e agregados de ferrita carbonetos (AFC). Os mesmos podem ser encontrados da Figura 49(d) na qual visualiza-se o primeiro passe de raiz. Este passou por um ciclo de aquecimento em que removeu a estrutura bruta de fusão, constituindo assim uma estrutura mais homogênea.

Na Figura 50(a) tem-se a região de ZAC com tamanho de grão similar ao MB e com presença de perlita (PE) e ferrita (FE). Contudo, na Figura 50(b), há um aumento na quantidade de grãos de mesma base de microconstituintes.

Já na Figura 50(c) tem-se uma ZAC próxima a região de união da junta soldada onde possuímos um aporte térmico elevado e com isso o surgimento de martensita (M) e ferrita primária (FP). Na Figura 50(d) tem-se a ZF com os seguintes microconstituintes: ferrita de segunda fase alinhada FS(A) ou também conhecida como ferrita de Widmanstatten, ferrita acicular (FA) e ferrita primária (FP).

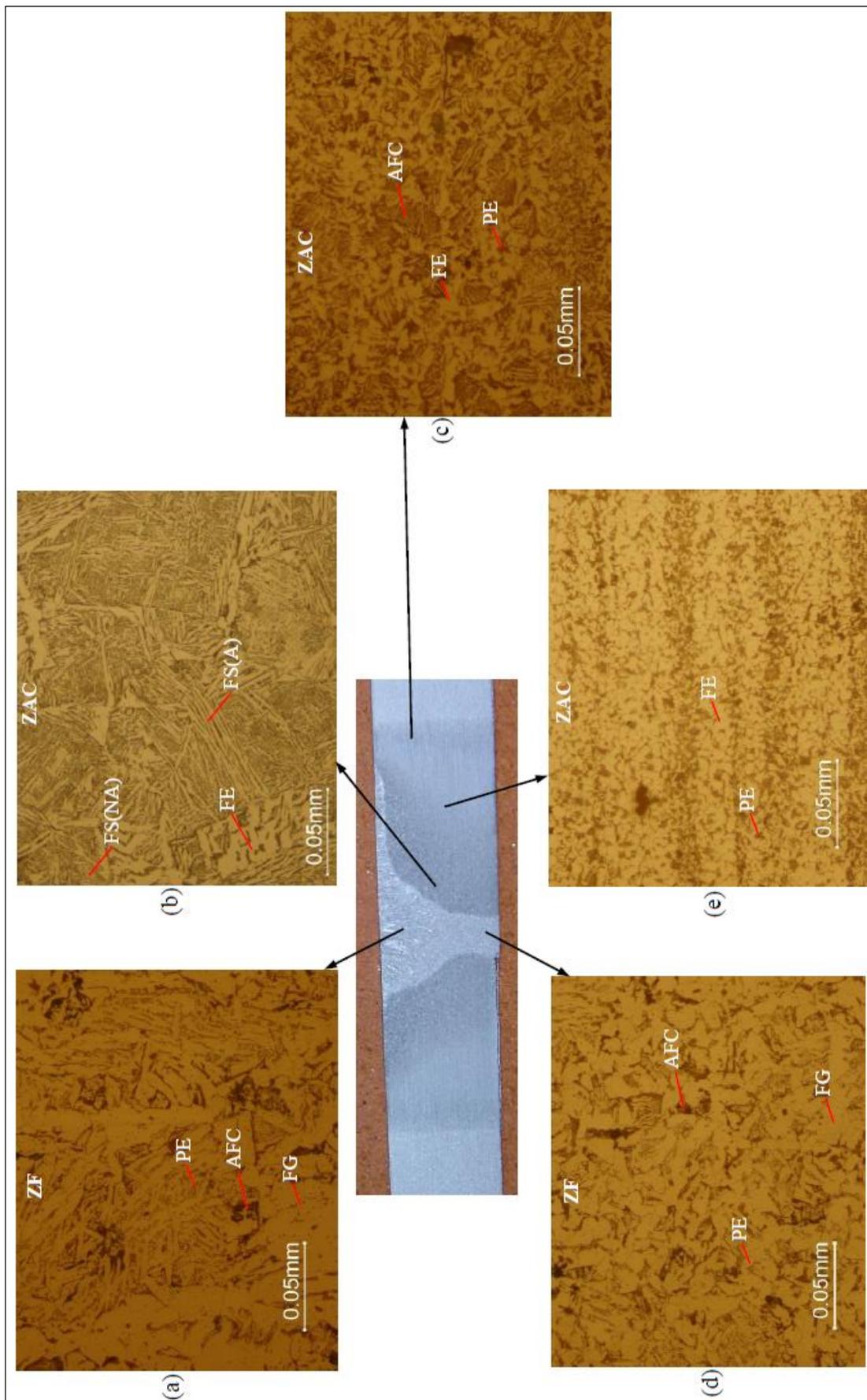
Conforme Figura 51(a), na região de ZAC tem-se a presença de ferrita (FE) e perlita (PE). Mais próximo da região de interface, entre a região de caldeamento e ZAC, Figura 51(b), tem-se os mesmo microconstituintes porém com grãos menores, ocasionados pelo aumento da temperatura. Já em (c) da mesma figura é possível observar a presença de ferrita acicular (FA), martensita (M) e ferrita primária (FP). Ainda na Figura 51(d), tem-se como microconstituintes a ferrita secundária não alinhada FS(NA), ferrita secundária alinhada FS(A) e inclusões provenientes da interface entre a região de caldeamento e ZAC do anel intermediário.

Figura 48 - Micrografia dos tubos e anel intermediário dos CP identificado por GM, LW e FW.



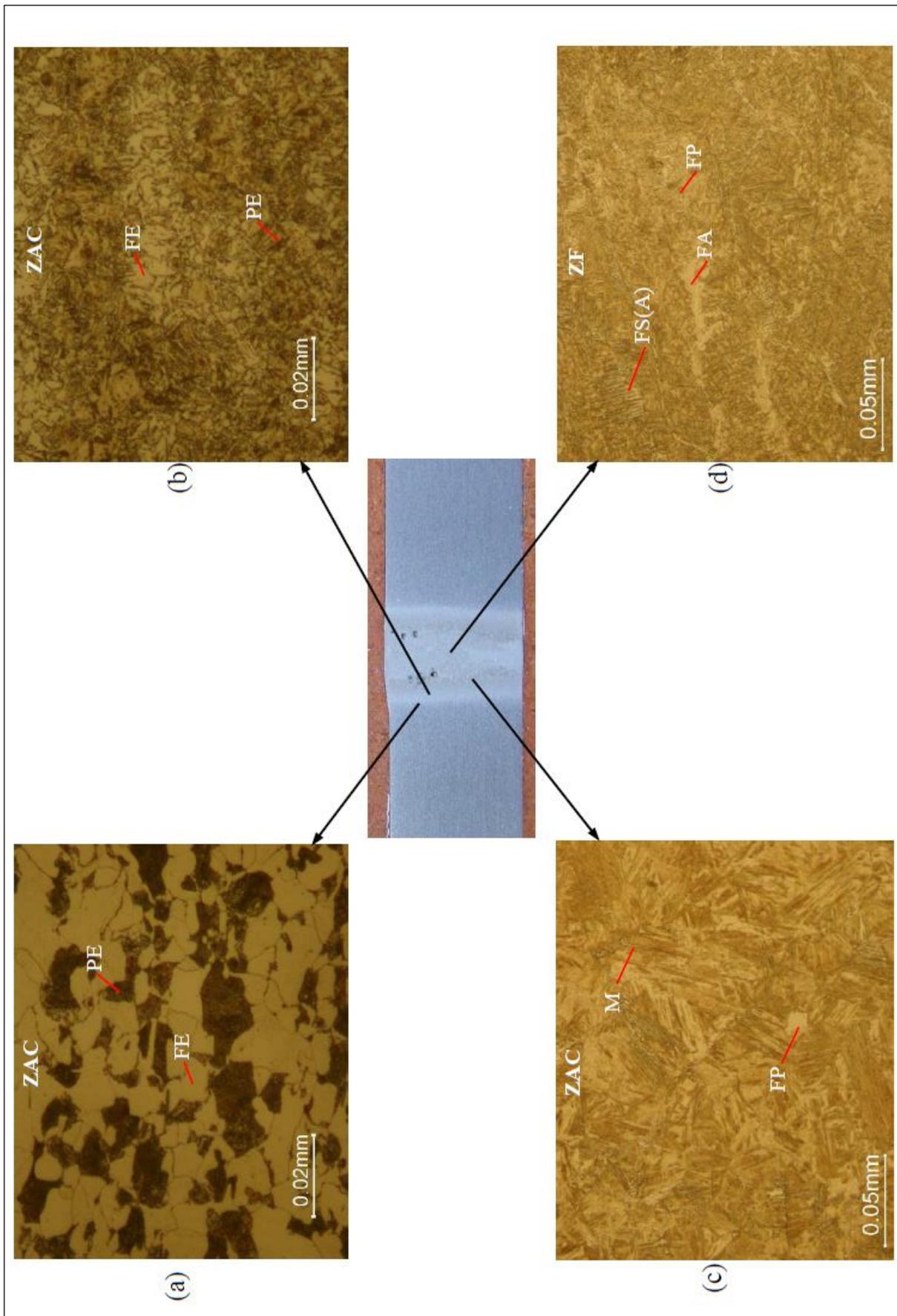
Fonte: autor (2015)

Figura 49 - Micrografia do CP identificado por GM do processo de soldagem GMAW.



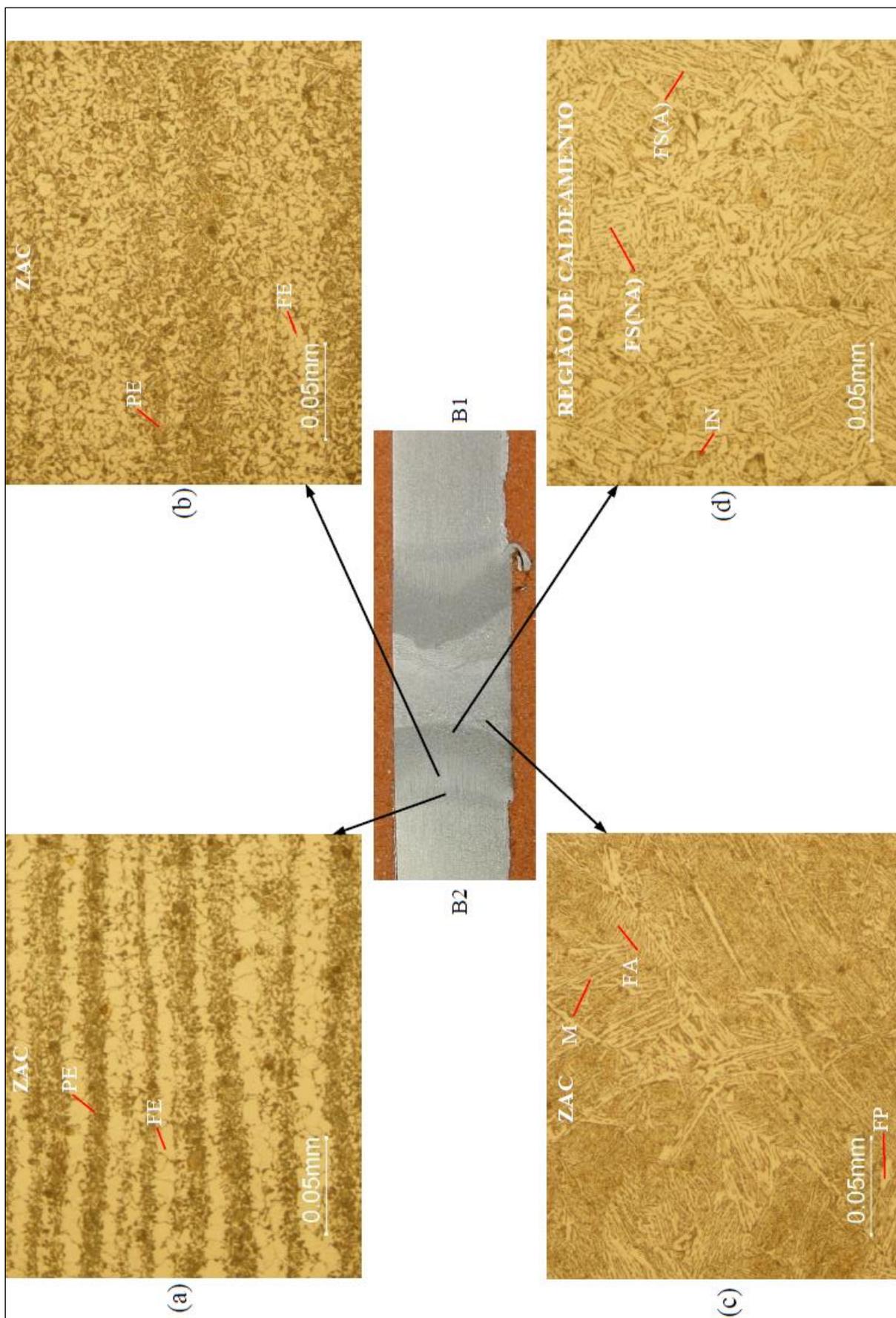
Fonte: autor (2015)

Figura 50 - Micrografia do CP identificado por LM do processo de soldagem LW.



Fonte: autor (2015)

Figura 51 - Micrografia do CP identificado por FM do processo de soldagem FW.



Fonte: autor (2015)

4.4 RESULTADO DA FERRAMENTA DE VALORAÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM

Conforme já mencionado, foram estabelecidos dois critérios (deveres) que são condições essenciais para a análise dos processos em questão. Estes dois critérios correspondem ao limite de resistência do material base e presença de defeitos na união soldada.

Para o processo GMAW, LW e FW obteve-se limite resistência superior ao valor referência de 565 MPa em todos os processos avaliados. Contudo, na análise de existência de defeitos observa-se que o único processo que atende os requisitos esperados é o processo de soldagem GMAW. Consideram-se reprovados os CPs do processo LW pelo fato de observar-se trincas, porosidade e falta de fusão, e os CPs do processo FW, pelo fato de apresentar falta de adesão no cordão de solda e internamente.

Assim, procede-se apenas a análise seguinte para o processo GMAW, aprovado na etapa anterior, conforme Quadro 9. Na coluna “Peso” foram atribuídas médias conforme dados coletados via Google Docs com uma amostra de contatos que tem experiência no segmento de soldagem. Na coluna “Comentários” elencam-se características de cada processo de acordo com o referencial teórico e com os dados coletados durante o estudo.

Quadro 9 – Matriz de resultados da avaliação dos processos GMAW, LW e FW.

Critérios de Avaliação		Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3		
Objetivos Obrigatórios		GMAW			LW			FW		
LR do Material Base	565 MPa	640 MPa			739 – 740 MPa			611 – 654 MPa		
Defeitos	Porosidade, Trincas, Falta de Fusão	Nenhum			Trinca, Porosidade e falta de Fusão			Falta de Adesão		
		Aprovado			Reprovado			Reprovado		
Objetivos Desejáveis	Peso	Comentários	Pontos		Comentários	Pontos		Comentários	Pontos	
			Nota	Total		Nota	Total		Nota	Total
Consumo de Energia	5	1790 J/mm	5	25	50 J/mm	10	50	120 MJ/mm	1	5
Material de Adição	3,33	Arame de Solda	5	16,65	Não Utiliza	10	33,33	Anel Intermediário	1	3,33
Volumes de Fabricação	3,66	Baixos	10	36,6	Médio	5	18,3	Altos	1	3,66
Geometrias	5,33	Não há	10	53,3	Não há	10	53,3	Limitado	5	26,65
Investimento	2,66	Baixo	10	26,6	Médio	5	13,3	Alto	1	2,66
Manutenção Equipamento	5,33	Fácil	10	53,3	Médio	5	26,65	Difícil	1	5,33
Abertura de Novos Negócios	5,66	Não	1	5,66	Corte a Laser	5	28,3	Linha Pesada	10	56,6
Facilidade de Operação	5	Fácil	10	50	Média	5	25	Difícil	1	5
Pontuação Total		267,11			248,18			108,23		

Fonte: autor (2015)

Analisando os resultados das colunas “Peso” e “Comentários” atribuiu-se uma nota para cada critério desejado (onde 1 não atende as expectativas, 5 atende parcialmente as

expectativas e 10 atende satisfatoriamente as expectativas), sendo o total o produto entre as colunas “Peso” e “Nota”. Por fim, é atribuída uma pontuação final através do somatório da coluna “Total” em cada processo analisado.

Como pode-se observar no Quadro 9, o processo GMAW foi o único aprovado nos objetivos obrigatórios. Quanto aos outros processos, consideram-se os dados obtidos como não relevantes, uma vez que os CPs dos processos foram reprovados já na etapa inicial correspondente aos critérios essenciais para sua aprovação.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que é possível a união de tubos mecânicos ST52 BKW utilizando os três processos de soldagem analisados (GMAW, LW e FW), afim de minimizar o descarte de matéria prima pré consumo, reduzindo os impactos ambientais ocasionados pelo descarte, diminuindo os custos com compra de matéria prima e com o menor desperdício de matéria prima utilizada na produção de cilindros hidráulicos.

Deve-se salientar que as conclusões obtidas e aqui relatadas se referem ao um universo muito restrito, sendo que os CPs que aqui tornam-se não aprovados, poderiam tornar-se qualificados com a aprimoramento dos parâmetros/técnicas ou utilização de outros equipamentos. Assim este é um estudo preliminar e que pode ser ampliado e aprimorado futuramente.

Quanto os testes realizados, pode-se apontar que após o processo de usinagem por torneamento dos CPs evidenciou-se que estes apresentaram desalinhamento entre os tubos soldados. Ainda, no que diz respeito a inspeção visual, observou se a falta de material base no processo LW e a maior perda de massa (-22%) pós usinagem no processo FW devida ao recalque. Já o processo GMAW não apresentou defeitos na inspeção visual.

Conforme ensaio de ultrassom, verificou-se a inexistência de defeitos nos CPs dos processos GMAW e LW. Quanto ao CPs do processo FW obteve-se falta de adesão em duas regiões em profundidades de 1,6 mm e 2,6 mm.

Já no ensaio de líquidos penetrantes, nota-se novamente a isenção de defeitos no CP do processo GMAW. O CP do processo de soldagem LW evidenciou falta de material base, presença de porosidade e trincas e, o CP do processo FW, apresentou sobreposição de material base proveniente do processo de caldeamento que ocorre no momento da fricção.

Tratando dos ensaios destrutivos, observou-se no ensaio de tração que todos os CPs tiveram resultados satisfatórios, estando acima do limite mínimo de resistência a tração que é de 565 MPa (GMAW sendo 640 MPa, LW sendo 739 – 740 MPa e FW sendo 611 – 654 MPa).

No ensaio de dobramento de face e raiz pode-se destacar que o único CP que garantiu a sanidade do cordão de solda foi o do processo GMAW. No CP do processo LW ocorreu o rompimento no dobramento de face causada por porosidade gerada pela falta de material base. Por fim, os CPs do processo FW apresentaram heterogeneidade de resultados, dentre eles pode-se evidenciar rompimento de CPs e surgimento de trincas.

No ensaio macrográfico dos CPs do processo LW verifica-se uma ZF e ZAC reduzida quando comparadas com as dos CPs do processo GMAW e para os CPs do processo FW tem-se duas regiões caldeadas e três ZACs. Para a análise micrográfica tem-se o surgimento de martensita nas regiões de ZAC dos processos LW e FW e predominância de ferrita (FE) e perlita (PE) nas regiões de ZF e ZAC do processo GMAW.

Analisando os resultados da ferramenta de valoração, mais uma vez evidencia-se a qualificação dos CPs do processo GMAW. Os CPs dos processos restantes foram reprovados ainda na etapa inicial devido ao não atendimento do critério “defeitos”.

Desta forma, pode-se dizer que os resultados obtidos nos variados testes realizados tornam o processo GMAW o mais qualificado para a união de tubos mecânicos ST52 BKW para os CPs avaliados e de acordo com os parâmetros utilizados.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo da aplicabilidade do processo LW para outros diâmetros e espessuras de tubos mecânicos;
- Avaliação da resistência a fadiga e impacto nas juntas obtidas pelos processos de soldagem GMAW, LW e FW em tubo mecânico ST52 BKW;
- Desenvolver processo de soldagem por arco submerso para aplicação no reaproveitamento de tubos mecânicos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1** – Structural welding code steel. Miami, 2010.

ARCELORMITTAL. **Certificado tubo ASTM A513**. Brasil, 2014.

ASM Handbook. *Welding, Brazing and Soldering. United States*: ASM International, 1994. v. 6, cap. Procedure Development and Practice Considerations for Solid-State Welding.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11889: **Bobinas e chapas grossas de aço carbono e de baixa liga e alta resistência**: requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

BACK, N. *et al.* **Projeto integrado de produtos**: planejamento, concepção e modelagem. Barueri, SP: Manole, 2008.

CALDLASER. **Banco de dados**. São Paulo, 2015.

CATÁLOGO g 470 10x4. Scania, 2009. Disponível em: <<http://www.terraplenagem.net/arquivos/scania-G470-10x4.pdf>>. Acesso em: 03 junho 2015.

DIN EN ISO 15620 - **Friction Welding of Metallic Materials**. 2000.

DONAIRE, D. A internalização da gestão ambiental na empresa. **Revista Brasileira de Administração**, v. 31, n. 1, p.44-51, jan./mar. 2001.

ESAB. **Apostila de soldagem MIG/MAG**. São Paulo, 2005. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag_low.pdf>. Acesso em: 01 maio 2015.

ESAB. **Mild Steel Wires**. Estados Unidos, 2015. Disponível em: <<http://www.esabna.com/us/en/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=69&tab=2>>. Acesso em: 09 setembro 2015.

FILHO, E. A. *et al.* Influência do espaçamento do feixe de laser Nd:YAG na obtenção de óxidos e nitretos na superfície do titânio em pressão atmosférica. **The Scientific Electronic Library Online**, Rio de Janeiro, 30 julho 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762009000200003>. Acesso em: 02 maio 2015.

FLEURY, A. C. C. e FLEURY, M. T. L. Estratégias competitivas e competências essenciais: perspectivas para a internacionalização da indústria no Brasil. **Revista GESTÃO & PRODUÇÃO**, v.10, n.2, p.129-144, ago. 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2003000200002>. Acesso em: 19 de março de 2015.

GERTEC. **Banco de dados**. Condor, 2015.

HAUPT, W. **Ensaio mecânicos e caracterização microestrutural de tubos soldados por fricção**. 2013. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia – Modalidade

Acadêmica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/76163/000892933>>. Acesso em: 29 setembro 2015.

ISOTREF. **DIN 2391 - Informações Técnicas**. São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.isotref.com.br/site/download/din2391.pdf>>. Acesso em: 17 novembro 2015.

KEIM, C. **Contato Luciano Sommacal - Soprano Hidráulica** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <Diogo.Corazza@br.TRUMPF.com>, em 25 mar. 2015.

KEPNER, C.H. e TREGOE, B.B. **O administrador racional: abordagem sistemática para solução de problemas**. São Paulo: Atlas, 1972.

LAMEF. **Solda por fricção**. Disponível em: <http://www.lamef.demet.ufrgs.br/trabalho/soldagem_friccao.html>. Acesso em: 13 junho 2015.

LOPERA, J. E. P.; ALFARO, S. C. A. e MOTTA, J. M. S. T. Modelagem empírica da transferência goticular projetada em processos de soldagem GMAW. **The Scientific Electronic Library Online**, São Paulo, 8 julho 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242012000400008>. Acesso em: 06 junho 2015.

LÓPES, F. S. **Montagem e Avaliação de uma máquina de solda fricção**. 2010. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalurgia e Materiais, porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/29070>>. Acesso em: 04 maio 2015.

MACHADO, I. G. **Soldagem & Técnicas Conexas: processos**. Porto Alegre, editado pelo autor, 1996.

MADEIRA, R. P. e MODENESI, P. J. Utilização do ensaio erichsen para a avaliação do desempenho de juntas soldadas. **The Scientific Electronic Library Online**, São Paulo, 7 dezembro 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-92242010000100004&script=sci_arttext>. Acesso em: 13 junho 2015.

MODENESI, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. Belo Horizonte: UFMG, 2007 Disponível em: <<http://www.iem.unifei.edu.br/professores/edmilson/Arco.pdf>>. Acesso em: 16 abril 2015.

MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. e MARQUES, P. V. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. e SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>>. Acesso em: 02 abril 2015.

RECKZIEGEL, V. N. *et al.* **Reaproveitamento de resíduo do triturador de sucata em uma**

indústria siderúrgica. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA PARA O MEIO AMBIENTE, 3., 2012, Bento Gonçalves.

SCANIA. **Novidades em mineração na Exposibram 2009.** Disponível em: <<http://www.scania.com.br/a-scania/imprensa/press-releases/press-release-49-09.aspx>>. Acesso em: 26 junho 2015.

SILVA, S. A. da. **Análise ergonômica do trabalho do soldador:** contribuição para projeção ergonômica. 2003. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia – Modalidade Acadêmica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4094/000407483.pdf>>. Acesso em: 27 abril 2015.

SOPRANO. **Banco de dados.** Caxias do Sul, 2015.

THOMPSON. **Solução de solda por fricção.** Disponível em: < <http://www.br.thompson-friction-welding.com/solucoes-de-solda-por-friccao/aplicacoes/aplicacoes-populares/aplicacoes-de-construcao> >. Acesso em: 03 maio 2015.

TRUMPF. **Laser systems.** Disponível em: < <http://www.trumpf-laser.com/en/products/laser-systems/3d-laser-processing-systems/trulaser-cell-series-7000.html> >. Acesso em: 10 junho 2015.

TROMMER, F. *et al.* **Simulação de soldagem rotativa e orbital de soldagem por fricção em aços não ligados.** Alemanha, 2009. Disponível em: < http://www.tl-ing.de/data/ueber_uns/veroeffentlichungen/SysweldForum09_TROMMER_Loose_et_al.pdf >. Acesso em: 02 maio 2015.

VALLOUREC & MANNESMANN. **Certificado tubo ST52 BKW.** Brasil, 2012.

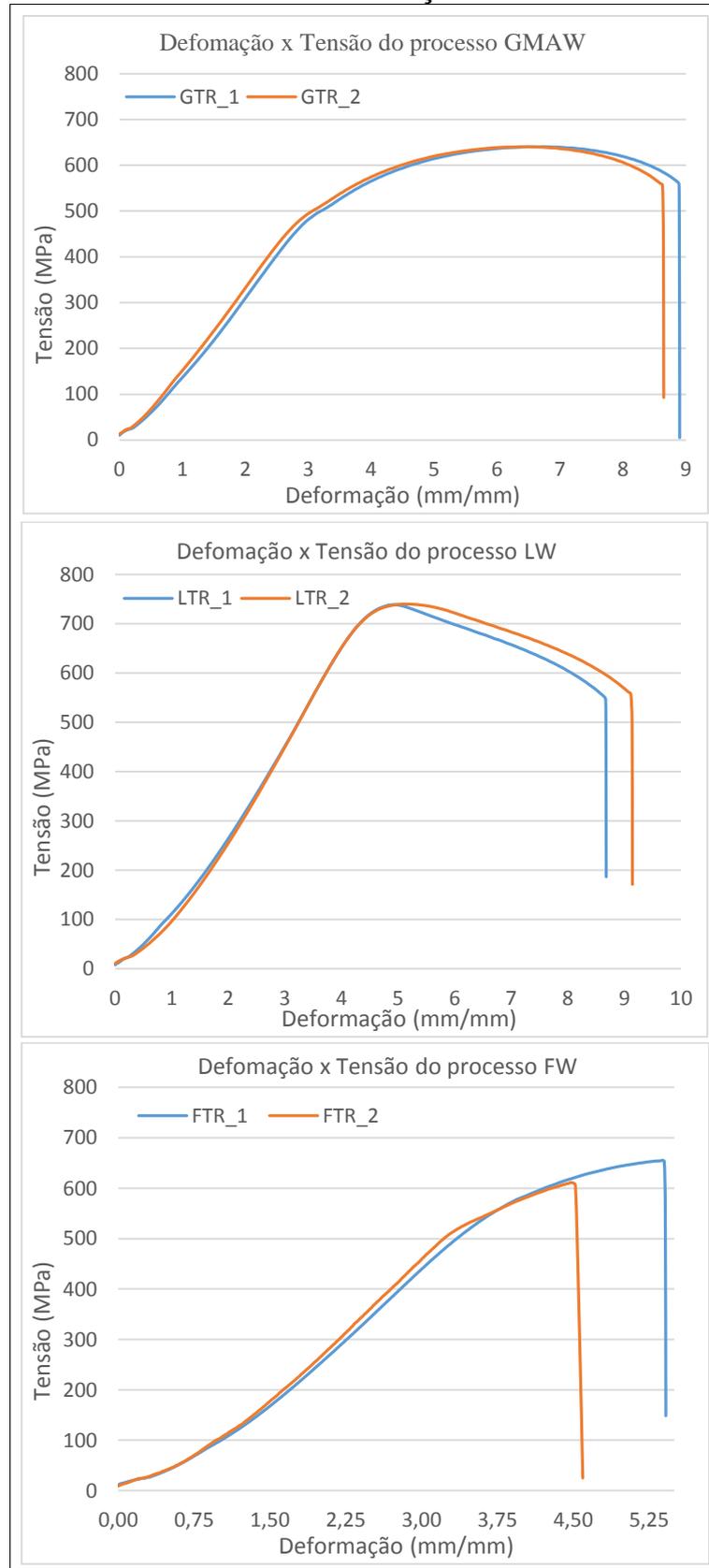
WAINER, E. **Soldagem.** São Paulo: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS, 1980.

WAINER, E.; BRANDI S.D. e MELLO, F. D. **Soldagem:** Processos e Metalurgia. São Paulo: EDGARD BLUCHER, 1992.

ZEFFERER, H. e MORRIS T. **Design Guidelines for Laser Welding of Sheet Metal Components.** Miami, 2015.

APÊNDICE A

GRÁFICOS DEFORMAÇÃO x TENSÃO



Fonte: autor (2015)

ANEXO A

CERTIFICADO DO TUBO MECÂNICO ST52 BKW

DIMENSÕES: 101,40mm X 88,20mm X 6,60mm GRAU DO AÇO : DIN ST 52														
NORMA METALÚRGICA: DIN 2391 01.09.1994 # NORMA DIMENSIONAL: DIN 2391 01.09.1994														
PRODUTO: TUBOS DE AÇO SEM COSTURA TREFILADO A FRIO , PONTA LISA # BKW # PROTECAO SUPERFICIAL: OLEADO #														
TOLERÂNCIAS: DIÂMETRO EXTERNO(CORPO TUBO): - 0,400mm / + 0,400mm DIÂMETRO INTERNO: - 0,300mm / + 0,300mm														
PAREDE: - 0,660mm / + 0,660mm														
COMPRIMENTO: FAIXA 6000,00mm - 12000,00mm #														
Análise Química (%) CEq conforme: DI conforme: Unidade: Pem:														
		C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V	Nb	Ti
Exigência: Min														
Max		0,22	1,60	0,025	0,025	0,55						0,050	0,030	0,030
Corrida/Lote Controle														
119255	030002145900	0,18	1,48	0,015	0,013	0,24	0,01	0,16	0,02	0,014	0,010	0,005	0,001	0,001
Ensaio Mecânicos Direção CP: Longitudinal Temperatura: Ambiente Medida L0: L0=5D														
		Área(MM2)	LE(MPA)	RT(MPA)	AL(%)									
Exigência: Min			480	565	12									
Max														
Corrida/Lote Controle														
119255	030002145900	166,3	670	770	15									
LE-Limite de escoamento : RT-Resistência à Tração : AL-Alongamento														
Dureza														
		HB												
Exigência: Min		160												
Max														
Corrida/Lote Controle														
119255	030002145900	232												
		234												

Fonte: VALLOUREC & MANNESMANN (2012)

ANEXO B

CERTIFICADO DO TUBO MECÂNICO ASTM A513

GRADE 520	SIZE(O.D x ID x WALL) 297.510 X 268.910 X 14.300	QUANTITY 9815 KG	98.40 M	SHIPPED 05/12/14	DATE 05/14/14								
CONDITION EW TUFFDOM STRESS RELIEVE ANNEAL			PART NO. 01083.0000.94	50075223									
HEAT NO.	CHEMICAL ANALYSIS											GRAIN SIZE	
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Al	OTHER	
9508535	.16	1.43	.012	.002	.250	.010	.040	.010	.030	.006	.034	.0022 TI .0040 Cb .0030	
MECHANICAL PROPERTIES												MAGNAFLUX	
HEAT NO.	LOAD NO.	YIELD MPa	TENSILE MPa	ELONG %	RED AREA %	HARDNESS BHN ROCKWELL		IMPACT JOULES		FREQ.	SEVERITY		
9508535	T6341821	590	678	2.0" 27		207							

Fonte: ARCELORMITTAL (2014)

ANEXO C

CERTIFICADO DO ENSAIO DE ULTRASSOM DO PROCESSO GMAW

		RELATÓRIO DE ENSAIO ULTRA-SOM						FORM-001						
								Data de Elab. SETEMBRO/2010						
								REV. 00						
								Nº	Data	Folha				
		0207/2015		25/09/2015		01/01								
NOME DO PROJETO:			ORDEM DE SERVIÇO			CLIENTE:								
Tubo de teste			NE			Soprano Indústria de Equipamentos Oleodinâmicos Ltda.								
UNIDADE:			LOCAL			CONTRATO Nº								
Tubo de teste			Caxias do Sul - RS			NE								
CÓDIGO DESENHO			PROCED. EXECUÇÃO:			CRIT. DE ACEITAÇÃO:								
NA			GER 001			ASME VIII								
PROCESSO DE SOLDAGEM:			CONSUMIVEL			MATERIAL								
GMAW			ER 70S-6			Conforme desenho								
CONDIÇÕES SUPERFICIAIS:			ESPESSURA:			DIÂMETRO								
Escovada			Conforme desenho			Conforme desenho								
APARELHO/FABRICANTE:			MODELO:			Nº SÉRIE:								
GE			USM GO			9100153								
DADOS TRANSDUTORES						DADOS DE CALIBRAÇÃO								
Tipo	Fabricante	Modelo	Nº Série	Dimensões	Ângulo	Freq. [MHz]	Bloco Ref.	GP [Db]	PT [Db]	GV [Db]				
Angular	GE	MWB	56928-58193	8X9 mm	60	4	ASME 20	55	-5,1	66,1				
Angular	GE	MWB	56929-71647	8X9 mm	70	4	ASME 20	55,6	0	61,6				
Normal	GE	MSEB 4	57749-53594	3,5x10 mm	-	4	Eoo de Fundo	50,4	-	56,4				
LOCALIZAÇÃO	Nº JUNTA	DESCONTINUIDADE								SOLDADOR				
		Nº Desc.	Cabeçote	AMP [Db]	LOCAL	Comp. [mm]	Prof. [mm]	Percurso Som [mm]	Distância Ref. [mm]	Superfície Detecção	Identificação Descont-ruído	Lauda	Raiz	E/A
J1	Circunferencial	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A	-	x
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
REGISTRO VISUAL:														
OBS.: Realizado ultrassom no tubo de teste.														
EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO						Nº DO CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO								
GE / USM GO						10090/2010								
BLOCO V2						3247/2010								
ASME 20						R3248/2010								
ASME 38						R3251/2010								
BLOCO V1						R3246/2010								
LEGENDA:														
(TL) TRINCA LONGITUDINAL	(PO) POROSIDADE	(A) APROVADO	(AR) APROVADO APÓS REPARO											
(TT) TRINCA TRANSVERSAL	(MO) MORDEDURA	(R) REPROVADO	(NE) NÃO ESPECIFICADO											
(FP) FALTA DE PENETRAÇÃO	(S) SOBREPÓSICÃO	(E/A) ENCHIMENTO/ACABAMENTO												
(FF) FALTA DE FUSÃO	(IE) INCLUSÃO DE ESCÓRIA	(NA) NÃO APLICÁVEL												
ENVIAR PARA: <input checked="" type="checkbox"/> Soprano Indústria de Equipamentos Oleodinâmicos Ltda.						<input checked="" type="checkbox"/> CLIENTE FINAL								
INSPECTOR DE ULTRA-SOM						CONTROLE DE QUALIDADE				CONTROLE DE QUALIDADE CLIENTE/FISCALIZAÇÃO				
Arfonis Fellin Inspetor de Ultra-Som - N2-ASNT Cod.: U72-001.15 GERTEC - Engenharia, Inspeção e Treinamentos														
Assin. / Data 29/09/2015						Assin. / Data				Assin. / Data				

ANEXO D

CERTIFICADO DO ENSAIO DE ULTRASSOM DO PROCESSO LW

		RELATÓRIO DE ENSAIO ULTRA-SOM						FORM-001						
								Data de Elab. SETEMBRO/2010						
								REV. 00						
								Nº	Data	Folha				
		0206/2015		25/09/2015		01/01								
NOME DO PROJETO:			ORDEM DE SERVIÇO			CLIENTE:								
Tubo de teste			NE			Soprano Indústria de Equipamentos Oleodinâmicos Ltda.								
UNIDADE:			LOCAL			CONTRATO Nº								
Tubo de teste			Caxias do Sul - RS			NE								
CÓDIGO DESENHO			PROCED. EXECUÇÃO:			CRIT. DE ACEITAÇÃO:								
NA			GER 001			ASME VIII								
PROCESSO DE SOLDAGEM:			CONSUMIVEL			MATERIAL								
LBW			-			Conforme desenho								
CONDIÇÕES SUPERFICIAIS:			ESPESSURA:			DIÂMETRO								
Escovada			Conforme desenho			Conforme desenho								
APARELHO/FABRICANTE:			MODELO:			Nº SÉRIE:								
GE			USM GO			9100153								
DADOS TRANSDUTORES							DADOS DE CALIBRAÇÃO							
Tipo	Fabricante	Modelo	Nº Série	Dimensões		Ângulo	Freq. [MHz]	Bloco Ref.	GP [Db]	PT [Db]	GV [Db]			
Angular	GE	MWB	56928-58193	8x9 mm		60	4	ASME 20	55	-6,3	67,3			
Angular	GE	MWB	56929-71647	8x9 mm		70	4	ASME 20	55,6	0,3	61,3			
Normal	GE	MSEB 4	57749-53594	3,5x10 mm		-	4	Eco de Fundo	50,4	-	56,4			
LOCALIZAÇÃO	Nº JUNTA	DESCONTINUIDADE										SOLDADOR		
		Nº Desc.	Cabeçote	AMP [Db]	LOCAL	Comp. [mm]	Prof. [mm]	Percurso Som [mm]	Distância Ref. [mm]	Superfície Detecção	Identificação Descont. [mm]	Laudo	Raiz	E/A
J1	Circunferencial	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A	-	x
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
REGISTRO VISUAL:														
OBS.: Realizado ultrassom no tubo de teste.														
EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO						Nº DO CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO								
GE / USM GO						10090/2010								
BLOCO V2						3247/2010								
ASME 20						R3248/2010								
ASME 38						R3251/2010								
BLOCO V1						R3246/2010								
LEGENDA:														
(TL) TRINCA LONGITUDINAL	(PO) POROSIDADE	(A) APROVADO	(AR) APROVADO APÓS REPARO											
(TT) TRINCA TRANSVERSAL	(MO) MORDEDURA	(R) REPROVADO	(NE) NÃO ESPECIFICADO											
(FP) FALTA DE PENETRAÇÃO	(S) SOBREPOSIÇÃO	(E/A) ENCHIMENTO ACABAMENTO												
(FF) FALTA DE FUSÃO	(IE) INCLUSÃO DE ESCÓRIA	(NA) NÃO APLICÁVEL												
ENVIAR PARA: <input checked="" type="checkbox"/> Soprano Indústria de Equipamentos Oleodinâmicos Ltda.						<input checked="" type="checkbox"/> CLIENTE FINAL								
INSPEÇÃO DE ULTRA-SOM				CONTROLE DE QUALIDADE				CONTROLE DE QUALIDADE CLIENTE/FISCALIZAÇÃO						
 Inspeção de Ultra-Som - N2-ASNT Cód.: UT2-001.15 GERTEC - Engenharia, Inspeção e Treinamentos														
Assin. / Data 29/09/2015				Assin. / Data				Assin. / Data						

ANEXO E

CERTIFICADO DO ENSAIO DE ULTRASSOM DO PROCESSO FSW

		RELATÓRIO DE ENSAIO ULTRA-SOM						FORM-001								
								Data de Elab. SETEMBRO/2010								
								REV. 00								
								Nº	Data	Folha						
		0205/2015		25/09/2015		01/01										
NOME DO PROJETO:			ORDEM DE SERVIÇO			CLIENTE:										
Tubo de teste			NE			Soprano Indústria de Equipamentos Ócrodinâmicos Ltda.										
UNIDADE:			LOCAL			CONTRATO Nº										
Tubo de teste			Caxias do Sul - RS			NE										
CÓDIGO DESENHO			PROCED. EXECUÇÃO:			CRIT. DE ACEITAÇÃO:										
NA			GER 001			ASME VIII										
PROCESSO DE SOLDAGEM:			CONSUMIVEL			MATERIAL										
FSW			-			Conforme desenho										
CONDIÇÕES SUPERFICIAIS:			ESPESSURA:			DIÂMETRO										
Escovada			Conforme desenho			Conforme desenho										
APARELHO/FABRICANTE:			MODELO:			Nº SÉRIE:										
GE			USM GO			9100153										
DADOS TRANSDUTORES							DADOS DE CALIBRAÇÃO									
Tipo	Fabricante	Modelo	Nº Série	Dimensões		Ângulo	Freq. [MHz]	Bloco Ref.	GP [Db]	PT [Db]	GV [Db]					
Angular	GE	MWB	56928-58193	8X9 mm		60	4	ASME 20	55	-5,2	66,2					
Angular	GE	MWB	56929-71647	8X9 mm		70	4	ASME 20	55,6	1,1	60,5					
Normal	GE	MSEB 4	57749-53594	3,5x10 mm		-	4	Eco de Fundo	50,4	-	56,4					
LOCALIZAÇÃO	Nº JUNTA	Nº Desc.	Cabeçote	AMP [Db]	LOCAL	Comp. [mm]	Prof. [mm]	Percurso Som [mm]	Distância Ref. [mm]	Superfície Detecção	DESCONTINUIDADE				SOLDADOR	
											Identificação Descont. - uridade	Lauda	Raiz	E/A		
J1	Circunferencial	1	60	6,3	0	40	1,6	22,7	23	1B	FA	R	-	-	x	
J1	Circunferencial	2	60	11,6	230	35	2,6	20,6	25	1A	FA	R	-	-	x	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
REGISTRO VISUAL:																
OBS.: Realizado ultrassom no tubo de teste.																
EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO						Nº DO CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO										
GE / USM GO						10090/2010										
BLOCO V2						3247/2010										
ASME 20						R3248/2010										
ASME 38						R3251/2010										
BLOCO V1						R3246/2010										
LEGENDA:																
(L) TRINCA LONGITUDINAL	(P) POROSIDADE	(A) APROVADO	(AR) APROVADO APÓS REPARO													
(T) TRINCA TRANSVERSAL	(MO) MORDEDURA	(R) REPROVADO	(NE) NÃO ESPECIFICADO													
(FP) FALTA DE PENETRAÇÃO	(S) SOBREPOSIÇÃO	(E/A) ENCHIMENTO/ACABAMENTO														
(FA) FALTA DE ADESÃO	(IE) INCLUSÃO DE ESCÓRIA	(NA) NÃO APLICÁVEL														
ENVIAR PARA: <input checked="" type="checkbox"/> Soprano Indústria de Equipamentos Ócrodinâmicos Ltda.						<input checked="" type="checkbox"/> CLIENTE FINAL										
INSPEÇÃO DE ULTRA-SOM						CONTROLE DE QUALIDADE						CONTROLE DE QUALIDADE CLIENTE/FISCALIZAÇÃO				
 Inspetora de Ultra-Som - N2-ASNT Cód.: UT2-001.15 GERTEC - Engenharia, Inspeção e Treinamentos																
Assin. / Data 25/09/2015						Assin. / Data						Assin. / Data				