

**UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ARQUITETURA E URBANISMO**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**ESTUDO COMPARATIVO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM  
APLICADOS EM CARRETAS DE TRANSPORTE PRESSURIZADO  
PARA GÁS GLP**

**BIANCO GALLAZZI DA SILVA LEITE**

**ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS R. C. LIMA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

Santa Bárbara d'Oeste

Agosto / 2018

**ESTUDO COMPARATIVO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM  
APLICADOS EM CARRETAS DE TRANSPORTE  
PRESSURIZADO PARA GÁS GLP**

**BIANCO GALLAZZI DA SILVA LEITE**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 22/08/2018, pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr. André Luis Helleno (Presidente)  
UNIMEP - PPGEP

Prof. Dr. Maria Rita Pontes Assunção  
UNIMEP - PPGEP

Prof. Dr. Hipólito Domingo Carvajal Fals  
UO – UNIVERSIDADE DE ORIENTE - CUBA

A todos os mestres das salas de aula, que condicionam seu tempo na busca incessante pelo conhecimento, e que tem o prazer de contribuir para que um desconhecido desfrute da imensidão a qual pertencemos: o meio acadêmico.

## Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por me dar coragem e consciência para a concepção deste trabalho.

Aos meus pais, Nilce e Francisco, pelo apoio incondicional em todos os meus momentos de vida.

À Camila, pelo amor, paciência, companheirismo e perseverança.

Ao Lucas, por sua grande participação afetiva nesse processo.

Ao estimado Prof. Dr. Carlos Roberto Camello Lima, pelo apoio, orientação e sabedoria compartilhadas, e também pela confiança depositada.

À CAPES e à Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo (FEAU) da Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), pela concessão da bolsa.

À Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da FEAU - UNIMEP, em especial, à Marta Helena T. Bragaglia, pelo apoio.

“Educação é aquilo que fica depois que se esquece tudo que se aprendeu na escola.”

**Albert Einstein**

LEITE, Bianco Gallazzi da Silva. **Estudo Comparativo de Processos de Soldagem Aplicados em Carretas de Transporte Pressurizado para Gás GLP**. 2018, 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo (FEAU), Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), Santa Bárbara d'Oeste – SP.

## RESUMO

A fabricação de componentes de transporte para gases pressurizados é restrita no Brasil. Isto é devido à certificação obrigatória por organismos governamentais, que impõe requisitos complexos da qualidade inerentes aos processos de fabricação, principalmente o processo de soldagem. Neste sentido, somando-se as variantes construtivas e metalúrgicas do material a ser soldado, os requisitos da construção têm sofrido mudanças obrigatórias visando ao aumento de qualidade e redução de possíveis acidentes (riscos). Apesar dos processos utilizados serem de soldagens comuns, a aplicação é especial no que tange aos metais base utilizados. Assim, o objetivo deste trabalho é identificar o melhor processo de soldagem a arco elétrico para a fabricação dos tanques de transporte, visando à qualidade e produtividade. O trabalho adota um estudo experimental para a coleta de dados. As empresas analisadas são referência no mercado nacional na fabricação deste tipo de equipamento, bem como estão em ascensão no mercado internacional. O resultado esperado foi atingido, pois os processos avaliados apresentaram resultados discrepantes, podendo-se concluir que o processo mais adequado de soldagem é o arco submerso (SAW) para a situação apresentada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Soldagem, arco submerso, arame tubular, eletrodo revestido, arame sólido, aço baixa liga alta resistência.

*LEITE, Bianco Gallazzi da Silva. Comparative Study of Welding Processes Applied in Pressurized Transport Carts for LPG Gas. 2018, 93 p. Dissertation (Master in Production Engineering) – College of Engineering, Architecture and Urbanism, Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), Santa Bárbara d'Oeste – SP.*

### **ABSTRACT**

*The manufacture of transport components for pressurized gases is restricted in Brazil. This is due to the mandatory certification by governmental organisms, which imposes complex requirements of the quality to the manufacturing processes, mainly the welding process. In this sense, adding the constructive and metallurgical variants of the material to be welded, the requirements of the construction have undergone obligatory changes aiming at the increase of quality and reduction of possible accidents. Although the processes used are common welds, the application is special with respect to the base metals used. Thus, the objective of this work is to identify the best process of electric arc welding, aiming at quality and productivity. The work adopts an experimental study for data collection. The analyzed companies are reference in the national market in the manufacture of this type of equipment, as well as they are in ascendancy in the international market. The expected result was achieved because the processes presented divergent results, and it can be concluded that the most suitable welding process is the submerged arc for the presented situation.*

**KEYWORDS:** *Welding, submerged arc, tubular wire, coated electrode, solid wire, low alloy steels Resistance.*

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO .....	4
1.3. DELIMITAÇÃO DO TRABALHO .....	5
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	5
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>7</b>
2.1. CENÁRIO DO CONSUMO DE GÁS ATUAL .....	7
2.2. MATERIAIS UTILIZADOS PARA VASOS DE PRESSÃO.....	9
2.3. AÇOS ALTA RESISTÊNCIA DE BAIXA LIGA (ARBL).....	10
2.4. MATERIAL BASE DAS CARRETAS – DESIGNAÇÃO ASTM A517 GR. B .....	14
2.5. SOLDABILIDADE DOS AÇOS ALTA RESISTÊNCIA BAIXA LIGA .....	15
2.6. REQUISITOS DE QUALIDADE – ORGANISMOS REGULAMENTADORES .....	18
2.7. PROCESSOS DE SOLDAGEM .....	18
ARCO SUBERMERSO (SAW) .....	21
2.7.1. 21	
2.7.2. ARAME SÓLIDO (GMAW).....	27
2.7.1. ARAME TUBULAR (FCAW) .....	28
2.7.2. ELETRODO REVESTIDO (SMAW).....	30
2.8. VARIÁVEIS ESSENCIAIS DE SOLDAGEM.....	31
2.9. A MECANIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM .....	32
2.10. DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS DE SOLDAGEM .....	34
<b>3. ASPECTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA</b> .....	<b>40</b>
3.1. MATERIAIS E MÉTODOS DE SOLDAGEM .....	42
3.2. ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	43
3.3. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA SOLDADOS – ASTM A517 GR. B.....	48
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>57</b>
4.1. ENSAIOS MECÂNICOS .....	57
4.2. CUSTOS DE SOLDAGEM .....	68
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>73</b>
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	74
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>75</b>



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SMAW – eletrodo revestido (*shielded metal arc welding*)

GMAW – (*gas metal arc welding*) soldagem semi-automática por arame sólido

FCAW (*fluxed cored arc welding*) – soldagem semi-automática por arame tubular

SAW (*submerged arc welding*) – soldagem mecanizada por arco submerso

GTAW (*gas tungsten arc welding*) – soldagem com eletrodo não consumível de tungstênio protegido por gás

ZTA – zona termicamente afetada

CA – corrente alternada

CC – corrente contínua

EP – Eletrodo Positivo

EN – Eletrodo Negativo

EPS – especificação de procedimento de soldagem

ARBL – alta resistência e baixa liga

## **LISTA DE UNIDADES**

Ksi – unidade de força

N/mm<sup>2</sup> – unidade de tensão

MPa – unidade de tensão

°C - graus celsius

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PESQUISA PARA TIPOS DE SOLDAGEM , MATERIAIS ALTERNATIVOS E MÉTODOS(ADAPTADO DE JAHANZAIB, 2017) .....	3
FIGURA 2 – DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMOS DE GÁS POR SETOR (FONTE: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2015) .....	8
FIGURA 3 – OFERTA DE GÁS NATUAL (FONTE: MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA, 2015).....	8
FIGURA 4-COMPARAÇÃO TÍPICA DE TAXA DE DEPOSIÇÃO X DIÂMETRO DO TUBO (ADAPTADO DE PATRICK ET AL., 2014). .....	21
FIGURA 5-DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO PROCESSO SAW (ADAPTADO DE KASABE, 2015).....	24
FIGURA 6-PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG (ADAPTADO DE PHILIPS, 2016). .....	28
FIGURA 7-PROCESSO DE SOLDAGEM FCAW (ADAPTADO DE PHILIPS, 2016). .....	29
FIGURA 8-PROCESSO DE SOLDAGEM SMAW (ADAPTADO DE PHILIPS,2016). .....	31
FIGURA 9-PROCESSO DO CONHECIMENTO PARA ESCOLHA DO PROCESSO DE SOLDAGEM (ADAPTADO VIEIRA ET AL., 2011). .....	33
FIGURA 10-FOTO ILUSTRATIVA EQUIPAMENTO TRANSPORTE (ACESSO INTERNET) (HTTPS://WWW.AFDC.ENERGY.GOV/UPLOADS/PUBLICATION/NG_REGIONAL_TRANSPORT_TRUCKS.PDF) .....	40
FIGURA 11-DIAGRAMA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO EQUIPAMENTO .....	42
FIGURA 12-FIGURA ILUSTRATIVA DAS DIMENSÕES NOMINAIS DO EQUIPAMENTO .....	44
FIGURA 13- EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA REALIZAÇÃO DA ANÁLISE QUÍMICA DA AMOSTRA (FONTE: PRÓPRIO AUTOR, 2017) .....	44
FIGURA 14 - CROQUI DE RETIRADA DO CORPO DE PROVA DE TRAÇÃO (PRÓPRIO AUTOR).....	46
FIGURA 15-CROQUI DE USINAGEM DO CORPO DE PROVA DE TRAÇÃO.....	46
FIGURA 16-EQUIPAMENTO UNIVERSAL DE ENSAIO (PRÓPRIO AUTOR).....	47
FIGURA 17-IMAGEM DA MICROGRAFIA DO METAL BASE (PRÓPRIO AUTOR) .....	48
FIGURA 18-CROQUI PREPARAÇÃO DO CHANFRO DOS CORPOS DE PROVA (PRÓPRIO AUTOR).....	49
FIGURA 19-DIMENSIONAL CORPOS DE PROVA (PRÓPRIO AUTOR).....	49
FIGURA 20-CORPOS DE PROVA APÓS SOLDAGEM (PRÓPRIO AUTOR) .....	52
FIGURA 21-SEQUENCIAMENTO DE RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA DE SOLDAGEM (ASME IX) .....	53
FIGURA 22-CROQUI PARA USINAGEM CORPO PROVA DE TRAÇÃO (ADAPTADO ASME IX) .....	53
FIGURA 23-CROQUI PARA USINAGEM CORPO DE PROVA DE DOBRAMENTO (ASME IX) .....	54
FIGURA 24-DESENHO ESQUEMÁTICO DO PROVA DE IMPACTO CHARPY (ASTM E23) .....	55
FIGURA 25-ESQUEMA REPRESENTATIVO DA RETIRADA DO CORPO DE PROVA DE CHARPY NO CENTRO DO CORDÃO DA JUNTA SOLDADA (CS). .....	55
FIGURA 26- ESQUEMA REPRESENTATIVO DA RETIRADA DO CORPO DE PROVA DE CHARPY NO ZONA TERMICAMENTE AFETADA (ZTA). .....	56

FIGURA 27-GRÁFICO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO .....	59
FIGURA 28-CORPOS DE PROVA SOLDADOS APÓS ENSAIO DE TRAÇÃO .....	60
FIGURA 29-CORPOS DE PROVA SOLDADOS APÓS ENSAIO DE DOBRAMENTO. ....	61
FIGURA 30 - CORPOS DE PROVA APÓS ENSAIO DE IMPACTO CHARPY .....	63
FIGURA 31-GRÁFICO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO CHARPY .....	64
FIGURA 32-MICROGRAFIA DO METAL DE SOLDA DO CP1 .....	64
FIGURA 33-MICROGRAFIA DO METAL DE SOLDA DO CP2 .....	65
FIGURA 34-MICROGRAFIA DO METAL DE SOLDA DO CP3 .....	65
FIGURA 35-MICROGRAFIA DO METAL DE SOLDA DO CP4 .....	66
FIGURA 36-MACROGRAFIA DA JUNTA SOLDADA CP1-GMAW .....	67
FIGURA 37-MACROGRAFIA DA JUNTA SOLDADA CP2-SMAW .....	67
FIGURA 38-MACROGRAFIA DA JUNTA SOLDADA CP3-FCAW .....	67
FIGURA 39-MACROGRAFIA DA JUNTA SOLDADA CP4-SAW .....	68
FIGURA 40-RESUMO DOS CUSTOS DE SOLDAGEM .....	71

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 1-COMPARAÇÃO DOS TIPOS DE COMPOSICAO X TENSÃO DE ESCOAMENTO ...	14
TABELA 2-TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO E INTERPASSE PARA SOLDAGEM DO AÇO ASTM A517 GR. B .....	16
TABELA 3-TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO E INTERPASSE ASTM A517 GR. B .....	16
TABELA 4-TEMPERATURA DE PRÉ E PÓS-AQUECIMENTO ASTM A517GR. B .....	16
TABELA 5 - VARIÁVEIS ESSENCIAIS DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	32
TABELA 6-RELAÇÃO DE CUSTOS DE REMOÇÃO DE DEFEITOS (RESTECKA ET.AL., 2016).....	35
TABELA 7-FATORES DE OPERAÇÃO PARA DIVERSAS TÉCNICAS DE SOLDAGEM (ADAPTADO NEVES 1994) .....	36
TABELA 8 - EFICIÊNCIA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM (ADAPTADO NEVES 1994).....	37
TABELA 9-FATOR DE CORREÇÃO (ADAPTADO DE NEVES 1994).....	39
TABELA 10 - COMPOSIÇÃO QUIMICA DO MATERIAL BASE (PRÓPRIO AUTOR) .....	45
TABELA 11-VALORES ENSAIOS DE TRAÇÃO METAL BASE (PRÓPRIO AUTOR) .....	47
TABELA 12-CONSUMIVEL DE SOLDAGEM CP1 (SMAW) .....	50
TABELA 13-CONSUMIVEL DE SOLDAGEM CP2 (GMAW).....	51
TABELA 14-CONSUMIVEL DE SOLDAGEM CP3 (FCAW).....	51
TABELA 15-CONSUMIVEL DE SOLDAGEM CP4 (SAW) .....	51
TABELA 16-PARÂMETROS DE SOLDAGEM UTILIZADOS NOS CORPOS DE PROVA .....	51
TABELA 17-PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES .....	52
TABELA 18-MEDIDAS DIMENSIONAIS CORPO DE PROVA DE TRAÇÃO .....	54
TABELA 19-MEDIDAS DIMENSIONAIS DO CORPO DE PROVA DE DOBRAMENTO.....	54
TABELA 20-PARÂMETROS DE SOLDAGEM ENCONTRADOS .....	57
TABELA 21-RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO .....	58
TABELA 22-RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DOBRAMENTO .....	60
TABELA 23-RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO CHARPY .....	62
TABELA 24-CUSTO DA MÃO DE OBRA DE SOLDAGEM .....	68
TABELA 25-CUSTO DO METAL DE ADIÇÃO.....	69
TABELA 26-DADOS DA MÃO DE OBRA PARA SOLDAGEM POR PROCESSO.....	69
TABELA 27-DADOS PARA CÁLCULO DO CUSTO DO EQUIPAMENTO .....	70
TABELA 28-CÁLCULO DO VALOR HORA MÁQUINA .....	70
TABELA 29-RESUMO DOS CUSTOS DE SOLDAGEM (R\$ / 300 MM) .....	71
TABELA 30-RESUMO DOS TEMPOS DE SOLDAGEM.....	71

---

QUADRO 1- INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA .....	13
QUADRO 2-IDENTIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA POR PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	49

## **1. INTRODUÇÃO**

Com a disputa crescente pela liderança de mercados nacionais e internacionais, a concorrência tem sido um fator determinante na constante busca pela redução de custos em todos os setores produtivos brasileiros. Especificamente no setor de fabricação de equipamentos, tem-se observado a crescente preocupação com a produtividade nos processos de fabricação. Incluídos nessa sistemática, os processos de soldagem, tratados pelas normas internacionais como processos especiais, têm sido avaliados como itens determinantes no sucesso dos projetos de fabricação de equipamentos.

### **1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO**

Segundo Oliveira (2016), na Europa e nos Estados Unidos da América, a distribuição de produtos desde as fábricas até os centros atacadistas ou varejistas pode ser realizada através de diversas opções de modalidade: rodoviário, ferroviário, aquaviário, aéreo e dutos para casos especiais (gás, gasolina, óleo diesel e álcool). No entanto, para o Brasil não há essa disponibilidade de opções de modais, pois as ferrovias não formam uma rede com boa cobertura do território nacional, as opções de transporte marítimo não são amplas, proporcionando assim uma abrangência maior ao transporte rodoviário.

Conforme a Agência Nacional de Transportes Terrestres (2014), a seriedade das atividades que envolvam substâncias perigosas é de extrema necessidade, pois o entendimento da cadeia de transporte de produtos perigosos e dos consumidores desses produtos auxilia o país no desenvolvimento econômico, sua preservação ambiental e, principalmente, na redução de mortes de pessoas afetadas nos acidentes.

De acordo com Khattak *et al.* (2016), os mecanismos de falha dos vasos de pressão têm sido compartilhados com acidentes catastróficos, como em Sultana (1865) e a explosão na *Grover Shoe Factory* (1904), surgindo assim a necessidade para o desenvolvimento de padrões básicos para fabricação e operação de equipamentos de trabalho sob pressão. Mesmo com os avanços na metalurgia, tecnologia de soldagem e nos testes não destrutivos, e uma real compreensão da ciência e da mecânica da falha dos vasos de pressão, os acidentes continuaram até o final do século XX. No século XXI, a falha catastrófica de uma caldeira de pressão no navio da SS Noruega no porto de Miami, em 2003, que matou oito tripulantes, lembrou que os vasos sob pressão permanecem perigosos, a menos que sejam cuidadosamente projetados, operados e inspecionados.

De acordo com Casal *et al.* (2017), aproximadamente 40% dos acidentes graves ocorrem durante o transporte. Em plantas fixas, conforme demonstrado na Tabela 1, os planos de emergência são eficazes; no entanto, quando o acidente ocorre durante o transporte, especialmente nos modos rodoviário ou ferroviário, muitas vezes outras pessoas podem ser afetadas. O período dos dados da Tabela 1 corresponde aos anos 2011 a 2016, extendendo-se a todo o território nacional.

Tabela 1: Distribuição de acidentes com gases pressurizados

Origem geral	Número de acidentes	Porcentagem
Transporte	78	45,1
Área de armazenamento	39	22,5
Transferência	22	12,7
Plantas de processo	19	11,0
Outras atividades	15	8,7
Total	173	100

Fonte: Adaptado de Casal *et al.* (2017)

Ainda baseado na complexidade da construção de vasos de pressão, Jahanzaib *et al.* (2017) afirmam que o aço de baixa liga de alta resistência (ARBL) é 20-30% mais leve do que aço carbono para o mesmo volume. Com isto, o aço ARBL é preferido sobre o aço carbono para as aplicações que exigem alta relação força/baixo peso, melhor resistência à pressão atmosférica, corrosão e melhores propriedades mecânicas. Assim o aço ARBL é usado para aplicações mais exigentes, incluindo oleodutos e gasodutos, tanques de armazenamento, pontes, estruturas *offshore* e torres de transmissão de energia. A soldagem é o processo de fabricação mais utilizado para aço ARBL, destacando-se os processos manuais e automatizados.

A Figura 1 representa abordagens alternativas empregadas em vários materiais usando diferentes processos de soldagem. Os materiais são mostrados no eixo das abcissas, enquanto que os processos de soldagem são apresentados no eixo das ordenadas.

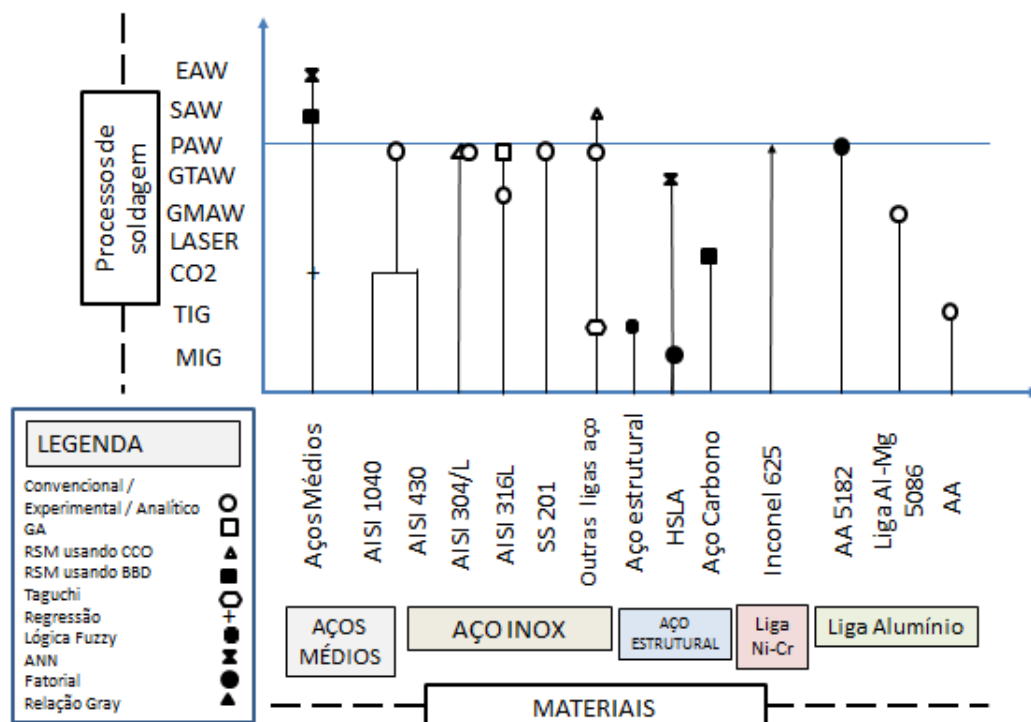


FIGURA 1 – PESQUISA PARA TIPOS DE SOLDAGEM, MATERIAIS ALTERNATIVOS E MÉTODOS (ADAPTADO DE JAHANZAIB, 2017)



A combinação apresentada pela Figura 1 justifica que os aços alta resistência (ARBL) foram pesquisados com maior representatividade nos processos de soldagem MIG/MAG e TIG. Dentre essa combinação, também são apresentados os métodos de estudo conforme a legenda.

Na soldagem do aço ARBL na condição temperado e revenido, são impostos vários problemas, tais como trincas, alterações de dureza na zona afetada pelo calor (HAZ) entre outros defeitos inerentes ao processo de soldagem (XU, 2014).

De acordo com Sumesh *et al.* (2017), a soldagem é um dos principais processos de junção de metal empregado em indústrias de fabricação, especialmente na fabricação de caldeiras e vasos de pressão. Controle de qualidade de solda é muito importante para essas indústrias, considerando as condições de funcionamento e os riscos envolvidos para usuários. As empresas procuram algum tipo de monitoramento/controlado de processo, em tempo real, que assegure a qualidade da solda *online* e evite a ocorrência de defeitos.

Com isso, tem-se a necessidade do atendimento aos requisitos de qualidade somados às solicitações das certificações de liberação do equipamento antes do envio ao cliente. Aspectos metalúrgicos inerentes ao metal de base que conferem sua alta resistência e proporcionam também reprovações nos ensaios de qualificação dos procedimentos de soldagem (EPS), e ainda um alto índice de reprovação em testes de ensaios não destrutivos, os ensaios radiográficos deixam pontos em aberto para uma relação de produtividade adequada. Devido à pequena quantidade de estudos de processos de construção, os métodos de soldagem são utilizados de forma aleatória, não se estabelecendo assim um melhor processo de soldagem, definição de tipo de junta ou posição de soldagem adequada.

## **1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO**

O objetivo deste trabalho é identificar aspectos do processo de soldagem a arco elétrico para fabricação dos tanques de transporte de gases pressurizados usados em carretas, que garantem o atendimento aos requisitos impostos pela qualidade interna da empresa, os requisitos normativos dos organismos fiscalizadores e atendimento aos requisitos de inspeção internacionais.

Os objetivos secundários são:

- Verificar os resultados dos ensaios destrutivos de impacto charpy para os diferentes processos de soldagem e seu atendimento aos requisitos de soldagem.
- Avaliar, na região da junta soldada, a zona termicamente afetada (ZTA), a formação de estruturas fragilizantes pelos diferentes processos de soldagem.

### **1.3. DELIMITAÇÃO DO TRABALHO**

O trabalho concentra-se na avaliação comparativa de 4 processos de soldagem, sendo SMAW, GMAW, FCAW e SAW mais adequado em uma empresa fabricante de carretas pressurizadas. Para tanto, é realizada a aplicação do método em uma única empresa, primeiro para coletar dados que contribuam com o refinamento do método e, posteriormente, para ilustrar a sua aplicação.

Assim, como delimitações deste trabalho, ficam elencadas a abrangência, por tratar-se de um estudo de caso único, e o desenvolvimento experimental com a soldagem de corpos de prova com diferentes processos de soldagem.

### **1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, incluindo este capítulo introdutório (Capítulo 1).

O Capítulo 2, sob o ponto de vista da revisão da literatura, reúne os principais conceitos dos temas abordados para a realização desse trabalho.

No Capítulo 3, são apresentados os aspectos metodológicos da pesquisa e o perfil da empresa estudada, com seus dados coletados e analisados.

O Capítulo 4 se concentra na apresentação do método proposto e dos materiais a serem utilizados no processo de fabricação.

O Capítulo 5 apresenta os resultados e as discussões.

O Capítulo 6 apresenta a conclusão do trabalho, suas limitações e sugestões para trabalhos futuros e ou pesquisas na área.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

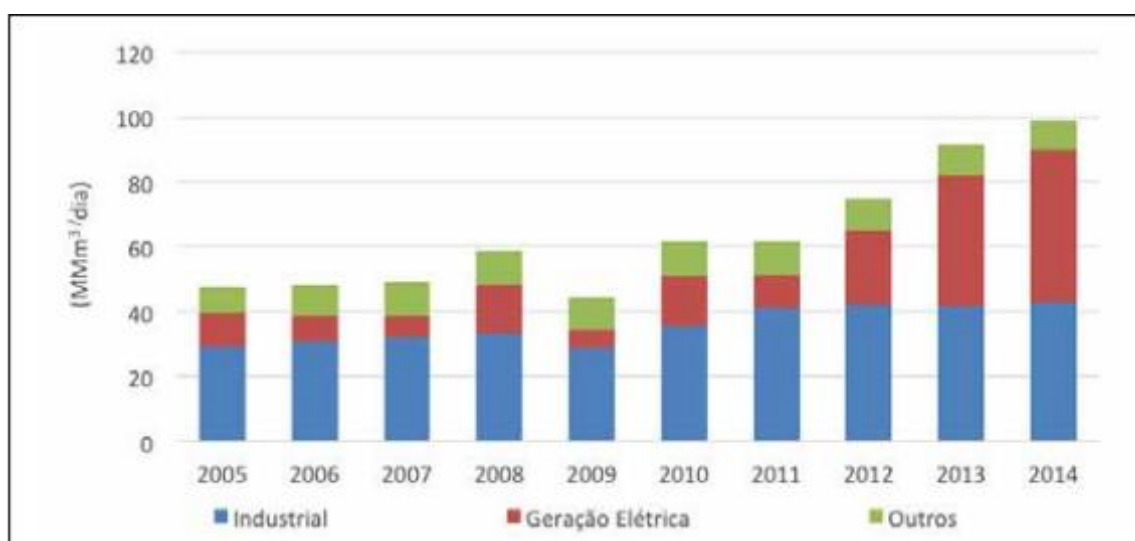
### 2.1. CENÁRIO DO CONSUMO DE GÁS ATUAL

De acordo com a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2016), o consumo de gás natural no Brasil cresceu em média 12,4% ao ano no período 2011-2015, mas a oferta de gás nacional não foi suficiente para atender o crescimento da demanda. As importações de gás natural cresceram em média 15,8% nesse mesmo período e correspondem atualmente a quase 50% da oferta total de gás no Brasil. A crescente dependência de gás importado coloca em relevo questões de segurança, diversidade e economicidade do suprimento de energia para o setor industrial e para a geração de eletricidade no país.

Até novembro de 2015, o consumo total médio de gás no Brasil foi de 103,3 MMm<sup>3</sup>/dia, o qual foi atendido por uma oferta de gás nacional de 52,2 MMm<sup>3</sup>/dia, e 51,1 MMm<sup>3</sup>/dia de gás importado da Bolívia e de Gás Natural Liquefeito (GNL) (OLIVEIRA, 2016).

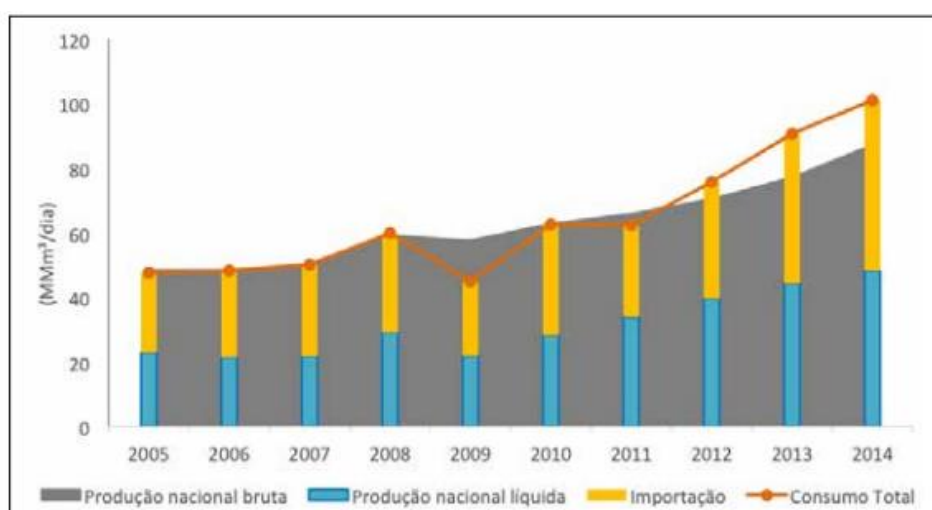
A Petrobras é atualmente o único importador de GNL no Brasil, operando três terminais de importação e regaseificação flutuantes no Ceará, Rio de Janeiro e Bahia. Além dos terminais da Petrobras, a iniciativa privada está desenvolvendo três outros projetos flutuantes e acoplados a usinas termelétricas, em Pernambuco, Rio Grande do Sul e Sergipe. Caso esses novos projetos se concretizem, vencendo consideráveis barreiras logísticas e comerciais, a indústria brasileira poderá contar com novas alternativas de suprimento de gás natural a partir de 2020 (OLIVEIRA, 2016).

O consumo de gás natural no país é dominado, principalmente, pelos segmentos industriais e de geração térmica (Figura 2).



*FIGURA 2 – DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO DE GÁS POR SETOR  
(FONTE: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2015)*

Entre 2005 e 2014, conforme a Figura 3, a oferta cresceu cerca de 50%, a uma taxa média de 9% ao ano. Na década de 2000 a 2010, o crescimento do consumo de gás natural se deu principalmente no setor industrial, impulsionado pelos descontos praticados pela Petrobras até 2007, a fim de estimular o consumo nesse segmento (OLIVEIRA, 2016).



*FIGURA 3 – OFERTA DE GÁS NATURAL  
(FONTE: MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA, 2015)*

## 2.2. MATERIAIS UTILIZADOS PARA VASOS DE PRESSÃO

Para a redução dos custos dos projetos, a seleção dos materiais de aplicação e dos metais de base se destaca pelo seu diferencial na construção do equipamento. Com a escolha de materiais com resistência mecânica maior, a redução das espessuras de parede pode ser feita mantendo-se os cálculos estruturais iniciais. Desta forma, destacam-se os mais utilizados, nomeados como “alta resistencia e baixa liga” (*ASM HANDBOOK*, 2001).

A redução de espessuras e as maiores resistências mecânicas contribuem para a diminuição de peso do equipamento. Porém, acrescentam cuidados ou requisitos importantes durante os processos de construção e, principalmente, nos processos de soldagem (*PHILIPS*, 2016), além do que pode representar maior uso nas operações.

Para a indústria de base e metalúrgicas, os processos de soldagem são planejados de acordo com as variáveis essenciais do projeto, incluindo as normas de fabricação e requisitos de clientes. Uma vez definido o processo de soldagem, o próximo passo é a definição da mão-de-obra qualificada e também os equipamentos compatíveis para a execução da soldagem (*PRACTICAL GUIDE*, 2002).

Com a utilização de materiais de propriedades mecânicas melhoradas, ou seja, materiais de alta resistência baixa liga (*ARBL*), devem ser observadas com maior critério as propriedades metalúrgicas pós soldagem, ou mais especificamente a formação de microestruturas metalográficas não desejáveis à junta soldada solidificada. Deve haver uma alteração planejada na utilização de consumíveis compatíveis com a especificação do material base soldada. (*CATALOGO MITTAL*, 2008).

### 2.3. AÇOS ALTA RESISTÊNCIA DE BAIXA LIGA (ARBL)

A norma ASM Handbook International (2001) cita os aços de alta resistência de baixa liga (ARBL- alta liga e baixa resistência), os quais são desenvolvidos para atender a melhores propriedades mecânicas e uma maior resistência a corrosão atmosférica em relação aos aços comerciais convencionais. Não são considerados como aços liga normais, pois são projetados para atender propriedades mecânicas específicas, com limites de escoamentos superiores a 275 MPa (45 Ksi).

A composição química de um aço ARBL pode variar de acordo com a solicitação mecânica dos projetos. Os aços ARBL fabricados em chapas têm baixo teor de carbono entre 0,05 e -0,25% C para poderem ser conformados e terem melhor soldabilidade, considerando também um teor de manganês até 2,0%. Pequenas quantidades de cromo, níquel, molibdênio, cobre, vanádio, nióbio, titânio e zircônio são utilizados em suas combinações (ASM, 2001).

De acordo com Balkrishnan (2014), de todos os tipos de aços, os ARBL temperados e revenidos estão sendo cada vez mais usados em projetos estruturais, por serem resistentes também resistentes à abrasão, devido a sua alta resistência mecânica e tenacidade. Porém, trincas induzidas por hidrogênio após a soldagem e diminuição da dureza na ZTA devido ao ciclo térmico da solda são problemas apresentados com frequência.

Aços de baixa liga de alta resistência (ARBL) não só fornecem economia em relação ao consumo de ligas para sua fabricação, mas também fornecem capacidades termomecânicas únicas tais como alta resistência, excelente ductilidade, boa soldabilidade e impressionante resistência a impactos de baixa temperatura superior a essa as propriedades dos aços convencionais de alto rendimento (ALIPOORAMIRABAD *et al.* ,2016).

Os aços de baixa liga de alta resistência incluem padrões de propriedades projetados para fornecer combinações como resistência, tenacidade, conformabilidade, soldabilidade incluindo a resistência à corrosão atmosférica. Estes aços não são considerados aços ligados, pois suas propriedades estão baseadas em pequenas adições de elementos de liga. Ao invés desta situação, são classificados como uma categoria separada de aços, similares aos aços laminados a quente com propriedades mecânicas melhoradas, obtidas através da adição de pequenas quantidades de ligas e técnicas especiais de resfriamento (ASM, 2001).

Segundo Neves, os aços de alta resistência mecânica e baixa liga (ARBL) são constituídos por um grupo específico de aços com composição química desenvolvida para alcançar certas especificações de propriedades mecânicas, principalmente de limite de escoamento.

Segundo a Auto Steel Partnership (2000), aços microligados (ARBL) abrangem valores de limite de escoamento estão na faixa de 300 a 800 MPa. Segundo ainda a norma SAE J2340 (*Society of Automotive Engineers*), os aços HSLA (High Strength Low Alloy) ou ligas ARBL são classificados segundo o seu limite de escoamento que pode variar de 300 a 900 MPa. Estudos feitos anteriormente nos aços de alta resistência e baixa liga, utilizados em grande escala para construção de navios, edifícios e oleodutos, mostraram as principais vantagens de se trabalhar com este tipo de material. Dentre estas vantagens encontra-se o limite relativamente alto de escoamento e a soldabilidade relativamente boa do aço em questão.

Matlock (2009) afirma que dentro desta classe de aços estão os aços microligados, no qual a adição de elementos microligantes como o nióbio (Nb), o titânio (Ti) ou o vanádio (V), por exemplo, juntamente com o processamento termomecânico (laminação controlada), resulta em aços de alta resistência e baixa liga. Os teores de elementos ligantes são muito menores do que em aços de outras categorias, como aços inoxidáveis, ou aços ferramenta, por exemplo, no qual a soma dos elementos de liga geralmente não ultrapassa 2 %, e o teor de carbono situa-se abaixo de 0,25 %.



De acordo com Sephrzad *et al.* (2015), os aços de baixa liga temperados e revenidos (QT) são amplamente utilizados em aplicações onde alta resistência, soldabilidade e boa tenacidade à fratura são de extrema importância. O aumento da resistência destas ligas facilita o uso de seções mais finas, o que leva a redução de peso e dá origem a uma melhoria potencial de carga útil, mobilidade e economia de combustível. São usados para a construção soldada de todos os tipos, como vasos de pressão, pontes, veículos de transporte, içamento, equipamentos de terraplanagem e, ainda, muito utilizados na construção naval.

Ainda segundo Sephrzad *et al.* (2015), esta classe de aços, após o processo de fabricação, é submetida a um tratamento térmico de têmpera e revenimento, onde o aço é austenitizado a cerca de 900°C, resfriado em seguida em água ou óleo para a obtenção de estrutura martensítica ou bainítica. No seu estado logo após esse tratamento, o mesmo fica com propriedade de durezas alta e conseqüentemente, frágil (quebradiço). Nessa situação, é submetido a outro tratamento na temperatura subcrítica para atenuar o efeito da têmpera. O tratamento de normalização é realizado a temperaturas entre 480 e 600 °C, podendo ser superior, resultando em um aço temperado com microestrutura martensítica/bainítica, associada à combinação de boas características mecânicas, como elevada resistência à ruptura, ductilidade, dureza e consideráveis propriedades de soldabilidade.

Com isso, após a soldagem, a microestrutura dos metais de solda formada é em martensita e ferrita acicular devido à taxa de resfriamento rápida inerente ao processo de soldagem. Áreas próximas à soldagem, como a Zona Termicamente Afetada (ZTA), formam uma microestrutura consistindo de martensita temperada e bainita grossa. O tratamento pós-soldagem, com o objetivo de alívio de tensões é obrigatório e requerido nos procedimentos de soldagem aplicados (SEPHRZAD *et al.*, 2015).

Segundo Montemarano (1986), os resultados são aços que, devido ao baixo teor de carbono, possuem boas propriedades de soldagem. Já os aços bainíticos de baixo carbono laminados a quente foram bem sucedidos e usados em muitos campos por várias décadas devido a sua boa combinação de alta resistência

mecânica e dureza. No entanto, quando soldados usando processos de soldagem convencionais, podem produzir defeitos de soldagem, como trincas de resfriamento rápido e aumento acentuado da dureza nas regiões termicamente afetadas. Considerando esses itens, a soldagem desses materiais deve ser tratada com controle.

Para os processos de soldagem, o desenvolvimento de novos aços pode ser influenciado por vários parâmetros, tais como composição de metais, métodos e parâmetros do processo de soldagem (por exemplo, velocidade, corrente e tensão). Para um determinado método de soldagem e metal base, é evidente que a adição de calor, o qual é definido como função da corrente, tensão e velocidade soldagem, desempenha um papel crítico na influência das microestruturas das regiões e propriedades mecânicas da junta soldada (LAN, 2012).

Ainda de acordo com Lins (2013), um fator importante na obtenção das propriedades desejadas para os aços temperados e revenidos é a influência dos elementos de liga nas etapas de tratamento térmico de têmpera e revenimento. O Quadro 1 apresenta um resumo do efeito dos principais elementos de liga durante o processo de têmpera e revenido.

Pela exposição representada no Quadro 1, cada elemento possui uma representatividade em maior ou menor proporção. Porém, todos os elementos têm influência nas características metalúrgicas dos materiais.

*QUADRO 1- INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA*

ELEMENTO	TÊMPERA	REVENIDO
----------	---------	----------

<b>Mn</b>	Contribui para a temperabilidade, especialmente em percentuais acima de 0,8%.	Aumenta da dureza da martensita revenida.
<b>Ni</b>	É similar ao manganês para baixas adições, é menos potente quando presente em altas concentrações.	Tem um efeito relativamente pequeno na dureza da martensita revenida, que é essencialmente o mesmo para toda a faixa de temperaturas de revenimento.
<b>Cu</b>	É usualmente adicionado aos aços liga pela sua contribuição para maior resistência a corrosão atmosférica e maiores níveis de endurecimento por precipitação.	Quando o aço é aquecido a uma temperatura entre 425 – 650°C, o cobre pode precipitar promovendo um endurecimento por precipitação.
<b>Si</b>	O efeito do silício varia consideravelmente com a quantidade de carbono e outros elementos de liga presentes.	Aumenta a dureza da martensita revenida para toda a faixa de temperatura de revenimento.
<b>Mo</b>	É o mais efetivo no aumento da temperabilidade.	Retarda o amortecimento da martensita para toda a faixa de temperaturas de revenimento.
<b>Cr</b>	Da estabilidade dos carbeto de cromo para baixas temperaturas de austenitização, o cromo toma-se menos efetivo na temperabilidade.	É um forte formador de carbeto sendo esperado produzir um retardo no amolecimento da martensita em todas as temperaturas.
<b>V</b>	Não é usualmente adicionado para prover temperabilidade em aços temperados e Revenidos.	É um forte formador de carbeto.
<b>Ti, Nb e Zr</b>	São fortes formadores de carbeto e não são adicionados para o aumento da temperabilidade pelos mesmos motivos apresentados para o Vanádio.	Podem comportar-se como vanádio, pois são fortes formadores de carbeto.

Fonte: Schnitzer (2017)

#### 2.4. MATERIAL BASE DAS CARRETAS – DESIGNAÇÃO ASTM A517 GR. B

Para Drawish *et al.* (1996), há uma grande disponibilidade de aços soldáveis para projetistas e fabricantes para uso na construção geral, vasos de pressão e outras aplicações. A Tabela 2 classifica, de forma simplificada, estes aços com base no tipo de composição, tipos de tratamentos térmicos e suas respectivas propriedades mecânicas.

TABELA 2- COMPARAÇÃO DOS TIPOS DE COMPOSIÇÃO X TENSÃO DE ESCOAMENTO

Tipo de composição	Tratamento Térmico	Tensão de escoamento	
		Ksi	N/mm <sup>2</sup>

Aço Carbono	Como fabricado	30- 50	(207- 345)
	Normalizado	30- 50	(207- 345)
	Temperado e revenido	50-100	(345- 689)
Aço Carbono Baixa Liga	Como fabricado	40- 70	(276- 482)
	Normalizado	50- 60	(276- 413)
	Temperado e revenido	60-100	(413- 689)
Aço Carbono Ligados	Como fabricado	35- 50	(241- 345)
	Normalizado	50- 80	(345- 552)
	Temperado e revenido	50-180	(345-1241)

Fonte: SSAB (2016)

A diversidade das ligas representadas na Tabela 1 aplica-se tanto em ambientes estáticos, como em ambientes dinâmicos, envolvendo temperaturas atmosféricas, temperaturas criogênicas e ou elevadas, com outras ainda requerendo a resistência ao desgaste.

## 2.5. SOLDABILIDADE DOS AÇOS ALTA RESISTÊNCIA BAIXA LIGA

Para a soldagem dos aços alta resistência baixa liga temperados e revenidos, um importante procedimento a ser adotado é o pré-aquecimento, pois previne a ocorrência de trincamento induzido por hidrogênio e pode contribuir para produzir uma zona termicamente afetada (ZTA) diminuída e com microestrutura e propriedades mecânicas similares ao metal base, podendo reduzir o valor da dureza localizada nessa região (SSAB, 2016).

A Tabela 3 apresenta valores orientativos para o pré-aquecimento, considerado uma variável essencial nos procedimentos de soldagem para os aços de alta resistência, especificamente o ASTM A517 Gr. B, que devem ser empregados para obter velocidades de resfriamento reduzidas e obtenção de microestruturas menos fragilizante (SSAB, 2016).

**TABELA 3-TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO E INTERPASSE PARA SOLDAGEM DO AÇO ASTM A517 GR. B**

Espessura metal base (mm)	Temperatura de pré-aquecimento (°C)	Temperatura de interpasse (°C)
< 9,5	18	18
9,5 a 19	79	79
19 a 31,8	110	110

Fonte: SSAB (2016).

Em comparação com a Tabela 3, a Tabela 4 traz informações do fabricante do próprio material base, estipulando valores de pré-aquecimento orientativos (ARCELOR MITAL, 2008).

**TABELA 4-TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO E INTERPASSE ASTM A517 GR. B**

Espessura metal base (mm)	Temperatura de pré-aquecimento (°C)
<12,7	10
12,7 a 25,4	65
25,4 a 50,8	65
>50,8	93

Fonte: Catálogo ARCELOR MITTAL (2008).

Ainda no mesmo termo de definição da temperatura de interface, a Tabela 5 mostra valores de pré-aquecimento e também de pós-aquecimento para o mesmo material base descrito (PRACTICAL WELDING TODAY, 2002).

**TABELA 5-TEMPERATURA DE PRÉ E PÓS-AQUECIMENTO ASTM A517GR. B**

Espessura metal base (mm)	Temperatura de pré-aquecimento mínimo (°C) (*1)	Temperatura de pré-aquecimento mínimo (°C) (*2)	Temperatura de pós-aquecimento máximo (°C)
<19	21	21	204
19 a 38,1	52	148	204
38,1 a 63,5	79	176	232
>63,5	107	176	232

\*1 – processo eletrodo revestido (SMAW)

\*2 – processo arco submerso (SAW)

Fonte: PRACTICAL WELDING TODAY (2002).

Aço temperado e revenido, designação ASTM A517, é um aço importante na indústria e tem ampla aplicação na construção de equipamentos e embarcações. Como este aço é martensítico e na zona termicamente afetada (ZTA) há mudança de estrutura para ferrita e perlita, a resistência da zona afetada pelo calor é reduzida em comparação com o metal base e, conseqüentemente, os aços temperados têm uma alta sensibilidade à entrada de calor.

Portanto, alta temperatura de entrada diminui a taxa de resfriamento e cria efeitos adversos microestruturais e de suas propriedades. Assim, processos de processo com entrada excessiva de calor como *eletro-escória* e arco-submerso (SAW) com múltipla alimentação devem ser evitados; com isso os métodos de menor aporte de calor são os mais recomendados. Portanto, métodos com aporte de calor mais baixa deve ser usada nestes tipos de soldagem, procedimentos utilizados para evitar danos causados pela mudança de microestrutura da junta soldada e áreas adjacentes (PEZESHKIAN; SHAFIAEPOUR, 2015)

Devido à alta temperabilidade dos aços de alta resistência e alta qualidade, tanto o metal de solda, quanto a zona termicamente afetada (ZTA), podem desenvolver microestruturas que são susceptíveis ao trincamento induzido por hidrogênio. A microestrutura da zona de fusão pode ser facilmente controlada pela adição de elementos de liga, através dos consumíveis empregados no processo de soldagem, enquanto a microestrutura da zona termicamente afetada pode ser controlada com o emprego do pré-aquecimento (LINS, 2013).

Para a soldagem dos aços desta designação, com o nível apropriado de pré-aquecimento para o aporte térmico, a velocidade de resfriamento na zona termicamente afetada produz uma microestrutura martensítica/bainítica, sendo benéfico para a junta soldada uma vez que o metal base é constituído por estas duas microestruturais (LINS, 2013).

Além das considerações mecânicas do projeto conjunto, o processo de soldagem, material de enchimento, aporte de calor (*heat input*), número de cordões, etc. influenciarão na microestrutura da junta soldada e, por sua vez, irá

influenciar a extensão da zona afetada pelo calor e tensões residuais que se acumulam no metal de base. Esta heterogeneidade microestrutural terá uma influência nas propriedades mecânicas (MAGUDEESWARAN *et al.* 2014).

## **2.6. REQUISITOS DE QUALIDADE – ORGANISMOS REGULAMENTADORES**

Os equipamentos transportadores de gases pressurizados devem ser regidos por padrões, no Brasil há organismos regulamentadores da construção, inspeção e liberação do equipamento de transporte para uso e venda. Esses organismos são regidos pelo INMETRO e organismos credenciados, os quais contemplam normas nacionais e internacionais (PORTARIA INMETRO, RTQ1C).

Referenciando-se os padrões normativos internacionais, tem-se especificamente a utilização de uma norma norte-americana de construção de vasos de pressão, conhecida e utilizada mundialmente, designado como Código ASME (American Society of Mechanical Engineers), em seus capítulos V e VIII (NORMA ASME, 2017).

Esses capítulos são representados em sua numeração V como a parte responsável pelos ensaios não destrutivos (END) e, já na sua divisão VIII, são apresentados os cálculos de construção do vaso de pressão, e também é mencionado o roteiro de especificações para o acompanhamento da construção, montagem e soldagem do equipamento apresentado (NORMA ASME, 2017).

No ambiente africano, também é seguido o Comitê Nacional SABS SC 1060A, Comitê Nacional para padrões de mercadorias perigosas - Projeto e construção de veículos, tanques e acessórios para o transporte de mercadorias perigosas (NORMA SANS 1518:2011).

## **2.7. PROCESSOS DE SOLDAGEM**

A qualidade de uma junta de soldada é diretamente influenciada pelos parâmetros de entrada de soldagem durante a execução do processo. Portanto, o processo de soldagem pode ser considerado como uma entrada de inúmeras variáveis essenciais e várias respostas na saída. Contudo, um problema comum enfrentado pelas indústrias é o controle dos parâmetros de entrada do processo, quando é necessário se obter uma boa junta soldada com a geometria do padrão (BENYOUNIS *et.al.*, 2008).

A soldagem é o mais importante processo industrial de fabricação de peças metálicas. Processos de soldagem ou processos afins são também utilizados na recuperação de peças desgastadas para a aplicação de revestimentos de características especiais sobre superfícies metálicas e para corte (MODENESI *et al.*, 2012).

A soldagem é, ainda, o processo de fabricação que tem aplicação prática no ar, água e espaço. Também é empregada nos diferentes setores industriais, como automotivo, aeroespacial, construção naval, construção civil, energia nuclear, energia eólica, geração de energia, eletroeletrônicos, aparelhos domésticos, petroquímica e todos os setores da fabricação mecânica (ALKAHLA; *et.al.*, 2017).

De acordo com a norma internacional ISO 4063, existem mais de 90 diferentes tipos conhecidos de processos de soldagem. A soldagem é usada extensivamente em todos os setores para a fabricação de produtos em uma grande variação de equipamentos, desde terraplenagem, até equipamentos aeroespaciais com muitos requisitos de tecnologia. Os processos usados podem ser classificados como soldagem a arco, gás soldagem, soldagem por resistência, soldadura de feixe de energia e soldagem de estado sólido. A seleção do processo de soldagem adequado entre as alternativas disponíveis para uma determinada aplicação de engenharia torna-se uma decisão de extrema importância (CAPRAZ *et al.*, 2015).

Sendo a soldagem por fusão aplicada amplamente na construção com aços estruturais de engenharia, o foco em pesquisas estavam focadas na evolução



da microestrutura e otimização do desempenho das juntas soldadas. Como o sistema de soldagem envolve muitas variáveis, como processos, parâmetros, metais base e microestruturas iniciais, tem sido uma tarefa difícil obter um ótimo sistema de soldagem para novos aços. A comunidade de manufatura ainda sofre muitos problemas de soldagem, mesmo após 100 anos da invenção do arco de soldagem (LAN *et al.*, 2016).

Para atender aos requisitos do ambiente de serviço e para reduzir o custo, muitos aços novos com alto desempenho têm sido desenvolvidos. Posteriormente, o sistema de soldagem aceitável deve ser projetado para garantir a integridade estrutural das soldas na prática. No entanto, com o aumento da resistência do metal base, o design de resistência do metal de solda está dentro de um dilema. Tradicionalmente, o metal de solda deve ter maior resistência do metal. No entanto, a maior resistência do metal de solda precisa de maior teor de elementos de liga no consumível de soldagem, o que provavelmente leva a menor resistência às juntas soldadas, fissuras a frio bem como uma maior suscetibilidade à fragilização do hidrogênio na soldagem (LAN *et al.*, 2016).

Como exemplo de comparação entre produtividade de processos de soldagem, para a soldagem de tubulação, similares a vasos de pressão, são classificados em ordem decrescente de acordo com a taxa de deposição: Soldagem de arco submerso (SAW), arame tubular (FCAW), eletrodo revestido (SMAW) e arame sólido (GTAW) estão ilustrados na Figura 4 (PATRICK *et.al.*, 2014):

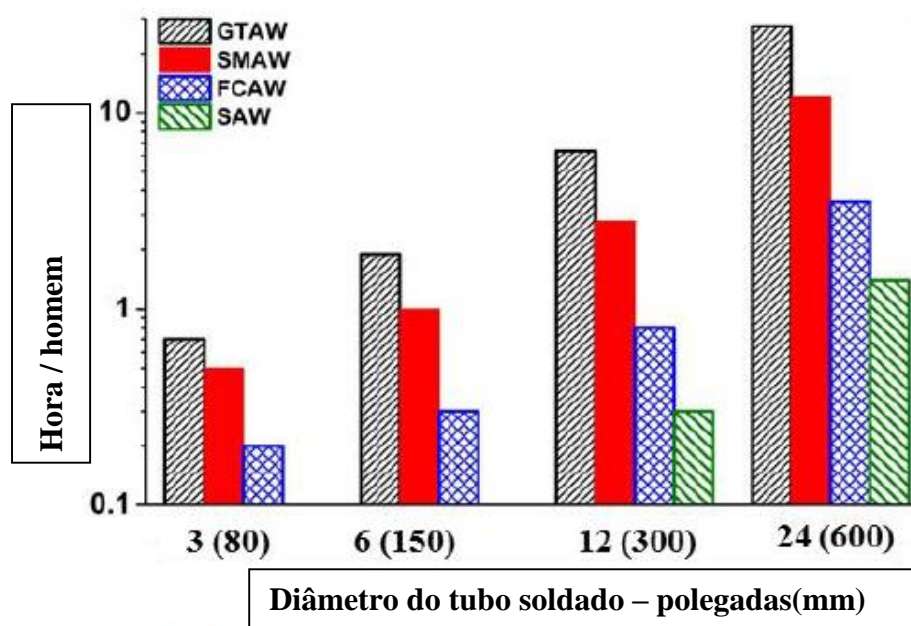


FIGURA 4-COMPARAÇÃO TÍPICA DE TAXA DE DEPOSIÇÃO X DIÂMETRO DO TUBO (ADAPTADO DE PATRICK ET AL., 2014).

### 2.7.1. ARCO SUBMERSO (SAW)

A soldagem por arco submerso (SAW) é aplicada na soldagem de tal estrutura metálica com maior produtividade e economia, porque a alta entrada de energia poderia aumentar a taxa de deposição e reduzir tempo de soldagem. Portanto, existe uma contradição entre produtividade e qualidade. O aumento da demanda por melhorar qualidade e eficiência de custo na soldagem e o aço ARBL temperado exigiu um processo de soldagem de alta eficiência, com baixa entrada de energia, enquanto a técnica de soldagem a arco metálico com gás ativo (GMAW) tem as vantagens de alta eficiência e qualidade comparativa com o processo de soldagem tradicional na soldagem de chapas pesadas XU et al., 2014).

De acordo com Gosha (2011), a soldagem a arco submerso é um processo de soldagem de alta taxa de deposição, de alta qualidade. Surgiu no início da década de 1930 e sua utilização aumentou durante a Segunda Guerra Mundial. Embora o consumo anual e sua participação no mercado de trabalho estejam aumentando, sua contribuição percentual entre os outros processos ainda é inferior a 10%.

A principal característica do processo é sua alta deposição, combinada ao ajuste químico do metal depositado, e isso combinado à somatória do arame e do fluxo durante a soldagem. O processo SAW é semelhante à soldagem MIG/MAG, onde a formação do arco elétrico ocorre entre um eletrodo consumível alimentado continuamente, adicionado fluxo e a peça a ser soldada. Neste processo de soldagem, a função da proteção gasosa é realizada pelo fluxo adicionado durante a soldagem, que, além de controlar e ou adicionar elementos de liga na poça de fusão, a protege de contaminação e oxidação (GOSHA, 2011).

A soldagem a arco submerso é um processo de soldagem amplamente utilizado na indústria para soldagem de chapas grossas, em particular aço. O processo é essencialmente automático ou semi-automático, com eletrodos consumíveis alimentados continuamente de um rolo de arame. O processo envolve geração de calor por um arco produzido entre o fio consumível e a peça de trabalho (NEGI *et al.*, 2013).

O arco assim produzido é coberto em uma massa de fluxo granular fusível. O fluxo ajuda o processo de várias maneiras: forma um revestimento protetor sobre a solda, remove impurezas na forma de escória, forma o cordão de solda, contribui com a composição química do metal de solda e com suas propriedades mecânicas. Além disso, durante o processo de fusão, o arco ainda líquido é coberto por uma camada de fluxo granulado, o que reduz a perda de energia térmica para o ambiente, tornando-se assim o resfriamento do cordão bem mais lento (NEGI *et al.*, 2013).

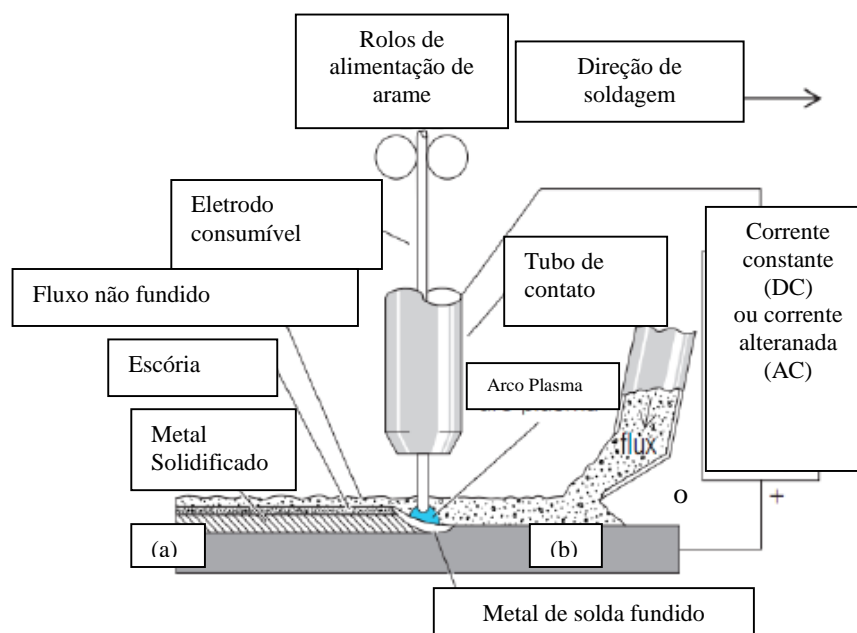
Ainda de acordo com Negi *et al.*(2013), com essas características, o processo arco submerso é considerado um dos processos de soldagem mais eficientes

em taxa de deposição, com valores em torno de  $0,84 \pm 0,03$ . O diâmetro do eletrodo consumível pode variar de 1 a 5 mm. Um gerador de fonte contínua permite que o comprimento do arco possa ser controlado e, em alguns casos, podendo ser até automatizado, ou seja, auto-ajustável. Para fios com um diâmetro superior, é utilizada uma fonte contínua de corrente constante. Porém, na situação de correntes muito altas de soldagem, é preferível a utilização de corrente alternada para evitar o “sopro magnético”.

Baseado na combinação de alta taxa de deposição, somada a altas taxas de correntes elétricas, é inerente ao processo a utilização de altas velocidades de soldagem, podendo chegar até 5 metros/minuto (m/min), as quais reduzem consideravelmente as distorção e deformações de materiais ou peças que estão sendo soldados, que ocorre devido a expansão e contração da solda adjacente ao metal base (KASABE, 2015).

De acordo com Cho (2013), a soldagem a arco submerso (SAW) é um processo muito complexo, que inclui reações físicas e químicas, o qual citou também a dificuldade do estudo deste processo utilizando simulações numéricas. Já com relação à zona termicamente afetada (ZTA) podem ser estimadas utilizando o método de elementos finitos (FEM) e considerando apenas a transferência de calor de condução.

Conforme o esquema da Figura 5, pode-se verificar as principais regiões durante a soldagem: (a) o fluxo e a escória fundida cobrem o cordão de solda e (b) a camada de fluxo não fundida que protege a poça de fusão. Devido ao arco de plasma estar coberto, é muito difícil observar a transferência de metal de SAW, porém alguns estudos anteriores conseguiram capturar o movimento de uma gota em SAW (KASABE, 2015)



**FIGURA 5 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO PROCESSO SAW  
(ADAPTADO DE KASABE, 2015)**

De acordo com Philips (2016), o processo de soldagem a arco submerso é quase sempre mecanizado, mas as versões manuais também estão disponíveis. Este processo baseia-se na fusão de uma porção de fluxo granular devido ao calor do arco de modo a formar uma escória fundida. Uma vez que é menos densa do que o metal, a escória fundida permanece no topo do metal de solda solidificar, protegendo-a da atmosfera, bem como auxiliar no formato do cordão. A radiação do arco, fumos e respingos ficam contidos sob o fluxo. A principal vantagem do processo SAW são as altas taxas de deposição do metal de solda, principalmente quando vários arames são utilizados em apenas um cordão. Esta característica é possível também pela excelente proteção contra a atmosfera e o controle da poça de fusão fornecida pela escória fundida.

O processo a arco submerso é comum para a soldagem de seções espessas onde há uma oportunidade para reduzir significativamente o número de passes que seriam necessários com outros processos de soldagem a arco. No entanto, a grande poça de solda e de escória envolvidas neste processo limita o uso da posição plana e tem muitas restrições no plano horizontal. Este processo foi desenvolvido na década de 1950 para aumentar a produtividade da fabricação de estruturas de paredes espessas na soldagem de um só lado (PHILIPS, 2016).

O processo é amplamente utilizado hoje para vigas I de construção, construção naval, tubulação e fabricação de vasos de pressão, construção de vagões, e revestimentos. É facilmente adaptado à automatização, mas geralmente não é usada no campo, devido à necessidade de alimentação do fluxo e sistemas de aspiração do fluxo que não foi fundido. Em muitos casos, a tocha de solda é estacionária, o que requer que as peças a serem soldadas sejam movidas abaixo da tocha. O processo normalmente opera em níveis muito elevados de amperagem (até 2000 A). Assim, as fontes de energia necessárias para SAW são mais caras do que aqueles para os processos concorrentes, como GMAW. As tensões de arco típicas variam entre 25 e 40 V. As variáveis do processo SAW são os mesmos que outros processos, tais como semi-automáticas GMAW, com a variável adicional do fluxo granular (PHILIPS, 2016).

A AWS (American Welding Society) especifica o fluxo e o metal de enchimento em uma única especificação. A especificação de aço carbono para eletrodos e fluxos é contida na especificação SFA 5.17. Por exemplo, uma especificação comum para uma combinação de fluxo-eletrodo a partir desta especificação é F7A2-EM12K. O "F" indica que este é um fluxo. As informações após o "M" referem-se às propriedades do metal de solda que uma solda feita com esta combinação de fluxo-eletrodo apresenta, e que o tratamento térmico é exigido para produzir essas propriedades.

O primeiro número é a resistência à tração do metal mínimo depositado em incrementos de 10 000 libras por metro quadrado polegada. A letra seguinte um "A" ou um "P" fornece informações sobre a condição do tratamento térmico da placa de teste antes de serem testadas. A letra "A" indica a ausência de tratamento térmico, ou como soldada, e um "P" indica que um tratamento térmico pós-soldagem foi conduzido. O número após a designação do tratamento térmico fornece informações sobre propriedades ensaio de impacto Charpy da soldagem quando produzido com o eletrodo. Especificamente, a temperatura (em °F multiplicado por 10) em que um mínimo de 20 ft-lbs é conseguido através de testes de impacto Charpy. Por exemplo, se o número é um 2, a temperatura de ensaio de Impacto Charpy é de -20°C, se é um 4 a temperatura é de -40 ° C,

e assim por diante. As designações para o eletrodo referem-se a composição química que é necessária para produzir as propriedades de solda descritos sob a designação de fluxo. Um "C" refere-se a um eletrodo de compósito enquanto a ausência de um "C" significa que um fio sólido é utilizado. A letra seguinte, um "L", "M", ou "H" refere-se a baixo, médio ou alto nível de manganês, respectivamente. Os dois números seguintes representam o teor de carbono (AWS, 2017).

Com relação aos fluxos de soldagem, existem: neutro, ativo, ou ligado. Um fluxo é considerado neutro se não há nada adicionado a afetar a qualidade da solda ou propriedades. Fluxos de ativos e ligados apresentam elementos adicionais que beneficiam o metal de solda, quer através de liga para melhorar propriedades mecânicas, ou outras melhorias para soldar com melhor qualidade, tais como a porosidade reduzida. Portanto, as alterações na tensão do arco podem resultar em alterações nas propriedades do metal de solda, ou a propensão para formação de porosidade quando se utilizam estes fluxos. (PHILIPS, 2016).

Ainda como características desse processo, podem-se destacar as seguintes vantagens:

- Taxas de deposição extremamente altas
- Nenhum arco visível
- Fumaça e fumos mínimos
- Oportunidade significativa para personalizar as propriedades do metal de solda, através da seleção do fluxo
- Soldas podem ser produzidas com ângulos de chanfros reduzidos
- Processo mecanizado (geralmente) não depende da habilidade do soldador

E também as seguintes limitações:

- Restritos a posição plana para soldas chanfro e plana e horizontal posições para soldas de filete
- Manuseio do equipamento complexo devido ao fluxo
- Exigência de remoção de escória
- Fluxo pode facilmente absorver a umidade
- Não é adequado para espessuras finas

### **2.7.2. ARAME SÓLIDO (GMAW)**

O processo semi-automático por arame sólido, utilizado com a abreviatura MIG (*Metal Inert Gas*) de soldagem, também conhecido com a variação usando gás ativo MAG (*Metal Active Gás*), e nos EUA como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), é um processo de soldagem amplamente utilizado para soldar uma variedade de materiais, ferrosos e não ferrosos. A característica essencial do processo é o eletrodo consumível de pequeno diâmetro, alimentado continuamente no arco a partir de uma bobina. Este processo pode produzir soldas rápidas e perfeitas em diversos tipos de juntas (MISHRA, 2015)

De acordo com Mukhopadhyay (2004), o processo semi-automático com arame sólido (GMAW), representado pela Figura 6, possui alta produtividade, aplicabilidade para uma ampla gama de metais comuns espessura em todas as posições de soldagem e adaptabilidade à automação ou a mecanização. A proteção feita por gás utilizado para este processo tem de proteger a piscina e gotícula fundida transferida através do arco. Além disso, deveria promover um arco estável, o modo desejado de transferência de metal e característica de cordão de solda. O CO<sub>2</sub> é usado como proteção gás devido ao seu baixo custo, mas seu uso foi limitado porque do problema de salpicaduras, perdas de oxidação e posição geral pobre desempenho. Por outro lado, o argônio sozinho também não é adequado para soldar aço, pois não pode obter a desejada estabilidade do arco e características de cordão de solda desejadas. A soldagem



pelo processo *GMAW* pode ser feita de três formas diferentes: a) Soldagem Semi-automática: o equipamento controla apenas a alimentação de eletrodo consumível. O movimento da pistola de solda é controlado manualmente, chamado de soldagem manual; b) Soldagem com auxílio de equipamentos: a tocha é conectada a um manipulador. O operador deve constantemente definir e ajustar os parâmetros de movimentação; c) Soldagem Automática: utilizado com equipamentos sem o constante ajuste dos controles por um soldador ou operador. Em alguns equipamentos, dispositivos de detecção automática controlam o alinhamento correto da tocha em uma junta soldada (SATYADUTTSINH *et.al.*, 2014).

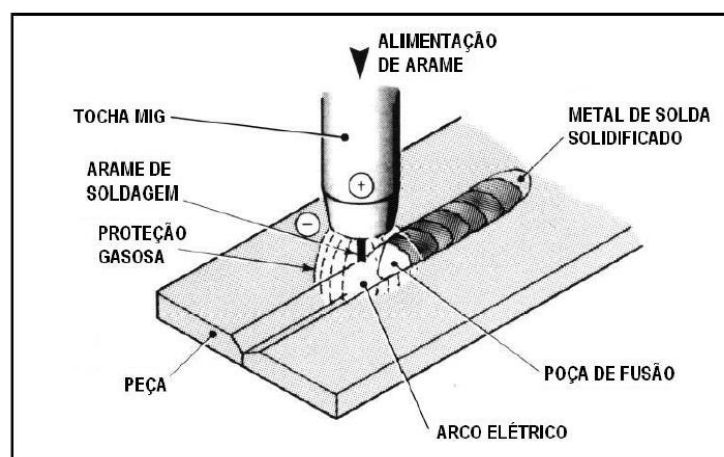


FIGURA 6 - PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG (ADAPTADO DE PHILIPS, 2016).

### 2.7.3 ARAME TUBULAR (FCAW)

O processo de soldagem denominado como arame tubular (FCAW), conforme exemplificado na Figura 7, é reconhecido por sua alta taxa de deposição, bom desempenho do arco, e de proteção adequada, que atende requisitos de soldagem de posição, é único em relação ao seu consumível blindado e envolto por lamina de aço condutiva e interior com fluxo determinante da constituição dos elementos de liga (CHENG *et al.*, 2017).

Os arames com núcleo preenchido pelo fluxo apresentam inúmeras vantagens em relação aos fios sólidos convencionais, como o aumento da taxa de deposição, maior rendimento e um maior controle dos elementos químicos a serem depositados, aumentaram o rendimento (GUCWA *et al.*, 2016).

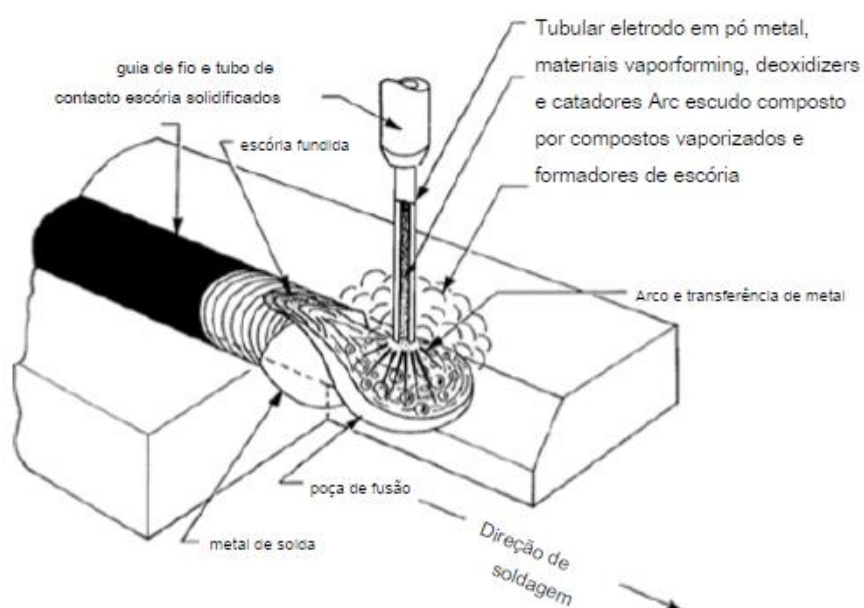


FIGURA 7 - PROCESSO DE SOLDAGEM FCAW (ADAPTADO DE PHILIPS, 2016).

O uso do processo FCAW se solidificou com a redução no uso da técnica de eletrodo revestido, apresentando um desenvolvimento contínuo também por sua flexibilidade, baixo custo e adequados para processos mecânicos. Ainda este processo destaca-se gerando metal depositado e qualidade de solda com ótimo acabamento, e ainda maior tolerância para a presença de contaminantes que podem causar a aparência de trincas (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Adicional a esses fatores, a soldagem FCAW possui maior controle sobre a corrente, tensão, entrada de calor, taxa de fluxo de gás, distância de saída, velocidade e taxa de alimentação de fio da tocha de solda em solda de união e solda de reparos. Para projetos de automação também é recomendada. Além disso, valores de dureza e microestruturas desejáveis pode ser obtidos usando este processo, relacionando-se ao fator diluição (LING *et al.*, (2015).

#### **2.7.4 ELETRODO REVESTIDO (SMAW)**

Comumente chamado de soldagem a arco elétrico, é um dos métodos de soldagem por fusão, unindo metais entre dois condutores, sendo o eletrodo e a peça os condutores. O processo emprega como consumíveis eletrodos revestidos ou cobertos, para produzir um arco para atuar como fonte de calor, o revestimento na queima fornece o escudo necessário para proteger o metal fundido do efeito de oxigênio e hidrogênio da atmosfera circundante. Sendo considerado o processo de soldagem mais usado no mundo, tanto a alimentação em corrente alternada (CA), quanto a corrente contínua (CC), e considerando as respectivas polaridades diretas (EP) ou inversas (EN), podem ser usadas igualmente e efetivamente. Cerca de 70% do calor liberado é devido a golpes de elétrons no ânodo, que o eleva a temperaturas para valores muito altos, sendo responsável pelo derretimento do metal de base (GOWTHAMAN *et al.*, 2017). A Figura 8 ilustra o processo.

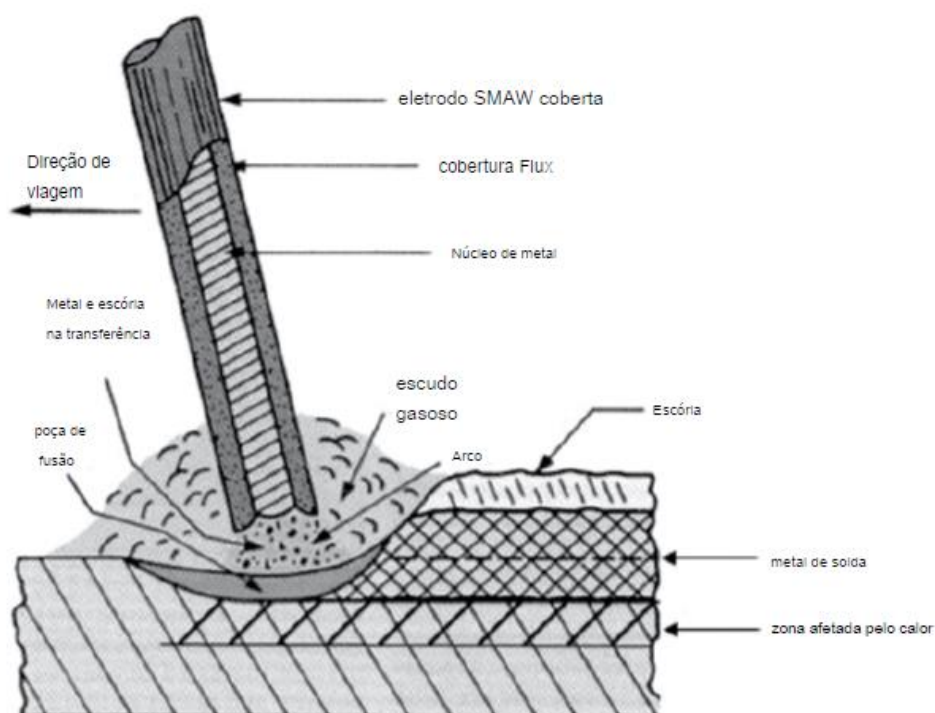


FIGURA 8-PROCESSO DE SOLDAGEM SMAW (ADAPTADO DE PHILIPS,2016).

O processo de soldagem SMAW oferece várias vantagens, incluindo menor custo de equipamento, portabilidade de equipamentos, e soldagem em várias posições e ainda em espaços confinados. Dependendo do consumível a ser utilizado, quando da classificação de celulósicos, há uma velocidade de soldagem mais rápida e uma maior penetração (ALIPOORAMIRABAD *et al.*, 2017).

## 2.8. VARIÁVEIS ESSENCIAIS DE SOLDAGEM

Variáveis essenciais são designadas como itens essenciais nos requisitos de soldagem, que quando houver alteração ou mudança, que podem ou não afetar as propriedades mecânicas da junta soldada. Havendo a alteração dos itens citados na Tabela 6, é necessário a qualificação de um novo procedimento de soldagem. (Código ASME – Capítulo IX).

TABELA 6 - VARIÁVEIS ESSENCIAIS DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM

Descrição das Variáveis	SMAW	FCAW	GMAW	SAW
Espessura qualificada	X	X	X	X
Largura do passe	X	X	X	X
Material base qualificado	X	X	X	X
Especificação(grupo) do consumível utilizado	X	X	X	X
Composicao química do metal depositado	X	X	X	X
Temperatura de pré-aquecimento	X	X	X	X
Fluxo utilizado				X
Liga do fluxo utilizado		X	X	X
Tratamento pós soldagem				X
Tipo do arame consumível utilizado				
Tipo de gás utilizado		X	X	
Modo de transferência		X	X	

Fonte: Standard ASME IX (2015)

## 2.9. A MECANIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM

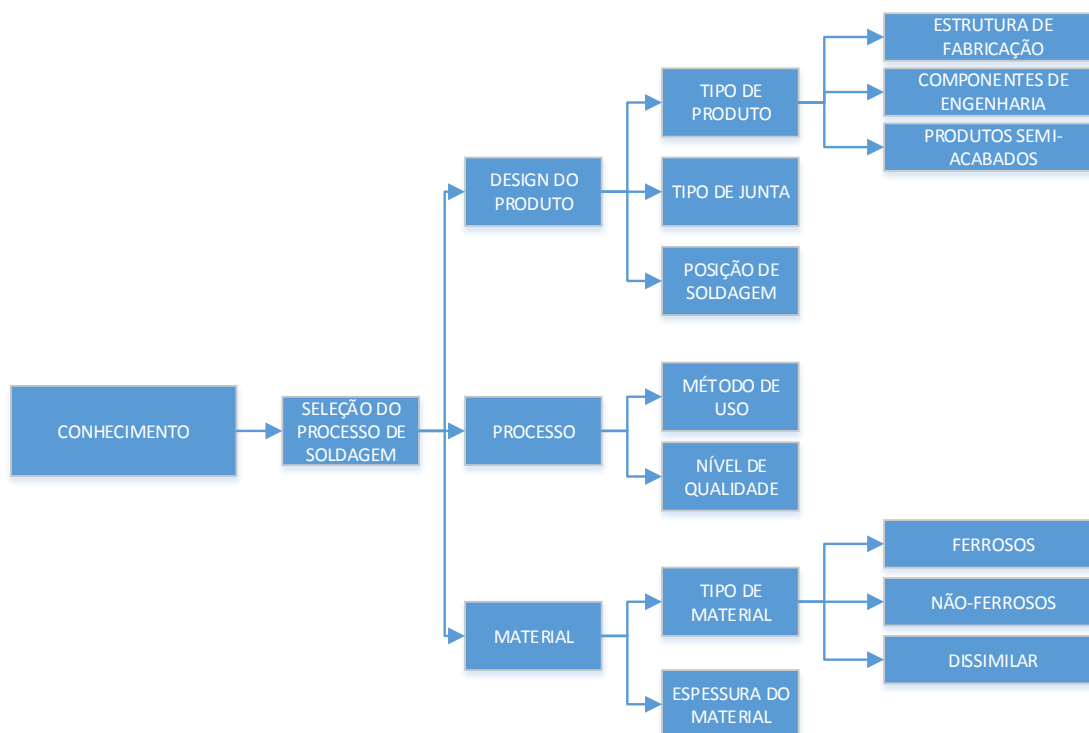
Uma das maneiras de aumentar a produtividade e reduzir o custo da solda é a mecanização da mesma, que pode ser realizada utilizando-se dispositivos que auxiliam à sua execução. Os principais benefícios inerentes à mecanização são (VIEIRA *et al.*, 2011):

- Maiores taxas de deposições: com a mecanização é possível manter correntes de soldagem e “stick-out” elevados de forma homogênea durante a soldagem;
- Elevados ciclos de trabalho: parte do trabalho pesado é realizado pelo equipamento, com isso o número de paradas é reduzido e as condições de saúde e segurança são melhoradas;
- Alta qualidade e padronização do cordão de solda: Como os parâmetros de soldagem são previamente definidos, a soldagem é padronizada, garantindo a qualidade de forma uniforme ao longo do cordão de solda. Isso leva a um menor nível de respingos e redução da incidência de

defeitos (como, por exemplo, mordedura e falta de fusão), afetando positivamente também o ciclo do trabalho.

- Facilidade de qualificação de mão-de-obra: Pelo fato da execução da solda ser realizada pelo equipamento, não é requerida tamanha habilidade como na soldagem manual e com isso se torna mais fácil à qualificação da mão-de-obra.

Além da mecanização dos equipamentos, destacam-se também alguns aspectos operacionais fazendo comparações entres os processos na soldagem em posições de soldagem específicas, o que nem sempre corresponde com a capacidade operacional de cada processo. Desta forma, é necessário o desenvolvimento de uma metodologia que tenha capacidade de analisar de maneira comparativa dois ou mais processos, para uma determinada aplicação e condições de soldagem (SOUZA, 2013). De acordo com Vieira (2011), para aumento da produtividade, no contexto de mecanização dos processos, especificamente processos de soldagem, é usado o diagrama da Figura 9 para a definição da melhor opção para cada soldagem de junta.



**FIGURA 9 - PROCESSO DO CONHECIMENTO PARA ESCOLHA DO PROCESSO DE SOLDAGEM (ADAPTADO VIEIRA ET AL., 2011).**

Com a utilização do diagrama da Figura 9, é possível avaliar as variáveis essenciais necessárias para a adequação do melhor processo de soldagem, relacionando qualidade, produtividade e responsabilidades.

## **2.10. DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS DE SOLDAGEM**

De acordo com Urtado *et al.* (2014), a boa soldagem é aquela que proporciona boas propriedades com o menor custo possível, desde que a qualidade desejada seja atingida, pois para cada produto tem-se vários níveis de qualidade, e não se pode, por exemplo, comparar uma soldagem de vasos de pressão com uma solda comum. Uma atitude responsável para a realização de uma soldagem bem-sucedida pressupõe a elaboração de uma documentação completa dos procedimentos e os meios de controle e inspeção e testes baseados em norma ou código de construção.

Tudo começa com um projeto de acordo com um código de construção, devemos nos esforçar ao máximo para minimizar a quantidade de metal de adição necessária e certificar-se que as juntas são facilmente acessíveis para operações de soldagem, ou seja, o projeto da junta deve estar de acordo com o processo e posição de soldagem, a padronização de tipos e formas de juntas podem desempenhar um papel decisivo na redução dos custos de soldagem, comece usando os tradicionais usados na indústria, para depois otimiza-los com o menor volume possível (URTADO *et al.*, 2014).

Relacionando a questão atual de produtividade pode-se destacar como prioritário o atendimento aos requisitos dos clientes, satisfazendo o que pode ser perceptível, mas também monitorando as necessidades não percebidas. Na indústria automotiva, onde a concorrência é mais elevada, a melhoria sistemática da qualidade dos processos de soldagem e minimizar o custo são condições para permanecer no mercado. Processos de reparo e a perda de confiança do cliente mobilizam os fabricantes de automóveis para se intensificarem controle

de qualidade. Isso está intimamente relacionado com os custos. A Tabela 7 mostra os custos de remoção de defeitos, dependendo do estágio de produção (RESTECKA *et al.*, 2016).

TABELA 7 - *RELAÇÃO DE CUSTOS DE REMOÇÃO DE DEFEITOS (RESTECKA ET.AL., 2016)*

ETAPA	RELAÇÃO DE CUSTO
Durante o projeto	1
Depois da aprovação do projeto	10
Durante o projeto tecnológico	100
Durante a produção	1000
Com o produto no mercado	10000

Ainda de acordo com URTADO *et al.* (2014), a estimativa de custo em soldagem é a soma de vários itens essenciais a execução da soldagem. O resultado é a totalização destes custos em um valor monetário. Deve-se atentar-se as unidades de medida. Com isto, o custo total de soldagem pode ser representado pela somatória dos custos individuais dos seguintes itens:

- Custo do metal base
- Custo da preparação
- Custo da mão de obra de soldagem – soldadores e operadores
- Custo do metal depositado
- Custo gases
- Custo dos equipamentos fonte de energia e acessórios
- Custo da energia
- Custos indiretos
- Custo da inspeção
- Custo de acabamento

De acordo com Modenesi (2001), para o detalhamento técnico dos custos de soldagem também devem incorporados aos cálculos dos custos de soldagem:



- Massa do material depositado
- Tempo de arco aberto
  - ✓ Com base na taxa de deposição
  - ✓ Com base na velocidade de soldagem
- Eficiência dos eletrodos, fluxos, e outros consumíveis
- Custos fixos da empresa

Segundo NEVES (1994), é considerado um valor tabelado chamado fator de operação, qual corresponde a porcentagem de tempo que o arco esta efetivamente aberto, durante um período. O fator de operação varia de acordo com o processo e as condições operatórias (método, diâmetro do eletrodo, posição e parâmetros de soldagem). A Tabela 8 apresenta os intervalos dos fatores de operação para diversas formas de soldagem.

*TABELA 8 - FATORES DE OPERAÇÃO PARA DIVERSAS TÉCNICAS DE SOLDAGEM  
(ADAPTADO NEVES 1994)*

Método de Soldagem	Intervalo do fator de operação (%)
Manual (SMAW e TIG)	5 – 30
Semi-automático (GMAW e FCAW)	10-60
Automatico (SAW)	50-95

Com relação aos custos relacionados à mão de obra (\$MO), são determinados por unidade de comprimento (L), a partir de salario do soldador (S), massa do metal depositado (M), taxa de deposição (T) e pelo fator de operação (F).

$$\$MO = (S * M)/(T * F) \quad (1)$$

A massa do material depositado (M) utilizada na equação 1 é determinada pela relação 2, sendo obtida a partir do produto da área da seção transversal da junta (A) pela densidade do metal depositado (D). O volume do reforço pode ser

estimado assumindo uma de 10% da secao transversal para chanfros simples e 20% para chanfros duplos. A taxa de deposição é em função do processo.

$$M = A.D \quad (2)$$

Todos os processos de soldagem apresentam perdas, que podem ser na forma de vaporização do metal pela ação do arco, respingos, formação de escória e aproveitamento incompleto dos eletrodos e varetas do metal de adição. Portanto deve-se calcular a quantidade efetiva de material a ser consumida (C), pela equação (3), através da razão entre a quantidade de metal da junta (M) em (kg/m) e a eficiência do processo (E). A Tabela 9 apresenta os intervalos de eficiência para os processos utilizados.

$$C = M/E \quad (3)$$

*TABELA 9 - EFICIÊNCIA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM (ADAPTADO DE NEVES, 1994)*

Processo	Eficiência
Eletrodo Revestido	55 – 75
Arco submerso	95 – 99
TIG / Plasma	99
MIG / MAG	90 -95

O custo do metal de adição (\$MA) é calculado por unidade de comprimento da solda, a partir do produto entre o preço do metal de adição (P) em quilos pelo consumo de metal de adição (C) em (kg/m). Este é incorporado pela relação 4 aos custos totais.

$$\$MA = P * C \quad (4)$$

Outro método é utilizado para o calculo do custo do arame dos eletrodos, em processos de alimentação continua, tais como arco submerso, MIG/MAG ou TIG com alimentação automatizada do metal de adição. Determina-se a massa de metal (Q) em (kg/s) usada por unidade de tempo, através da razão entre a velocidade de alimentação do arame (va) em m/s e o comprimento por unidade de peso (Co) em m/kg.

$$Q = va/Co \quad (5)$$

O comprimento do fio ( $Co$ ) é estimado pela relação 6.  $Co = 1/(A.D)$ , onde ( $A$ ) é a área de secção transversal em ( $m^2$ ) e ( $D$ ) é a densidade em  $Kg/m^3$ . Determina-se a massa do eletrodo por unidade de comprimento ( $C$ ), pelo quociente entre massa do metal utilizada para preencher a junta ( $Q$ ) e a velocidade de soldagem ( $V$ ) estabelecida no procedimento.

$$C = Q/V \quad (7)$$

O custo do metal de adição ( $\$MA$ ) é estimado por unidade de comprimento pela relação 8.

$$\$MA = C.P \quad (8)$$

Os processos tig e mig/mag utilizam gases de proteção para a poça de fusão. A quantidade necessária do gas esta relacionada a velocidade de soldagem ou ao tempo para realizar a solda. O gasto com gás por unidade de comprimento ( $\$G$ ) é calculado a partir do preço do gás ( $Pg$ ), vazão ( $Q$ ) e velocidade de soldagem ( $V$ ), conforme equação 9. O custo do gás ( $\$Gu$ ) é expresso pela equação 10, onde ( $t$ ) é o tempo de arco para a realização da solda.

$$\$G = \frac{Pg.Q}{V} \quad (9)$$

$$\$Gu = Pg.Q.t \quad (10)$$

No processo a arco submerso um custo importante a ser considerado é o fluxo, e sua quantidade é proporcional a massa do metal depositada. Utiliza-se a relação fluxo/metal o intervalo de valores de 1,0 a 1,3. O custo do fluxo por unidade de comprimento ( $\$F$ ) é avaliado pela relação 11, que considera o preço do fluxo por kg ( $\$Pf$ ), consumo do metal de adição ( $C$ ) e razão ( $R$ ) entre fluxo e metal depositado.

$$\$F = \$Pf.C.R \quad (11)$$

A energia elétrica também é um custo (\$EE) considerável na soldagem, sendo possível estimar o seu valor, através do produto da potencia elétrica, pelo custo do Kwh (\$Kwh), conforme equação 12.

$$\$EE = (I.V.t).\$Kwh \quad (12)$$

Também, deve-se incluir o custo das despesas gerais, sendo gerência administrativa, depreciação e manutenção dos equipamentos, ferramentas de fixação e de uso geral, materiais consumíveis (bicos e bocais) e equipamentos de proteção individual. As despesas gerais podem ser rateadas pelos custos, possibilitando a obtenção dos custos totais por atividades realizadas. Outra alternativa é utilizar um fator de correção, através da multiplicação da soma dos custos da mão de obra e dos consumíveis, obtendo-se assim, o custo aproximado das despesas diversas. A Tabela 10 representa os fatores de correção utilizados para os processos de soldagem.

TABELA 10 - FATOR DE CORREÇÃO (ADAPTADO DE NEVES, 1994)

Processo	Eficiência
Eletrodo Revestido	1,02
Arco submerso	1,05
TIG / Plasma	1,09
MIG / MAG	1,09

Existem vários *softwares*, alguns comparando os custos de soldagem com métodos manuais e robóticos. Em adicional, tem-se a possibilidade de calcular o corte transversal área baseada na geometria da solda, calculando os parâmetros de arcos, salpicos e os parâmetros associados a eletricidade. Softwares mais complexos permite ajustar fatores de custo para a região e o perfil da empresa, geram relatórios, fazer cálculos para exploração de solda definida conjunto ou toda a estrutura, e também calcular a provável hora do tempo de conclusão de acordo com a especificação do processo. Exemplos de tais softwares são: *Weld Cost Calc XL*, *Weld Wizard Estimator Welding*, *Welding Pro* e outros (RESTECKA *et.al.*, 2016).

### 3. ASPECTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA

A pesquisa exposta trata-se de uma pesquisa experimental, onde, segundo Cauchick (2007), é tratado como um estudo sobre a relação causal entre duas ou mais variáveis de um sistema sob condições controladas pelo pesquisador, geralmente conduzidas em laboratórios.

O objeto de estudo é uma carreta de transporte de gases pressurizados (tanque), onde foram estudados os processos de soldagem para a definição do processo mais eficaz na soldagem deste equipamento. O equipamento é um semi-reboque, composto por um tanque de aço carbono ARBL para baixas temperaturas, conforme ilustrado na Figura 10. É autoportante e montado sobre um chassi de vigas de aço carbono, utilizando suspensões mecânicas ou pneumáticas. Possui sistema de iluminação, boca de visita, para-choque, paralamas e dispositivos de segurança para atender aos requisitos e normas regulamentadoras.



*FIGURA 10 - FOTO ILUSTRATIVA EQUIPAMENTO TRANSPORTE (ACESSO INTERNET)  
([HTTPS://WWW.AFDC.ENERGY.GOV/UPLOADS/PUBLICATION/NG\\_REGIONAL\\_TRANSPORT\\_TRUCKS.PDF](https://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/ng_regional_transport_trucks.pdf))*

O modelo do equipamento é uma carreta com capacidade de carregamento de 60 m<sup>3</sup>, construído por um aço carbono baixa liga alta resistência, denominado pela norma americana ASTM A517, com chassi autoportante com três eixos juntos para cavalo 8x2, com indicador de nível Rochester e válvulas Rego ou Piccollo.

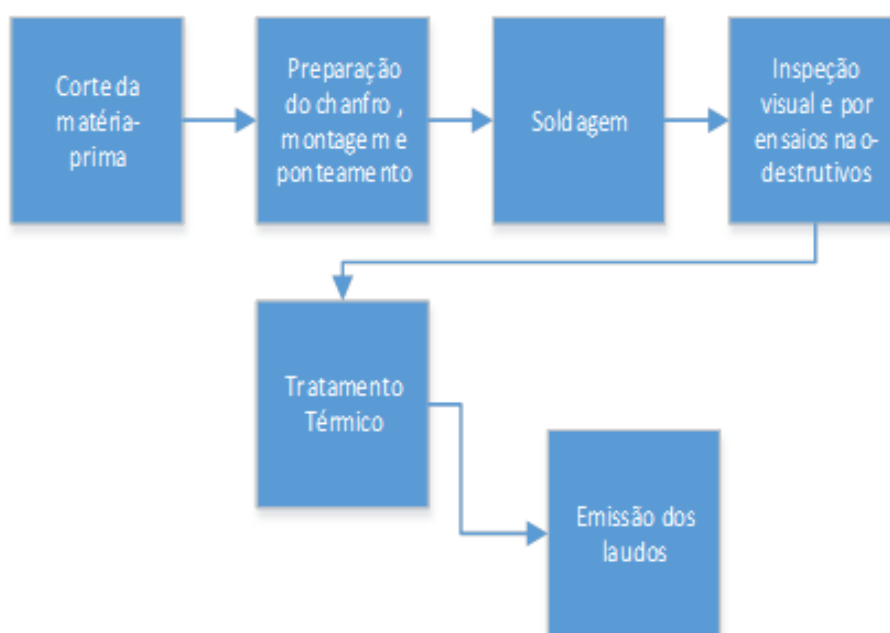
A empresa fabricante do equipamento onde foi realizado o estudo é uma empresa originária do México, fundada em 1972, destinada exclusivamente ao atendimento do mercado de equipamentos para a indústria do GLP (Gás Liquefeito de Petróleo). Em abril de 1996 foi inaugurada sua filial brasileira dedicada ao comércio de peças e equipamentos para GLP. Com o decorrer dos anos iniciou-se as atividades de assistência técnica, sendo a pioneira na prestação deste serviço no setor. Com a entrada, parcial, de capital brasileiro em 2000, mudou-se para Paulínia-SP, em uma área de 12.000 m<sup>2</sup>. Com a ampliação física, cresceu a linha de reforma para equipamentos, tanques e auto-tanques, como também o departamento de projetos e montagens de centrais de GLP e industrialização de equipamentos.

A partir de 2002, a administração passou a ser feita pelos acionistas brasileiros e, em 2003, tornou-se uma empresa de capital 100% brasileira, inovando o seu portfólio para atender a toda a cadeia do setor, desde a industrialização à contratos de manutenção para os equipamentos. Com a nova direção, iniciou-se a linha de montagem de auto-tanques novos e o desenvolvimento dos produtos já utilizados no setor, sendo a primeira empresa a trazer medidores mássicos para auto-tanques no Brasil, a primeira na produção de carretas de 70m<sup>3</sup> para o transporte de GLP e outros mais.

Atualmente, são fabricados vasos de pressão rodoviários e estacionários de até 400 m<sup>3</sup>, esferas de GLP e Amônia, Semi Reboques tanques de inox, alimentício, químico, sanitários e térmicos; Tanques de Gases de Ar Rodoviários e Estacionários para mercados criogênicos e CO<sub>2</sub> de até 400 m<sup>3</sup>; caminhões sobre chassis de INOX e Vaso de pressão e de Gases de AR.

Com a expansão da empresa no final de 2005, buscou-se novos mercados, iniciando a comercialização nos setores criogênico, alimentício, amoníaco e de projetos industriais. Atualmente, continua localizada em Paulínia, considerado um dos maiores centros petroquímicos do Brasil, em uma área de 46.000 m<sup>2</sup>.

Para a montagem do equipamento com sua posterior soldagem, observa-se a sequência de fabricação mostrada na Figura 11.



*FIGURA 11- DIAGRAMA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO EQUIPAMENTO*

O foco do estudo está no processo de união por soldagem, sendo que foram usados processos manuais, semi-automáticos e automatizados. Foram soldados corpos de prova nos processos utilizados na soldagem da carreta.

### **3.1. MATERIAIS E MÉTODOS DE SOLDAGEM**

O objetivo da pesquisa é comparar, por meio de análises e ensaios, o melhor processo de soldagem utilizando-se eletrodo revestido, arame tubular, arame sólido e arco submerso. O estudo foi efetuado em chapas de qualificação produzidas especificamente para testes.

Nos procedimentos, são necessários basicamente os equipamentos que já compõem a estrutura da empresa analisada. As variáveis essenciais de soldagem, como parâmetros elétricos e consumíveis, foram definidas pela engenharia de processo da empresa: mistura de gás na proporção de 10% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para 90% de argônio (Ar); Velocidade de alimentação de 3,5 – 6 m/min. As características analisadas foram: análise visual do cordão soldado, consumo do metal de adição, consumo de energia elétrica.

A análise da qualidade do cordão de solda foi feita visualmente, verificando a uniformidade (se a largura é constante em todo o cordão), respingos, aparecimento de mordeduras, trincas e porosidade superficiais. O consumo do arame de solda foi medido pela diferença de massa do rolo de antes com a de depois dos cordões. O tempo em que o arco elétrico esteve aberto foi cronometrado nas duas situações, sendo uma manualmente e a outra pelo próprio sistema e, assim, obtém-se o valor em kWh da energia elétrica utilizada pela seguinte fórmula:

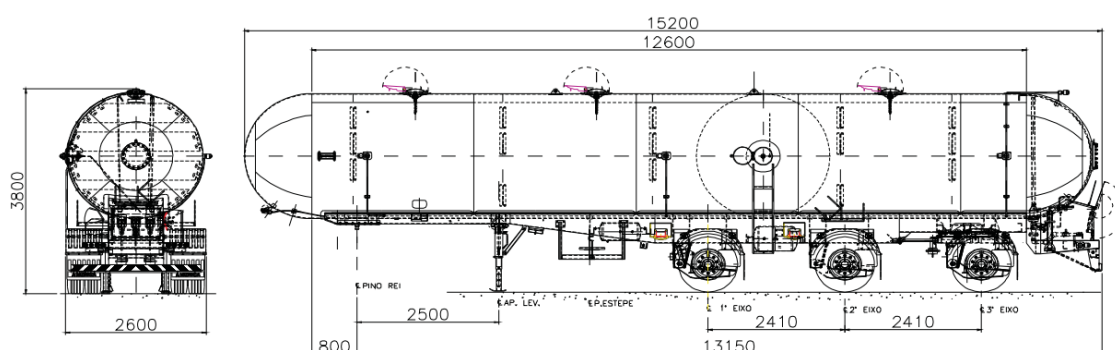
Consumo = (Corrente Média) X (Tensão Média) X (Fator de Potência) X (Tempo)

A potência da máquina é dada em quilowatt e o tempo em horas. O fator de potência utilizado foi o mesmo para as duas situações. Esse fator é utilizado nas máquinas da linha nova e tem o valor especificado no manual definido como sendo igual a 0,95. Portanto, este é o valor utilizado para o cálculo do consumo da linha antiga. Com os dados obtidos, a economia esperada pode ser verificada.

### **3.2. ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA**



O material utilizado como material base foi a chapa de aço carbono designada pela Norma ASTM A517 Grau B, com espessura nominal de 9,5mm (3/8"). O equipamento possui formato semelhante a um vaso de pressão (Figura 11), tendo como diâmetro externo nominal de 2,460 mm.



*FIGURA 12-FIGURA ILUSTRATIVA DAS DIMENSÕES NOMINAIS DO EQUIPAMENTO*

O material soldado possui composição química conforme apresentada pela análise de uma amostra no quadro da Figura 12. Foi utilizado para a análise química o método de espectrometria ótica por centelha, com um equipamento Spectromaxx, de acordo com o procedimento da norma ASTM A751: 2011 para metodologia de execução de ensaio.



*FIGURA 13- EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA REALIZAÇÃO DA ANÁLISE QUÍMICA DA AMOSTRA (FONTE: PRÓPRIO AUTOR, 2017)*

Os resultados da análise química do metal de base utilizado estão apresentados na Tabela 11:

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL BASE (PRÓPRIO AUTOR)

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
Concentração Média obtida (%)	0,15	0,22	0,79	0,02	0,035	0,49	0,19	0,020	0,02	0,01
Especificação	0,13 – 0,23	0,13 – 0,37	0,64 – 1,10	0,025	0,025	0,36 – 0,69	0,12 – 0,28	---	---	---
Incerteza expandida, U*	0,006	0,085	0,021	0,002	0,0006	0,03	0,049	0,011	0,004	0,001

Elementos	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	B	Mg	Fe
Concentração Média obtida (%)	0,015	ND	0,010	0,05	NA	0,008	0,001	ND	NA	98,0
Especificação	---	---	0,01 – 0,05	0,02 – 0,09	---	---	---	0,0005 – 0,005	---	---
Incerteza expandida, U*	0,001	---	0,0094	0,0026	---	0,0015	0,001	---	---	0,214

Para a classificação da resistência mecânica do material base, além de suas propriedades de tensão de escoamento, alongamento e redução de área, foram utilizados a metodologia para o ensaio conforme Norma ASTM A370:2016 e, para a verificação em relação ao atendimento dos resultados obtidos a partir de análise comparativa de valores, foram utilizadas as Normas do próprio material base (ASTM A517:2015) e também a Norma de construção do equipamento, ASME IX: 2015 - QW.422.

A retirada dos corpos de prova para os ensaios destrutivos para a análise comparativa do metal base foram executados conforme a Figura 14, retirados no sentido longitudinal ao sentido de laminação.

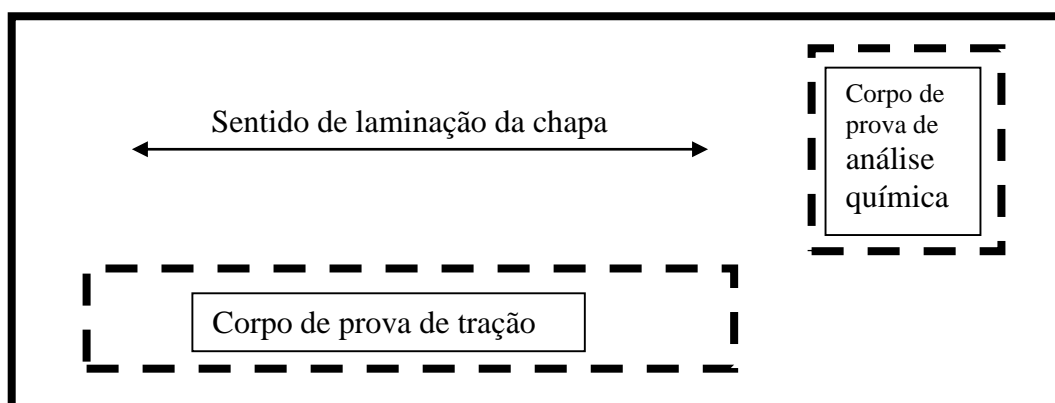


FIGURA 14 - CROQUI DE RETIRADA DO CORPO DE PROVA DE TRAÇÃO (PRÓPRIO AUTOR)

Para a realização do ensaio de tração, o corpo de prova, após ser retirado da chapa (metal base), foi usinado conforme croqui da Figura 14.

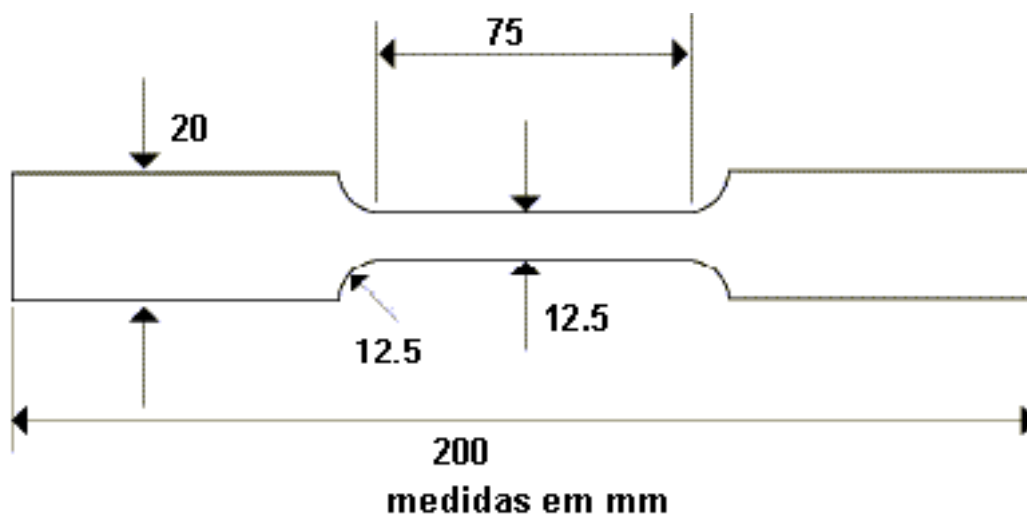


Figura 15-Croqui de usinagem do corpo de prova de tração

Para a execução do ensaio de tração, foi utilizado o Equipamento Universal de ensaios EMIC DL60000, utilizando um extensômetro (Figura 15) de abertura 50 mm também da marca EMIC; o corpo de prova foi fixado nas garras pneumáticas do equipamento e submetido ao ensaio conforme procedimento de ensaio da NORMA ASTM A370: 2016.



*FIGURA 16-EQUIPAMENTO UNIVERSAL DE ENSAIO (PRÓPRIO AUTOR)*

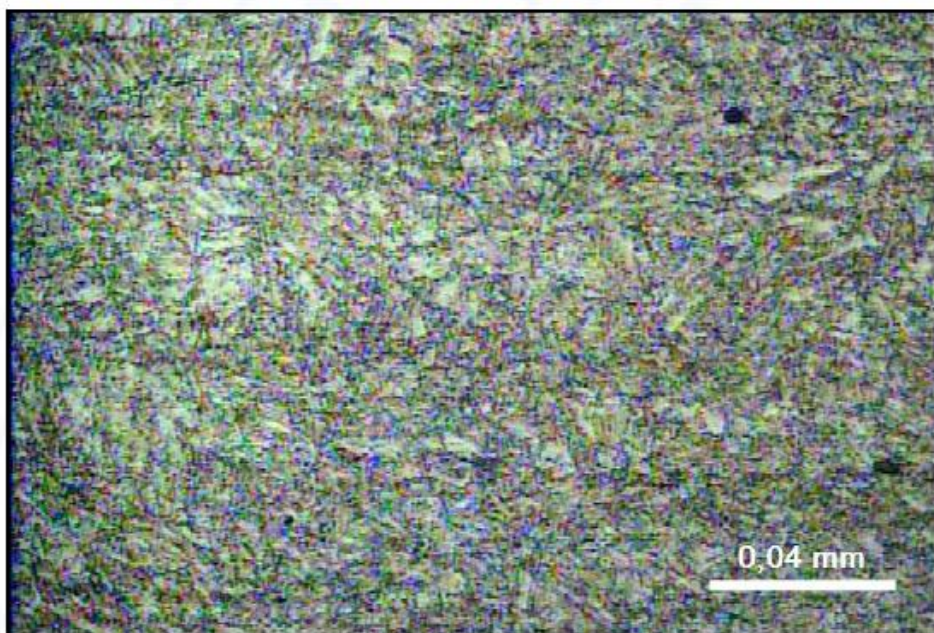
Após a usinagem e preparação do corpo de prova, foi ensaiado de acordo com o procedimento da norma ASTM A370. Os dados do ensaio estão apresentados na Tabela 12.

*TABELA 2-VALORES ENSAIOS DE TRAÇÃO METAL BASE (PRÓPRIO AUTOR)*

Amostra	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Força Máxima de Resistência (N)	Limite de Resistência (MPa)	Incerteza Expandida, U*
<b>Corpo de prova – metal base</b>	19,1	9,5	181,45	159.540	<b>879</b>	<b>± 4,1</b>

Para a verificação da microestrutura do material base, foi executado o ensaio metalográfico da seção da amostra de metal base. A condição do fornecimento para tratamento térmico é temperado e revenido.

Para esta verificação, o ensaio metalográfico foi realizado de acordo com a norma ASTM E3:11 (2017) perfazendo as etapas de corte da amostra, embutimento em baquelite, preparação (lixamento/polimento), ataque com a solução de Nital 4%. O resultado está apresentado na Figura 16.



*FIGURA 17-IMAGEM DA MICROGRAFIA DO METAL BASE (PRÓPRIO AUTOR)*

As fotomicrografias mostram a microestrutura do material base (chapa), revelando a matriz constituída por martensita revenida e bainita.

### **3.3. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA SOLDADOS – ASTM A517 GR. B**

Para a análise comparativa, foram soldados 4 corpos de prova nos processos eletrodo revestido, arame tubular, arame sólido e arco submerso.

Os corpos de prova foram confeccionados de acordo com a Figura 18, croqui esquematizado para a junta soldada, e dimensionais, conforme Figura 19.

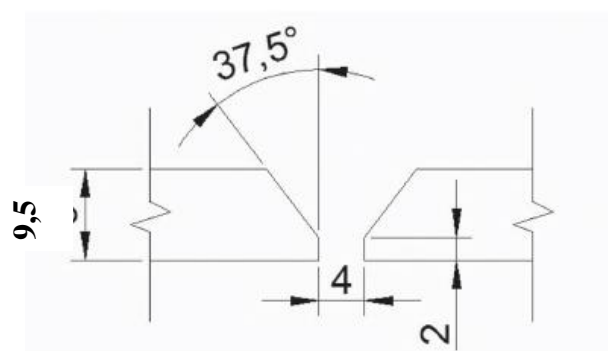


FIGURA 18-CROQUI PREPARAÇÃO DO CHANFRO DOS CORPOS DE PROVA (PRÓPRIO AUTOR)

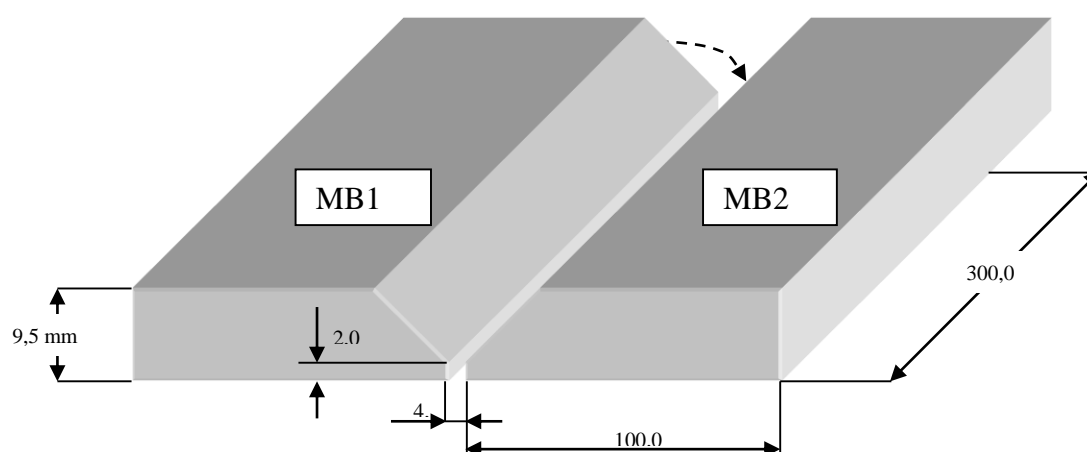


FIGURA 19 - DIMENSIONAL CORPOS DE PROVA (PRÓPRIO AUTOR)

Os corpos de prova foram soldados, sendo identificados pelo processo, conforme a identificação mostrada no Quadro 2.

QUADRO 2-IDENTIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA POR PROCESSOS DE SOLDAGEM

<b>Amostra</b>	<b>Processo de soldagem</b>	<b>Sigla</b>
<b>CP1</b>	ARAME SÓLIDO	GMAW
<b>CP2</b>	ELETRODO REVESTIDO	SMAW
<b>CP3</b>	ARAME TUBULAR	FCAW
<b>CP4</b>	ARCO SUBMERSO	SAW

Os corpos de prova foram soldados como os parâmetros especificados pelos catálogos comerciais dos fabricantes dos consumíveis, especificações técnicas das normas aplicáveis. Para a seleção dos consumíveis os critérios utilizados foram similaridade com a composição química e resistência mecânica superior ao metal de base.

Para o processo SMAW devem ser considerados para a seleção dos consumíveis de soldagem os seguintes fatores: tipo de metal base, posição de soldagem, equipamento disponível e montagem.

Basicamente existem cinco fatores principais que influenciam a escolha do arame para a soldagem GMAW e FCAW: a composição química do metal de base; as propriedades mecânicas do metal de base; o gás de proteção empregado; o tipo de serviço ou os requisitos da especificação aplicável e o tipo de projeto de junta.

Arares para soldagem por arco submerso são escolhidos primeiramente por sua influência nas propriedades mecânicas e/ou na composição química requerida para o metal depositado. Os fluxos para soldagem por arco submerso são escolhidos para satisfazer aos requisitos de propriedades mecânicas em conjunto com um arame particular e também para atender às necessidades de desempenho de cada aplicação.

. A soldagem foi executada seguindo os consumíveis das Tabelas 13 a 16, respectivamente, considerando os diferentes diâmetros.

*TABELA 3-CONSUMIVEL DE SOLDAGEM CP1 (SMAW)*

Classificação	Diâmetro (mm)	Especificação	Fabricante	Marca Comercial
E11018-M	2,5	AWS SFA 5.5	BOHLER	UTP 6020
E11018-M	3,25	AWS SFA 5.5	ESAB	OK 75.75
E11018-M	4,0	AWS SFA 5.5	ESAB	OK 75.75

TABELA 14 - CONSUMIVEL DE SOLDAGEM CP2 (GMAW)

Classificação	Diâmetro (mm)	Especificação	Fabricante	Marca Comercial	Gás Proteção
ER120S-G	1,2	AWS SFA 5.28	ESAB	OK ARISTO ROD79	80% Argônio / 20% CO <sub>2</sub>

TABELA 4-CONSUMIVEL DE SOLDAGEM CP3 (FCAW)

Classificação	Diâmetro (mm)	Especificação	Fabricante	Marca Comercial	Gás Proteção
E110C-G / E110T15-M21A2-G	1,2	AWS SFA 5.36	ESAB	OK TUB ROD 110 MC	Argônio / 20% a 25% CO <sub>2</sub>

TABELA 16 - CONSUMIVEL DE SOLDAGEM CP4 (SAW)

Classificação	Diâmetro (mm)	Especificação	Fabricante	Marca Comercial
ECF6-F6 (arame)	2,4	AWS 5.23	ESAB	OK TUBRODUR ECF6
F10A10(fluxo)	---	AWS 5.32	ESAB	OK FLUX 10.61B

Os parâmetros foram registrados conforme Tabela 17, onde foram avaliados principalmente os parâmetros elétricos, taxa de deposição e velocidade de soldagem.

TABELA 5- PARÂMETROS DE SOLDAGEM UTILIZADOS NOS CORPOS DE PROVA

Identificação	Tensão (V)	Amperagem (A)
CP1 – SMAW	32	160
CP2 – GMAW	28	190
CP3 – FCAW	27,5	210
CP4 - SAW	32	470



Após o término da soldagem, foram encaminhados para o forno de tratamento térmico, para a execução do ensaio de tratamento de alívio de tensões, definidos nos parâmetros da Tabela 18.

TABELA 68 - PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES

Temperatura de início de controle	Temperatura de aquecimento	Temperatura de patamar	Tempo de patamar	Velocidade de resfriamento	Temperatura de final de controle
300 °C	222 °C/h	600 °C ± 25	30 min	222 °C/h	300 °C

Apesar da comprovação que a formação de trincas pode ocorrer por reaquecimento nos contornos de grãos da ZTA, durante o tratamento térmico pós soldagem, no estudo apresentado não foi evidenciado os defeitos, como trincas.

A Figura 20 ilustra os corpos de prova após soldagem, o detalhamento e a identificação dos mesmos.



FIGURA 20-CORPOS DE PROVA APÓS SOLDAGEM (PRÓPRIO AUTOR)

Após realizado o tratamento térmico de alívio de tensões, os corpos de prova foram encaminhados ao departamento de usinagem, foram confeccionados os corpos de prova de acordo com a Norma ASME IX. Na Figura 21, é representada a sequência de retirada dos corpos de prova.

DESCARTE (25 MM)	DOBRAMENTO (10 MM)	TRAÇÃO (35 MM)	DOBRAMENTO (10 MM)	ENSAIO DE IMPACTO (CHARPY)	DOBRAMENTO (10 MM)	TRAÇÃO (35 MM)	DOBRAMENTO (10 MM)	DESCARTE (25 MM)
------------------	--------------------	----------------	--------------------	----------------------------	--------------------	----------------	--------------------	------------------

FIGURA 21-SEQUENCIAMENTO DE RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA DE SOLDAGEM (ASME IX)

Após o corte, os corpos de prova foram usinados para adaptação nos equipamentos de ensaio conforme as Figuras 22, 23 e 24, atendendo também aos requisitos expressos na norma ASME IX. Para o ensaio de tração, foram utilizadas as dimensões da Tabela 19.

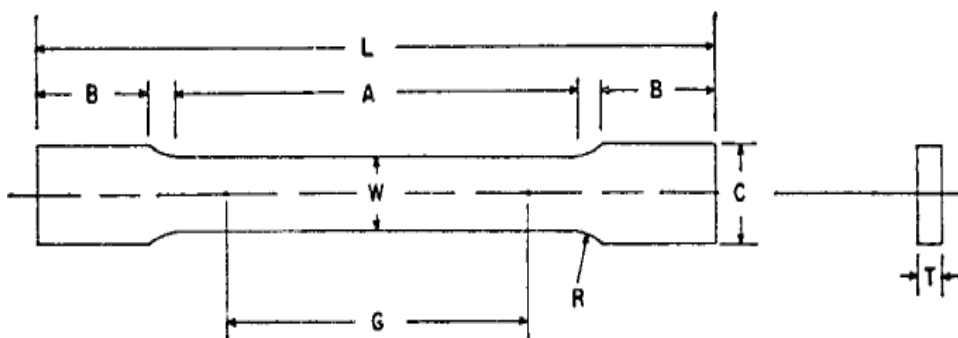


FIGURA 22-CROQUI PARA USINAGEM CORPO PROVA DE TRAÇÃO (ADAPTADO ASME IX)

TABELA 7 - MEDIDAS DIMENSIONAIS CORPO DE PROVA DE TRAÇÃO

L (mm)	W (mm)	C (mm)	R (mm)	G (mm)
250	19	31	25	Largura da solda + 6 mm de cada lado

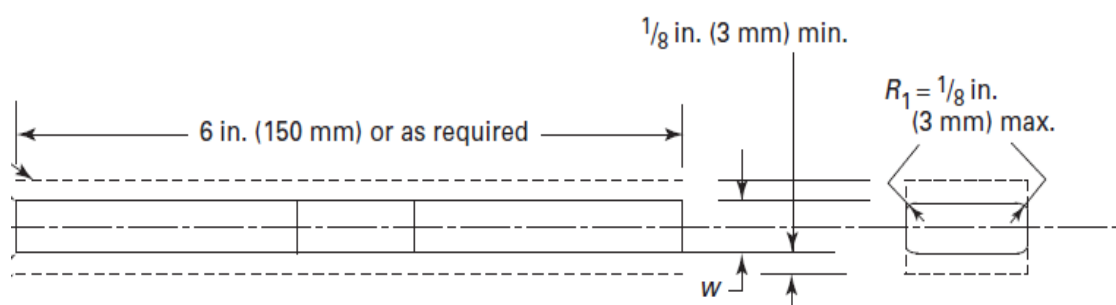


Figura 23-Croqui para usinagem corpo de prova de dobramento (ASME IX)

Para a preparação do corpo de prova de dobramento lateral, são utilizados os dados da Tabela 20 nas cotas dimensionais.

TABELA 20-MEDIDAS DIMENSIONAIS DO CORPO DE PROVA DE DOBRAMENTO

L – comprimento total (mm)	W(mm)	R <sub>1</sub> (mm)
150	10	3

Para a preparação do corpo de prova de impacto charpy, foi seguida a norma ASTM E23, conforme dimensional da Figura 24, utilizado o padrão dimensional 7,5 x 10 x 55mm

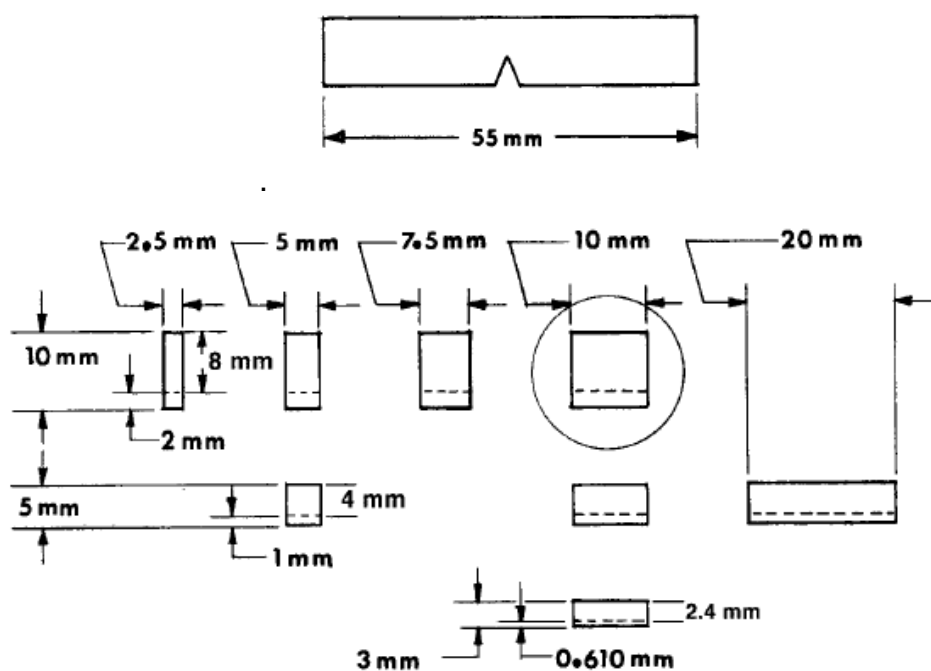


FIGURA 24-DESENHO ESQUEMÁTICO DO PROVA DE IMPACTO CHARPY (ASTM E23)

No estudo foram analisados 3 regiões da junta soldada para a retirada dos corpos de prova de charpy, sendo material base, zta e o centro do cordão de solda. O esquema representativo é mostrado conforme a figura 25:

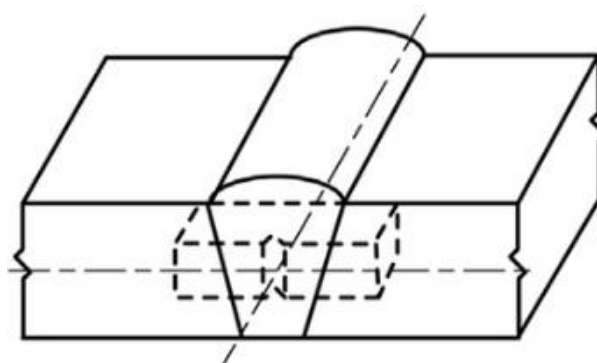
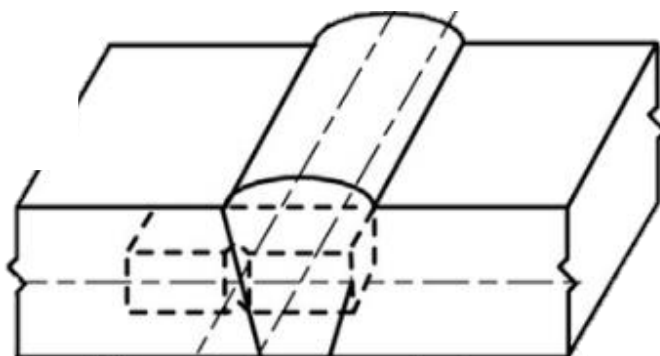


FIGURA 25-ESQUEMA REPRESENTATIVO DA RETIRADA DO CORPO DE PROVA DE CHARPY NO CENTRO DO CORDÃO DA JUNTA SOLDADA (CS).



*FIGURA 26- ESQUEMA REPRESENTATIVO DA RETIRADA DO CORPO DE PROVA DE CHARPY NO ZONA TERMICAMENTE AFETADA (ZTA).*

Essas regiões foram escolhidas por estarem de acordo com os requisitos da norma ASME IX de qualificação de procedimentos de soldagem para avaliar a quantidade mínima de valor atingida quando exposto a condições de temperaturas negativas.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. ENSAIOS MECÂNICOS

Com os corpos de prova usinados, foram realizados os ensaios. Foram obtidos os resultados, do acompanhamento de soldagem (Tabela 21), para ensaio de dobramento (Tabela 22), ensaio de tração (Tabela 23) e ensaio de impacto charpy (Tabela 24).

*TABELA 8-PARÂMETROS DE SOLDAGEM ENCONTRADOS*

Identificação	Quantidade de cordões	Velocidade (cm/min)	Aporte de Calor (kj/cm)
CP1 – SMAW	12	2,3	8,7
CP2 – GMAW	7	7,8	10,6
CP3 – FCAW	7	9,0	11,6
CP4-SAW	3	43	22,3

Para os parâmetros apresentados na tabela 20, a condição de quantidade de cordões foi determinada pelo processo de soldagem e também pelas boas praticas de soldagem da norma ASME IX e AWS D1.1, que determinam penetração na raiz e reforço da face da junta soldada.

As condições de velocidade e aporte térmico forma consideradas de acordo com o processo de soldagem, nas velocidades mais rápidas o processo é o mecanizado e o mais lento sendo o processo manual.

A Tabela 21 mostra os resultados de tração das juntas soldadas, bem como o detalhamento do rompimento dos corpos de prova após os ensaios.

TABELA 9-RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

IDENTIFICAÇÃO CP	Amostra	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Força Máxima de Resistência (N)	Limite de Resistência (MPa)	Local da Fratura / Aspecto
CP1-GMAW	TR 1	19,01	9,32	177,17	148.789	<b>852</b>	Metal Base / Dúctil
	TR 2	18,99	9,40	178,50	144.736	<b>835</b>	Metal Base / Dúctil
	TR 3	19,00	9,40	178,60	150.024	<b>840</b>	Metal Base / Dúctil
	TR 4	18,99	9,30	176,60	149.580	<b>847</b>	Metal Base / Dúctil
	TR 5	19,00	9,35	177,65	148.870	<b>838</b>	Metal Base / Dúctil
CP2-SMAW	TR 1	18,96	9,21	174,62	148.789	<b>852</b>	Metal Base / Dúctil
	TR 2	18,92	9,16	173,31	144.736	<b>835</b>	Metal Base / Dúctil
	TR 3	19,1	9,0	171,71	145,884	<b>850</b>	Metal Base / Dúctil
	TR 4	19,0	9,1	172,16	149,430	<b>868</b>	Metal Base / Dúctil
	TR 5	19,1	9,2	173,47	150,120	<b>865</b>	Metal Base / Dúctil
CP3-FCAW	TR 1	18,95	9,32	176,61	133.566	<b>729</b>	Metal Base / Dúctil
	TR 2	18,96	9,37	176,82	138.875	<b>776</b>	Metal Base / Dúctil
	TR 3	19,00	9,42	178,98	132.087	<b>738</b>	Metal Base / Dúctil
	TR 4	19,01	9,35	177,74	130.105	<b>732</b>	Metal Base / Dúctil
	TR 5	18,99	9,45	179,45	132.797	<b>740</b>	Metal Base / Dúctil
CP4-SAW	TR 1	18,77	9,44	177,19	141.219	<b>797</b>	Metal Base / Dúctil
	TR 2	18,91	9,30	175,86	142.449	<b>810</b>	Metal Base / Dúctil
	TR 3	18,90	9,40	177,94	143.292	<b>805</b>	Metal Base / Dúctil
	TR 4	19,1	9,32	176,40	142,498	<b>808</b>	Metal Base / Dúctil
	TR 5	19,2	9,47	178,43	143,732	<b>815</b>	Metal Base / Dúctil

Para os resultados de ensaio de tração, Alipooramirabad *et al.* (2016) associam o calor imposto pela soldagem relativo ao processo utilizado, em maior quantidade, produz uma estrutura mais frágil, tornando o resultado abaixo do especificado em normas vigentes, reprovando-se assim o procedimento a ser utilizado. Nos valores apresentados acima, é possível avaliar que mesmo o processo com um calor depositado maior, é possível conseguir resultados aprováveis.

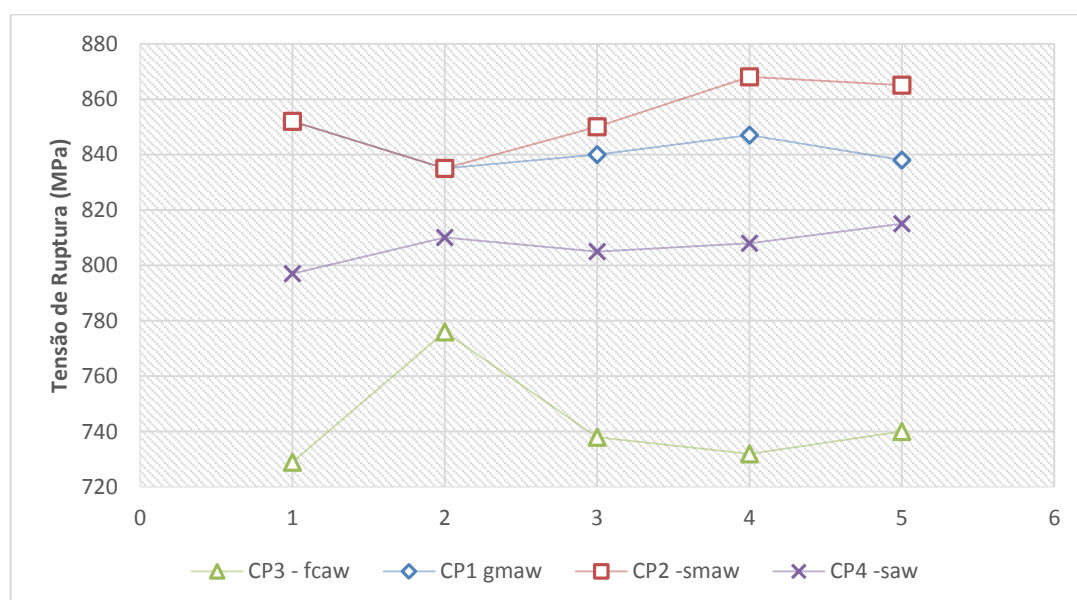


FIGURA 27-GRÁFICO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

A Figura 25 traz os resultados do ensaio de tração para os quatro corpos de prova. É possível verificar que os processos com alimentação semi-automática apresentaram diferença significativa entre os resultados, sendo que há diferença na concepção do consumível utilizado, onde o arame tubular necessita da ressecagem e o arame sólido é mandatório. Estes itens não foram avaliados neste estudo, porém devem ser considerados como boas práticas de soldagem.

Para o processo eletrodo revestido também é necessário a secagem do consumível e no arco submerso, o mesmo procedimento deve ser seguido para



o fluxo adicionado na junta soldada, estes procedimentos são recomendados pelo código ASME II – Parte C.

A diferença nos resultados pode ser explicada pelas transformações metalúrgicas, ou seja pelas mudanças de microestruturas durante a soldagem, sendo que mesmo controlando as variáveis essenciais, há fatores que podem prejudicar o rendimento da junta soldada.

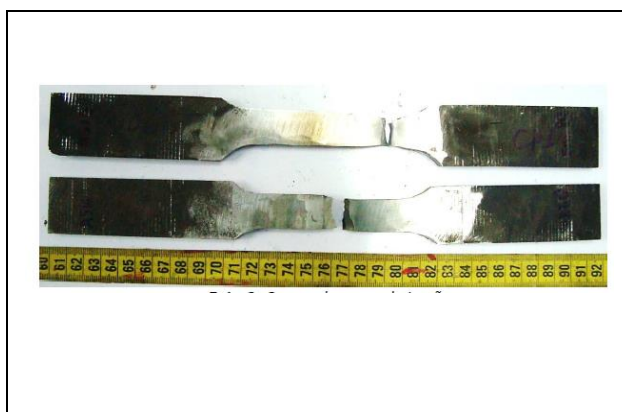


FIGURA 28-CORPOS DE PROVA SOLDADOS APÓS ENSAIO DE TRAÇÃO

Para o ensaio mecânico de dobramento, representado pela figura 26, o corpo de prova é submetido a conformação mecânica a frio, onde a execução é direcionada para avaliação da região soldada. Para esta situação de ensaios destrutivos todos apresentaram resultados satisfatórios, descontinuidades ou trincas.

TABELA 23 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DOBRAMENTO

Amostra	Largura (mm)	Espessura (mm)	Resultado (Trincas)				
CP 1	10	9,5	Isento	Isento	Isento	Isento	Isento
CP 2	10	9,5	Isento	Isento	Isento	Isento	Isento
CP 3	10	9,5	Isento	Isento	Isento	Isento	Isento
CP 4	10	9,5	Isento	Isento	Isento	Isento	Isento



*FIGURA 29-CORPOS DE PROVA SOLDADOS APÓS ENSAIO DE DOBRAMENTO.*

Na Tabela 23 são apresentados os resultados do ensaio de impacto charpy. Foi utilizado a temperatura de  $-10^{\circ}\text{C}$ , temperatura determinada pelo projeto do cliente e norma de qualificação aplicável. As amostras foram retiradas conforme posicionamento da Norma ASME IX, de modo a dar representatividade no corpo de prova utilizado como amostra.

Foi possível afirmar que a diferença entre os processos está associada à somatória de vários fatores, dentre eles os principais são o aporte de calor fornecido pelo processo de soldagem e o rigoroso controle nos parâmetros essenciais de soldagem. Foi possível considerar, de acordo com Ilic *et Al.* (2015), que o aporte de calor altera a microestrutura das regiões soldadas, transformando em microestruturas frágeis, prejudicando-se assim os valores obtidos nos ensaios destrutivos.

TABELA 24 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO CHARPY

<b>IDENTIFICAÇÃO CP</b>	<b>Amostra</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>METAL BASE (Joules)</b>	<b>ZAC (Joules)</b>	<b>METAL DE SOLDA (Joules)</b>
<b>CP 1-GMAW</b>	1	-10	90	88	31
	2		81	61	56
	3		100	70	36
	4		92	46,7	45,7
	5		95	57,2	55,8
<b>CP 2-SMAW</b>	1	-10	95	51	13
	2		78	73	15
	3		110	66	10
	4		100	52	12
	5		98	57	13
<b>CP 3-FCAW</b>	1	-10	98	37	40
	2		83	32	43
	3		116	53	40
	4		99	48	39
	5		92	39	42
<b>CP 4-SAW</b>	1	-10	96	95	113
	2		77	97	125
	3		116	99	108
	4		98	91	128
	5		95	89	126



*FIGURA 30 - CORPOS DE PROVA APÓS ENSAIO DE IMPACTO CHARPY*

Os corpos de provas apresentados na Figura 27 possuem as medidas após usinados: 7,5 x 10 x 10 mm. Os resultados apresentados representam, na sua totalidade, a execução da soldagem no equipamento estudado. Dentre os resultados, é observada a diferença entre os processos e suas variáveis.

Com relação ao ensaio de impacto charpy, houve significantes diferenciais, conforme apresentados no gráfico da Figura 28. Os resultados apresentados demonstram uma significativa superioridade nos valores do processo a Arco Submerso (SAW).

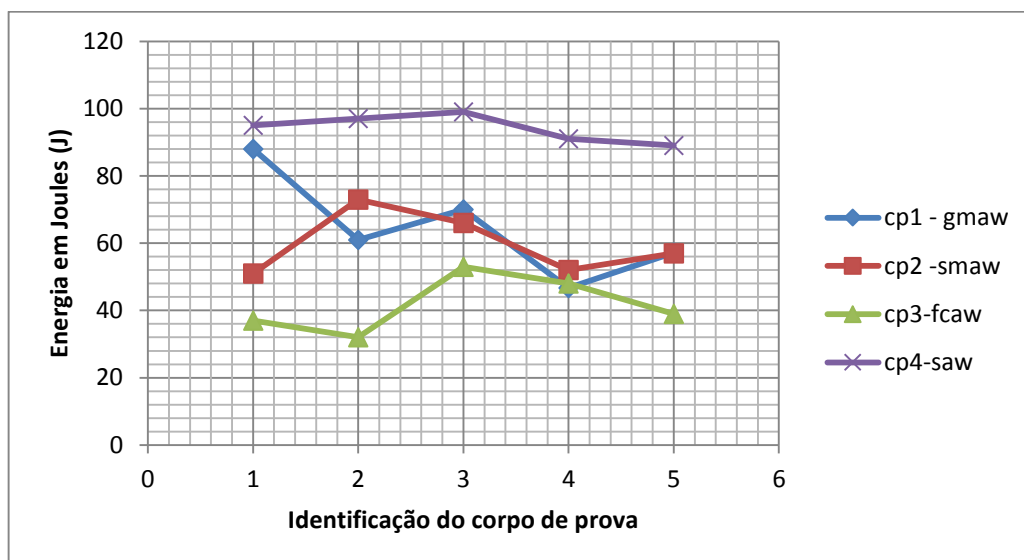


FIGURA 31-GRÁFICO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO CHARPY

Conforme apresentado nas imagens das Figuras 29 a 32, foram analisadas com auxílio do microscópio óptico, com aumento de 940X, as estruturas centrais dos cordões de soldas dos CPs de 1 a 4. Como resultado, observou-se estrutura compatível com o esperado, ou seja, a formação da martensita.

Na Figura 32, é representado o CP1, onde foi encontrado que as fotomicrografias mostram a microestrutura no METAL DE SOLDA, após o ataque químico, constituída por martensita de baixo carbono, bainita e ferrita acicular. Pode-se evidenciar o tamanho do grão N°6.

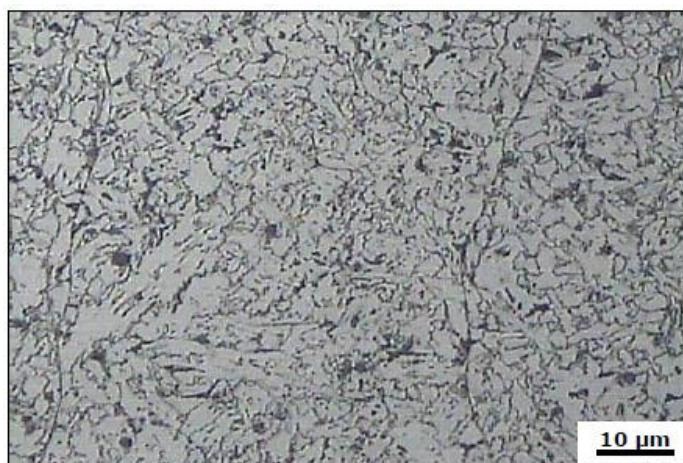
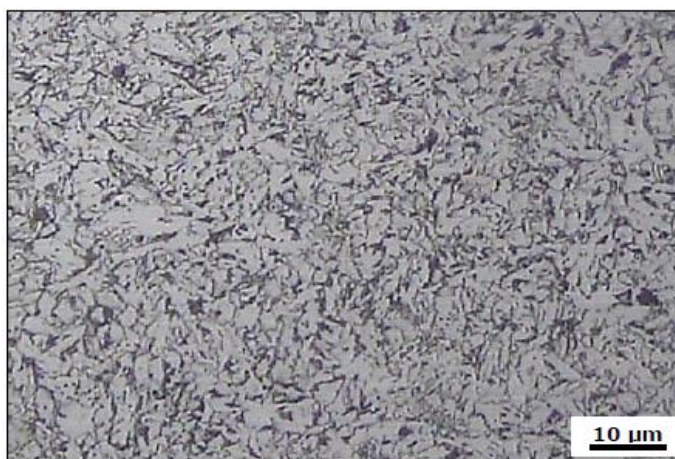


FIGURA 32-MICROGRAFIA DO METAL DE SOLDA DO CP1

Na Figura 33, é representado o CP2, onde as fotomicrografias mostram a microestrutura no METAL DE SOLDA, após o ataque químico, constituída por martensita de baixo carbono, bainita e ferrita acicular. Pode-se evidenciar o tamanho do grão N°6.



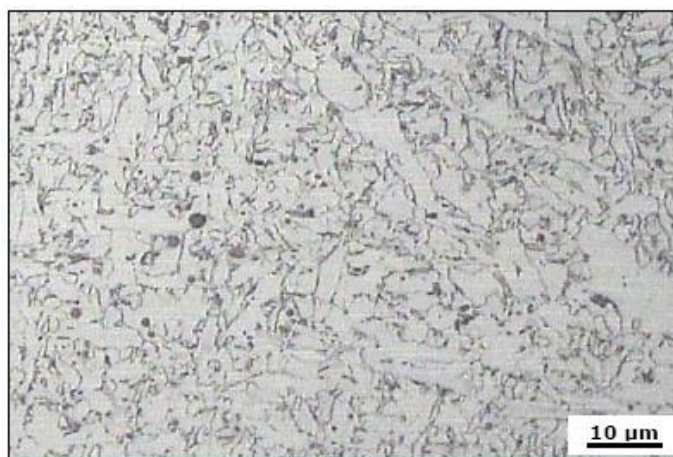
*FIGURA 33-MICROGRAFIA DO METAL DE SOLDA DO CP2*

Na Figura 34, é representado o CP3, onde as fotomicrografias mostram a microestrutura no METAL DE SOLDA, após o ataque químico, constituída por martensita de baixo carbono, bainita e ferrita acicular. Pode-se evidenciar o tamanho do grão N°6.



*FIGURA 34-MICROGRAFIA DO METAL DE SOLDA DO CP3*

Na Figura 35, é representado o CP4, onde as fotomicrografias mostram a microestrutura no METAL DE SOLDA, após o ataque químico, constituída por martensita de baixo carbono, bainita e ferrita acicular. Pode-se evidenciar o tamanho do grão N°6.



*FIGURA 35-MICROGRAFIA DO METAL DE SOLDA DO CP4*

Nas Figuras relacionadas de 36 a 39, foram analisadas as juntas soldadas para a verificação de defeitos ou discontinuidades pertinentes aos processos de soldagem utilizados. Não foram evidenciados quaisquer defeitos que pudessem ser rejeitados pelas normas aplicadas, considerando-se assim todas as amostras apresentadas como aprovadas.

As amostras foram preparadas com solução de Nital 10% e fotografadas com microscópio óptico com aumento de 5x.



*FIGURA 36-MACROGRAFIA DA JUNTA SOLDADA CP1-GMAW*

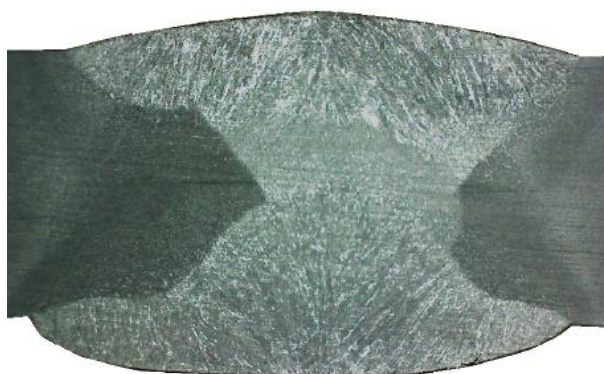


*FIGURA 37-MACROGRAFIA DA JUNTA SOLDADA CP2-SMAW*



*FIGURA 38-MACROGRAFIA DA JUNTA SOLDADA CP3-FCAW*





*FIGURA 39-MACROGRAFIA DA JUNTA SOLDADA CP4-SAW*

Conforme Winarto *et al.* (2018), o tamanho da zona afetada pelo calor pode ser alterada de acordo com o calor imposto, onde foi possível destacar nas análises macrográficas apresentadas de 34 a 37 as diferenças dimensionais entre elas, evidenciando assim a diferença do calor imposto.

#### **4.2. CUSTOS DE SOLDAGEM**

Quanto ao cálculo dos custos de soldagem, foi realizado um estudo comparativo entre os processos de soldagem, com a soldagem de 4 corpos de prova. Os valores relacionados ao custo da mão de obra foram considerados de acordo com a Tabela 25, baseados no 1º semestre do ano de 2018. Aos valores, serão acrescidos encargos sociais de 0,82%.

*TABELA 10-CUSTO DA MÃO DE OBRA DE SOLDAGEM*

<b>Processo</b>	<b>R\$ / hora</b>
Eletrodo Revestido (SMAW)	7,50
Arame sólido (GMAW)	8,90
Arame Tubular (FCAW)	8,90
Arco Submerso (SAW)	9,30

Não foram consideradas as etapas como chanfro, preparação, montagem e pré-aquecimento, pois foram similares nos 4 corpos de prova. Para o cálculo do custo do metal de adição, foi condicionado as variáveis de cada processo e os valores apresentados na Tabela 26.

*TABELA 11 - CUSTO DO METAL DE ADIÇÃO*

<b>Identificação</b>	<b>CP1 GMAW</b>	<b>CP 2 SMAW</b>	<b>CP3 FCAW</b>	<b>CP 4 SAW</b>
<b>Quantidade de consumível utilizado (kg)</b>	<b>0,182</b>	<b>0,287</b>	<b>0,201</b>	<b>0,194</b>
<b>Rendimento (%)</b>	95	70	85	95
<b>Custo do fluxo (R\$ /kg)</b>	---	---	---	9,63
<b>Custo consumível (R\$ /kg)</b>	45,14	48,50	34,68	30,48
<b>Quantidade de fluxo por kg de arame (kg)</b>	---	---	---	0,5
<b>Custo total</b>	<b>3,0</b>	<b>19,885</b>	<b>5,19</b>	<b>3,795</b>

<sup>1</sup>=cálculo do custo do fluxo na proporção apresentada = ( 2,72+1,075 = 3,795)

Para o cálculo do custo da mão de obra para os processos, foram registrados os resultados da Tabela 27.

Devido às diferentes técnicas de soldagem, existem valores significativos no que tange a remuneração, uma vez que essa diferença de valores está ligada ao grau de treinamento do soldador, à dificuldade da execução do processo, à quantidade de variáveis a serem controladas e às variáveis específicas de cada processo de soldagem.

*TABELA 12-DADOS DA MÃO DE OBRA PARA SOLDAGEM POR PROCESSO*

<b>Identificação</b>	<b>CP1 GMAW</b>	<b>CP 2 SMAW</b>	<b>CP3 FCAW</b>	<b>CP 4 SAW</b>
<b>Taxa de deposição (kg/h)<sup>2</sup></b>	4,5	1,25	7	11,5

<sup>2</sup> Acrescidos encargos sociais de 0,82.

Para calcular o valor do equipamento a ser acrescentado ao custo da solda, foi multiplicado o tempo de soldagem pelo valor da hora/máquina. O custo da hora máquina é composto pela depreciação do equipamento, mais o consumo de energia.

Para o cálculo de depreciação do equipamento, foi considerado que um equipamento de soldagem tem uma vida útil de 10 anos (180 horas trabalhadas por mês) e que, neste período, deve ser pago através de serviços por ele executados, sendo deduzido seu valor por hora trabalhada.

A energia elétrica consumida é calculada pelo produto da amperagem e voltagem (multiplicado por  $10^{-3}$  = kWh) usadas durante a soldagem. Para calcular este custo, deve-se multiplicar pelo valor da energia elétrica industrial.

Na Tabela 28, estão relacionados os dados para o cálculo do valor do equipamento de soldagem e, na Tabela 29, estão indicados os cálculos.

*TABELA 28 - DADOS PARA CÁLCULO DO CUSTO DO EQUIPAMENTO*

Descrição	Eletrodo Revestido	Arame Sólido	Arame Tubular	Arco Submerso
Valor do equipamento (R\$)	2.000,00	9.000,00	12.000,0	60.000,00
Depreciação equipamento (anos-180 h/mês)	10			
Amperagem de trabalho (A)	160	190	210	470
Voltagem (V)	32	28	27,5	32
Valor de 1 kW/h (R\$)	0,42			

*TABELA 13 - CÁLCULO DO VALOR HORA MÁQUINA*

Descrição	Valor de depreciação <sup>3</sup> (R\$)	Valor da energia elétrica consumida <sup>4</sup> (R\$)
Eletrodo Revestido	0,09	3,22
Arame Sólido	0,41	1,76
Arame Tubular	0,55	1,7
Arco Submerso	2,77	3,15

<sup>3</sup>fórmula apresentada de depreciação = valor do equipamento / (180X10x12) <sup>4</sup>Fórmula da energia elétrica consumida = (A x V x tempo de soldagem x custo da energia)

Para melhor visualização, a Tabela 30 apresenta o resumo dos custos obtidos e a Tabela 31 apresenta um resumo dos tempos utilizados nas soldagens dos corpos de prova com o comprimento de 300 mm de cordão de solda.

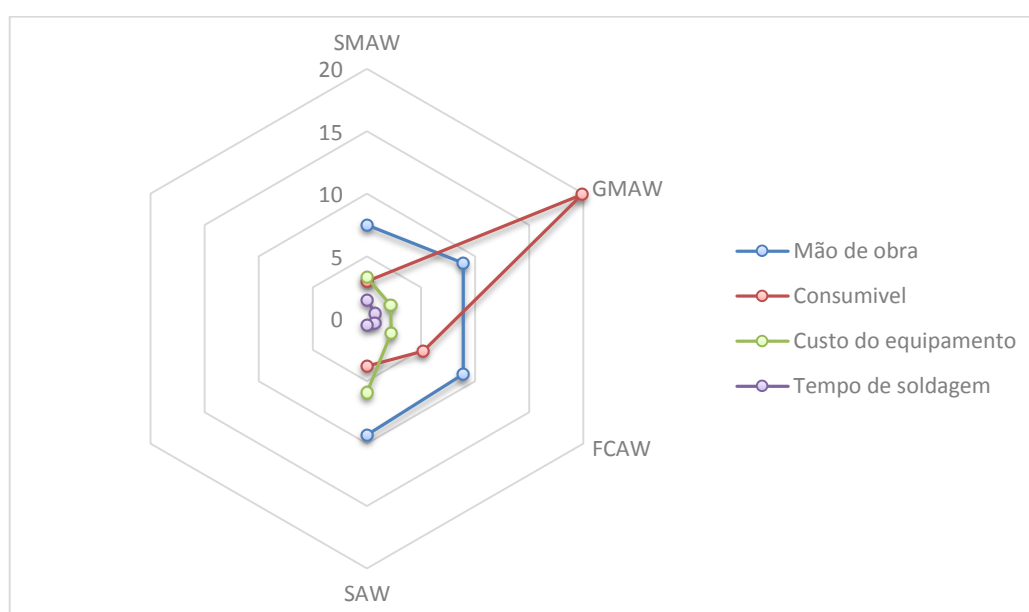
*TABELA 30 - RESUMO DOS CUSTOS DE SOLDAGEM (R\$ / 300 MM)*

<b>Descrição</b>	<b>Eletrodo Revestido</b>	<b>Arame Sólido</b>	<b>Arame Tubular</b>	<b>Arco Submerso</b>
Custo metal de adição	19,88	3,0	5,19	3,80
Custo da mão de obra de soldagem	7,5	8,9	8,9	9,3
Custo do equipamento	3,31	2,17	2,25	5,92
Custo total	30,7	14,07	16,34	21,14

*TABELA 31- RESUMO DOS TEMPOS DE SOLDAGEM*

<b>Descrição</b>	<b>Eletrodo Revestido</b>	<b>Arame Sólido</b>	<b>Arame Tubular</b>	<b>Arco Submerso</b>
Tempo soldagem (min)	1,5	0,8	0,7	0,5

Na Figura 40, é mostrado o resumo dos indicadores de custos de soldagem, contemplando os itens principais analisados.



*FIGURA 40-RESUMO DOS CUSTOS DE SOLDAGEM*

Foi possível avaliar que o consumível do processo GMAW possui os custos diferenciados dos demais, tornando-se um item a ser levado em consideração na escolha do processo.

## 5. CONCLUSÃO

As análises dos resultados obtidos a partir dos procedimentos experimentais apresentados neste trabalho tornaram possível chegar às seguintes conclusões:

### 1) Conclusões relacionadas aos resultados dos ensaios mecânicos

- Os resultados apresentados para os ensaios mecânicos de tração foram aprovados nos processos 1, 2 e 4, sendo, porém reprovados no processo arame tubular, quando baseados na norma ASTM.
- Para os ensaios de dobramento, todos os corpos de prova estão aprovados.
- Para os ensaios de impacto charpy, os valores apresentados nas regiões de centro solda, zona termicamente afetada e metal de base mostraram-se satisfatórios, quando classificados de acordo com a norma ASTM.
- O ensaio metalográfico, mais especificamente o ensaio micrográfico, foi realizado apenas no metal de solda para determinar a estrutura dos grãos formados e tamanho, as condições de tratamento térmico, para que não houvesse fatores impeditivos de soldagem adequada.

### 2) Conclusões relacionadas ao comparativo de custo dos processos

- Com relação ao comparativo de custos apresentado, provou-se que, apesar do equipamento arco submerso (SAW) possuir maior custo de aquisição e a mão de obra ser a mais onerosa, o mesmo ainda é considerado o mais vantajoso, em relação aos demais processos apresentados. Deve-se levar em consideração que uma das principais desvantagens deste processo é a restrição as posições que não forem planas ou horizontais; porém, na situação

apresentada, por se tratar de uma solda circunferencial e manter a posição plana, não houve influência que prejudicasse a utilização do mesmo.

- O processo arame tubular apresentou-se na sequência do primeiro processo como o mais vantajoso, porém não poderá ser utilizado devido aos ensaios mecânicos de tração não apresentarem resultados satisfatórios.
- Já o processo GMAW apresentou significativa relevância na sequência decrescente, podendo ser utilizado como substituto aos processos anteriores, levando-se em conta que necessita de dispositivos de elevação do equipamento e restrição a ambientes abertos.
- O último processo, o eletrodo revestido, apenas foi inserido neste estudo devido a fazer parte da rotina de escolha de processos do ambiente estudado; porém o mesmo não deve ser considerado pela sua baixa eficiência, baixa taxa de deposição, custo alto de consumíveis e também o pré-tratamento de secagem nos processos FCAW e SAW, a que os consumíveis deste processo devem ser submetidos.

### **5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A realização deste trabalho permite sugerir algumas propostas para realização de trabalhos posteriores, que busquem responder questões não abordadas neste trabalho, tais como:

- Avaliação dos resultados pelos ensaios micrográficos, verificação da microestrutura do centro de solda e da zona termicamente afetada.

- Avaliação da influência da velocidade de soldagem na transformação metalúrgica da zona termicamente afetada.
- Avaliação do perfil de dureza na junta soldada, compreendendo todas as regiões da mesma.
- Avaliação da influência da temperatura de tratamento térmico na junta soldada.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALIPOORAMIRABAD, H.; GHOMASHCHI, R.; PARADOWSKA, A.; REID, M.



Residual stress- microstructure- mechanical property interrelationships in multipass ARBL steel welds. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 231, p. 456–467, 2016.

ALIPOORAMIRABAD, H.; PARADOWSKA, A.; GHOMASHCHI, R.; REID, M. Investigating the effects of welding process on residual stresses, microstructure and mechanical properties in ARBL steel welds. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 28, p. 70–81, 2017.

ALKAHLA, I.; PERVAIZ, S. Sustainability assessment of shielded metal arc welding (SMAW) process. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 244, p. 12001, 2017.

BALADRISHNAN, M.; BALASSUBRAMANIN, V.; REEDY, M. G. Effect of joint design on ballistic performance of quenched and tempered steel welded joints. **Materials and Design**, v.54, p. 616–623, 2014.

BENYOUNIS, K. Y.; OLABI, A. G. Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches - A reference guide. **Advances in Engineering Software**, v. 39, n. 6, p. 483–496, 2008.

Catálogo Comercial Arcelor Mittal – How to weld “T1” Constructional Alloy Steels- site: [usa.arcelormittal.com/~media/Files/A/.../How-to-weld.pdf](http://usa.arcelormittal.com/~media/Files/A/.../How-to-weld.pdf)

Catálogo Comercial SSAB - Data sheet ASTM A517 Grade B - 2016 - site:file:///C:/Users/Windows%207/Downloads/Data\_sheet\_\_ASTM\_A517\_Gr\_B\_\_20170419\_225\_371857150\_en.pdf

Catálogo *PRACTICAL WELDING TODAY*- 2002 [http://www.thewelder-digital.com/practicalwelding/may\\_june\\_2002](http://www.thewelder-digital.com/practicalwelding/may_june_2002).

CAPRAZ, O.; MERAN, C.; WÖRNER, W.; GUNGOR, A. Using AHP and TOPSIS to evaluate welding processes for manufacturing plain carbon stainless steel storage tank. **Archives of Materials Science and Engineering**, v. 76, n. 2, p. 157–162, 2015.

CARDOSO JUNIOR, R.; Utilização de Processos Mecanizados para Soldagem de Esferas de Armazenamento. **Revista Solução**, p. 42 - 52, 2011.

CHENG, F.; ZHANG, S.; DI, X.; WANG, D.; CAO, J. Arc Characteristic and Metal Transfer of Pulse Current Horizontal Flux-Cored Arc Welding. **Transactions of Tianjin University**, v. 23, n. 2, p. 101–109, 2017.

Cho D. W.; Song W. H.; Cho M. H.; Na S. J.; – Analysis of submerged arc welding process by three-dimensional computational fluid dynamics simulations. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 213 - pág. 2275-2291, 2013.

Confederação Nacional da Indústria. Gás natural liquefeito: cenários globais e oportunidades para a indústria brasileira / Confederação Nacional da Indústria. –Brasília:CNI,2016.169p. [https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/18196/gas\\_natural\\_liquefeito\\_cenarios\\_globais\\_e\\_oportunidades.pdf?sequence=1&isAllowedCZYRYCA](https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/18196/gas_natural_liquefeito_cenarios_globais_e_oportunidades.pdf?sequence=1&isAllowedCZYRYCA) E. J., LINK R. E., Wong R. J., Aylor D. A., Montemarano T. W., Gudas J. P., Nav. Eng. J. 102 (1990) 63-82

DRAWISH S.M.; TAMIMI A. Al.; HABDAN Al.; A knowledge base for metal welding process selection - **Tools Manufact**, v. 37, n.7, p 1007-1023, 1996.

GHOSHA A.; CHATTOPADHYAYAB S.; SARKAR P.K.; Critical Analysis of Confounded Parameters of SAW Process - College of Engg & Textile Technology,Berhampore,WB,India – 2011. **Engineering Procedia**, v. 10, p. 2786-2790, 2011.

GOWTHAMAN, P. S.; MUTHUKUMARAN, P.; GOWTHAMAN, J.; ARUN, C. Review on Mechanical Characteristics of 304 Stainless Steel using SMAW Welding. **MASK International Journal of Science and Technology**, v. 2, n. 2, p. 33–37, 2017.

GUCWA, M.; WINCZEK, J.; BĘCZKOWSKI, R.; DOŚPIAŁ, M. Structure and Properties of Coatings Made with Self Shielded Cored Wire. **Archives of Foundry Engineering**, v. 16, n. 3, p. 39–42, 2016.

HEMMATIAN B.; CASAL, J.; PLANAS E.; - Essential Points in the Emergency Management in Transport Accidents which Can Lead to a BLEVE-Fireball Centre for Technological Risk Studies (CERTEC). Universitat Politècnica de Catalunya-EEBE. Eduard Maristany 10. 08019- Barcelona Spain - 2013 **Chemical Engineering Transactions**, v. 57, 2017.

ILIĆ, A.; IVANOVIĆ L.; STOJANOVIĆ B.; JOSIFOVIĆ D.; DESNICA E.; Impact Toughness of high-strength low-alloy steel welded joints. **Machine elements and systems in energy sector. 8<sup>th</sup> International Scientific Conference IRMES 2017.**

JAHANZAIB. M.; SALMAN H. AHMAD W.; HARIS A.; ADNAN M.; SAIF U.; - Modeling of weld bead geometry on ARBL steel using response surface methodology. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 89, n.5-8, p.2087-2098, 2017.

KASABE P. V.; Kolhe K. P.; Study of Heat Transfer Rate on Multipass Submerged Arc Welding - **International Engineering Research Journal (IERJ)**, 2015. Special Issue, p. 20-25.

KHATTAK M. A.; MUKHTAR A.; AZAM K - Common Root Causes of Pressure Vessel Failures:A Review. **Journal of Advanced Research in Applied Mechanics** v.21, n. 1, p. 22-37, 2016.

LAN L. Y., QIU C.L., ZHAO D. W. , GAO X. H. e DU L. X. - Effect of single pass Welding Heat input on microstructure and hardness of submerged arc welded high strength low carbon bainitic steel - **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 17, p. 564 – 570, 2012.

LAN, L.; KONG, X.; QIU, C.; ZHAO, D. Influence of microstructural aspects on impact toughness of multi-pass submerged arc welded ARBL steel joints. **Materials and Design**, v. 90, p. 488–498, 2016.

LING, K. H.; FUH, Y. K.; KUO, T. C.; XUN-TU, S. Effect of welding sequence of a multi-pass temper bead in gas-shielded flux-cored arc welding process:

hardness, microstructure, and impact toughness analysis. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, n. 5–8, p. 1033–1046, 2015.

MAGUDEESWARAN, G.; BALASUBRAMANIAN, V.; REDDY G. M.; Effect of welding processes and consumables on fatigue crack growth behaviour of armour grade quenched and tempered steel joints. **Defence Technology**, v.10, n.1, p.47- 59, 2014.

MATLOCK, D.; SPEER, J. Microalloying concepts and application in long products. **Materials Science and Technology**, 2009.

MISHRA, H. K. Review on Effect of Heat Input on Tensile Strength of Butt Weld Joint Using Mig Welding. **IJIERT**, v. 2, n. 9, p. 1–13, 2015.

MODENESI P. J.; Estimativa de custos de soldagem, 2001. Belo Horizonte. EDITORA UFMG.

MODENESI P. J.; MARQUES P.V.; SANTOS D.B.; Introdução a metalurgia de soldagem, 2012. Belo Horizonte, EDITORA UFMG.

MODENESI P. J.; MARQUES P.V.; SANTOS D.B.; Soldabilidade de algumas ligas, 2011. Belo Horizonte, EDITORA UFMG.

MONTEMARANO T.W.; SACK B. P.; GUDAS J. P.; VASSILAROS M. G., VANDERVELDT H. H. – High Strength Low Alloy Steels in Naval Construction – **Journal of Ship Production**, v.2, p. 145-162, 1986.

MUKHOPADHAYAY S.; Pal T.K.; Effect of shielding gas mixture on gas metal arc welding of HSLA steel using solid and flux-cored wires. *Int. J. Adv. manuf. Technol.* v.29, p. 262-268, 2006.

NEGI V.; CHATTOPADHAYAYA S.; Critical Assessment of Temperature Distribution in Submerged Arc Welding Process - **Advances in Materials Science an Engineering**, v. 2013, Article ID 543594, 9 p., 2013.

NEVES, F.; REGONE, W.; BUTTON, S.T. Análise de comportamento microestrutural de um aço microligado por simulação física analógica ao

forjamento a quente. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. São Paulo, s/d.

NEVES M.D.M.; Estimativa de custo na soldagem dos aços inoxidáveis. **Comissão Nacional de Energia Nuclear**. p. 225-232, 1994.

NORMA BS7122:1989. welded steel tanks for the road transport of liquefable gases, british standard institution

NORMA DIN EN 12972:2007, Tanks for the transport of dangerous goods .– Testing, inspection and marking of metallic tanks

NORMA SANS 1518:2011 – Transporte perigos. Construção projeto, teste , aprovação , manutenção, de veículos de estrada e tanques de transporte. Edição 4 – 2011

Norma ASM International - The Materials Information Society Publication Title Code Alloying: Understanding the Basics 2001 site: [https://www.asminternational.org/search/journal\\_content/56/10192/06117G/PUBLICATION](https://www.asminternational.org/search/journal_content/56/10192/06117G/PUBLICATION)

OLIVEIRA, F.; PEREIRA, W. X.; COSTA, M. C. M.; CASTRO, C. A. C. Characterization of the Parameters in FCAW Welding Process in Alloy Steel Using Statistics. **Proceedings of the World Congress on Engineering**, v. II, 2016.

PATRICK, C. W.; NEWELL, W. F. J. Understanding Welding Cost - Using Flux-Cored Arc Welding (FCAW) For Cost Reduction and Productivity Improvement. **Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference.**, p. 1–8, 2014.

PEZESHKIAN, R. M.; SHAFIPOUR, S. Heat input effects on microstructure quenched and tempered steel ASTM A517 to stainless steel AISI 316L. **Journal of Welding and Joining**, v. 33, n. 1, p. 41-48, 2015.

PHILIPS D. H.; Livro: Welding Engineering -2016. Editora Wiley, Inglaterra.

RESTECKA, M.; WOLNIAK, R. IT Systems in Aid of Welding Processes Quality

Management in the Automotive Industry. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 61, n. 4, p. 1785–1792, 2016.

SAE Standard J2340. Surface vehicle recommended practice, 1999.

SATYADUTTSINH P. CHAVDA, JAYESH V. DESAI, T. M. P. A Review on Optimization of MIG Welding Parameters using Taguchi's DOE Method. **International Journal of Engineering and Management Research**, v. 4, n. 1, p. 2250–758, 2014.

SCHNITZER R., ZUGNER D., HASLBERGER P., ERNST W., KOZESCHNIK E. - Influence of alloying elements on the mechanical properties of high-strength weld metal. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 22, n. 6, p. 536-543, 2017.

SOUZA, C.I.; FERRARESI V. A.; Análise Comparativa dos Processos de Soldagem GMAW e FCAW com Transferência Metálica por Curto-circuito na Posição Horizontal **Soldagem & Inspeção**, v. 18, n. 03, p.268-280, 2013.

STERJOVSKI, Z.; Pad-Weld Repairs of in-Service High-Strength Steel Plate used in Seawater Environments. **Welding in the World**, v.54, n. 7-8, p. 173-181, 2010.

SUMESH, A.; RAMESHKUMAR, A.; RAJA A.; MOHANDAS K.; SINTHAKUMARI, R.; SHYAMBABU R. Establishing Correlation Between Current And Voltage Signatures of the Arc and Weld Defects in GMAW Process, 2017 **Arab J Sci Eng**, v.42, p. 4649–4665, 2017.

URTADO, E.S.; Soldagem. 1 Ed. São Paulo: SENAI, 2013. v.1.

XU, W. H.; LIN, S. B.; FAN, C. L.; YANG, C. L. Evaluation on microstructure and mechanical properties of high-strength low-alloy steel joints with oscillating arc narrow gap GMA welding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 75, n. 9–12, p. 1439–1446, 2014.

WINARTO ,W. RINI, R., NUR, K. Microstructural and Mechanical Properties of

Welded High Strength Steel Plate Using SMAW and SAW Method for LPG Storage Tanks. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering** 316, 012051, 2018. doi:10.1088/1757-899X/316/1/012051

WINSOR, F. J.; Metals and their weldability - **Asm Handbook. 7**, Vol. 4, 1982.