

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

UISLEI RIZZO

**ESTUDO DE UNIÕES SOLDADAS DE CHAPAS DE AÇO SAE 1008 POR
PROCESSO GMAW**

CAXIAS DO SUL

2020

UISLEI RIZZO

**ESTUDO DE UNIÕES SOLDADAS DE CHAPAS DE AÇO SAE 1008 POR
PROCESSO GMAW**

Trabalho de conclusão de curso II apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação.

Orientador: MSc. Victor Hugo Velazquez Acosta Eng. Metalúrgico

CAXIAS DO SUL

2020

UISLEI RIZZO

**ESTUDO DE UNIÕES SOLDADAS DE CHAPAS DE AÇO SAE 1008 POR
PROCESSO GMAW**

Trabalho de conclusão de curso II apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.
Área de concentração: Processos de Fabricação.

Aprovado em: 15 / 12 / 2020

Banca Examinadora

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

Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer ao professor Victor Hugo Velazquez Acosta por me orientar neste trabalho, ajudar a definir e mostrar o caminho a seguir e me ajudar nas mais diversas dúvidas.

Quero agradecer á todos os meus colegas de trabalho que de alguma maneira me auxiliaram na execução deste trabalho, desde soldagem até o suporte para utilização de outros processos.

Agradeço também a empresa Jarflex que não só possibilitou a realização deste trabalho mas também me abriu as portas para trabalhar na área e adquirir conhecimento prático do que foi estudado em sala de aula.

Um agradecimento ao laboratório de ensaios mecânicos (LAMEC) e ao técnico Matheus Tuzzin pela disponibilidade e auxílio prestado na realização dos ensaios.

A todos os meus amigos e colegas de faculdade muito obrigado por cada momento de estudos e diversão que tivemos junto neste meio acadêmico.

Minhas sinceras gratidões também para Angélica Buckell que no decorrer destes cinco anos que se passaram esteve ao meu lado como companheira e muitas vezes foi compreensível e me deu forças para chegar neste objetivo.

Meu agradecimento mais especial para meus familiares Suzete Maria Rech e Wesley Rech de Souza que estiveram comigo desde o início desta caminhada e me deram suporte, carinho, força e atenção em todos os momentos que eu precisei e que esperaram ansiosos este momento tanto quanto eu.

RESUMO

As chapas de aço com baixo teor de carbono são amplamente utilizadas no mercado de implementos rodoviários desde a reposição até novos projetos e aplicações. O processo de união utilizado para elas mais comum é o processo GMAW por ser de fácil automação e um custo relativamente acessível. A fim de entender o comportamento do material diante deste processo de soldagem foram soldadas peças em chapas com espessura de 8 mm utilizando dois parâmetros de soldagem diferentes. Com estas peças foram realizados ensaios mecânicos e metalográficos para analisar as propriedades mecânicas e as transformações estruturais para cada caso. Os resultados demonstraram que a quantidade de energia utilizada na soldagem deve ser suficiente para que o material adquira propriedades e resistência para não falhar por causa de algumas descontinuidades. Também foi realizado uma simulação computacional das tensões existentes nas regiões dos cordões de solda para verificar se as tensões exercidas no componente são suportadas pelo metal de adição e a matéria-prima. Os valores de tensão encontrados na simulação demonstram que o dimensionamento dos cordões de solda estão dentro do que a aplicação exige. Estes resultados ajudam na escolha dos parâmetros de soldagem e dimensionamento dos cordões de solda unindo a qualidade do processo com o melhor custo.

Palavras chave: Soldagem, Processo GMAW, Energia de Soldagem, ensaios mecânicos, metalografia.

ABSTRACT

Low carbon steel sheets are widely used in the road implements market since the replacement to new projects and applications. The most common joining process for them is the GMAW process because it is easy to automate and relatively affordable. In order to understand the behavior of the material in the face of this process Welding parts were welded on 8 mm thick plates using two different welding parameters. With these parts mechanical and metallographic tests were carried out to analyze the mechanical properties and the structural transformations for each case. The results showed that the amount of energy used in welding should be sufficient for the material to acquire properties and strength so as not to fail because of some discontinuities. A computer simulation of the stresses existing in the weld beads regions was also carried out to verify whether the stresses exerted on the component are supported by the filler metal and the raw material. The stress values found in the simulation demonstrate that the sizing of the weld beads is within what the application requires. These results help in choosing the welding parameters and dimensioning the weld beads joining the quality of the process at the best cost.

Keywords: Welding, GMAW Process, Welding Energy, Mechanical Tests, Metallography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de Soldagem GMAW	14
Figura 2 - Equipamento de soldagem GMAW	15
Figura 3 - Geometria de cordões com diferentes tipos de gases	16
Figura 4 - Diagrama de Fases Fe-C	20
Figura 5 - Martensita em um aço baixo carbono. Ataque: Nital. 200x.	21
Figura 6 - Diagrama TRC de um aço Eutetoide (0,76%C)	22
Figura 7 - Representação da curva do ciclo térmico de soldagem	24
Figura 8 - Regiões da macroestrutura de uma solda por fusão.....	25
Figura 9 - Regiões da ZTA	26
Figura 10 - Desenho esquemático da ferrita de contorno de grão	28
Figura 11 - Desenho esquemático (a) e microscópico (b) da PF(I).....	28
Figura 12 - Desenho esquemático da ferrita de Widmanstätten.....	29
Figura 13 - Comparação entre ferritas de segunda fase.....	30
Figura 14 - Imagens da ferrita acicular.....	30
Figura 15 - Microscopia da área de ferrita-carbonetos.....	31
Figura 16 - Trinca por fissuração à quente	33
Figura 17 - Macro e Micrografia de uma trinca pelo hidrogênio	34
Figura 18 - Fluxograma	37
Figura 19 - Chapas soldadas em topo e em Ângulo	38
Figura 20 - Confeção dos Corpos de prova para Tração	40
Figura 21 - Corpos de prova de dobra (Alta Energia de Soldagem)	41
Figura 22 - Corpos de prova de dobra (Baixa Energia de Soldagem).....	41
Figura 23 - Pontos para medição de dureza.....	42
Figura 24 - Corpo de prova para dobra de Filete.....	42
Figura 25 - Modelo para Estudo	43
Figura 26 - Diagrama de corpo Livre da Base.....	43
Figura 27 - Corpos de prova da matéria prima após ensaio de tração.....	44
Figura 28 - CP's soldados com alta energia com fratura em destaque.....	45
Figura 29 - Semelhança entre as fraturas.....	45
Figura 30 - CP's soldados com baixa energia com indicação das estricções	46
Figura 31 - Corpos soldados com baixa energia com fratura na região da solda	47
Figura 32 - Regiões com porosidade na área de ruptura	47

Figura 33 - Média de Tensões	48
Figura 34 - Ferramenta para ensaio de dobramento	48
Figura 35 - Corpos de prova ensaio de dobramento na raiz (Alta Energia)	49
Figura 36 - Trincas do AER3	50
Figura 37 - Corpo de prova com trincas devido a porosidade.....	50
Figura 38 - Trinca no corpo de prova BER1	51
Figura 39 - Corpos de prova ensaio de dobramento de face (Baixa Energia).....	51
Figura 40 - Macrografia junta em ângulo de 90° com Alta Energia de Soldagem.....	52
Figura 41 - Macrografia junta em ângulo de 90° com Baixa Energia de Soldagem	53
Figura 42 - Micrografia do Metal Base	54
Figura 43 - Microscopia ZTA; a) alta energia, b) baixa energia	55
Figura 44 - Microscopia Metal de Adição; a) alta energia, b) baixa energia	56
Figura 45 - Micrografia do metal de adição para Alta Energia (100x)	56
Figura 46 - Zona de Transição da Baixa Energia de Soldagem (50x).....	57
Figura 47 - Gradiente de Durezas.....	58
Figura 48 - Junta de 90° após ensaio de dobra de filete (Baixa Energia).....	59
Figura 49 - Junta de 90° após ensaio de dobra de filete (Alta Energia)	59
Figura 50 - Tensões na parte superior do suporte da base.....	60
Figura 51 - Tensões na parte inferior do suporte da base.....	61
Figura 52 - Tensões na parte da solda interna do chassi	61
Figura 53 - Tensões na parte da solda da extremidade entre chassi e coluna.....	62

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Misturas de gases usados na soldagem MIG/MAG	17
Quadro 2 - Resultados dos ensaios de dobramento	49
Tabela 1 - Propriedades de eletrodos.....	35
Tabela 2 - Tensões permitidas pela AISC para metais de solda.....	35
Tabela 3 - Tensões permitidas pela AISC para metais de solda.....	36
Tabela 4 - Composição Química da Matéria Prima	38
Tabela 5 - Parâmetros utilizados para soldagem dos corpos de prova	39
Tabela 6 - Resultados do Ensaio de Tração da Matéria prima	44
Tabela 7 - Resultados do ensaio de tração para soldagem com alta energia	45
Tabela 8 - Resultados do ensaio de tração para soldagem com baixa energia	46
Tabela 9 - Informações Macrografia com Alta Energia de Soldagem	53
Tabela 10 - Informações Macrografia com Baixa Energia de Soldagem.....	54
Tabela 11 - Gradiente de durezas	58

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AISC	Instituto Americano de Construção de Aço
AM	Austenita-Martensita
ARBL	Alta Resistencia Baixa Liga
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CE	Carbono Equivalente
CNC	Comando Numérico Computadorizado
FA	Ferrita Acicular
FC	Agregados Ferrita-Carbonetos
FS(A)	Ferrita com Segunda Fase Alinhada
FS(NA)	Ferrita com Segunda Fase não Alinhada
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
IIW	<i>International Institute of Welding</i>
M	Martensita
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
MB	Metal Base
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
PF(G)	Ferrita de Contorno de Grão
PF(I)	Ferrita Poligonal Intragranular
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
TRC	Temperatura de Resfriamento Contínuo
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

γ	Austenita
α e δ	Ferrita
ϕ	Velocidade de resfriamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	AMBIENTE DE TRABALHO	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	12
1.3	OBJETIVO GERAL.....	13
1.4	OBJETIVOS ESPECIFICOS	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	PROCESSO DE SOLDAGEM	14
2.1.1	Processo de Soldagem GMAW.....	14
2.1.1.1	Consumíveis	15
2.1.1.2	Modos de transferência metálica.....	17
2.2	METALURGIA DA SOLDAGEM.....	19
2.2.1	Metalurgia física do aço	19
2.2.2	Ciclo Térmico.....	23
2.2.3	Macroestrutura.....	24
2.2.3.1	Características da zona fundida.....	25
2.2.3.2	Características da zona termicamente afetada.....	26
2.2.4	Microestruturas	27
2.2.5	Descontinuidades	31
2.3	RESISTÊNCIA DE JUNTAS SOLDADAS	34
2.4	MÉTODOS COMPUTACIONAIS	36
3	MÉTODOS E MATERIAIS	37
3.1	MATERIAL	38
3.1.1	Projeto de peças para soldagem	38
3.2	PARÂMETROS DO PROCESSO	39
3.3	ENSAIOS	39
3.3.1	Ensaio de Tração	40
3.3.2	Ensaio de dobramento.....	40

3.3.3	Ensaio de Metalografia	41
3.3.4	Ensaio de dobra do Filete	42
3.4	SIMULAÇÃO DE TENSÕES NAS REGIÕES DAS JUNTAS SOLDADAS	43
4	RESULTADOS	44
4.1	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	44
4.2	ENSAIO DE DOBRAMENTO	48
4.3	ENSAIOS DE METALOGRAFIA	52
4.3.1	Macrografia	52
4.3.2	Micrografia	54
4.3.2.1	Micrografia do Metal Base.....	54
4.3.2.2	Micrografia da Zona Termicamente Afetada	55
4.3.2.3	Micrografia do Metal de Adição	55
4.3.2.4	Micrografia da Área de Transição.....	57
4.3.3	Gradiente de durezas	57
4.4	ENSAIO DE DOBRA DO FILETE.....	59
4.5	RESULTADO DA SIMULAÇÃO.....	60
5	CONCLUSÃO	63
	BIBLIOGRAFIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

O processo de Soldagem surgiu para a união de peças desde itens pequenos como joias ou componentes eletrônicos até conjuntos de grande porte como trens, navios ou naves espaciais. Vários processos foram criados para esta união, desde materiais ferrosos e não ferrosos até uma mistura dos mesmos.

Conforme Norton (2013) uma solda corretamente aplicada pode ser tão resistente quanto o material-base, mas se feita de maneira inadequada pode deixar a montagem severamente enfraquecida. Para execução do processo de forma adequada existem diversas variáveis que podem se alterar, algumas dessas variáveis podem ser controladas através dos parâmetros do próprio maquinário. Se o processo for realizado de forma inadequada podem surgir diversos defeitos que podem ser visuais, macrográficos através da geometria do cordão, como também pode ser um defeito que ocasione a perda das propriedades mecânicas do material como a resistência a tração, que pode ocasionar uma falha prematura do componente em trabalho por estar enfraquecido.

Dentre os processos de soldagem existentes o mais utilizado em nossa região é o processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) mais popularmente chamado de MIG (*Metal Inert Gas*) ou MAG (*Metal Active Gas*) dependendo de qual gás é utilizado em sua aplicação. Este processo é o mais utilizado devido à facilidade para automatização em robôs de solda ou equipamentos que reproduzam um movimento mecânico padronizado (BRACARENSE, MARQUES, MODENENSI, 2009).

Aços de baixo carbono são mais fáceis de soldar (NORTON, 2013). Estes são utilizados pelas empresas em forma de chapas metálicas que posteriormente cortadas, conformadas e entre outros processos chegam à operação de soldagem para gerar o produto final. Produtos estes que abastecem o mercado de reposição aonde o valor final do produto é o mais importante. Diferente de produtos fornecidos para montadoras onde se prioriza muitas vezes o peso final do produto o que impacta no rendimento do implemento que será aplicado, nestes casos outros materiais como aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) são utilizados o que implica em processos de soldagem mais complexos com pré e pós preparações à soldagem.

Embora os aços de baixo carbono tenham uma boa soldabilidade ainda assim é necessário saber o comportamento microestrutural e das propriedades mecânicas mediante o processo de soldagem para poder assim ter uma economia não só de matéria-prima como também na utilização da energia e consumíveis de soldagem.

1.1 AMBIENTE DE TRABALHO

A empresa Jarflex Indústria e Comércio LTDA, que é detentora das marcas Ibral e Suspenflex. É uma indústria do ramo metalmeccânico e seus principais produtos são: molas pneumáticas (bolsas), suspensores, kit's direcionais, de suspensões pneumáticas e pinos/buchas para suspensão.

O trabalho será realizado juntamente com a filial Ibral a qual é responsável pelos processos de metalurgia da empresa tais como corte à plasma, corte de tubos mecânicos, conformação mecânica por prensagem e dobradeira CNC e soldagem tanto manual em bancada como em robô de solda CNC.

Para o trabalho em questão os materiais utilizados serão cortados pelo processo de corte a plasma e soldadas de forma manual a fim de reproduzir a maneira como é fabricado a maioria dos produtos.

1.2 JUSTIFICATIVA

As empresas tem como objetivo sempre garantir um processo bem executado para garantir a qualidade e segurança em seus produtos. Para garantir isso muitas vezes é necessário utilizar de processos cada vez mais automatizados que garantam sempre os mesmos parâmetros em determinado maquinário.

Parâmetros estes que devem ser sempre revisados para garantir o objetivo de ter um processo que seja produtivo e de qualidade, seja ele manual ou automático.

A escolha de parâmetros como Tensão e Corrente também podem implicar no custo de quanta energia é utilizada. Assim se valores menores destes parâmetros forem utilizados, menores custos com energia será necessário.

Nem sempre pode se ter a automatização de todos os processos de soldagem. Sendo necessário assim que sempre tenha uma parte manual do processo. Como mencionado anteriormente a automatização dos equipamentos hoje em dia garante uma boa estabilidade dos parâmetros do processo. Cabendo ao operador regular estes parâmetros devidamente conforme necessário.

São muitos os parâmetros que podem ser variados dentro do processo de soldagem. Para este trabalho, utilizando como referência documentação da empresa, será utilizado valores para Corrente e Tensão de acordo com a espessura do material a ser soldado.

Realizando este estudo poderá se entender melhor a utilização destes parâmetros na soldagem de componentes com determinado material que é predominantemente utilizado nos produtos da empresa e verificar se a redução da quantidade de energia é possível.

1.3 OBJETIVO GERAL

Verificar a soldabilidade de chapas de aço SAE 1008 utilizando processo de soldagem GMAW com a utilização de parâmetros definidos por documentação própria da empresa, para obter uma melhor compreensão sobre as propriedades mecânicas e metalúrgicas do produto obtido.

1.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Para o atendimento do objetivo geral é previsto os seguintes objetivos específicos:

- a) analisar o material utilizado quanto à suas propriedades mecânicas e soldabilidade;
- b) compreender a metalurgia da soldagem para entender as transformações ocorridas na microestrutura durante o processo;
- c) realizar simulação computacional das tensões na região das juntas soldadas;
- d) realizar ensaios mecânicos e metalográficos (Avaliação Visual, macrografia, micrografia, ensaio de tração e de dobramento);

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

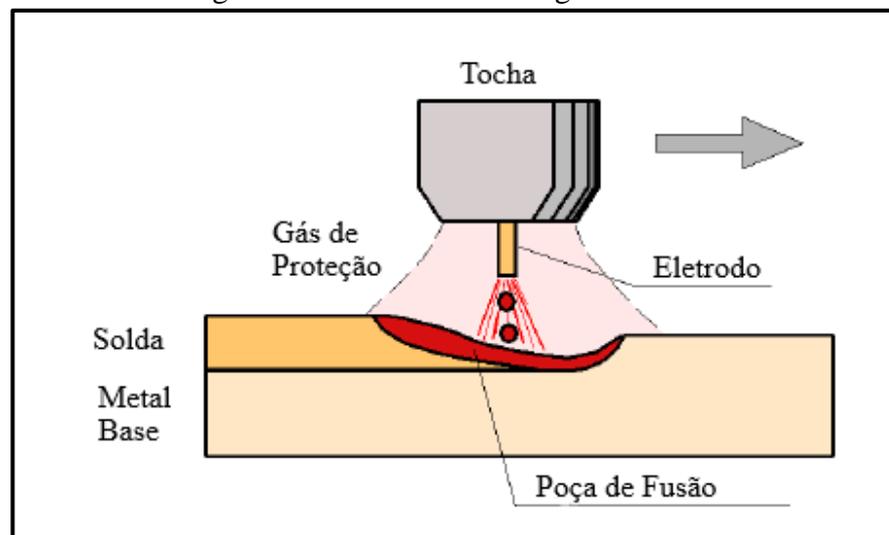
2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM

Soldagem é o processo de união de materiais através da fusão de ambos os materiais entre si, com adição de um material fundido ou através de pressão entre os mesmos em fase sólida ou semissólida. Ao finalizar este processo busca-se obter a continuidade das propriedades mecânicas entre os materiais e a área fundida para que não ocorram falhas.

2.1.1 Processo de Soldagem GMAW

Processo de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo consumível, do inglês GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). É o processo de soldagem onde ocorre a fusão de um metal de adição (eletrodo consumível), que é continuamente alimentado, junto ao material base. Para a proteção da poça de fusão é utilizado um gás de proteção conforme ilustrado na Figura 1.

1. Percebi que a maioria das figuras e tabelas estão descentralizadas e algumas fora das margens da página. Parece que estás usando parágrafo para as figuras. Não se usa parágrafo para figuras e tabelas. Devem ser centralizadas na linha.

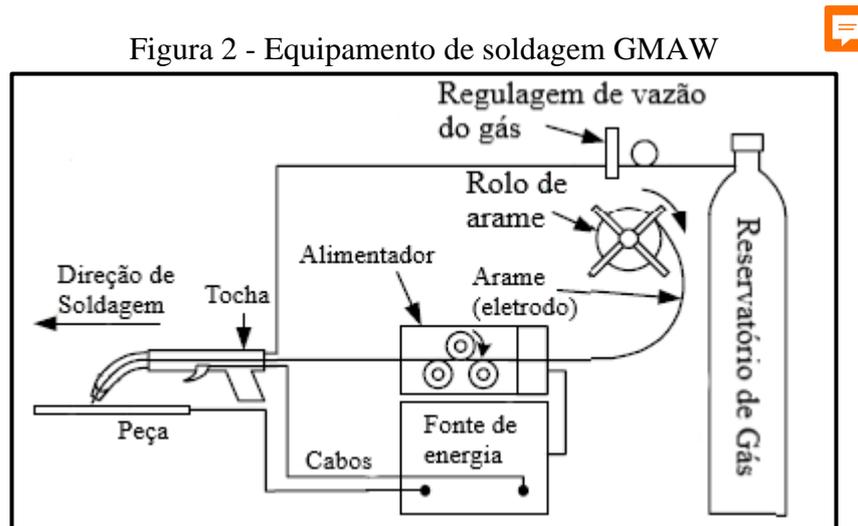


Fonte: Adaptado de Modenesi (2012)

Quando este gás contém uma mistura de gases inertes, como por exemplo Argônio e Hélio, o processo é denominado de MIG (*Metal Inert Gas*) e quando é utilizado uma mistura de gases ativos, como por exemplo a utilização de Gás Carbônico, o processo é denominado MAG (*Metal Active Gas*).

O processo MIG é utilizado tanto na soldagem de metais ferrosos e não ferrosos. O processo MAG é utilizado na soldagem de aços baixo carbono e aços de baixa liga (BRACARENSE, MARQUES, MODENENSI, 2009).

O processo por soldagem GMAW é muito utilizado devido a sua facilidade para automatização. O equipamento com os elementos básicos para uma soldagem pelo processo GMAW é representado na Figura 2.



Fonte: Adaptado de Kou (2003)

O equipamento é composto por um reservatório de gás, com a função de armazenar a mistura de gases para a proteção do arco, um alimentador de arame que segundo Machado (1996) é de extrema importância para manter a alimentação constante do arame para determinada faixa de parâmetros utilizadas e utilizar um mecanismo que cause a menor torção possível do arame na alimentação.

O equipamento é formado também por uma fonte de energia que tem a função de manter a corrente e a tensão de trabalho desejada para a soldagem. Através de cabos a tocha é alimentada com o eletrodo que será fundido ao metal base e com o gás que fará a proteção da poça de fusão do ar atmosférico e ajudará a estabilizar e garantir as propriedades da junta soldada.

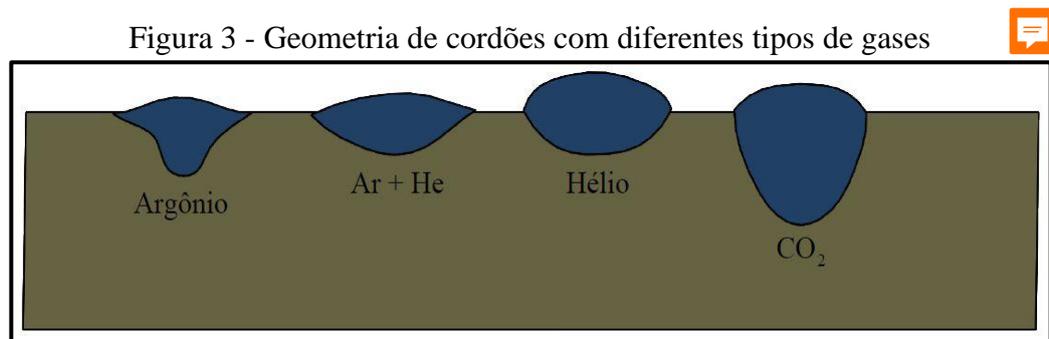
2.1.1.1 Consumíveis

Os principais consumíveis para o processo de soldagem GMAW são o eletrodo consumível, o gás de proteção e um líquido para reduzir a adesão de respingos, conhecidos como antirrespingo na indústria (BRACARENSE, MARQUES, MODENENSI, 2009).

O arame ou eletrodo de soldagem é constituído por metais ou ligas metálicas que são produzidos com rigorosos critérios de dureza, composição química, condições superficiais e dimensões controladas. Estes arames são revestidos com finas camadas de cobre que tem a função de proteger o arame da corrosão, melhorar o contato elétrico entre a tocha e aumentar a vida do bico de contato. Segundo Machado (1996) a escolha do eletrodo é baseada em requisitos mecânicos e metalúrgicos da junta além de considerar o custo envolvido.

Os gases de proteção como dito anteriormente são separados em dois grupos, os inertes e os oxidantes (ativos). Uma mistura dos mesmos também é utilizado. Ele tem a função de proteger o arco elétrico contra a ação do ar atmosférico. Sua utilização também influencia na característica do arco, no modo de transferência de metal, penetração, largura e formato do cordão de solda, velocidade de soldagem e no custo da operação (BRACARENSE, MARQUES, MODENENSI, 2009).

A Figura 3 representa como os diferentes tipos de gases influenciam na geometria do cordão.



Fonte: Bracarense, Marques e Modenesi (2009)

Os gases inertes mais utilizados são o Argônio e o Hélio. Na soldagem de aços adiciona-se um gás oxidante (O_2 e CO_2) para melhorar a estabilidade do arco, reduzir a quantidade de respingos e melhorar a fluidez da poça de fusão (MACHADO, 1996). A adição de CO_2 na mistura reduz o custo da soldagem e este gás, que em temperatura ambiente é inerte, se torna ativo quando alcança as temperaturas elevadas do arco elétrico se transformando em CO e O .

No Brasil a utilização de Argônio na mistura de gases é utilizada devido a ser mais barato que o Hélio, manter o arco mais estável e ter uma densidade maior fazendo com que o gás se deposite no nível do chão reduzindo os riscos dos operadores inalarem este gás.

No Quadro 1 temos alguns exemplos de misturas de gases utilizados para soldagem de aços carbono e aços de baixa liga.

Quadro 1 - Misturas de gases usados na soldagem MIG/MAG

Gás ou Mistura	Comportamento Químico	Aplicações
Ar + 3-5 % O ₂	Oxidante	Aços Carbonos e alguns aços de baixa liga
CO ₂	Oxidante	Aços Carbonos e alguns aços de baixa liga
Ar + 20-50 % CO ₂	Oxidante	Aços
Ar + CO ₂ + O ₂	Oxidante	Aços

Fonte: Adaptado de Bracarense, Marques e Modenesi (2009)



O líquido antirrespingo é utilizado para reduzir a adesão de respingos na peça e no bico de contato da tocha. É utilizado na forma de aerossol e é depositado em finas camadas onde se deseja reduzir a adesão dos respingos. Deve-se tomar cuidado na utilização muito próxima da junta pois a mistura deste líquido, muitos deles hidrogenados, na reação química da solda pode gerar descontinuidades no cordão como porosidade e trincas. Para peças que posteriormente passarão por processo de pintura deve se tomar cuidado também para a remoção deste líquido pois a sua composição contém silicone que dificulta o processo de pintura (BRACARENSE, MARQUES, MODENENSI, 2009).

2.1.1.2 Modos de transferência metálica

No processo de soldagem GMAW a transferência do metal fundido do eletrodo para a poça de fusão se dá de quatro maneiras diferentes: transferência por curto-circuito, transferência globular, transferência por *spray* ou aerossol e transferência controlada. Estas transferências acontecem por complexas interações de forças as quais são influenciadas por vários fatores como o gás de proteção, a corrente de soldagem, tensão, distância do eletrodo e peça, bitola do arame entre outros. Cada modo de transferência afeta de diferentes maneiras as características do processo como estabilidade do arco, nível de respingos, aplicabilidade do processo em diferentes posições e quantidade de gases absorvidos pelo metal fundido (MACHADO, 1996; BRACARENSE, MARQUES, MODENENSI, 2009).

A transferência por curto-circuito ocorre com baixos valores de tensão e corrente, bitolas mais finas do arame de soldagem e utilização de diversos tipos de gases de proteção. Conhecido também pela formação de arcos curtos as gotas de metal são transferidas para o metal base pela ação de tensões superficiais, por este motivo é o modo mais utilizado para soldagem fora de posição. Devido à baixa energia de soldagem é o modo mais utilizado para

soldagem de chapas finas pela baixa penetração. Este modo de transferência gera um arco com bastante instabilidade e grande quantidade de respingos. A quantidade de respingos pode ser reduzida regulando a indutância na fonte de energia. Segundo Machado (1996) esta regulagem da indutância não pode ser prevista teoricamente e deve ser regulado conforme cada situação de trabalho.

A transferência globular ocorre com valores maiores de tensão e corrente comparados com o modelo anterior resultando em um arco mais estável. O metal passa a ser em formas de gotas que são transferidos por tensões superficiais e principalmente pela ação da gravidade, motivo este que limita sua utilização apenas para posições planas. O diâmetro destas gotas é influenciado pelo valor de corrente utilizado, o diâmetro das gotas tende a diminuir com o aumento da corrente.

Como desvantagem, além de se limitar a soldagem em posições planas, pode gerar falta de penetração, falta de fusão, reforço do cordão de solda excessivo e elevada quantidade de respingos (BRANDI, MELLO, WAINER, 1992).

A transferência por *spray* ocorre quando o nível de corrente da transferência globular passa do valor da corrente chamada “corrente de transição”. As gotas diminuem tanto de tamanho por causa do aumento da corrente que passa a ser transferido por esta maneira tipo aerossol. Estas gotas passam a ser transferidas por uma força eletromagnética e com frequências e velocidades muito maiores do que na transferência globular (KOU, 2003). Os gases a serem utilizados devem ser misturas de natureza inerte.

O arco por este modo de transferência é bastante estável, quase não tem a ocorrência de respingos e o cordão é regular e suave (BRACARENSE, MARQUES, MODENENSI, 2009). Devido ao aumento dos valores de corrente e tensão ocorre uma maior penetração e altas taxas de deposição, causando também uma transformação na aparência e no ruído do arco (MACHADO, 1996). Como pontos negativos deste modo de transferência podemos citar que não é indicado para soldar chapas finas devido aos altos valores de corrente e tensão. A soldagem em posições que não seja plana também não é indicada pelo tamanho da sua poça de fusão e dificuldade de controle.

A transferência controlada pode ocorrer de diversas maneiras por ter um controle maior dos parâmetros na fonte de energia. Por exemplo pode se utilizar parâmetros que alcancem as características desejáveis de uma transferência por *spray* mas com taxas de correntes mais baixas para conseguir utilizar em soldagem de chapas finas. Outro exemplo de transferência controlada que é muito utilizada é a pulsada, que mistura características da transferência globular mais estável e regular. Vários outros modos de transferência podem ser

criados e o seu estudo é realizado a partir de filmagem por câmeras e mecanismos de coletas de dados de alta velocidade (BRACARENSE, MARQUES, MODENENSI, 2009).

No geral o processo por soldagem GMAW tem como vantagens a facilidade para se automatizar, por ter também uma alimentação contínua do consumível, escolhendo o modo de transferência correta pode-se soldar em todas as posições. As taxas de deposição e velocidades de soldagem são elevadas, o que é muito positivo do ponto de vista econômico. Comparado a outros processos a quantidade de escoria que é gerado é muito baixo, economizando tempo na limpeza das peças e sem riscos de inclusões da escoria nos cordões de vários passes da soldagem. De modo geral a regulagem de parâmetros e o controle de características é muito mais fácil devido à tecnologia empregada nos equipamentos, facilitando assim o treinamento de novos soldadores.

Como desvantagem podemos citar o resfriamento rápido do metal, que no caso de aços mais temperáveis pode gerar trincas. A soldagem deve ser realizada em local fechado para evitar por exemplo a ocorrência de correntes de ar. Quando em peças mais complexas alguns locais são de difícil acesso para soldagem devido a geometria do bocal. No processo GMAW é gerada uma grande quantidade de metal líquido projetado durante a soldagem e também uma maior emissão de raios ultravioleta fazendo necessário não só o investimento no equipamento, mas também no ambiente para criar a proteção necessária (BRACARENSE, MARQUES, MODENENSI, 2009; BRANDI, MELLO, WAINER, 1992).

2.2 METALURGIA DA SOLDAGEM

O estudo da metalurgia é importante para compreender as transformações ocorridas na microestrutura do material durante a fusão do eletrodo com o metal base. Devido à grande taxa de energia depositada deve-se conhecer o comportamento da microestrutura pois muitas vezes pode ocorrer transformações que não sejam desejadas. Nesta seção também será revisado a metalurgia física do aço, objeto que é utilizado neste estudo de soldagem.

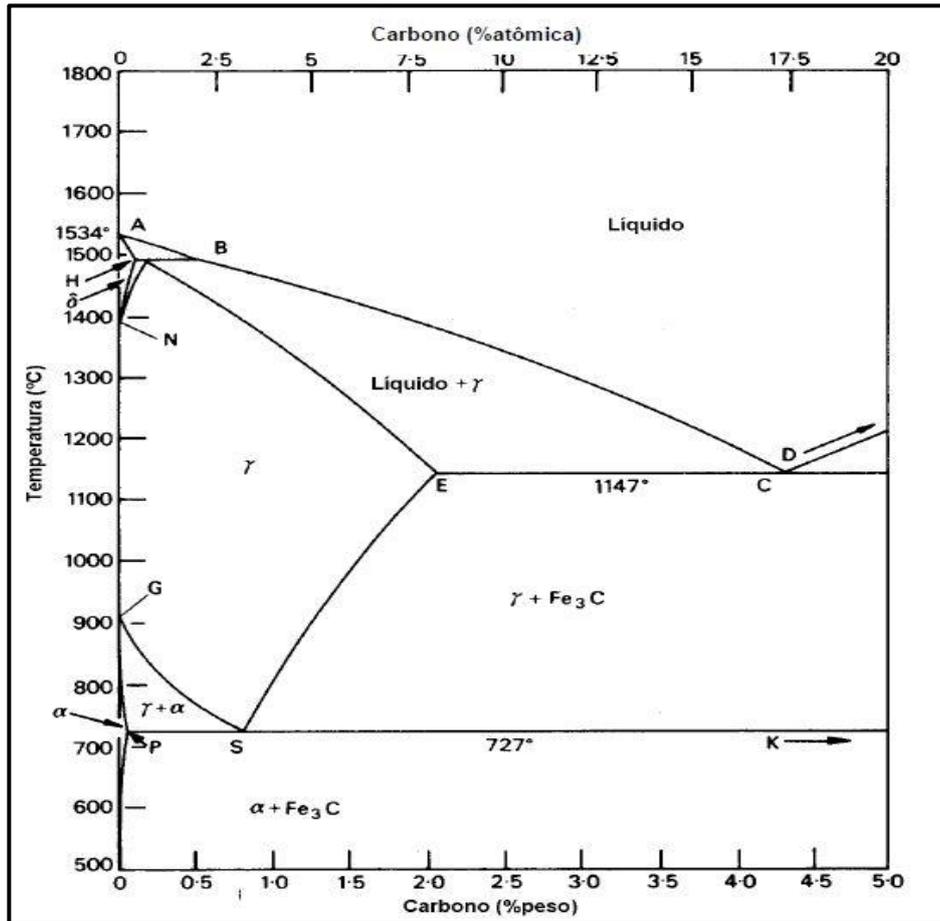
2.2.1 Metalurgia física do aço

Os aços são ligas de ferro contendo quantias menores que 2% de carbono em sua composição. Podem ainda conter outros elementos em sua constituição que são adicionados intencionalmente ou por resíduos do processo. Conforme Modenesi (2012) e Kou (2003) este é o conjunto de ligas mais utilizado no processo de soldagem devido à facilidade de se obter o

material básico, facilidade de refino e a variedade de propriedades obtidas para diversas aplicações.

Para o estudo do efeito que a soldagem causa na microestrutura dos aços devido à sua composição química e ciclos de temperatura é utilizado o diagrama de equilíbrio Fe-C. Conforme é mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Diagrama de Fases Fe-C



Fonte: Modenesi (2012)

Com este diagrama temos condições de estudar a estrutura e sua constituição de diversas ligas de ferro (aços e ferros fundidos). A sua utilização para transformações em aço carbono é utilizada em transformações onde ocorre uma variação lenta da temperatura.

Neste diagrama estão representadas as fases da austenita (γ), ferrita (α e δ) e cementita (Fe_3C). Abaixo dos 727°C a composição do aço carbono é formada por ferrita, que é a solução sólida do carbono no ferro, e cementita que é um carboneto de ferro de estrutura ortorrômbica. Para temperaturas mais elevadas o ferro existe em outra estrutura com mais capacidade de dissolver carbono, esta estrutura é conhecida como austenita (BRACARENSE, MARQUES, MODENENSI, 2009).

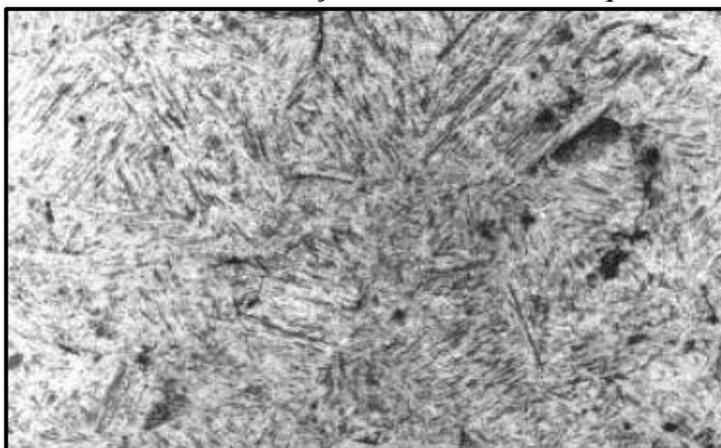
A transformação da austenita ocorre quando ela se torna instável, isso ocorre quando ela esfria para valores abaixo da linha GSE (figura 4). Ela começa a se transformar em ferrita para aços com menos de 0,8% de teor de carbono e se transforma em cementita nos aços com este teor maior que 0,8%. Quando o resfriamento chega à temperatura de 727°C esta mistura começa a se transformar numa mistura de ferrita e cementita, esta conhecida como transformação eutetóide. Em um resfriamento com velocidade suficientemente baixa estas estruturas se organizam em forma de camadas de ferrita e cementita, para este constituinte se dá o nome de perlita.

Então com um resfriamento lento para aços hipoeutetóides (carbono inferior à 0,8%) a estrutura seria formada por ferrita e perlita, para aços hipereutetóides (carbono superior à 0,8%) a estrutura seria formada por cementita e perlita e para aços eutetóides (com 0,8% de carbono) a composição seria formada puramente por perlita.

Quanto menor for a temperatura de resfriamento ou ainda por influência de elementos de liga mais fina se torna as camadas de perlita, a separação das camadas de ferrita e cementita se tornam menor conforme a temperatura de transformação for menor. Com isso pode ocorrer a formação uma nova estrutura chamada de bainita formada por grãos alongados de ferrita e com uma fina dispersão de carbonetos. Este constituinte fornece ao aço uma elevada resistência mecânica e em algumas situações boa tenacidade.

Outro constituinte também não é previsto no diagrama de fases. A martensita também pode ser formada devido à um aumento suficientemente elevado do resfriamento. Esta estrutura tem elevada dureza que aumenta conforme sua composição de carbono, se tornando extremamente frágil. Sua geometria típica tem aspecto de agulhas ou lâminas conforme representado na Figura 5.

Figura 5 - Martensita em um aço baixo carbono. Ataque: Nital. 200x.

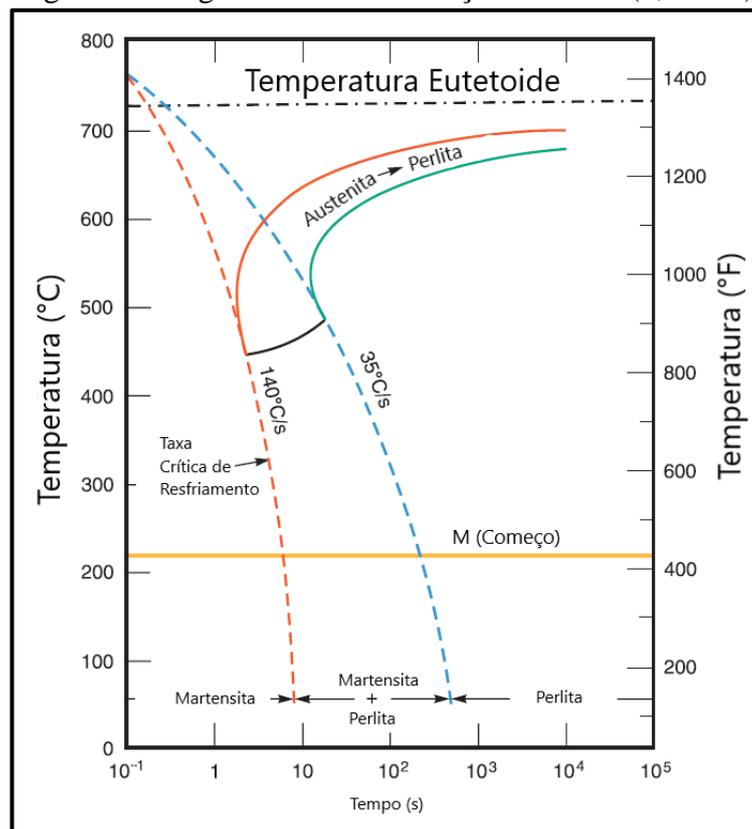


Fonte: Modenesi (2012)

Pode se concluir que quanto menor a temperatura de transformação e maior teor de carbono, mais dura e frágil é a microestrutura. Na soldagem por fusão a velocidade de resfriamento depende da energia utilizada, da temperatura inicial da peça e da espessura do material. Sabendo destes fatos pode-se limitar a faixa de energia para um componente que necessite de determinadas propriedades mecânicas.

Para obter qual microestrutura será formada pelo aço temos o diagrama TRC, transformação durante resfriamento contínuo. Ele mostra a evolução da microestrutura em função da temperatura, do tempo e do resfriamento. Eles surgiram originalmente para transformações após austenitização a temperaturas relativamente baixas, mas já existem diagramas que podem ser aplicados à solda. Na Figura 6 podemos observar um destes diagramas TRC e podemos observar que à medida que a velocidade de resfriamento aumenta a microestrutura vai se transformando conforme as mesmas citadas anteriormente.

Figura 6 - Diagrama TRC de um aço Eutetoide (0,76%C)



Fonte: Adaptado de AWS (2011)

Como existem diversas ligas de aços com diferentes composições é utilizado uma fórmula que calcula o carbono equivalente (CE). Com isso é possível prever se o aço precisa de pré ou pós-tratamento térmico antes e após a soldagem. Este cálculo e este tratamento ajudam

a prevenir também problemas como trincas e fissurações devido aos materiais serem de elevada dureza. Abaixo está descrita a equação (1) para o cálculo de carbono equivalente:

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

Para valores abaixo de 0,4% é pouco provável a ocorrência de trincas e não é necessário nenhum tratamento. Para valores entre 0,4% e 0,6% pode haver a ocorrência de trincas então é necessário um pré-aquecimento. Por último, valores acima de 0,6% significam grandes chances de ocorrer trincas sendo necessário tanto o pré quanto o pós-aquecimento do material.

2.2.2 Ciclo Térmico

Na soldagem por fusão o calor é a principal fonte de energia. Conforme Wainer, Brandi e Mello (1992) é o elemento principal para a boa execução de uma união soldada, mas também pode trazer problemas nas transformações metalúrgicas e fenômenos mecânicos na zona soldada se não aplicada a quantidade correta.

O fluxo de calor na soldagem pode-se dividir em duas etapas: Fornecimento de calor e dissipação deste calor pela peça. Para calcular a quantidade de energia fornecida na primeira etapa é utilizada a equação (2):

$$H = \frac{n V I}{v} \quad (2)$$

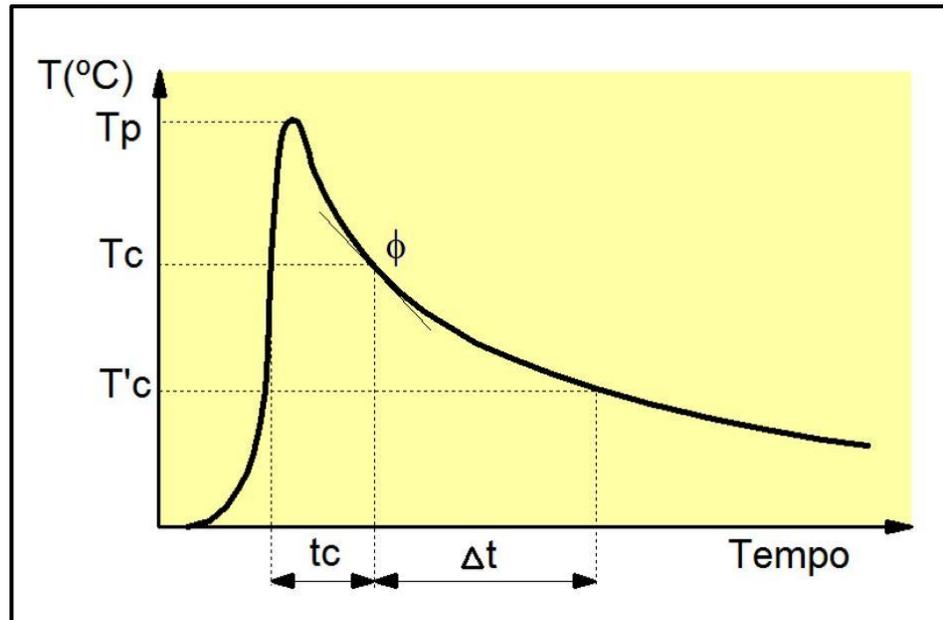
Onde o H é a energia de soldagem (J/mm), n é a eficiência térmica do processo, V é a tensão (V), I é a corrente de soldagem (A) e v é a velocidade de soldagem (mm/s).

Essa energia fornecida gera o calor para o material atingir temperaturas onde ocorrem a transformação da microestrutura, onde se forma a austenita. Após começa a segunda etapa onde o calor começa a se dissipar. Estas duas etapas juntas formam o ciclo térmico da soldagem e podem ser representados por uma curva conforme a Figura 7.

Algumas características importantes podem ser observadas nessa curva como a temperatura de pico (T_p) que é a temperatura máxima atingida pelo ciclo possibilitando a transformação da microestrutura e determinando a região afetada pelo calor durante a soldagem,

o tempo de permanência (t_c) é o intervalo onde o ponto fica entre as temperaturas superiores e uma temperatura mínima (temperatura crítica, T_c) possibilitando as alterações microestruturais e das propriedades e por último a velocidade de resfriamento (ϕ) parâmetro importante na determinação da microestrutura que será formada no material como pode ser visto no diagrama TRC.

Figura 7 - Representação da curva do ciclo térmico de soldagem



Fonte: Modenesi (2012)

Diversas variáveis podem influenciar na construção da curva do ciclo térmico como por exemplo o tipo de metal base e suas propriedades físicas, a geometria da junta, espessura do material, energia de soldagem e temperatura inicial da peça (BRACARENSE, MARQUES, MODENENSI, 2009).

2.2.3 Macroestrutura

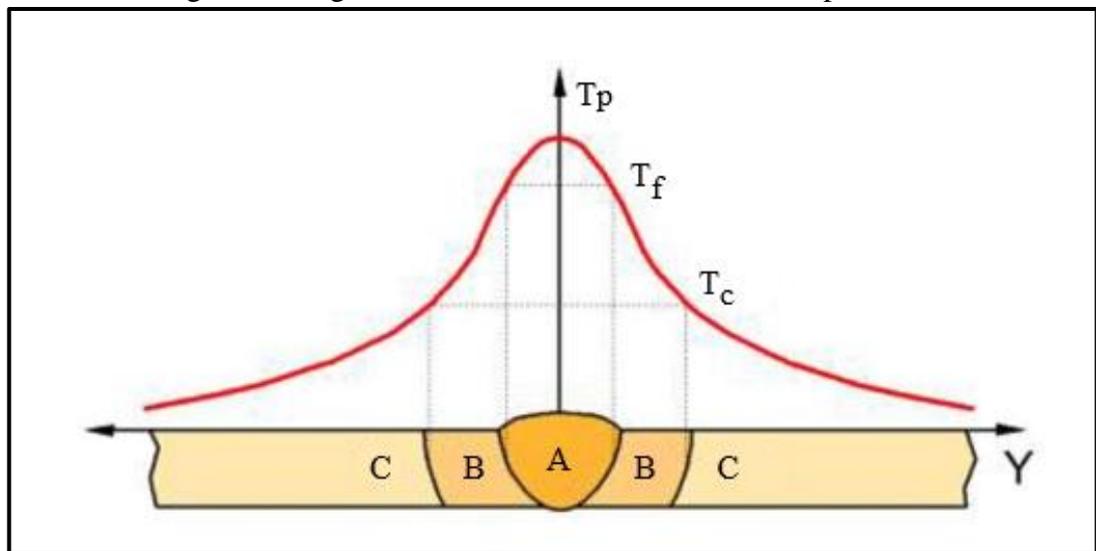
Durante a realização da solda o calor dissipado pela energia de soldagem gera alterações na microestrutura. Essas alterações ocorrem de acordo com a temperatura que vai decrescendo conforme se afasta do ponto central da fonte de calor. Podemos então definir três regiões em uma solda por fusão:

- a) zona fundida (ZF): Região onde o material foi fundido e se solidificou. As temperaturas atingidas nesta zona são superiores à temperatura de fusão do metal base;

- b) zona termicamente afetada (ZTA): Região onde a microestrutura do metal base sofre alteração devido ao ciclo térmico da soldagem. Local onde as temperaturas ficam entre a temperatura crítica e a temperatura de fusão do metal base;
- c) metal base (MB): Local mais afastado da poça de fusão não sofrendo alterações microestruturais. Sua temperatura fica abaixo da temperatura crítica.

Na Figura 8 podemos visualizar essas 3 regiões juntamente com uma repartição da curva do ciclo térmico em suas determinadas divisões. Estão representados ZF por A, ZTA por B e MB por C.

Figura 8 - Regiões da macroestrutura de uma solda por fusão



Fonte: Adaptado de Modenesi (2012)

2.2.3.1 Características da zona fundida

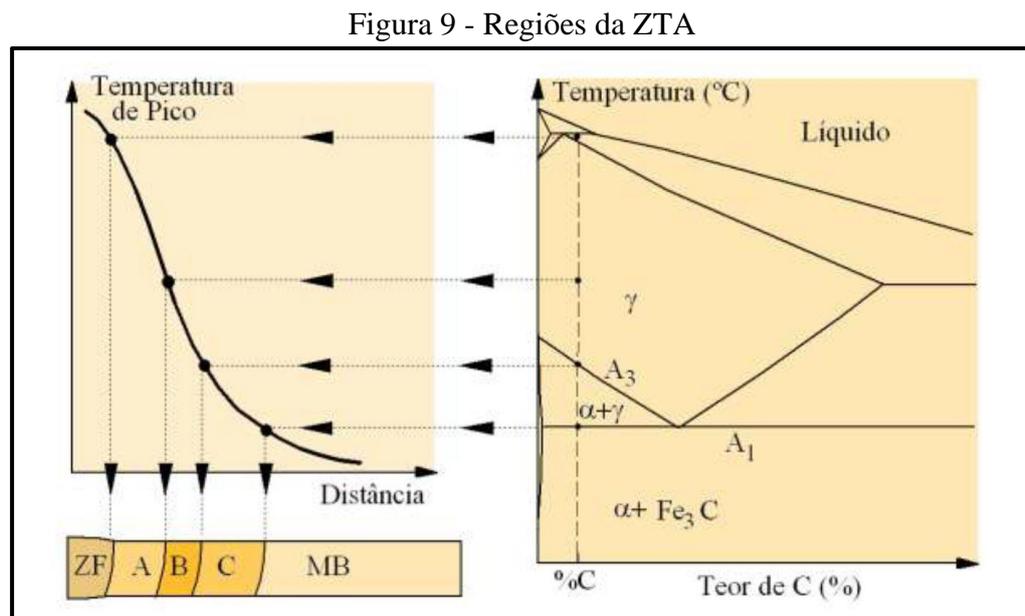
Na soldagem por fusão as gotas de metais são transferidas para a poça a temperaturas acima de 2000°C . Esta condição faz com que o metal de adição se misture ao metal base fundido e na parte posterior comece a se solidificar dando origem ao cordão de solda. A solidificação é um processo que determina as características da microestrutura tendo importante efeito nas propriedades e comportamento da solda (BRACARENSE, MARQUES, MODENENSI, 2009).

Um passe de solda pode ser comparado com uma pequena peça fundida. O metal líquido entra em contato com o metal base que está aquecido pela fonte de calor assim não tende a acontecer a formação de novos grãos, diferente das peças fundidas que pela diferença de temperatura entre o molde e o material fundido formam uma região chamada de zona coquilhada. Comparado com uma peça fundida podemos dizer então que o cordão de solda é

formado por uma zona colunar, que é formada por grãos grosseiros de austenita e elevadas quantidades de inclusões. Durante o resfriamento esta austenita é decomposta em diferentes agregados de ferrita e carbonetos e dependendo da condição da velocidade de resfriamento pode ser formado também a martensita. Uma melhor caracterização das microestruturas será apresentada no decorrer do trabalho.

2.2.3.2 Características da zona termicamente afetada

As características da zona termicamente afetada dependem da composição do material, das deformações durante o processo e da energia de soldagem utilizada. De acordo com todas estas variáveis a ZTA possui várias regiões que são separadas devido ao resfriamento que ocorre dentro do ciclo térmico, como pode ser observado na Figura 9.



Fonte: Modenesi (2012)

De acordo com a Figura 9 a ZTA pode ser dividida pelas seguintes regiões: região de crescimento de grão (A), região de refino de grão (B) e região intercrítica (C).

A região de crescimento de grão é a região mais próxima da zona fundida e que foi submetida a temperaturas acima dos 1200 °C. A estrutura austenítica sofre um crescimento de grão geralmente grosseiro, isto depende do tipo de aço e da energia de soldagem. A estrutura grosseira leva a ferrita apresentar uma morfologia de placas e até a presença da bainita. É a região mais problemática da ZTA podendo ter baixa tenacidade e a propensão ao aparecimento de trincas.

A região de refino de grão é onde as temperaturas atingidas são as mesmas utilizadas na normalização de aços, entre 1100 °C e 900 °C (BRANDI, MELLO, WAINER, 1992). É formada por estruturas finas de ferrita e perlita e não causa problemas maiores pois tem resistência e ductilidade elevadas.

Na região intercrítica as temperaturas variam entre 727°C e a linha A3 da Figura 9. Sofre poucas transformações por estar mais afastado da zona fundida, somente uma parte do material é austenitizado e quanto mais se afasta do cordão de solda menos transformações vão ocorrendo.

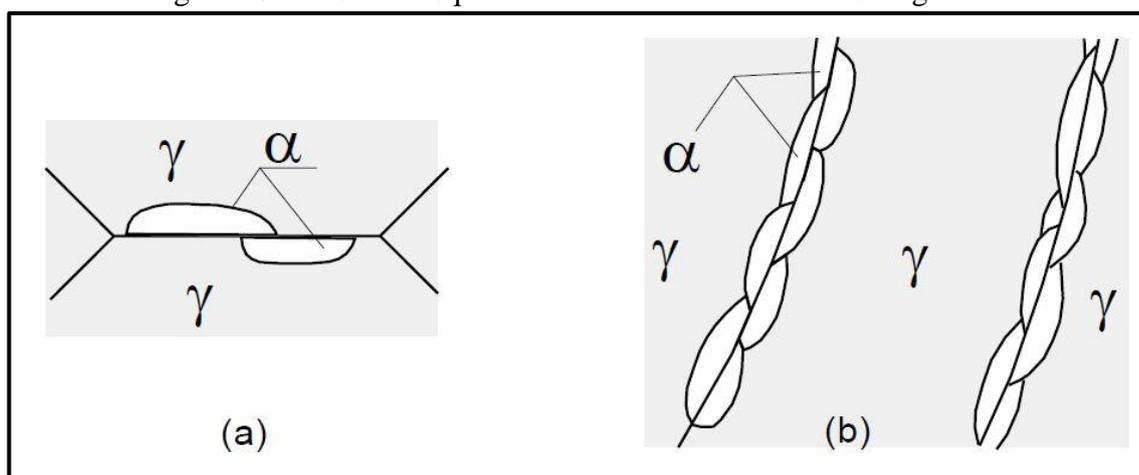
2.2.4 Microestruturas

Na soldagem a transformação da microestrutura austenita em ferrita, carbonetos e martensita ocorre devido ao resfriamento e a composição química do material. As características destas microestruturas são fundamentais para a determinação das propriedades finais da zona fundida (MODENESI, 2012).

O Instituto Internacional de Soldagem (IIW) desenvolveu uma classificação para os constituintes do metal de solda devido à dificuldade na identificação especificamente na microscopia ótica. Segundo Wainer, Brandi e Mello (1992) para diferenciar algumas microestruturas deve se observar os constituintes em microscópios eletrônicos, de varredura ou transmissão pois a microscopia ótica não consegue visualizar pequenas diferenças entre estes constituintes. Esta dificuldade gerou diversas terminologias para descrever as microestruturas do metal de solda. Os itens caracterizados a seguir seguem a classificação do IIW:

- a) Ferrita de contorno de grão – PF(G): Primeiro constituinte a se formar da decomposição da austenita a temperaturas de 800°C a 850°C. Sua forma é lenticular ou equiaxial e pode ser facilmente observado por um microscópio ótico. Apresenta tamanho de grão relativamente grande se formando ao longo dos contornos de grão colunares austeníticos. Entre seus grãos podem ter constituintes ricos em carbono e impurezas como por exemplo a perlita devido às transformações de fase. Encontrar esta microestrutura em grande quantidade nos contornos de grão é indesejável em soldas que precisam de uma elevada resistência à fratura por clivagem (fratura frágil). A Figura 10 mostra um desenho esquemático desta ferrita em contorno de grão (a) e os veios de ferrita em torno dos grãos colunares da austenita da ZF (b).

Figura 10 - Desenho esquemático da ferrita de contorno de grão

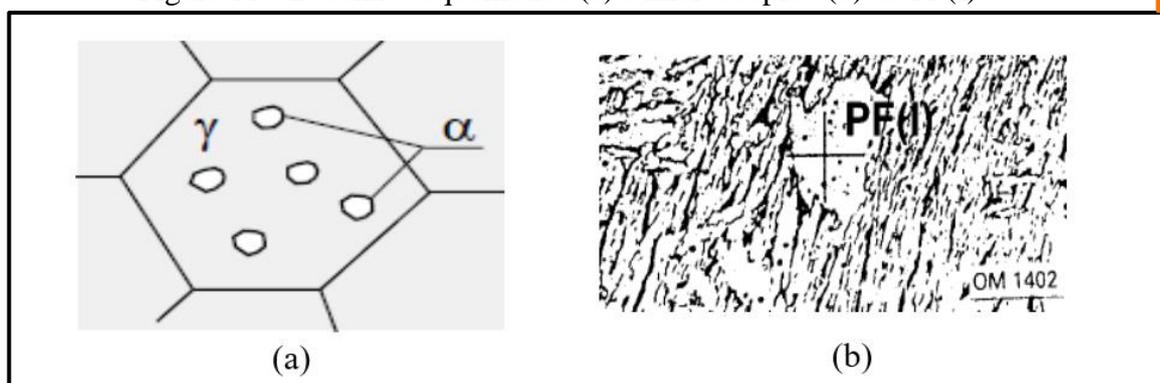


Fonte: Modenesi (2012)



b) Ferrita poligonal intragranular – PF(I): Se o tamanho de grão da austenita for muito maior que o grão da ferrita formada no seu contorno e houver espaço para a nucleação intragranular esta ferrita será formada no interior das austenita conforme podemos ver na Figura 11(a). Os grãos apresentam formato equiaxial que podem ser facilmente identificados na microscopia ótica, na Figura 11(b) podemos observar os grãos de PF(I) dentro de um grão de austenita.

Figura 11 - Desenho esquemático (a) e microscópico (b) da PF(I)



Fonte: Adaptado de Modenesi (2012)

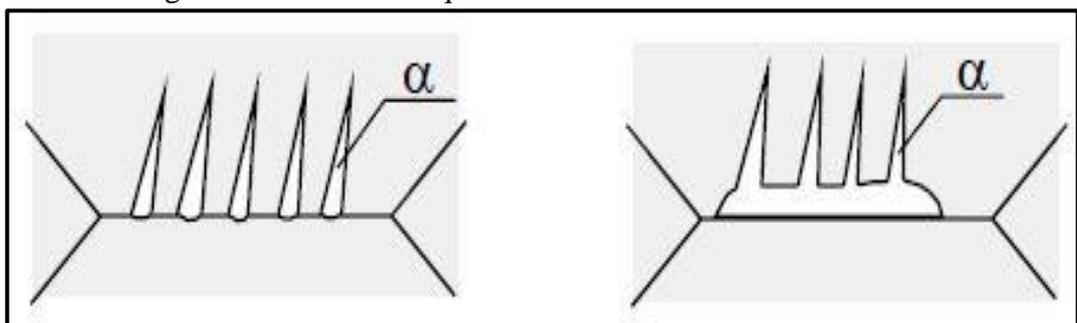
Para estes dois tipos de ferrita podemos observar os seguintes comportamentos: A transformação da ferrita de contorno de grão antecede a formação da ferrita poligonal intragranular, as duas são características de soldas com baixa velocidade de resfriamento e baixo teor de elementos de liga e microconstituintes como a perlita são observados nos contornos de grãos de ambas as ferritas.

- c) Ferrita com segunda fase alinhada – FS(A): Esta engloba três constituintes, a ferrita de Widmanstätten e a bainita (geralmente superior), que apresentam uma aparência muito similar quando observados por microscopia ótica. Ambos iniciam seu crescimento a partir do contorno de grãos da austenita ou a partir dos grãos de ferrita nos contornos de grão citados anteriormente.

A ferrita de Widmanstätten também conhecida como “placas laterais de ferrita” ou constituinte lamelar” forma grãos relativamente grosseiros com pequenas diferenças de orientação cristalina entre com a direção para dentro da matriz conforme a Figura 12. A região de austenita entre os grãos de ferrita se enrijece de carbono e dão origem à formação de perlita e outros constituintes ricos em carbono. Esta estrutura é favorecida pelo tamanho de grão da austenita e por teores de carbono intermediário, entre 0,2 e 0,4%, e principalmente por um super-resfriamento. Esta forma de ferrita é pouco desejada em zonas fundidas que necessitam de elevada tenacidade.

A bainita superior se forma a temperaturas similares a da ferrita acicular (FA). Ocorre em soldagens com elevada velocidade de resfriamento, teor de oxigênio muito baixo ou teor de elementos de liga muito elevados. É muito parecida com a ferrita de Widmanstätten podendo ser diferenciada pela microscopia eletrônica através da qual podemos observar uma maior quantidade de defeitos cristalinos e em geral uma precipitação interna de carbonetos. Como no caso anterior esta estrutura também é indesejável em soldagens por apresentar baixa tenacidade.

Figura 12 - Desenho esquemático da ferrita de Widmanstätten

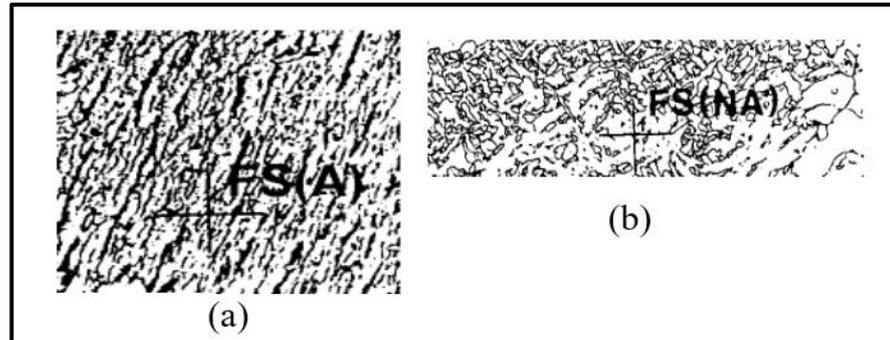


Fonte: Modenesi (2012)

- d) Ferrita com segunda fase não alinhada – FS(NA): É formada por ferrita envolvendo completamente as micro fases (carbonetos ou austenita-martensita) ou grãos de ferrita acicular. Este constituinte parece uma forma atípica da bainita, sua microestrutura se desenvolve em três dimensões, mas no microscópio o que se pode ver é um corte desta em duas dimensões. Na Figura 13 podemos observar a

diferença entre os tipos de ferrita com segunda fase quanto aos seus alinhamentos. Na Figura 13(a) temos a presença da segunda fase alinhada e na Figura 13(b) a presença da segunda fase não alinhada.

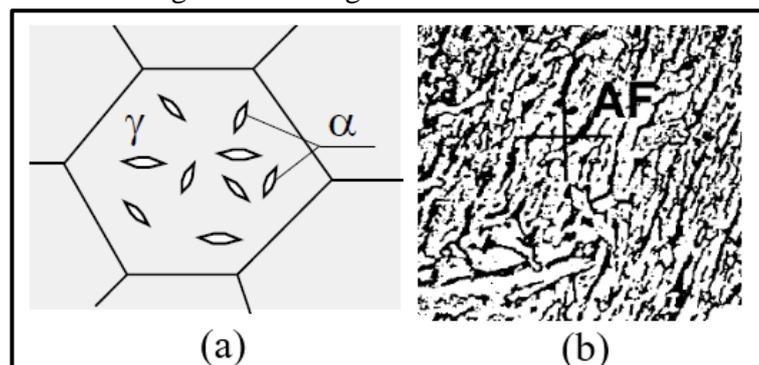
Figura 13 - Comparação entre ferritas de segunda fase



Fonte: Adaptado de Modenesi (2012)

- e) Ferrita acicular – FA: Tipo mais comum de ferrita nucleada no interior de grãos austeníticos. Pode ser formado a temperaturas tão baixas quanto a de formação de bainita em aços baixa liga com temperaturas na faixa de 510-440°C e 560-500°C. A nucleação ocorre de forma heterogênea favorecida pela presença de precipitados e inclusões resultantes da presença de oxigênio. Inclusões de compostos de titânio parecem mais efetivos para esta nucleação. Este tipo de ferrita possui granulação muito fina com formatos lenticulares de espessuras entre 1 ou 2 μm e contornos de grão de grande ângulo. Devido ao seu tamanho e diferença de orientação entre os grãos este constituinte é considerado o melhor para garantir alta tenacidade para o metal de solda em aços com limite de escoamento em torno de 500 Mpa. Na Figura 14(a) é mostrado este constituinte de forma esquemática e na Figura 14(b) é mostrado em uma microscopia.

Figura 14 - Imagens da ferrita acicular



Fonte: Adaptado de Modenesi (2012)

- f) Agregados ferrita-carbonetos – FC: Dentro destes agregados incluem a perlita, bainita inferior e a austenita-martensita (AM). Estes se formam durante a decomposição da austenita rica em carbono que foi rejeitada na formação da ferrita em elevadas temperaturas. Nos aços baixo carbono e baixa ligas estes constituintes aparecem em pequenas quantidades quando observados na microscopia ótica, formando áreas escurecidas na microestrutura sendo difícil de identificar.

Figura 15 - Microscopia da área de ferrita-carbonetos



Fonte: Adaptado de Modenesi (2012)

- g) Martensita – M: É formada em aços com maior teor de carbono ou outros elementos de ligas e com velocidades maiores de resfriamento. A formação de ferrita pode ser parcial ou totalmente interrompida substituída pela formação de uma estrutura inteiramente martensítica na zona fundida. Esta estrutura apresenta alta resistência mecânica e baixa tenacidade em aços com teor de carbono mais alto. Em aços com teor mais baixo de carbono alguns carbonetos podem ser formados diminuindo a supersaturação de carbono na martensita, esta estrutura (martensita auto revenida) é semelhante à bainita inferior e tem uma boa resistência à fratura frágil.

2.2.5 Descontinuidades

Descontinuidade é uma interrupção ou violação da estrutura típica esperada em um cordão de solda. A mesma é considerada prejudicial à junta soldada pois pode levar o item à

uma falha prematura da peça ou durante a execução de algum trabalho. Segundo a AWS existem três categorias básicas de descontinuidade: dimensionais, estruturais e propriedades inadequadas. Como o trabalho envolve um estudo mais metalúrgico da soldagem vamos abordar as descontinuidades relacionadas ao grupo das estruturais do qual fazem parte: porosidade, trincas, mordeduras entre outros.

A porosidade é causada por umidade, contaminação de óleos, ferrugem e outros. Estes constituintes quando em contato com a poça de fusão liberam gases que durante a solidificação podem ficar aprisionados no cordão de solda. Os poros em pequenas quantidades não são prejudiciais, mas em quantidades maiores determinadas por norma podem afetar as propriedades mecânicas reduzindo a área efetiva da solda. Para evitar a porosidade deve-se utilizar materiais limpos e secos com equipamentos em boa condição e parâmetros de soldagem adequados.

As mordeduras surgem devido a fusão do metal base na margem do cordão não preencher totalmente a área formando uma reentrância na região. Pode ser causado por manuseio incorreto do eletrodo de soldagem, correntes ou velocidade de soldagem elevada e por certos eletrodos que tem mais tendência a formar esta descontinuidade. Com a redução desta área efetiva da solda causa uma concentração de tensões reduzindo em específico a resistência à fadiga. Para prevenir este problema é necessário em uma soldagem de vários passes que elimine este defeito para o próximo passe, pode ser feito esmerilhando por exemplo.

As trincas são consideradas as descontinuidades mais graves na soldagem. Pois são fortes concentradores de tensão e tornam o material soldado suscetível à fratura frágil. As trincas podem surgir devido a incapacidade do material de responder as reações das tensões do material no processo de soldagem.

As trincas podem ser externas ou totalmente internas não sendo possível de se identificar apenas por verificação visual. Internamente as trincas podem ser tanto micro ou macroscópicas.

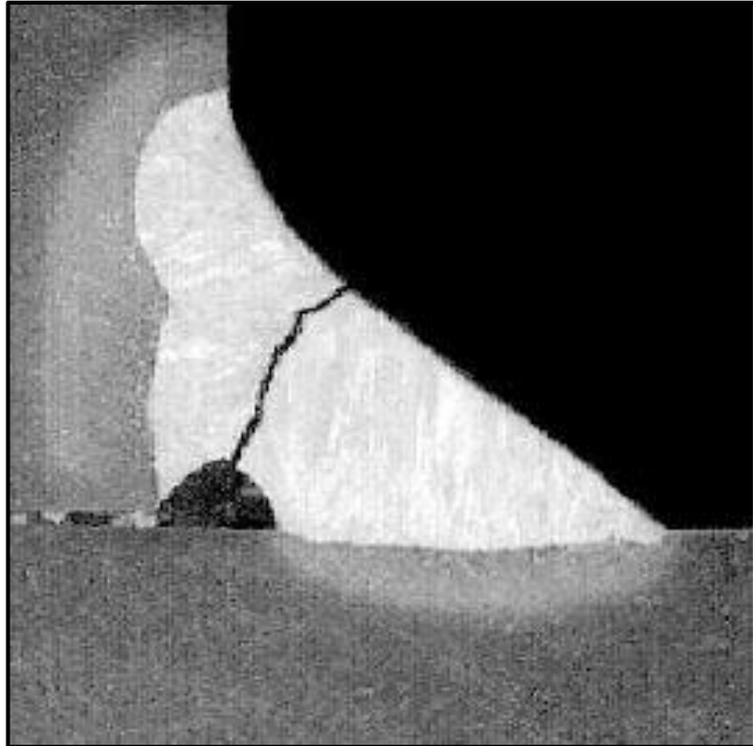
Os mecanismos para o surgimento de trincas podem ser durante a solidificação, durante o resfriamento, horas após a soldagem, na realização de tratamentos térmicos para alívios de tensão e até mesmo meses após o serviço de soldagem.

Dois mecanismos são os mais comuns na formação de trincas em soldas. Estes são a fissuração na solidificação conhecido como fissuração à quente e a fissuração por hidrogênio ou também conhecido como fissuração à frio.

A fissuração a quente também é comum em outros processos como por exemplo na fundição. Este mecanismo ocorre quando filmes de material líquido ficam segregados entre os

contornos de grãos na fase final de solidificação. Este tipo de trinca aparece no centro do cordão de solda como pode ser visto na Figura 16, mas também podem aparecer em diferentes localizações e orientações e ainda podem aparecer como microtrincas.

Figura 16 - Trinca por fissuração à quente



Fonte: Adaptado de Modenesi (2012)

A fissuração a frio é o mecanismo de formação de trincas mais comum em aços carbono e de média liga principalmente nos temperáveis. As trincas ocorrem principalmente na ZTA e aparecem tempo após a soldagem e crescem lentamente, aproximadamente dois dias até completar o crescimento. Existem quatro fatores que influenciam no aparecimento deste mecanismo.

A presença de hidrogênio, este elemento é absorvido pela poça de fusão devido à materiais com umidade existente no consumível ou na superfície da junta.

Microestrutura sensível, a fragilização ocorre com mais facilidade em materiais de baixa tenacidade e elevada dureza, destaca-se a presença de martensita. Também ocorre em aços com maior temperabilidade, para isto é utilizado o cálculo do carbono equivalente visto na equação (1) e verificado se são necessários tratamentos pré ou pós-soldagem.

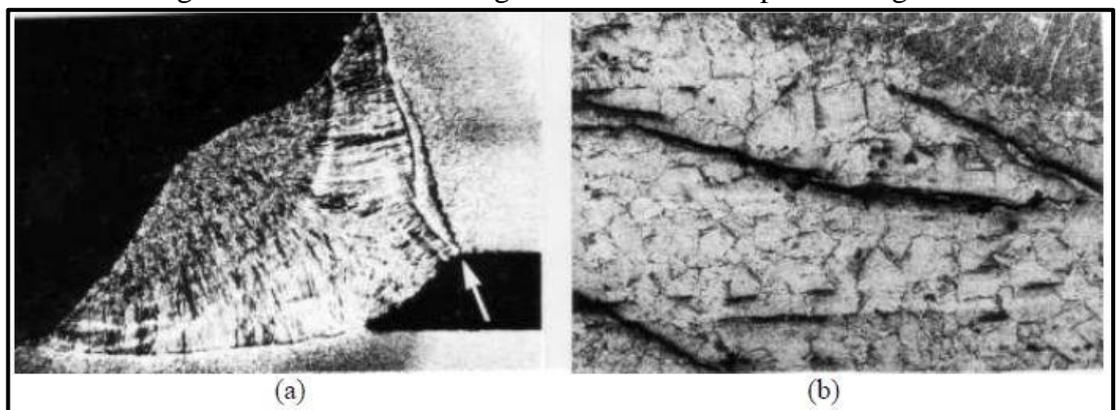
Em elevadas solicitações mecânicas, quando a ocorrência de trincas é facilitada pela intensidade da solicitação mecânica na região. Por exemplo em peças de maior espessura que

tem menos facilidade de se deformar ou em peças presas a dispositivos para diminuir o efeito de distorção.

E o fator da temperatura, a fissuração pelo hidrogênio ocorre a temperaturas de -100°C a 200°C . Então a manutenção da solda acima destas temperaturas faz com que o hidrogênio seja expulso da junta reduzindo as chances de se formar as trincas.

Na Figura 17(a) é apresentado uma macrografia de uma trinca pelo hidrogênio e na Figura 17(b) uma micrografia de uma trinca a frio obtido por microscopia ótica.

Figura 17 - Macro e Micrografia de uma trinca pelo hidrogênio



Fonte: Modenesi (2012)

2.3 RESISTÊNCIA DE JUNTAS SOLDADAS

A compatibilidade entre as propriedades do material e do eletrodo devem ser observadas assim como a habilidade do operador em executar a junta com os aspectos desejados. De preferência na hora de escolher um aço a ser soldado se seleciona aquele com que as propriedades atendam aos requisitos do projeto e que tenha boa soldabilidade resultando uma soldagem rápida e mais econômica.

Além da resistência do material podemos observar também a resistência do eletrodo. A Tabela 1 mostra as propriedades para diversos tipos de eletrodos. Quando soldar dois aços com diferentes propriedades, o resultado final das propriedades da junta será uma mistura desses dois aços junto com a propriedade desse material de solda.

Os valores das propriedades mecânicas dos eletrodos também podem variar de fabricante para fabricante. Assim pode ser necessário a consulta aos catálogos técnicos de cada um para obter eletrodos com as propriedades necessárias para determinadas aplicações. A nomenclatura conforme a Tabela 1 também pode variar dependendo de fabricante, mas em seus catálogos também vem as descrições para o entendimento e leitura.

Tabela 1 - Propriedades de eletrodos

Número de eletrodo AWS	Resistencia à Tração (Mpa)	Resistencia ao Escoamento (Mpa)	Elongação Percentual
E60xx	427	345	17-25
E70xx	482	393	22
E80xx	551	462	19
E90xx	620	531	14-17
E100xx	689	600	13-16
E120xx	827	737	14

Fonte: Adaptado de Shigley (2011)



O instituto Americano de Construção de Aço (AISC) publicou uma série de normas com recomendações para a construção civil com enfoque em juntas soldadas. A Tabela 2 abaixo indica tensões admissíveis para diferentes tipos de carregamentos aplicados em juntas soldadas. As tensões permissíveis são baseadas na resistência ao escoamento do material que em aços estruturais variam de 230 a 340 Mpa (SHIGLEY, 2011).

Tabela 2 - Tensões permitidas pela AISC para metais de solda

Tipo de Carregamento	Tipo de solda	Tensão permissível	Fator de segurança
Tração	Topo	0,60 S_y	1,67
Suporte	Topo	0,90 S_y	1,11
Flexão	Topo	0,60-0,66 S_y	1,52-1,67
Compressão Simples	Topo	0,60 S_y	1,67
Cisalhamento	Topo ou Filete	0,30 S_{ut}	

Fonte: Adaptado de Shigley (2011)

Com estes valores o projetista pode selecionar fatores de segurança e tensões permissíveis com maior confiança pois já foram estudados. Para estas tabelas as tensões permissíveis agora são baseadas na resistência ao escoamento do material e permite o uso de variedades de aços estruturais ASTM com resistências ao escoamento que variam de 230 a 340 MPa (Shigley, 2011). Para o cálculo dos fatores de segurança (n) é utilizado a teoria da energia de distorção como critério de falha.

O AISC também indica fatores de concentração de tensão apresentados na Tabela 3 para carregamentos com fadiga. Esses fatores devem ser utilizados para o metal original e para o metal de solda.

Tabela 3 - Tensões permitidas pela AISC para metais de solda

Tipo de Solda	K_{fs}
Solda de topo reforçada	1,2
Ponta de solda de filete transversal	1,5
Extremidade de solda paralela	2,7
Junção em topo-T com cantos aguçados	2,0

Fonte: Adaptado de Shigley (2011)



2.4 MÉTODOS COMPUTACIONAIS

Quando se trata de métodos computacionais para se calcular os esforços de uma estrutura pode ser utilizado o método dos elementos finitos. Dos quais existem vários softwares especializados para esta aplicação dentre eles por exemplo o ANSYS, Abaqus e SolidWorks. Estes softwares substituem muitas vezes ensaios destrutivos, economizando material, tempo de preparação e assim chegando à resultados finais da estrutura antecipadamente.

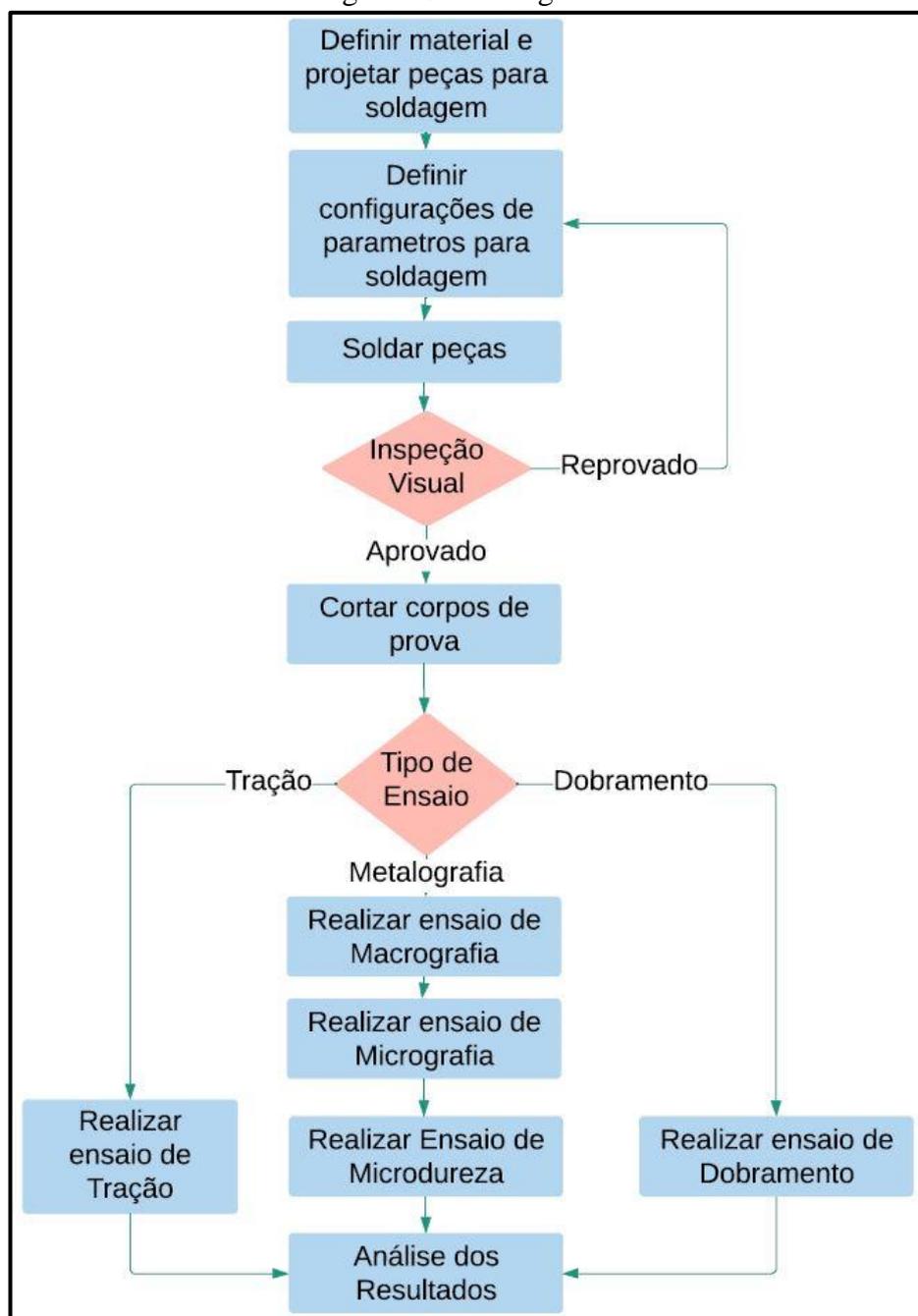
Utilizando-se de dados de entrada como propriedades dos materiais, cargas exercidas sobre o modelo, geometrias de fixações, pode-se gerar uma malha dentro desses softwares que farão uma análise e exibirão os resultados de acordo com as configurações pré-estabelecidas. Estas configurações e os dados de entrada podem ser bastante diversificados, tornando assim vantajoso o uso de método computacional para obter os resultados rapidamente.

Segundo Alves Filho (2012) os métodos analíticos utilizam de equações diferenciais e teorias específicas da resistência dos materiais para cálculos mais precisos de deslocamentos, tensões e deformações de estruturas. O MEF então realiza estes cálculos para qualquer situação cotidiana que possa ser mais complexa do que se utilizado um cálculo analítico.

3 MÉTODOS E MATERIAIS

O fluxograma representado na Figura 18 mostra a sequência de etapas que tiveram como função cumprir com o objetivo de compreender as propriedades mecânicas e metalográficas da junta soldada. Nele é descrito etapas como a seleção do material a ser soldado, parâmetros de soldagem do processo GMAW utilizados e os ensaios que foram realizados.

Figura 18 - Fluxograma



Fonte: O autor (2020)

3.1 MATERIAL

O material utilizado é o aço ao carbono SAE 1008 que é fornecido no formato de chapas de diversas espessuras. Para este estudo a fim de simular a soldagem de componentes referentes a suspensores pneumáticos é utilizado a espessura de 8 mm, espessura esta que engloba a grande maioria das peças soldadas. A tabela 4 apresenta a composição química deste material, estas informações são obtidas juntamente ao fornecedor que deve entregar um certificado de conformidade a cada lote de chapas entregues na empresa.

Tabela 4 - Composição Química da Matéria Prima

Material	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Al
SAE 1008	0,061	0,299	0,01	0,01	0,003	0,039

Fonte: Panatlântica Tubos (2020)

3.1.1 Projeto de peças para soldagem

As peças a serem soldadas foram cortadas por processo de oxicorte com dimensões que possam abranger as confecções dos corpos de prova para os ensaios conforme a norma ASME IX.

Dois tipos de juntas foram soldadas, junta de topo e em ângulo. As peças soldadas pela junta de topo foram utilizadas em ensaios de tração e de dobramento. As peças soldadas em junta em ângulo foram utilizadas para o ensaio metalográfico e ensaio de dobra do filete.

Figura 19 - Chapas soldadas em topo e em Ângulo



Fonte: O autor (2020)

3.2 PARÂMETROS DO PROCESSO

Com a finalidade de compreender como a escolha de parâmetros interfere nas propriedades mecânicas e metalúrgicas do material duas configurações diferentes de parâmetros foram utilizadas. Utilizando como referência a documentação interna da empresa o primeiro parâmetro foi utilizado para gerar uma alta energia de soldagem. O segundo parâmetro tem variações na tensão e na corrente utilizados a fim de reduzir a energia de soldagem e verificar quais efeitos causara nas propriedades da junta soldada.

Outros parâmetros como vazão do gás de proteção e distância do bico-peça não foram alterados para não aumentar o número de variáveis. Conforme o anexo D podemos conferir também que o consumível que foi utilizado é o ER 70S6 conforme a norma AWS com diâmetro da bitola de 1,2 mm e a mistura de gases utilizada é 82% Argônio 18% CO₂.

A tabela 5 apresenta as duas configurações juntamente com a energia de soldagem resultante da equação 2.

Tabela 5 - Parâmetros utilizados para soldagem dos corpos de prova

	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (mm/s)	Energia de Soldagem (J/mm)
Parâmetro 1	272	25	8,1	839,5
Parâmetro 2	184	18	6,4	517,5

Fonte: O autor (2020)

3.3 ENSAIOS

Após realizada a soldagem dos componentes foi feito uma verificação visual para conferir a existência de mordeduras, porosidade ou qualquer descontinuidade que possa ser identificada visualmente. Ocorrendo a existência de uma destas em grande quantidade é reavaliado os parâmetros e proposto novos parâmetros para a soldagem.

Para identificação dos materiais após soldados os códigos identificados nas peças tinham as letras iniciais AE (Alta Energia) para as peças soldadas com o parâmetro 1 e BE (Baixa Energia) para as peças soldadas com o parâmetro 2. As letras MP (Matéria prima) também foram utilizadas para identificar as peças da matéria prima que sofreram ensaio de tração.

3.3.1 Ensaio de Tração

Para as peças soldadas em junta de topo, após aprovadas pela inspeção visual foram confeccionados os corpos de prova com as dimensões conforme a norma ASME IX. Foram feitos 3 corpos de prova para o ensaio de tração para cada configuração de parâmetros.

A fim de obter as propriedades mecânicas originais do material para comparação, três corpos de prova foram confeccionados sem que haja ação da energia de soldagem.

A figura 20 exhibe o material cortado de cada configuração de parâmetros soldados à esquerda e os corpos de prova para tração usinados pelo Laboratório de Ensaio Mecânico da UCS à direita.

Figura 20 - Confeção dos Corpos de prova para Tração



Fonte: O autor (2020)

3.3.2 Ensaio de dobramento

Para o ensaio de dobramento, utilizando as mesmas peças soldadas em junta de topo, foram feitos 6 corpos de prova para cada configuração de parâmetros, 3 para dobramento de face e 3 para dobramento de raiz. Estas peças foram cortadas e confeccionadas dentro da empresa. Todas foram preparadas da mesma maneira, para identificação de qual lado era face

e raiz foi acrescentado as letras R para raiz e F para face junto aos códigos AE e BE descritos anteriormente.

Figura 21 - Corpos de prova de dobra (Alta Energia de Soldagem)



Fonte: O autor (2020)

Figura 22 - Corpos de prova de dobra (Baixa Energia de Soldagem)



Fonte: O autor (2020)

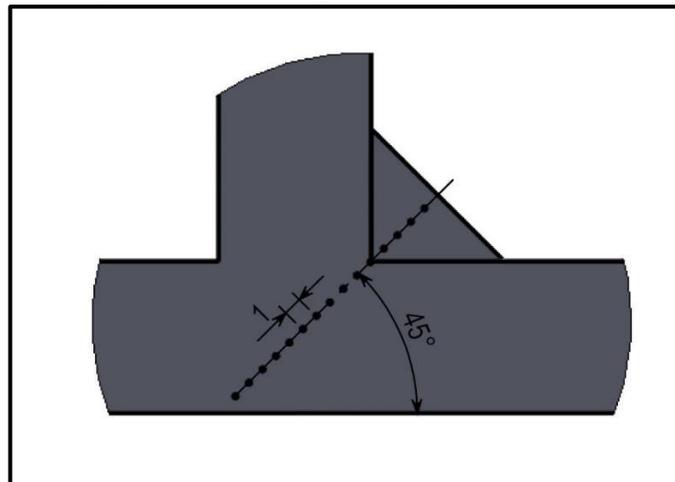
3.3.3 Ensaio de Metalografia

As peças soldadas em junta de ângulo foram utilizadas para realizar a metalografia. Foi confeccionado dois corpos de prova para cada configuração de parâmetros. No mesmo

corpo de prova pode ser realizado a análise da macrografia, micrografia e gradiente de durezas realizados nesta sequência dentro dos procedimentos do laboratório.

Com a finalidade de obter um gradiente de durezas que englobassem as três regiões do material soldado os pontos de medição foram definidos conforme a Figura 23.

Figura 23 - Pontos para medição de dureza



Fonte: O autor (2020)

3.3.4 Ensaio de dobra do Filete

O ensaio de dobra do filete foi realizado dentro da empresa juntamente com o ensaio de dobra de face e raiz. As peças soldadas em ângulo foram cortadas conforme a norma ASME IX. Foi desse corte que foi retirado o material para a realização dos ensaios metalográficos citado anteriormente.

Figura 24 - Corpo de prova para dobra de Filete

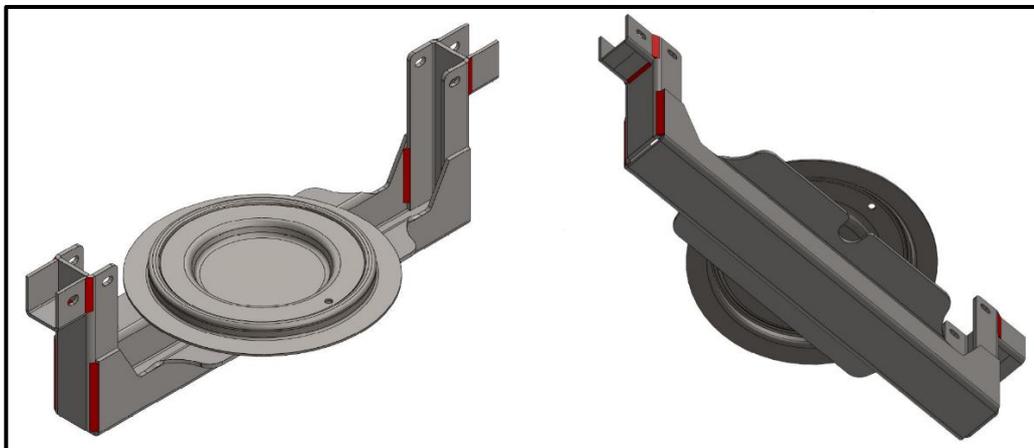


Fonte: O autor (2020)

3.4 SIMULAÇÃO DE TENSÕES NAS REGIÕES DAS JUNTAS SOLDADAS

Juntamente com os estudos das propriedades e da microestrutura será realizado a simulação das tensões nas regiões das juntas soldadas. Para esta simulação será utilizado um dos modelos de base para suspensor pneumático produzidos pela filial Ibral. O modelo é utilizado em implementos como os bitrens 3 eixos e o objetivo é verificar a magnitude das tensões nas regiões onde o conjunto é soldado. Na figura 25 temos o modelo da base e a região onde será dimensionado o cordão de solda está circulado em vermelho.

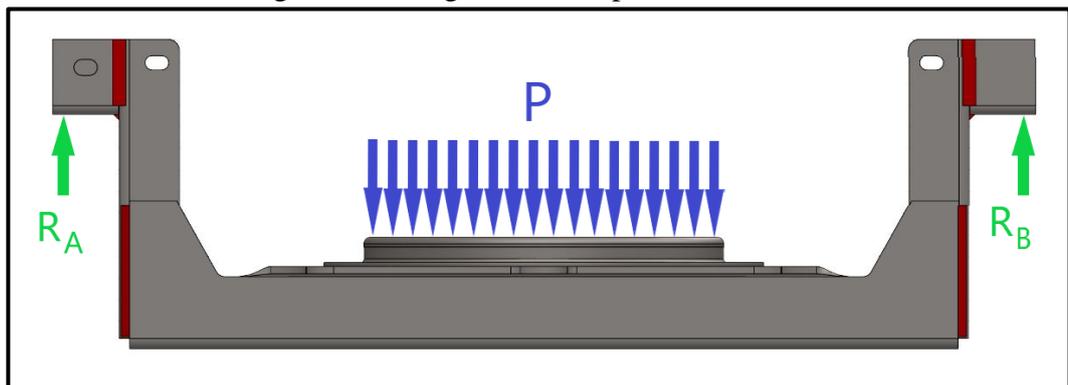
Figura 25 - Modelo para Estudo



Fonte: O autor (2020)

Um diagrama do corpo livre é apresentado na Figura 26 a seguir para representar as reações (R_A e R_B) de apoio no chassi do implemento e a carga P que é a pressão exercida pela mola pneumática, ainda as partes em vermelho é onde se localiza os cordões de solda e onde se localiza os pontos para verificar as tensões. Para simulação o valor da pressão utilizado será de 10 bar, valor este utilizado para testes dentro da empresa.

Figura 26 - Diagrama de corpo Livre da Base



Fonte: O autor (2020)

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados dentro do laboratório (ensaio de dureza, tração, macro e micrografia) e os ensaios de dobramento realizados na empresa Jarflex. Analisando e comparando estes resultados pode-se entender um pouco mais sobre o efeito dos parâmetros sobre a soldagem.

Os resultados da simulação dos esforços por MEF, é apresentado neste capítulo a fim de verificar se as propriedades do metal de solda para a soldagem atendem aos esforços.

4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

A tabela 6 apresenta os valores obtidos para o ensaio de tração da matéria prima e a média aritmética entre os resultados dos 3 corpos de prova.

Tabela 6 - Resultados do Ensaio de Tração da Matéria prima

CP	Força de Escoamento (kgf)	Tensão de Escoamento (Mpa)	Força Máxima (kgf)	Tensão Máxima (Mpa)
MPT1	3751	288	5076	389
MPT2	4056	311	5094	390
MPT3	3891	298	5105	391
Média	3899	299	5092	390

Fonte: O autor (2020)

A Figura 27 mostra os corpos de prova após o ensaio.

Figura 27 - Corpos de prova da matéria prima após ensaio de tração



Fonte: O autor (2020)

Na imagem pode se observar que houve a estrição e após a ruptura, característica de materiais dúcteis.

A Tabela 7 apresenta os resultados para o ensaio de tração para os corpos de prova soldados com os parâmetros de alta energia de soldagem.

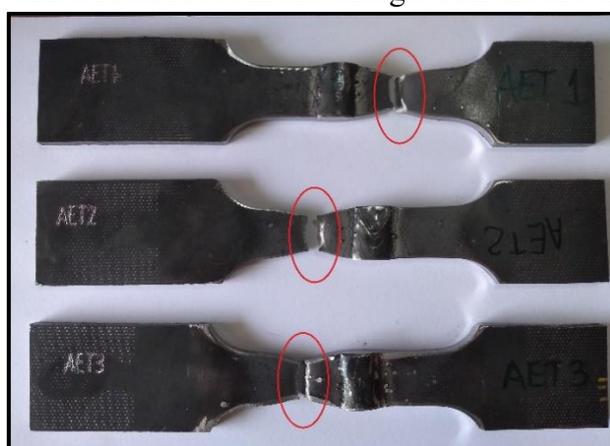
Tabela 7 - Resultados do ensaio de tração para soldagem com alta energia

CP	Força de Escoamento (kgf)	Tensão de Escoamento (Mpa)	Força Máxima (kgf)	Tensão Máxima (Mpa)
AET1	6410	310	8269	399
AET2	6425	310	8227	397
AET3	6342	306	8221	397
Média	6392	309	8239	398

Fonte: O autor (2020)

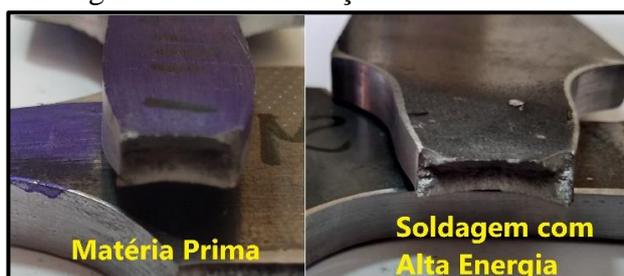
Na Figura 28 podemos observar que a fratura do corpo de prova ocorreu no metal base, o que é desejável pois não queremos que a fratura ocorra na solda.

Figura 28 - CP's soldados com alta energia com fratura em destaque



Fonte: O autor (2020)

Figura 29 - Semelhança entre as fraturas



Fonte: O autor (2020)

Na Figura 29 a imagem traz a semelhança entre a fratura do corpo de prova da matéria prima com o corpo de prova soldado à alta energia de soldagem. Isto comprova que a ruptura do corpo soldado realmente ocorreu no metal base. A diferença nas larguras dos corpos se deve ao fato de as dimensões para ensaio de tração nos corpos soldados serem diferentes do que materiais delgados.

A tabela 8 apresenta os resultados para o ensaio de tração para os corpos de prova soldados com os parâmetros de baixa energia de soldagem.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de tração para soldagem com baixa energia

CP	Força de escoamento (kgf)	Tensão de Escoamento (Mpa)	Força Máxima (kgf)	Tensão Máxima (Mpa)
BET1	6550	316	8170	394
BET2	6247	302	8183	395
BET3	--	--	7666	370
Média	6399	309	8006	386

Fonte: O autor (2020)

O corpo de prova BET3 não tem força de escoamento devido à não ocorrer estricção antes do rompimento do corpo de prova. A Figura 30 apresenta os corpos de prova soldados com baixa energia com indicação das regiões onde houve estricção e o material que não ocorreu a mesma.

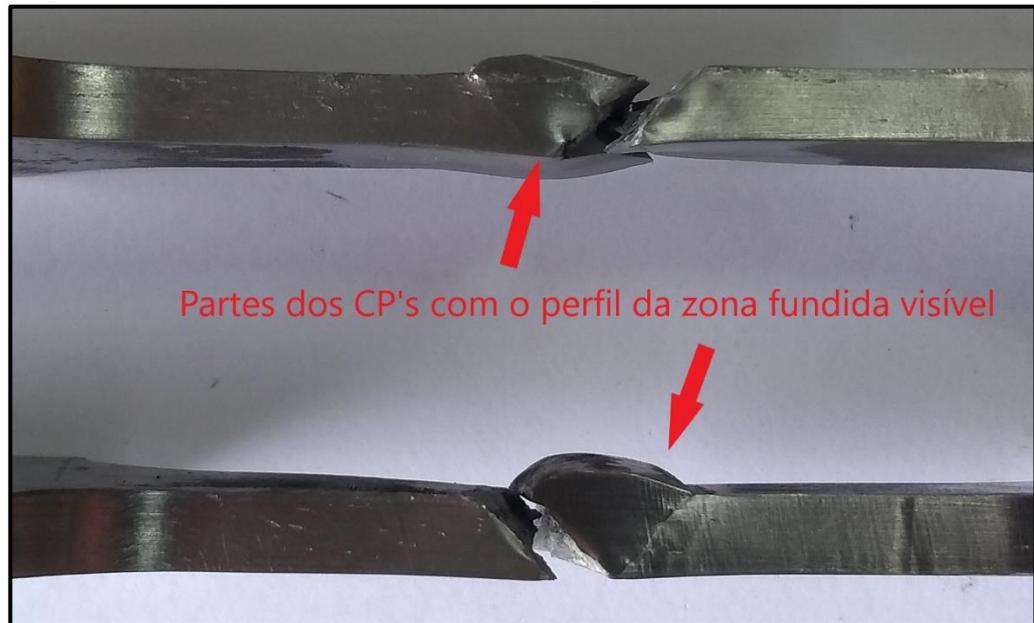
Figura 30 - CP's soldados com baixa energia com indicação das estricções



Fonte: O autor (2020)

Nos dois corpos de prova em que a fratura ocorreu na região da solda pode se perceber que ocorreu entre a zona fundida e a zona termicamente afetada pelo calor. O rompimento nessa região se deve pela falta de penetração da solda, uma das partes fica com o perfil inteiro da zona fundida como pode ser visto na Figura 31.

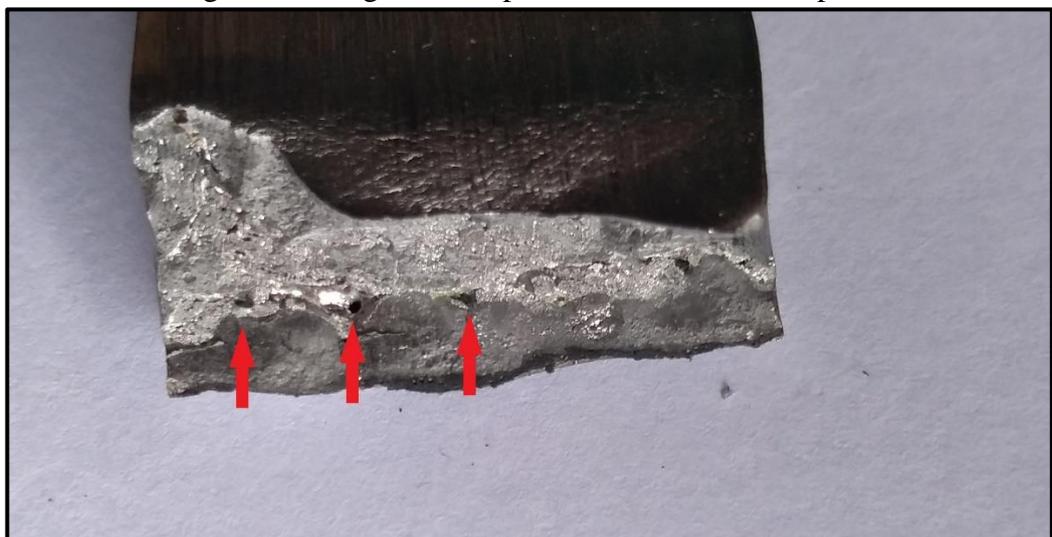
Figura 31 - Corpos soldados com baixa energia com fratura na região da solda



Fonte: O autor (2020)

Ainda no corpo de prova BET3 pode se observar na região fraturada a existência de pontos com porosidade conforme pode ser observado na Figura 32.

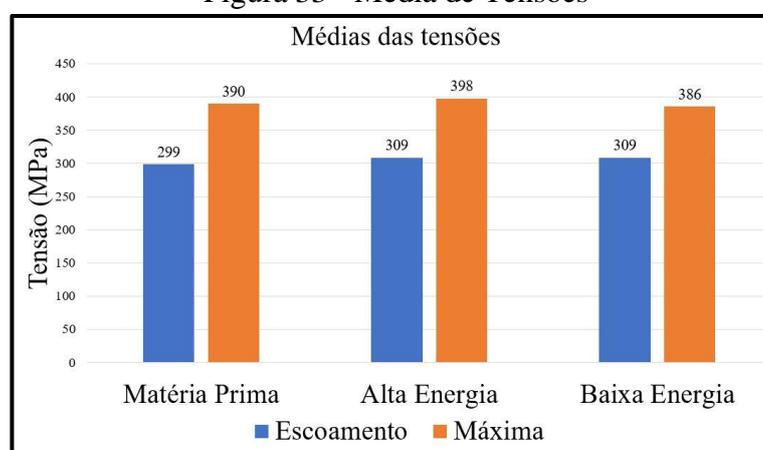
Figura 32 - Regiões com porosidade na área de ruptura



Fonte: O autor (2020)

Os ensaios de tração demonstraram que os resultados das tensões para a soldagem com alta energia apresentaram valores até superiores aos resultados da matéria prima. Para os corpos soldados com baixa energia apesar de apresentar tensões muito próximas ao da alta energia ocorreu fraturas na região da zona fundida, o que reprova a utilização destes parâmetros para soldagem. As médias das tensões são exibidas no gráfico da Figura 33 para uma melhor visualização. Segundo Norton (2013) quando soldamos materiais de propriedades diferentes o resultado é uma mescla das duas propriedades, o que podemos ver no resultado das tensões para peças soldadas com alta energia.

Figura 33 - Média de Tensões



Fonte: O autor (2020)

4.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Para a realização do ensaio de dobramento foi projetado uma ferramenta com dimensões conforme a norma ASME IX, o mesmo pode ser observado na Figura 34.

Figura 34 - Ferramenta para ensaio de dobramento



Fonte: O autor (2020)

O Quadro 2 apresenta os resultados dos corpos de prova ensaiados para as duas configurações de soldagem.

Novamente as letras AE significam alta energia de soldagem, BE para baixa energia de soldagem e F e R para dobramento de face e raiz respectivamente.

Quadro 2 - Resultados dos ensaios de dobramento

CP	Resultado do Ensaio
AER1	Não apresentou trincas ou fissuras
AER2	Não apresentou trincas ou fissuras
AER3	Apresentou trinca de 2 mm e 4,8 mm
AEF1	Não apresentou trincas ou fissuras
AEF2	Não apresentou trincas ou fissuras
AEF3	Apresentou Trincas
BER1	Apresentou trinca de 2mm
BER2	Rompeu
BER3	Rompeu
BEF1	Apresentou fissura
BEF2	Apresentou fissura
BEF3	Apresentou fissura

Fonte: O autor (2020)

A Figura 35 mostra os corpos ensaiados com o dobramento da raiz para alta energia de soldagem, conforme o quadro apenas um dos corpos apresentou as trincas mencionadas.

Figura 35 - Corpos de prova ensaio de dobramento na raiz (Alta Energia)



Fonte: O autor (2020)

As trincas encontradas no terceiro corpo de prova pode ser visto na Figura 36.

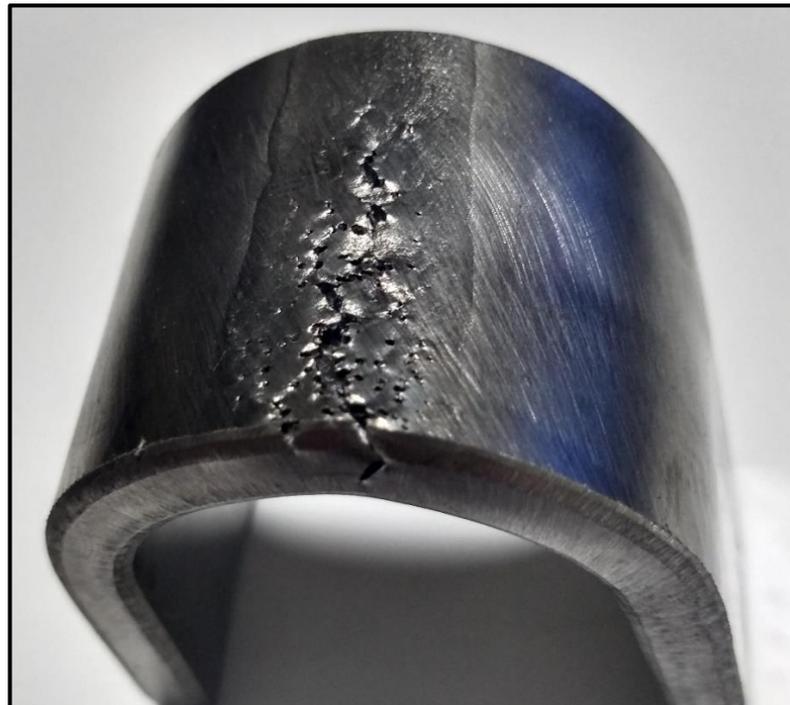
Figura 36 - Trincas do AER3



Fonte: O autor (2020)

Para o ensaio de dobramento de face para o mesmo parâmetro de soldagem nenhum dos corpos romperam, porém no terceiro corpo de prova apareceram diversas trincas devido á face apresentar vários defeitos de porosidade. Na Figura 37 pode se observar nitidamente os pontos onde estava a porosidade e o surgimento das trincas.

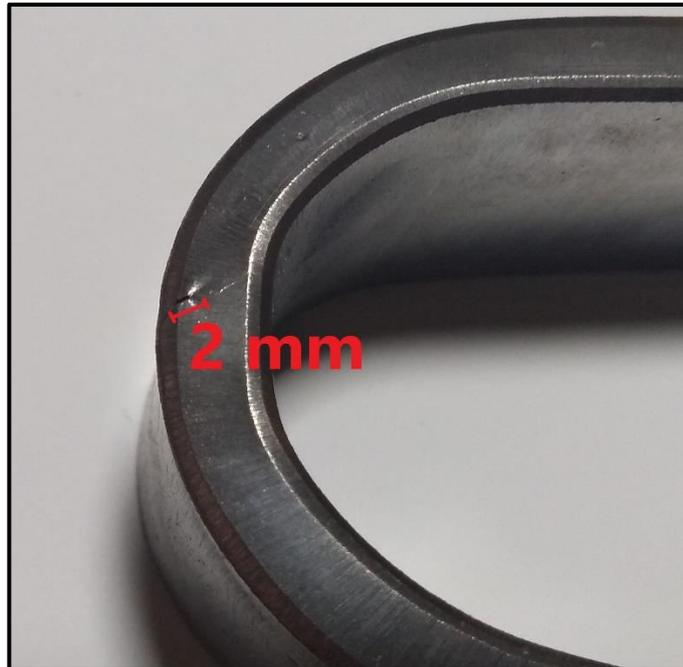
Figura 37 - Corpo de prova com trincas devido a porosidade



Fonte: O autor (2020)

Para os corpos de prova com parâmetros de soldagem de baixa energia, no dobramento de raiz apenas um corpo de prova não rompeu apresentando uma trinca de 2 mm como pode ser visto na Figura 38.

Figura 38 - Trinca no corpo de prova BER1



Fonte: O autor (2020)

Com o mesmo parâmetro de baixa energia, realizando o dobramento de face nos corpos de prova os mesmos apresentaram fissura. Em todos os casos o rompimento ocorre de maneira semelhante ao que ocorreu no ensaio de tração, podendo ser visto o perfil da zona fundida devido à pouca penetração do metal de solda. A Figura 39 mostra os três corpos com suas fissuras, no primeiro corpo da imagem pode-se ver claramente o rompimento no perfil da zona fundida.

Figura 39 - Corpos de prova ensaio de dobramento de face (Baixa Energia)



Fonte: O autor (2020)

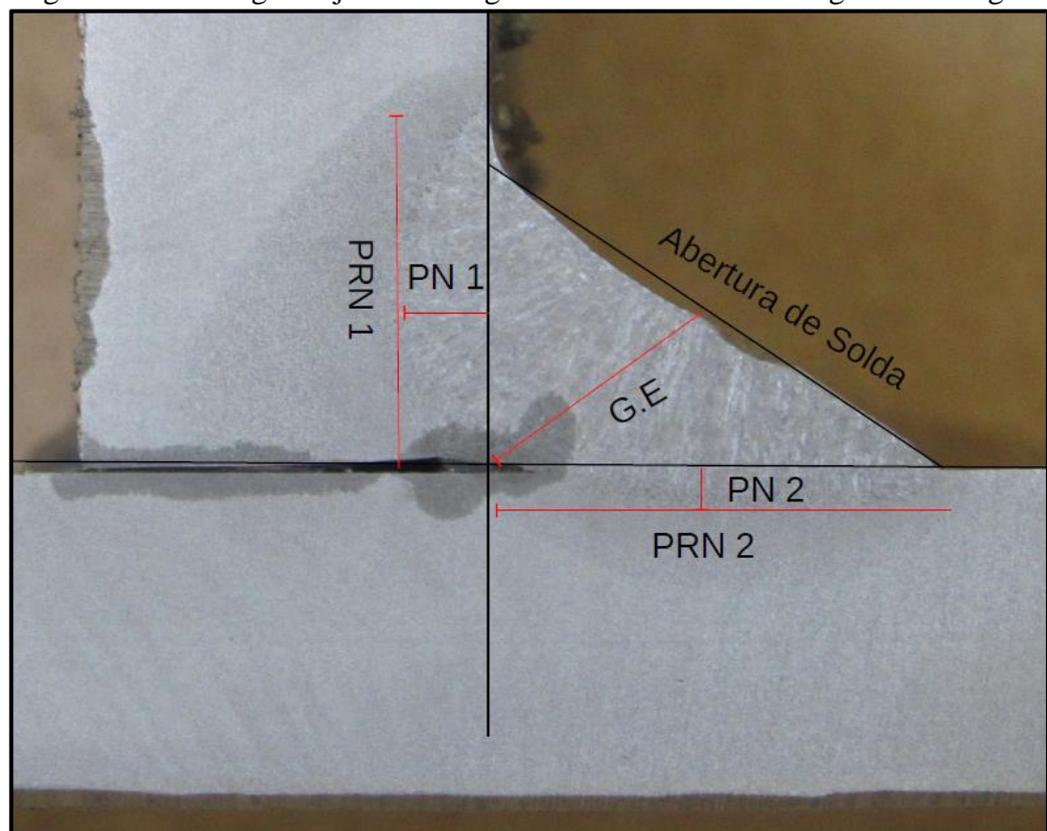
4.3 ENSAIOS DE METALOGRAFIA

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de metalografia realizados pelo LAMEC. Todos os ensaios foram realizados utilizando os procedimentos internos do laboratório.

4.3.1 Macrografia

A Figura 40 apresenta a macrografia para a junta em ângulo de 90° soldada com alta energia de soldagem. O significado das siglas e as medidas obtidas são apresentados na Tabela 9.

Figura 40 - Macrografia junta em ângulo de 90° com Alta Energia de Soldagem



Fonte: O autor (2020)

A diferença de simetria entre a perna vertical e horizontal se deve ao fato de a soldagem ser feita de forma manual, o que não garante que toda a extensão do cordão de solda tenha estas mesmas dimensões. Na perna 1 (PN1) apresentou-se uma maior penetração do que na perna (PN2), o que também pode ser devido ao modo como a solda manual foi realizada.

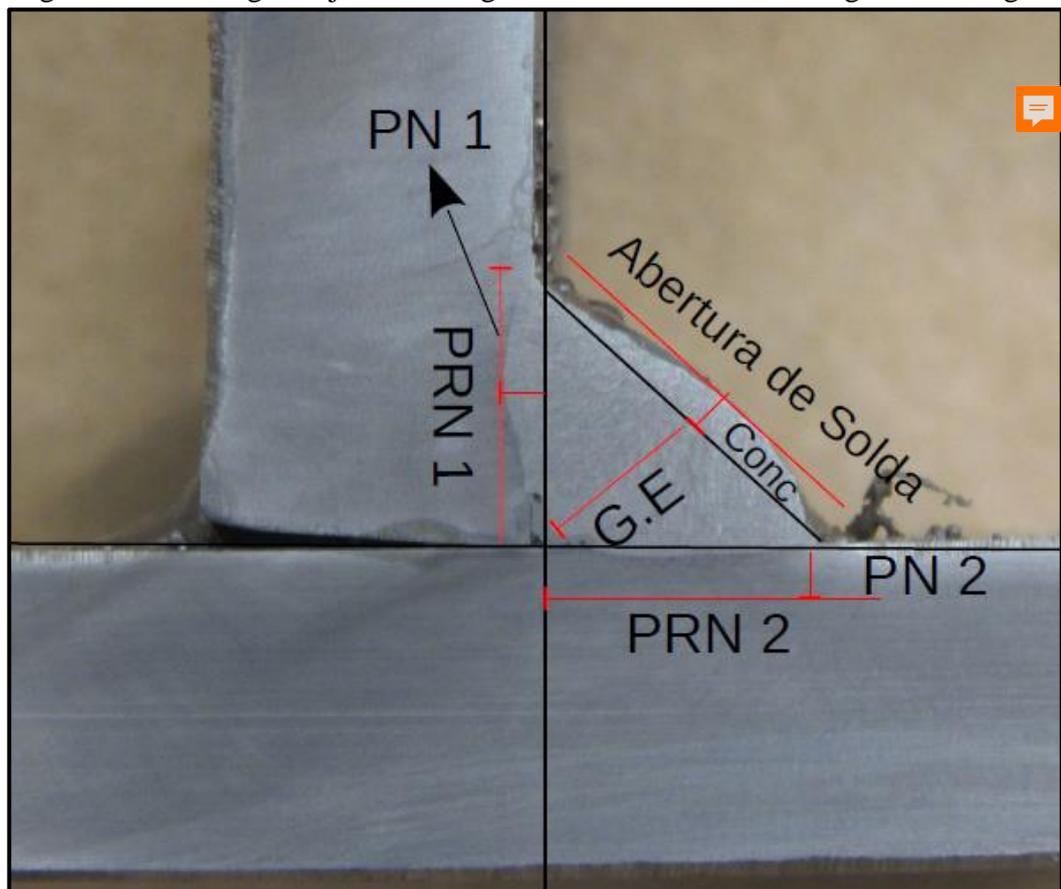
Tabela 9 - Informações Macrografia com Alta Energia de Soldagem

Penetração 1 (PN1)	2,0 mm
Penetração 2 (PN2)	0,8 mm
Perna 1 (PRN1)	8,2 mm
Perna 2 (PRN2)	9,4 mm
Abertura de Solda	12,1 mm
Garganta Efetiva (G.E)	5,6 mm

Fonte: O autor (2020)

A Figura 41 apresenta a macrografia para a junta em ângulo de 90° soldada com baixa energia de soldagem.

Figura 41 - Macrografia junta em ângulo de 90° com Baixa Energia de Soldagem



Fonte: O autor (2020)

As siglas tem o mesmo significado utilizados anteriormente e os valores são apresentados na Tabela 10.

Nota se uma menor penetração da solda, devido à utilização de parâmetros menores para a soldagem. Essa falta de penetração no caso das juntas de topo ocasionou a fratura bem na região de transição entre o metal fundido e a ZTA. A concavidade neste caso ocorre pois devido à não ocorrência de penetração o material vai se depositando na superfície.

Tabela 10 - Informações Macrografia com Baixa Energia de Soldagem

Penetração 1 (PN1)	0,7 mm
Penetração 2 (PN2)	0,2 mm
Perna 1 (PRN1)	6,5 mm
Perna 2 (PRN2)	6,4 mm
Abertura de Solda	9,2 mm
Garganta Efetiva (G.E)	5,1 mm

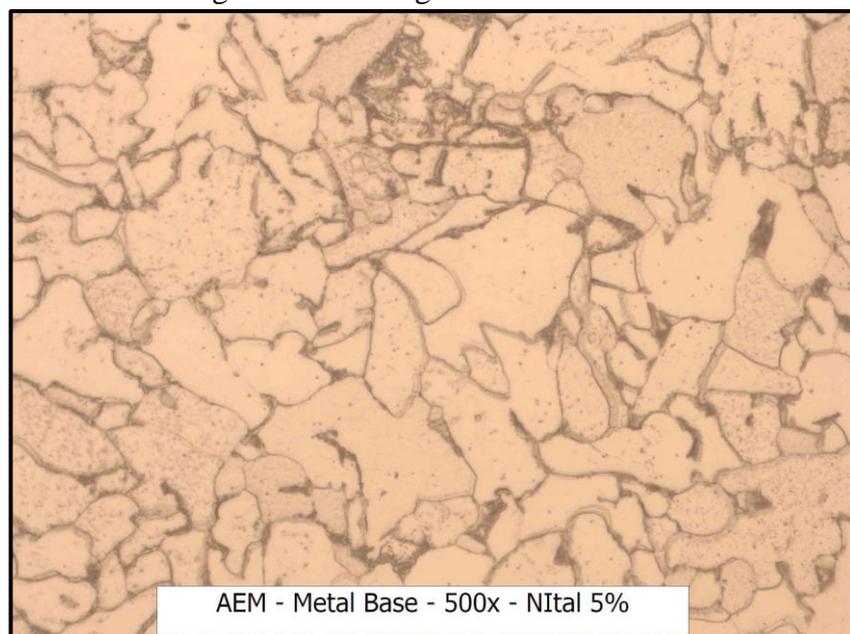
Fonte: O autor (2020)

4.3.2 Micrografia

4.3.2.1 Micrografia do Metal Base

Como material se trata de um aço carbono a estrutura predominantemente é formada por ferrita e grãos de perlita como visto na Figura 42.

Figura 42 - Micrografia do Metal Base



AEM - Metal Base - 500x - Nital 5%

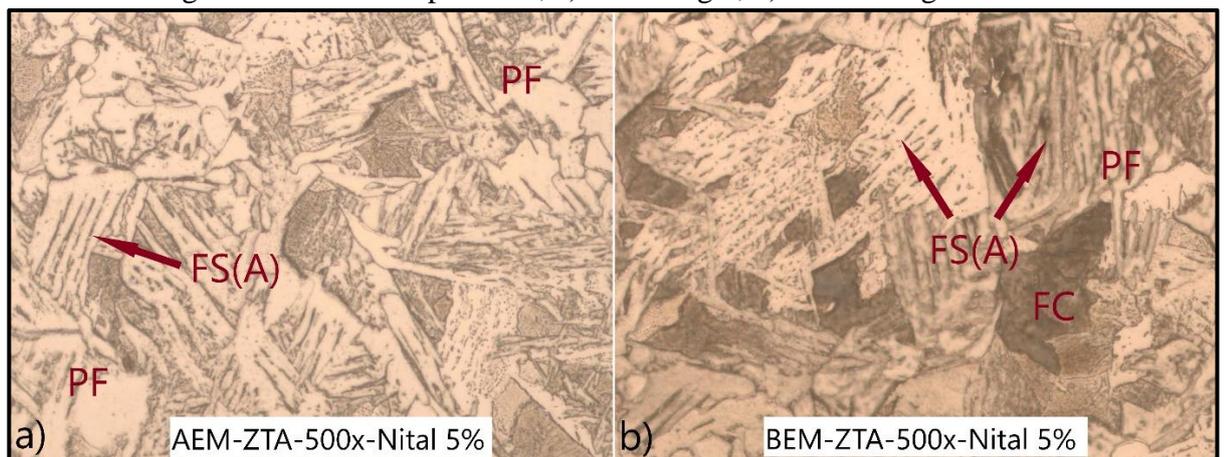
Fonte: O autor (2020)

Por se tratar de um aço com uma porcentagem baixa de carbono durante o ciclo térmico, quantidades menores de perlita são gerados. Ficando assim predominante os grãos de ferrita.

4.3.2.2 Micrografia da Zona Termicamente Afetada

Para os dois parâmetros de soldagem as zonas termicamente afetadas são bastante parecidas. A transformação conforme o ciclo térmico faz com que apareçam regiões com ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)). Para o parâmetro de baixa energia de soldagem, à direita na Figura 43, também pode se observar a existência de uma região com agregados de ferrita carbonetos (FC). Microestrutura esta comumente encontrada em microscopias de aços baixo carbono mas que não causa impacto nos resultados obtidos nos ensaios.

Figura 43 - Microscopia ZTA; a) alta energia, b) baixa energia

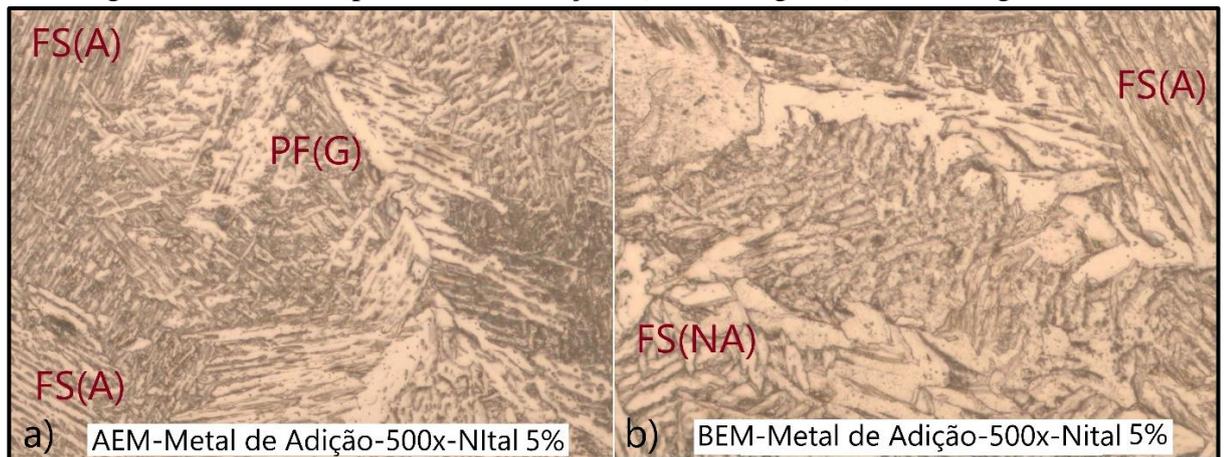


Fonte: O autor (2020)

4.3.2.3 Micrografia do Metal de Adição

Na micrografia do metal de adição pode se notar a diferença, conforme a Figura 44, da formação das microestruturas para os dois parâmetros. Na Figura 44(a) a estrutura da alta energia de soldagem apresenta a ferrita em sua segunda fase alinhada por grande parte da microscopia, isto ocorre devido ao ciclo térmico propiciar a formação desta microestrutura. Na Figura 44(b) a estrutura da baixa energia de soldagem devido à um ciclo térmico com temperaturas mais baixas, comparadas ao anterior, não proporcionou a transformação de alguns grãos de ferrita e em algumas partes a ferrita de segunda fase também não se alinhou.

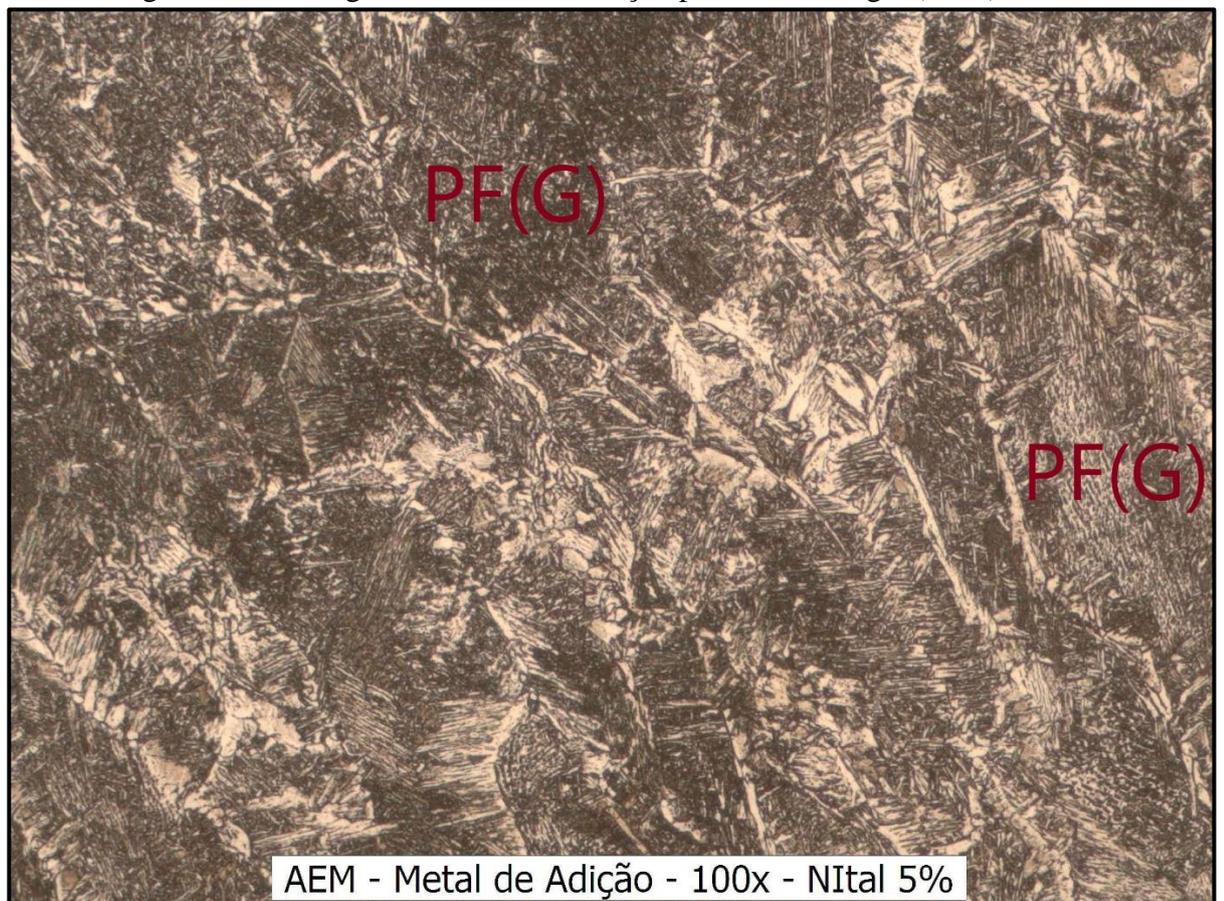
Figura 44 - Microscopia Metal de Adição; a) alta energia, b) baixa energia



Fonte: O autor (2020)

Observando a Figura 45 com zoom de 100x podemos observar melhor o formato da ferrita de contorno de grão, a figura refere-se a amostra soldada com alta energia de soldagem, mas o mesmo comportamento se apresenta na amostra de baixa energia.

Figura 45 - Micrografia do metal de adição para Alta Energia (100x)



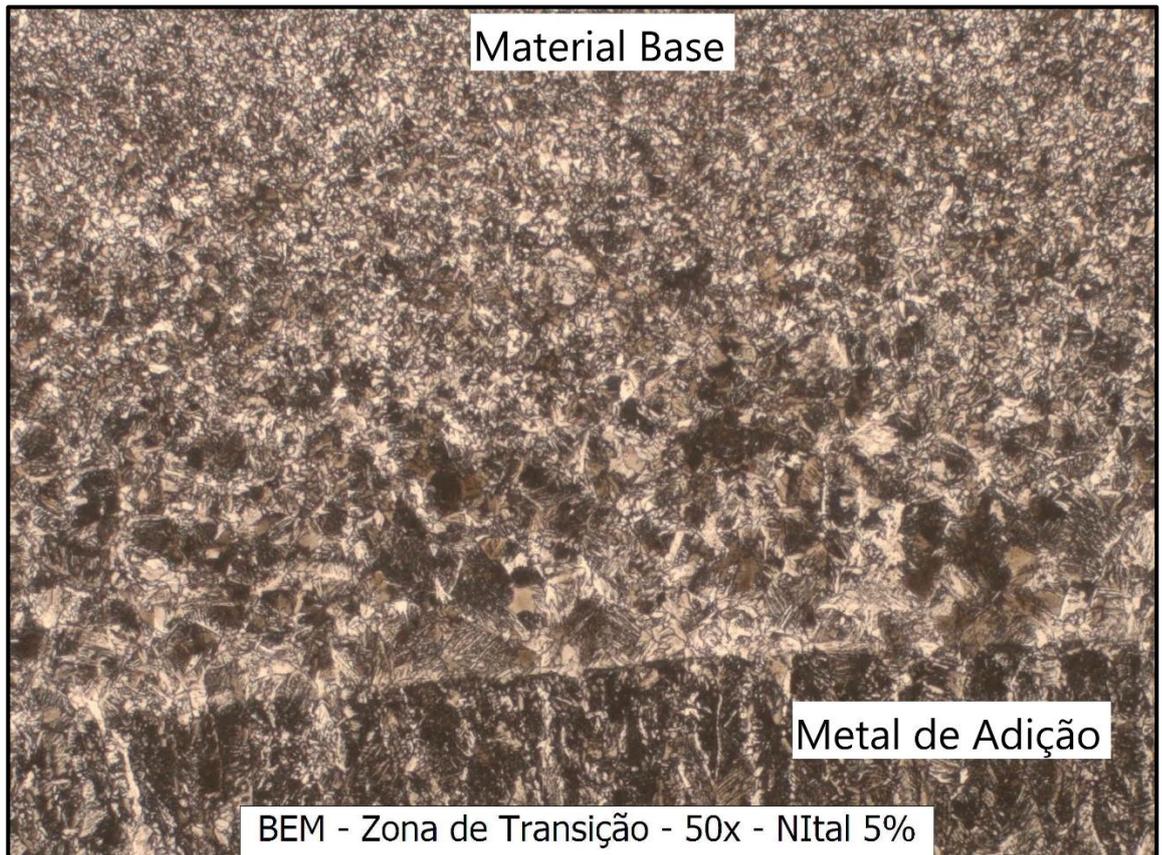
Fonte: O autor (2020)

Apesar das semelhanças entre as duas microestruturas dos parâmetros de soldagem, algumas diferenças existem. Como podemos observar na existência de agregados encontrados na estrutura com baixa energia de soldagem ou a falta de transformação das fases na mesma.

4.3.2.4 Micrografia da Área de Transição

Na Figura 46 podemos observar as transformações de fase desde o material base até o metal de adição. O tamanho de grãos do material aumenta conforme entra na ZTA devido ao ciclo térmico e a transformação das estruturas bem visível na transição para a zona fundida do metal de adição.

Figura 46 - Zona de Transição da Baixa Energia de Soldagem (50x)



Fonte: O autor (2020)

4.3.3 Gradiente de durezas

A Tabela 11 apresenta o gradiente de durezas medido nas juntas de 90° conforme a Figura 23. A tabela apresenta alguns pontos das três regiões da peça para comparação.

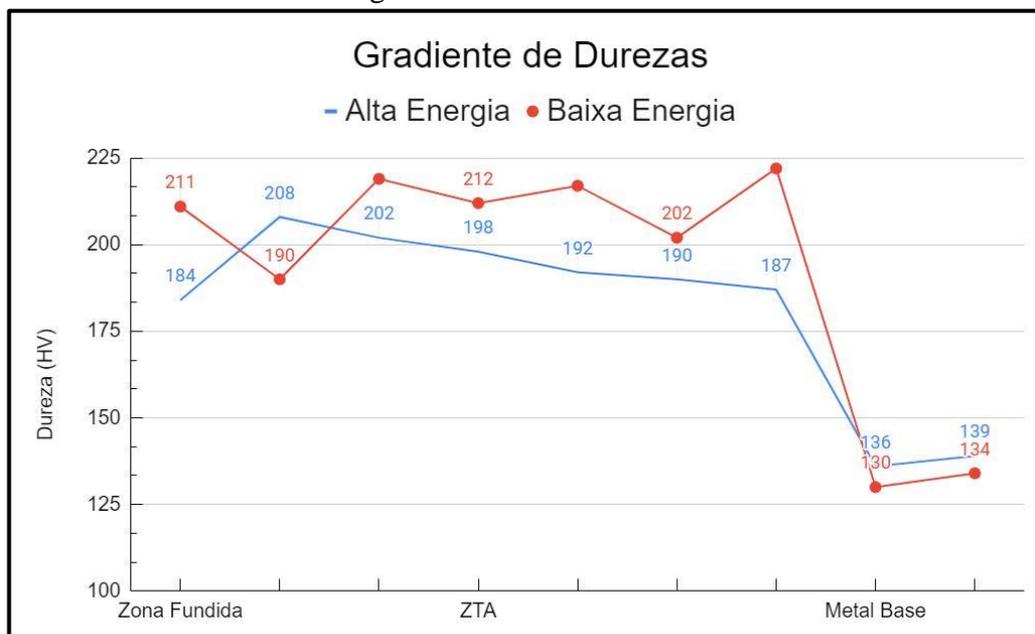
Tabela 11 - Gradiente de durezas

	Alta Energia		Baixa Energia	
	Ponto	Dureza (HV)	Ponto	Dureza (HV)
Zona Fundida	1	184	1	211
	2	208	2	190
	3	202	3	219
Zona Termicamente Afetada	4	198	4	212
	5	192	5	217
	6	190	6	202
	7	187	7	222
Metal Base	8	136	8	130
	9	139	9	134

Fonte: O autor (2020)

Podemos observar que a dureza no metal de adição não teve grandes variações para os dois parâmetros. Já para a zona termicamente afetada da soldagem com baixa energia apresentou valores maiores de dureza, essa diferença se deve ao ciclo térmico onde utilizando valores menores de energia o resfriamento ocorre mais rapidamente produzindo estruturas de maior dureza. O metal base não apresentou grandes diferenças por se tratar da mesma matéria prima. A Figura 47 traz um gráfico comparativo entre as duas soldagens.

Figura 47 - Gradiente de Durezas



Fonte: O autor (2020)

4.4 ENSAIO DE DOBRA DO FILETE

O ensaio de dobra de filete foi realizado em uma prensa hidráulica nas juntas soldadas em T. Ambas as peças foram cortadas nos comprimentos conforme descrito na Norma ASME IX e prensadas de forma que o ângulo onde tinha o cordão de solda sofresse compressão e o ensaio parasse assim que as duas chapas ficassem paralelas uma a outra.

A Figura 48 mostra a região de dentro do cordão da solda com baixa energia de soldagem. Informações como penetração, comprimento de perna já foram apresentados nos resultados da macrografia. Na imagem podemos evidenciar a falta de penetração na chapa superior observando que podemos traçar uma linha vermelha e acima dela não há metal de adição. Dentro do cordão existe um aspecto de rompimento no meio do cordão não formando assim uma região homogênea por toda a extensão do cordão.

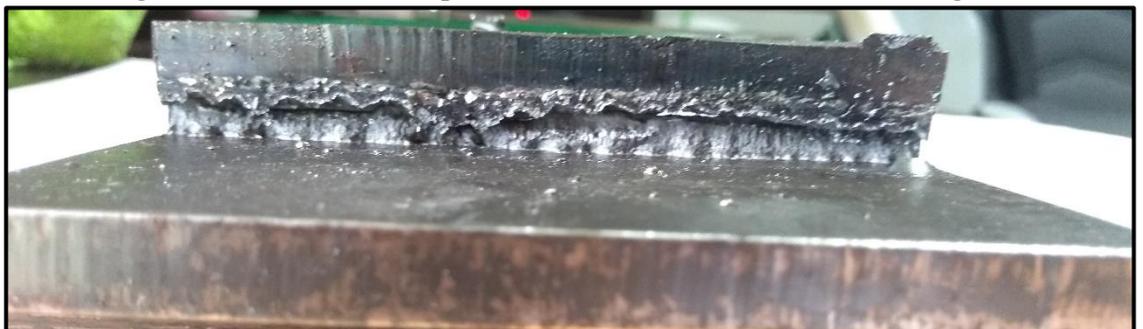
Figura 48 - Junta de 90° após ensaio de dobra de filete (Baixa Energia)



Fonte: O autor (2020)

A Figura 49 mostra a mesma região do ensaio para o corpo de prova soldado com alta energia. Neste caso podemos observar a diferença na profundidade de penetração do metal de adição, não sendo visível a aresta da chapa superior como no caso anterior. O decorrer do cordão também não apresenta descontinuidades, formando um material fundido mais homogêneo.

Figura 49 - Junta de 90° após ensaio de dobra de filete (Alta Energia)



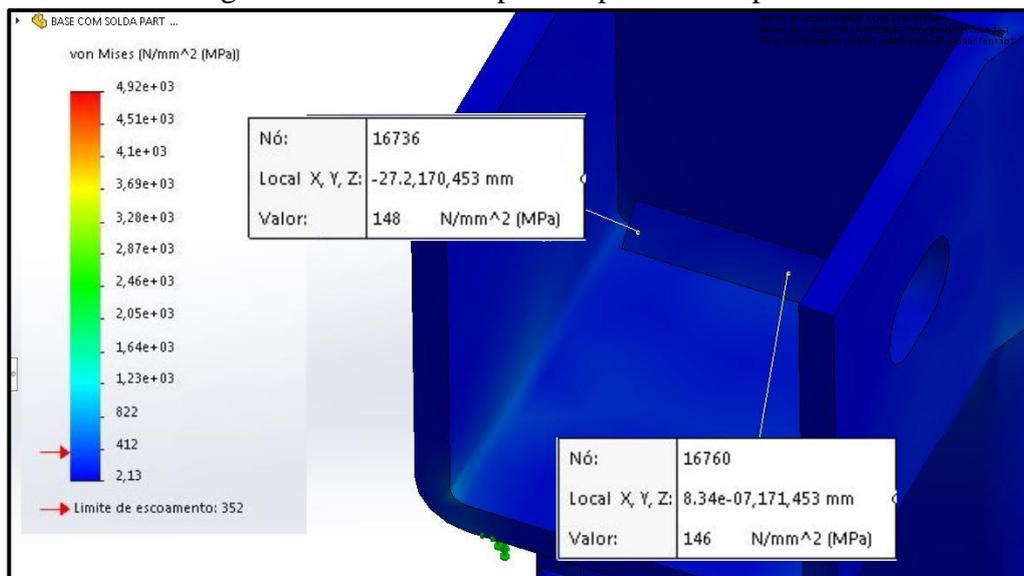
Fonte: O autor (2020)

4.5 RESULTADO DA SIMULAÇÃO

A simulação foi realizada no software *SolidWorks*. Os esforços e a pressão foram aplicados conforme o DCL da Figura 26. A seguir as imagens exibem os resultados nas regiões dos cordões de solda. O limite de escoamento utilizado para o modelo no todo foi de 352 MPa conforme biblioteca de materiais do próprio software e simplificação para gerar a simulação. O limite de escoamento do metal de adição utilizado é de 393 MPa conforme bibliografia, podendo variar conforme o fabricante.

A Figura 50 mostra os valores para as tensões na solda da parte superior da base. Comparando os resultados com os Limites de Escoamento dos materiais, este cordão está de acordo com os limites de escoamentos dos dois materiais por apresentar tensões de 148 MPa e 146 MPa.

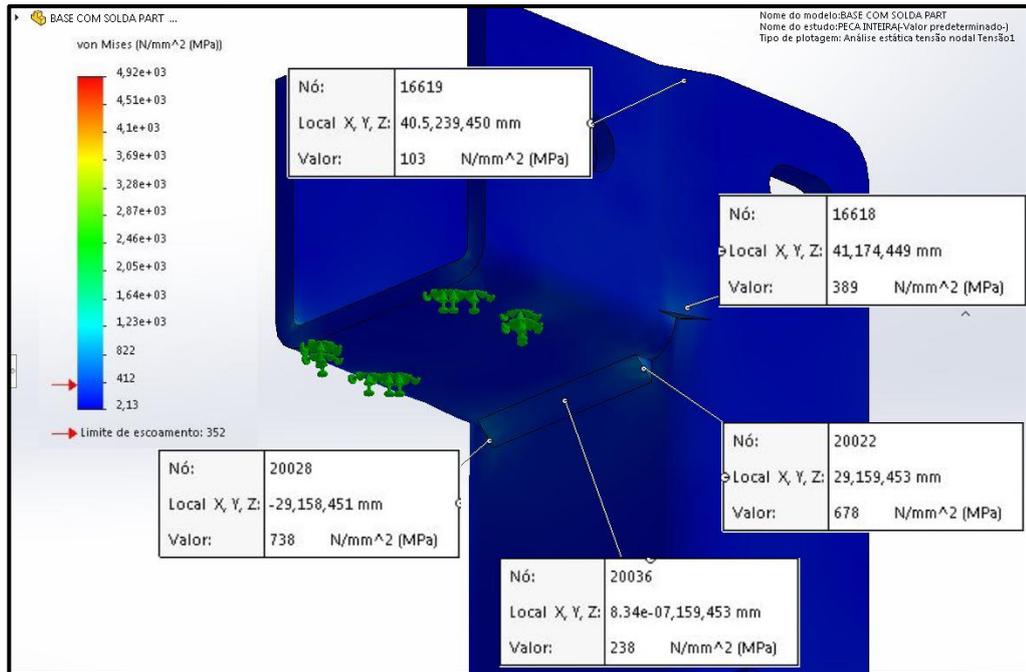
Figura 50 - Tensões na parte superior do suporte da base



Fonte: O autor (2020)

A Figura 51 apresenta as tensões na parte inferior do suporte da base. Valores elevados foram encontrados próximo das dobras das peças, tensões na faixa dos 678 a 738 MPa, isto pode ser um caso específico do modelo por estar próximo à um canto e ser um acumulador de tensões. A solda nesta região também foi simplificada nesta região. Na pratica o cordão é contínuo por todo o contorno da peça em U, o que reduziria o acúmulo de tensões naqueles pontos. Os demais valores se encontram na faixa dos 103 MPa bem no topo da coluna, 389 MPa na lateral da coluna perto do outro cordão com acúmulo de tensão e 238 MPa no meio do cordão inferior.

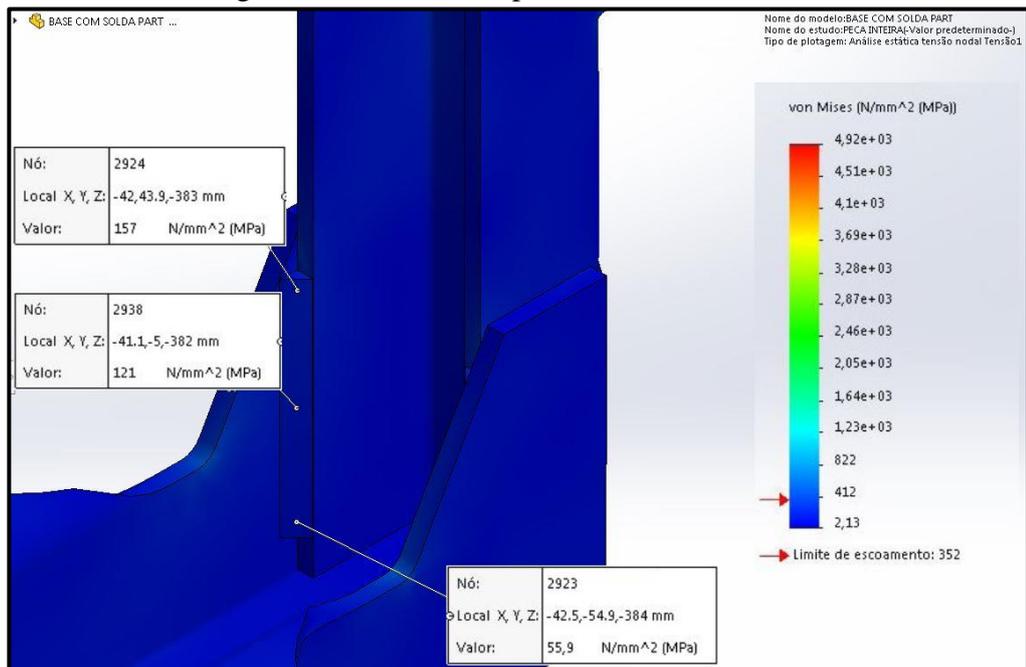
Figura 51 - Tensões na parte inferior do suporte da base



Fonte: O autor (2020)

A Figura 52 apresenta os resultados para as tensões no cordão de solda no interior do chassi. Os valores variados em três pontos diferentes (157 MPa, 121 MPa e 55,9 MPa de cima para baixo na imagem) demonstram a ação de um momento fletor sobre a base.

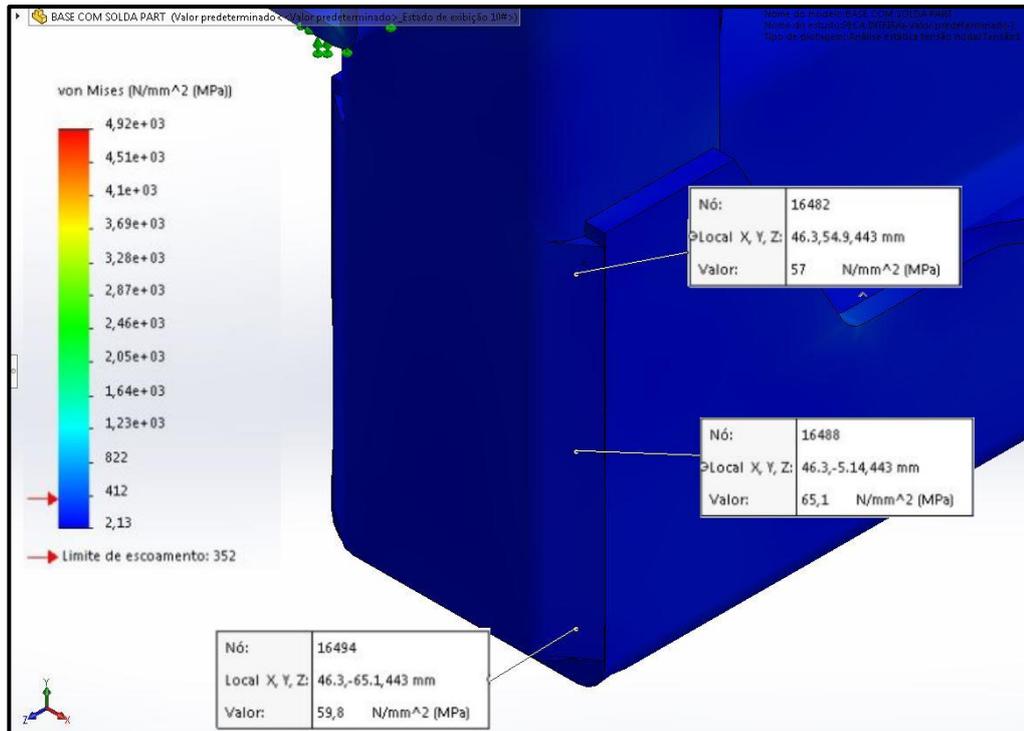
Figura 52 - Tensões na parte da solda interna do chassi



Fonte: O autor (2020)

A Figura 53 traz os valores de tensão sobre a solda na extremidade do chassi. Embora esteja na extremidade do conjunto os valores de tensão são menores do que a região anterior, isto significa que as forças exercidas no centro da base são absorvidas primeiramente pela solda na região interna.

Figura 53 - Tensões na parte da solda da extremidade entre chassi e coluna



Fonte: O autor (2020)

De um modo geral de acordo com a simulação a matéria prima e o metal de adição utilizados atendem aos esforços da aplicação.

5 CONCLUSÃO

O acompanhamento de cada etapa deste trabalho proporcionou um conhecimento melhor da soldagem do ponto de vista prático, como verificar o método usado e as diferenças utilizando cada parâmetro, até a realização de ensaios que podem ser utilizados para a qualificação da soldagem e ensaios para conferir propriedades adquiridas pelo processo.

De acordo com os ensaios de tração, os corpos soldados apresentaram tensão de escoamento maior que a matéria prima e o corpo soldado com alta energia também apresentou a maior tensão máxima.

Os corpos de soldagem com alta energia também apresentaram estricção antes do rompimento para todos os corpos enquanto os soldados com baixa energia romperam na transição da ZTA com a zona fundida o que não é desejável.

Nos ensaios de dobramento podemos observar que os corpos de alta energia não romperam com os ensaios, apresentando trincas em apenas uma das amostras. Os corpos soldado com baixa energia apenas um não rompeu apresentando pequena trinca. O rompimento dos demais corpos novamente ocorreu entre a transição da ZTA e a zona fundida.

Observando a macrografia das juntas em ângulo de 90° pudemos observar que a soldagem com alta energia teve mais penetração que a soldagem de baixa energia, assim podemos concluir que as falhas nos ensaios anteriores se devem a esta falta de penetração.

Realizando o ensaio da dobra do filete podemos evidenciar a falta de penetração na soldagem de baixa energia pela visualização da aresta da chapa que não foi fundida com o metal de adição.

Na micrografia as duas microestruturas das soldagens foram bastante similares com alguma diferença no metal de adição onde na baixa energia apresentou um alinhamento diferente das estruturas de ferrita.

O gradiente de durezas apresentou valores de dureza maiores na ZTA da soldagem com baixa energia de soldagem. Materiais mais duros se tornam mais frágeis, para algumas aplicações isto não é desejável.

O último estudo realizado foi a simulação computacional das tensões em um implemento rodoviário. Os resultados apresentaram tensões que são compatíveis com o metal de adição e matéria prima utilizado na aplicação.

Com os resultados obtidos nos ensaios realizados para comparar os dois parâmetros de soldagem a fim de ajustar os parâmetros para soldagem pudemos verificar que valores mais

baixos de parâmetros implicam em menores penetrações da solda no material e a existência de descontinuidades que como visto nos ensaios levam a fratura das peças.

Embora a diminuição de parâmetros implicaria na diminuição de energia e custos não pode se realizar esta escolha e reduzir a qualidade e segurança dos componentes soldados.

BIBLIOGRAFIAS

ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2012.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook: Materials and applications**, part 1. 9. ed. Miami, 2011. v. 4. ISBN 978-0-87171-759-7.

ARRUDA, Nicollas Freitas de et al. **Influência do Regime Transiente Sobre a Microdureza e Microestrutura nos Aços ASTM-A36 e SAE-1045 Soldados pelo Processo MAG**. Soldag. insp., São Paulo, v. 24, e2414, 2019. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242019000100212&lng=en&nrm=iso. Acessado em 20 de maio de 2020.

BRAHIM, Izzatul Aini *et al.* **The Effect of Gas Metal Arc Welding (GMAW) processes on different welding parameters**. International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors 2012 (IRIS 2012) , [S. l.], p. 1502-1506, 26 maio 2020.

BUDYNAS, Richard G. **Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011

DEMARQUE, Rudineli et al. **Estudo Numérico e Experimental da Evolução Microestrutural e das Propriedades de Juntas Soldadas de Vergalhões pelo Processo GMAW**. Soldag. insp., São Paulo, v. 20, n. 4, p. 434-445, Dec. 2015. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242015000400434&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 26 de maio de 2020.

G.F. Sun, S. Yao, Z.D. Wang, X.T. Shen, Y. Yan, R. Zhou, Z.H. Ni. (2018) **Microstructure and mechanical properties of HSLA-100 steel repaired by laser metal deposition**. *Surface and Coatings Technology* 351, pages 198-211.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2. ed. New Jersey: Editora John Wiley & Sons, 2003.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem & técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: Ed. do Autor, 1996. x, 477 p.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. atual. Belo Horizonte: UFMG, 2009. 362 p. (Didática)

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Departamento de Engenharia Metalúrgica – UFMG, Belo Horizonte, jan. 2012.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos aços transformáveis**. Departamento de Engenharia Metalúrgica – UFMG, Belo Horizonte, abr. 2012.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. ISBN 978-85-8260-023-8.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME IX:** Welding and Brazing Qualifications, 2007.

WAINER, E.; BRANDI, Sérgio D.; MELLO, F. D. H. de. **Soldagem:** processos e metalurgia. São Paulo: E. Blücher, 1992.