



CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PRÉ-
AQUECIMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO
SAE 1045, SOLDADO PELO PROCESSO MIG/MAG**

Diego Azzolini

Lajeado, junho de 2017

Diego Azzolini

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PRÉ-
AQUECIMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO
SAE 1045, SOLDADO PELO PROCESSO MIG/MAG**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão do Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Cristian Pohl Meinhardt

Lajeado, junho de 2017

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais, minha irmã e minha namorada, Darci Pedro Azzolini, Luiza Lurdes Fusiger Azzolini, Maiara Azzolini e Vanessa Tatiana Markus pelo apoio e o grande incentivo, os quais nunca mediram esforços para que eu realizasse esse sonho.

Ao meu orientador Cristian Pohl Meinhardt, pelos ensinamentos, paciência e colaboração.

RESUMO

Atualmente a soldagem dos aços de baixo e médio carbono está literalmente difundida nas indústrias do setor metal-mecânico. Para os aços classificados como médio carbono (0,3% a 0,6%), muitas vezes, é necessário realizar algum processo térmico antes ou após a soldagem para evitar defeitos, como no caso de trincas induzidas por microestruturas frágeis. Assim este trabalho apresenta a soldagem MIG/MAG do aço SAE 1045, utilizando o processo de pré-aquecimento antes da soldagem. Este se enquadra na faixa dos aços de médio carbono, conforme classificação da norma SAE, podendo possuir entre 0,43% a 0,50% de carbono no material. Na análise comparativa entre os processos, observou-se que o uso do pré-aquecimento influencia positivamente na penetração da solda. Tal como, a tenacidade e ductibilidade da junta soldada tiveram um sensível aumento, por ter ocorrido uma taxa de extração de calor menor, influenciando no aumento do tamanho de grão na ZTA. Para análise comparativa, foram realizados ensaios de tração, ensaios de impacto Charpy-V, ensaios de dobramento, microdureza, além do ensaio metalográfico com objetivo de analisar a influência do pré-aquecimento nas principais propriedades mecânicas e metalúrgicas de uma junta soldada do aço SAE 1045.

Palavras-chave: Soldagem MIG/MAG. Pré-aquecimento. Aço SAE 1045.

ABSTRACT

Currently the welding steels of low and medium carbon is literally widespread in the industries of the metal-mechanic sector. For steels classified as medium carbon (0.3% to 0.6%), oftentimes, it is necessary to defeat some thermal process before or after welding to avoid problems in the welding, as in the case of cracks induced by fragile microstructures. This work presents the MIG / MAG welding of SAE 1045 steel, using the preheating process before welding. This is the range of medium carbon steels, according to SAE classification, and may have between 0.43% and 0.50% carbon in the material. In the comparative analysis between the processes, it was observed that the use of the preheating influences positively the penetration of the weld. As the toughness and ductility of the welded joint had a significant increase, due to a lower heat extraction rate, influencing the increase of the grain size in the ZTA. For the comparative analysis, tensile tests, Charpy-V impact tests, folding tests, microhardness, of the metallographic test will be carried out to analyze the influence of preheating on the main mechanical and metallurgical properties of SAE 1045 steel welded joints.

Keywords: MIG / MAG welding. Preheating. SAE 1045 steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicações do processo de soldagem	13
Figura 2 – Componente de grandes dimensões manufaturado utilizando soldagem de SAE 1045	16
Figura 3 – Em (a) é observado a macrografia da junta soldada do componente da Figura 2 e em (b) uma imagem de microscópio ótico mostrando trinca na ZTA.....	16
Figura 4 – Esquema soldagem MIG/MAG.....	19
Figura 5 – Equipamento básico de soldagem MIG / MAG	20
Figura 6 – Esquema alimentador de arame-eletrodo para soldagem MIG/MAG.....	21
Figura 7 – Esquema de uma tocha para soldagem MIG/MAG	22
Figura 8 – Trator soldagem MIG/MAG	23
Figura 9 – Nomenclatura do arame-eletrodo.....	27
Figura 10 – Composição química de alguns arames-eletrodo (% peso)	28
Figura 11 – Conceito aporte térmico	31
Figura 12 – Eficiência processos de soldagem	32
Figura 13 – Partes do processo de solda	32
Figura 14 – Regiões de uma junta soldada.....	33
Figura 15 – Regiões de uma junta soldada.....	34
Figura 16 – Esquema das alterações microestruturais em função da velocidade de resfriamento	36

Figura 17 – Microestrutura do aço SAE 1045 normalizado	39
Figura 18 – Fatores de influência a soldabilidade	40
Figura 19 – Desenho esquemático de uma máquina universal de ensaios	41
Figura 20 – Desenho esquemático de corpo de prova.....	41
Figura 21 – Desenho esquemático ensaio Charpy.....	42
Figura 22 – Corpo de prova Charpy conforme norma ASTM E23.....	43
Figura 23 – Dispositivo para ensaio de dobramento	44
Figura 24 – Fluxograma da metodologia.....	45
Figura 25 – Equipamentos de soldagem.....	47
Figura 26 – Junta de chanfro em V com reforço	48
Figura 27 – Usinagem da junta de chanfro em V	48
Figura 28 – Forno JUNG modelo 96120	49
Figura 29 – Temperatura de pré-aquecimento.....	50
Figura 30 – Dispositivo de fixação.....	51
Figura 31 – Principais parâmetros de soldagem	52
Figura 32 – Dimensões das juntas.....	53
Figura 33 – Definição de parâmetros (soldas 1 e 2).....	53
Figura 34 – Definição de parâmetros (solda 4 e 5)	54
Figura 35 – Definição de parâmetros (soldas 6 e 7).....	54
Figura 36 – Chapas SAE 1045 soldada	55
Figura 37 – Remoção reforço do cordão de solda	56
Figura 38 – Disposição dos corpos de prova	56
Figura 39 – Posicionamento do entalhe no ensaio de Charpy V na ZTA	57
Figura 40 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração.....	57
Figura 41 – Máquina universal de tração Pantec, modelo VERSAT	58
Figura 42 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de dobramento.....	59
Figura 43 – Projetor de perfil Pantec, modelo PPV-3025-15D	59

Figura 44 – Dispositivo de dobramento de raiz	60
Figura 45 – Dimensões do corpo de prova para ensaio Charpy-V	60
Figura 46 – Disposição análise microdureza.....	62
Figura 47 – Macrografia das juntas soldadas (a) com pré-aquecimento (b) sem pré-aquecimento	63
Figura 48 – Micrografia metal de solda: (a-b) com pré-aquecimento e (c-d) sem pré-aquecimento	64
Figura 49 – Micrografia ZTA: (a-b) com pré-aquecimento e (c-d) sem pré-aquecimento	65
Figura 50 – Micrografia metal base	65
Figura 51 – Micrografia das transições entre regiões da junta soldada: (a-b) com pré-aquecimento e (c-d) sem pré-aquecimento	66
Figura 52 – Ensaio de tração, falha nos CP3 no cordão de solda.....	68
Figura 53 – Fratura e alongamento do metal base: (1-2) longitudinal (3-4) transversal a solda	70
Figura 54 – Indicação e aspecto das rupturas das juntas soldadas no ensaio de tração.....	70
Figura 55 – Desclassificam do CP1 da junta soldada com pré-aquecimento, devido falha de penetração da solda.....	74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1– Microdureza das juntas com pré-aquecimento e sem pré-aquecimento..	67
Gráfico 2 – Média das propriedades mecânicas do metal base e da junta soldada..	69
Gráfico 3 – Comparativo entre as médias do ensaio de Charpy	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedade química dos gases de proteção	25
Tabela 2 – Gases e misturas utilizados na soldagem MIG/MAG	26
Tabela 3 – Temperatura de pré-aquecimento recomendada x C_{eq}	30
Tabela 4 – Composição química do aço SAE 1045	38
Tabela 5 – Classificação dos aços segundo teor de carbono	38
Tabela 6 – Composição química do aço SAE 1045 [% em peso]	46
Tabela 7 – Propriedade mecânica do aço SAE 1045.....	46
Tabela 8 – Composição química (% em peso) do arame AWS ER70S-3.....	47
Tabela 9 – Parâmetros de soldagem padrão	51
Tabela 10 – Definição dos parâmetros.....	52
Tabela 11 – Corpos de prova (CP).....	57
Tabela 12 – Microdureza das amostras analisadas	67
Tabela 13 – Propriedades mecânicas do metal base e junta soldada	68
Tabela 14 – Resultado dos ensaios de Charpy.....	71
Tabela 15 – Ângulo de dobramento dos corpos de prova.....	72

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Ar	Argônio
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
C_{eq}	Carbono equivalente
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Corpo de prova
CT	Condutividade térmica
CV	Volume constante
H ₂	Hidrogênio
He	Hélio
IIW	<i>International Institute of Welding</i>
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
PI	Potencial de ionização
SAE	Society of Automotive Engineers
ZF	Zona fundida
ZTA	Zona termicamente afetada

SUMÁRIO

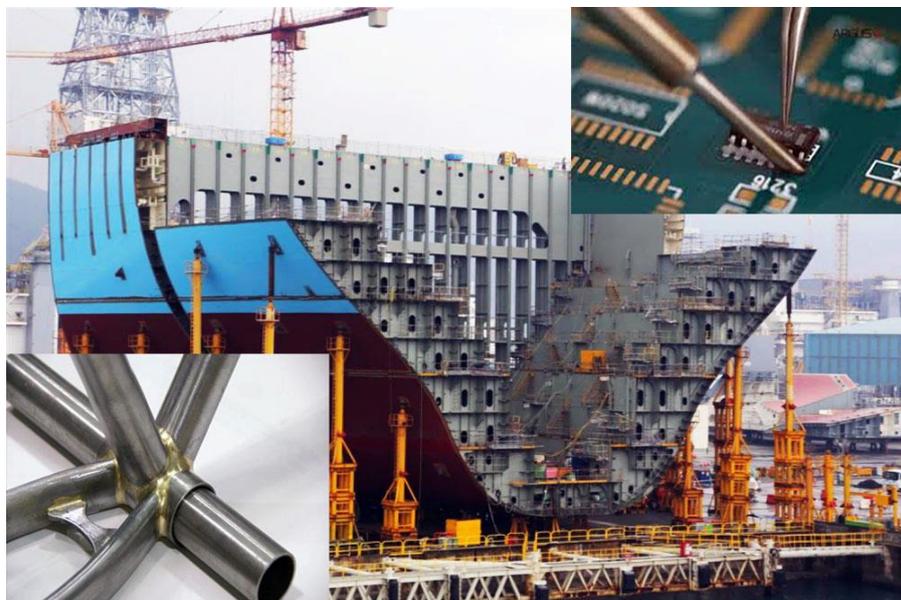
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Definição do problema.....	15
1.2 Justificativa do trabalho	15
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivos específicos.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Soldagem MIG/MAG	18
2.1.1 Equipamentos básico	20
2.1.2 Soldagem mecanizada	22
2.1.3 Consumíveis	23
2.1.3.1 Gás de proteção	23
2.1.3.2 Arame-eletrodo	27
2.2 Pré-aquecimento	28
2.2.1 Carbono equivalente	29
2.3 Caracterização da junta soldada.....	30
2.3.1 Aporte térmico	30
2.3.2 Geometria da junta soldada	32
2.3.3 Regiões da ZTA	33
2.3.4 Microestruturas da junta soldada	35
2.4 Aço SAE 1045	37
2.4.1 Microestrutura	38
2.4.2 Soldabilidade	39
2.5 Ensaio metalúrgicos	40
2.5.1 Ensaio de tração.....	40
2.5.2 Ensaio Charpy	42
2.5.3 Ensaio de dobramento guiado	43
3 METODOLOGIA	45
3.1 Material.....	46
3.2 Equipamento de soldagem.....	46

3.3 Consumíveis	47
3.4 Junta de soldagem	48
3.5 Pré-aquecimento	49
3.6 Soldagem	50
3.6.1 Dispositivo de fixação.....	50
3.6.2 Definição de parâmetros.....	51
3.6.2.1 Análise de soldagem.....	52
3.6.3 Parâmetros de soldagem.....	55
3.7 Preparação dos corpos de prova.....	55
3.8 Ensaio de tração.....	57
3.9 Ensaio de dobramento.....	59
3.10 Ensaio de Charpy-V	60
3.11 Ensaio metalográfico	61
3.11.1 Ensaio macrográfico.....	61
3.11.2 Ensaio micrográfico.....	61
3.11.3 Ensaio de microdureza vickers.....	61
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1 Análise macrografica	63
4.2 Micrografia	64
4.3 Microdureza	67
4.4 Ensaio de tração.....	68
4.5 Ensaio de Charpy	71
4.6 Ensaio de dobramento.....	72
5 CONCLUSÃO	75
REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

Conforme Marques et al. (2011), o processo de soldagem é considerado o mais importante processo de união de metais utilizado atualmente na indústria. Este é empregado desde a indústria microeletrônica até a fabricação de navios ou de estruturas metálicas diversas, podendo chegar a conter de centenas a milhares de toneladas, conforme ilustra Figura 1. A soldagem de estruturas metálicas abrange desde aplicações mais simples, até estruturas de elevado grau de responsabilidade, como o caso das plataformas de petróleo.

Figura 1 – Aplicações do processo de soldagem



Fonte: <http://ectjoinville.com>, adaptado pelo autor (2016).

Na atualidade, os processos de soldagem a arco elétrico são considerados os de maior importância industrial. Nestes métodos de soldagem, faz-se necessário o uso de algum meio de proteção, para evitar que ocorram reações do metal fundido, com os gases da atmosfera (MARQUES et al., 2011).

Segundo Okumura e Taniguchi (1982, p. 17), “nos processos de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa, a zona do arco e a poça de fusão, são protegidas da contaminação atmosférica por um gás alimentado pela tocha de soldagem”. Os gases utilizados com maior frequência na soldagem industrial são: o hélio, o argônio e o CO₂, e muitas vezes, são utilizados uma mistura desses gases.

Assim, o processo de soldagem MIG/MAG, é aquele em que se utiliza gás de proteção. Para a soldagem *Metal Inert Gas* (MIG), o gás de proteção a ser utilizado é inerte, sendo o hélio e o argônio os gases mais utilizados. Já para a soldagem *Metal Active Gas* (MAG), o gás de proteção reage quimicamente com o metal fundido da poça de fusão, adicionando ou retirando elementos de liga. Geralmente, é utilizado o CO₂ puro ou misturado com outros gases inertes.

A união de metais por soldagem é realizada por meio da aplicação localizada de calor. Um arco elétrico estabelecido entre a região a ser soldada e o eletrodo, estabelece um ciclo térmico que pode alterar significativamente a microestrutura do metal de base e por consequência prejudicar as propriedades mecânicas do material. Esta região do metal de base, adjacente a poça de fusão é conhecida como zona termicamente afetada (ZTA) e é considerada a região mais crítica da solda.

O aço SAE 1045 é um aço de baixa liga e com teor de carbono entre 0,43% a 0,50%. Este tipo de aço é considerado de baixa soldabilidade, pois quando submetido ao processo de soldagem, pode ocorrer a formação da fase martensita, principalmente na ZTA da junta soldada. Este tipo de fase apresenta elevada dureza e baixa tenacidade (se não for revenido), tornando frágil a união soldada. Isto ocorre, pois o elevado teor de carbono faz com que seja um aço temperável, que facilmente produz uma microestrutura martensítica quando austenitizado e resfriado rapidamente. Para contornar este problema, pode ser necessário um tratamento térmico após soldagem, ou pré-aquecimento das peças antes de serem soldadas.

Devido estas particularidades apresentadas pelo aço SAE 1045, este trabalho tem por objetivo comparar o desempenho da junta soldada pelo processo MIG/MAG em duas condições: (a) sem pré-aquecimento e (b) com pré-aquecimento. O desempenho será avaliado através de ensaios de dobramento, tração, Charpy-V, microdureza e caracterização microestrutural.

1.1 Definição do problema

A soldagem em aço SAE 1045 requer cuidados especiais. Pôr se tratar de um aço de médio carbono, é indicado um ciclo térmico controlado durante a soldagem devido à suscetibilidade à formação de microestrutura de elevada dureza e baixa tenacidade. Esse tipo de microestrutura é altamente suscetível a formação de trincas durante o resfriamento, além de trincas induzidas pelo hidrogênio.

Principalmente por esses motivos, é sugerido uma etapa prévia a soldagem, chamada de pré-aquecimento e também um resfriamento lento após a execução do cordão de solda. Dependendo do projeto de solda, pode ser necessário tratamento térmico posterior. Por esses motivos, o estudo da soldagem de aço SAE 1045 desperta o interesse prático acadêmico. Então o trabalho proposto visa aprofundar o conhecimento da soldabilidade do aço SAE 1045, utilizando pelo menos duas condições distintas, (a) com pré-aquecimento e (b) sem pré-aquecimento.

1.2 Justificativa do trabalho

O aço SAE 1045 é muito utilizado na indústria metal-mecânica. Inúmeros componentes são fabricados através da soldagem do aço SAE 1045, porém é muito comum apresentar problemas de trincas em estruturas soldadas onde não foram utilizados o pré-aquecimento ou tratamento térmico após a soldagem.

Por ser um aço altamente temperável, muitas vezes, se faz necessário um tratamento térmico após a soldagem, para reestabelecer as propriedades mecânicas, principalmente a tenacidade. Porém, o tratamento térmico após

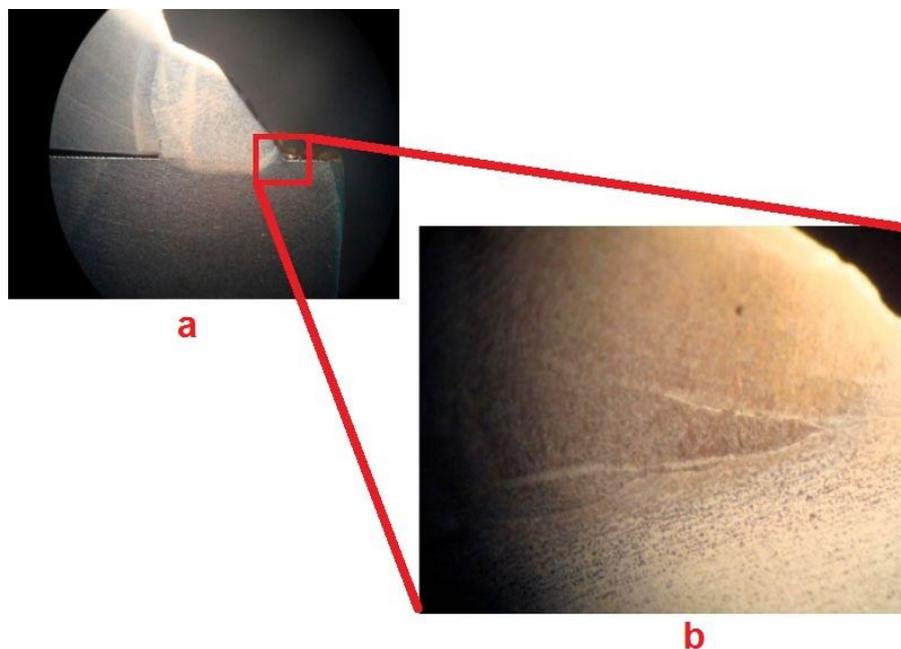
soldagem, tem um custo elevado, e dependendo do tamanho da peça, como demonstrado na Figura 2 pode se tornar inviável.

Figura 2 – Componente de grandes dimensões manufaturado utilizando soldagem de SAE 1045



Fonte: Weber (2014).

Figura 3 – Em (a) é observado a macrografia da junta soldada do componente da Figura 2 e em (b) uma imagem de microscópio óptico mostrando trinca na ZTA.



Fonte: Weber, adaptado pelo autor (2016).

Então, aprofundar o entendimento de como o pré-aquecimento irá influenciar as propriedades mecânicas da junta soldada é de fundamental importância para o engenheiro que atua na área de soldagem.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é aprofundar o conhecimento sobre o processo de soldagem MIG/MAG em aço SAE 1045 com o uso de pré-aquecimento. Esse trabalho propõe verificar as principais propriedades mecânicas da junta soldada, como: a resistência mecânica, a ductilidade, a tenacidade e a dureza. Também serão realizadas análises microestruturais e a verificação da formação de defeitos ou trincas na junta soldada.

1.3.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos para esse trabalho são:

- a) Realizar uma revisão bibliográfica, abordando os conceitos de soldagem MIG/MAG e as características mecânicas e metalúrgicas do aço SAE 1045;
- b) Estabelecer parâmetros de soldagem para a união de chapas do aço do aço SAE 1045 pelo processo MIG/MAG;
- c) Avaliar qualitativamente as principais propriedades mecânicas e metalúrgicas da junta soldada do aço SAE 1045 com e sem pré-aquecimento;
- d) Verificar a influência do pré-aquecimento nas propriedades mecânicas de uma junta soldada do aço SAE 1045 pelo processo MIG/MAG.

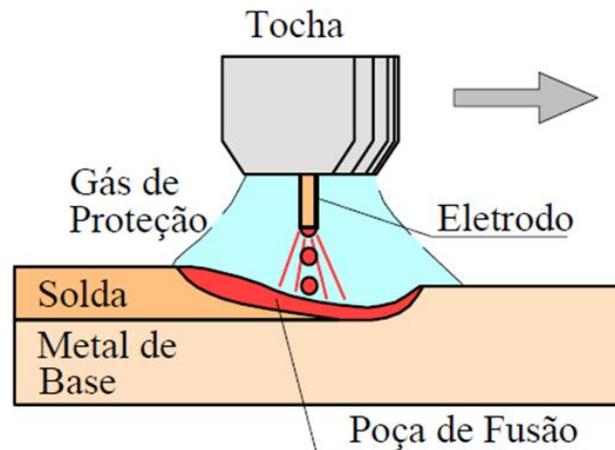
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta parte do trabalho são apresentados os principais conceitos referente ao tema em estudo. Será abordado o processo de soldagem MIG/MAG, citando os princípios de soldagem MIG/MAG, as partes que compõem um equipamento de soldagem e seus consumíveis. Subsequentemente, será analisado o processo de pré-aquecimento, aporte térmico e propriedades de uma união soldada. Por fim, é realizado uma revisão das propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço SAE 1045.

2.1 Soldagem MIG/MAG

A união dos metais pode ser classificada em duas categorias. A primeira é aquela em que a união ocorre sem a fusão dos metais, como exemplo podemos citar as técnicas de rebiteagem e parafusagem. Nestas técnicas, a resistência da união ou da junta, é dada pela própria resistência ao cisalhamento do material. Na segunda, ocorre a fusão dos metais envolvidos na soldagem, dando origem a uma poça de fusão que ao solidificar, consolida a junta. Neste caso a resistência de uma junta soldada de topo é dada pela penetração da solda multiplicada pelo comprimento soldado. Podemos citar a soldagem a arco elétrico e a brasagem como exemplos da soldagem por fusão (MARQUES et al., 2011). A Figura 4 ilustra o processo de soldagem a arco elétrico MIG/MAG.

Figura 4 – Esquema soldagem MIG/MAG



Fonte: Marques et al. (2011).

Conforme Scotti e Ponomarev (2008), a soldagem MIG/MAG é um processo de união de metais por fusão, onde o calor necessário para a fusão é gerado por um arco elétrico estabelecido entre a extremidade de um arame consumível, e a peça a ser soldada.

Nos processos de união por fusão, são necessários o uso de um meio de proteção, para evitar a contaminação da poça de fusão pelos gases da atmosfera. Assim, o processo de soldagem MIG/MAG utiliza gases de proteção, podendo ser estes inertes ou ativos. Para a soldagem MIG, a proteção é feita por gases inertes (argônio e hélio). Já na soldagem MAG utiliza gases ativos, como o caso do dióxido de carbono (CO_2) ou uma mistura de gases ativos (MARQUES et al., 2011).

O processo de soldagem MIG/MAG pode ser utilizado para a união de metais em uma ampla faixa de espessuras. Este processo é utilizado para a união de metais ferrosos e não ferrosos. A soldagem MAG é utilizada apenas para metais ferrosos, enquanto que a soldagem MIG é utilizada tanto na soldagem de metais ferrosos e não ferrosos.

Podemos citar como principais vantagens do processo de soldagem MIG/MAG, a elevada taxa de deposição, a alta velocidade de soldagem; possibilidade de variação do modo de soldagem (alteração do modo de transferência metálica, facilitando a soldagem fora de posição), boa versatilidade quanto ao

material e espessura, facilidade de operação e manuseio por parte do operador, além de praticamente inexistência de escória.

Conforme Brandi (2011), as principais limitações da soldagem MIG/MAG são: maior incidência de trincas na região da solda, principalmente em aços temperáveis, devido à alta taxa de resfriamento, sendo esta muito influenciada pela ausência de escória. Elevada emissão de raios ultravioletas e maior custo de aquisição dos equipamentos de soldagem são outras limitações desse processo.

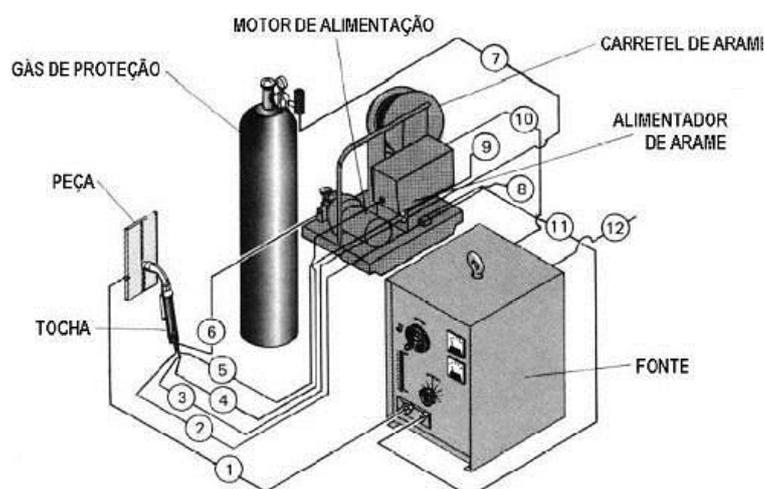
2.1.1 Equipamentos básico

O equipamento básico utilizado na soldagem MIG/MAG é composto pelas seguintes partes:

- a) Fonte de energia;
- b) Alimentador de arame;
- c) Tocha de soldagem.

Conforme a Figura 5, podemos identificar os componentes que fazem parte de um equipamento de soldagem MIG/MAG.

Figura 5 – Equipamento básico de soldagem MIG / MAG



A fonte de energia tem como principal objetivo, fornecer energia elétrica ao arco de soldagem, influenciando de forma significativa o desempenho da soldagem (qualidade e produtividade). No interior da fonte existe um transformador, o qual tem como função converter a energia elétrica fornecida pela rede, de alta tensão e baixa corrente, para baixa tensão e elevada corrente. Nos casos em que a energia fornecida para a soldagem for corrente contínua é necessário a utilização de um banco de retificadores na saída do transformador.

O alimentador é um equipamento simples. Internamente, possui uma armação que suporta o sistema de alimentação e um suporte para o carretel do arame-eletrodo. O sistema de alimentação é composto por roletes acionados por um motor elétrico, este impulsiona o arame para a tocha de soldagem, conforme ilustrado na Figura 6. O motor de acionamento dos roletes é geralmente alimentado por corrente contínua, com comando por meio de circuitos eletrônicos. Assim, permite variar a velocidade de alimentação do arame, buscando obter uma maior estabilidade do arco elétrico.

Figura 6 – Esquema alimentador de arame-eletrodo para soldagem MIG/MAG



Fonte: <http://retrorides.proboards.com>, adaptado pelo autor (2016).

A tocha de soldagem tem por função conduzir a energia de soldagem até o arame, além de guiar o arame e gás de proteção. É composta basicamente, por um cabo, o qual pode chegar a dois metros de comprimento, por um punho, possuindo o gatilho de acionamento e um bico de tocha, que direciona os gases de proteção para a poça de fusão. Como a tocha trabalha próxima ao arco elétrico e a poça de fusão,

Figura 8 – Trator soldagem MIG/MAG



Fonte: <http://www.sumig.com>, adaptado pelo autor (2016).

2.1.3 Consumíveis

Os consumíveis utilizados no processo de soldagem MIG/MAG, são os gases de proteção e os arames-eletrodos, os quais podem variar conforme a necessidade existente em cada condição e material a ser soldado.

2.1.3.1 Gás de proteção

Conforme comentado anteriormente, o gás de proteção se faz necessário na soldagem MIG/MAG, principalmente, para a proteção da poça de fusão e também para que ocorra a estabilidade do arco elétrico, além de controlar a operacionalidade e a transferência metálica.

Scotti e Ponomarev (2008), argumentam que, para se obter uma considerável eficiência de proteção, não devemos atentar somente ao tipo de gás de proteção, mas também a configuração do bocal da tocha, a junta de soldagem, a vazão do gás de proteção, e também, evitar ao máximo que ocorra a incidência de correntes de ar durante a soldagem.

A vazão do gás de proteção normalmente adotado para processo de soldagem MIG/MAG, é de 10 à 16 l/min. O uso de uma vazão mais elevada pode gerar turbulência no fluxo de gás, diminuindo assim a eficiência de proteção, tornando uma operação ineficiente e antieconômica.

Scotti e Ponomarev (2008) retratam a estabilidade do arco, como a segunda principal função do gás de proteção. São as propriedades físico-químicas dos gases, que influenciam a estabilidade do arco, podemos destacar o potencial de oxidação, a condutividade térmica e o potencial de ionização.

O potencial de oxidação é uma propriedade do gás que se faz necessário para a soldagem nos aços e suas ligas. Pois para a soldagem de aço é necessária uma camada de óxido sobre a poça de fusão, para que ocorra a estabilidade do arco. Para os metais reativos, não se utiliza gases com propriedades oxidantes, mas sim, gases inertes.

Entende-se como condutividade térmica a capacidade do gás conduzir calor para o metal de base. Os gases que apresentam boa condutividade térmica possuem ótima eficiência de fusão, e por consequência geram uma maior zona fundida. Podemos citar gases com alta condutividade térmica, o hélio (He), o dióxido de carbono (CO₂) e o hidrogênio (H₂).

Pode-se entender o potencial de ionização como a energia necessária para que o gás possa conduzir eletricidade. Essa propriedade influencia fortemente a abertura e a estabilidade do arco. Por exemplo, o argônio possui baixo potencial de ionização, e por isto apresenta boa abertura e elevada estabilidade do arco.

No processo de soldagem MIG/MAG, a escolha correta do gás de proteção depende de inúmeros fatores, os principais gases utilizados atualmente são:

- Argônio – Contém baixo potencial de ionização, apresenta um arco estável e boa abertura, sua densidade é maior que do ar atmosférico, possuindo boa eficiência de proteção. Por conter baixo potencial de oxidação (quase nulo), é utilizado na soldagem de material reativo e não ferrosos, sendo considerado gás inerte;

- Hélio - É um gás inerte como o argônio, porém possui alto potencial de ionização, o qual acaba dificultando a ignição da abertura do arco. Assim, é necessário uma maior tensão de soldagem, para um mesma corrente e comprimento de arco quando comparado com o argônio. Sua densidade é inferior ao ar atmosférico, por isso, geralmente utiliza-se uma maior vazão. Por conter alta condutividade térmica, transfere mais calor ao metal base, sendo possível obter maiores velocidades de soldagem;
- Dióxido de carbono (CO₂) - O CO₂ é um gás com comportamento oxidante, e por isso não é utilizado para soldagem em metais fortemente reativos. Sua maior aplicação é para aços de baixo carbono. Contém alta capacidade de troca de calor, maior que a do argônio e apresenta comportamento semelhante ao do gás hélio em relação ao perfil do cordão de solda e características de abertura do arco;
- Oxigênio (O₂) - Utilizado como constituinte da mistura com os demais gases de proteção, é utilizado para melhorar a estabilidade do arco e também diminuir a tensão superficial da gota e da poça de fusão, favorecendo o processo de transferência metálica.

Na Tabela 1 são apresentadas as principais propriedades química dos gases citados, como o potencial de ionização (PI), a condutividade térmica (CT) e a capacidade específica de calor à volume constante (Cv):

Tabela 1 – Propriedade química dos gases de proteção

Gás	Densidade (kg/m³)	PI (eV)	CT (mW/m.K)	Cv (kJ/kg°C)
Argônio	1,78	15,8	16,4	0,314
Dióxido de carbono	1,98	14,4	14,7	0,657
Hélio	0,18	24,6	142,6	3,11
Oxigênio	1,33	13,2	24,2	0,653

Fonte: Scotti e Ponomarev, adaptado pelo autor (2016).

Com a evolução do processo de soldagem e a constante busca pela melhoria da qualidade da solda, foram desenvolvidos diversas misturas de gases (Ar, He, CO₂, O₂). Na Tabela 2 podem ser observados os principais gases e misturas conforme a aplicação.

Tabela 2 – Gases e misturas utilizados na soldagem MIG/MAG

Gás ou mistura	Comportamento químico	Aplicações
Argônio	Inerte	Quase todos os metais, exceto aço
Hélio	Inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas. Alta penetração
Ar + He (20 - 50%)	Inerte	Idem He, mas melhor que 100% He
Nitrogênio	—	Cobre, maior energia de soldagem
Ar + 20-30% N ₂	---	Idem N ₂ , mas melhor que 100% N ₂
Ar + 1 - 2% O ₂	Ligeiramente oxidante	Aços inoxidáveis e algumas ligas de Cu
Ar + 3 - 5% O ₂	Oxidante	Aços carbono e alguns aços de baixa liga
CO ₂	Oxidante	Aços carbono e alguns aços de baixa liga
Ar + 20-50% CO ₂	Oxidante	Aços
Ar + CO ₂ + O ₂	Oxidante	Aços

Fonte: Marques et al. (2011).

Aqui, falaremos somente da mistura Ar e CO₂, por ser utilizado na aplicação deste trabalho.

- Argônio + CO₂ – É a mistura de gases mais utilizada na soldagem MIG/MAG. As principais vantagens são: o aumento da estabilidade do arco, quando usado na soldagem de metais ferrosos e melhora do desempenho do gás na soldagem a baixa corrente e tensão (transferência por curto/circuito). Conforme Scotti e Ponomarev (2008), comercialmente existem três métodos de mistura. Para chapas espessas ($\geq 6\text{mm}$) utiliza-se entre 18 a 25% de CO₂; para chapas finas ($\leq 3\text{ mm}$) utiliza-se entre de 8 a 15% de CO₂ e para chapas muito finas é usada uma mistura entre 3 a 5% de CO₂.

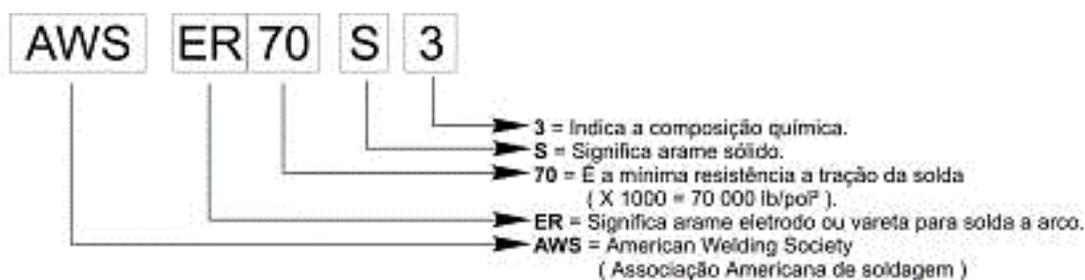
2.1.3.2 Arame-eletrodo

Conforme Fortes e Vaz (2005), é muito importante a seleção correta do arame de solda, pois, em conjunto com o gás de proteção a ser utilizado, determinam as propriedades químicas e físicas da solda. Existem cinco fatores principais que influenciam na seleção do arame:

- A composição química do material a ser soldado;
- As propriedades mecânicas do material a ser soldado;
- O gás de proteção utilizado;
- O tipo de serviço ou os requisitos da especificação aplicável;
- O tipo de junta a ser soldada.

Para realizar a classificação dos arames-eletrodos, o Brasil adotou a norma American Welding Society (AWS), possuindo uma nomenclatura específica para cada arame-eletrodo utilizado. Na Figura 9, pode-se observar a nomenclatura utilizada para os arames-eletrodos.

Figura 9 – Nomenclatura do arame-eletrodo



"S" = significa que o arame é sólido;
 "T" = significa que o arame é tubular.

Fonte: SENAI SP, (2004).

Segundo Scotti e Ponomarev (2008, p. 91), "os arames podem assumir as mais diversas composições químicas (diferentes tipos de metais e classes dentro cada material), de acordo com a aplicação". A Figura 10 ilustra a composição química de alguns arames-eletrodos existentes.

Scotti e Ponomarev (2008) citam também que a disponibilidade de arame-eletrodo existente no mercado para diferentes composições de elementos é pequena. A alternativa para os arames maciços em soldagem MIG/MAG é o uso de arames tubulares que possuem em seu interior preenchimento com os elementos de liga, conforme a necessidade.

Figura 10 – Composição química de alguns arames-eletrodo (% peso)

Classificação	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
ER 70S-2	0,07	0,9-1,4	0,40-0,70	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,50
ER 70S-3	0,06-0,15	0,9-1,4	0,45-0,75							
ER 70S-4	0,06-0,15	1,0-1,5	0,65-0,85							
ER 70S-6	0,06-0,15	1,4-1,8	0,80-1,15							
E 70S-7	0,06-0,15	1,5-2,0	0,50-0,80							
E 70S-G	Não especificado									
ER80S-B2	0,07-0,12	0,4-0,7	0,40-0,70	0,025	0,025	0,20	1,2-1,5	0,40-0,65	–	0,35
ER80S-B6	0,10	0,4-0,7	0,50			0,60	4,5-6,0	0,45-0,65	–	0,35
ER90S-B9	0,07-0,13	1,25	0,15-0,30	0,010	0,010	1,0	8,0-9,5	0,80-1,10	0,15-0,25	0,20
ER100S-1	0,08	1,2-1,8	0,20-0,55			1,4-2,1	0,30	0,25-0,55	0,5	0,25
ER110S-1	0,09	1,4-1,8	0,20-0,55			1,9-2,6	0,50	0,25-0,55	0,4	
ER120S-1	0,10	1,4-1,8	0,25-0,60			2,0-2,8	0,60	0,30-0,65	0,3	
ER 70C-3X*	0,12	1,75	0,90	0,03	0,03	0,50	0,20	0,30	0,08	0,50
E80C-B2	0,05-0,12	0,4-1,0	0,25-0,60	0,025	0,030	0,20	1,0-1,5	0,40-0,65	–	0,35
E80C-B3L	0,05	0,4-1,0	0,25-0,60	0,025	0,030	0,20	2,0-2,5	0,90-1,20	–	0,35
E90C-B3	0,05-0,12	0,4-1,0	0,25-0,60	0,025	0,030	0,20	2,0-2,5	0,90-1,20	0,15-0,25	0,35

Fonte: Marques et al. (2011).

2.2 Pré-aquecimento

Conforme Fortes e Araújo (2005), os metais possuem boa condutividade térmica. O calor fornecido pelo arco elétrico para a poça de fusão, durante o processo de soldagem, é rapidamente transmitido para o metal base que compõem a junta a ser soldada. Em virtude da grande diferença de temperatura (metal base e poça de fusão), ocasiona um rápido resfriamento. Este rápido resfriamento, pode ser prejudicial as propriedades mecânicas da junta soldada. No caso de aços ao

carbono, a elevada taxa de resfriamento pode propiciar a formação de fases duras e de baixa tenacidade, como o caso da microestrutura martensítica, sendo esta suscetível ao surgimento de trincas durante o resfriamento.

De acordo com Fortes e Araújo (2005, p. 13) “O pré-aquecimento da junta a ser soldada é uma maneira de reduzir a taxa de resfriamento do metal”. Assim podemos afirmar que a etapa de pré-aquecimento consiste no aquecimento do metal base antes do processo de soldagem. As temperaturas mais usuais estão entre 150 °C a 200 °C. A necessidade do uso do pré-aquecimento aumenta com os seguintes fatores:

- teor de carbono ou de elementos de liga existente no material de base;
- tamanho da peça;
- temperatura inicial do metal;
- velocidade de soldagem;
- diâmetro do consumível.

2.2.1 Carbono equivalente

Para sabermos a temperatura correta a ser utilizada no pré-aquecimento, temos que conhecer a composição química do material, como o teor de carbono ou de elementos de liga existentes no aço. A espessura e o tamanho do componente são outros fatores que influenciam.

Segundo Fortes e Araújo (2005), o método mais prático para determinar a temperatura de pré-aquecimento para um determinado aço, é mediante o cálculo do carbono equivalente (C_{eq}). Quanto maior o valor do C_{eq} , maior será a temperatura de pré-aquecimento.

A equação para o carbono equivalente mais largamente utilizada é dada pelo IIW (*International Institute of Welding*):

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

Conforme Fortes e Araújo (2005), sugere para as determinadas faixas de carbono equivalente as seguintes temperaturas de pré-aquecimento, conforme ilustrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Temperatura de pré-aquecimento recomendada x Ceq

Carbono equivalente Ceq (%)	Temperatura de pré-aquecimento
< 0,30	Opcional
0,31 - 0,45	100°C - 200°C
0,45 - 0,60	200°C - 250°C
> 0,60	250°C - 300°C
Aços ferramenta, aços mola, aços de composição desconhecida	~300°C

Fonte: Fortes e Araújo, adaptado pelo autor (2016).

2.3 Caracterização da junta soldada

2.3.1 Aporte térmico

De acordo com Zeemann (2003, p. 01), “a quantidade de calor adicionada a um material, por unidade de comprimento linear, é o que se chama energia de soldagem, ou aporte de calor, ou aporte térmico”. Geralmente esta grandeza é representada pela letra E ou H, e sua unidade de medida usual é kJ/mm.

Na soldagem a arco elétrico, o cálculo do aporte térmico pode ser expresso pela Equação 2:

$$E = \eta x \frac{VI}{v} \quad (2)$$

Sendo:

η – Eficiência de transferência

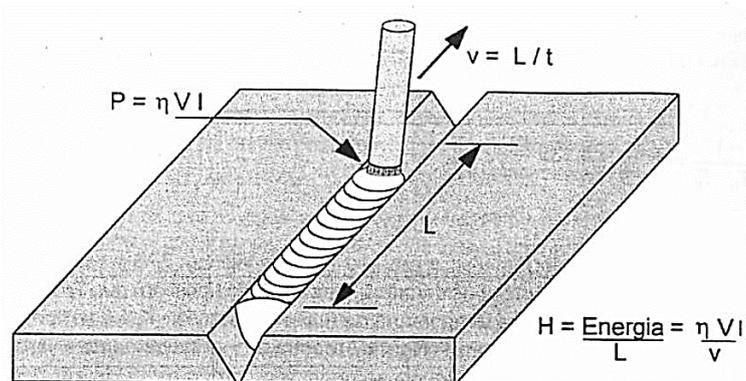
V – tensão em Volts (V)

I – corrente elétrica em Ampéres (A)

v – velocidade linear de soldagem (mm/s)

Pode-se observar que o aporte térmico depende do processo de soldagem utilizado. Assim como, da eficiência na transferência de calor (η) de cada processo, e das faixas de corrente (I) e de tensão (V) utilizadas. O aporte térmico, também pode variar bastante, dependendo da velocidade de soldagem utilizada. A Figura 11 ilustra o conceito de aporte térmico.

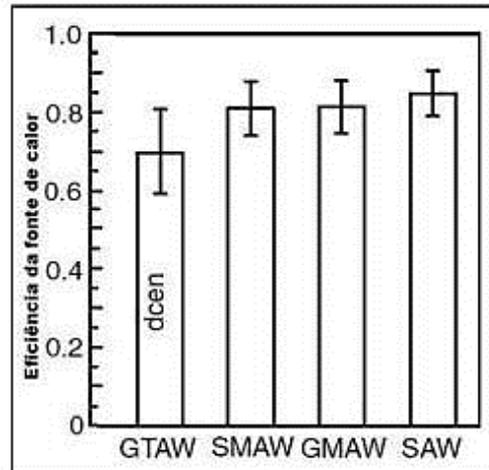
Figura 11 – Conceito aporte térmico



Fonte: Marques et al. (2011).

A Figura 12 mostra um comparativo da eficiência de transferência dos processos mais usuais de soldagem a arco elétrico. Verifica-se que o processo de soldagem por arco submerso (SAW) possui a maior eficiência (85%) entre os demais, no entanto, o processo GTAW ou soldagem TIG é o que possui menor eficiência (70%). No processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW) e no processo MIG/MAG (GMAW), consideramos a eficiência média de 80%.

Figura 12 – Eficiência processos de soldagem

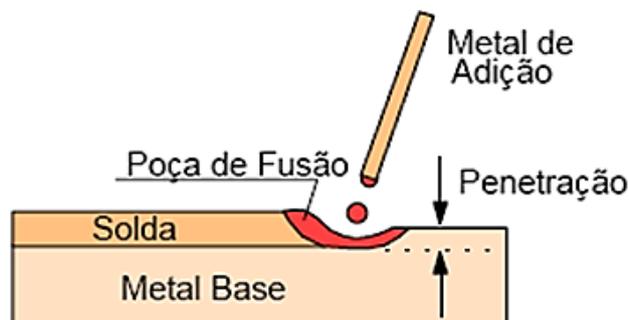


Fonte: Filho (2008).

2.3.2 Geometria da junta soldada

Segundo Marques et al. (2011), o processo de união de peças metálicas por soldagem é ilustrado na Figura 13. O material da peça a ser soldada é chamado de metal base. O arame-eletrodo fornecido para a formação da junta é chamado de metal de adição, o qual cria uma poça de metal fundido durante o processo de soldagem, chamado de poça de fusão.

Figura 13 – Partes do processo de solda

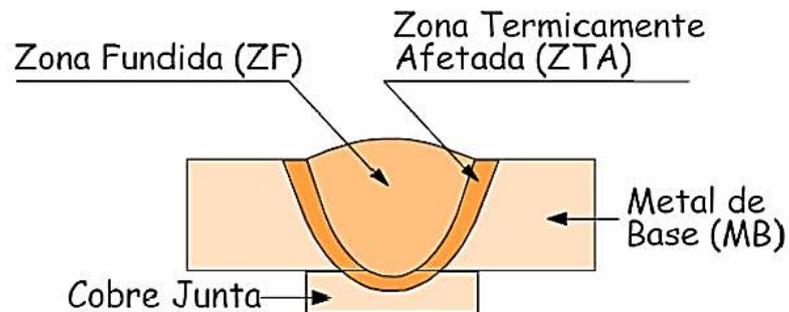


Fonte: Vitor (2010).

Conforme Filho (2008), “qualquer região na qual em decorrência dos efeitos da soldagem tenham ocorrido consideráveis alterações em suas condições iniciais, é constituinte da junta soldada”. Assim, junta soldada corresponde a toda região próxima a soldagem, a qual, sofreu alguma alteração na estrutura do material.

Esta região pode ser dividida em zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e metal base conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Regiões de uma junta soldada



Fonte: Filho (2008).

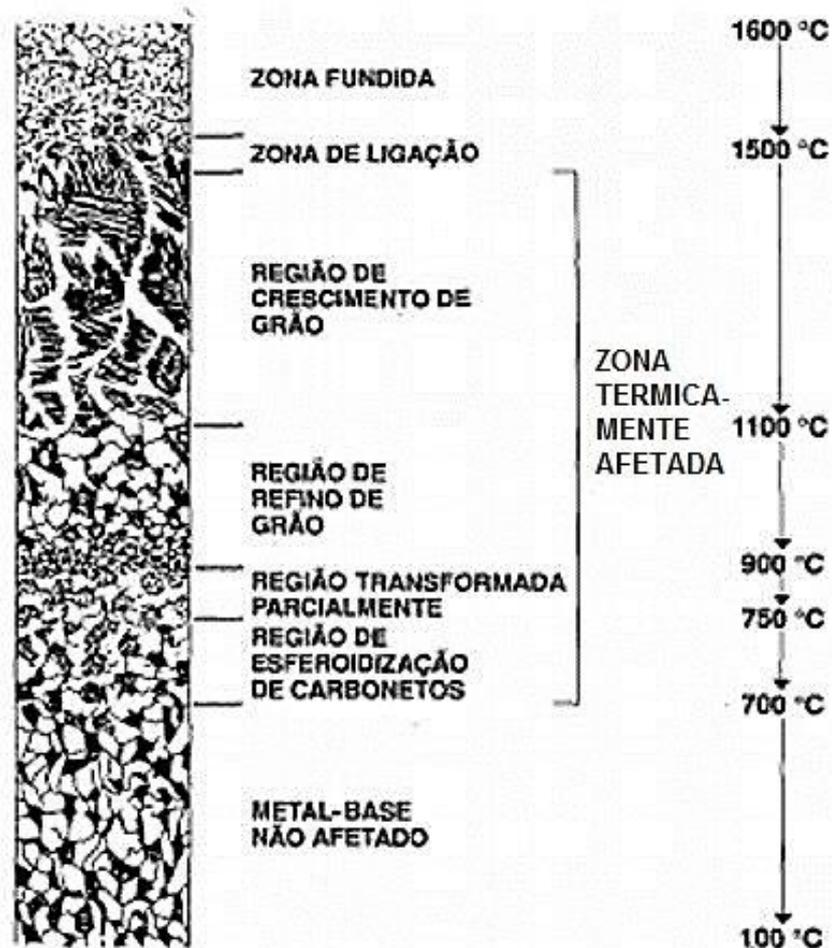
- a. Zona fundida – Esta região é resultado da solidificação da poça de fusão, o seja, é constituída por parte do metal de adição juntamente com o metal base fundido;
- b. Zona termicamente afetada – Região adjacente a poça de fusão, esta experimenta elevada temperatura de pico, ocorrendo significativo ciclo térmico. Assim, sua microestrutura é significativamente alterada, modificando as propriedades mecânicas do material, como, a ductilidade, tenacidade, resistência, etc.;
- c. Metal base – Região na qual não ocorre nenhuma alteração em suas propriedades mecânicas, ou seja, esta região não foi influenciada pelo processo de soldagem.

2.3.3 Regiões da ZTA

Segundo Júnior (2013), pode-se dividir a ZTA em quatro zonas, as quais apresentam diferentes características metalúrgicas. Estas diferenças também ocorrerão com as propriedades mecânicas.

A Figura 15 ilustra as diferentes regiões da ZTA de uma junta soldada de um aço ao carbono, desde a zona fundida até o metal base inalterado. É realizada uma correlação das respectivas temperaturas de pico com a microestrutura formada.

Figura 15 – Regiões de uma junta soldada



Fonte: Brandi, adaptada pelo autor (2016).

Assim, resumidamente podemos citar:

- Região de granulação grosseira: região que corresponde a parte do metal de base que é aquecida acima de sua temperatura de crescimento de grão, na faixa de temperatura entre 1.500 a 1.100 °C. Possui como característica uma microestrutura de elevado tamanho de grão;
- Região de normalização: região o qual encontra-se mais afastada do que a anterior, na faixa de temperatura entre 1.100 a 900 °C. Possui

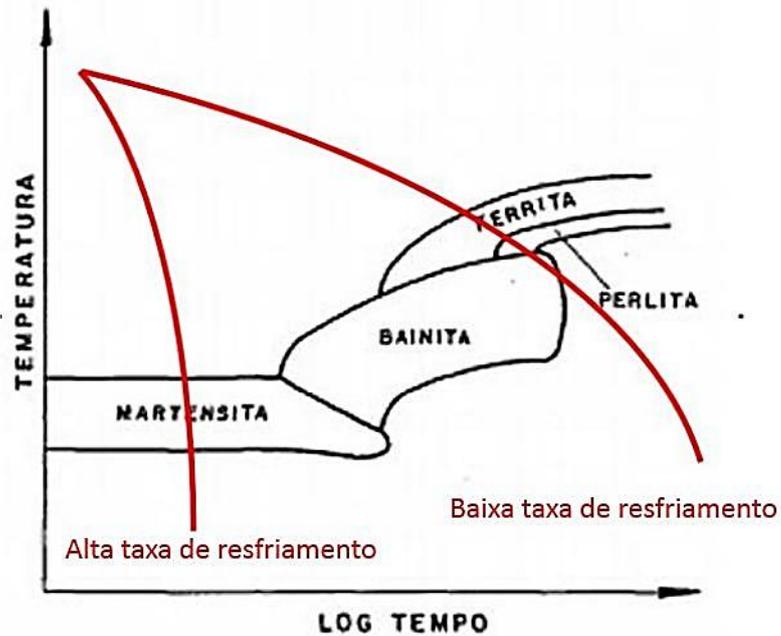
como característica um microestrutura de tamanho de grão mais fina, podendo ser ferrita e/ou perlita;

- Região de intercrítica: região que experimentou uma faixa de temperatura entre 900 a 750 °C. A microestrutura encontrada nesta região dependerá da velocidade de resfriamento, na qual, a austenita poderá se decompor em perlita, bainita ou martensita maclada (martensita de alto carbono);
- Região subcrítica: Região que apresenta pequenas alterações na microestrutura, com temperatura entre 750 a 700 °C. Nesta região ocorre a esferoidização da perlita, resultando a diminuição quase que imperceptível da resistência mecânica quando comparada com o metal base.

2.3.4 Microestruturas da junta soldada

Brandi (2011, p. 370), afirma que “conforme a velocidade de resfriamento da junta soldada, pode ocorrer mudança de morfologia, modo de crescimento”, entre outras. Ou seja, dependendo da velocidade de resfriamento aplicada a junta a ser soldada, a microestrutura poderá mudar significativamente para um mesmo material. A Figura 16 demonstra esquematicamente as alterações microestruturais em função da velocidade de resfriamento para um aço-carbono.

Figura 16 – Esquema das alterações microestruturais em função da velocidade de resfriamento



Fonte: Brandi, adaptado pelo autor (2016).

Segundo o Instituto Internacional de Soldagem (IIW/IIS), a terminologia dos microconstituintes que compõem a microestrutura de uma junta soldada foi baseada fundamentalmente em observações feitas em microscópio ótico.

Os microconstituintes são:

- Ferrita Primária de Contorno de Grão – PF (G): é o primeiro produto a se formar na decomposição da austenita, formando-se a taxas de resfriamento muito lentas;
- Ferrita Poligonal Intragranular – PF (I): aparece na forma de grãos, normalmente poligonais, e nucleia-se exclusivamente no interior dos grãos austeníticos;
- Ferrita Acicular - AF: constituinte que se apresenta na forma de grãos extremamente finos de ferrita não paralelas, nucleando-se no interior do grão da austenita;

- Ferrita com Segunda Fase Alinhada – FS (A): constituinte formado por grãos grosseiros e paralelos que crescem ao longo de um plano, formando duas ou mais ripas de ferrita paralelas;
- Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada – FS (NA): formada por ferrita circundando microconstituintes ou ripas de ferrita acicular. Não se apresenta em forma paralela como a FS (A);
- Agregado Ferrita-Carboneto - FC: constituinte com estrutura fina de ferrita e carbonetos, incluindo perlita e ferrita com interfaces de carboneto;
- Martensita - M: constituinte formado como produto final de transformação da austenita sob condições de alta taxa de resfriamento e elevado teor de C.

2.4 Aço SAE 1045

Segundo Simon et al. (2012), o aço é basicamente uma liga de ferro e carbono, possuindo níveis de resistência através da adição de carbono. Os aços carbono podem ser classificados de acordo com a quantidade de carbono, conforme segue abaixo:

- Baixo carbono: até 0,14% carbono;
- Aço doce: de 0,15% até 0,29% carbono;
- Aço de médio carbono: de 0,30% até 0,59% carbono;
- Aço de alto carbono: de 0,60% até 2,00 % carbono.

De acordo com a Associação de Engenharia Automotiva (SAE) (2011), os aços contêm uma nomenclatura padrão, sendo os dois primeiros dígitos a indicação dos principais elementos de liga e os últimos o valor médio da faixa de carbono.

Conforme Buerger et al. (2009, p. 2), “o aço SAE 1045 é classificado como aço de médio teor de carbono com boas propriedades mecânicas e tenacidade bem como boas usinabilidade e soldabilidade quando laminado a quente ou normalizado”. Sua aplicação pode ser encontrada em virabrequins, componentes estruturais e de máquinas, peças soldadas e demais aplicações. O aço SAE 1045 possui composição química conforme a Tabela 4:

Tabela 4 – Composição química do aço SAE 1045

%C	%Mn	%P_{máx.}	%S_{máx.}	%Si
0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,040	0,050	0,10 – 0,60

Fonte: Norma ABNT NBR 87/2000, adaptado pelo autor (2016).

Azevedo (2002) cita que o aço SAE 1045 é classificado como um aço para construção mecânica, sendo formado por aproximadamente 0,45% de carbono. A sua aplicação ocorre normalmente no estado de fornecimento sem necessidade de haver qualquer tratamento térmico, mas para se ter melhores características, utiliza-se tratamentos térmicos como recozimento e têmpera.

2.4.1 Microestrutura

Conforme David et al. (2014), os aços comuns são agrupados em três grupos segundo teor de carbono presente, podendo ser: aço eutetóide, hipoeutetóide, hipereutetóide. A classificação segundo teor de carbono é representada na Tabela 5.

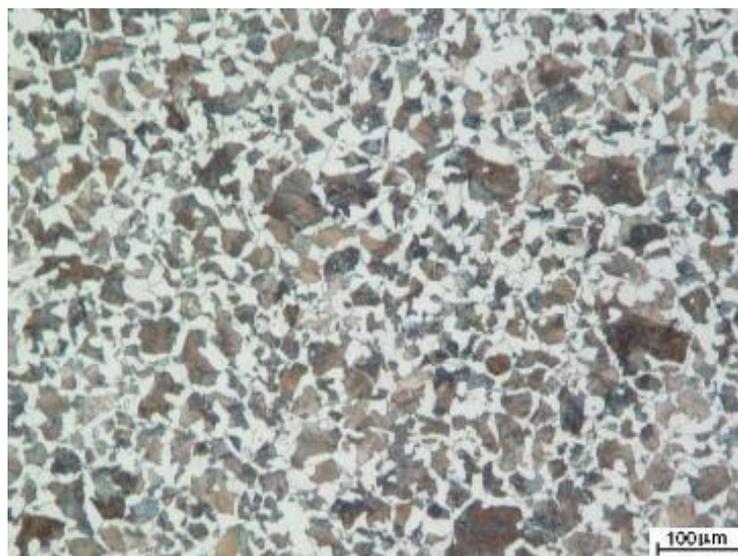
Tabela 5 – Classificação dos aços segundo teor de carbono

Eutetóide	Hipoeutetóide	Hipereutetóide
≈ 0,8 %	≤0,8 %	0,77 – 2,11 %

Fonte: David et al., adaptado pelo autor (2016).

Pode se afirmar então que o aço SAE 1045 é classificado como um aço hipoeutetóide. A este grupo de aços, são constituídos por uma microestrutura formada por perlita grossa e ferrita primária (DAVID et al., 2014). A Figura 17 ilustra a microestrutura do aço SAE 1045, formada por perlita representada por áreas mais escuras e por ferrita nas áreas claras.

Figura 17 – Microestrutura do aço SAE 1045 normalizado



Fonte: Perreira e Perozzi, (2008).

A ferrita é o constituinte mais mole dos aços, sendo também o mais maleável. Encontra-se disposta nos aços como constituinte e misturada com a cementita que acaba formando a perlita. Nos casos em que o teor de carbono é relativamente baixo, a estrutura será formada quase que totalmente por perlita.

A perlita é constituída pela mistura das fases ferrita e cementita, nas condições de temperatura aproximada de 723 °C e composição de 0,80 % de carbono. A perlita é formada por lâminas alteradas de ferrita e cementita, porém a espessura das laminas de ferrita são mais espessas. A perlita pode ser considerada mais dura e resistente que a ferrita, porém, mais branda e maleável que a cementita.

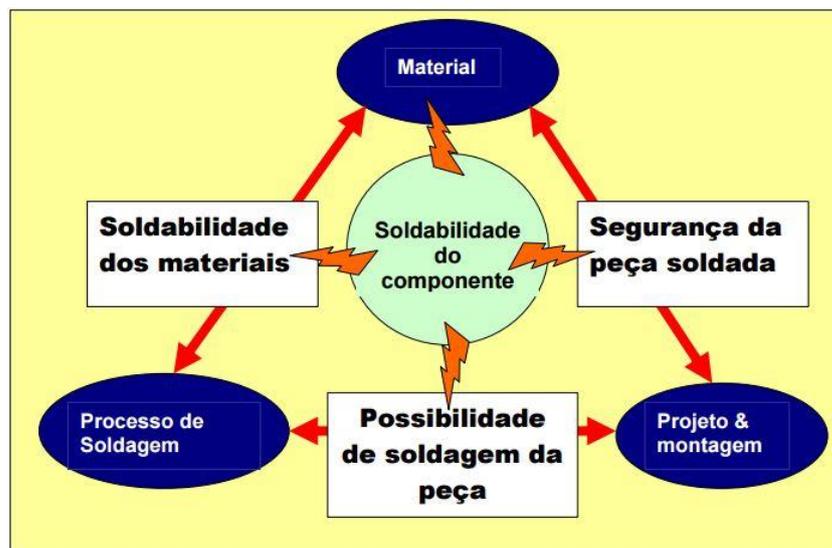
2.4.2 Soldabilidade

Segundo a norma AWS, a soldabilidade de um metal é a capacidade do material ser soldado, conforme condições de fabricação impostas. As ligas metálicas em sua maioria são soldáveis, mas, algumas são mais difíceis de serem soldadas por um determinado processo do que as outras.

Simon et al. (2012, p. 02) afirmam que: “a soldabilidade de um material é definida pela formação da junção permanente por solda entre dois materiais para um determinado processo de soldagem”.

Na Figura 18, podemos observar os principais fatores que influenciam a soldabilidade.

Figura 18 – Fatores de influência a soldabilidade



Fonte: Simon et al. (2012).

Weber (2014) destaca que o maior problema da soldabilidade do aço 1045 é a formação de trincas induzidas pelo hidrogênio, que ocorre principalmente na zona termicamente afetada (ZTA). Podemos citar alguns outros problemas mais específicos como a perda da tenacidade na ZTA ou na zona fundida e o surgimento de trincas de solidificação que ocorre devido soldagem com aporte térmico elevado.

2.5 Ensaios metalúrgicos

2.5.1 Ensaio de tração

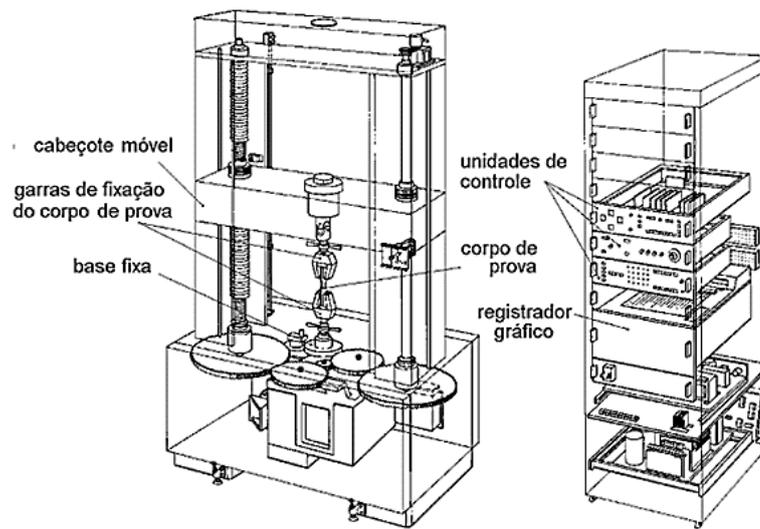
O ensaio de tração é padronizado conforme a norma ASTM E8 (*American Society for Testing and Materials*).

Segundo Souza (1982), o ensaio de tração consiste na aplicação de uma força de tração uniaxial em um corpo de prova, podendo afirmar que as deformações são uniformemente distribuídas ao longo de todo o corpo de prova até a ruptura.

Garcia et al. (2012) citam que na Engenharia, o ensaio de tração é largamente utilizado na determinação das características mecânicas dos materiais, como o limite de resistência à tração e de escoamento, o módulo de elasticidade, a ductilidade, além do coeficiente de encruamento.

O ensaio de tração é geralmente realizado na máquina universal, o qual recebe este nome por realizar diversos tipos de ensaios, a Figura 19 ilustra o equipamento com maiores detalhes.

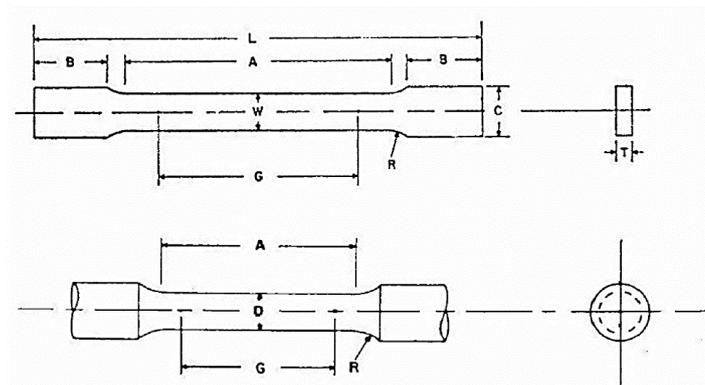
Figura 19 – Desenho esquemático de uma máquina universal de ensaios



Fonte: <http://mecanica-blog.blogspot.com.br>, adaptado pelo autor (2016).

De acordo com a norma ASTM E8, os corpos de prova apresentam secção retangular ou circular, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20 – Desenho esquemático de corpo de prova



Fonte: ASTM E8, adaptado pelo autor (2016).

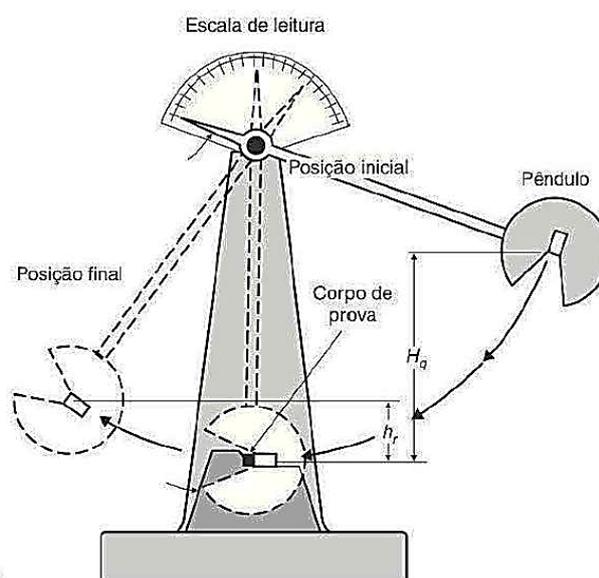
2.5.2 Ensaio Charpy

Segundo Garcia et al. (2012, p. 246), o ensaio de impacto charpy “é um ensaio dinâmico empregado para a análise da fratura frágil de materiais”. O resultado obtido neste ensaio corresponde a um valor de energia absorvida pelo corpo de prova até o momento que ocorrer a ruptura.

A norma ASTM E23 é responsável pela padronização destes métodos de ensaio. O ensaio de Charpy é utilizado especificamente para analisar o comportamento dos metais quando submetido a um elevado impacto, podendo ocorrer em caso de temperaturas altas ou baixas. Este ensaio tem como objetivo verificar a probabilidade de ocorrer fratura frágil no material com maior precisão.

Conforme Garcia et al. (2012), a carga utilizada para a ruptura do corpo de prova é gerada por meio do impacto de um martelo pendular, que está posicionado e fixado a uma altura (H_q), que é padronizado conforme norma ASTM E23. Quando liberado o pêndulo, sua extremidade choca-se e fratura o corpo de prova no entalhe. Após o choque, o pêndulo continua seu movimento até uma altura (h_f), o qual é menor que a altura H_q . A diferença entre as alturas H_q e h_f , corresponde a energia absorvida pelo corpo de prova. Para melhor entendimento a Figura 21 ilustra esquematicamente o equipamento utilizado e as referidas alturas.

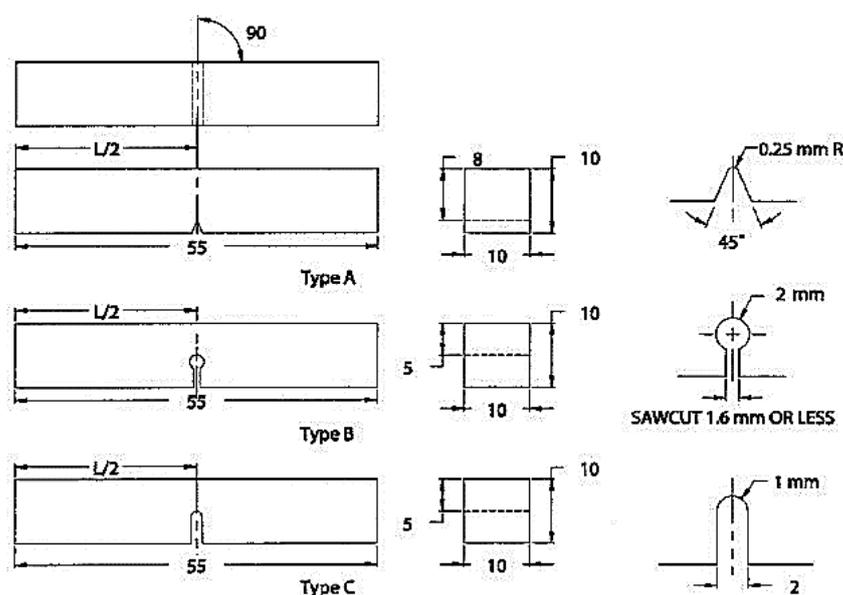
Figura 21 – Desenho esquemático ensaio Charpy



Fonte: Garcia et al. (2012).

Conforme norma ASTM E23, os corpos de prova utilizados para o ensaio Charpy são padronizados em três diferentes configurações de entalhe, conforme demonstrado na Figura 22. Estes são classificados em tipo A (entalhe em forma de V), tipo B (entalhe na forma de buraco de fechadura) e tipo C (entalhe na forma de U).

Figura 22 – Corpo de prova Charpy conforme norma ASTM E23



Fonte: ASTM E23, adaptada pelo autor (2016).

2.5.3 Ensaio de dobramento guiado

O ensaio de dobramento consiste em submeter o corpo de prova a deformação plástica por flexão. Este ensaio é utilizado como indicação qualitativa da ductilidade do material na junta soldada. Mediante o ensaio é possível verificar problemas metalúrgicos de soldagem, como por exemplos: trincas, mordeduras ou falta de penetração.

Segundo a norma ASME V (*American Society of Mechanical Engineers*), responsável pela padronização do ensaio de dobramento guiado, segue os seguintes quesitos:

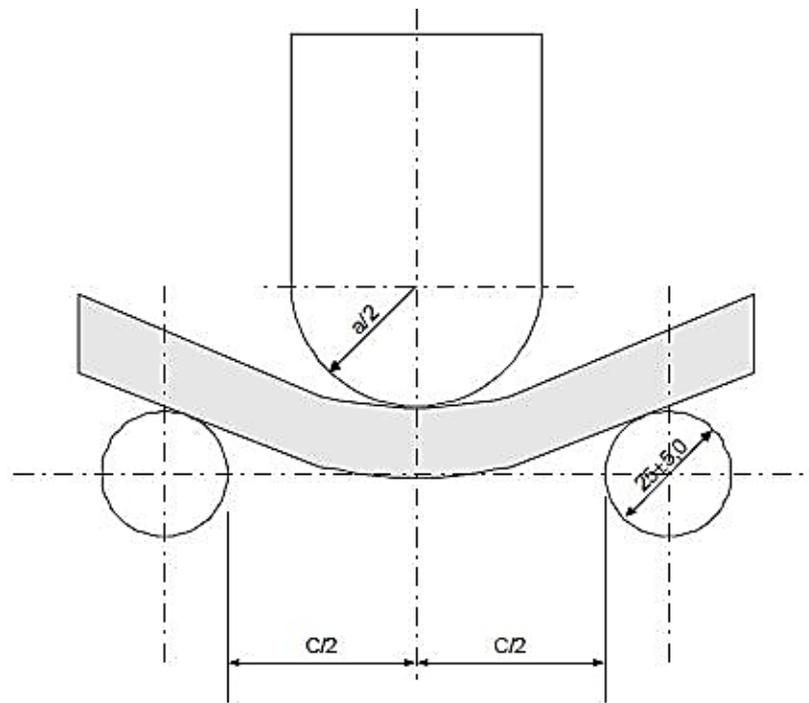
- O corpo de prova deve ser centrado entre os apoios e submetido a carga do cutelo. A carga somente será removida quando for impossível

inserir um fio de um milímetro entre as extremidades do corpo de prova e as superfícies laterais do cutelo;

- Para satisfazer o ensaio de dobramento não deveram existir trincas ou falhas medindo mais que três milímetros em qualquer direção na superfície do corpo de prova. Não serão consideradas as trincas junto às bordas, desde que não sejam maior que seis milímetros e que sejam causadas por inclusão de escória ou por defeitos internos do material.

Conforme a norma ASME V, a distância entre centros dos suportes e o diâmetro do cutelo são determinado em relação a espessura do corpo de prova a ser utilizado, conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Dispositivo para ensaio de dobramento

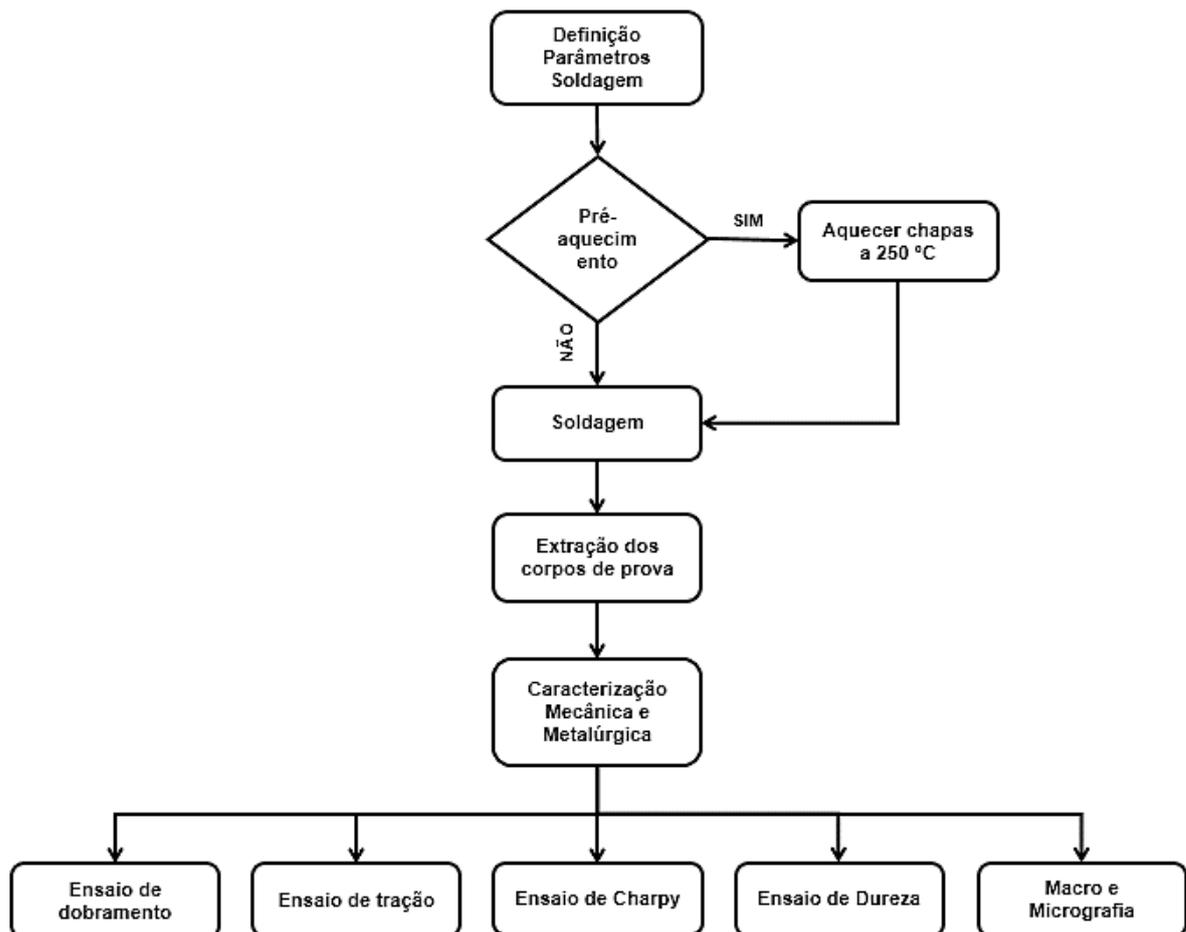


e (mm)	a (mm)	c (mm)
3,2 ± 0,2	13,0	22,8
3,7 ± 0,2	15,0	25,8
6,2 ± 0,2	25,0	40,8
7,5 ± 0,2	30,8	48,4
10,0 ± 0,2	40,0	63,4
e = espessura do corpo-de-prova		

3 METODOLOGIA

A seguir, será descrito brevemente a metodologia utilizada neste trabalho, assim como os ensaios propostos, materiais e equipamentos utilizados. A Figura 24 apresenta o fluxograma das etapas desenvolvidas.

Figura 24 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Do autor (2017).

3.1 Material

O material utilizado neste trabalho foram duas chapas de aços SAE 1045 com dimensões de 3/8" (9,52 mm) de espessura, 250 milímetros de largura e 360 milímetros de comprimento, as quais foram bipartidas para realização da soldagem.

O aço SAE 1045 é conhecido por conter boas propriedades mecânicas, devido sua composição química. As Tabelas 6 e 7 apresentam os valores referentes a composição química e as propriedades do material.

Tabela 6 – Composição química do aço SAE 1045 [% em peso]

%C	%Mn	%Pmáx.	%Smáx.	%Si
0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,040	0,050	0,10 – 0,60

Fonte: ABNT NBR 87/2000, adaptado pelo autor (2017).

Tabela 7 – Propriedade mecânica do aço SAE 1045

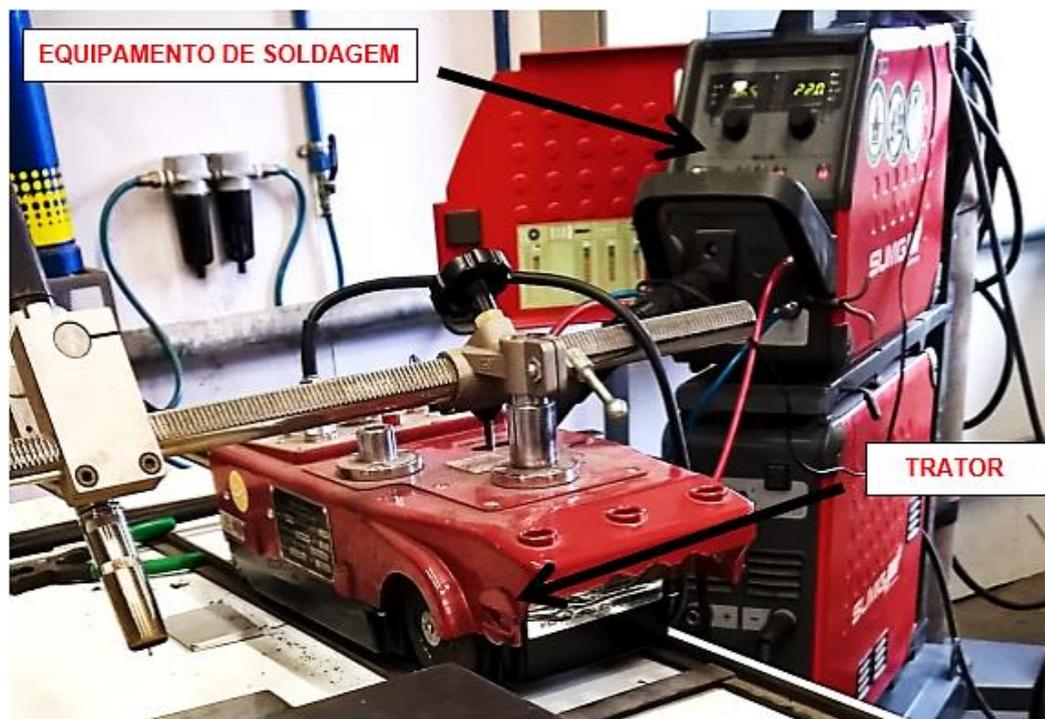
Limite de elasticidade (GPa)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)
250	310	560	17

Fonte: <http://www.acoespecial>, adaptado pelo autor (2017).

3.2 Equipamento de soldagem

O equipamento utilizado para a realização das soldas foi da marca SUMIG, modelo SIGMA 500. A soldagem deste trabalho foi do tipo mecanizada, utilizando-se um equipamento para suportar e movimentar a tocha de soldagem chamado de trator da marca SUMIG, modelo AUTOTRACK30. A Figura 25 mostra o equipamento de soldagem e o trator utilizado.

Figura 25 – Equipamentos de soldagem



Fonte: Do autor (2017).

3.3 Consumíveis

O arame-eletrodo utilizado neste trabalho é o AWS ER70S-3 com diâmetro de 1 milímetro. Este tipo de arame é muito utilizado na soldagem MIG/MAG de aços em geral e com espessuras diversas. A Tabela 8 apresenta a composição química do arame.

Tabela 8 – Composição química (% em peso) do arame AWS ER70S-3

% C	% Si	% Mn	% P	% S	%Cu
Carbono	Silício	Manganês	Fósforo	Enxofre	Cobre
0,06 a 0,15	0,45 a 0,75	0,90 a 1,40	0,025 máx.	0,025 máx.	0,5 máx.

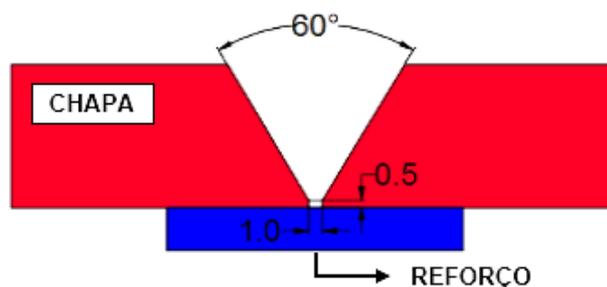
Fonte: Catalogo Belgo Bekaert Arames, adaptado pelo autor (2017).

Conforme citado na bibliográfica, o gás de proteção utilizado para a soldagem foi uma mistura com composição de 82% de argônio e 18% de CO₂.

3.4 Junta de soldagem

A configuração geométrica da junta utilizada na soldagem das chapas de aço SAE 1045 foi do tipo chanfro em V com uso de reforço. A Figura 26 apresenta as dimensões em milímetros do chanfro da junta soldada.

Figura 26 – Junta de chanfro em V com reforço



Fonte: Do autor (2017).

A usinagem para obtenção do chanfro na extremidade das chapas foi por meio do uso de fresadora, a qual se encontra instalada no laboratório de usinagem da UNIVATES. A Figura 27 demonstra o processo de fresamento do chanfro.

Figura 27 – Usinagem da junta de chanfro em V



Fonte: Do autor (2017).

3.5 Pré-aquecimento

O pré-aquecimento das chapas foi realizado através de um forno da marca JUNG, modelo 96120, com potência de 16 kW. A Figura 28 mostra o equipamento instalado no laboratório de usinagem da instituição UNIVATES.

Figura 28 – Forno JUNG modelo 96120



Fonte: Do autor (2017).

A definição da temperatura de pré-aquecimento utilizada neste trabalho, foi em função do carbono equivalente (Ceq) do material, o qual este pode ser determinado por meio da composição química. Assim, conforme Tabela 3 e a Equação 1, o aço SAE 1045 possui em média Ceq igual a 0,59%. Correlacionado o Ceq na Tabela 2 encontramos uma temperatura de pré-aquecimento de 250°C, o qual foi a temperatura escolhida para a soldagem com pré-aquecimento.

As chapas submetidas ao processo de soldagem com pré-aquecimento foram aquecidas até uma temperatura de 300°C. Esse sobreaquecimento foi necessário para posiciona adequadamente as chapas para a operação de soldagem. Para o controle da temperatura das chapas foi utilizado por um pirômetro ótico da marca Fluke, modelo MAX 62. Assim, quando a temperatura atingiu 250°C foi realizada a soldagem, conforme mostra Figura 29.

Figura 29 – Temperatura de pré-aquecimento



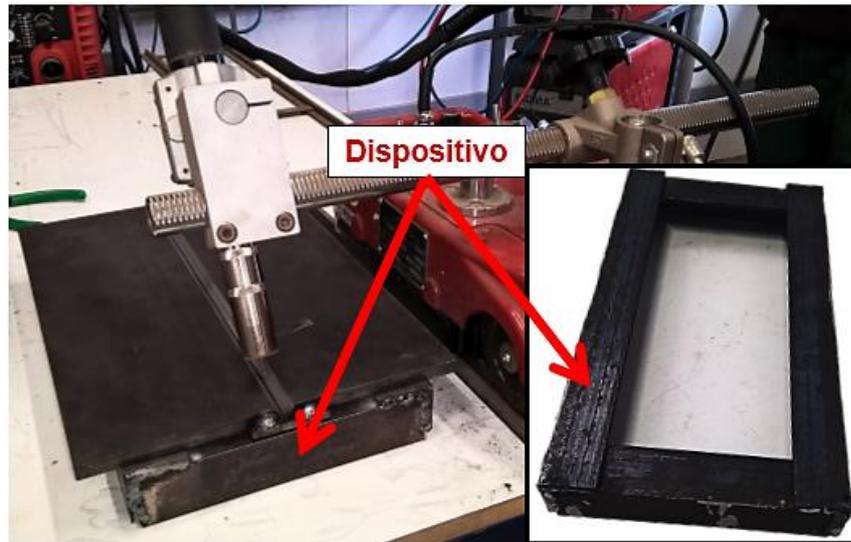
Fonte: Do autor (2017).

3.6 Soldagem

3.6.1 Dispositivo de fixação

Para um melhor suporte e posicionamento das chapas, foi desenvolvido um dispositivo com uso de cantoneiras. O dispositivo além de ser utilizado como apoio para as chapas, também serviu como meio de fixação, reduzindo a possibilidade de distorções térmicas “empenamento”. A fixação das chapas no dispositivo foi através de pontos de solda, realizados na face inferior da chapa. A Figura 30 mostra as chapas montadas sobre o dispositivo.

Figura 30 – Dispositivo de fixação



Fonte: Do autor (2017).

3.6.2 Definição de parâmetros

A primeira etapa prática do trabalho foi a definição de parâmetros. Com objetivo de obter o conjunto de parâmetros que resulta em uma união soldada de boa qualidade, foram realizadas diversas tentativas de soldagem em chapas testes.

Sabe-se que em um processo de soldagem a arco, existem diversos parâmetros que influenciam o processo de soldagem MIG/MAG e consequentemente as propriedades mecânicas da união soldada. A Figura 31 apresenta os principais parâmetros controlados.

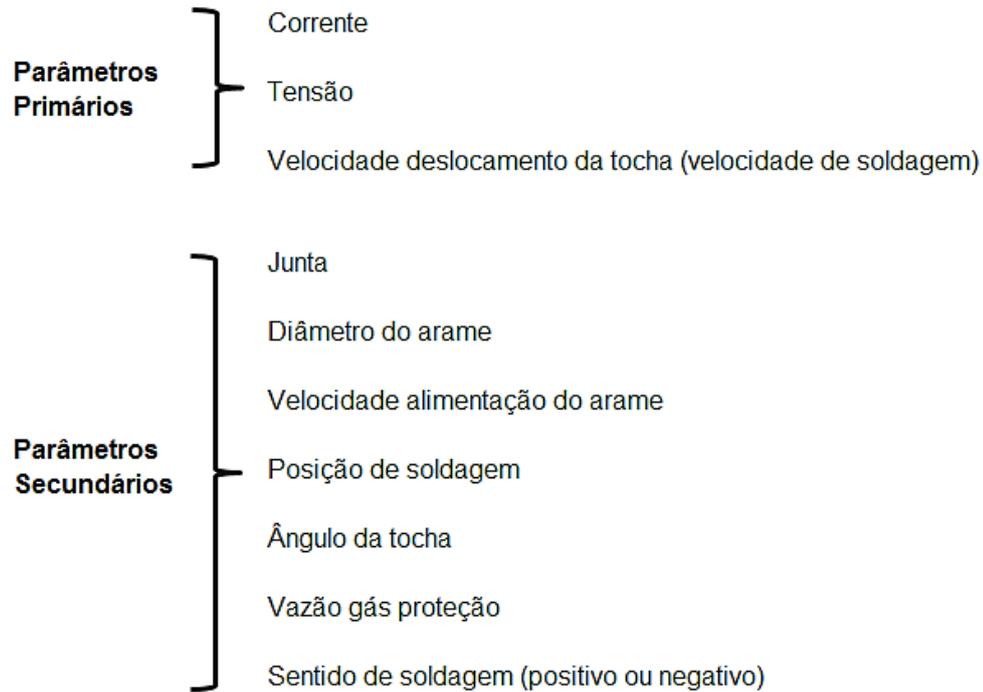
Neste trabalho foram adotados parâmetros obtidos na literatura conforme a Tabela 9, somente alterando os parâmetros primários, diâmetro do arame e dimensões da junta para a definição dos parâmetros de soldagem.

Tabela 9 – Parâmetros de soldagem padrão

Junta	Posição de soldagem	Ângulo da tocha	Sentido de soldagem	Vazão gás
Chanfro em V de 60°	Vertical	25°	Positivo “puxando a tocha”	15 L/min

Fonte: autor (2017).

Figura 31 – Principais parâmetros de soldagem



Fonte: Do autor (2017).

3.6.2.1 Análise de soldagem

Foi realizada a soldagem nas chapas teste em sete condições diferentes, com objetivo de encontrar os melhores parâmetros de soldagem. A Tabela 10 traz os valores para cada parâmetro utilizado. A letra E significa o espaçamento entre as chapas e a letra N significa o nariz da junta.

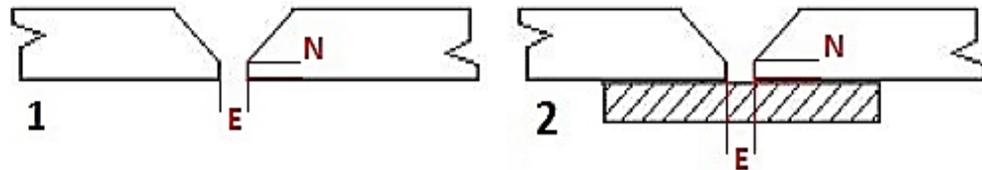
Tabela 10 – Definição dos parâmetros

Solda Nº	Junta		Ø arame	Corrente	Tensão	Veloc. Desloc.	
	Tipo	E					N
1	1	1 mm	1 mm	0,8 mm	160 A	21 V	2 mm/s
2	1	1 mm	1 mm	0,8 mm	140 A	20,4 V	1 mm/s
3	1	0,3 mm	0,5 mm	1 mm	155 A	21,5 V	1,5 mm/s
4	1	0,3 mm	0,5 mm	1 mm	148 A	21,3 V	1,5 mm/s
5	1	0,3 mm	0,5 mm	1 mm	152 A	21,4 V	1,5 mm/s
6	2	1 mm	0,5 mm	1 mm	160 A	22 V	1 mm/s
7	2	1 mm	0,5 mm	1 mm	165 A	22 V	1 mm/s

Fonte: autor (2017).

A junta soldada também sofreu alteração nas suas dimensões, como o espaçamento e a altura do nariz. A Figura 32 apresenta as duas juntas utilizadas na definição dos parâmetros.

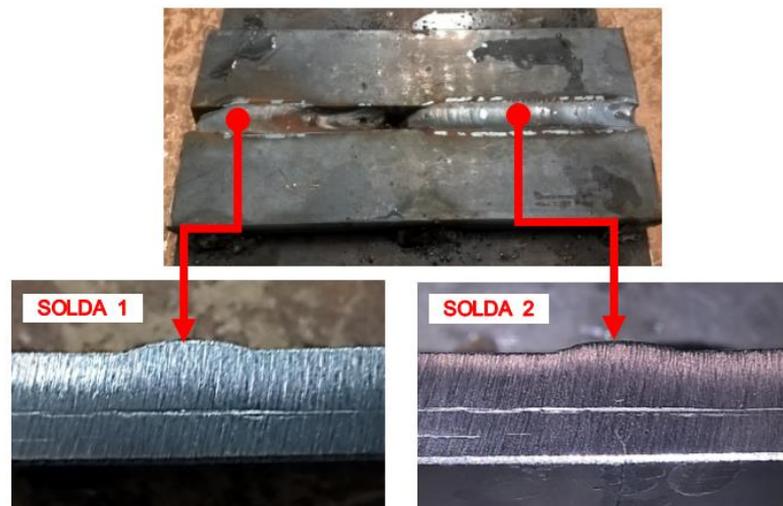
Figura 32 – Dimensões das juntas



Fonte: Do autor (2017).

As soldas 1 e 2 foram realizadas com arame de diâmetro 0,8mm. Nestas soldas não ocorreram uma boa fusão do material de adição com o metal base e uma baixa taxa de deposição de material. Na solda 1 a poça de fusão acabou transpassando o metal base e na solda 2 ocorreu falta de penetração e de fusão, conforme Figura 33.

Figura 33 – Definição de parâmetros (soldas 1 e 2)



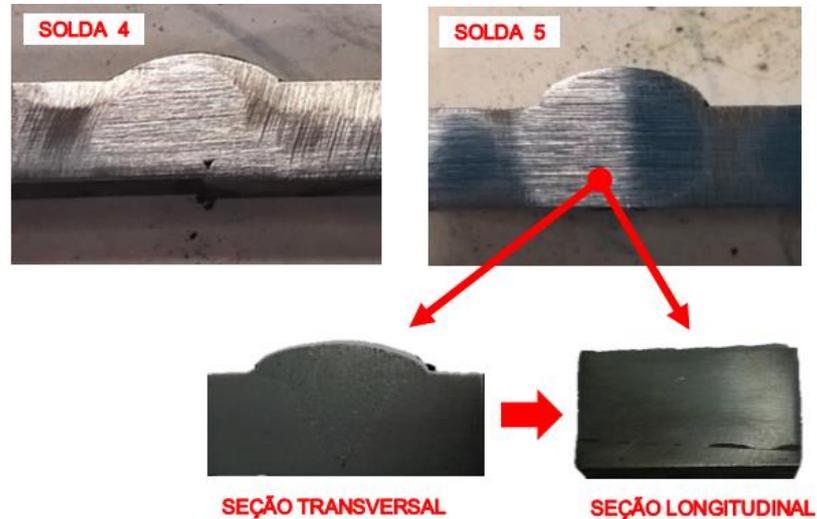
Fonte: Do autor (2017).

Para que ocorresse uma maior taxa de deposição de material e aumento na penetração, o rolo de arame foi substituído por um de diâmetro maior, com 1mm de diâmetro e foi diminuído o espaçamento entre as chapas.

Na solda 3, o metal base novamente acabou furando devido elevada energia de soldagem, assim foi diminuído a corrente. As soldas 4 e 5 tiveram boa aparência

superficial na face do cordão, porém quando cortado o cordão de solda, pode-se observar a falta de penetração e vazios ao longo da solda 4 e intermitente na solda 5, como pode ser observado na Figura 34.

Figura 34 – Definição de parâmetros (solda 4 e 5)



Fonte: Do autor (2017).

Nas soldas 6 e 7 foi aumentado a corrente de soldagem para se ter uma maior penetração da solda e utilizado uma chapa de reforço na parte inferior da junta, uma técnica comum para dar suporte a poça de fusão. Aumentou-se também o espaçamento entre as chapas e diminuiu-se a velocidade de soldagem. A velocidade de soldagem foi reduzida para que a poça de fusão possa preencher adequadamente o chanfro, obtendo penetração completa e ausência de defeitos. Desta forma, as soldas 6 e 7 apresentaram uma ótima união soldada, a solda 7 foi a que apresentou melhor penetração, assim seus parâmetros foram adotados para este trabalho. A Figura 35 mostra a macrografia da união soldada das soldas 6 e 7.

Figura 35 – Definição de parâmetros (soldas 6 e 7)



Fonte: Do autor (2017).

3.6.3 Parâmetros de soldagem

Para a proteção gasosa do arco elétrico utilizou-se uma mistura de 82% Argônio e 12% de CO₂ com vazão de 15 L/min. Foi utilizado uma corrente contínua de 165A, com polaridade positiva e voltagem de 22V. A processo foi realizado com auxílio de um trator (soldagem mecanizada), com velocidade de soldagem de aproximadamente 1 mm/s. A partir destes parâmetros, resultou em um aporte térmico de 2,9 kJ/mm.

A partir dos parâmetros definidos, as chapas foram submetidas o processo de soldagem, com e sem pré-aquecimento, conforme Figura 36.

Figura 36 – Chapas SAE 1045 soldada



Fonte: Do autor (2017).

3.7 Preparação dos corpos de prova

As chapas soldadas foram submetidas ao processo de usinagem por fresamento, com objetivo de remover o reforço do cordão de solda, conforme ilustrado na Figura 37.

Figura 37 – Remoção reforço do cordão de solda

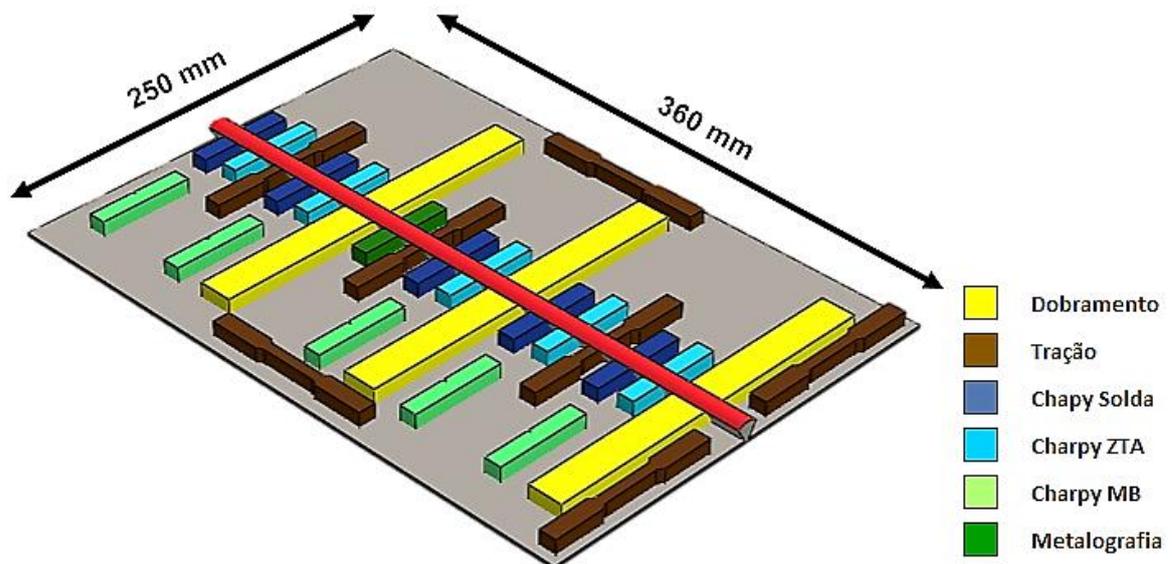


Fonte: Do autor (2017).

Os corpos de prova foram extraídos das chapas soldadas através do processo de corte a plasma.

A disposição dos corpos de prova para os ensaios de dobramento, tração, Charpy-V e metalografia, foram no sentido transversal ao cordão de solda. A disposição dos corpos de prova nas chapas soldadas está representada na Figura 38.

Figura 38 – Disposição dos corpos de prova



Fonte: Do autor (2017).

Na Tabela 11 segue o número de corpos de prova extraídos das chapas soldadas para cada ensaio e posição de extração.

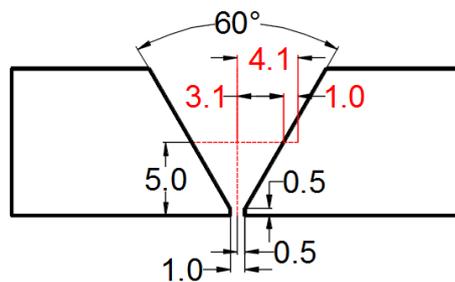
Tabela 11 – Corpos de prova (CP)

Metalografia	Ensaio de Tração		Ensaio de Dobramento	Charpy - V		
	Metal Base	Metal de solda	Metal de solda	Metal de solda	ZTA	Metal Base
1 cp	4 cp	3 cp	3 cp	5 cp	5 cp	5 cp

Fonte: Do autor (2017).

A localização do entalhe nos corpos de prova para o ensaio de Charpy-V da ZTA, foi determinado conforme análise apresentada em bibliografia. Em seu trabalho, Costa (2014) demonstra que o entalhe fica localizado à 1 mm da linha de fusão. Então, foi adotado a localização do entalhe para o corpo de prova de Charpy-V da ZTA à 1mm da linha do chanfro, à meia espessura da chapa. A Figura 39 apresenta o centro do corpo de prova de Charpy-V da ZTA, ou localização do entalhe, afastado a 4,1mm do centro da solda.

Figura 39 – Posicionamento do entalhe no ensaio de Charpy V na ZTA

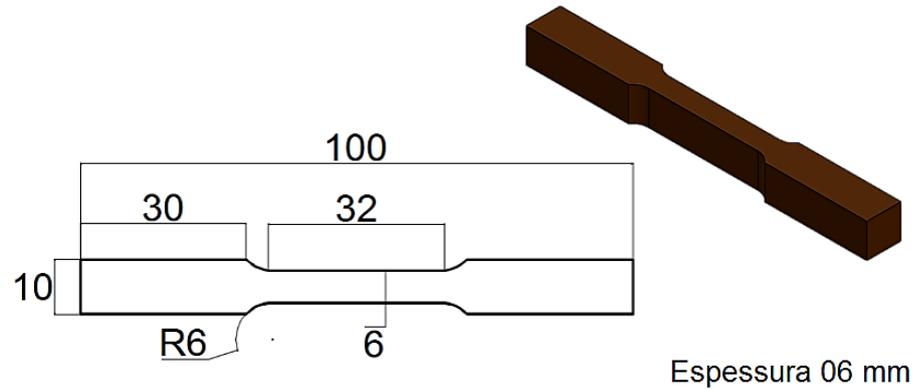


Fonte: Do autor (2017).

3.8 Ensaio de tração

Neste trabalho foram utilizados corpos de prova de seção retangular, conforme a norma ASTM E8 (2010). Os corpos de prova seguiram o modelo reduzido, possuindo as dimensões ilustradas na Figura 40.

Figura 40 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração



Fonte: ASTM E8/E8M, modificado pelo autor (2017).

Foram realizados ensaios de tração em cinco corpos de prova, dois no metal base (um na longitudinal e outro na transversal) e três no metal de solda (perpendicular ao cordão de solda). Todos os ensaios foram realizados em temperatura ambiente.

O equipamento utilizado para ensaio de tração foi da marca Pantec, modelo VERSAT, disposta na instituição UNIVATES, conforme Figura 41. A máquina de tração possui célula de carga com capacidade de 100 kN, sendo controlada pelo software PANAMBRA.

Figura 41 – Máquina universal de tração Pantec, modelo VERSAT

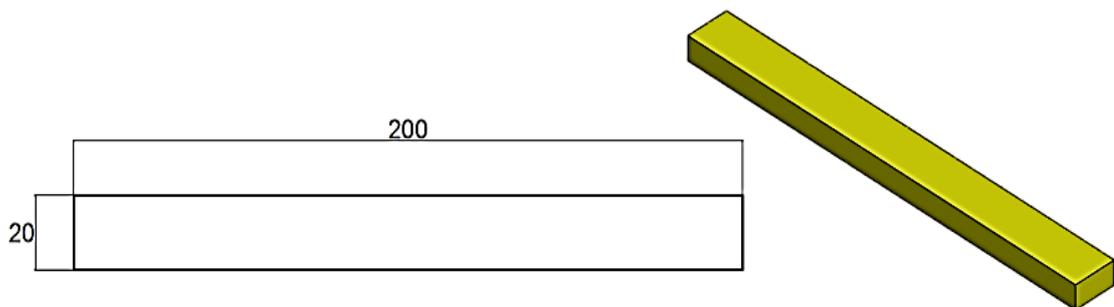


Fonte: Do autor (2017).

3.9 Ensaio de dobramento

No ensaio de dobramento, foram extraídos três corpos de prova retangulares, transversalmente ao cordão de solda. As dimensões dos corpos de prova são ilustrados na Figura 42.

Figura 42 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de dobramento



Fonte: ASME V, modificado pelo autor (2017).

Os ensaios de dobramento ocorreram conforme método utilizado para dobramento de raiz. A norma ASME V cita que o corpo de prova deverá ser submetido a uma carga gerada pelo cutelo até o surgimento de algum defeito ou que apresente a curvatura de 180°. Nos casos em que o corpo de prova não chegar a 180°, devido surgimento de algum defeito, será medido o ângulo do corpo de prova. Esta medição ocorreu mediante uso de projetor de perfil da marca Pantec, modelo PPV-3025-15D, instalado no Laboratório da UNIVATES, ilustrado na Figura 43.

Figura 43 – Projetor de perfil Pantec, modelo PPV-3025-15D



Fonte: www.revistaih.com, modificado pelo autor (2017).

O equipamento utilizado no ensaio de dobramento será o mesmo que o de ensaio de tração, sendo que foi desenvolvido um dispositivo conforme norma ASME V. A Figura 44 ilustra o dispositivo a ser utilizado para o ensaio de dobramento de raiz.

Figura 44 – Dispositivo de dobramento de raiz

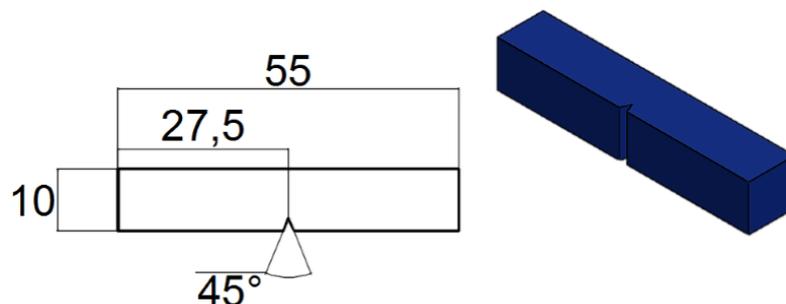


Fonte: Do autor (2017).

3.10 Ensaio de Charpy-V

O ensaio de impacto Charpy-V será realizado em temperatura ambiente de acordo com o procedimento estabelecido pela norma ASME E23. Os corpos de prova extraídos seguiram o modelo tipo A, com dimensões representadas na Figura 45.

Figura 45 – Dimensões do corpo de prova para ensaio Charpy-V



Fonte: ASMT E23, modificado pelo autor (2017).

3.11 Ensaio metalográfico

O corpo de prova utilizado no ensaio metalográfico, foi extraído no sentido transversal ao cordão de solda, com seguintes dimensões de 55 x 10 x 9,5 mm.

3.11.1 Ensaio macrográfico

A amostra para a macrografia foi lixada obedecendo a ordem granulométrica das lixas: 120, 220, 320 e 400 *mesh*. Após esta etapa, a amostra foi submetida ao ataque com Nital 5% durante 10 segundos. Este processo tem por objetivo revelar a macroestrutura da junta soldada, permitindo uma inspeção visual, a fim de verificar a extensão da ZTA e se ocorreu a penetração total na junta soldada.

3.11.2 Ensaio micrográfico

Para a análise micrográfica, os corpos de prova que foram submetidos ao ensaio macrográfico passaram novamente pelo processo de lixamento, mediante lixas de granulometria na sequência 600 e 1200 *mesh*. Após o lixamento, as amostras foram submetidas ao polimento com uso de pastas abrasivas de alumina e posteriormente ao ataque químico por imersão com Nital 2 % durante 5 segundos.

A observação da microestrutura de cada região da junta soldada foi realizada em um microscópio ótico de marca Pantec, modelo MKS, com aumentos de, 100X, 500X e 1000X.

3.11.3 Ensaio de microdureza vickers

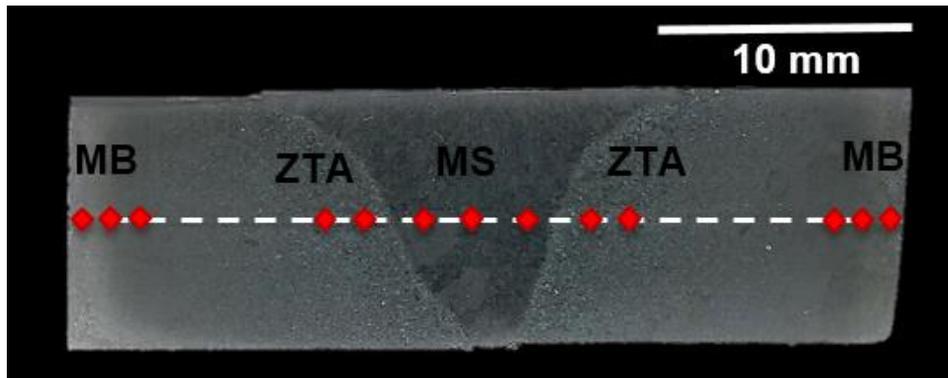
A partir do corpo de prova utilizado para as análises metalográficas (macrografia e micrografia) foi realizado o ensaio de microdureza.

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado utilizando um Microdurômetro Pantec modelo HXD-1000MT. Utilizou-se o modelo de ensaio HV0,5 disponível no equipamento, aplicando-se uma carga de 0,5 Kgf num período de 10 segundos. O

distanciamento entre as endentações seguiu conforme norma ASTM E384, sendo de 2,5 vezes a diagonal do prisma formado pelo penetrador.

Para análise da microdureza, foram analisados três pontos próximo ao metal base, três pontos no metal de solda e dois pontos na ZTA, a meia espessura da chapa. A Figura 46 demonstra os pontos analisados no ensaio de microdureza.

Figura 46 – Disposição análise microdureza



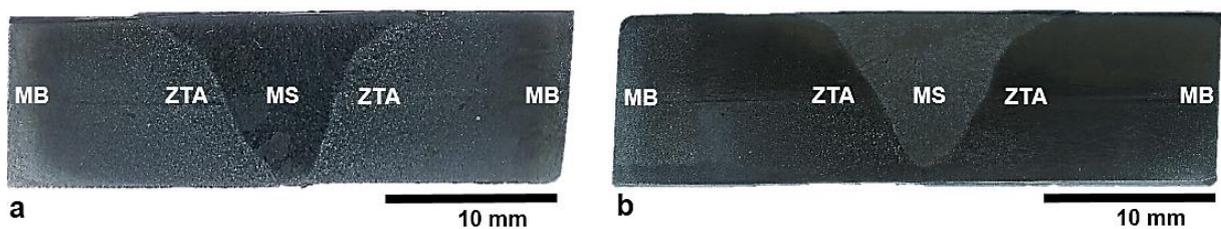
Fonte: Do autor (2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise macrográfica

A Figura 47 apresenta a macrografia das amostras das juntas soldadas do aço SAE 1045 com pré-aquecimento e sem pré-aquecimento.

Figura 47 – Macrografia das juntas soldadas (a) com pré-aquecimento (b) sem pré-aquecimento



Fonte: Do autor (2017).

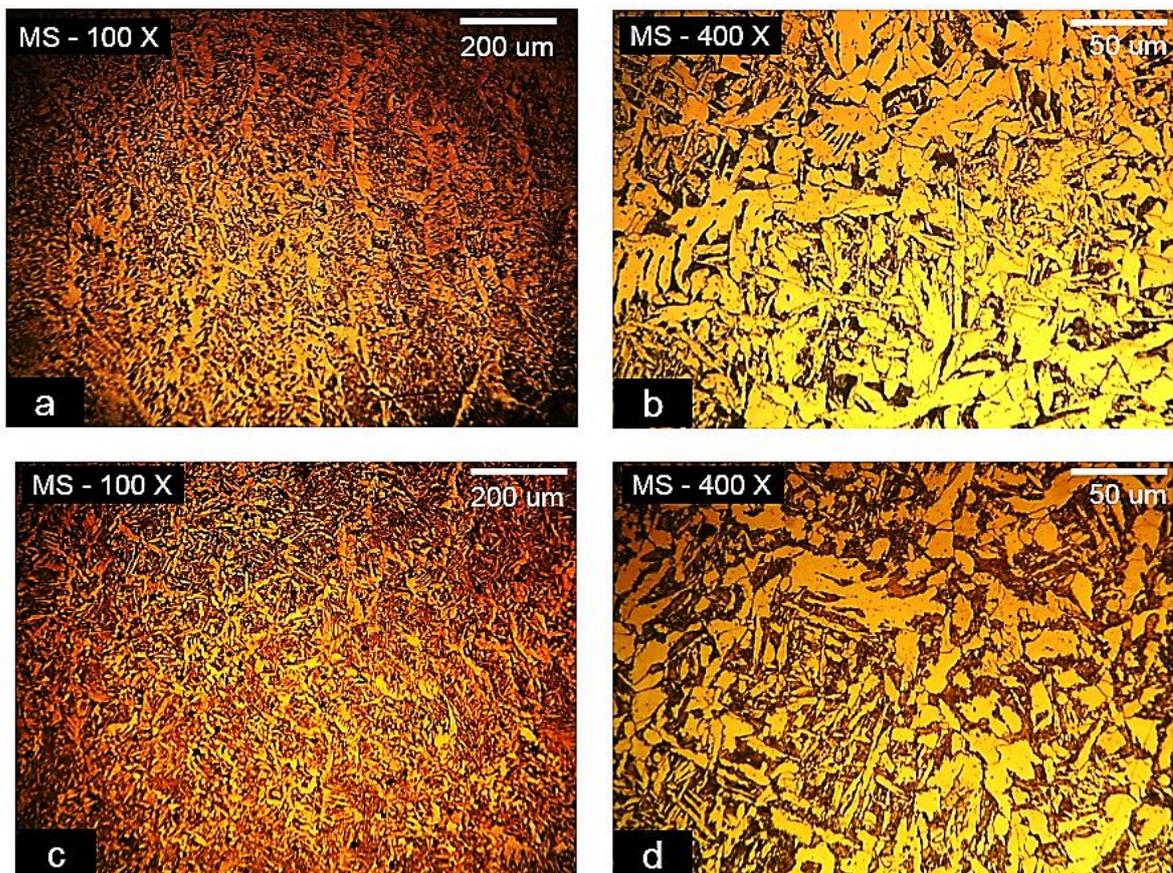
Foi observada na Figura 47a representada pela macrografia da junta soldada com pré-aquecimento, uma boa penetração da solda na chapa. Observa-se nitidamente a ZTA contornando o metal de solda, possuindo aparência de estrutura mais grosseira.

Na Figura 47b representada pela macrografia da junta soldada sem pré-aquecimento, observa-se uma penetração de solda inferior quando comparada com a junta soldada com pré-aquecimento. A ZTA desta macrografia não ficou tão evidente quanto a com pré-aquecimento. Teoricamente a ZTA da junta soldada sem pré-aquecimento deverá ser de menor em extensão, porém, apresentará uma maior dureza devido ter ocorrido tempera por haver uma maior taxa de resfriamento.

4.2 Micrografia

A Figura 48 apresenta a microestrutura da junta soldada no metal de solda com pré-aquecimento (48a e 48b) e sem pré-aquecimento (48c e 48d). Na Figura 48b podemos observar a grande presença de ferrita acicular envolvendo os carbonetos, já na soldagem sem pré-aquecimento, Figura 48d, observa-se uma maior presença de carbonetos.

Figura 48 – Micrografia metal de solda: (a-b) com pré-aquecimento e (c-d) sem pré-aquecimento

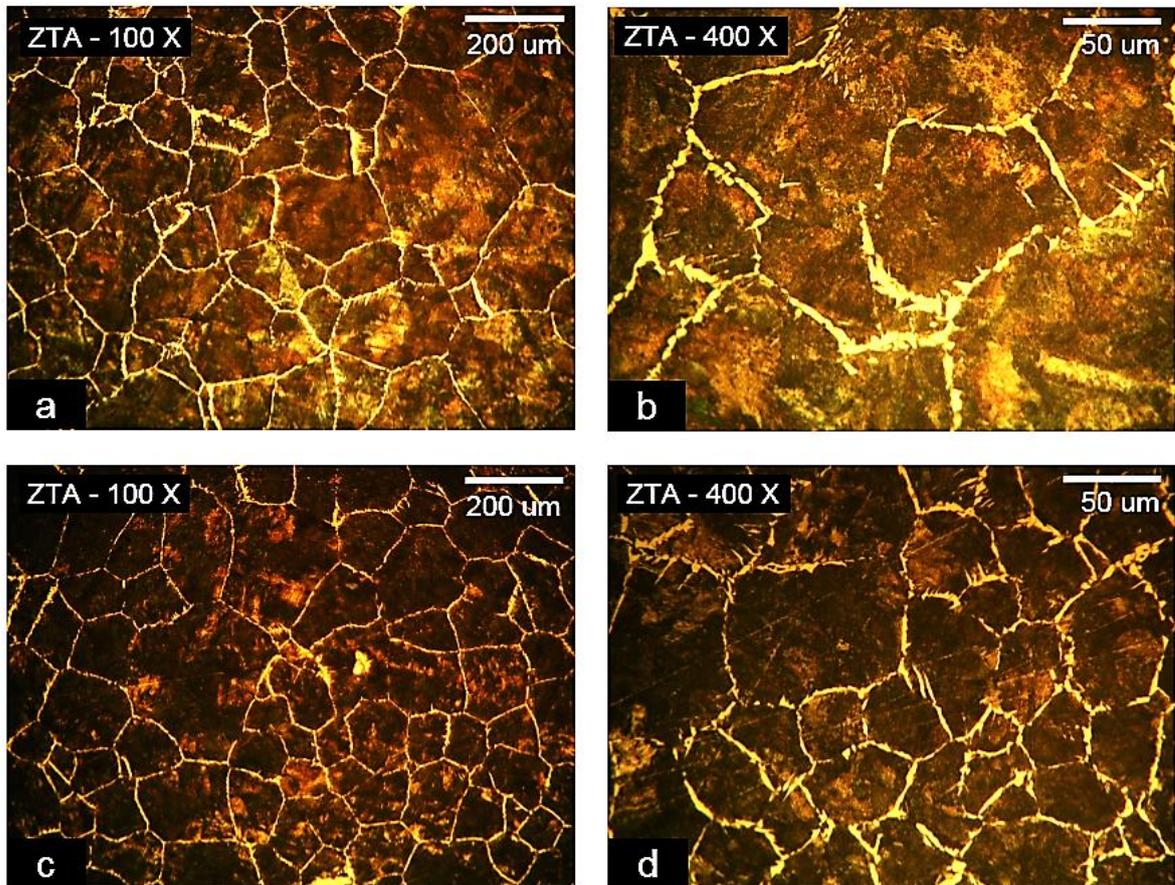


Fonte: Do autor (2017).

A Figura 49a apresenta a microestrutura da ZTA com pré-aquecimento. Nesta é possível identificar claramente os contornos de grão da microestrutura, constituindo na sua maioria de tamanho grande, quando comparado com a sem pré-aquecimento na Figura 49c. Ambas microestruturas são constituídas de uma fina lamela de ferrita no contorno de grão, a parte clara, e colônias de martensita, na parte escura. Porém, a lamela de ferrita da junta com pré-aquecimento é mais

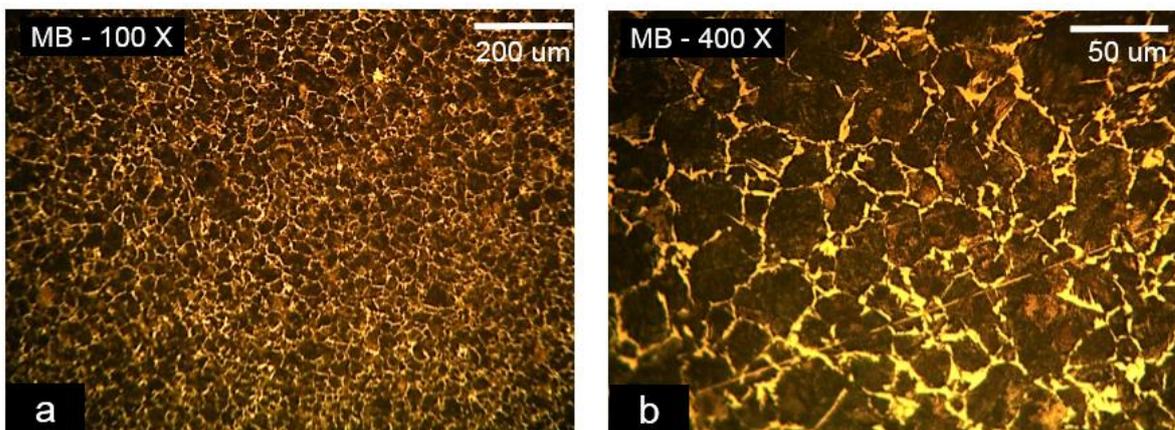
espessa do que a sem pré-aquecimento, devido a diferença da taxa de resfriamento, conforme Figuras 49b e 49d.

Figura 49 – Micrografia ZTA: (a-b) com pré-aquecimento e (c-d) sem pré-aquecimento



Fonte: Autor (2017).

Figura 50 – Micrografia metal base



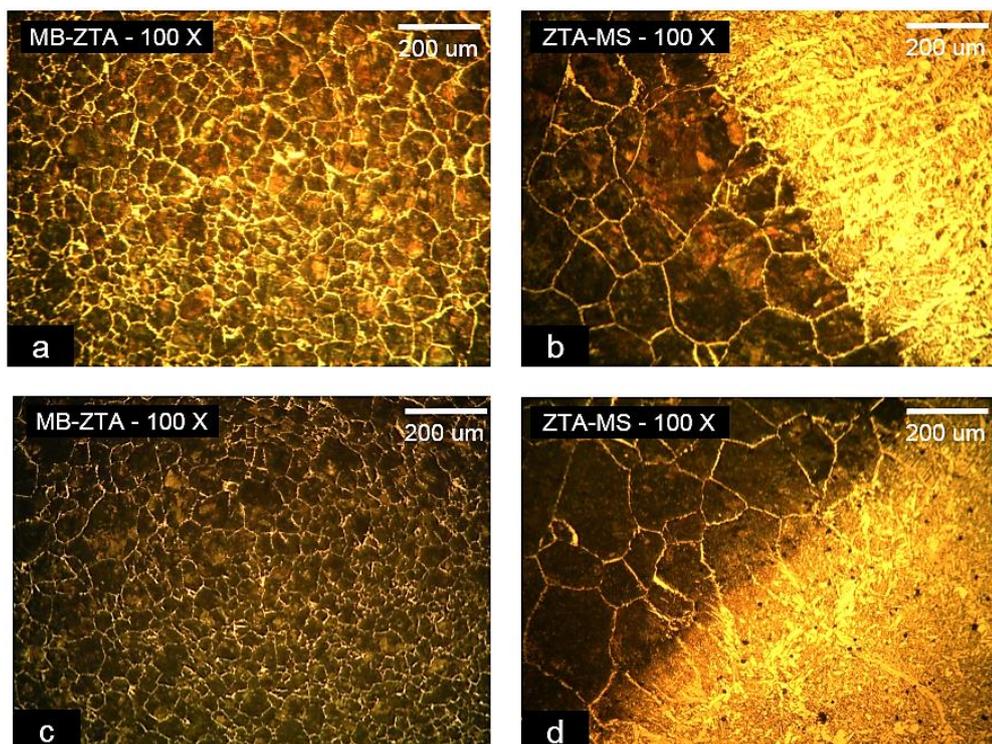
Fonte: Do autor (2017).

A microestrutura do metal base, Figura 50, apresentou características semelhantes a da microestrutura da ZTA, contendo finas lamelas de ferrita nos contornos de grão e colônias de perlita. Verifica-se que o tamanho de grão nesta microestrutura é relativamente menor, assemelhando-se a microestrutura padrão do aço SAE 1045.

A transição entre o metal base e a ZTA apresentado nas Figuras 51a e 51b não é tão perceptível, pois, a microestrutura é composta pelos mesmos constituintes, somente alterando o tamanho de grão. Observa-se maior incidência de lamela de ferrita no processo de soldagem com pré-aquecimento, Figura 51a.

É nítida a transição da ZTA para o metal de solda, devido que o metal de solda é composto por ferrita acicular e carbonetos possuindo aparência mais clara, já a ZTA é composta por matriz ferrítica e martensitas com uma aparência mais escura, conforme Figuras 51b e 51d. Observa-se na Figura 51b (com pré-aquecimento) uma maior penetração do metal de solda na ZTA do que na solda sem pré-aquecimento, Figura 51d.

Figura 51 – Micrografia das transições entre regiões da junta soldada: (a-b) com pré-aquecimento e (c-d) sem pré-aquecimento



Fonte: Do autor (2017).

4.3 Microdureza Charpy

A Tabela 12 apresenta os valores de microdureza obtidos nos ensaios conforme descrito na metodologia.

Tabela 12 – Microdureza das amostras analisadas

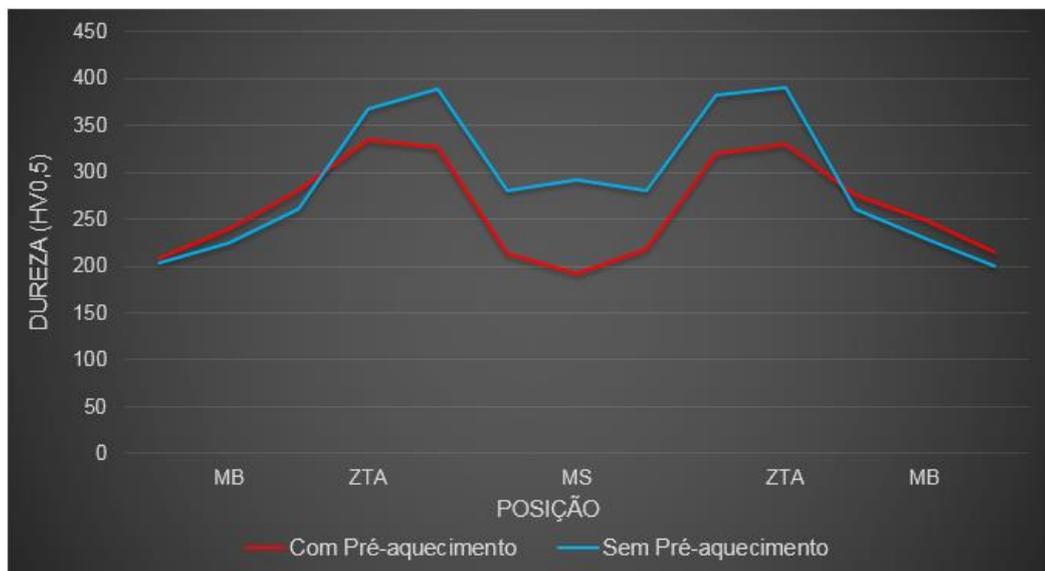
SOLDA	MB			ZTA		MS			ZTA		MB		
	1	2	3	1	2	1	2	3	1	2	1	2	3
Com Pré-aquecimento	208	240	280	335	326	213	192	218	320	330	275	250	215
Sem Pré-aquecimento	203	225	260	368	388	281	292	280	382	390	260	230	200

Fonte: Do autor (2017).

Os valores obtidos de microdureza no metal base são próximos aos tabelados para os aços SAE 1045.

Comparando os dois processos de soldagem e considerando que o corte a plasma tenha influenciado ambos os corpos de prova. Os valores obtidos de microdureza para a ZTA e metal de solda provam que a soldagem sem pré-aquecimento acaba gerando uma maior dureza nestas áreas. O Gráfico 1 apresenta a diferença da dureza nestas duas regiões, conforme valores da Tabela 12.

Gráfico 1– Microdureza das juntas com pré-aquecimento e sem pré-aquecimento



Fonte: Do autor (2017).

4.4 Ensaio de tração

A Tabela 13 apresenta os valores de resistência máxima e de alongamento obtidos nos ensaios de tração. Somente foram analisados duas amostras para cada orientação do metal base.

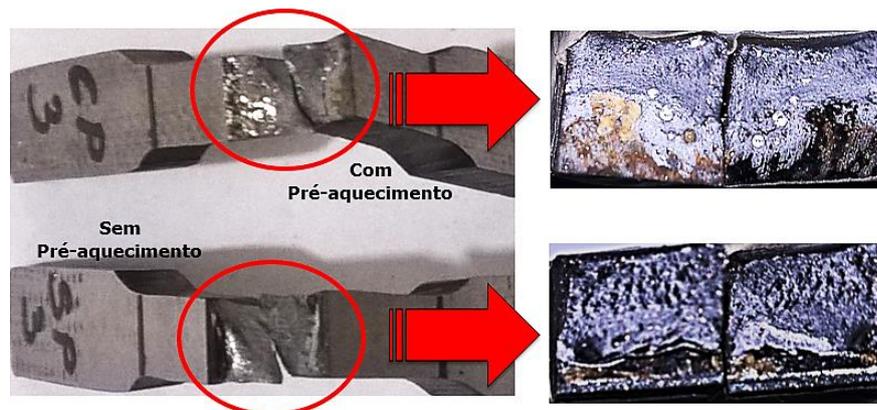
Tabela 13 – Propriedades mecânicas do metal base e junta soldada

Posição em relação cordão de solda	N° CP	Resistencia Máxima (MPa)		Alongamento (%)	
		Amostra	Média	Amostra	Média
MB Transversal	CP 1	704,02	688,35	13,04	11,61
	CP 2	672,67		10,18	
MB Longitudinal	CP 1	565,96	570,87	3,07	2,35
	CP 2	575,77		1,64	
Solda com Pré-aquecimento Transversal	CP 1	566,88	544,04	3,23	3,07
	CP 2	521,19		2,91	
	CP 3	322,12		0,33	
Solda sem Pré-aquecimento Transversal	CP 1	520,36	518,84	3,85	3,54
	CP 2	517,31		4,23	
	CP 3	410,26		0,33	

Fonte: Do autor (2017).

O terceiro corpo de prova no cordão de solda “CP3” de cada análise, foram desconsiderados para a aplicação do valor médio devido falha na solda, Figura 52. Estes apresentaram falta de penetração de solda além de possível presença de impureza, fazendo com que a amostra rompesse prematuramente.

Figura 52 – Ensaio de tração, falha nos CP3 no cordão de solda



Fonte: Do autor (2017).

O Gráfico 2 apresenta os valores médios da resistência máxima e alongamento da Tabela 12, para cada amostra considera.

Gráfico 2 – Média das propriedades mecânicas do metal base e da junta soldada



Fonte: Do autor (2017).

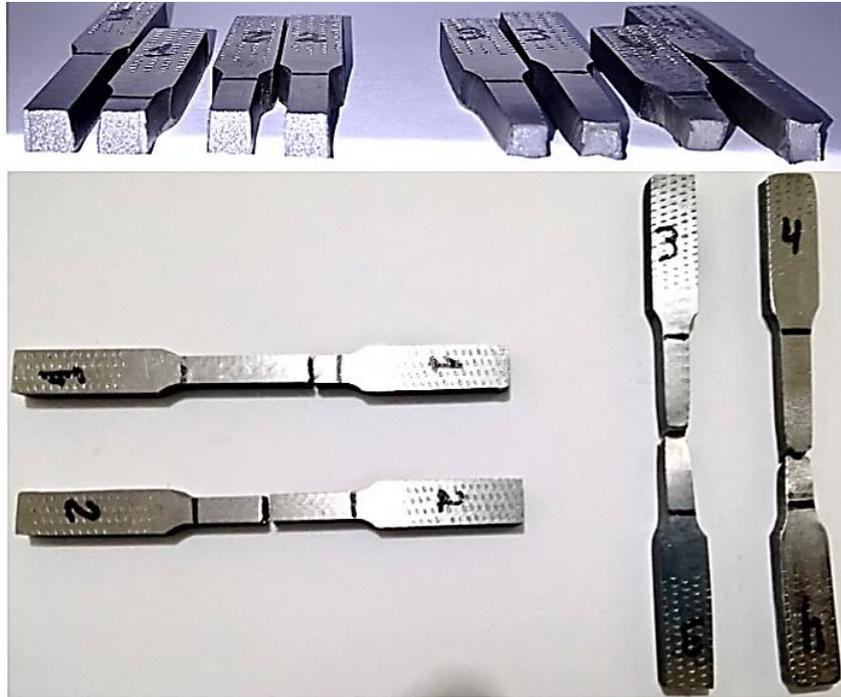
Na análise do metal base verifica-se que as amostras no sentido transversal a solda obtiveram maiores valores comparado com os da longitudinal. A fratura dos corpos de prova na transversal apresentou uma aparência dúctil, com redução considerável de sua seção. Nos corpos de prova na longitudinal, a fratura ocorreu de forma frágil não apresentou uma redução nas suas seções. A diferença entre os alongamentos dos corpos de prova do metal base são bem distintas, conforme representado no Gráfico 2. Podemos observar o alongamento e aparência da fratura das amostras no metal base na Figura 53.

Comparando os ensaios de tração na junta soldada, observa-se que os corpos de prova com pré-aquecimento obtiveram resistência máxima maior, porém, apresentaram menor valor de alongamento.

A ruptura dos corpos de prova com pré-aquecimento, apresentaram características de um metal frágil. No CP1 a ruptura ocorreu no centro do metal de solda, já para o CP2 ocorreu na ZTA. Nos corpos de prova sem pré-aquecimento, a ruptura do CP2 apresentou características semelhante as do CP2 (com pré-

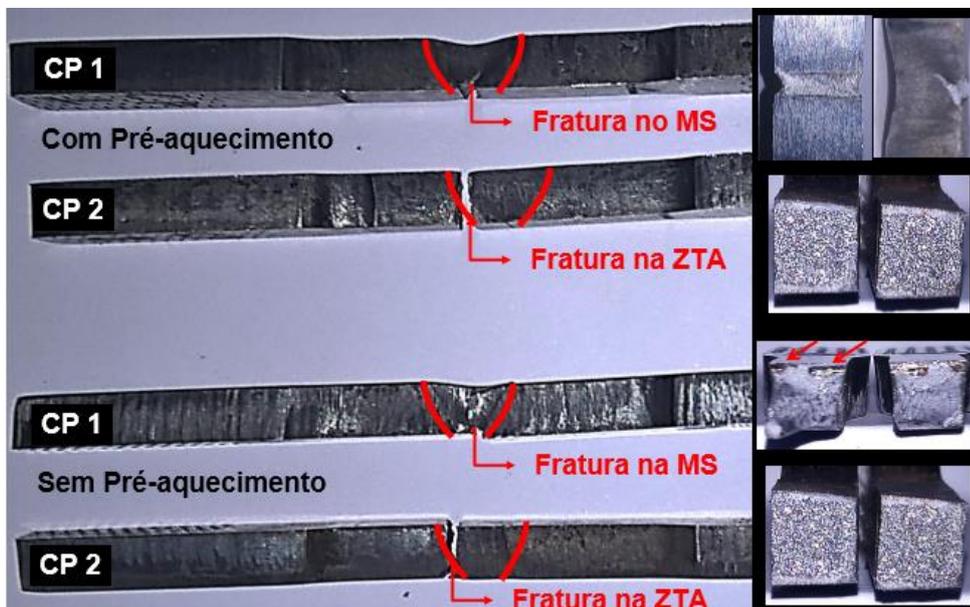
aquecimento), ocorrendo na ZTA. O CP1 (sem pré-aquecimento) ocorreu fratura no metal de solda, apresentando falta de penetração conforme Figura 54.

Figura 53 – Fratura e alongamento do metal base: (1-2) longitudinal (3-4) transversal a solda



Fonte: Do autor (2017).

Figura 54 – Indicação e aspecto das rupturas das juntas soldadas no ensaio de tração



Fonte: Do autor (2017).

4.5 Ensaio de Charpy

Os ensaios de Charpy foram realizados em temperatura ambiente, a Tabela 14 apresenta os valores obtidos para cada corpo de prova ensaiado.

Tabela 14 – Resultado dos ensaios de Charpy

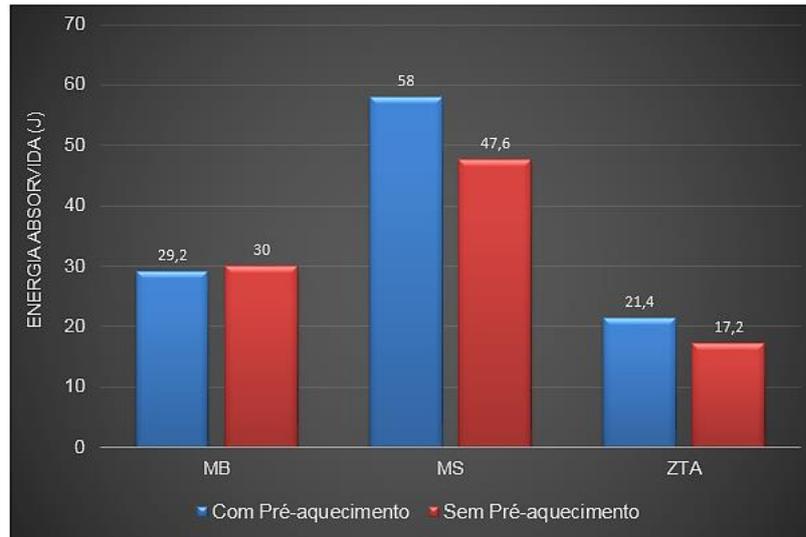
		Com Pré-aquecimento		Sem Pré-aquecimento	
		Energia (J)	Média	Energia (J)	Média
MB	CP 1	30	29,2	31	30
	CP 2	28		21	
	CP 3	23		32	
	CP 4	30		35	
	CP 5	35		31	
MS	CP 1	50	62	41	47,6
	CP 2	60		39	
	CP 3	60		50	
	CP 4	65		60	
	CP 5	55		48	
ZTA	CP 1	15	21,4	12	17,2
	CP 2	30		20	
	CP 3	19		15	
	CP 4	23		22	
	CP 5	20		17	

Fonte: Do autor (2017).

Analisando o valor médio dos ensaios realizados (GRÁFICO 3), podemos observar que o metal de solda absorveu maior valor de energia em relação as demais regiões, indicando ser uma material mais tenaz. A média comparativa entre as amostras do metal base apresentaram valores relativamente próximos.

Os valores obtidos no ensaio de Charpy para a ZTA geraram uma média aproximadamente semelhante, porém, na soldagem com pré-aquecimento a energia máxima obtida foi de 30 J, enquanto que na sem pré-aquecimento foi de 22 J.

Gráfico 3 – Comparativo entre as médias do ensaio de Charpy



Fonte: Do autor (2017).

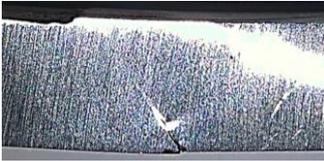
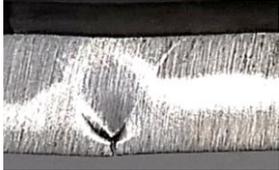
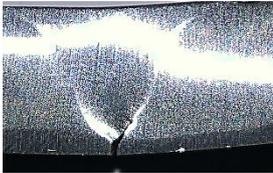
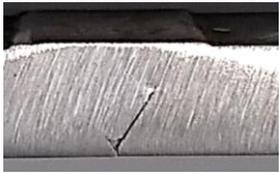
4.6 Ensaio de dobramento

A Tabela 15 apresenta o ângulo de dobramento e o início da propagação da trinca nos corpos de prova.

Tabela 15 – Ângulo de dobramento dos corpos de prova

	Com Pré-aquecimento		Sem Pré-aquecimento	
	Ângulo de dobramento	Surgimento trinca	Ângulo de dobramento	Surgimento trinca
CP 1	11,1°		4,5°	

continua

	Com Pré-aquecimento		Sem Pré-aquecimento	
	Ângulo de dobramento	Surgimento trinca	Ângulo de dobramento	Surgimento trinca
CP 2	3,71°		2,34°	
CP 3	6,89°		0,14°	

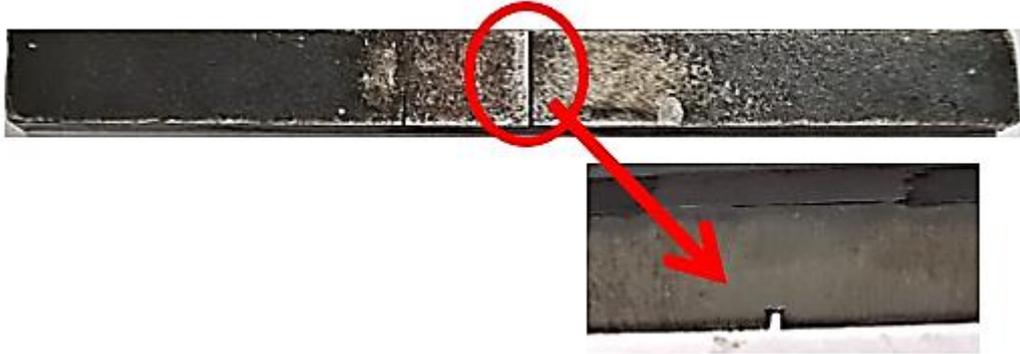
Fonte: Do autor (2017).

Os corpos de prova submetidos ao ensaio de dobramento em um contexto geral apresentaram uma baixa ductilidade, apresentando ângulos de dobramento de baixo valor.

O surgimento das trincas iniciou-se pelo centro da solda na superfície inferior, propagando-se na região de transição entre a ZTA e o metal de solda em ambos os CP. A propagação da trinca nesta região teve como causa a baixa fusão entre o metal de solda e o metal base.

Comparando os dois métodos, verifica-se que os CP das chapas com pré-aquecimento apresentaram maior ângulo de dobramento. Porém, devemos desconsiderar o CP1 da análise comparativa, por este apresentar uma falha na soldagem, conforme Figura 55.

Figura 55 – Desclassificam do CP1 da junta soldada com pré-aquecimento, devido falha de penetração da solda



Fonte: Do autor (2017).

Os CP sem pré-aquecimento, além de apresentarem baixos ângulos de dobramento, também, apresentaram propagação da falha por trinca nos dois sentidos da junta soldada conforme CP1 e CP2. Comprovando assim, que a fusão entre metal de solda e o metal base foi inferior ao dos CP com pré-aquecimento.

5 CONCLUSÃO

Na análise microestrutural, observou-se que a ZTA da solda sem pré-aquecimento é constituída de tamanho de grãos menores do que os da solda com pré-aquecimento. No ensaio de microdureza Vinckes o valores obtidos na ZTA do corpo de prova sem pré-aquecimento foram maiores do que com pré-aquecimento. Comprando assim, que o tamanho de grão menor na ZTA apresenta maior microdureza.

Verificou-se que o pré-aquecimento influencia positivamente na penetração da solda, tal como, também beneficia na fusão do metal de solda com o metal base. Sendo observado no ensaio de dobramento, o qual, o corpo de prova sem pré-aquecimento obteve os menores valores de ângulo de dobramento, tal como pode-se observar que o surgimento de defeito propagou-se em ambos os lados da união da junta soldada.

Observou-se neste trabalho, que o uso de pré-aquecimento no processo de soldagem do aço SAE 1045 é benéfico e necessário. Porém, o aço SAE 1045 soldado pelo processo MIG/MAG apresenta baixa soldabilidade quando comparado com o aços com menor teor de carbono.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E23**: Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials. 2007.

_____. **ASTM E384**: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials: Annual Book of ASTM Standards. USA: [s.n.]. 2011.

_____. **ASTM E8**: Standard test methods for tension testing of metallic materials. 2010.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME V**: Boiler and Pressure Vessel Code. 2011.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS**: Welding Handbook, Materials and Applications. 8. ed. v. 4, 1998.

AZEVEDO, Alessandra Gois Luciano de. **Aplicação da técnica da dupla camada na soldagem do aço ABNT 1045**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais. UFC. Fortaleza, set. 2002.

BRANDI, Sérgio Duarte; WAINER, Emilio; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem**: processos e metalurgia. São Paulo: Edgard Blucher, 2011.

BUERGER, G. R. et al. **Estudo do tratamento térmico sobre a conformação do aço 1045**. UDESC. Joinville, 2009.

CHEMIN, Beatris Francisca. **Manual da Univates para trabalhos acadêmicos**. 3. ed. Lajeado: Univates, 2015.

DAVID, Fabio Henrique Santos et al. Efeito da taxa de resfriamento na constituição da perlita e nas propriedades mecânicas de aços comuns. **Revista Iniciação Científica**. Centro universitário Newton Paiva. Belo Horizonte, 2014.

ESAB. **Trator para soldagem automatizada MIG/MAG**: manual do usuário. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/0216721_rev2_magnetic_trac_etp2_mig-mag_pt.pdf>. Acesso em: 18 out. 2012.

FILHO, Carlos Abreu. **Metalurgia da soldagem**. Curso técnico em mecânica. CEFET. Pará, 2008.

FORTES, Cleber; ARAÚJO, Welerson. **Apostila de metalurgia da soldagem**. Apostila ESAB. Revisado em 25 jan 2005.

FORTES, Cleber; VAZ, Cláudio Turani. **Apostila de soldagem MIG/MAG**. Apostila ESAB. Revisado em 25 jan. 2005.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GHENO, Simoni Maria; FANTIM, Anderlon. **Análise e caracterização microestrutural na soldagem do material SAE J403-1045 para qualificação de procedimento de soldagem**. FATEC. Sertãozinho, 2014.

JÚNIOR, Diniz Ramos de Lima. **Caracterização microestrutural e mecânica de juntas soldadas utilizando os processos GTAW, FCAW E SMAW**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UFPE. Recife, 2013.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

OKUMURA, Toshie; TANIGUCHI, Célio. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

PERREIRA, Johnny Alencar; PEROZZI, Marcel Rodolfo. **Relatório de tratamento térmico**. Curso Técnico em Mecânica. IFSP. Sertãozinho, 2008.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento/melhor desempenho**. São Paulo: Artliber, 2008.

SIMON, Fabiana Camila et al. **Análise prática de penetração de solda em aço 1045**. 2º semana internacional das engenharias da FAHOR. Horizontina, out. 2012.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

VITOR, Everaldo. **Apostila básica de processos de soldagem**. São Paulo, 2010.

WEBER, Jacson Rafael. **Estudos dos efeitos do tratamento térmico pré-soldagem em juntas T de aço 1045 pelo processo MAG**. Monografia (Graduação) - UNIJUÍ. Panambi, 2014.

ZEEMANN, Annelise. **Energia de soldagem**. Portal infosolda. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/metal/energia-de-soldagem.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2016.



UNIVATES

R. Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95900.000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09