

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL FINGER DIAS DE SOUZA

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA SOLDA COM E SEM PRÉ AQUECIMENTO NO
AÇO SAE 1045**

GUARAPUAVA

2022

GABRIEL FINGER DIAS DE SOUZA

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA SOLDA COM E SEM PRÉ AQUECIMENTO NO
AÇO SAE 1045**

**Analysis of the effects of welding with and without preheating on sae 1045
steel**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à
Coordenação de Engenharia Mecânica, como
requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel
em Engenharia Mecânica, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Aldo Przybysz

GUARAPUAVA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GABRIEL FINGER DIAS DE SOUZA

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA SOLDA COM E SEM PRÉ AQUECIMENTO NO
AÇO SAE 1045**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 02/Dezembro/2022

Aldo Przybysz
Doutor em Química dos Recursos Naturais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Denise Alves Ramalho
Doutora em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Sergio Dalmas
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

GUARAPUAVA

2022

Dedico este trabalho a minha família,
pelos momentos de ausência

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e pelas oportunidades que me foram dadas.

Aos meus pais, Divino e Marlizete, pelo apoio, suporte, incentivo nesta etapa de minha formação, e pela confiança depositada em mim em todos os momentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Aldo Przybysz, pelas orientações e direcionamento para a realização deste trabalho.

A todos os professores desta respeitosa instituição de ensino, pelos conhecimentos transmitidos nesta etapa de minha formação acadêmica.

A todos meus amigos e companheiros que participaram desta minha jornada, pelas ajudas nos momentos difíceis e pelos momentos inesquecíveis vivenciados.

Enfim, a todos aqueles que de certo modo estiveram envolvidos neste meu projeto.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que
ninguém viu, mas pensar o que
ninguém ainda pensou sobre aquilo
que todo mundo vê.”
(SCHOPENHAUER; ARTHUR.1851)

RESUMO

O processo de junção metálica através da solda é amplamente utilizado e eficaz. Em alguns casos, é recomendável a utilização de um pré-aquecimento para se realizar tal processo. Neste estudo, serão feitas análises comparativas dos resultados da solda MAG no aço SAE 1045, sendo esta comparação entre a solda com o pré-aquecimento e sem o pré-aquecimento. Para isto, o corpo de prova será preparado e submetido ao ensaio de tração e metalografia. O corpo de prova foi trabalhado para uma análise na região da solda. Na análise visual, observou-se a formação e porosidades excessivas na solda sem o pré-aquecimento. Com o ensaio de tração, foi perceptível uma maior resistência a tração para a solda com o pré-aquecimento. No exame de microscópico, foi observado uma pequena mudança estrutural para os processos de solda.

Palavras-chave: Aço SAE 1045. Solda MAG. Ensaio de tração. Análise de micrografia.

ABSTRACT

The process of joining metals by welding is widely used and effective. In some cases, the use of preheating is recommended to carry out this process. In this study, comparative analysis of the results of MAG welding on SAE 1045 steel will be done, comparing the weld with preheating and without preheating. For this, the specimen will be prepared and submitted to tensile testing and metallography. The specimen was machined for an analysis in the weld region. In the visual analysis, excessive porosity was observed in the weld without preheating. With the tensile test, a higher tensile strength was perceived for the weld with preheating. In the microscopic examination, a small structural change was observed for the weld processes.

Keywords: SAE 1045 steel. MAG welding. Tensile testing. Micrography analysis.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Princípios básicos do processo MIG / MAG..... | 18 |
| Figura 2 - Equipamentos básicos para soldagem MIG/MAG..... | 19 |
| Figura 3 - Tocha para soldagem MIG/MAG..... | 20 |
| Figura 4 - Classificação do arame..... | 22 |
| Figura 5 - Esboço da máquina de ensaio a tração..... | 24 |
| Figura 6 - Identificação das regiões do corpo de prova..... | 25 |
| Diagrama 1 - Diagrama tensão deformação padrão para materiais dúcteis | 26 |
| Diagrama 2 - Diagrama de fases Ferro - Carbono..... | 32 |
| Figura 7 - Microestruturas para uma liga ferro carbono hipoeutetoide..... | 33 |
| Figura 8 - Metalografia aço SAE 1045 com zoom de 200x..... | 34 |
| Fluxograma 1 - Fluxograma das etapas do trabalho..... | 37 |
| Fotografia 1 - Barras de aço com 1 metro de comprimento..... | 38 |
| Fotografia 2 - Repartições do aço..... | 39 |
| Figura 9 - Chanfro em X..... | 40 |
| Fotografia 3 - Torno mecânico..... | 41 |
| Fotografia 4 - Corpo de prova com o chanfro realizado..... | 42 |
| Fotografia 5 - Cantoneira com parafuso e corpos de prova fixadas..... | 43 |
| Fotografia 7 - Arame MIG..... | 43 |
| Fotografia 1 - Ponto de solda..... | 44 |
| Fotografia 8 - Corpos de prova com solda sem o pré-aquecimento..... | 45 |
| Fotografia 9 - Câmera térmica registrando a temperatura..... | 46 |
| Fotografia 10 - Corpo de prova com solda com pré-aquecimento..... | 47 |
| Fotografia 11 - Corpo de prova após a solda..... | 48 |
| Fotografia 12 - Máquina Universal de Ensaio..... | 49 |
| Fotografia 13 - Corpo de prova preso para o ensaio de tração..... | 50 |
| Fotografia 14 - Cortadora Metalográfica CM 60..... | 51 |
| Fotografia 15 - Embutida Metalográfica EM30D..... | 52 |
| Fotografia 16 - Garrafa de Baquelite..... | 53 |
| Fotografia 17 - Amostra preparada..... | 53 |
| Figura 10 - Representação do corte e da amostra embutida..... | 54 |
| Fotografia 18 - Lixa d'agua no suporte com água corrente..... | 55 |
| Fotografia 19 - Politriz Lixadeira Metalográfica PL02E..... | 55 |
| Figura 11 - Microscópio Ótico Olympus BX51M..... | 56 |
| Fotografia 20 - Corpos de prova da soldagem sem o pré-aquecimento..... | 58 |
| Fotografia 21 - Corpos de prova da soldagem com o pré-aquecimento..... | 59 |
| Fotografia 22 - Micrografia do aço após solda sem o pré-aquecimento..... | 61 |
| Fotografia 23 - Micrografia do aço após solda com o pré-aquecimento..... | 61 |
| Fotografia 24 - ZTA da solda sem o pré-aquecimento..... | 62 |
| Fotografia 25 - ZTA da solda com o pré-aquecimento..... | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Dimensões de corpos de prova padrão..... | 25 |
| Tabela 2 - Temperatura de pré-aquecimento recomendada x C_{eq} | 36 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------------------------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ASTM | Sociedade Americana de Testes e Materiais (do inglês - <i>American Society for Testing and Materials</i>) |
| CC | Corrente Contínua |
| CCC | Cúbica de Corpo Centrado |
| C_{eq} | Carbono equivalente |
| $C_{eqtotal}$ | Carbono equivalente total |
| CFC | Cúbica de face centrada |
| Cm | Centímetro |
| GMAW | Soldagem por Arco Elétrico com Gás de Proteção (do inglês - <i>Gas Metal Arc Welding</i>) |
| HC | Hexagonal compacta |
| IIW | Instituto Internacional de Soldagem (do inglês - <i>International Institute of Welding</i>) |
| ISO | Organização Internacional de Normalização (do inglês – <i>International Organization for Standardization</i>) |
| MAG | Soldagem por Gás Ativo (do inglês – <i>Metal Active Gas</i>) |
| MIG | Soldagem por Gás Inerte (do inglês – <i>Metal Inert Gas</i>) |
| μm | Micrometro |
| NBR | Norma Brasileira |
| SAE | Sociedade de Engenheiros Automotivos (do inglês – <i>Society of Automotive Engineers</i>) |
| UTFPR-GP Guarapuava | Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Guarapuava |
| ZTA | Zona termicamente afetada |

LISTA DE SIMBOLOS

| | |
|------------|---|
| A | Área |
| A0 | Área Inicial |
| Al | Alumínio |
| Ar | Argônio |
| C | Carbono |
| Co | Monóxido de Carbono |
| Co2 | Dióxido de carbono |
| Cr | Cromo |
| E | Módulo de elasticidade ou módulo de Young |
| Fe | Ferro |
| Fe3C | Cementita |
| H | Hidrogênio |
| H2 | Gás Hidrogênio |
| H2O | Água |
| He | Hélio |
| L | Comprimento |
| L0 | Comprimento Inicial |
| N | Nitrogênio |
| N2 | Gás Nitrogênio |
| O | Oxigênio |
| O2 | Gás Oxigênio |
| P | Força |
| SiC | Carboneto de Silício |
| α | Alfa |
| δ | Delta ou Deformação |
| ϵ | Deformação específica |
| σ | Tensão |
| Cu | Cobre |
| Mn | Manganês |

Mo

Molibdênio

Ni

Níquel

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1.1 | Justificativa | 17 |
| 1.2 | Objetivos | 17 |
| 1.2.1 | Objetivo geral..... | 17 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos..... | 17 |
| 2. | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 18 |
| 2.1 | Soldagem MIG/MAG | 18 |
| 2.1.1 | Equipamentos..... | 19 |
| 2.1.2.1 | Arames | 21 |
| 2.1.2.2 | Gases de proteção..... | 22 |
| 2.2 | ENSAIOS MECÂNICOS | 23 |
| 2.2.1 | Ensaio a tração | 23 |
| 2.2.2 | Diagrama tensão deformação..... | 25 |
| 2.2.3 | Metalografia | 28 |
| 2.2.4 | Microscopia Ótica | 28 |
| 2.3 | Estrutura cristalina | 30 |
| 2.3.1 | Diagrama de fases..... | 31 |
| 2.4 | Pré-aquecimento e resfriamento | 34 |
| 2.4.1 | Temperatura de pré-aquecimento..... | 35 |
| 3. | METODOLOGIA | 37 |
| 3.1 | Corpo de Prova | 38 |
| 3.2 | Pré-aquecimento e solda | 45 |
| 3.4 | Preparação da região da solda | 47 |
| 3.5 | Ensaio de tração | 48 |
| 3.6 | Metalografia | 50 |
| 3.7 | Análise no Microscópio | 56 |
| 4. | ANÁLISE DOS RESULTADOS | 57 |
| 4.1 | Comparação entre as soldas | 57 |
| 4.2 | Comparação dos resultados do ensaio de tração | 60 |
| 4.3 | Comparação microscópica | 60 |
| 5. | CONCLUSÃO | 64 |
| 6. | SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS | 65 |
| 7. | REFERÊNCIAS | 66 |

| | |
|---|-----------|
| APÊNDICE A – Diagrama tensão-deformação do ensaio de tração para a solda sem pré-aquecimento | 68 |
| APÊNDICE B – Diagrama tensão-deformação do ensaio de tração para a solda com pré-aquecimento..... | 69 |

1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem, do modo que conhecemos atualmente, trata-se de um processo com menos de 150 anos de aplicação, mas já nos tempos remotos, há registros de outros processos para realizar esta ação, tais como a brasagem e a soldagem por forjamento, como exemplo disto, temos no Museu do Louvre, um pingente de ouro com indicações de ter sido soldado com fabricação datada de pôr volta de 4000AC (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Conforme Modenesi, Marques e Santos (2012), no final do século XIX e início do século XX, o processo de soldagem teve um grande avanço, com o desenvolvimento da soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido, porém ainda continuava sem ser largamente utilizada. Até então que na 1ª guerra mundial, devido as necessidades da época, a soldagem passou a ser utilizada com maior intensidade. E ainda, segundo Brandi (1995), na 2ª guerra mundial também se teve um grande impulso na utilização deste processo.

É denominado soldagem, o processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado desse processo (WAINER; BRANDI; MELO, 1992).

Dentre os processos de soldagem existem, temos o processo MIG/MAG (MIG Metal Inert Gas e MAG Metal Active Gas), no qual um arco elétrico é estabelecido entre a peça e um consumível na forma de arame. O metal da solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de gás inerte ou ativo liberado juntamente com o arame (FORTES E VAZ, 2005).

O ciclo térmico ao qual o material é submetido possui influência muito importante em suas propriedades mecânicas. As variações de temperatura ao qual o material é exposto podem resultar em uma alteração da sua estrutura cristalina, podendo resultar em estruturas mais frágeis ou mais resistentes. Assim, o pré-aquecimento da região de solda, busca reduzir esta taxa de resfriamento do metal após o processo da soldagem (DUTRA; MACHADO, 2017).

1.1 Justificativa

O aço SAE 1045, trata-se de um aço com baixo teor de carbono, com cerca de 0,45% de peso, comumente encontrado e utilizado industrialmente, possuindo características satisfatórias as suas aplicações. É recomendável o uso do pré-aquecimento deste aço até uma temperatura de 200 a 300 °C, com um resfriamento lento e alívio de estresse sempre que possível (STEEL FORGE).

As recomendações propostas podem ocasionar um aumento no custo operacional, portanto a análise das mudanças mecânicas do material faz-se necessário para a verificação da relação custo/benefício deste procedimento.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho podem ser divididos em dois tópicos, objetivos gerais e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Este estudo possui como objetivo realizar uma análise comparativa entre as características mecânicas obtidas após a soldagem, com e sem pré-aquecimento da região de solda, para o processo de soldagem MAG. Buscando obter resultados através do ensaio de tração realizado sobre os corpos de prova previamente soldados.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Preparar os corpos de prova e realizar o processo de soldagem;
- Realizar o ensaio de líquidos penetrantes a fim de buscar, na região, falhas resultantes dos processos de soldagem;
- Realizar o ensaio de tração e obter as características resultantes de cada processo;
- Analisar comparativamente a influência do pré-aquecimento nas características mecânicas finais do material de estudo.

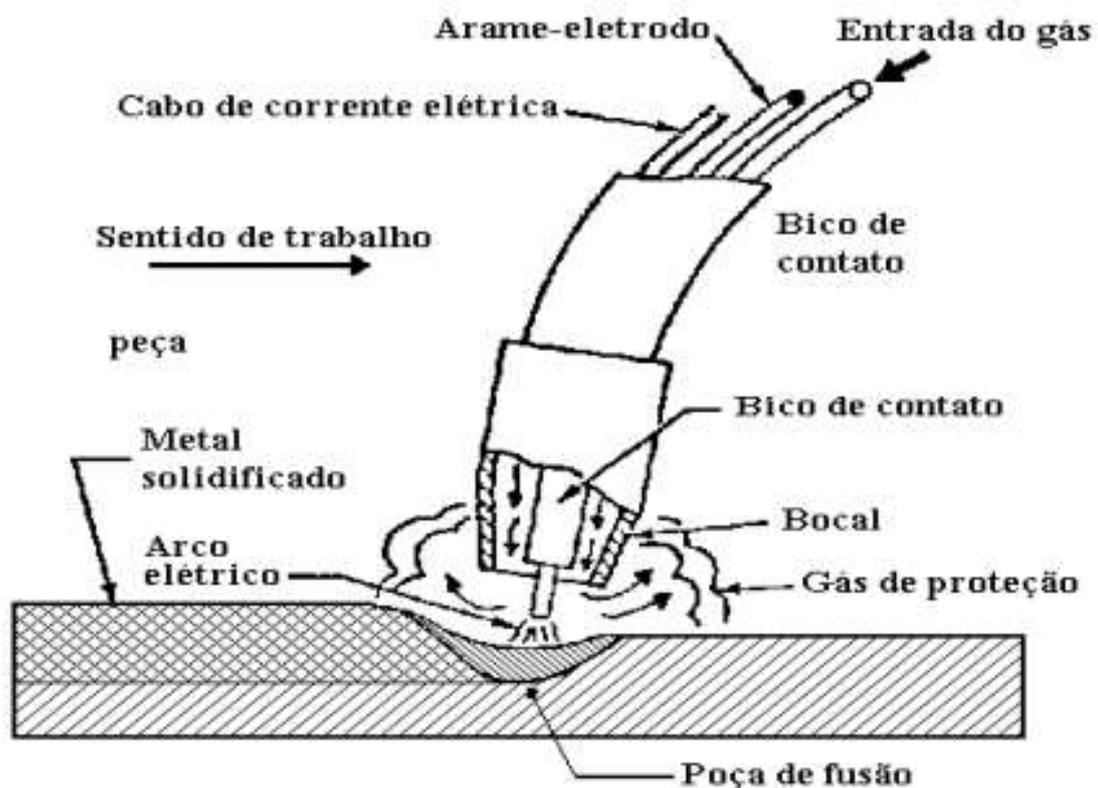
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Soldagem MIG/MAG

A soldagem a arco com eletrodos sobre proteção gasosa, é conhecida por algumas denominações:

- MIG, quando a proteção gasosa utilizada é constituída de um gás inerte, e que não tem nenhuma atividade física com a poça de fusão.
- MAG, quando a proteção gasosa é feita com um gás dito ativo, o qual interage com a poça de fusão.
- GMAW (Gás Metal Arc Welding), que designa os dois processos citados cima.

Figura 1 - Princípios básicos do processo MIG / MAG



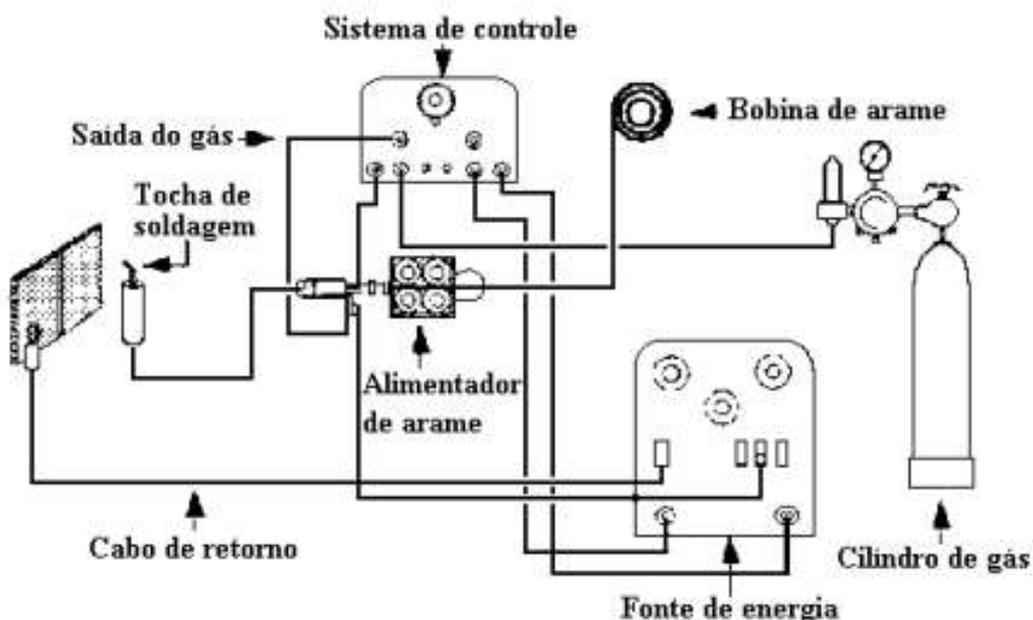
Fonte: Núcleo tecnológico de soldagem e qualidade

A única diferença entre os dois processos são os gases utilizados, mas esta única diferença possui total influência no comportamento da soldagem. Estes gases, influenciam fortemente nas características do arco, no tipo de transferência de meta do eletrodo à peça, na velocidade de soldagem, nas perdas por projeções, na penetração e na forme externa da solda, além de influências nas perdas de elementos químicos, na temperatura da poça de fusão, na sensibilidade a fissuração e porosidade, além da facilidade da execução da soldagem (NÚCLEO TECNOLÓGICO DE SOLDAGEM E QUALIDADE, 2002).

2.1.1 Equipamentos

Os equipamentos básicos para a soldagem MIG/MAG consistem em uma fonte de energia, uma tocha de soldagem com um jogo de bocais, um alimentador de arame, um sistema de controle, um par de bocais, um jogo de válvulas redutoras para o gás de proteção, canalizações para transporte do gás, uma fonte para o gás de proteção e um garra para fixação do cabo a peça. Os quais podem ser vistos abaixo.

Figura 2 - Equipamentos básicos para soldagem MIG/MAG



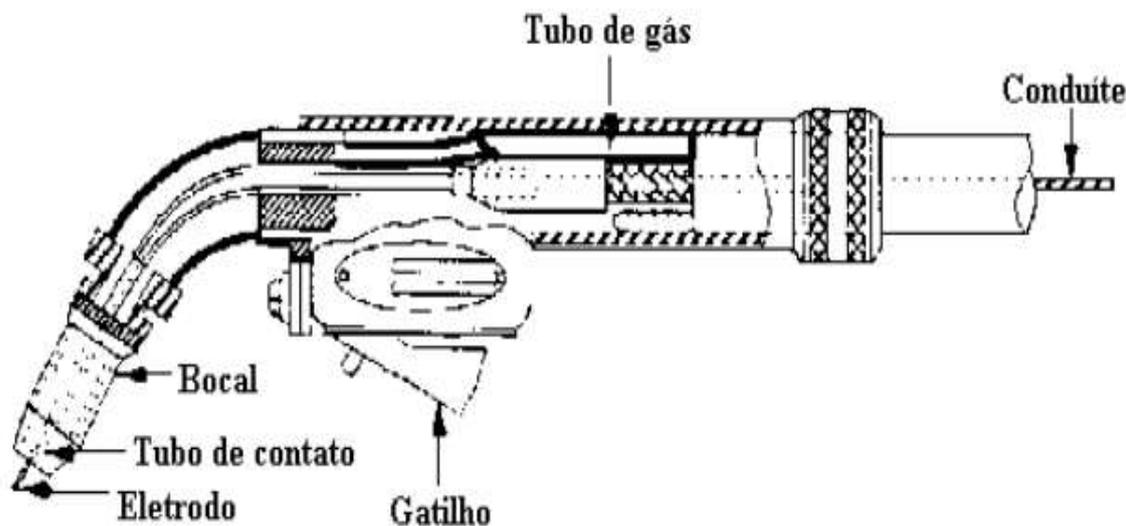
Fonte: Núcleo tecnológico de soldagem e qualidade

- Fontes de energia: Neste processo é utilizado uma corrente do tipo contínua (CC), a qual pode ser fornecida por um conjunto transformador-retificador ou por um conversor

- Tocha, bicos de contato e bocais: Consiste basicamente em um bico de contato, responsável pela energização do arame-eletrodo, de um bocal que orienta o fluxo de gás de proteção e de um gatilho de acionamento (NÚCLEO TECNOLÓGICO DE SOLDAGEM QUALIDADE, 2002).

Existem diversos tipos de diferentes de tochas, as quais podem variar conforme a aplicação. A Figura 3 apresenta a tocha para soldagem MIG/MAG. (FORTES E VAZ, 2005)

Figura 3 - Tocha para soldagem MIG/MAG



Fonte: Núcleo tecnológico de soldagem e qualidade

- Alimentador de arame: o motor de alimentação de arame e o controle de soldagem frequentemente são fornecidos em um único módulo, possuem a função principal de puxar o arame do carretel e alimentá-lo ao arco. Esta alimentação segue uma velocidade predeterminada a aplicação (FORTES E VAZ, 2005).

- Sistema de controle: é um sistema que permite a verificação e ajuste dos parâmetros da soldagem.
- Cabos elétricos e garras de fixação: cabos para o transporte da eletricidade e garras para a fixação do cabo dos cabos.
- Canalizações e válvulas redutoras: Canalizações para o deslocamento do gás de proteção e válvulas para o controle do fluxo.
- Fonte de gás: Responsável pelo fornecimento do gás para o processo, podendo ser cilindros únicos e adequadas para esta utilização, ou uma central de cilindros (NÚCLEO TECNOLÓGICO DE SOLDAGEM E QUALIDADE, 2002).

2.1.2 Consumíveis

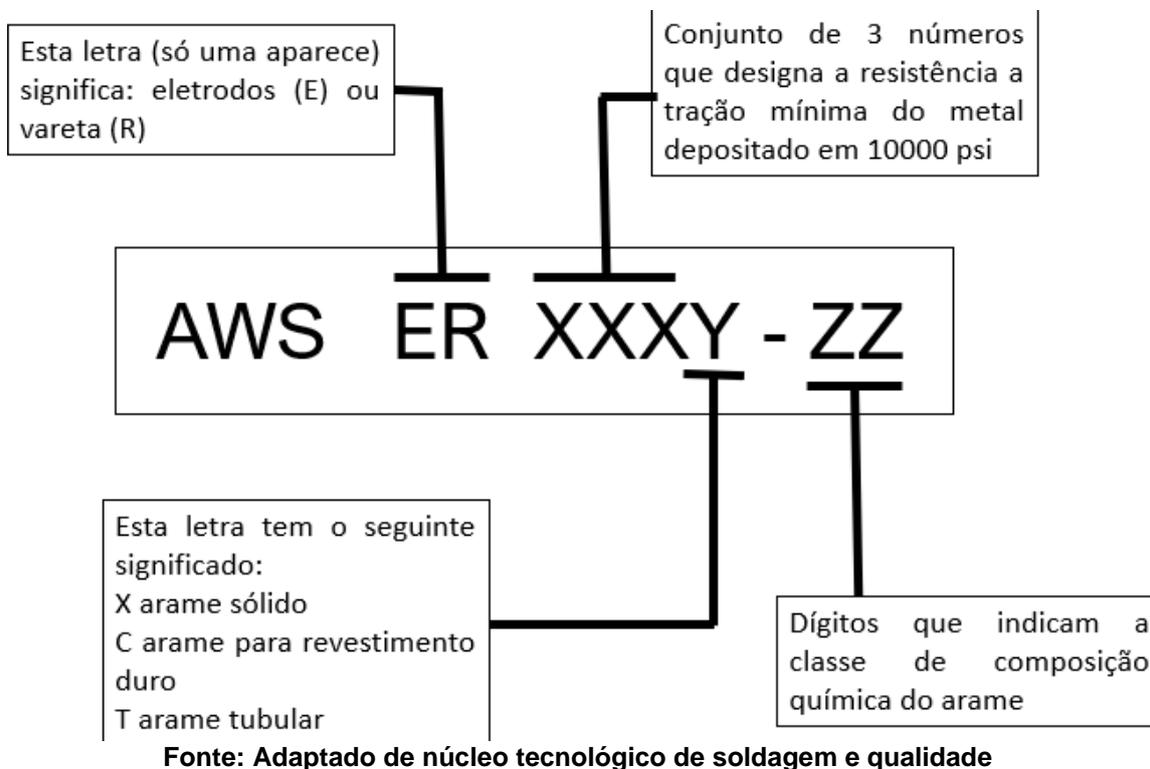
Os principais consumíveis utilizados na soldagem MIG/MAG, são o arame-eletrodo e os gases de proteção.

2.1.2.1 Arames

A seleção correta do arame é um fator de grande importância na soldagem MIG/MAG, pois esta combinação arame/Gás irá produzir o depósito químico que irá determinar as propriedades físicas e mecânicas da solda.

Por mais que a seleção do arame deva levar em considerações os fatores da soldagem, devido à grande experiência na soldagem industrial, a AWS simplificou esta seleção. Alguns arames foram desenvolvidos, os quais produzem os melhores resultados com materiais de base específicos, e embora não exista uma especificação aplicável à indústria geral, a maioria dos arames está em conformidade com os padrões da AWS conforme indicado na Figura 4 (FORTES E VAZ, 2005).

Figura 4 - Classificação do arame



2.1.2.2 Gases de proteção

O ar atmosférico é expulso da região de soldagem por um gás de proteção com o objetivo de evitar a contaminação da poça de fusão, evitando a contaminação pelo nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂) e vapor de água (H₂O), que estão presentes na atmosfera.

A contaminação por nitrogênio no aço solidificado reduz a ductibilidade e a tenacidade da solda, podendo causar fissurações, e em grandes quantidades porosidades. O oxigênio (O) em excesso no aço se combina com o carbono formando monóxido de carbono (CO), que pode causar porosidade, além de poder se combinar com outros elementos do aço, formando compostos que produzem inclusão no metal de solda. O hidrogênio(H), presente no vapor de água, pode combinar-se com o ferro (Fe) ou o alumínio (Al), resultando em porosidade e fissuração sob o cordão de solda.

Para evitar estes problemas de contaminação da poça de fusão, três gases principais são utilizados como proteção, sendo eles: argônio (Ar), hélio (He) e dióxido de carbono (CO₂). E pequenas quantidades de oxigênio (O₂),

nitrogênio (N₂) e hidrogênio (H₂) já se provaram como benéficas em alguns casos. Dos gases citados, apenas o argônio e o hélio são inertes (FORTES E VAZ, 2005).

2.2 ENSAIOS MECÂNICOS

As propriedades mecânicas de um material são determinadas através da realização de alguns ensaios. Estes ensaios podem ser os denominados destrutivos ou não destrutivos. Os ensaios mecânicos destrutivos são aqueles que promovem a ruptura ou a inutilização do material, enquanto os ensaios não destrutivos são os que não inutilizam o material. No que se trata de ensaios destrutivos, podemos citar os ensaios de tração, dobramento, flexão, torção, fadiga, impacto, compressão e outros. Já para ensaios não destrutivos estão os ensaios com raios X, ultrassom, Magnaflux, elétricos e outros.

Os ensaios mecânicos são realizados através da aplicação, sobre o material, em a um determinado tipo de esforço, podendo ser tração, compressão, flexão, torção, cisalhamento e pressão interna, buscando determinar a resistência do material a cada um desses esforços.

A escolha do ensaio mecânico adequado para cada material depende da finalidade ao qual ele será empregado e das propriedades mecânicas que se deseja medir.

Os ensaios mecânicos também servem para comparar dois materiais distintos ou que passaram por processos diferentes, e juntamente com uma análise química, é possível avaliar de grosso modo sua história, processos de fabricação e possíveis aplicações. (SOUZA, 1982)

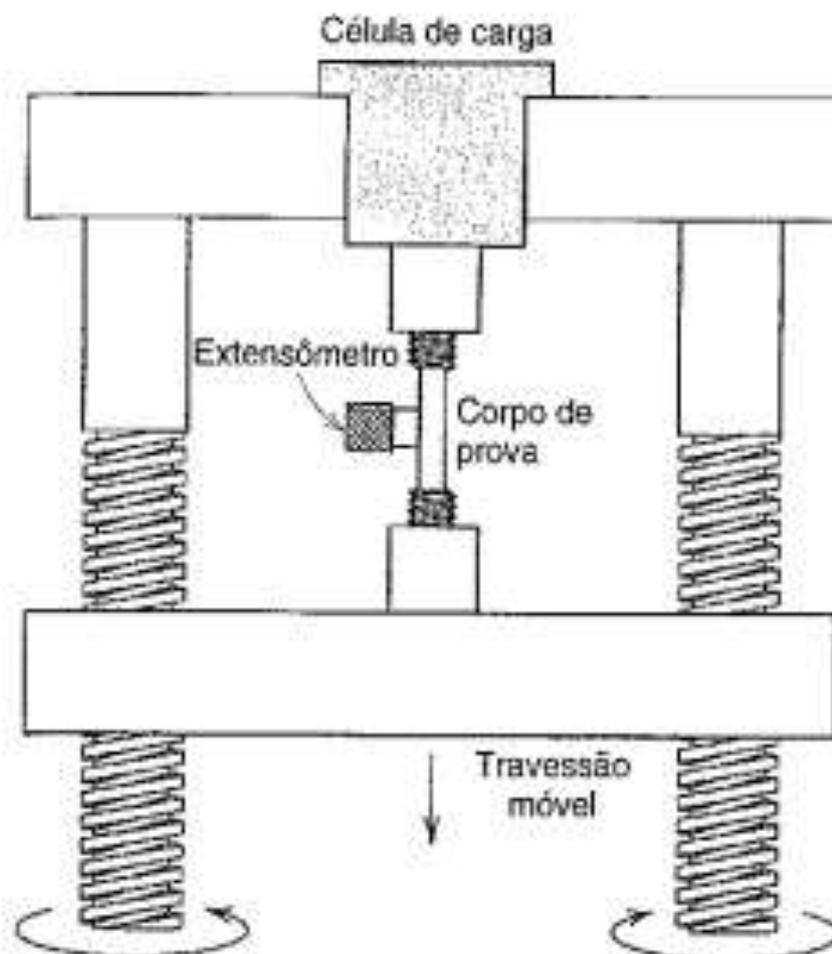
2.2.1 Ensaio a tração

Dos ensaios mecânicos destrutivos, um dos mais comuns para determinar a tensão-deformação é o executado sobre tração, o qual pode ser utilizado para a avaliação de diversas propriedades mecânicas dos materiais importantes para projetos.

No ensaio de tração, temos uma amostra do material (corpo de prova), que é deformada, geralmente até sua fratura, através da aplicação de uma carga de tração gradativamente crescente aplicada uniaxialmente ao longo do eixo

mais comprido do corpo de prova. O corpo de prova é preso a máquina de ensaios de tração através das garras de fixação do dispositivo conforme na Figura 5.

Figura 5 - Esboço da máquina de ensaio a tração



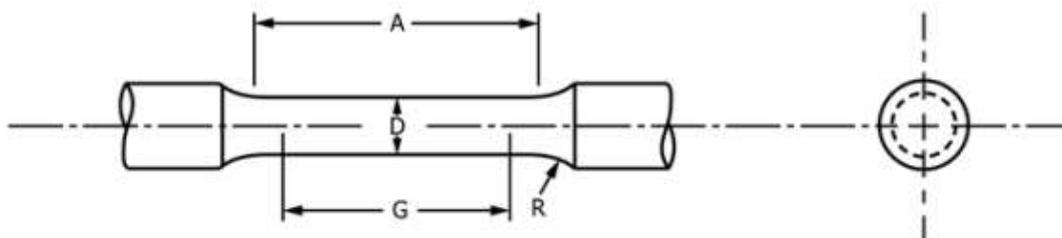
Fonte: Adaptado de Callister (2000)

A máquina é projetada para alongar o corpo de prova a uma taxa constante, além de realizar a medição contínua da carga instantânea aplicada e os alongamentos resultantes (através de um extensômetro). (CALLISTER, 2000)

No Brasil a norma ABNT NBR ISO 6892 é a responsável por ditar os procedimentos de ensaio de tração de materiais metálicos e normatiza as propriedades mecânicas que podem ser determinadas a temperatura ambiente. Já a norma ASTM A370 é a mais utilizada para a padronização dos corpos de

prova. Para corpos de prova circulares temos as seguintes padronizações de dimensões apresentadas na Figura 6.

Figura 6 - Identificação das regiões do corpo de prova



Fonte: Adaptado de ASTM A370

Na Tabela 1, temos as métricas padrões mais utilizados.

Tabela 1 - Dimensões de corpos de prova padrão

| Diâmetro Nominal | mm | |
|-------------------------------------|-------------|-------------|
| | 12.5 | 8.75 |
| G - Comprimento útil | 50.0 ± 0.10 | 35.0 ± 0.10 |
| D - Diâmetro | 12.5 ± 0.25 | 8.75 ± 0.18 |
| R - Raio | 10 | 6 |
| A - Comprimento da seção de redução | 60 | 45 |

Fonte: Adaptado de ASTM A370

2.2.2 Diagrama tensão deformação

Conforme Hibbeler (2010), pelos dados obtidos em um ensaio de tração, é possível calcular vários valores da tensão e da deformação correspondentes ao corpo de prova, e com isto, construir um gráfico com esses resultados.

Com os dados registrados, pode-se determinar a tensão nominal, através da equação:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (1)$$

onde

σ = Tensão, P = Pressão; A0 = Área de seção transversal inicial

E de maneira semelhante, também é possível determinar a deformação nominal

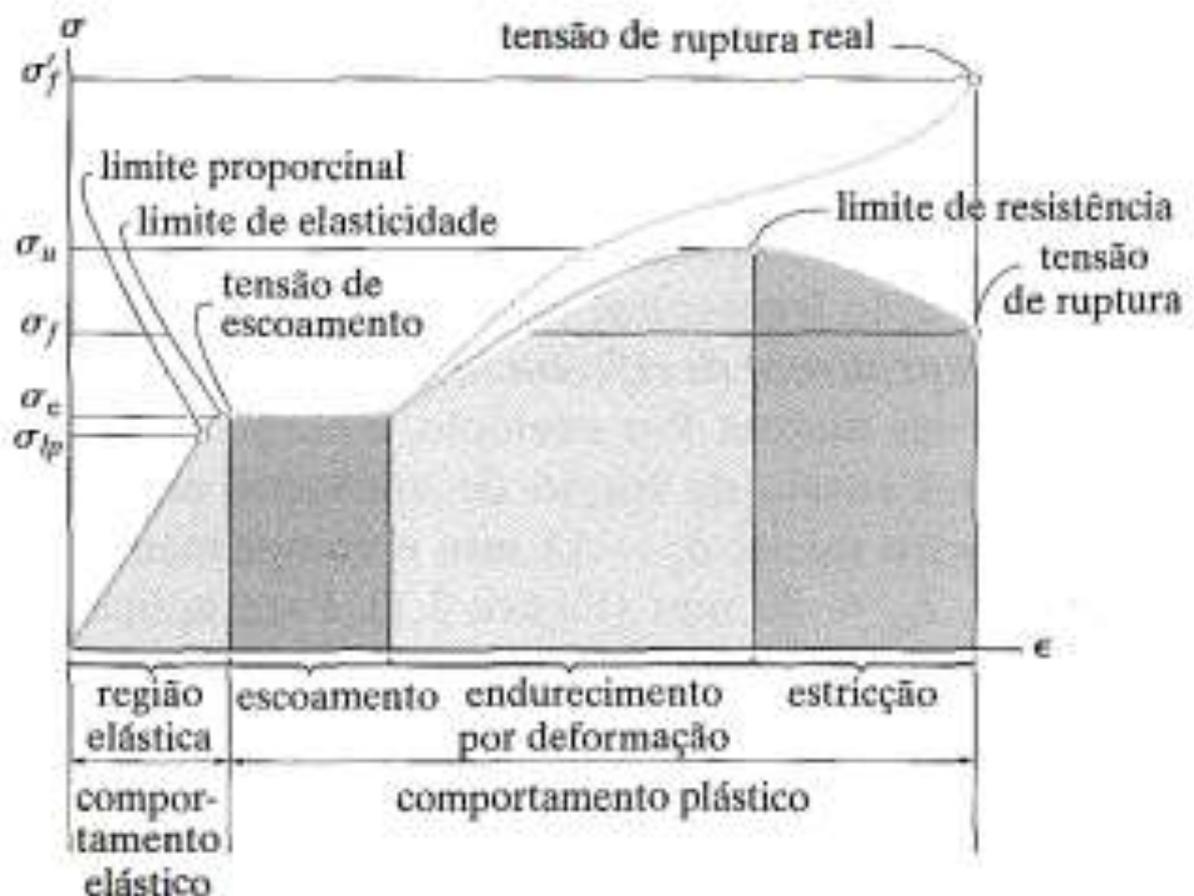
$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (2)$$

sendo que

ϵ = Deformação, δ = Variação, L_0 = Comprimento Inicial

Com a plotagem destes valores em um gráfico, tendo a tensão no eixo da ordenada e a deformação a abscissa, teremos a curva denominada diagrama tensão-deformação, em que para materiais dúcteis pode ser exemplificado pelo Diagrama 1:

Diagrama 1: Diagrama tensão deformação padrão para materiais dúcteis



Fonte: Hibbeler (2010)

Do diagrama tensão-deformação, pode-se notar que há 4 diferentes estágios para a deformação de um corpo de prova dúctil.

- Região elástica: quando as deformações do material estão no primeiro estágio mostrado. Neste estágio a curva comportasse como uma linha reta, até um determinado limite denominado limite de elasticidade, com isto nota-se que a tensão é proporcional a deformação e o material possui um comportamento linearmente elástico, e caso a tensão seja retirada, o material irá retornar a sua forma original.

- Escoamento: corresponde a segunda porção do diagrama, em que caso a tensão ultrapasse o limite de elasticidade, o material irá colapsar, e com isto terá uma deformação permanente. A tensão que provoca o escoamento é denominada tensão de escoamento e a deformação que ocorre é a deformação plástica, na qual o material não voltara a sua forma original com a ausência da tensão.

- Endurecimento por deformação: Ao fim do escoamento, uma carga adicional pode ser aplicada ao corpo de prova, que resultará numa curva crescente e contínua, tornando-se mais achatada até uma tensão máxima, denominada limite de resistência. Esta parte corresponde ao terceiro estágio do diagrama.

- Estricção: O último estágio do diagrama, no qual temos uma redução abrupta da área de seção transversal em uma região localizada do corpo de prova. Com a redução continuamente desta área, o corpo poderá suportar menor carga, e por consequência, o diagrama tensão-deformação tende a curvar-se para baixo até a ruptura do corpo de prova, ao atingir a tensão de ruptura (HIBBERLER, 2010).

Como já observado, o diagrama-tensão deformação, para a maioria dos materiais, exibe uma relação linear entre a tensão e a deformação dentro da região elástica. Tal relação foi inicialmente estudada por Robert Hooke, em 1676, e ficou conhecida como lei de Hooke com a utilização do módulo de elasticidade (E), expressa por: (HIBBERLER, 2010).

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (3)$$

com $E = \text{Módulo de elasticidade do material}$

Ainda é possível relacionar as equações apresentadas. Dá equação 1 com a equação 3, podemos reescrever a deformação específica como:

$$\epsilon = \frac{P}{A \cdot E} \quad (4)$$

sendo $A = \text{Área da seção transversal}$

De forma semelhante podemos relacionar a equação 2 com a equação 4, e assim teremos que a deformação também pode ser escrita como:

$$\delta = \frac{P \cdot L}{A \cdot E} \quad (5)$$

onde $L = \text{Comprimento}$.

2.2.3 Metalografia

Ocasionalmente, faz-se necessário ou desejável o exame dos elementos estruturais e dos defeitos que influenciam as propriedades dos materiais. A capacidade de executar tais exames é importante, para assegurar que as associações entre as propriedades e a estrutura sejam compreendidas da forma apropriada, além de prever as propriedades de materiais.

Alguns elementos possuem dimensões macroscópicas, ou seja, podem ser observadas a olho nu, enquanto na maioria dos casos, os grãos constituintes possuem dimensões microscópicas, e a esta análise microscópica para metais e ligas, damos o nome de Metalografia ou Ensaio Metalográfico. (CALLISTER, 2000)

2.2.4 Microscopia Ótica

Os microscópicos são equipamentos utilizados com frequência na microscopia, pois auxiliam nas investigações das características microestruturais de todos os tipos de materiais. A maioria dessas técnicas emprega em conjunto com o microscópio um equipamento fotográfico. A fotografia na qual a imagem é registrada é chamada de fotomicrografia.

Normalmente, o preparo de superfície cuidadosos e meticulosos são necessários para revelar os detalhes importante da microestrutura. (CALLISTER, 2000). A técnica de preparação de amostras para a realização de um ensaio metalográfico em microscópio ótico pode ser dividida nas seguintes fases: (COLPAERT, 2008)

- Escolha e localização da seção a ser estudada
- Obtenção de uma superfície plana e polida no local escolhido para estudo
- Exame ao microscópio para observação das ocorrências visíveis sem ataque
- Ataque da superfície por um reagente química adequado
- Exame ao microscópio para a observação da microestrutura
- Registro do aspecto observado (fotomicrografia)

A localização da uma seção adequada para o estudo pode variar para cada caso. Se o aspecto macrográfico for homogêneo, a localização para retirada da amostra é indiferente, já para casos heterogêneos, pode ser recomendável a realização do exame em variados pontos, para um resultado mais detalhado.

Para a obtenção de uma superfície plana e polida do material, são dedicados alguns preparos especiais, uma vez que, está superfície será designada a um exame de escala microscópica. Na preparação clássica, após a obtenção da amostra, temos duas opções: (a) o embutimento em plástico ou resina da amostra, permitindo assim maior firmeza e facilidade de manuseio e permitir medidas para preservar as arestas durante o polimento ou (b) a amostra é submetida diretamente à preparação.

A preparação da superfície de interesse envolve o lixamento manual ou motorizado seguindo uma sequência de papeis de lixa de carboneto de silício (SiC), com resfriamento e lubrificação por água. A sequência usual de lixa é: 100 (ou 120 ou 180), 240, 320, 400, 600, 800 (Opcional) e 1200. Já para materiais mais macios, como aços inoxidáveis, aços ferríticos e aços carbonatados, em que há interesse em evitar a deformação excessiva, a sequência de lixa pode ser: 240, 320, 400, 600, 800 (Opcional) e 1200.

Deve-se reorientar em 90° a direção do lixamento e polimento ao se passar de um abrasivo para outro, e seguir o quanto possível a sequência de lixa apresentada. O comum é submeter a amostra a cada lixa, a pelo menos o dobro do tempo necessário para eliminar os riscos da lixa anterior.

Após o emprego das lixas, o polimento é continuado sobre um disco giratório de feltro, sobre o qual se aplica uma leve cama de abrasivo. Os abrasivos mais comuns são a alumina, o diamante e em alguns casos a sílica coloidal. O polimento é realizado em politrizes manuais ou automáticas. Usualmente pós o acabamento com a lixa de 600, utiliza-se a pasta de alumina na sequência 1 0,3 e 0,05 μm ou pasta de diamante com 3 μm seguida por 1 μm (COLPAERT,2008).

2.3 Estrutura cristalina

Conforme Callister (2000), os materiais sólidos podem ser classificados de acordo com a regularidade segundo a qual os átomos ou íons estão arranjados em relação uns aos outros. Um material cristalino é aquele no qual os átomos estão situados em um arranjo que se repete ou que é periódico ao longo de grandes distâncias atômicas.

Algumas das propriedades dos sólidos cristalinos dependem da estrutura cristalina do material, isto é, da maneira segundo a qual os átomos, íons ou moléculas estão arranjadas espacialmente. Existe muitas estruturas cristalinas diferentes, todas com uma ordenação atômica de longo alcance.

A ordenação atômica em sólidos cristalinos indica que pequenos grupos de átomos formam um padrão repetitivo. Dessa forma, ao descrever estruturas cristalinas, com frequência torna-se conveniente subdividir a estrutura em pequenas entidades que se repetem, chamadas, células unitárias. Assim sendo, a célula unitária consiste na unidade estrutural básica ou bloco de construção básico da estrutura cristalina e define a estrutura cristalina em virtude da sua geometria e das posições dos átomos no seu interior.

Para materiais metálicos, considerando a utilização do modelo de esferas rígidas para a representação da estrutura cristalina, temos três principais estruturas cristalinas mais comuns, sendo elas: cúbica de faces centradas

(CFC), cúbica de corpo centrado (CCC) e a hexagonal compacta (HC). (CALLISTER, 2000).

2.3.1 Diagrama de fases

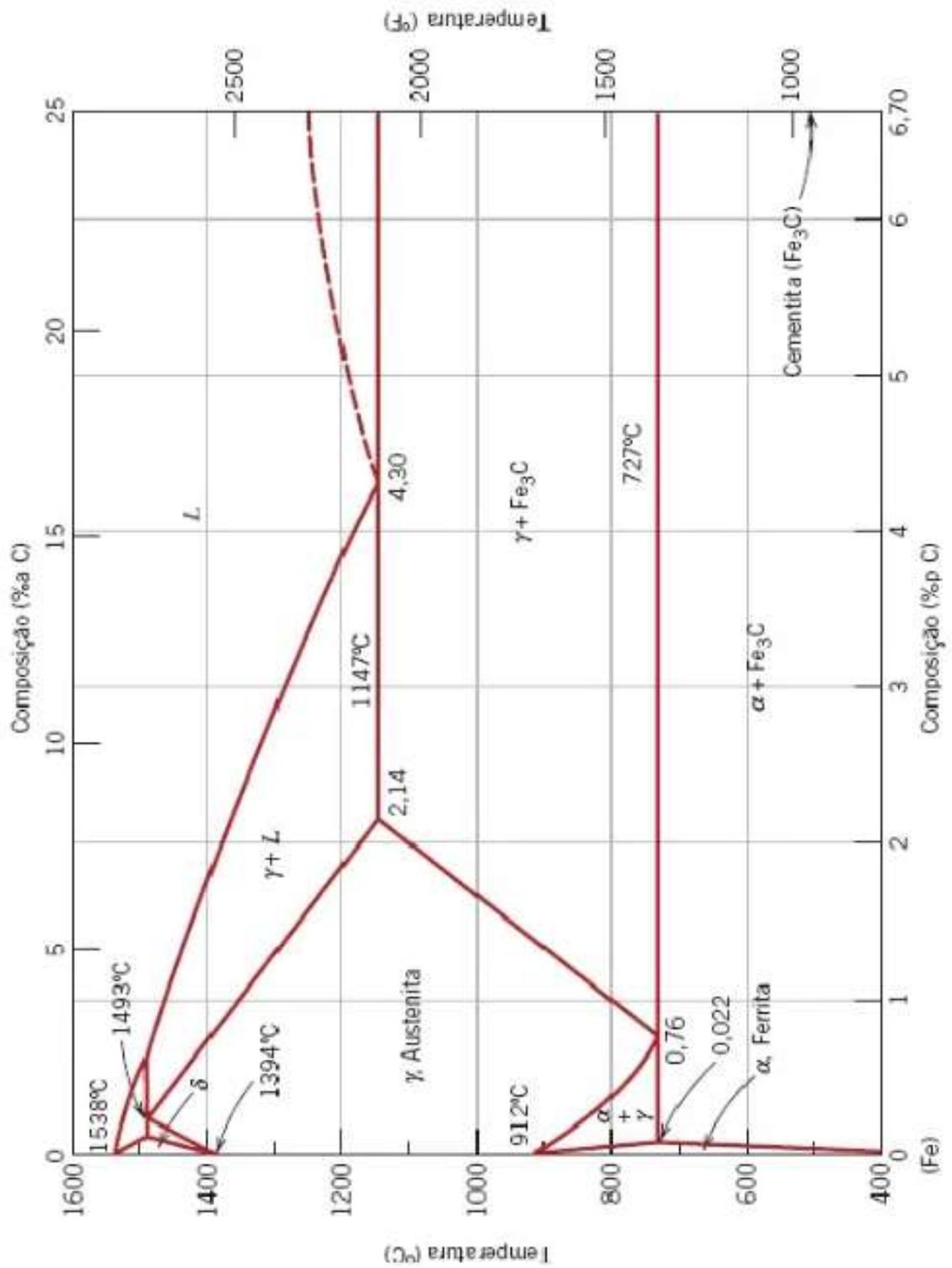
Segundo Callister (2018), a compreensão dos diagramas de fases para sistemas de ligas é extremamente importante, pois existe uma forte correlação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas; e o desenvolvimento da microestrutura de uma liga está relacionado com as características de seu diagrama de fases. Diversos materiais e misturas possuem seus respectivos diagramas de fases.

De todos os sistemas de ligas binárias, a formada pelo ferro-carbono é um dos mais importantes. Tanto os aços quanto os ferros fundidos são os principais materiais estruturais em toda cultura tecnologicamente avançada, são em essência ligas ferro-carbono. O diagrama de fases ferro-carbeto de ferro é apresentado no Diagrama 2.

O ferro puro, ao ser aquecido, apresenta duas mudanças de estrutura cristalina antes de se fundir. Em temperatura ambiente, a forma estável, é chamada de ferrita, ou ferro α , apresentando uma estrutura cristalina CCC (Cúbica de corpo centrado). A ferrita à 912°C , apresenta uma transformação polimórfica para austenita CFC (Cúbica de face centrada), ou ferro γ . Essa austenita persiste até 1394°C , quando a austenita CFC se reverte novamente a uma fase CCC, chamada ferrita δ , até que se funde a 1538°C . Tais mudanças ficam evidentes no eixo vertical a esquerda do diagrama.

O eixo das composições na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** s e estende apenas até 6,70%p C, nessa concentração se forma o composto intermediária carbeto de ferro, ou cementita (Fe_3C), representado por uma linha vertical no diagrama de fases.

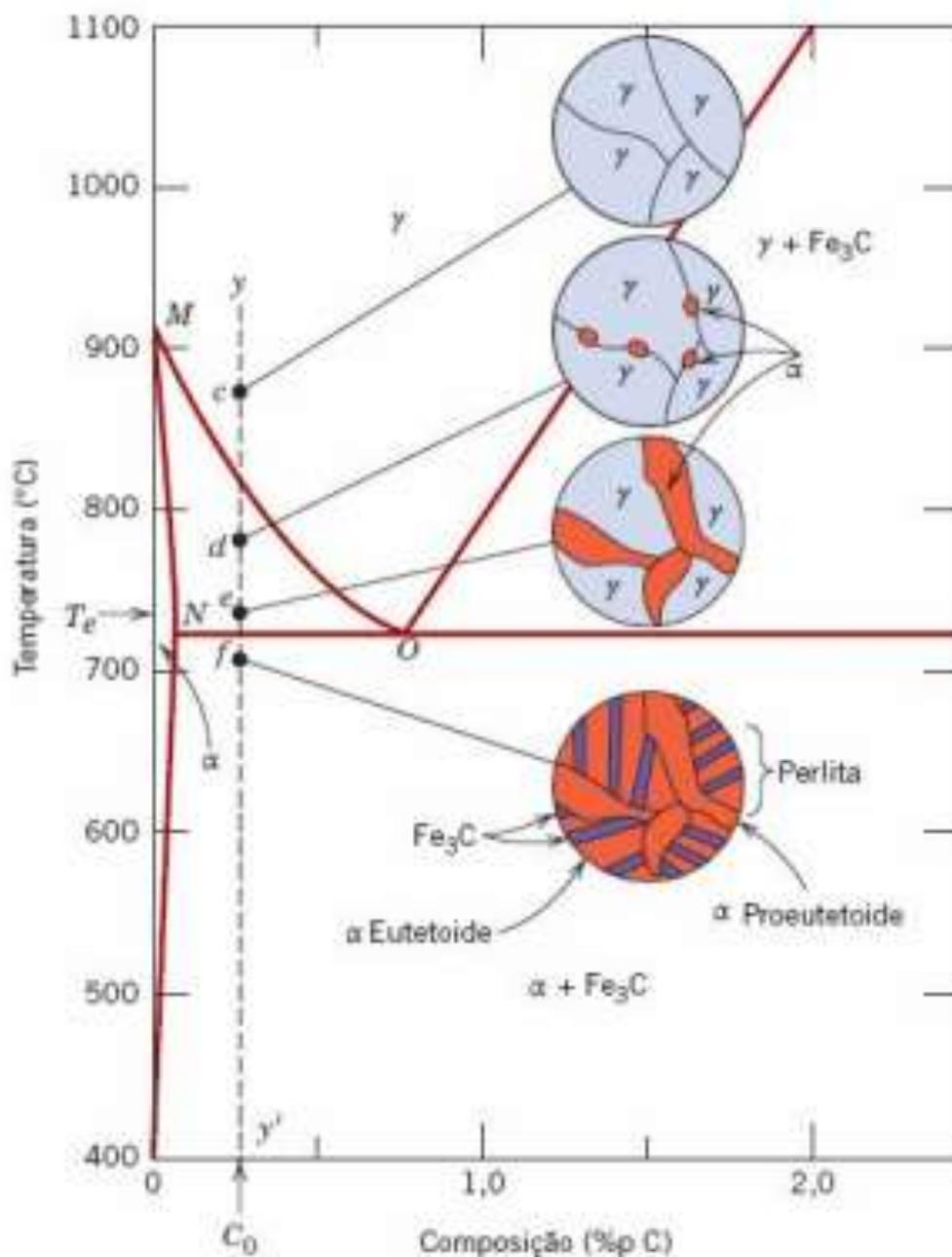
Diagrama 2: Diagrama de fases Ferro - Carbono



Fonte: Callister (2018)

As ligas com uma composição C_0 , entre 0,022%pC e 0,76%p C, são denominadas ligas hipoeutetoides (“menos que o eutetoide”). O Aço SAE 1045 possui 0,45%p C, se encaixa nesta classificação. O resfriamento desta região pode ser visto na Figura 7, na qual é possível a análise da microestrutura esperado para cada grau de temperatura.

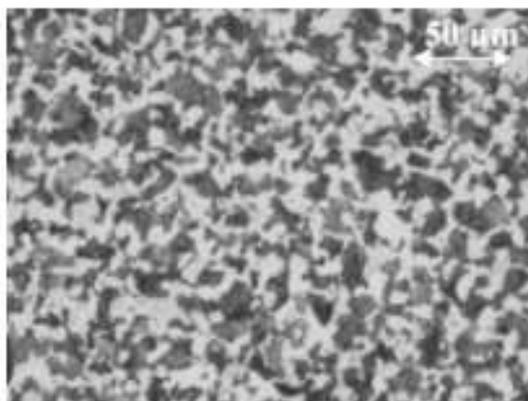
Figura 7 - Microestruturas para uma liga ferro carbono hipoeutetoide



Fonte: Callister (2018)

Na Figura 8, é possível observar uma micrografia do aço SAE 1045, o qual numa temperatura abaixo de 727°C, possui uma estrutura formada por Perlita e Ferrita.

Figura 8 - Metalografia aço SAE 1045 com zoom de 200x



Fonte: Filho e Lima (2020)

É possível a visualização do perlita e ferrita na figura acima, sendo a perlita os grãos claros.

2.4 Pré-aquecimento e resfriamento

Segundo Fortes (2005), a grande maioria dos metais são bons condutores de calor. Por consequência disto, o calor na região da soldagem é rapidamente escoado por toda a massa envolvida no processo, acarretando um resfriamento relativamente rápido. Em alguns metais esta alta taxa de resfriamento pode contribuir para a formação de microestruturas prejudiciais na região da soldagem. Assim, o pré-aquecimento da junta a ser soldada é uma maneira de reduzir esta taxa de resfriamento.

Durante a soldagem de aços de alto teor de carbono ou de alta liga, existe o perigo de depósito de solda e a zona termicamente afetada (ZTA) contenham altos percentuais de martensita, um constituinte duro do aço. Tais soldas possuem alta dureza e baixa ductibilidade e podem mesmo vir a trincar durante o resfriamento. O objetivo do pré-aquecimento é manter o teor de martensita da solda a um nível mínimo.

A martensita é formada durante o resfriamento da solda e da ZTA. A quantidade de martensita pode ser limitada reduzindo-se a taxa de resfriamento da solda. O pré-aquecimento aumenta a temperatura da região de solda, de modo que o gradiente de temperatura entre a solda e sua vizinhança fique reduzido. Com isto, a zona de soldagem aquecida se resfria mais lentamente. Em suma, o pré-aquecimento reduz:

- O risco de trincas por hidrogênio
- As tensões de contração;
- A dureza na ZTA

2.4.1 Temperatura de pré-aquecimento

Conforme Fortes (2005), um método para determinar a necessidade de pré-aquecimento de uma solda é o do carbono equivalente (C_{eq}). Para este cálculo determina-se um teor aproximado de outros elementos de liga que produzem a mesma dureza que 1% de carbono, assim, o C_{eq} pode ser calculado pela expressão:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%M_n}{6} + \frac{\%N_i}{15} + \frac{\%M_o}{4} + \frac{\%C_r}{5} + \frac{\%C_u}{13} \quad (6)$$

Essa expressão é válida para teores que estão dentro das faixas:

- $\%C < 0,50$
- $\%M_n < 1,60$
- $\%N_i < 3,50$
- $\%M_o < 0,60$
- $\%C_r < 1,00$
- $\%C_u < 1,00$

Outra expressão para o cálculo do C_{eq} é dada pelo IIW (International Institute of Welding):

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%M_n}{6} + \frac{\%C_r + \%M_o + \%V}{5} + \frac{\%N_i + \%C_u}{15} \quad (7)$$

A espessura do metal de base pode tornar necessário o pré-aquecimento mesmo para aços de baixo carbono. Existem vários métodos para se calcular a temperatura de pré-aquecimento, levando-se em consideração a espessura do material, os mais comuns são:

$$\text{Temperatura de pré - aquecimento } (^\circ\text{C}) = 350 * \sqrt{C_{eqtotal} - 0,25} \quad (8)$$

onde

$$C_{eqtotal} = 0,005 * C_{eq} * \text{espessura (mm)} + C_{eq} \quad (9)$$

A Tabela 2 fornece os valores sugeridos de temperaturas de pré-aquecimento para diferentes valores de carbono equivalente.

Tabela 2 - Temperatura de pré-aquecimento recomendada x Ceq

| Carbono Equivalente Ceq (%) | Temperatura de pré-aquecimento recomendada |
|---|--|
| < 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 (2005)

3. METODOLOGIA

Nesta etapa do trabalho, alguns passos devem ser seguidos para a obtenção de um resultado satisfatório. Os equipamentos e laboratórios utilizados são das dependências da UTFPR-GP (Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Guarapuava). O fluxograma 1 mostra resumidamente as etapas a serem seguidas.

Fluxograma 1 - Fluxograma das etapas do trabalho



Fonte: Autoria própria

3.1 Corpo de Prova

Com os objetivos do trabalho definidos, pode-se dar continuidade ao estudo prático. Para isto, uma barra cilíndrica de aço SAE 1045 com 5 m de comprimento e aproximadamente 13 mm de diâmetro foi adquirida, e para facilitar o transporte a barra foi repartida em 5 pedaços com aproximadamente 1 metro cada.

Fotografia 7 - Barras de aço com 1 metro de comprimento



Fonte: Autoria própria

Com auxílio da serra fita, do tipo horizontal, estas barras foram então repartidas novamente em pedaços menores com aproximadamente 20 cm de comprimento, totalizando então 25 repartições menores para a preparação dos

corpos de prova. Foi tomada tal extensão por conta da facilidade e qualidade para as etapas seguintes do estudo.

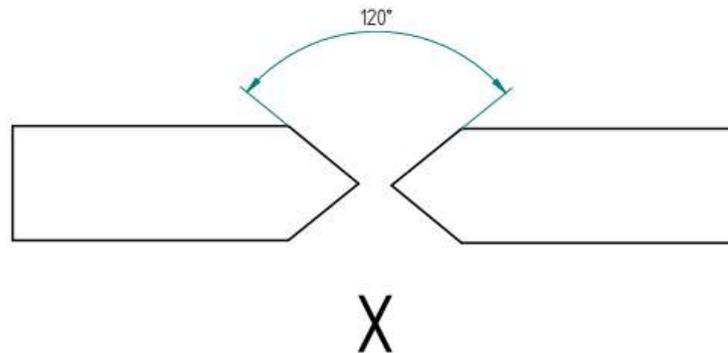
Fotografia 2 - Repartições do aço



Fonte: Autoria própria

Com os pedaços menores prontos, é então necessário a preparação de chanfros em cada corpo para os processos a seguir. Conforme Modenesi (2008), o chanfro é um corte efetuado na junta para possibilitar/facilitar a obtenção de uma solda com a penetração desejada, e é utilizada quando a espessura dos componentes da junta impede a obtenção da penetração desejada sem o chanfro. A escolha do tipo de chanfro e suas dimensões dependem de muitos fatores como o material base, sua espessura, o tipo de junta, o processo de soldagem, a possibilidade de se acessar os dois lados da junta, a posição de soldagem e as características desejadas para a junta.

Com o objetivo de analisar a região de solda, um chanfro foi realizado nas extremidades dos corpos de prova. Segundo estudos, o chanfro em X, conforme apresentado na Figura 9, com angulação de 120° é o adequado para este estudo.

Figura 9 - Chanfro em X

Fonte: Adaptado de MODENESI (2008)

Como o objeto de estudo trata-se de uma barra cilíndrica, e pelo dispositivo de fixação dos corpos não permitir uma solda contínua circulando a barra, a solda será aplicada no mesmo sentido da peça.

Com a angulação definida, os corpos de prova de 20 cm foram levados ao torno mecânico e então chanfrados. O torno mecânico é um equipamento que serve para girar uma peça em alta velocidade, e com a utilização de uma ferramenta de corte, esta peça pode ser trabalhada no formato desejado. Neste estudo foi utilizado o torno mecânico Nardini – Mascote, com adaptação de proteção contra rebarbas, apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 3.

Fotografia 3 - Torno mecânico

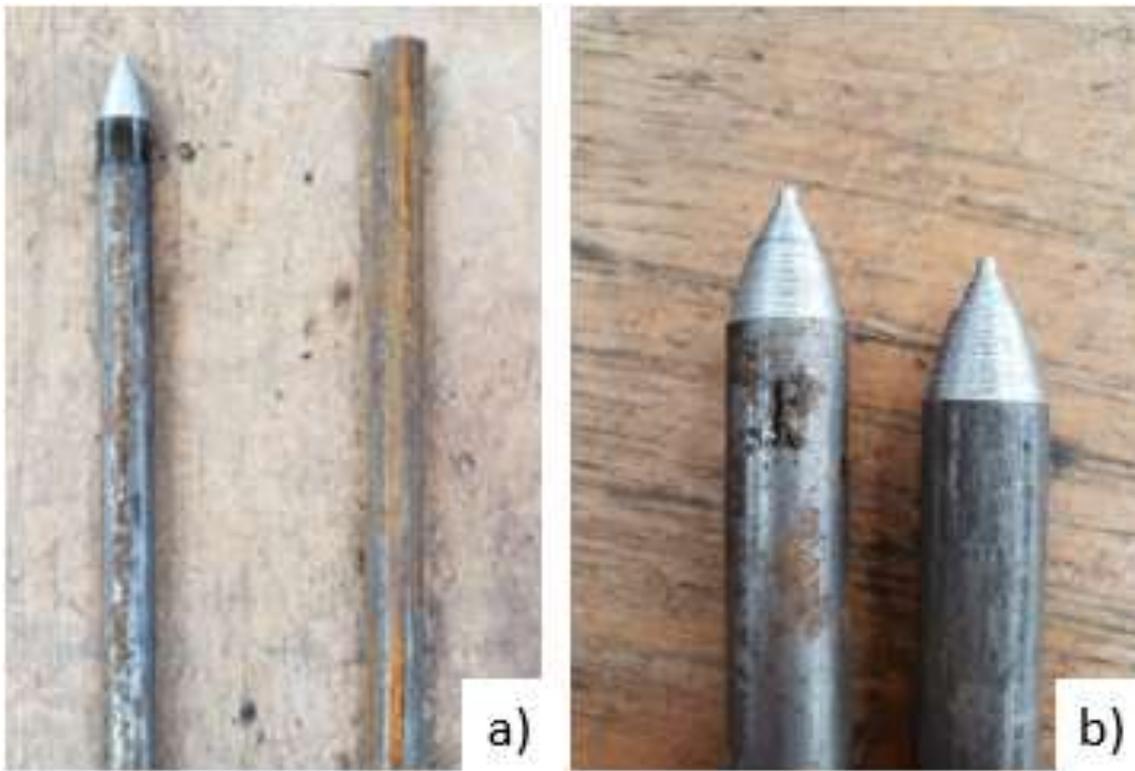


Fonte: Autoria própria

Para a retirada de material, foi adotada uma velocidade de giro de 315 RPM, e uma ferramenta de corte adequada.

A Fotografia 4 a) apresenta o corpo de prova antes e após a realização do chanfro, e na b) pode-se observar o detalhe do chanfro.

Fotografia 4 - Corpo de prova com o chanfro realizado



Fonte: Autoria própria

3.2 Soldagem

Os corpos de prova foram então separados em pares e com o auxílio de uma cantoneira, da Fotografia 5, e dois parafusos, foi possível garantir a fixação e a concentricidade entre as peças.

Fotografia 5 - Cantoneira com parafuso e corpos de prova fixadas



Fonte: Autoria própria

Para a soldagem foi utilizado o arame MIG da fabricante Vonder, com 0,8mm de diâmetro com classificação AWS ER70S-6, apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Fotografia 6 - Arame MIG



Fonte: Autoria própria

Com os corpos fixos e concêntricos, foi realizada um ponto de solda para juntar as partes. Para a solda, foi utilizado o processo de solda MAG, com composição aproximada de 20% de CO₂ e 80% de Ar.

Fotografia 7 - Ponto de solda



Fonte: Aatoria própria

Nesta etapa de soldagem, foi necessária a utilização dos seguintes EPI's:

- Jaleco de manga comprida;
- Luvas para solda;
- Sapato fechado;
- Máscara de Solda.

Por conta dos gases gerados durante o processo de solda, o sistema de exaustão do laboratório foi acionado, a fim de reduzir a quantidade destes gases no laboratório de soldagem.

Com os corpos devidamente juntos, foram realizadas seis soldas a temperatura ambiente no mesmo sentido da peça, a qual foi girada manualmente

de forma que todo o chanfro foi coberto com o material depositado, e então deixado para resfriamento natural.

Fotografia 8 - Corpos de prova com solda sem o pré-aquecimento



Fonte: Autorial própria

Nos processos de solda, foi perceptível o empenamento dos corpos de prova após o resfriamento.

3.2 Pré-aquecimento e solda

Como o material de estudo foi adquirido como sendo um aço SAE 1045, mas sem a devida documentação comprobatória de sua composição química, a temperatura de pré-aquecimento foi adotada conforme a Tabela 2, para aço com composição química desconhecida.

Assim, a região de solda foi aquecida com um maçarico, e a temperatura foi medida com a utilização de uma câmera térmica da fabricante HOT TEC, modelo HT7, com registro de temperatura na **Erro! Fonte de referência não encontrada**.9. Com o material na temperatura adequada, foram adotados os mesmos procedimentos da solda a temperatura ambiente.

Fotografia 9 - Câmera térmica registrando a temperatura



Fonte: Autoria própria

Devido ao resfriamento natural que ocorre após a retirada da chama do maçarico sobre a peça, a temperatura na região atingiu aproximadamente 360°C, assim, no intervalo de tempo entre desligar o maçarico e iniciar a solda, a temperatura do material já estaria mais próxima dos 300°C recomendados para

a realização da solda, os corpos de prova soldados podem ser vistos na Fotografia 10.

Fotografia 80 - Corpo de prova com solda com pré-aquecimento



Fonte: Autorial própria

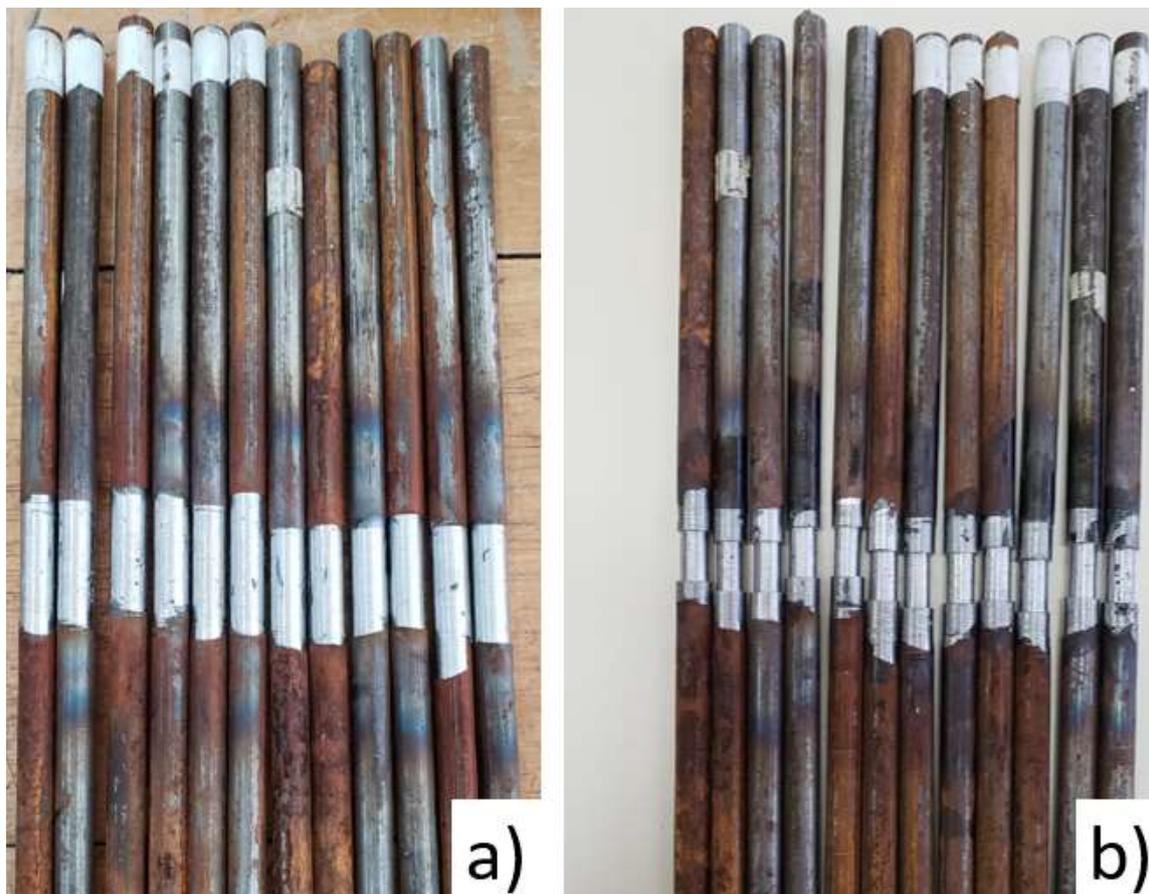
Foram realizadas as soldas com pré-aquecimento em seis pares de corpos de prova.

3.4 Preparação da região da solda

Nesta etapa, o excesso de solda foi retirado dos corpos de prova com a utilização novamente do torno mecânico e da ferramenta de corte. Neste processo foi criado um canal na região de solda. Este canal serve para realizar a concentração de tensão nesta região, e assim, ocorrer o rompimento exatamente nesta região durante o ensaio de tração.

Na Fotografia 11 temos os corpos de prova após este retrabalho no torno, sendo que a a) observa-se os corpos sem o excesso da solda, e em b) as peças com o canal já realizado.

Fotografia 91 - Corpo de prova após a solda



Fonte: Autoria própria

Os corpos de prova foram marcados com uma fita branca na extremidade a fim de diferenciar o processo de soldagem pelo qual passaram.

3.5 Ensaio de tração

Com todos os corpos de prova preparados, eles foram levados para o ensaio de tração na máquina universal de ensaios, que pode ser vista na Fotografia 12.

Fotografia 102 - Máquina Universal de Ensaios



Fonte: Autoria própria

Todos os corpos foram então ensaiados sob tração, e o resultado foi passado a um computador com um software apropriado para a recepção destes dados.

Fotografia 113 - Corpo de prova preso para o ensaio de tração



Fonte: Autoria própria

A fotografia acima demonstra como o corpo e prova foi preso e ensaiado sob tração.

3.6 Metalografia

Após a realização dos ensaios de tração, uma amostra de material com e sem o pré-aquecimento foi tomada para a análise metalográfica. Esta amostra foi tomada realizando-se um corte transversal na região da solda, de forma que no centro da amostra tivesse o aço, e ao redor o material depositado pela solda.

O material foi cortado com a utilização de uma cortadora metalográfica CM 60, **Erro! Fonte de referência não encontrada.**otografia 14, na qual durante todo o processo de corte temos o arrefecimento por água corrente.

Fotografia 124 - Cortadora Metalográfica CM 60



Fonte: Autoria própria

Após o corte, a amostra foi levada a uma embutidora metalográfica EM30D, Fotografia 15, na qual foi embutida em baquelite preto granulada, **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Durante o embutimento, buscou-se manter uma pressão de aproximadamente 1500 psi durante todo o processo.

Fotografia 135 - Embutida Metalográfica EM30D



Fonte: Autoria própria

O embutimento tem por finalidade facilitar o manuseio da amostra para os processos de lixamento e polimento a seguir.

Conforme a Teclago, Tecnologia em Máquinas Metalográficas, a baquelite é uma resina fenólica aplicado no processo de embutimento de amostras metalográficas através do método a quente. Trata-se de uma resina fenólica de alta qualidade quimicamente estável e resistente ao calor. Comercializada em garrafa conforme a Fotografia 16.

Fotografia 146 - Garrafa de Baquelite



Fonte: Autoria própria

Com a amostra embutida, ela apresentou o formato apresentado na Fotografia 17.

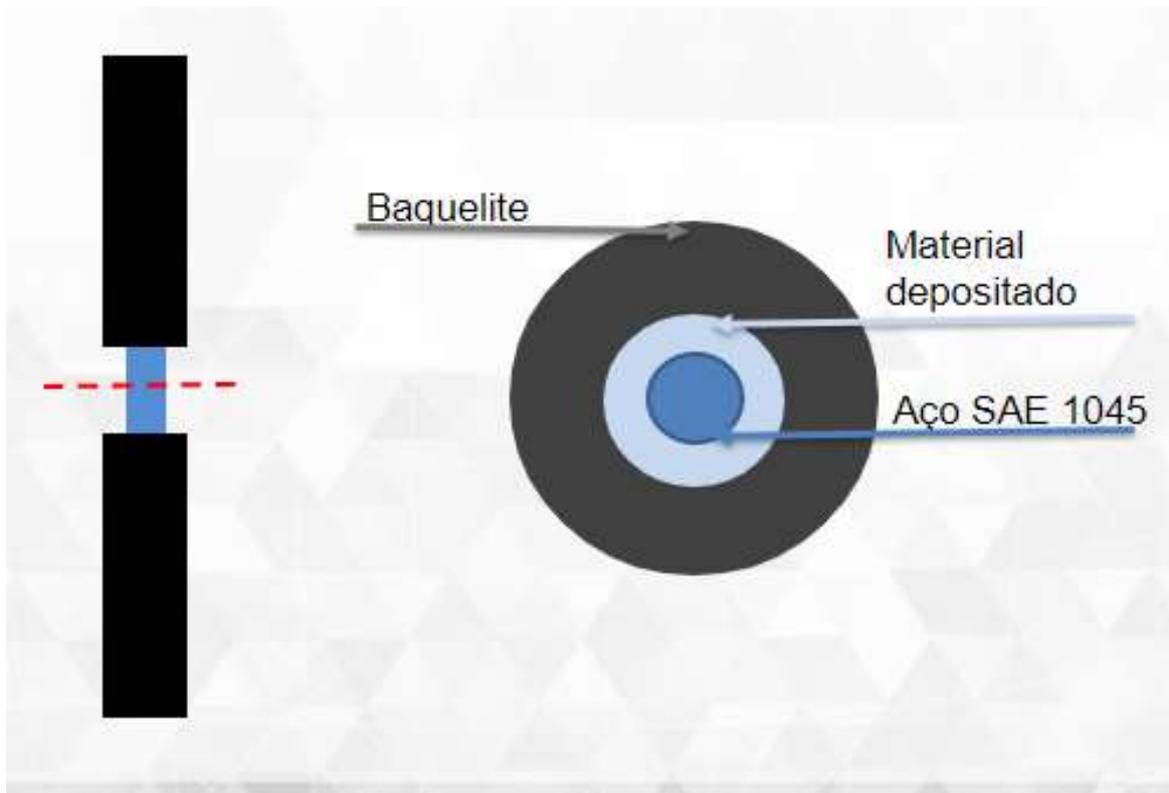
Fotografia 157 - Amostra preparada



Fonte: Autoria própria

Assim, a amostra foi preparada para ser levada ao lixamento e polimento. A Figura 10 mostra de forma esquemática a composição da peça e da região que foi retirada a amostra.

Figura 10 - Representação do corte e da amostra embutida



Fonte: Autoria própria

Para o lixamento das peças foi utilizado um suporte adequado com a passagem contínua de água corrente, Fotografia 18. O sequenciamento de lixas d'água com granulometria 320-400-600-1200 foi adotado, alterando o sentido de lixamento em 90° , para a troca de lixas, quando todos os riscos se encontravam em uma única direção.

Fotografia 18 - Lixa d'agua no suporte com água corrente



Fonte: Aatoria própria

Com o lixamento finalizado a amostra foi polida com a utilização de uma Politriz Lixadeira Metalográfica PL02E, Fotografia 19, com rotação alta e utilização de alumina 0,5 μ m.

Fotografia 169 - Politriz Lixadeira Metalográfica PL02E



Fonte: Aatoria própria

Com a amostra preparada, a seguinte etapa é o ataque químico. O ataque químico foi realizado com a utilização do Nital 10%, no qual o aço foi mergulhado por 6s e em seguida limpo com a utilização de água corrente.

3.7 Análise no Microscópio

A amostra foi analisada com a utilização do Microscópio ótico Olympus BX51M, visto na Figura11.

Figura 11 - Microscópio Ótico Olympus BX51M



Fonte: Olympus IMS

O microscópio é equipado com lentes de aumento de 5X, 10X, 20X, 50X e 100X, as quais foram selecionadas conforme a região de análise. O equipamento está conectado a um computador e a uma televisão de 40", na qual foi possível a visualização e retirada de fotografias das amostras com as lentes de aumento.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após todos os experimentos práticos finalizados, e com todos os dados coletados, foi iniciada a comparação entre os resultados obtidos com a solda sem e com pré-aquecimento. Este tópico possui esta finalidade e será realizado conforme a sequência:

- Comparação entre as soldas;
- Comparação dos resultados do ensaio de tração;
- Comparação microscópica.

4.1 Comparação entre as soldas

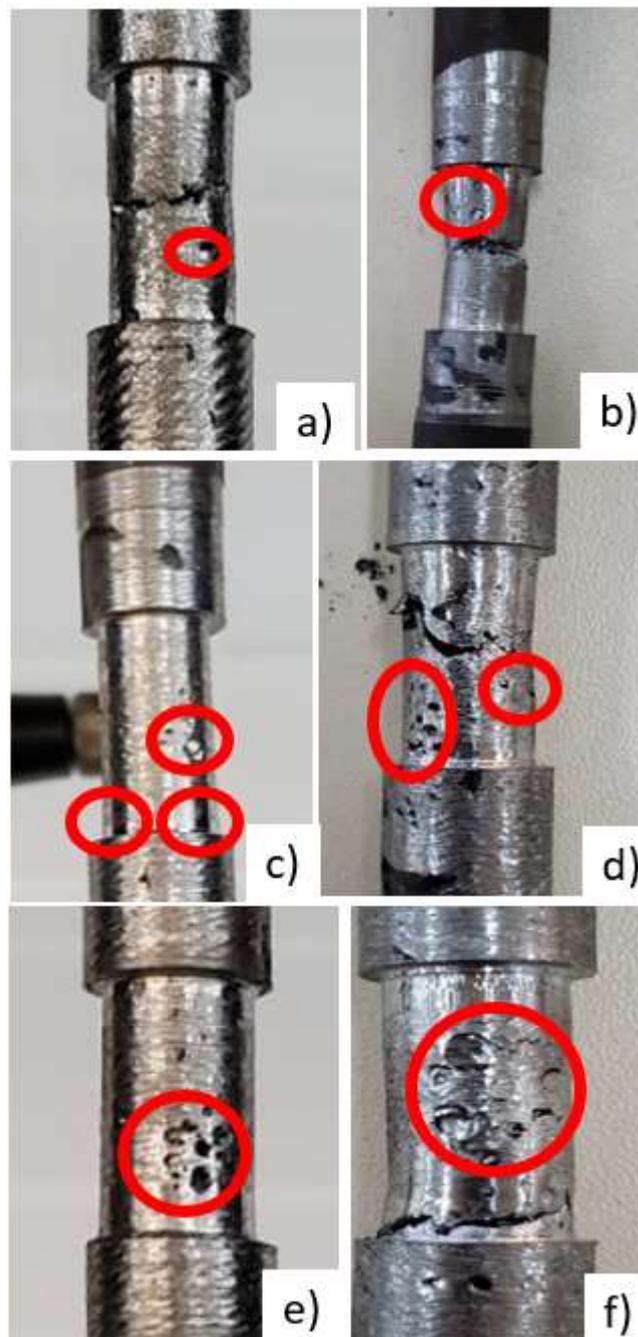
Ambas as soldas foram realizadas com a utilização dos mesmos equipamentos, seguindo os mesmos parâmetros e pelo mesmo soldador, sendo a única diferença entre elas o pré-aquecimento.

Nos dois processos de solda, foi possível observar um número significativo de porosidade, a qual pode ter tido grande influência nos resultados do ensaio de tração. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostram os corpos de prova com a presença da porosidade em destaque (marcadas com um círculo vermelho).

A porosidade é definida como uma descontinuidade do tipo de cavidade formada pelo aprisionamento de gases durante a solidificação. As causas das porosidades na solda, são os gases dissolvidos no metal fundido e as variáveis no processo de soldagem que controlam a taxa de solidificação. (RAMIREZ, HAN E LIU, 1994). Estes gases dissolvidos podem ser entendidos como contaminantes no processo de soldagem.

A contaminação ocorre principalmente por elementos presentes no vapor d'água, tais como o nitrogênio (N₂), o oxigênio (O₂) e o hidrogênio (H₂), que trazem resultados danosos a solda. O pré-aquecimento possibilita uma diminuição da umidade superficial da peça, reduzindo assim uma possível fonte desta contaminação. (MODENESI, 2004).

Fotografia 20 - Corpos de prova da soldagem sem o pré-aquecimento



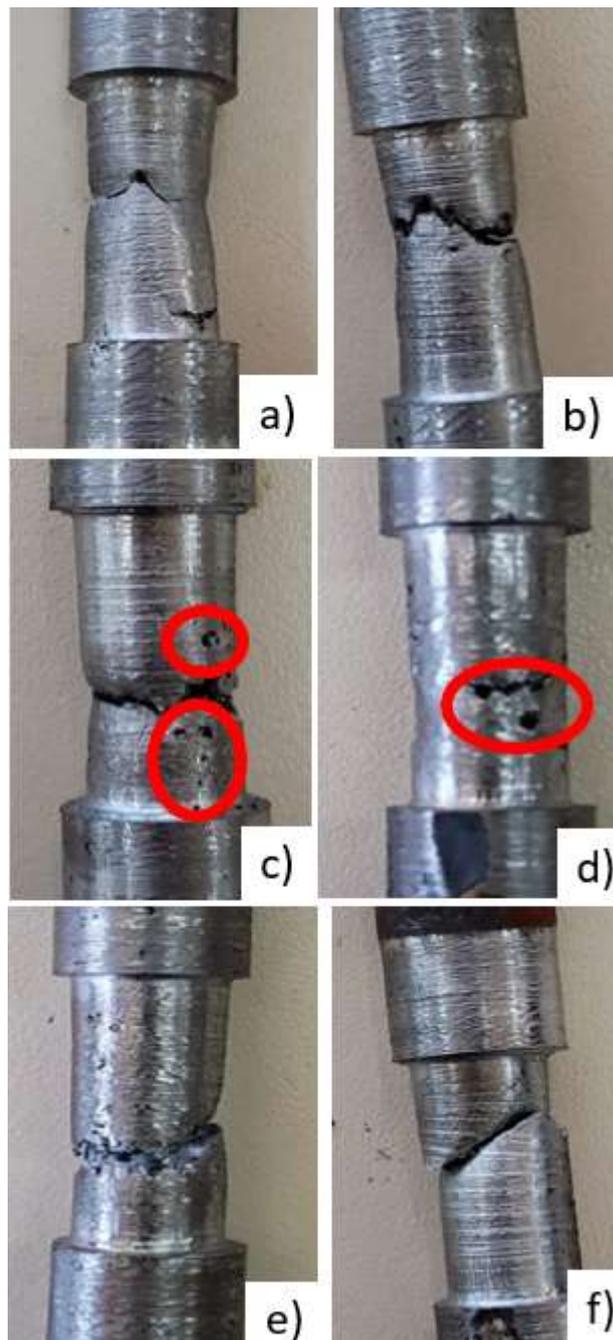
Fonte: Autoria própria

É possível observar a presença da porosidade, circulado em vermelho na Fotografia 20.

Nas soldas com o pré-aquecimento, obteve-se uma diminuição da presença de porosidade e diminuição no grau de empenamento dos corpos de prova. Estas mudanças devem-se justamente ao pré-aquecimento realizado.

Também foi perceptível uma maior facilidade para a abertura e manutenção do arco-elétrico durante a solda. A **Erro! Fonte de referência não encontrada. 20** pode ser comparada a **Erro! Fonte de referência não encontrada. 21** com relação a diminuição de porosidade visível.

Fotografia 217 - Corpos de prova da soldagem com o pré-aquecimento



Fonte: Autoria própria

Conforme MODENESI (2004), poros não são concentradores de tensão muito efetivos, mas quando possuem dimensões elevadas ou estão presentes em grande quantidade, causam uma redução na seção útil da solda e, portanto, da carga máxima que esta pode suportar.

4.2 Comparação dos resultados do ensaio de tração

Os resultados do ensaio de tração, obtidos através da máquina universal de ensaios, podem ser observados no **APÊNDICE A e B**. Todos os corpos de prova sofreram o rompimento no canal realizado, assim como planejado anteriormente

É perceptível que houve um aumento da tensão de escoamento, quando comparamos a solda sem pré-aquecimento e o processo com o pré-aquecimento. Este aumento da resistência deve-se principalmente as mudanças microestruturais do aço, relacionadas diretamente a taxa de resfriamento menor entre os dois tipos de solda realizados, a solda sem o pré-aquecimento apresentou uma tensão máxima média de 255,8 MPa, enquanto a com pré-aquecimento apresentou uma tensão máxima média de 342,7 Mpa.

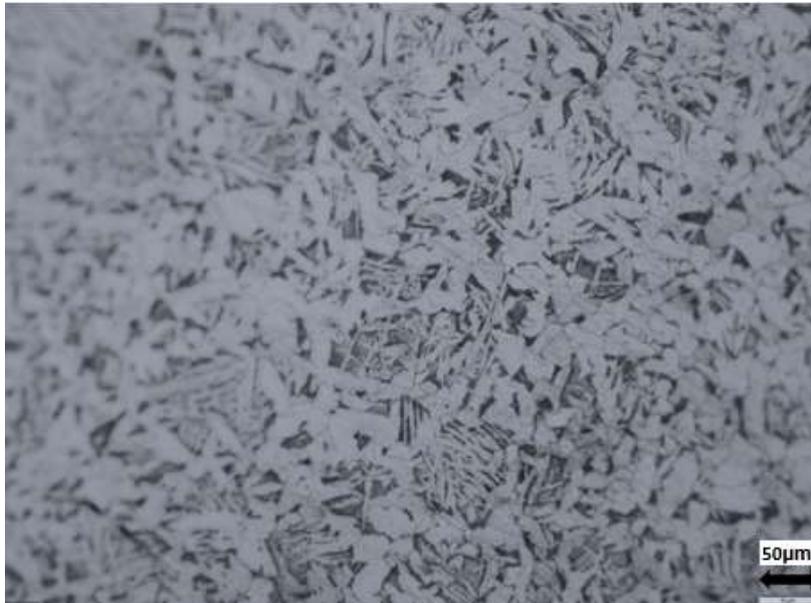
O procedimento de pré-aquecimento diminui os gradientes térmicos, causando redução na velocidade de resfriamento, possibilitando a formação de uma estrutura macia na ZTA e propiciando um maior tempo para que o hidrogênio escape da peça antes que se atinja as temperaturas de fragilização (MODENESI, 2004).

A fragilização por hidrogênio é preocupante em aços de alta resistência, podendo diminuir consideravelmente a resistência mecânica do material a valores abaixo da própria tensão de escoamento (ROSADO ,2011).

4.3 Comparação microscópica

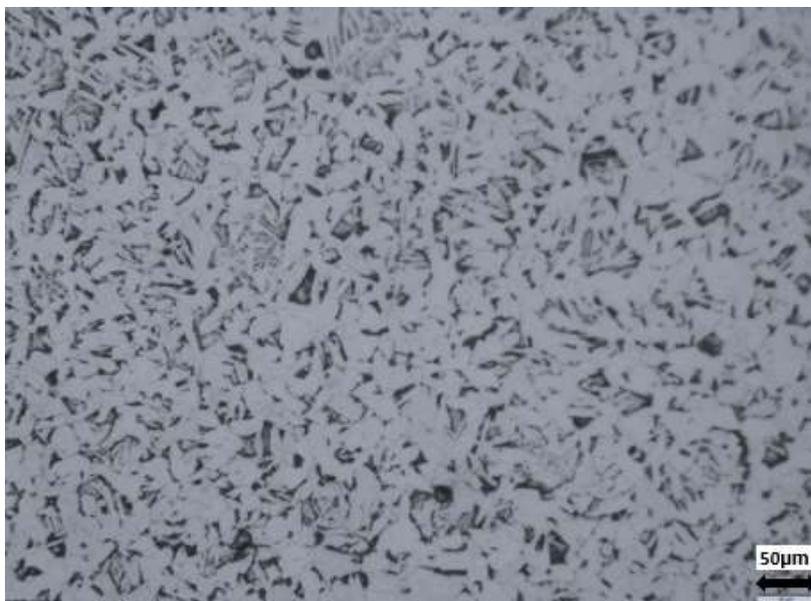
A Fotografia 22**Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a microestrutura após o processo de soldagem sem o pré-aquecimento com a utilização de filtros e a lente de 20X.

Fotografia 22 - Micrografia do aço após solda sem o pré-aquecimento



Fonte: Autoria própria

Fotografia 23 - Micrografia do aço após solda com o pré-aquecimento



Fonte: Autoria própria

Comparando a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 22 com a REF _Ref118816880 \h * MERGEFORMAT **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 23 é perceptível a semelhança entre as duas fases, no entanto, é possível analisar a presença de uma perlita (grãos claros) mais fina na

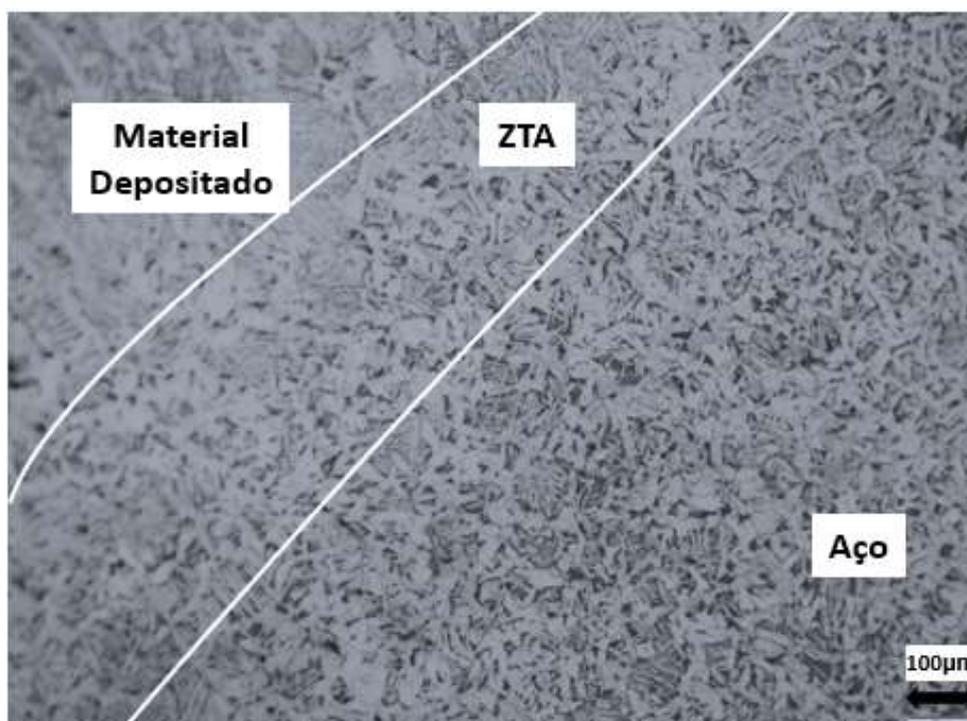
microestrutura da solda sem o pré-aquecimento, enquanto no aço da solda com o pré-aquecimento temos a presença de uma perlita mais grossa, isto ocorre justamente devido a diferença da taxa de resfriamento entre as duas soldas.

Em um aço com uma estrutura de ferrita e perlita antes da soldagem, as regiões perlíticas e uma quantidade variável da ferrita junto à perlita se transformam em austenita durante a soldagem. No resfriamento, estas regiões que apresentam com um teor de carbono maior do que teor médio do aço, podem se transformar em martensita se a velocidade de resfriamento for suficientemente elevada. (MODENESI, 2004).

Neste estudo teve-se o resfriamento lento a ar livre para as duas soldas, no entanto, para a solda com o pré-aquecimento, este resfriamento ocorreu a uma taxa menor, devido a todo conjunto da peça estar a uma temperatura semelhante.

A Fotografia 24 apresenta a micrografia da região de solda, com a possibilidade de visualizar a região do material depositado, da ZTA e do aço.

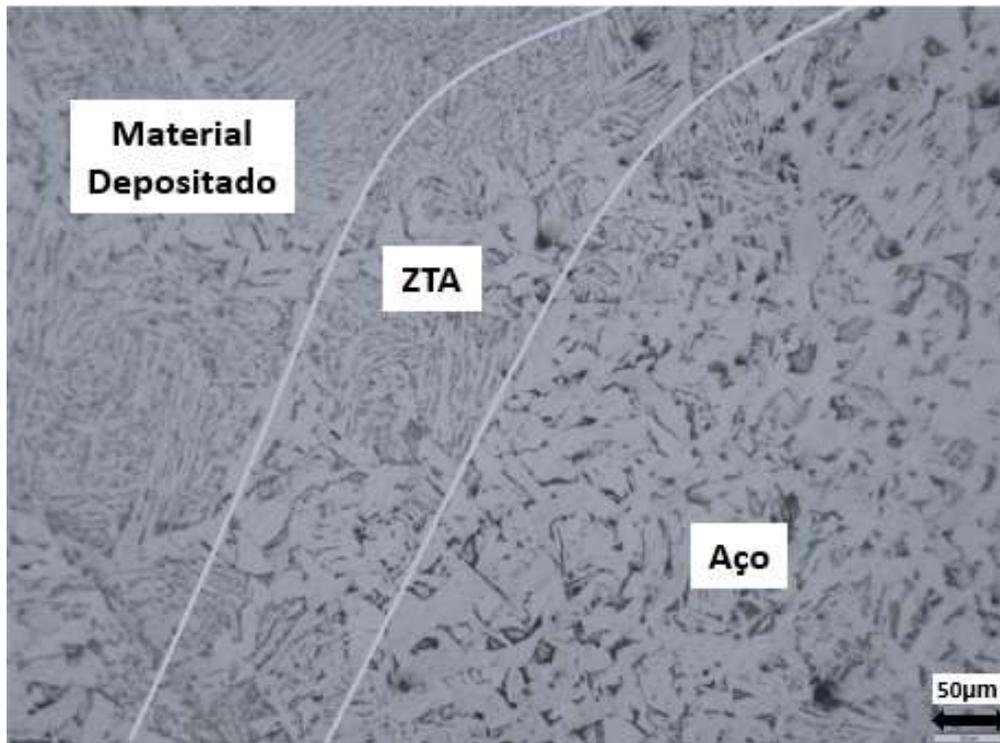
Fotografia 24 - ZTA da solda sem o pré-aquecimento



Fonte: Autoria própria

A Fotografia 25 apresenta de forma semelhante as regiões apresentadas na figura acima, mas para o aço que passou pelo processo de pré-aquecimento.

Fotografia 25 - ZTA da solda com o pré-aquecimento



Fonte: Autoria própria

Pela diferenciação do tempo de resfriamento da peça, e conforme estudos, na ZTA da solda com o pré-aquecimento foi observado uma menor formação de martensita.

5. CONCLUSÃO

Através dos estudos realizados, é possível afirmar que o processo de soldagem MAG (20% CO₂ e 80% de Ar) sem o pré-aquecimento se mostrou mais difícil de se realizar e com um maior número de imperfeições (poros) quando comparada ao mesmo processo com o pré-aquecimento.

Com o ensaio de tração, foi perceptível um aumento de resistência média de aproximadamente 34% da solda com o pré-aquecimento. Este fato deve-se estar relacionado as mudanças microestruturais apresentadas no ensaio metalográfico, também pode estar relacionado a uma redução significativa das imperfeições apresentadas com a solda.

A análise micrografia da solda não apresentou grandes mudanças estruturais no aço, devido a temperatura abaixo da recristalização do aço, mas demonstrou algumas mudanças na ZTA, com uma pequena formação de martensita, que influenciou no resultado do ensaio de tração.

Assim, a técnica de pré-aquecimento para a soldagem MAG se mostrou eficiente para aumento de resistência a tração do aço SAE 1045, e que pode vir a ser empregada conforme a aplicação do material.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir, seguem-se algumas sugestões para trabalhos futuros correlacionados a área de estudo apresentada:

- Analisar a influência do pré-aquecimento para a soldagem de aços com diferentes composições;
- Modificar o processo de soldagem para analisar as variedades de resultados com e sem o pré-aquecimento
- Padronizar a forma de soldagem, a fim de reduzir as variações humanas do processo de soldagem.
- Analisar a dureza do material com estes processos.

7. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASMT A370 / ASME AS-370. Revisada em 2016. [S.l.]

ANDREUCCI, Ricardo. **Ensaio por Líquidos Penetrantes**. São Paulo; LP. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6892**: Materiais metálicos – Ensaio de Tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018

CALLISTER, William D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 5ª ed. Rio de Janeiro; LTC editora. 2002

CALLISTER, William D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 9ª ed. Rio de Janeiro; LTC editora. 2016

COLPART, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4ª ed. São Paulo: Bluncher, 2008.

DUTRA, William T.; MACHADO, Ivan G. **Influência do Pré-aquecimento indutivo localizado sobre características Metalúrgicas de Juntas Soldadas**. 2017. Artigo Técnico. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/S12203.10>. Acesso em 23 mai. 2022.

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

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

GEARY, Don.; MILLER, Rex. **Soldagem**. [S.l.]: Porto Alegre: Bookman, 2013.

HIBBELER, Russell C. **Resistência dos materiais**. 7ª ed. São Paulo: Pearson, 2010.

LINCOLN ELETRIC. **Consumíveis de Soldagem**. Disponível em: <https://docero.com.br/doc/e1vv818>. Acesso em 18 mai. 2022

MEDEIROS, Aldimar F de M. LIMA, Ramsés O. C. **Análise comparativa da usinabilidade do ferro fundido e do aço SAE 1045 no torneamento com ferramenta de metal duro**. 2020. Trabalho de conclusão de curso. Curso

interdisciplinar em ciência e tecnologia, Universidade federal rural do semiárido – UFERSA. [S.l.]

MODENESI, Paulo J. **Fontes de Energia para a Soldagem a Arco**. 2009. Dissertação (Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal de Minas Gerais, . [S.l.]: 2009.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. 2012. Dissertação (Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal de Minas Gerais, . [S.l.]: 2012.

MODENESI, Paulo J.; **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**. 2004. Dissertação (Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal de Minas Gerais, . [S.l.]: 2004

NÚCLEO TECNOLÓGICO DE SOLDAGEM E QUALIDADE. **Manual de Tecnologia e Fabricação e Soldagem**. 2002. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM354/Manual%20de%20Processos%20de%20Soldagem.pdf. Acesso em 22 mai. 2022

OLYMPUS IMS. MICROSCOPE BX53M. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/pt/microscope/bx53m/>. Acesso em 08 nov. 2022.

RAMIREZ, J.E. ; HAN, B. ; LIU, S. Effect of Welding Variables and Solidification Substructure on Weld Metal Porosity. Metallurgical and Materials Transactions: **Physical Metallurgy and Materials Science**.1994.

STEEL FORGE. AISI 1045 CARBON STEEL. Disponível em: <https://steelforge.com/aisi-1045>. Acesso em 02 mai. 2022.

WAINER, Emílio.; BRANDI, Sérgio D.; MELLO, Fábio D. H. de. **Soldagem: processos e metalurgia**. [S.l.]: Editora Blucher, 1992.

