

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS GUARAPUAVA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

THIAGO GIOVANI MATTOZO

**ANÁLISE COMPARATIVA EM SOLDAS COM E SEM PRÉ-
AQUECIMENTO NO AÇO CARBONO SAE 1045**

**GUARAPUAVA
2021**

THIAGO GIOVANI MATTOZO

**ANÁLISE COMPARATIVA EM SOLDAS COM E SEM PRÉ-
AQUECIMENTO NO AÇO CARBONO SAE 1045**

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

Coorientadora: Prof. Dra. Carla Dantas da Silva

GUARAPUAVA
2021



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

ANÁLISE COMPARATIVA EM SOLDAS COM E SEM PRÉ-AQUECIMENTO NO AÇO CARBONO SAE 1045

por

Thiago Giovani Mattozo

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 10:00h do dia 14 de Maio de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Câmpus* Guarapuava. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos Membros abaixo assinados. Após deliberação e conferidas, bem como achadas conforme, as alterações indicadas pela Banca Examinadora, o Trabalho de Conclusão de Curso, em sua forma final, pela Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica foi considerado APROVADO.

Prof. Dr. Aldo Przybysz
Prof. Orientador

Prof^ª. Dr^ª. Carla Dantas da Silva
Prof. Coorientadora

Prof. Dr. Sergio Dalmas
Prof. Membro da banca

Thiago Giovani Mattozo

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelos dons que me deu nesta existência que serviram na realização deste projeto.

Sou grato aos meus pais por sempre terem dado o suporte necessário, incentivarem e acreditarem que eu seria capaz de superar os obstáculos que a vida me apresentou.

Ao meu orientador, Aldo Przybysz e minha coorientadora, Carla Dantas da Silva por sempre estar presente para indicar a direção correta que o trabalho deveria tomar.

A todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional.

A minha namorada Vanessa Gomes da Silva pelo apoio e companheirismo durante cada etapa na execução deste projeto.

Aos meus amigos e colegas de curso com quem convivi durante os últimos anos, pelo companheirismo e pela troca de experiências que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como formando.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte de minha formação, o meu muito obrigado.

MATTOZO, Thiago G. **Análise Comparativa em Soldas com e sem Pré-aquecimento no Aço Carbono SAE 1045**. 2021. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

RESUMO

A utilização do processo de soldagem nas indústrias é extremamente importante para união dos elementos estruturais, que em grande parte são produzidos com material base aços de médio carbono como o aço SAE 1045. Os efeitos de temperatura na soldagem podem resultar em trincas, porosidade e microestrutura perlítica endurecida que causam heterogeneidades nas propriedades mecânicas na região da solda. Para contornar este problema, este trabalho propõe a realização um pré-aquecimento com oxiacetileno até a temperatura calculada de 250°C para então realizar as soldagens MAG e eletrodo revestido, possibilitando então um resfriamento lento evitando assim a formação de perlita. Para análise dos resultados, alguns ensaios mecânicos como líquidos penetrantes, dureza e análise metalográfica proporcionam uma análise adequada. Comparando os resultados do processo de soldagem aplicando a técnica de pré-aquecimento com os resultados do processo de soldagem sem pré-aquecimento obteve-se uma incidência menor de descontinuidades na análise de líquidos penetrantes. Na comparação de dureza Rockwell houve uma redução considerável de dureza nas regiões do cordão de solda e ZTA (Zona Termicamente Afetada) ocasionando uma estrutura mais dúctil. A metalografia aplicada permitiu verificar uma melhor penetração na solda quando aquecida, além de despontar uma ZTA de maior largura acarretando em propriedades mais uniformes no material de estudo pela menor taxa de extração de calor.

Palavras-chave: Pré-aquecimento. Soldagem MIG/MAG. Soldagem por Eletrodo Revestido. Aço SAE 1045. Ensaio Mecânicos.

MATTOZO, Thiago G. **Comparative Analysis in Weld with and without Preheating in Carbon Steel SAE 1045**. 2021. 72 p. Completion of coursework to obtain a bachelor's degree in Mechanical Engineering – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

ABSTRACT

The usage of the welding process in industries is extremely important for joining structural elements that in mostly cases are made by medium carbon steels such as SAE 1045 steel. The temperature effects in welding may result in cracks, porosity and hardened pearlitic microstructure that cause heterogeneities on mechanical properties in the weld region. To get around this problem, preheating with oxyacetylene will be carried out up to the calculated temperature of 250°C to then carry out MIG/MAG welding and a coated electrode arc welding that allow a slow cooling rate avoiding the formation of perlite. For analysis of the results, some mechanical tests such as penetrating liquids, hardness and metallographic analysis provide an adequate analysis. Comparing the results of the welding process using the preheating technique with the results of no preheating, a lower incidence of discontinuities was obtained in the analysis of penetrating liquids. In the Rockwell hardness comparison, there was a considerable reduction in hardness in the weld bead and HAZ (Heat-Affected Zone) regions, causing a more ductile structure. The applied metallography allowed to verify a better penetration in the weld when heated, in addition to spawning a larger HAZ, resulting in more uniform properties in the study material due to the lower rate of heat extraction.

Keywords: Preheating. MIG/MAG Welding. Coated Electrode arc Welding. SAE 1045 Steel. Mechanical Testing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de fases Fe-C.....	19
Figura 2 - Aço SAE 1045 ferrita e perlita	20
Figura 3 - Soldagem MIG/MAG	22
Figura 4 - Tocha MIG/MAG	23
Figura 5 - Equipamento soldagem com eletrodo revestido	25
Figura 6 - Efeito da polaridade na solda com eletrodo revestido	26
Figura 7 - Representação de um eletrodo para aço.....	29
Figura 8 - Etapas do ensaio de líquidos penetrantes.....	32
Figura 9 - Ensaio de dureza Rockwell.....	33
Figura 10 - Fluxograma da metodologia	37
Figura 11 - Amostras de Aço SAE 1045	38
Figura 12 - Preparação da junta em aço-carbono	39
Figura 13 - Fresadora	39
Figura 14 - Amostras chanfradas.....	40
Figura 15 - Tocha e cilindros de oxiacetileno	41
Figura 16 - Medição termômetro Infravermelho.....	41
Figura 17 - Eletrodo E6013	44
Figura 18 - Amostras soldadas	45
Figura 19 - Líquido Penetrante e Revelador.....	46
Figura 20 - Durômetro de bancada Rockwell.....	47
Figura 21 - Edentador esférico	48
Figura 22 - Corte da amostra para análise	49
Figura 23 - Cortadora Metalográfica.....	49
Figura 24 - Embutidora metalográfica	50
Figura 25 - Amostras embutidas em baquelite	51
Figura 26 - Base de lixamento.....	51
Figura 27 - Politriz lixadeira metalográfica	52
Figura 28 - Balão volumétrico com Nital 3%	53
Figura 29 - Microscópio ótico	53
Figura 30 - Ensaio Líquidos Penetrantes.....	55
Figura 31 - Análise de descontinuidades soldagem MAG	56
Figura 32 - Análise de descontinuidades MAG Com Pré-aquecimento.....	57
Figura 33 - Análise de descontinuidades eletrodo revestido	58
Figura 34 - Análise de descontinuidades eletrodo revestido com pré-aquecimento	59
Figura 35 - Comparação de dureza.....	61
Figura 36 - Comparação MAG.....	62
Figura 37 - Comparação Eletrodo Revestido	63
Figura 38 - Micrografia do material soldado pelo processo MAG, com pré-aquecimento.....	64
Figura 39 - Micrografia do material soldado com processo MAG, sem pré-aquecimento	65
Figura 40 - Micrografia do material soldado com eletrodo revestido, com pré-aquecimento	65
Figura 41 - Micrografia do material soldado com eletrodo revestido, sem pré-aquecimento.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação numérica dos aços norma SAE	18
Tabela 2 - Tensão de escoamento SAE 1045	18
Tabela 3 - Constituintes revestimento e principais funções	27
Tabela 4 - Temperatura de pré-aquecimento recomendada.....	30
Tabela 5 - Escala de dureza Rockwell	34
Tabela 6 - Composição química média do aço SAE 1045	42
Tabela 7 - Configuração de soldagem MAG.....	43
Tabela 8 - Características Eletrodo E6013	44
Tabela 9 - Resultados de dureza MAG.....	60
Tabela 10 - Resultados de dureza Eletrodo Revestido	60

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 - Reação do Dióxido de Carbono	24
Equação 2.2 - Fórmula do Carbono Equivalente	30
Equação 2.3 - Profundidade de Penetração Comum com Penetrador de Diamante.....	34
Equação 2.4 - Profundidade de Penetração Superficial com Penetrador de Diamante	34
Equação 2.5 - Profundidade de Penetração Comum com Penetrador Esférico.....	35
Equação 2.6 - Profundidade de Penetração Superficial com Penetrador Esférico.....	35
Equação 3.1 - Aplicação da Fórmula do Carbono Equivalente	42
Equação 3.2 - Valor de Carbono Equivalente % (em peso) para o Aço SAE 1045.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>Ar</i>	Argônio
AWS	Sociedade Americana de Soldagem (do inglês – <i>American Welding Society</i>)
<i>C</i>	Carbono
C_2H_2	Acetileno
C_2H_6O	Álcool Etílico
CC-	Polaridade Direta
CC+	Polaridade Reversa
CFC	Estrutura Cúbica de Face Centrada
<i>CO</i>	Monóxido de Carbono
CO_2	Dióxido de Carbono
<i>Cr</i>	Cromo
CS	Cordão de Solda
<i>Cu</i>	Cobre
<i>Fe</i>	Ferro
Fe_3C	Cementita
Fe_α	Ferrita
Fe_γ	Austenita
GMAW	Soldagem por Arco Elétrico com Gás de Proteção (do inglês - <i>Gas Metal Arc Welding</i>)
<i>He</i>	Hélio
HNO_3	Ácido Nítrico
HR	Dureza Rockwell (do inglês – <i>Hardness Rockwell</i>)
IIW	Instituto Internacional de Soldagem (do inglês – <i>International Institute of Welding</i>)
MAG	Soldagem por Gás Ativo (do inglês – <i>Metal Active Gas</i>)

MB	Metal Base
MIG	Soldagem por Gás Inerte (do inglês – <i>Metal Inert Gas</i>)
ml	Mililitro
mm	Milímetro
<i>Mn</i>	Manganês
<i>Mo</i>	Molibdênio
Mpa	Magapascal
<i>Ni</i>	Níquel
<i>O₂</i>	Oxigênio
°C	Grau Celsius
PSI	Libras por Polegada Quadrada (do inglês – <i>Pound-force per Square Inch</i>)
SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos (do inglês – <i>Society of Automotive Engineers</i>)
<i>Si</i>	Silício
<i>SiC</i>	Carboneto de Silício
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	OBJETIVO GERAL	15
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	AÇO SAE 1045.....	17
2.1.1	FASES E MICROESTRUTURA.....	18
2.2	SOLDAGEM MIG/MAG	20
2.2.1	GASES DE PROTEÇÃO	23
2.3	SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO	24
2.3.1	CONSUMÍVEIS	26
2.3.2	CLASSIFICAÇÃO.....	28
2.4	RESFRIAMENTO E PRÉ-AQUECIMENTO	29
2.5	ENSAIOS MECÂNICOS	31
2.5.1	LÍQUIDOS PENETRANTES	31
2.5.2	DUREZA ROCKWELL.....	33
2.5.2.1	PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO	34
2.6	METALOGRAFIA	35
2.6.1	MICROGRAFIA	35
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1	CHAPAS DE AÇO SAE 1045.....	38
3.2	PRÉ-AQUECIMENTO	40
3.3	PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	42
3.3.1	SOLDAGEM MAG.....	43
3.3.2	SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO	44
3.4	ANÁLISE E INSPEÇÃO DAS SOLDAS	45
3.4.1	LÍQUIDOS PENETRANTES	45
3.4.2	DUREZA ROCKWELL.....	47
3.4.3	MICROGRAFIA	48
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1	ANÁLISE DAS DESCONTINUIDADES	55
4.2	DUREZA.....	59
4.3	METALOGRAFIA	63
5.	CONCLUSÃO	67
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
	REFERÊNCIAS	69

1. INTRODUÇÃO

Desde a origem dos metais há evidências de processos rudimentares de soldagem como forjamentos de peças grandes com areia e martelo onde o ferro era obtido por redução direta. Com o passar do tempo e o desenvolvimento da tecnologia, da fabricação a partir do minério em larga escala e com o uso do alto-forno, o forjamento deixou de ser tão importante dando lugar para processos de união por rebiteagem por exemplo (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Já no século XIX, segundo Modenesi, Marques e Santos (2012), a tecnologia de soldagem começou a mudar muito rápido, principalmente pelo desenvolvimento das experiências que vinham sendo elaboradas com o arco elétrico junto com a descoberta do acetileno e o desenvolvimento de fontes produtoras de energia elétrica possibilitaram o começo dos processos de soldagem por fusão.

Nos dias de hoje com peças cada vez mais complexas e ampla variedade de uso, houve a necessidade de novos processos de soldagem bem como novos métodos se tornaram mais práticos e com características distintas de acordo com as aplicações e parâmetros empregados. Dois métodos muito importantes são MIG/MAG que tem boas taxas de repetição sendo uma soldagem rápida e costumam ser empregados no processo produtivo industrial. E o processo de soldagem por eletrodo revestido que, por sua vez possui muita praticidade por não necessitar de uma fonte de gás de proteção externa e ter uma grande variedade de eletrodos para diferentes tipos de materiais (WAINER; BRANDI; MELO, 1992).

Como a aplicação localizada de calor é imprescindível durante a soldagem, acontece uma alteração microestrutural na região da solda tornando as propriedades físicas não uniformes em toda a peça. Quando aquecida a uma elevada temperatura, os átomos chamados soluto se dissolvem na solução tornando um sólido homogêneo (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012). Porém, quando temos um resfriamento rápido os átomos do soluto não têm tempo para se difundir na solução. Então uma estrutura mais frágil ocorre nos metais ferrosos com transformação da fase ferrita (ou ferro alfa) em cementita (Fe_3C) pela precipitação do carbono, resultando em uma microestrutura mais dura e com alto teor de carbono. A mistura dessas duas estruturas resulta num arranjo chamado perlita, formada por camadas alternadas de ferrita e cementita. A perlita depende da quantidade de carbono difundida que varia até cerca de 2% diferenciando os aços do ferro fundido, quando em 0,76% de carbono é dito como ponto

eutetóide e a microestrutura é 100% perlita. O aço SAE 1045 é pela classificação normativa um aço simplesmente ao carbono (representado pelo número 10) e com 0,45% de carbono em massa na sua constituição (representado pelo algarismo 45). Ou seja, é denominado um aço hipoeutetóide.

Uma das técnicas que visa atenuar o problema microestrutural no aço SAE 1045 no processo de soldagem é o pré-aquecimento da peça até uma temperatura elevada de forma a reduzir a taxa de resfriamento da solda e consequentemente evitar a formação da perlita tornando a peça mais uniforme. Essa uniformidade do aço SAE 1045 é muito importante em elementos estruturais pois torna mais previsível seu processo de falha, tendo como aplicabilidade na construção civil, implementos agrícolas, hastes de amortecedores, chassis tubulares (gaiolas de proteção) onde tem uma preocupação na região da solda que pode sofrer com trincas quando veículo é colidido, entre outros usos (FUNDIÇÃO MARTINELLI, 2018).

Para mensurar as propriedades mecânicas, este trabalho dispõe de alguns métodos quantitativos e qualitativos denominados ensaios mecânicos. O ensaio de líquidos penetrantes tem como objetivo uma análise qualitativa da superfície da peça, revelando as possíveis trincas e marcas de respingo da solda que venham a surgir. Seu procedimento é bastante simples sendo necessário a limpeza da peça a ser ensaiada, aplicação do penetrante, remoção do seu excesso e então o revelador mostrará os defeitos superficiais. Outro ensaio a ser utilizado é o de dureza Rockwell que consiste num penetrador de material mais duro do que a peça e com aplicação de uma carga, causa uma marca na superfície. Uma pré-carga é aplicada para eliminar a ação de defeitos superficiais e então a carga principal entra em ação. Valores de dureza são obtidos em escalas padronizadas de acordo com o tipo de penetrador e carga (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012). Uma análise microestrutural a partir da micrografia revelará as fases e estruturas cristalinas predominantes. É esperado uma estrutura com menos perlita nas amostras com pré-aquecimento (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

1.1 JUSTIFICATIVA

Sendo um aço de médio teor de carbono com 0,45% em peso o aço SAE 1045 é dito simplesmente ao carbono, resultando em boas propriedades mecânicas para demandas estruturais onde acaba sendo muito utilizado (WELDING, 2011).

As condições térmicas impostas durante a soldagem resultam numa estrutura frágil na região chamada de zona termicamente afetada (ZTA) e, com os esforços repetitivos de tração e

compressão que aceleram o processo de fadiga nessa região, levando à ruptura de forma inesperada na região soldada (AZZOLINI, 2017).

O aço SAE 1045 é altamente temperável podendo ser feito um tratamento térmico após a soldagem, mas o alto custo acaba tornando essa prática menos atrativa e nos casos de peças com grandes dimensões torna o tratamento térmico inviável. Tendo em vista esse problema, a técnica de pré-aquecimento com conjunto de oxiacetileno tem como função reduzir a taxa de resfriamento e assim, proporcionar uma estrutura mais uniforme em toda a peça. Tornando-a previsível nos critérios de falha e prolongando a vida útil da mesma.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos, conforme descritos a seguir.

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise comparativa em soldas com a técnica de pré-aquecimento utilizando oxiacetileno a fim de cruzar com os dados de uma soldagem sem pré-aquecimento e avaliar os resultados em duas frentes diferentes de soldagem: MIG/MAG e Eletrodo Revestido. São as mais comuns e ampla utilização onde a comparação será feita em processos semelhantes de soldagem. Por fim, uma análise metalográfica servirá de análise da microestrutura resultante e amparo aos dados obtidos.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os parâmetros de soldagem e temperatura de pré-aquecimento para as soldas MIG/MAG e Eletrodo Revestido;
- Realizar ensaio por líquidos penetrantes mapeando as possíveis trincas e porosidades na superfície da peça;
- Obter propriedades mecânicas de dureza da ZTA e do cordão de solda e comparando-as com a peça de origem;

- Análise metalográfica da peça de origem, da ZTA e do cordão de solda para identificar a microestrutura resultante e formação dos grãos;
- Cruzamento dos dados obtidos e verificar a influência do pré-aquecimento no aço SAE 1045.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo será apresentado os conceitos fundamentais que regem este trabalho através da exposição escrita do conteúdo a ser assimilado ao tema proposto.

2.1 AÇO SAE 1045

Segundo Colpaert (2008), define-se aço como uma liga ferro-carbono com até cerca de 2% de carbono. Este limite está associado à máxima solubilidade do carbono no ferro com estrutura Cúbica de Face Centrada (CFC). Ligas com maiores adições de carbono têm ponto de fusão mais baixo e são adequadas à fundição, sendo denominadas ferros fundidos. A adição de outros elementos de liga altera este limite de forma que a definição que é baseada neste limite de composição química deveria ser limitada somente aos chamados “aços carbono”.

A *Society of Automotive Engineers* (SAE) ou, em português Associação de Engenharia Automotiva, composta por especialistas técnicos, engenheiros dos setores automotivos e aeroespaciais. Dentre outras classificações, é responsável pela classificação normativa mundial para aços baseada na composição química pela SAE J403 de agosto de 1995 (SAE, 2014).

O algoritmo de identificação do padrão SAE é composto de quatro dígitos, sendo o primeiro a classe do aço; segundo a variação nos teores de elemento de liga; terceiro e quarto a porcentagem em peso de carbono multiplicado por 100. A Tabela 1 mostra a denominação e tipo de aço.

Para os dois primeiros dígitos, a classificação 10 indica que é um aço simplesmente ao carbono e a fração 45/100 representa o teor de carbono em porcentagem relativo ao peso. Ou seja, o aço SAE 1045 é um aço carbono com um teor de carbono que compreende uma tolerância que varia entre 0,43% e 0,50% de carbono (BUERGER, *et al.*, 2009).

Tabela 1 - Classificação numérica dos aços norma SAE

Tipo de Aço	Denominação SAE
Simplex não resulfurado	10XX
Simplex resulfurado	11XX
Ressulfurado e refosforado	12XX
Aços – Manganês (1,75%)	13XX
Aços - Níquel	2XXX
Aços – Níquel - Cromo	3XXX
Aços – Molibdênio – Cromo - Níquel	4XXX
Aços - Cromo	5XXX
Aços – Cromo – Vanádio	6XXX
Aços – Silício – Manganês	92XX

Fonte: Adaptado de MODENESI (2008).

Amplamente utilizado na engenharia industrial e civil, o aço SAE 1045 possui boa resistência estrutural e soldabilidade para seu baixo custo e fácil obtenção metalúrgica. As principais propriedades mecânicas podem ser observadas na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Tensão de escoamento SAE 1045

Tipo de aço	Teor de carbono (%)	Limite de Elasticidade (GPa)	Limite de escoamento (Mpa)	Limite de resistência à tração (Mpa)	Alongamento (%)
SAE 1045	0,45	250	310	560	17

Fonte: Aço Especial, adaptado de <https://www.acoespecial.com.br/aco-1045>.

2.1.1 FASES E MICROESTRUTURA

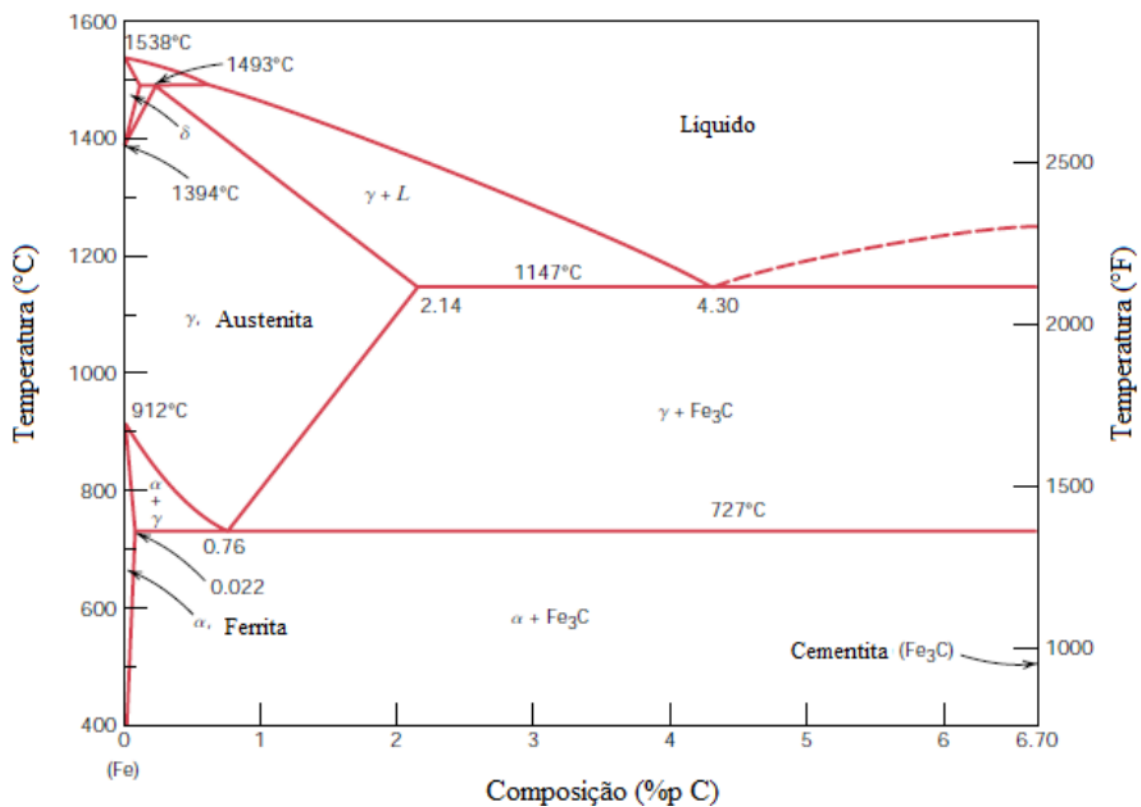
Algumas fases microestruturais podem ser identificadas nas estruturas dos aços. Na indústria se aplicam poucos metais puros, em sua grande maioria se utilizam ligas (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012). A mistura de componentes traz características únicas no resultado final. Ligas binárias (dois constituintes principais) como aços, apresentam

uma combinação dessas fases dependendo do tipo de tratamento dado ao metal e características de seus constituintes.

Segundo Callister (2012), “uma fase pode ser definida como uma porção homogênea de um sistema que possui características físicas e químicas uniformes.”

Dentre a combinação de diferentes fases sólidas e líquida, denomina-se ponto eutético como sendo semelhante a solidificação dos elementos puros, no sentido de que a reação prossegue até sua conclusão em uma temperatura constante. Entretanto, o produto da solidificação eutética consiste sempre de duas fases sólidas, enquanto para o componente puro é formada apenas uma única fase (CALLISTER, 2012). As fases do ferro-carbono podem ser observadas conforme Figura 1 a seguir.

Figura 1 - Diagrama de fases Fe-C



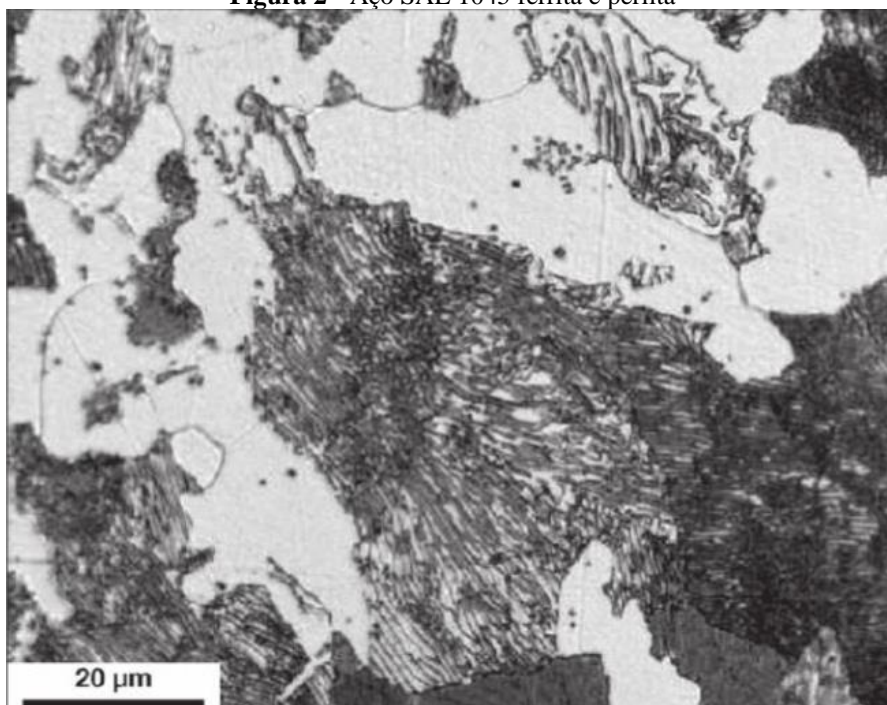
Fonte: Adaptado de CALLISTER (2012).

De acordo com a Figura 1, aços com teor abaixo de 0,76% de carbono são consideradas ligas hipoeutetóide (menos que o eutetóide). Com 0,45% de carbono, o aço SAE 1045 quando resfriado tem como resultado característicos dos microconstituintes como Ferrita e Perlita (RUCHERT, 2010).

Sendo o microconstituente do ferro de menor dureza, a ferrita (Fe_{α}) é formada a partir da austenita com estrutura CFC e fase austenita (Fe_{γ}) na forma contínua interligada. Predominante nos aços de baixo teor de carbono (matriz), é responsável pela ductibilidade das ligas (COLPAERT, 2008).

A perlita nada mais é que a ligação de dois constituintes: ferrita e cementita. Se apresenta de forma dispersa na matriz ferrítica, como um constituinte mais duro, torna a liga mais frágil e susceptível a fratura (RUCHERT, 2010).

Figura 2 - Aço SAE 1045 ferrita e perlita



Fonte: Adaptado de COLPAERT (2008).

Durante a solidificação ocorre a nucleação e crescimento da perlita (coloração escura pela precipitação do carbono) em torno dos grãos de austenita retida que solidificam antes (coloração clara) (FILHO, 2010).

2.2 SOLDAGEM MIG/MAG

Soldagem MIG (*Metal Inert Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*), também chamado de GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) que em português significa Soldagem ao Arco Elétrico com Atmosfera Gasosa. É um método de soldagem muito comum nas indústrias onde acontece de

forma automática quando feito por uma máquina e, também de forma semiautomática sendo administrado manualmente como utilizado por soldadores em geral. Consiste basicamente de um arame consumível também conhecido por eletrodo, impulsionado pelo alimentador que controla a velocidade de alimentação e a mantém constante (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Quando o eletrodo entra em contato com a peça, um arco elétrico é estabelecido e o metal de base começa a ser soldado. A partir do momento em que se abre o arco, devido à grande energia temos a fusão do eletrodo bem como a região da solda no metal base. Essa combinação de fusão é chamada poça de fusão. Conforme essa poça é resfriada, temos como resultado a união dos metais (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

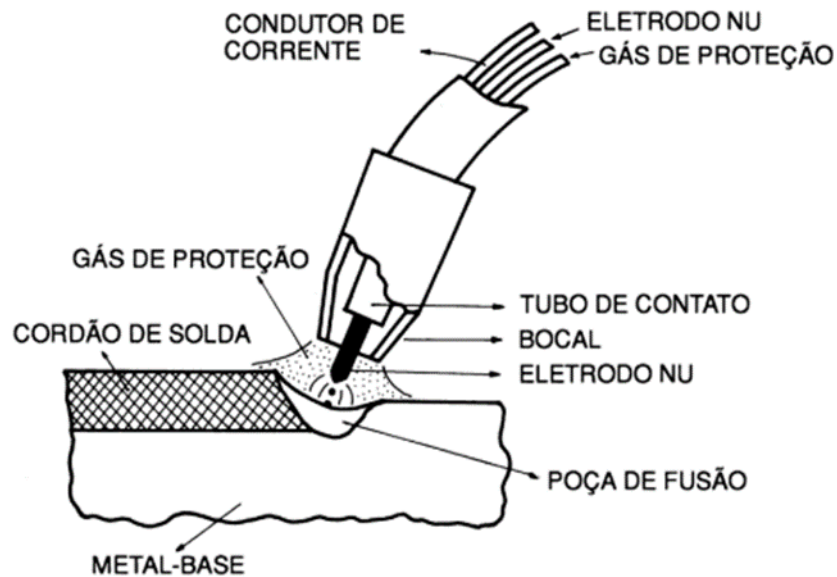
Dentre as principais vantagens desse processo podemos destacar a sua elevada velocidade de soldagem devido à alta corrente, baixa concentração de hidrogênio e não ocorre formação de escória. Entretanto a ausência de escória faz com que a taxa de resfriamento seja superior em relação ao eletrodo revestido podendo ocasionar maior incidência de trincas na Zona Termicamente Afetada (ZTA). Assim como as correntes de ar não são bem vindas pois dispersam o gás de proteção, expondo a poça de fusão ao ar atmosférico (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Segundo Scotti e Ponomarev (2008), os equipamentos necessários para uma soldagem MIG/MAG são:

- Fonte de energia;
- Alimentador de arame;
- Tocha de soldagem e;
- Fonte de gás de proteção.

O alimentador de arame tem como princípio um motor elétrico que faz o controle da velocidade predeterminada que o eletrodo é alimentado. Acoplado a ele temos o carretel e o eletrodo guiado por roletes de forma a manter o eletrodo tracionado para fora da estrutura do alimentador e pelo tubo que conduz o arame chamado de conduíte (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

A Figura 3 ilustra a tocha indicando os seus elementos.

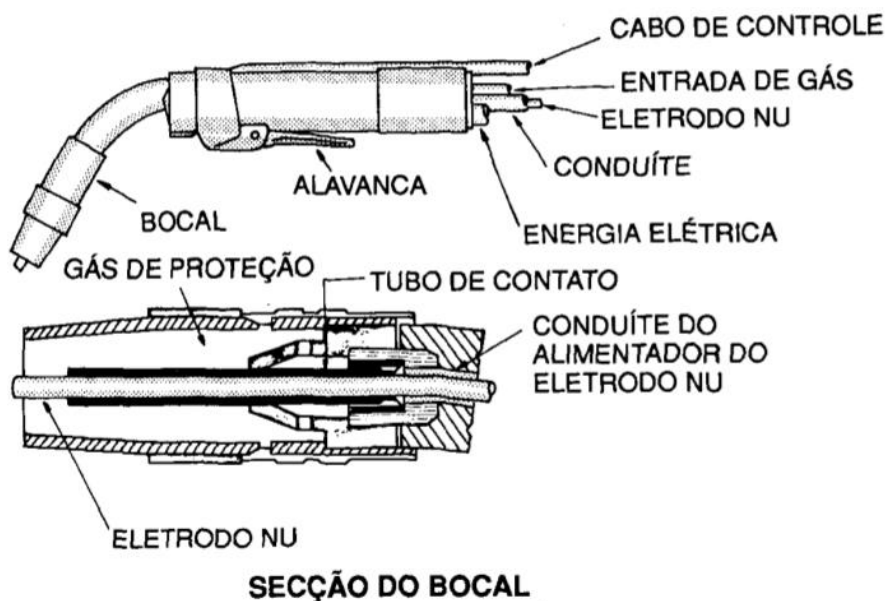
Figura 3 - Soldagem MIG/MAG

Fonte: Adaptado de WAINER; BRANDI; MELLO (1992).

A fonte de energia é uma peça fundamental no que se refere a produtividade e qualidade de uma solda. Um transformador converte energia de entrada da rede elétrica doméstica de alta tensão e baixa corrente para energia de saída de baixa tensão e alta corrente. Os sistemas eletrônicos entram em ação para uma calibragem adequada de voltagem e corrente para cada tipo de eletrodo e característica específica do material (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

A tocha de soldagem é o elemento de direção da formação de uma solda. Composta principalmente por bico de contato, bocal, conduíte e cabo, conforme a Figura 4 a seguir.

Figura 4 - Tocha MIG/MAG



Fonte: Adaptado de WAINER; BRANDI; MELLO (1992).

Controlada pelo operador com uma alavanca ou gatilho que guia o arame e o gás de proteção na fenda a ser soldada. Como a extremidade da tocha costuma ficar próximo da poça de fusão, deve sempre apresentar algum meio de refrigeração dependendo das condições de soldagem como corrente e tipo de junta, temos duas formas de resfriá-la: utilizando o próprio gás de proteção quando sob condições menos severas e, água que sai do conector até chegar à ponta da tocha e retornando por um duto até o reservatório (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

2.2.1 GASES DE PROTEÇÃO

Os gases de proteção atuam na solda como vedação ao ar atmosférico, saindo da tocha sob pressão, dessa forma criando uma camada protetora na poça de fusão contra contaminantes como o nitrogênio que estabiliza a austenita nos aços inoxidáveis e aumenta a porosidade. Oxigênio onde combinado com o carbono forma o monóxido de carbono (CO) elevando a porosidade, e com outros elementos de liga como silício (Si) e manganês (Mn) formam óxidos. Além dos contaminantes, os gases de proteção atuam diretamente no arco elétrico, dando estabilidade devido ao baixo potencial de ionização garantindo abertura do arco com facilidade e assim, uma excelente condução de corrente (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Uma das principais diferenças entre o processo MIG e MAG está no desempenho do gás de proteção, no caso da solda MIG, são utilizados apenas gases inertes, comumente argônio (*Ar*) por possuir densidade maior que do ar atmosférico e baixa oxidação. E hélio (*He*) que apesar de ter densidade menor que o ar atmosférico, quando em condições de posição sobre cabeça (de baixo para cima), oferece ótima proteção. O processo MIG é muito utilizado em metais não ferrosos pelo uso dos gases que podem reagir com o ferro (*Fe*) e misturas desses gases são comuns para obter propriedades intermediárias. No processo MAG, o gás de proteção atua de forma ativa, ou seja, o gás interfere ativamente na poça de fusão. Recomendado para metais ferrosos, o dióxido de carbono (CO_2) é muito utilizado em aços-carbono podendo ser puro ou com combinações de *Ar* e *He*, devido a sua alta condutividade térmica garante melhor formação do arco (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

De acordo com Fortes e Vaz (2005), “o oxigênio se combinará com outros elementos em transferência através do arco para formar óxidos que são liberados da poça de fusão na forma de escória ou carepa.”



Na solda MAG também podemos ter misturas de gases, quando misturamos dois gases chamamos de mistura binária. Para se obter propriedades intermediárias, é muito utilizado a mistura Argônio-dióxido de carbono. Ainda segundo Fortes e Vaz (2005), “essa mistura é muito utilizada nos aços carbono e de baixa liga. As adições de *Ar* ao CO_2 diminuem os níveis de respingos em comparação quando utilizamos apenas CO_2 ”.

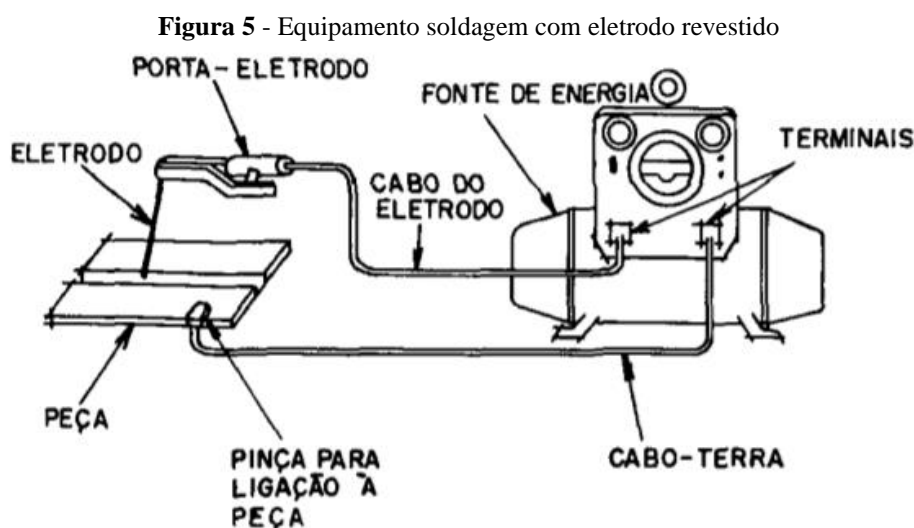
2.3 SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO

Por ser um processo de soldagem barato e de fácil operação, o eletrodo revestido é amplamente utilizado em praticamente todos os tipos de aplicações. Seu funcionamento consiste resumidamente de uma fonte de energia com terminais positivo e negativo, porta-eletrodo e eletrodo revestido. Este último que caracteriza o processo por justamente não se utilizar de uma fonte externa de gás de proteção, pois está contido no revestimento do eletrodo que se decompõe no processo.

Segundo Wainer; Brandi e Mello (1992), os equipamentos para soldagem com eletrodo revestido são:

- Fonte de energia;
- Alicate para a fixação dos eletrodos;
- Cabos de interligação;
- Pinça para ligação à peça;
- Equipamento para limpeza da solda.

Conforme a Figura 5 a seguir.



Fonte: Adaptado de WAINER; BRANDI; MELLO (1992).

A fonte de energia nesse processo permite operar em corrente alternada ou contínua, mas sempre será feito com corrente constante. Os transformadores trabalham sempre com corrente alternada, quando se desejar corrente contínua, é necessário o uso de um retificador ou inversor. Assim como na solda MIG/MAG, ocorre a transformação de alta tensão em baixa e baixa corrente em alta corrente (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

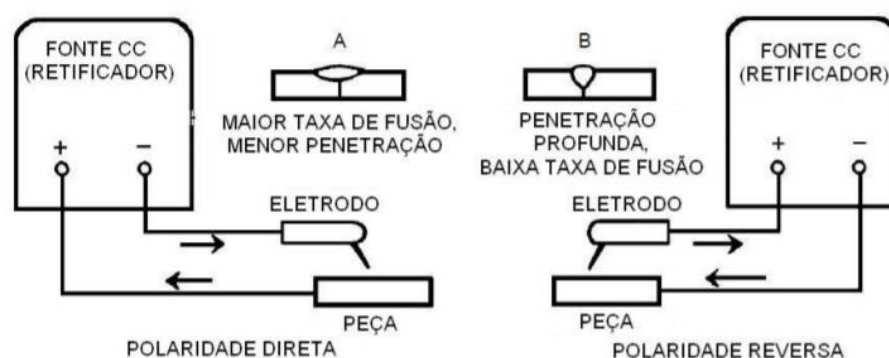
O alicate de fixação tem por objetivo segurar o eletrodo e por meio dele direcioná-lo à região a ser soldada. Um pegador em formato de pinça ou garra acionado por molas e alimentado por um cabo de energia que faz a conexão do eletrodo à fonte de energia.

As pinças nada mais são que grampos que se prendem à peça na mesa a ser soldada garantindo o contato elétrico necessário durante a soldagem. Quando o polo positivo é ligado ao eletrodo, chamamos de polaridade direta (CC-). Quando o polo positivo é ligado à peça, chamamos de polaridade reversa (CC+). Algumas variedades de eletrodos permitem somente

polaridade direta, reversa ou ambas. O fluxo de corrente é sempre unidirecional, a corrente flui sempre da polaridade negativa para a positiva (FORTES E VAZ, 2005).

O eletrodo no polo negativo produz soldas com menor penetração; no entanto, a taxa de fusão do eletrodo é alta. O cordão de solda é largo e raso como mostrado em A na Figura 6. Por sua vez, o eletrodo no polo positivo produz soldas com maior penetração e um cordão de solda mais estreito como mostrado em B na Figura 6, a seguir (FORTES E VAZ, 2005).

Figura 6 - Efeito da polaridade na solda com eletrodo revestido



Fonte: Adaptado de FORTES E VAZ (2005).

Devido a formação de escória ou carepa na solda, é necessária a limpeza da mesma antes de qualquer processo posterior. Para a correta limpeza é utilizado uma picadeira de solda para a remoção da carepa e uma escova de fios de aço, garantindo a correta remoção de respingos e impurezas.

2.3.1 CONSUMÍVEIS

Composto de alma metálica e revestimento, sua finalidade é fundir-se com o metal base e formar uma solda confiável e estável, sem oxidantes e baixa porosidade. O material da alma costuma ser aço de baixo teor de carbono, mas pode variar de acordo com a necessidade. Sua fabricação ocorre por extrusão ou trefilado à frio e o revestimento é formado de uma mistura de compostos minerais ou orgânicos (FORTES E VAZ, 2005).

Segundo Fortes e Vaz (2005), os ingredientes são pesados, misturados a seco, e então é adicionado solicato de sódio e/ou potássio. A mistura úmida é compactada em um cilindro e alimentada à prensa extrusora. O revestimento é removido da extremidade do eletrodo

garantindo o contato elétrico, e também da outra extremidade para assegurar uma abertura de arco fácil.

Alguns constituintes do revestimento podem ter mais de uma função e interagir entre eles. Os constituintes que podem fazer parte do revestimento são mostrados na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Constituintes revestimento e principais funções

Continua

Matéria-prima	Função Principal	Função Secundária
Açúcar	Aglomeração	-
Alumina	Formação de escória	-
Argila	Formação de escória	-
Asbestos	Formação de escória	Estabilidade do arco
Carbonato de bário	Estabilidade do arco	-
Carbonato de cálcio	Estabilidade do arco/Geração de gases	Formação de escória
Carbonato de lítio	Estabilidade do arco	-
Carbonato de zircônio	Estabilidade do arco	-
Carboxi-metil-celulose	Aglomeração	-
Celulose	Geração de gases	Desoxidação/Melhor revestimento
Dextrina	Aglomeração	-
Dióxido de manganês	Formação de escória	-
Feldspato	Formação de escória	Estabilidade do arco
Ferro	Adição componentes desoxidação	Estabilidade do arco
Fluorita	Desoxidação/Formação de escória	Estabilidade do arco
Glicerina	Melhor extrudabilidade	Estabilidade do arco
Goma arábica	Aglomeração	Desoxidação
Grafita	Adição de componentes	Melhor extrudabilidade
Ilmenita	Formação de escória	-

Tabela 3 - Constituintes revestimento e principais funções

Matéria-prima	Função Principal	Função Secundária	Conclui
Mica	Melhor extrudabilidade	-	
Oxalato de potássio	Estabilidade do arco	-	
Óxidos de ferro	Formação de escória	Estabilidade do arco	
Sílica	Formação de escória	-	
Silicato de potássio	Estabilidade do arco/Formação de escória	-	
Silicato de sódio	Formação de escória	-	
Talco	Melhor extrudabilidade	-	
Titanato de potássio	Estabilidade do arco	-	
Wolastonita	Formação de escória	-	
Zirconita	Estabilidade do arco	Formação de escória	

Fonte: Adaptado de WAINER; BRANDI; MELLO (1992).

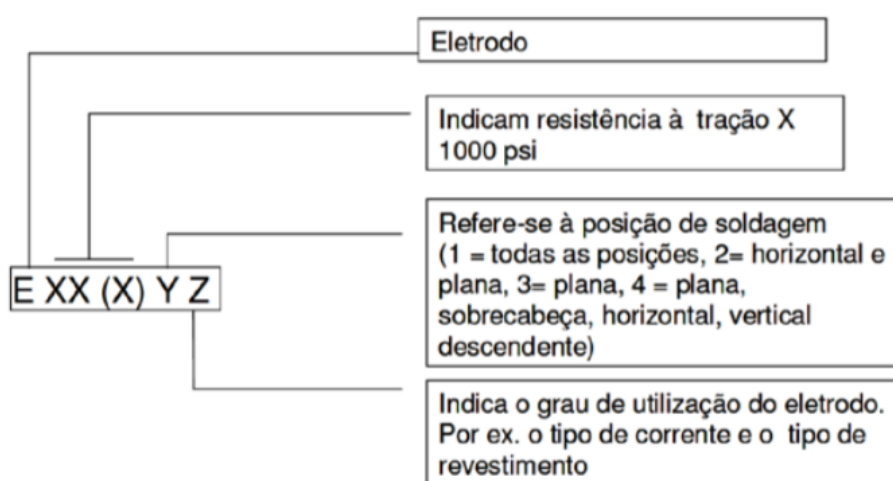
Durante a fusão do revestimento, gases são gerados para a proteção de contaminantes e funcionam como ionizantes para facilitar abertura do arco como óxidos de carbono. Os elementos formadores de escória possuem densidade muito menor que o metal do eletrodo e, portanto, flutuam na poça de fusão. Além de protegerem de impurezas, possuem baixa condutividade térmica, ou seja, promovem menor taxa de resfriamento (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

2.3.2 CLASSIFICAÇÃO

No Brasil, a classificação dos eletrodos é regida pela norma ABNT-EB-79, porém é pouco utilizada (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). Via de regra utilizamos o sistema americano chamado de Sociedade Americana de Soldagem ou do inglês *American Welding Society* (AWS). Sua caracterização consiste de um prefixo E de *electrode* ou eletrodo seguido de dígitos indicativos. No que diz respeito a identificação, a AWS 5.1 é referente a norma americana para eletrodos para aço carbono, composto de quatro dígitos onde os dois primeiros

representam limite de resistência à tração em libras por polegada quadrada (PSI) multiplicado por mil, ou quando identificadas com M implicam nas unidades métricas, no caso mega pascal (Mpa), o terceiro dígito é referente a posição de soldagem, sendo 1 para todas as posições, 2 para horizontal e plana, 3 para plana e 4 para vertical descendente e sobre cabeça. O último dígito se refere as características de operação do eletrodo como tipo de arco e escória depositada (FORTES E ARAÚJO, 2005). Conforme Figura 7 a seguir.

Figura 7 - Representação de um eletrodo para aço



Fonte: Adaptado de FORTES E ARAÚJO (2005).

Para chapas finas, um eletrodo de com menor espessura e regulagem amena devem ser utilizados para promover baixa penetração da solda e assim evitar furos nas chapas de aço. O tipo de escória gerada pode ter grande influência na qualidade final. Eletrodos celulósicos e rúflicos como os da classe E601X têm como elemento principal o dióxido de silício que possui um comportamento ácido e dessa forma não influencia no metal de solda. Já para os eletrodos que apresentam um comportamento básico como os compostos de cal e fluorita, resultam em baixas inclusões não metálicas, por exemplo os eletrodos E7016 e E7018 (FORTES E VAZ, 2005).

2.4 RESFRIAMENTO E PRÉ-AQUECIMENTO

O processo térmico comum nas soldas é sempre composto por um aquecimento seguido por um resfriamento rápido devido ao gradiente de temperatura, com o metal base à

temperatura ambiente e grande quantidade de material em relação a poça de fusão, esse resfriamento acontece de forma muito rápida. Como resultado, acarreta em uma formação de microestrutura endurecida, além de uma possível formação de trincas comprometendo a capacidade estrutural. Para tentar atenuar esse e outros efeitos de temperatura, um aquecimento prévio pode reduzir esses efeitos e se obter características finais semelhantes de antes da solda.

Uma forma de estimar a temperatura necessária para o aquecimento é pelo teor de carbono e de liga no metal base. De acordo com Fortes e Araújo (2005), “para o cálculo do carbono equivalente determina-se o teor aproximado de outros elementos de liga que produzem a mesma dureza que 1% de carbono. Então o carbono equivalente (C_{eq}), que é uma indicação da temperabilidade, pode ser calculado por:”

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Cu}{13} \quad (2.2)$$

Sendo válido quando:

- $\%C < 0,50$
- $\%Mn < 1,60$
- $\%Ni < 3,50$
- $\%Mo < 0,60$
- $\%Cr < 1,00$
- $\%Cu < 1,00$

Utilizando a equação (2.2), e aplicando na Tabela 4 temos uma estimativa de temperatura solicitada de aquecimento.

Tabela 4 - Temperatura de pré-aquecimento recomendada	
Carbono equivalente C_{eq} (%)	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, mola ou composição desconhecida	~ 300°C

Fonte: Adaptado de Fortes e Araújo (2005).

A temperatura deve ser homogênea em toda a peça o que pode ser difícil dependendo das dimensões e espessura.

2.5 ENSAIOS MECÂNICOS

A principal motivação dos ensaios mecânicos é a verificação das propriedades mecânicas de um material como resistência, elasticidade, resiliência entre outros. São classificados em dois grupos principais: Ensaio destrutivo, onde o material é ensaiado até sua ruptura ou danificando e inutilizando-o. E também ensaios não destrutivos de análise quantitativa e qualitativa são muito úteis quando se deseja inspecionar alguma peça durante sua vida útil pois não são inutilizadas e voltam a cumprir sua função (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

2.5.1 LÍQUIDOS PENETRANTES

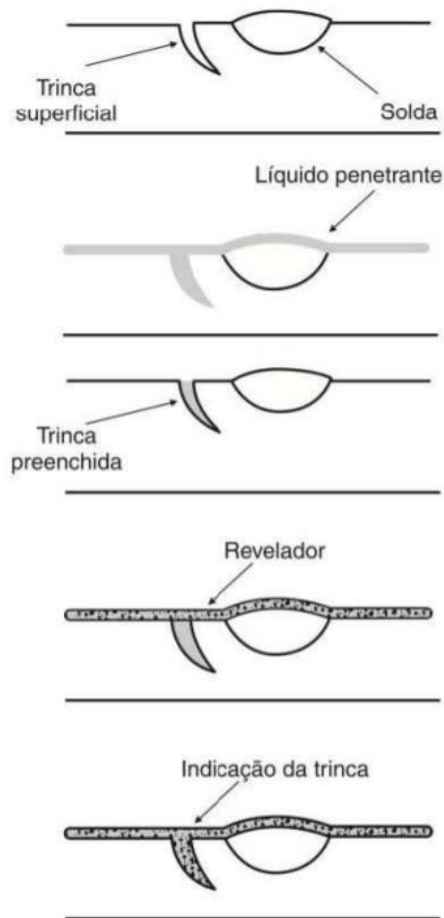
Caracterizado como ensaio qualitativo e não destrutivo, seu método foi desenvolvido com o objetivo de identificar descontinuidades ou defeitos superficiais imperceptíveis a olho nu. As peças que são submetidas a esforços repetitivos de tração e compressão geram desgastes e fadiga que podem falhar sem o acompanhamento periódico.

O procedimento de inspeção segundo Garcia, Spim e Santos (2012), consiste nas seguintes fases:

- Limpeza e desengraxamento da peça, seguido de secagem;
- Aplicação do líquido penetrante, por imersão ou aspersão;
- Limpeza superficial, com retirada do excesso de líquido penetrante, cuidando-se para que não seja removido o líquido que penetrou nas eventuais trincas;
- Aplicação de um pó revelador (ou líquido volátil) que absorve o líquido penetrante, revelando o local das trincas, porosidades e rachaduras;
- Observação das imperfeições no material;
- Limpeza e secagem final para remoção dos resíduos dos líquidos utilizados no ensaio.

O líquido penetrante adentra nas aberturas e descontinuidades da peça de forma que após a retirada do material da superfície da peça, permaneça intacto. Quando aplicado o pó revelador, absorvendo o líquido penetrante e expondo as falhas, conforme pode ser observado na Figura 8 a seguir.

Figura 8 - Etapas do ensaio de líquidos penetrantes



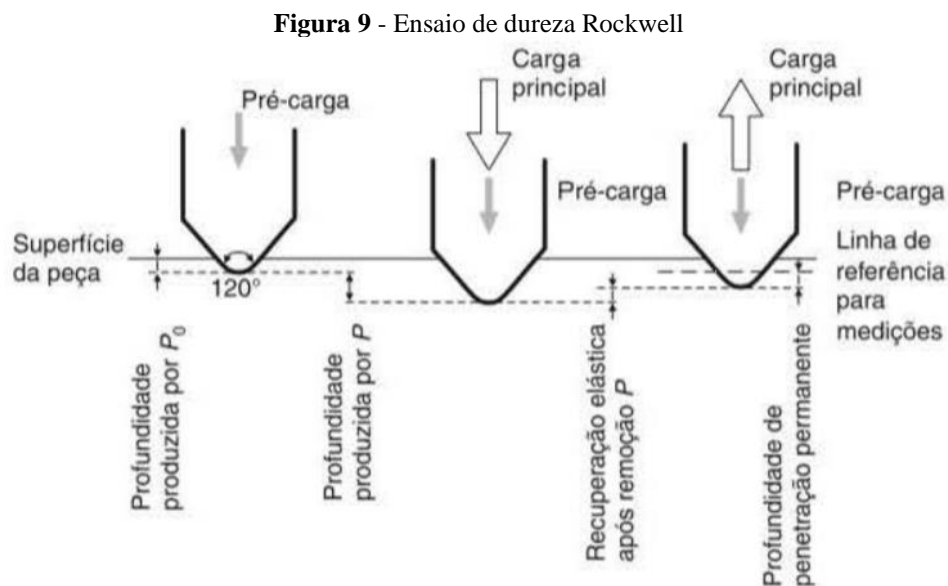
Fonte: Adaptado de GARCIA; SPIM; SANTOS (2012).

As descontinuidades superficiais causadas pelo processo de soldagem podem ser causadas por inclusões de escória, presença de um segundo material ou induzidas pelo hidrogênio por falta de fusão e pouca penetração da solda. Há também casos onde o efeito térmico gera tensões residuais. Geralmente as descontinuidades não aparecem de forma isoladas, de modo geral ocorrem duas ou mais combinações de fatores resultam em imperfeições na peça. Ao solucionar uma das causas, diminui ou elimina a formação de descontinuidades (NOVAIS, 2010).

2.5.2 DUREZA ROCKWELL

Atualmente, a norma brasileira que rege o ensaio de dureza Rockwell é a ABNT NBR ISO 6508:2019 (ABNT, 2019). O ensaio consiste numa máquina de dureza também conhecido como durômetro, penetrador de diamante de formato cônico ou esfera de aço endurecido que penetra a peça sob uma carga aplicada em dois estágios, sendo o primeiro chamado de pré-carga garantindo um contato firme e apertado, em seguida, a carga suplementar é aplicada como indicador da medida de dureza (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

A Figura 9 resume as etapas do processo de dureza Rockwell.



Fonte: Adaptado de GARCIA; SPIM; SANTOS (2012).

Quando acontece a retirada da carga principal ainda se mantém a pré-carga, então a dureza é obtida pela diferença na profundidade de penetração.

Para a pré-carga de acordo com Garcia, Spim e Santos (2012) “recomenda o uso de 98N (10kgf) e carga total ou força total de 589N (60kgf); 981N (100kgf) e 1471N (150kgf); e, para dureza superficial, pré-carga de 29N (3kgf) e forças totais de 147N (15kgf), 294N (30kgf) e 441N (45kgf)”.

A representação da dureza Rockwell é HR do inglês *Hardness Rockwell*, seguido de uma escala conforme a Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Escala de dureza Rockwell

Símbolo da Escala	Penetrador	Carga Principal [kg]
A	Diamante	60
B	Esfera com 1/16 polegada	100
C	Diamante	150
D	Diamante	100
E	Esfera com 1/8 polegada	100
F	Esfera com 1/16 polegada	60
G	Esfera com 1/16 polegada	150
H	Esfera com 1/8 polegada	60
K	Esfera com 1/8 polegada	150

Fonte: Adaptado de CALLISTER (2012).

Devido a dureza elevada em materiais desconhecidos ou misturas metálicas, algumas precauções devem ser tomadas na escolha do tipo de penetrador. Nesses casos, deve-se começar o ensaio com escalas mais altas como pontas de diamante, evitando assim avarias no equipamento para então utilizar penetradores mais macios como os de ponta esférica até que este se ajuste a escala de dureza (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

2.5.2.1 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO

De acordo com Garcia, Spim e Santos (2012), com os valores de dureza, pode-se determinar a profundidade de penetração (h) em milímetros conforme as equações seguintes:

- Penetrador de diamante:

Comum:

$$h = (100 - HR) * 0,002 \quad (2.3)$$

Superficial:

$$h = (100 - HR) * 0,001 \quad (2.4)$$

- Penetrador esférico:

Comum:

$$h = (130 - HR) * 0,002 \quad (2.5)$$

Superficial:

$$h = (130 - HR) * 0,001 \quad (2.6)$$

2.6 METALOGRAFIA

Parte das ciências dos materiais, a metalografia é empregada para a verificação da especificação de um metal ferroso quando se deseja conhecer a estrutura granulométrica e sua constituição, prever o comportamento por meio de uma análise visual através de um microscópio (COLPAERT, 2008).

As estruturas observadas nos aços dependem dos processos térmicos e formas de resfriamento sofridas pela peça acarretam em formação dos núcleos e transformações de fases que frequentemente são ordenadas em arranjos regulares chamados de cristais.

Segundo Colpaert (2008), “cada região contínua, com uma mesma orientação cristalográfica, é chamada de “grão”. A região de transição entre um grão e outro é chamada de “contorno de grão”. O material composto por vários grãos (ou cristais) é chamado policristalino.”

2.6.1 MICROGRAFIA

Com o interesse de analisar a estrutura dos aços por meio de um microscópio óptico, diferentes técnicas podem ser empregadas, porém a mais utilizada é a de luz paralela ao eixo do microscópio (COLPAERT, 2008).

Segundo Colpaert (2008), a técnica de preparação de amostras para a realização de um ensaio micrográfico ótico pode ser dividida nas seguintes fases:

- Escolha e localização da seção a ser estudada;
- Obtenção de uma superfície plana no local escolhido para estudo;

- Exame ao microscópio para a observação das ocorrências visíveis sem ataque;
- Ataque da superfície por um reagente químico adequado;
- Exame ao microscópio para a observação da microestrutura e;
- Registro do aspecto observado (fotografia).

Para a escolha e localização a ser estudada deve ser levada em conta as condições da peça. Em uma peça homogênea, a escolha da amostra não tem influência significativa nos resultados, porém, em uma peça com heterogeneidades, devem ser realizados exames em vários pontos e várias amostras analisadas para um resultado consistente (CALLISTER, 2012).

O corte das amostras deve ocorrer de forma a não alterar a microestrutura superficial, ou seja, deve-se evitar a geração de calor.

De acordo com Colpaert (2008), depois de cortada a amostra é embutida numa resina para dar melhor apoio e garantir firmeza para etapa de lixamento com água e polimento a base de alumina.

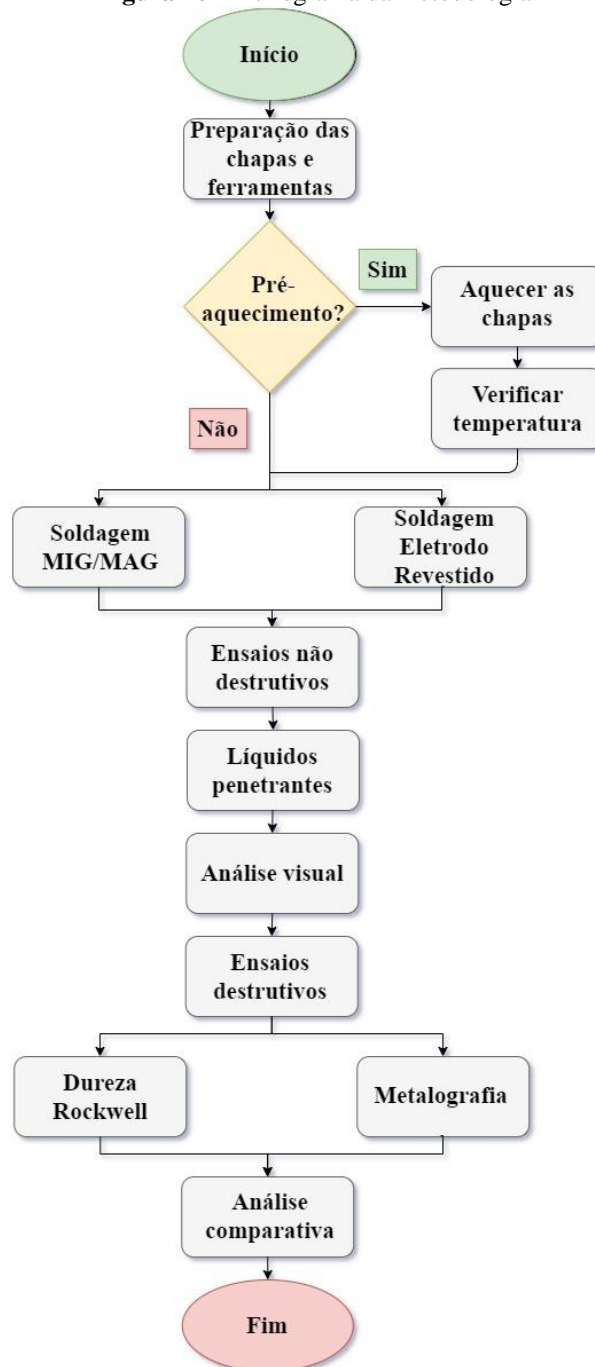
Deve-se começar com uma sequência de lixamento com uma granulometria maior para a menor, lembrando de rotacionar em 90° a amostra para garantir um lixamento uniforme de forma a eliminar riscos profundos provocados pelas lixas antecessoras e, em seguida, o polimento é necessário para plainar a superfície do metal e dar aparência “espelhada”.

Para o ataque químico, é feita a escolha do reagente e sua concentração pode variar dependendo da exposição da amostra, usualmente a reação demora de 5 a 15 segundos. A interrupção da reação é feita com álcool, a amostra depois de seca será analisada em um microscópio óptico.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução desse trabalho alguns passos foram necessários para se obter resultados consistentes. Sendo realizado nas dependências e laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Guarapuava, Paraná. O fluxograma da Figura 10 mostra resumidamente as etapas a serem executadas.

Figura 10 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Autoria própria (2020).

As etapas dos diferentes processos de soldagem ocorrem de forma independente, assim como os ensaios destrutivos de dureza e metalografia por não possuírem uma sequência cronológica que afetem os resultados do estudo. O pré-aquecimento justifica a proposta deste trabalho, portanto é o processo mais crítico e exige cuidado no controle de temperatura para assegurar sua uniformidade em toda a chapa. Para isso, foi realizado um aquecimento com o maçarico de oxiacetileno até uma temperatura próxima do desejado e aguardou-se cerca de 30 segundos para a distribuição de temperatura na chapa e, em seguida novamente aquecido até a temperatura final, conferindo com termômetro a laser para então ser realizado a soldagem.

3.1 CHAPAS DE AÇO SAE 1045

Foi utilizado um total de 8 chapas de aço SAE 1045 com espessura de ½ polegada (12,7mm), comprimento de 10cm e largura de 5cm. Foram adquiridas pela empresa FEX Comércio de Ferro Eireli, localizado no município de Ponta Grossa, Paraná. A Figura 11, a seguir representa as 4 amostras em laboratório antes da execução da soldagem.

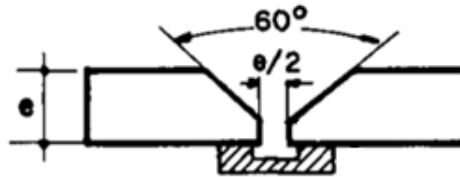
Figura 11 - Amostras de Aço SAE 1045



Fonte: Autoria própria (2021).

Cada chapa é preparada com a inclusão de chanfros em ambos os lados formando um ângulo de aproximadamente 60° entre as chapas. De acordo com Wainer, Brandi e Mello (1992), para juntas de solda plana, topo a topo, recomenda-se uma abertura de 60° para garantir melhor penetração de soldagem, com abertura de $\frac{1}{4}$ de polegada (6,35mm) entre as chapas, conforme a Figura 12 a seguir.

Figura 12 - Preparação da junta em aço-carbono



Fonte: Adaptado de WAINER; BRANDI; MELLO (1992).

Para a criação dos chanfros, foi realizado na fresadora ferramenta marca DIPLOMAT, modelo FVF2500, a Figura 13 a seguir ilustra o processo de fresamento ajustado num ângulo de 30° em relação ao plano horizontal.

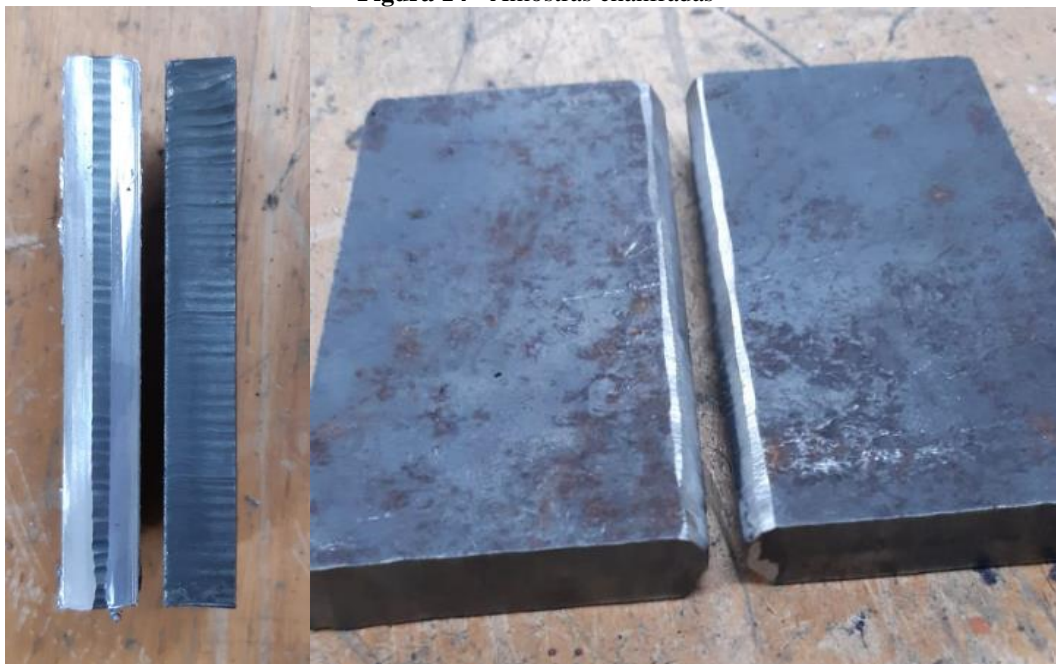
Figura 13 - Fresadora



Fonte: Autoria própria (2021).

Após a confecção dos chanfros em ambos os lados conforme Figura 14, as superfícies estão preparadas para as etapas a seguir.

Figura 14 - Amostras chanfradas



Fonte: Autoria própria (2021).

Devido a espessura considerável da amostra e condições de soldagem, optou-se por soldar nos dois lados para se obter uma amostra mais consistente para os ensaios mecânicos.

3.2 PRÉ-AQUECIMENTO

Utilizando como fonte de aquecimento disponível no laboratório, o oxiacetileno é resultado da mistura de acetileno (C_2H_2) que junto com o oxigênio (O_2) produz uma chama que pode chegar à temperatura na ordem de $3400^\circ C$. O cilindro de oxigênio pode chegar a uma pressão de até 20 Mpa quando cheio, já o acetileno é armazenado em cilindros dissolvido em acetona, isso se dá por conta de sua instabilidade em pressões altas. A mistura é ajustada manualmente pelo controle das válvulas de cada cilindro de forma a manter uma chama branca e sem resquícios de fuligem (fumaça preta) de acordo com a Figura 15 a seguir.

Figura 15 - Tocha e cilindros de oxiacetileno

Fonte: Autoria própria (2021).

Para medição da temperatura, um termômetro de infravermelho com mira a laser modelo CASON CA380 com faixa de medição variando entre -32°C até 380°C é utilizado para a verificação de temperatura conforme Figura 16. Devido ao tempo de exposição livre ao ar atmosférico entre o aquecimento e soldagem, a temperatura da peça passa por uma redução. Para compensar esse efeito a temperatura de aquecimento deverá ser superior a calculada em cerca de 50°C .

Figura 16 - Medição termômetro Infravermelho

Fonte: Autoria própria (2021).

Segundo Azevedo (2002), a composição química média do aço SAE 1045 encontra-se na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 - Composição química média do aço SAE 1045

Elemento químico	Porcentagem em massa [%]
<i>C</i>	0,45
<i>Mn</i>	0,63
<i>Ni</i>	0,065
<i>Mo</i>	0,021
<i>Cr</i>	0,13
<i>Cu</i>	0,119

Fonte: Adaptado de AZEVEDO (2002).

Com base nos dados da Tabela 6, calculamos o carbono equivalente pela equação (2.2) e temos como resultado as equações (3.1) e (3.2):

$$C_{eq} = 0,45 + \frac{0,63}{6} + \frac{0,065}{15} + \frac{0,021}{4} + \frac{0,13}{5} + \frac{0,119}{13} \quad (3.1)$$

$$C_{eq} = 0,599 \% \quad (3.2)$$

Aplicando a equação (3.2) na Tabela 4, temos uma temperatura recomendada de 250°C. Tendo em vista os efeitos de exposição e controle, consideramos uma temperatura de aquecimento de 300°C.

3.3 PROCESSOS DE SOLDAGEM

Foram escolhidos dois meios de soldagens para este trabalho, cada um com suas características descritas a seguir.

3.3.1 SOLDAGEM MAG

O primeiro passo na soldagem para garantir um bom resultado é a definição da corrente e voltagem e a escolha do arame.

Para este estudo, utilizou-se uma Fonte de Soldagem MIG/MAG da marca SUMIG modelo Hank 255. Utilizando arame de solda tipo aço ao carbono, com diâmetro de 0,80mm AWS A5.18/79, classe ER-70S-6. Como gás de proteção, utilizou-se uma mistura de 75% de Ar + 25% de CO_2 , caracterizando um gás do tipo atuante na estrutura do cordão de solda.

Os dados de configuração de soldagem foram definidos de forma empírica por meio de regulagem do equipamento e solda em chapas de testes. Por fim, ficou definida uma configuração conforme a Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 - Configuração de soldagem MAG

Chave seletora de corrente	Corrente [A]	Chave seletora de voltagem	Voltagem [V]
7	180	9	25,78

Fonte: Autoria própria (2021).

Segundo os dados do fabricante, para este modelo de equipamento os valores de corrente variam entre 40A até 250A e a voltagem de 16V até 27V, como as chaves seletoras possuem 10 posições, realizando uma interpolação linear obtemos como resultados valores de corrente de 180A e voltagem de 25,78V (SUMIG, 2014).

De acordo com Pereira (2014), a nomenclatura do eletrodo possui o seguinte significado:

- ER - Eletrodo/Fio/Vareta;
- 70 - Tensão de ruptura multiplicado por 1000 psi;
- S - Fio sólido;
- 6 - Gás, Composição química.

Ainda segundo Pereira (2014), a composição química representada pela porcentagem em peso é:

- Mn – 1,4 a 1,85;
- Cu – 0,5;

- Si – 0,8 a 1,15;
- Ni, Cr, Mo – 0,15;
- C – 0,06 a 0,15.

3.3.2 SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO

Assim como na solda MIG/MAG, o eletrodo revestido também permite regulagem de solda ainda que mais simplificada. Foi escolhido o Eletrodo AWS A5.1 E6013. Com um diâmetro de 3,25mm, a alma é de aço ao carbono e seu revestimento de óxido de titânio como principal componente e compostos de potássio como secundário garantindo boa estabilidade de arco (FORTES E VAZ, 2005). A Figura 17 a seguir representa o eletrodo utilizado em laboratório. Para a execução da soldagem foi determinado de forma empírica (assim como na solda MAG) uma corrente de 125A e utilizado polaridade direta.

Figura 17 - Eletrodo E6013



Fonte: Autoria própria (2021).

Algumas características mecânicas do metal soldado (eletrodo) podem ser visualizadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Características Eletrodo E6013

Limite elástico [N/mm ²]	Alongamento à ruptura [%]	Resistência a tração [Mpa]	Resistência ao impacto (ISSO- V) [J]	Faixa de corrente (diâmetro 3,25mm) [A]
375	25	490	60 à 0°C	90 a 140

Fonte: Adaptado de https://static.wurth.com.br/catalog/PDF/Info/10.01.0020_Eletrodo-E6013.pdf.

3.4 ANÁLISE E INSPEÇÃO DAS SOLDAS

Após realizada as soldas, uma sequência de ensaios vai revelar os resultados finais e caracterizar os diferentes processos empregados. Uma análise qualitativa pode ser feita por ensaio de líquidos penetrantes e micrografia. Uma análise de dureza irá fornecer valores quantitativos da superfície da peça. Na sequência, a Figura 18 representa as amostras após o processo de soldagem.

Figura 18 - Amostras soldadas



Fonte: Autoria própria (2021).

As amostras superiores foram executadas com soldagem MAG sendo a da esquerda sem pré-aquecimento e da direita com. As amostras inferiores foram realizadas por soldagem com eletrodo revestido sendo a amostra da esquerda sem pré-aquecimento e da direita com.

3.4.1 LÍQUIDOS PENETRANTES

Sendo realizada na superfície da peça buscando por trincas e imperfeições, o ensaio de líquidos penetrantes exige preparo da superfície a ser ensaiada com a limpeza com água e sabão

visando a retirada de graxas e impurezas. Após a secagem da peça, é aplicado o líquido penetrante da marca *Spotcheck* SKL-WP Penetrante conforme a Figura 19, de acordo com o fabricante deve-se aplicar o produto a uma distância de aproximadamente 25 centímetros na posição vertical por toda a face de interesse, então aguarda-se um período de tempo de 15 minutos para que o líquido adentre as descontinuidades. Em seguida é feita sua remoção com uma estopa umedecida e aguarda-se a secagem da superfície. Aplica-se então uma fina camada de revelador da marca *Spotcheck* SKD-S2 Revelador não aquoso conforme Figura 19 e aguarda-se sua ação por cerca de 15 minutos para exibir as descontinuidades presentes na peça (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Figura 19 - Líquido Penetrante e Revelador



Fonte: Autoria própria (2021).

Para se obter melhores resultados, deve-se garantir que ao aplicar o líquido penetrante e revelador que estes cubram toda a superfície da peça e se obtenha uma camada espessa o suficiente para obtenção de amostras satisfatórias.

3.4.2 DUREZA ROCKWELL

Neste ensaio foi utilizado o equipamento Durômetro de Bancada para Dureza Rockwell Normal Digimess como ilustrado na Figura 20 a seguir.

Figura 20 - Durômetro de bancada Rockwell



Fonte: Autoria própria (2021).

Também foi utilizado em conjunto com o durômetro um edentador esférico de aço temperado de diâmetro 1/16" ilustrado na Figura 21 a seguir e uma carga de 100kgf.

Figura 21 - Edentador esférico



Fonte: Autoria própria (2021).

Cada amostra é posicionada de forma a manter uma distância mínima de 2 mm entre pontos de ensaio. Para melhores resultados, foi executado cinco ensaios de macro dureza em pontos diferentes de cada amostra (metal base, ZTA e no cordão de solda) e, calculado a média aritmética de dureza como medição.

A leitura de escala será feita na escala vermelha e sua medida representada por HRB como mostrado na Tabela 5.

3.4.3 MICROGRAFIA

Para a preparação do ensaio metalográfico, foi necessário primeiramente cortar as amostras no sentido transversal ao cordão de solda com a Cortadora Metalográfica marca Teclago modelo CM40/60, permitindo o corte sem ocorrência de alterações microestruturais como representado na Figura 22.

Figura 22 - Corte da amostra para análise



Fonte: Autoria própria (2021).

Em seguida foi utilizado a Cortadora Metalográfica marca Teclago modelo CM40/60, permitindo o corte sem ocorrência de alterações microestruturais como representado na Figura 23 a seguir.

Figura 23 - Cortadora Metalográfica



Fonte: Autoria própria (2021).

A Prensa Embutidora Metalográfica Manual Teclago modelo EM30D (ϕ 30mm) ilustrado na Figura 24 foi utilizada para embutir em baquelite por meio de calor e pressão pequenas amostras do material a ser analisado.

Figura 24 - Embutidora metalográfica



Fonte: Autoria própria (2021).

A etapa de embutimento tem como função garantir maior firmeza ao manusear a amostra nas fases de lixamento e polimento além de proporcionar maior planitude final na superfície. A Figura 25 é uma demonstração da amostra após o embutimento.

Figura 25 - Amostras embutidas em baquelite



Fonte: Autoria própria (2021).

O lixamento com água corrente deverá seguir uma ordem de granulometria crescente, ou seja, das lixas de grãos maiores para os menores, rotacionando as amostras em 90° a cada troca de lixa, para garantir a homogeneidade da rugosidade e dos riscos. A Figura 25 ilustra a base para o lixamento. A conexão de água umedece a lixa garantindo que a superfície da amostra não aqueça e retirando resquícios do processo, as amostras são então lixadas no sentido vertical (de cima para baixo). A Figura 26 a seguir, mostra a base de lixamento utilizada.

Figura 26 - Base de lixamento



Fonte: Autoria própria (2021).

Ao todo foram empregadas 5 lixas com granulometrias de 100, 320, 360, 600 e 1200, respectivamente. Após finalizar a etapa de lixamento, as amostras são limpas com água e álcool para retirada de micropartículas abrasivas. Na sequência, o polimento a ser realizado na máquina Politriz Lixadeira Metalográfica Teclago modelo – PL02E representado pela Figura 27, realizado com um abrasivo de alumina até que a superfície da amostra fique espelhada e sem riscos.

Figura 27 - Politriz lixadeira metalográfica



Fonte: Autoria própria (2021).

Para expor a superfície na análise microscópica, um reagente químico muito comum para esse processo é o ácido nítrico (HNO_3) que corrói a superfície do metal permitindo a identificação dos contornos de grão, junto com o álcool etílico (C_2H_6O) para evaporação do ácido. Essa mistura é chamada de Nital (ROHDE, 2010).

Realizou-se o ataque químico com Nital 3% de concentração, ou seja, 12,09% de (HNO_3) em 74,96% de (C_2H_6O) durante 15 segundos (KRÜGER; PEDRALI, 2016). A Figura 28 representa o balão volumétrico contendo Nital disponível no laboratório de preparação de amostras da UTFPR – Câmpus Guarapuava.

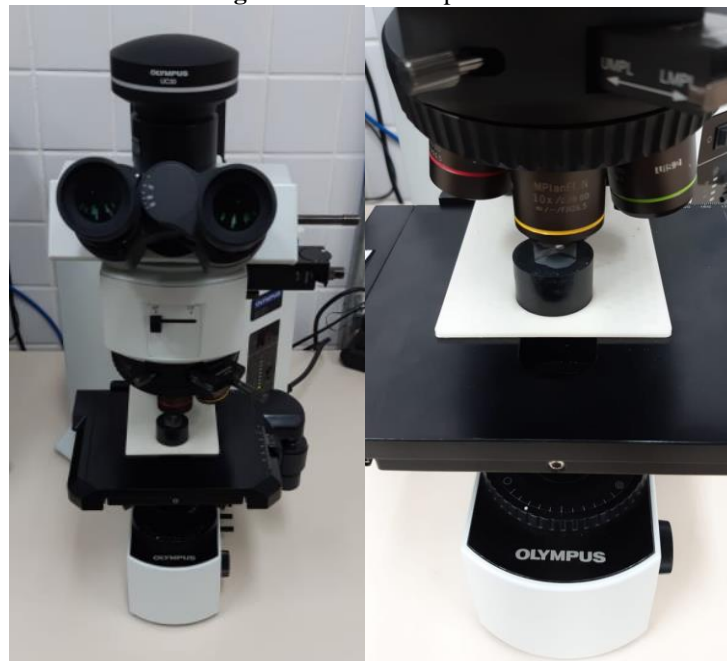
Figura 28 - Balão volumétrico com Nital 3%



Fonte: Autoria própria (2021).

Uma análise no Microscópio ótico Olympus BX51M mostrará a os resultados da solda e microestrutura. A Figura 29 representa o microscópio em laboratório e a mostra sendo analisada em uma lente de aumento de 20X.

Figura 29 - Microscópio ótico



Fonte: Autoria própria (2021).

O microscópio possui lentes de 5X, 10X, 20X, 50X e 100X de aumento onde para o trabalho em questão, a lente de 20X se mostrou mais adequada por apresentar uma imagem com ampliação suficiente para a revelação da microestrutura e análise visual da mesma. O microscópio está conectado a uma tela de 40” onde as imagens são projetadas e capturadas para este trabalho.

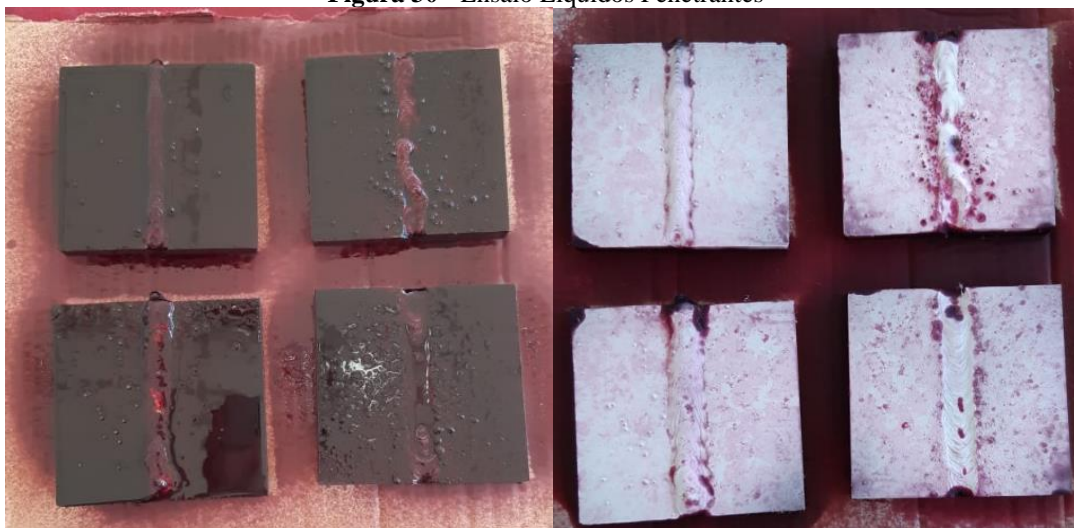
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após realizados os laboratórios e coletado os resultados, a análise comparativa será concretizada a seguir pela ordem cronológica dos ensaios.

4.1 ANÁLISE DAS DESCONTINUIDADES

Realizado o ensaio de Líquidos Penetrantes conforme a Figura 30, uma análise qualitativa buscando por trincas, fissuras ou poros derivados da falta de penetração do material de adição, pode ser observada em cada amostra.

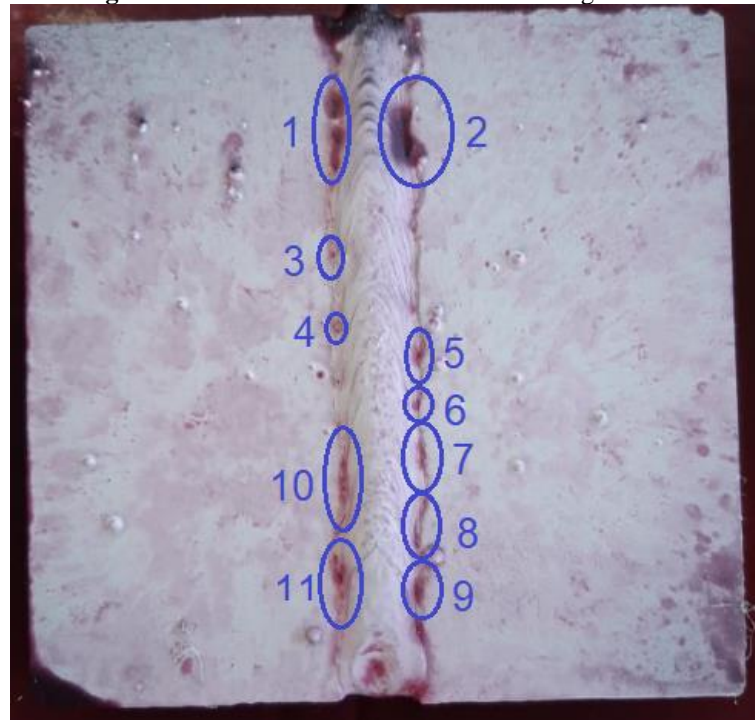
Figura 30 - Ensaio Líquidos Penetrantes



Fonte: Autoria própria (2021).

Para uma análise adequada, devido à efeitos de abertura de arco na borda, as extremidades de todas as amostras devem ser desconsideradas. Dessa forma podemos realizar uma análise com maior confiabilidade.

A primeira amostra a ser analisada será de soldagem MAG, começando com a primeira análise sem aquecimento prévio. A Figura 31 a seguir, ilustra os pontos de falha na amostra.

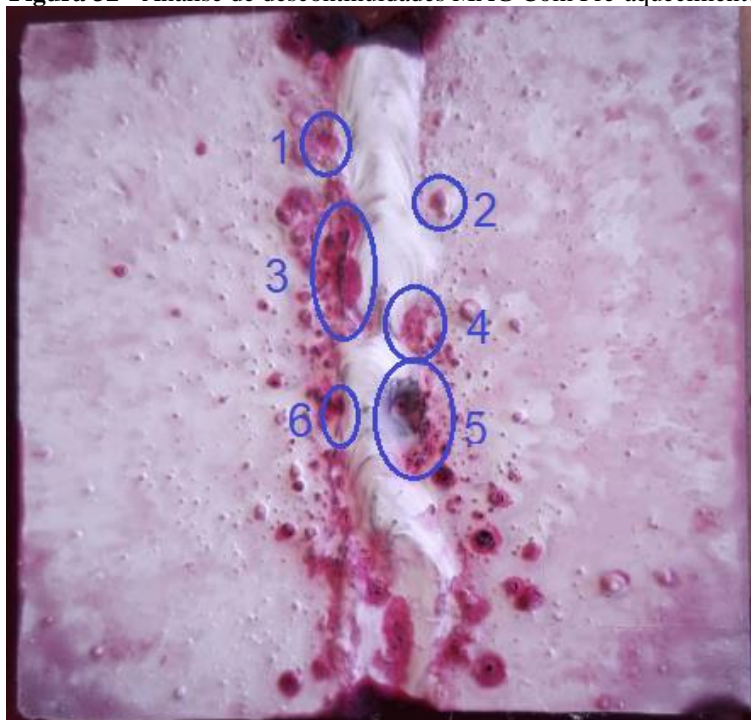
Figura 31 - Análise de descontinuidades soldagem MAG

Fonte: Autoria própria (2021).

Com um total de 11 pontos revelados que se apresentam apenas na região da ZTA, as marcações 1 e 2 são as mais profundas (escuras) ainda que localizadas numa região de proximidade da extremidade superior. Uma das possíveis causas são as trincas à frio onde as presenças de tensões residuais juntamente com o hidrogênio dissolvido no metal fundido causam fragilidade (SANTÓRIO; PAIVA, 2009). Na marcação 10, nota-se uma falha alongada podendo ser causado por pequenos poros aglomerados ocasionados pelo processo de solda que induz tensões residuais devido ao resfriamento heterogêneo e geometria de fusão (MANSUR et al., 2011).

A segunda amostra analisada é o processo MAG com pré-aquecimento conforme a Figura 32 a seguir.

Figura 32 - Análise de descontinuidades MAG Com Pré-aquecimento

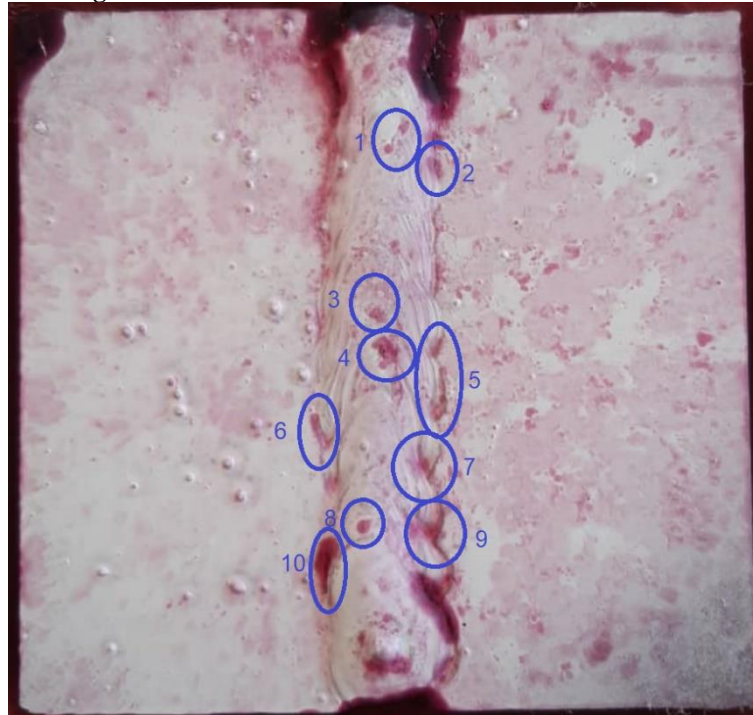


Fonte: Autoria própria (2021).

Numa análise preliminar podemos identificar uma alta incidência de respingos na solda como um todo. Um dos motivos mais plausíveis está no manuseio durante a soldagem com a variação na velocidade de soldagem, pois quando muito lenta irá causar um arco mais instável na poça de fusão (FORTES E VAZ, 2005). Como a configuração de soldagem foi a mesma da amostra anterior, então causas como quantidade de gás de proteção, corrente e tensão estão descartadas. Por outro lado, podemos verificar uma menor presença de imperfeições como as marcações 3 e 6. Tensões de tração costumam se desenvolver na região entre a solda e o metal de base (ZTA), isto ocorre principalmente devido à contração durante o resfriamento ocasionando tração naquela região.

A terceira amostra analisada foi a de Eletrodo revestido sem aquecimento. A Figura 33 a seguir nos mostra o resultado.

Figura 33 - Análise de descontinuidades eletrodo revestido

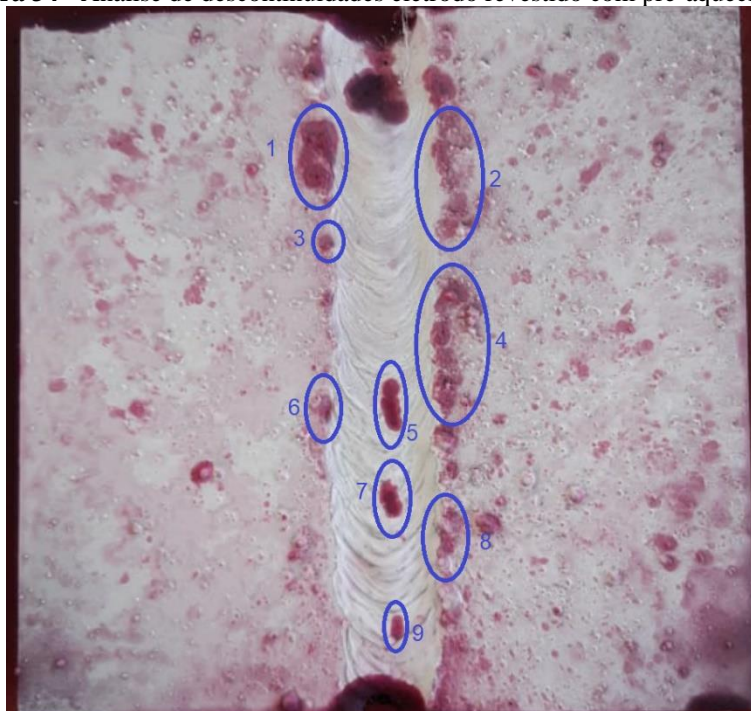


Fonte: Autoria própria (2021).

Conforme a Figura 33 podemos observar pequenos defeitos nos pontos 5, 6 e 9. Pequenos pontos de cavidade se formaram na solda como nos pontos 1, 3, 4 e 8 onde houve acúmulo do líquido penetrante, porém podem não indicar nenhuma falha. No ponto 10, assim como mencionado anteriormente na Figura 31, é mais profunda e está localizada próximo à extremidade. As demais marcações podem ter relação com a porosidade gerada pelo processo de soldagem (MANSUR et al., 2011).

Por fim, a última análise conforme Figura 34, na amostra de eletrodo revestido com pré-aquecimento.

Figura 34 - Análise de descontinuidades eletrodo revestido com pré-aquecimento



Fonte: Autoria própria (2021).

Conforme ilustrado na Figura 34, podemos identificar pontos de porosidade na região central da solda representado pelos pontos 5, 7 e 9. Este tipo de situação é chamado de porosidade em linha pois temos um conjunto de poros com formação em linha na direção paralela ao eixo longitudinal da peça onde os principais motivos deste tipo de defeito estão relacionados a falta de fusão ou de penetração da solda (SCHIO, 2013). Da mesma maneira como descrito anteriormente nas Figuras 31 e 33, a aglomeração de poros ou microporos pode resultar no surgimento de trincas, que quando submetidos a esforços podem gerar a propagação de trincas.

4.2 DUREZA

Os ensaios utilizando a escala Rockwell B com soldagem MAG podem ser observados na Tabela 9 a seguir. Os valores de profundidade de penetração nos fornecem o quanto o penetrador penetrou nas amostras onde o calculado se deu pela equação (2.5) utilizando os valores de dureza média. Onde as siglas MB, CS e ZTA são: metal base, cordão de solda e zona termicamente afetada, respectivamente.

Tabela 9 - Resultados de dureza MAG

Zona	Ponto 1 (HRB)	Ponto 2 (HRB)	Ponto 3 (HRB)	Ponto 4 (HRB)	Ponto 5 (HRB)	Média (HRB)	Profundidade de Penetração [mm]
MB	77	78	82	84	88	81,8	0,0964
MB Aquecido	72	75	78	83	84	78,4	0,1032
CS	59	69	70	77	87	72,4	0,1152
CS Aquecido	52	55	59	61	63	58,0	0,1440
ZTA	72	76	81	86	90	81,0	0,0980
ZTA Aquecido	63	65	76	79	85	73,6	0,1128

Fonte: Autoria própria (2021).

Podemos observar que a dureza média na ZTA da amostra sem aquecimento (81,0 HRB) se apresentou ligeiramente menor que no metal base (MB) com 81,8 HRB, e este próximo aos valores pesquisados na literatura (ANDREASSA, 2016; FILHO; LIMA, 2020). É importante ressaltar que a dureza quando em condições de aquecimento diminuiu (78,4 HRB no MB, 58,0 HRB no CS e 73,6 HRB na ZTA) devido a característica mais grosseira e uma estrutura predominantemente ferrítica.

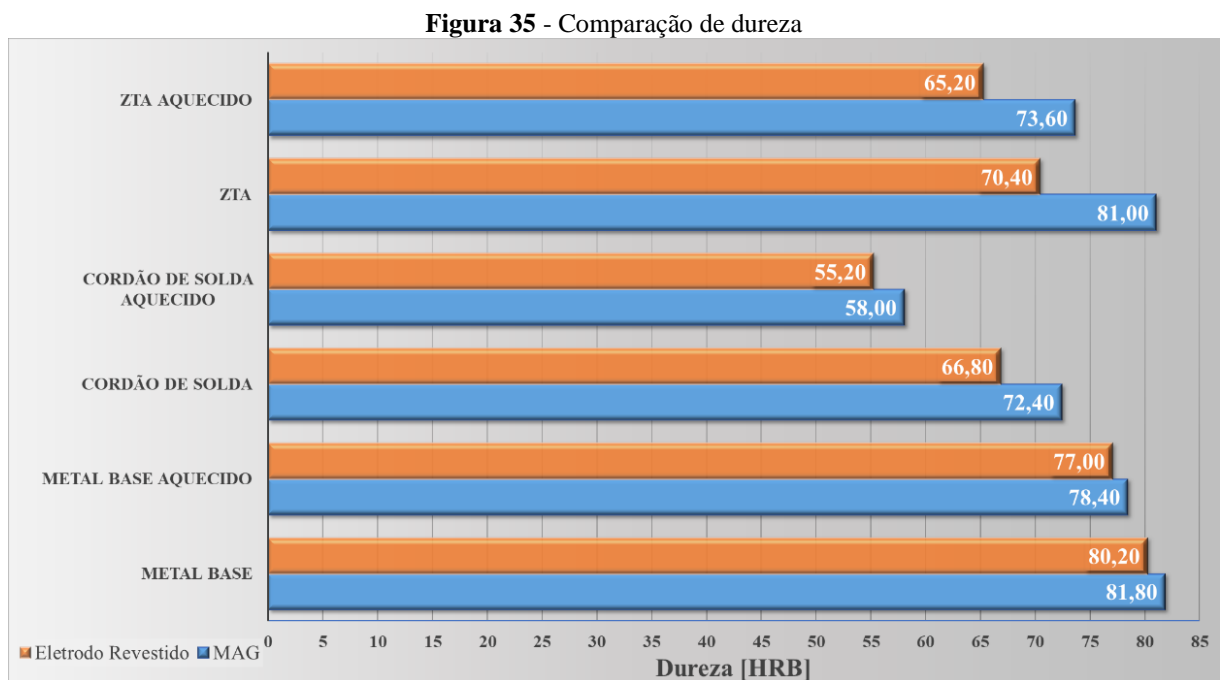
A Tabela 10 a seguir, representa os valores de dureza com soldagem com eletrodo revestido.

Tabela 10 - Resultados de dureza Eletrodo Revestido

Zona	Ponto 1 (HRB)	Ponto 2 (HRB)	Ponto 3 (HRB)	Ponto 4 (HRB)	Ponto 5 (HRB)	Média (HRB)	Profundidade de Penetração [mm]
MB	75	77	81	83	85	80,2	0,0996
MB Aquecido	72	74	77	80	82	77,0	0,1060
CS	60	60	67	71	76	66,8	0,1264
CS Aquecido	48	51	56	58	63	55,2	0,1496
ZTA	65	66	73	74	74	70,4	0,1192
ZTA Aquecido	52	61	63	74	76	65,2	0,1296

Fonte: Autoria própria (2021).

Com uma diferença significativa entre a dureza da ZTA e MB em ambas as amostras examinadas podemos ver um padrão de dureza semelhante ao processo MAG, porém menores valores de dureza em todas as análises. Isso se dá por conta do menor aporte térmico pela configuração de menor amperagem na solda, o controle de entrada de calor é muito importante e pode ser considerado um indicador de qualidade e melhor penetração na solda. Uma comparação entre os métodos de soldagem pode ser observada na Figura 35 a seguir.

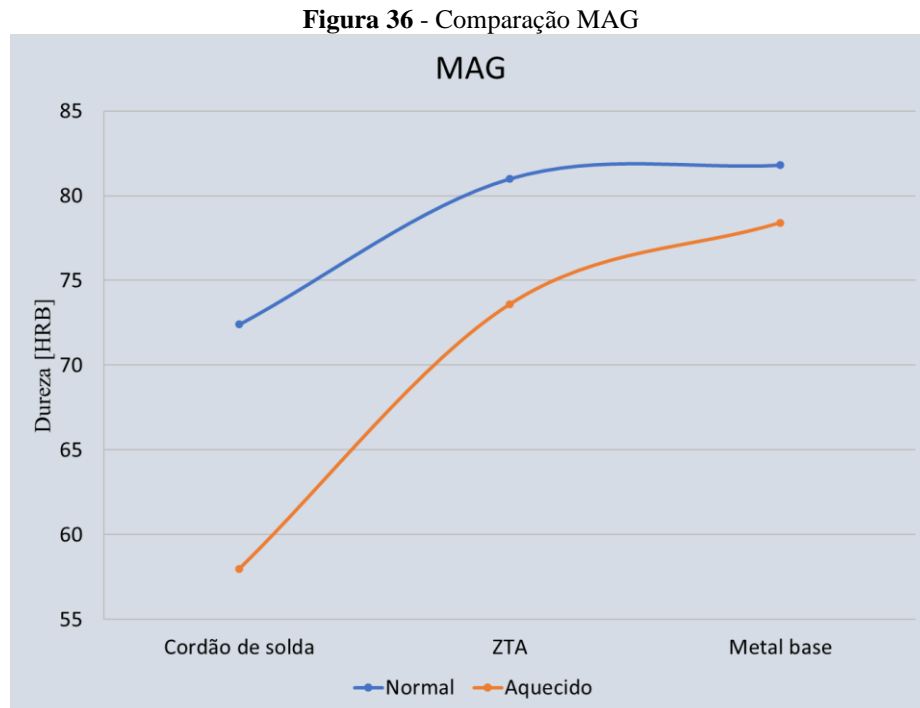


Fonte: Autoria própria (2021).

No metal base temos pouca influência do aporte térmico. Esta condição se dá devido ao menor efeito da temperatura nesta região o que ocasiona pouca diferença nos valores de dureza. No cordão de solda tem mais interferência, onde o resfriamento lento em conjunto com menor incidência de carbono no eletrodo ocasionam baixos valores de dureza. Já na ZTA, o grande impacto do aporte térmico causa um tratamento térmico havendo ajustes nos grãos e uma morfologia mais grosseira. Este problema pode ser amenizado utilizando condições e configurações menos agressivas de soldagem. O resfriamento lento se dá em todos os processos de soldagem, que após a soldagem as peças foram deixadas para resfriamento natural a temperatura ambiente, sem influência de nenhum meio que não seja o ar.

Para melhor comparação e visualização dos efeitos de aquecimento na solda MAG e eletrodo revestido, as Figuras 36 a seguir e Figura 37 reforçam as afirmações do parágrafo

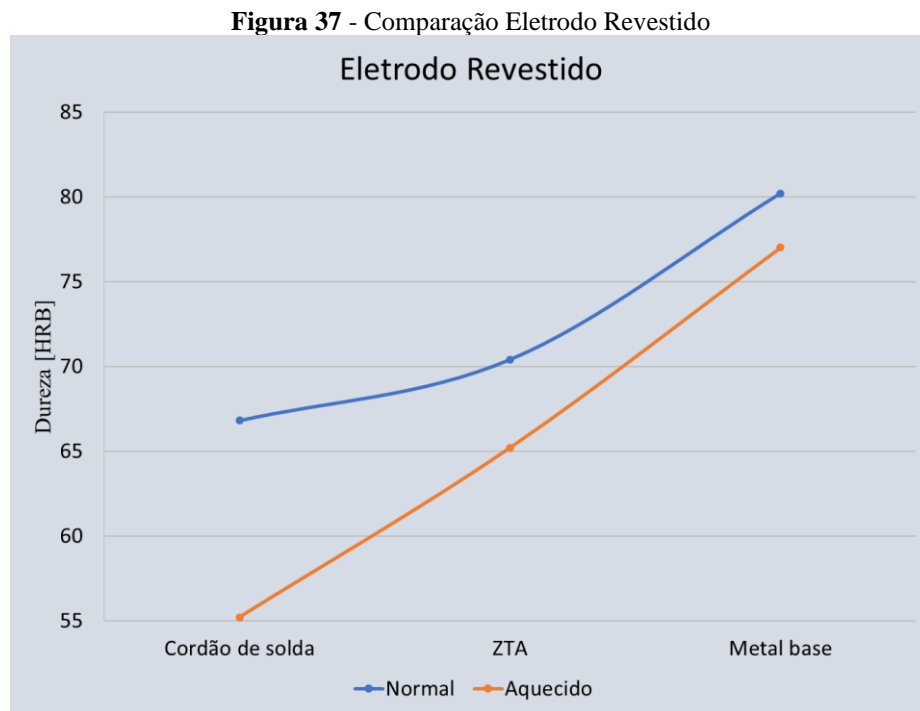
anterior, pois mostram em forma de gráfico a comparação de dureza para cada solda de forma individual.



Fonte: Autoria própria (2021).

É notável um comportamento muito semelhante entre o aço sem aquecimento e previamente aquecido, mas com uma considerável diminuição na dureza quando aquecido, especialmente na região do cordão de solda. Isso se dá devido à menor convecção térmica entre a poça de fusão acima de 1000°C e a amostra em temperatura cerca de 250°C .

A mesma análise na solda com eletrodo revestido é observada na Figura 37 a seguir.



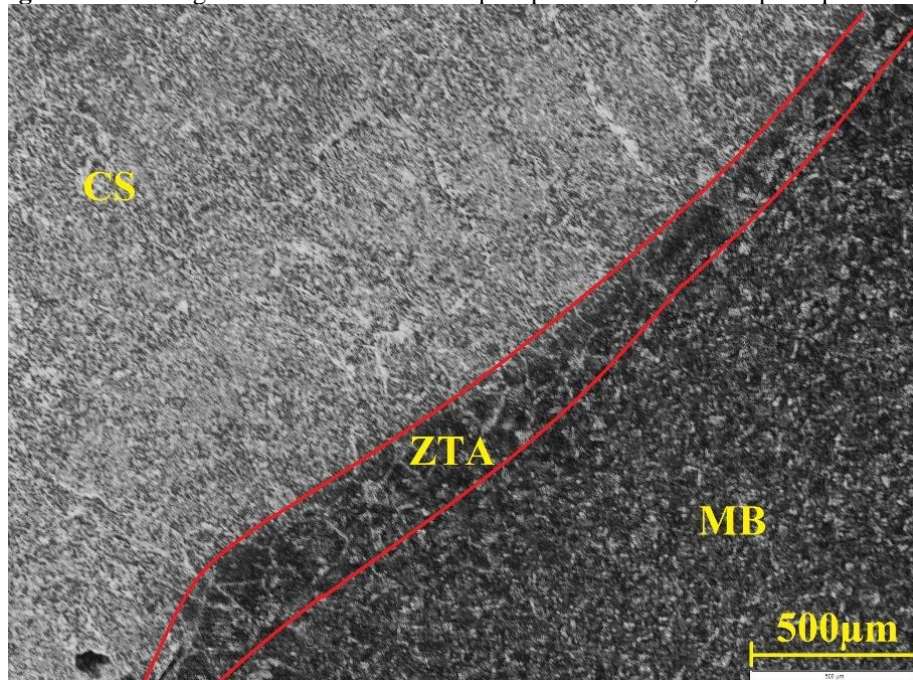
Fonte: Autoria própria (2021).

Assim como na solda MAG a solda de eletrodo revestido apresentou grande diferença de dureza na região do cordão de solda e também na ZTA mas pouca influência no metal base. Com eletrodo revestido a dureza caiu de 80,20 HRB no MB, 70,4 HRB na ZTA e 66,8 HRB no CS quando sem aquecimento, na situação com aquecimento 77 HRB no MB, 65,2 HRB na ZTA e 55,2 HRB no CS, onde uma das causas se dá devido ao menor aporte térmico em relação ao processo MAG e também pela diferença de carbono nos eletrodos utilizados.

4.3 METALOGRAFIA

As Figuras 38 e 39 apresentam a microestrutura da junta soldada com pré-aquecida e não, respectivamente na solda MAG. As regiões são classificadas em: cordão de solda (CS), zona termicamente afetada (ZTA) e metal base (MB). Aumento de 20x.

Figura 38 - Micrografia do material soldado pelo processo MAG, com pré-aquecimento



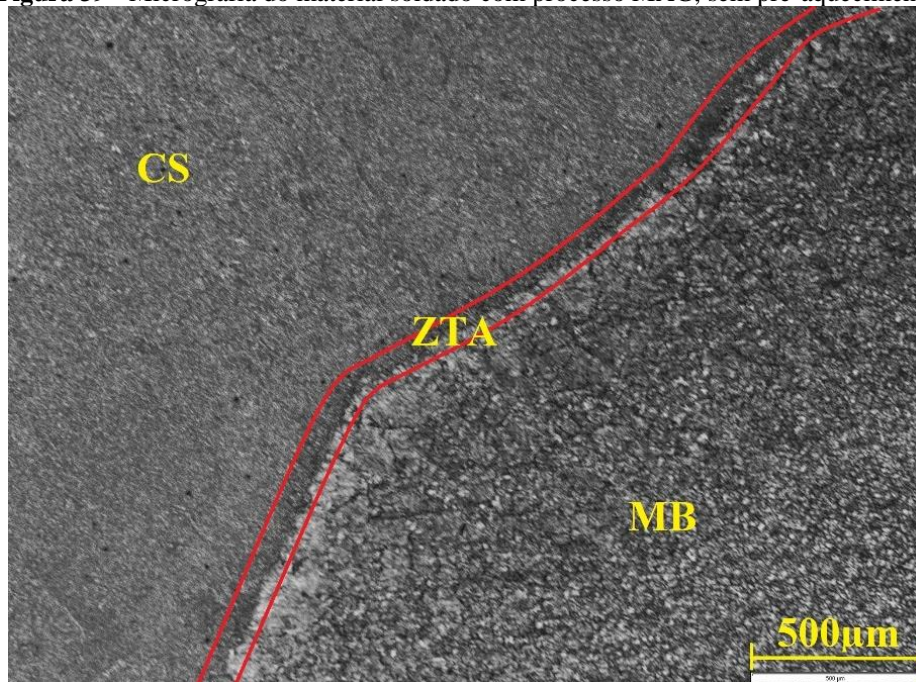
Fonte: Autoria própria (2021).

As diferenças microestruturais na região da solda ficaram bem definidas, onde podemos observar uma estrutura ferrítica no cordão de solda e ferrita e perlita no metal base (CALLISTER, 2012). Na ZTA a formação de grãos maiores (grosseiros) ocorre devido ao aquecimento acima da temperatura de fusão do aço com posterior resfriamento lento. A principal vantagem da estrutura com grãos maiores se dá principalmente pelos valores de ductibilidade que propiciam uma estrutura mais uniforme pela região da solda.

O tamanho do grão influencia muito nas propriedades mecânicas pois grãos adjacentes possuem diferentes orientações cristalográficas, dificultando assim os seus deslizamentos (CALLISTER, 2012). Ou seja, quanto maior o grão, mais fácil torna-se a movimentação, então, uma granulometria maior proporciona maior ductibilidade, mas em contra partida, menor resistência.

Na amostra da Figura 39 podemos verificar uma estrutura diferente no cordão de solda por causa do aquecimento e resfriamento que resultam em um alívio de tensões com formação de uma estrutura ferrítica, uma ZTA menor (estreita) e uma granulação mais refinada.

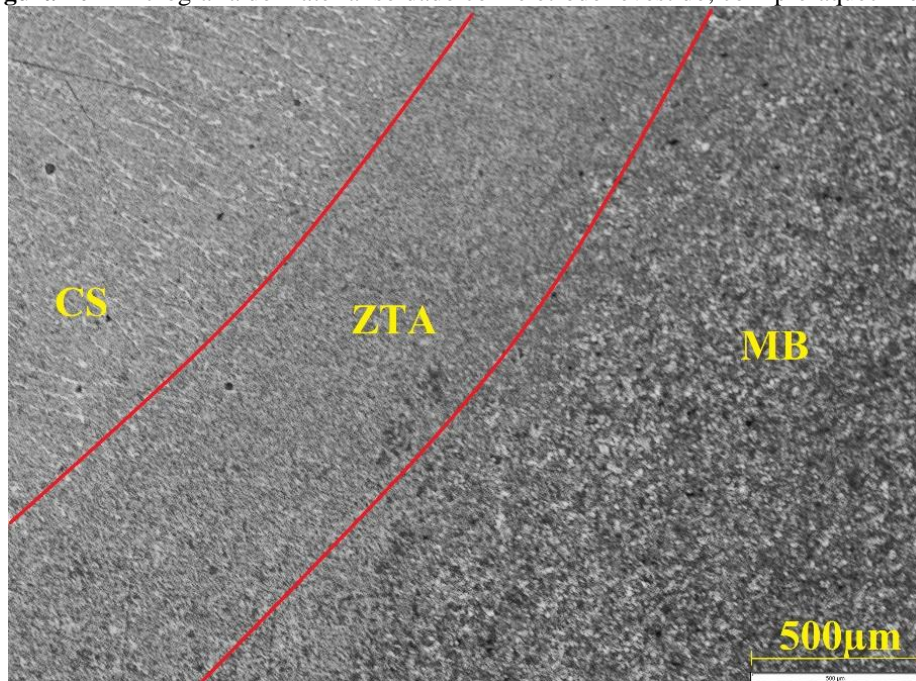
Figura 39 - Micrografia do material soldado com processo MAG, sem pré-aquecimento



Fonte: Autoria própria (2021).

As amostras de eletrodo revestido com e sem pré-aquecimento podem ser observadas nas Figuras 40 e 41 respectivamente. Aumento de 20x.

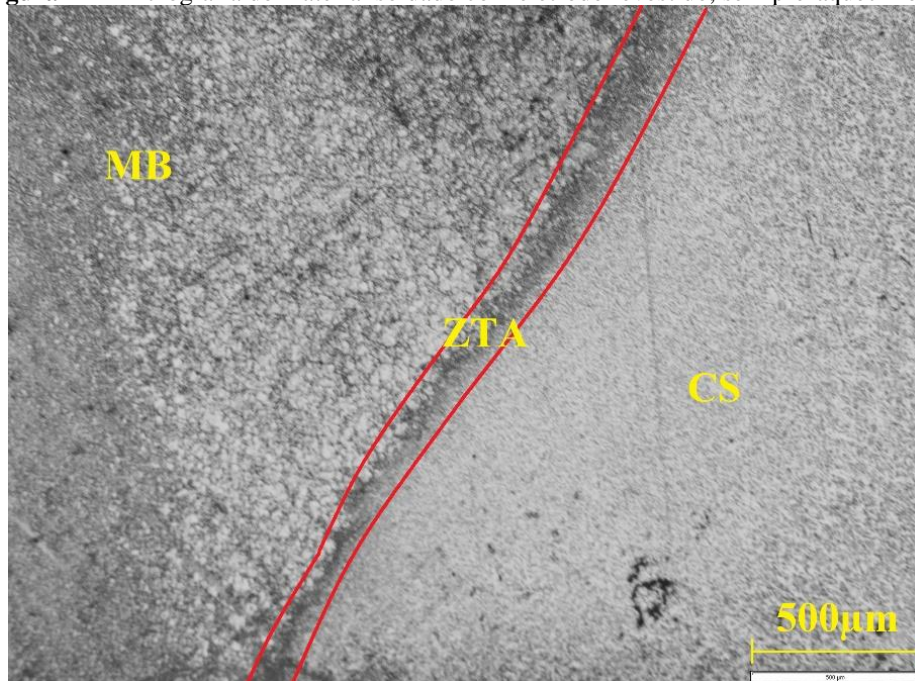
Figura 40 - Micrografia do material soldado com eletrodo revestido, com pré-aquecimento



Fonte: Autoria própria (2021).

No caso do eletrodo revestido as condições de aquecimento e configuração de soldagem proporcionaram um resfriamento lento e uniforme de modo que a transição entre o metal base e o cordão de solda seja muito suave, entretanto o processo MAG apresentou uma estrutura visual bem definida com o tamanho de grão. Contudo, verificamos a faixa da ZTA bastante ampla proporcionando uniformidades nas propriedades mecânicas como observado nos valores de dureza. Na região do MB nota-se uma presença de perlita com a presença maior de carbonetos nos contornos de grãos (CALLISTER, 2012).

Figura 41 - Micrografia do material soldado com eletrodo revestido, sem pré-aquecimento



Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 41 exibe uma estrutura ferrítica pré-eutetóide predominante no cordão de solda (CS). No metal base (MB) a estrutura é composta por ferrita contendo colônias de perlita (CALLISTER, 2012).

5. CONCLUSÃO

Por meio dos resultados obtidos de líquidos penetrantes é perceptível em ambas as formas de soldagem uma redução na quantidade de imperfeições, especificadamente na ZTA quando pré-aquecidas e também influencia positivamente na penetração da solda. Ainda que uma soldagem com alta incidência de respingos na amostra MAG dado pelas condições de soldagem, a amostra de eletrodo obteve uma superfície mais limpa e de melhor análise.

Em relação aos ensaios de dureza, constatou-se que quando pré-aquecido, o aço SAE 1045 apresentou uma redução significativa de dureza na ZTA e no cordão de solda, porém pouca influência no metal base devido a temperatura abaixo da temperatura de recristalização. As soldas MAG apresentaram maiores amplitudes de dureza devido a configuração mais agressiva durante a soldagem.

Através do ensaio metalográfico, foi possível observar uma ZTA com maior largura quando pré-aquecido nas soldas MAG e eletrodo, o que proporciona melhor transição entre metal base e cordão de solda, melhorando assim a sua homogeneidade estrutural como um todo. As amostras MAG obtiveram uma estrutura granulométrica maior em comparação com o eletrodo revestido, isso se dá pelo maior valor de tensão e aporte térmico.

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a técnica de pré-aquecimento se mostrou eficiente no quesito de melhorar a ductibilidade e homogeneidade para os meios de soldagem utilizados o que pode ser interessante nas aplicações estruturais onde o aço SAE 1045 costuma ser empregado.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros nesta mesma linha de pesquisa as propostas a seguir:

- Avaliar a influência do pré-aquecimento em chapas de menor espessura para efeitos do ciclo térmico;
- Aplicar o trabalho proposto em diferentes meios de soldagem como MIG por exemplo;
- Realizar ensaio de tração em amostras padronizadas para verificar a resistência à ruptura;
- Utilizar diferentes fontes de aquecimento como por exemplo forno mufla, para um ambiente térmico mais controlado;
- Realizar um estudo semelhante utilizando outros parâmetros de temperatura de pré-aquecimento ou variando-os e avaliando seus efeitos;
- Utilizar mecanismos de automatização no processo de soldagem de forma a minimizar as variações causadas pelo processo manual.

REFERÊNCIAS

ABNT. **Normas Técnicas**: Lista de Publicações. [S. l.], 16 jun. 2019. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/normalizacao/lista-de-publicacoes/abnt/category/284-junho?download=866:2019-lista-de-publicacao-01-a-30-jun>>. Acesso em: 26 maio 2020.

AÇO SAE 1045. Disponível em: <<https://www.acoespecial.com.br/aco-sae-1045>>. Acesso em: 13 abr. 2020.

ANDREASSA, Felipe dos S. Efeito de diferentes condições de resfriamento na dureza, microestrutura e distorção nos aços AISI H13, AISI 5160, AISI O1 e AISI 1045. In: ANDREASSA, Felipe dos S. **Efeito de diferentes condições de resfriamento na dureza, microestrutura e distorção nos aços AISI H13, AISI 5160, AISI O1 e AISI 1045**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais e Manufatura) - Universidade de São Paulo, [S. l.], 2016. p. 78.

FUNDIÇÃO MARTINELLI: **Aplicações e propriedades**. [S. l.], 2018. Disponível em: <<https://fundicaomartinelli.com.br/produto/aplicacoes-e-propriedades-2/>>. Acesso em: 25 maio 2020.

AZEVEDO, Alessandra G. L. de. **Aplicação da Técnica da Dupla Camada na Soldagem do Aço ABNT 1045**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Federal do Ceará, [S. l.], 2002.

AZZOLINI, Diego. **Estudo da Influência da Temperatura de Pré-Aquecimento nas Propriedades Mecânicas de um Aço SAE 1045, Soldado pelo Processo MIG/MAG**. 2017. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica.) - Centro Universitário UNIVATES, [S. l.], 2017.

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

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma introdução. 8ª edição. ed. [S. l.]: LTC, 2012. 817 p. ISBN 978-85-216-2124-9.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia**: dos produtos siderúrgicos comuns. 4ª edição. ed. [S. l.]: Blücher Ltda, 2008. 652 p. ISBN 978-85-212-0449-7.

FILHO, Aldimar F. de M.; LIMA, Ramsés O. C. **Análise Comparativa da Usinabilidade do Ferro Fundido Nodular e do Aço SAE 1045 no Torneamento com Ferramenta de Metal Duro**. 2020. 78 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) - UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO, [S. l.], 2020.

FILHO, Waldek W. B. **Transformações de Fases em Metais e Microestruturas**: Universidade de São Paulo. 2010. 47 slides. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3629504/mod_resource/content/1/Aula%2010-diagrama%20TTT.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2020.

FORTES, Cleber; VAZ, Cláudio Turani. **Apostila de eletrodos revestidos**. Apostila ESAB. Revisado em 03 fev. 2005.

MANSUR, Tanius R. et al. **Estudo das tensões residuais em juntas soldadas de materiais dissimilares e determinação dos limites de resistência à fadiga dos metais de base**, Universidade Federal de Minas Gerais, p. 11, set. 2011.

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 de Algumas Ligas Metálicas**. 2008. 26 p. Dissertação (Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2008.

NOVAIS, Paulo R. S. de. **Avaliação das principais descontinuidades encontradas nas juntas soldadas, causas e possíveis soluções**: Associação Brasileira da Construção Metálica. 2010. 20 slides. Disponível em: <<https://www.abcem.org.br/construmetal/2010/downloads/contribuicoes-tecnicas/ct09.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2020.

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

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

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime A.; SANTOS, Carlos A. dos. **Ensaio dos Materiais**. 2ª. ed. [S. l.]: LTC, 2012. 365 p. ISBN 978-85-216-2067-9.

KOU, Sindo. **Welding Metallurgy**. Second Edition. ed. [S. l.]: Wiley-Interscience, 2003. 461 p. ISBN 0-471-43491-4.

KRÜGER, Jéssica C.; PEDRALI, Patricia C. Departamento de Ciências Exatas e Engenharia da UNIJUÍ. **Microstructural Characterization Duplex Stainless Steel UNS S32101: REAGENT RESEARCH**, [s. l.], p. 4, 2016. Disponível em: <http://cricte.com.br/2016/artigos/CRICTE_2016_paper_140.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2020.

SAE: **Chemical Compositions of SAE Carbon Steels**. [S. l.], 2014. Disponível em: <https://www.sae.org/standards/content/j403_201406/>. Acesso em: 2 jun. 2020.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. **Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento Melhor desempenho**. [S. l.]: Artliber Ltda, 2008. 284 p.

SUMIG. **Manual de instruções**. 08/2014. ed. rev. [S. l.: s. n.], 2014. 28 p. Disponível em: https://www.sumig.com/manuais/manuais.php?folder=../02-Maquinas_para_Solda_Corte/01-Maquinas_MIG-MAG/Hawk_205-255-305. Acesso em: 14 fev. 2021.

ROHDE, Regis A. **Metalografia Preparação de Amostras: Uma abordagem pratica**. 3. ed. [S. l.]: LEMM Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais, 2010. 30 p. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4313798/mod_resource/content/1/APOSTILA_METALOGRAFIA.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2020.

RUCHERT, Cassius O. F. T. **Diagrama de equilíbrio Fe-C**. 2010. 62 slides. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/305682/mod_resource/content/1/Aula%203-Diagrama%20Ferro%20Carbono%20e%20TT%20normaliza%C3%A7%C3%A3o%20recozimento%20Final%20%5BModo%20de%20Compatibilidade%5D.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2020.

SANTÓRIO, Carlos A.; PAIVA, Thales D. de. **Avaliação da Susceptibilidade de um Metal Sujeito à Fragilização por Hidrogênio Através de um Equipamento de Teste de Implante Modificado**. 2009. 65 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Engenharia de Construção e Mmontagem) - Universidade Federal do Espírito Santo, [S. l.], 2009.

SCHIO, Fernando. **Análise Comparativa Entre Soldagem MIG/MAG Manual e Robotizada**. 2013. 68 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica.) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, [S. l.], 2013.

PEREIRA, Catarina A. dos R. **Contribuição para a caracterização da emissão de nanopartículas em processos de soldadura e avaliação de riscos decorrentes do processo.** 2014. 187 p. Trabalho Final de Mestrado (Mestre em Engenharia Química e Biológica) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, [S. l.], 2014.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio D. H. de. **Soldagem: Processos e Metalurgia.** São Paulo - SP: Blücher Ltda, 1992. 494 p. ISBN 85-212-0238-5.

WELDING. **Classificação dos aços conforme a Norma SAE** [S. l.], 2011. Disponível em: <<http://www.welding.com.br/site/classificacao-dos-acos>>. Acesso em: 28 abr. 2020.