

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

GUILHERME KOSINSKI

**ANÁLISE DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO DE
SOLDAGEM MAG UTILIZANDO OS AÇOS SAE 1020 E SAE
1045**

**GUARAPUAVA
2021**

GUILHERME KOSINSKI

**ANÁLISE DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO DE
SOLDAGEM MAG UTILIZANDO OS AÇOS SAE 1020 E SAE
1045**

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

Orientador: Prof.^a Dra. Carla Dantas da Silva
Coorientador: Prof. Dr. Aldo Przybysz

**GUARAPUAVA
2021**



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
UTFPR - CAMPUS GUARAPUAVA
DIRETORIA GERAL - CÂMPUS CAMPUS GUARAPUAVA
DIRET. GRAD. EDUCACAO PROFISSIONAL - GP
COORD. CURSO DE ENGENHARIA MECANICA - GP



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO DE SOLDAGEM MAG UTILIZANDO AÇO SAE 1020 E AÇO SAE 1045.

GUILHERME KOSINSKI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em Guarapuava, Paraná na data 24 de Fevereiro de 2021, de maneira remota, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

CARLA DANTAS DA SILVA
Prof. Orientador

DENISE ALVES RAMALHO
Membro Da Banca

SÉRGIO DALMÁS
Membro Da Banca

ALDO PRZYBYSZ
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

GUILHERME KOSINSKI
Estudante do Curso

Dedico esse trabalho aos meus pais,
Dirceu Kosinski e Marcia M. J. Kosinski
E ao meu irmão Gustavo Kosinski.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar forças para poder encerrar essa etapa.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

À minha orientadora Carla Dantas da Silva, pelo apoio e dedicação.

Ao meu coorientador, Aldo Przybysz, por toda dedicação, incentivo e amizade, que tornaram possível a elaboração desse trabalho.

Ao Técnico de Laboratório/Mecânica, Lucas Franco Wrege, pelo apoio e sugestões.

Aos meus amigos que fizeram parte dessa jornada.

O meu muito obrigado.

RESUMO

KOSINSKI, Guilherme. **Análise do cordão de solda no processo de soldagem MAG utilizando os aços SAE 1020 e SAE 1045.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

O presente estudo propõe uma contribuição na melhoria, otimização e redução de custos no processo de soldagem que tem se apresentado com uma grande demanda na indústria mecânica e metalúrgica. Neste contexto, o processo de soldagem MAG será utilizado para avaliar o cordão de solda utilizando um arame AWS A5.18 ER70S-6 depositado em aço SAE 1020 e aço SAE 1045, alterando os parâmetros de soldagem com o intuito de proporcionar-lhe mais estabilidade através do metal base do aço. Para este estudo serão utilizadas três amostras de cada aço, que serão cortadas e preparadas para serem soldadas pelo processo MAG, e em cada amostra serão variados os parâmetros de corrente e de tensão de solda com velocidade constante. Para cada amostra soldada serão realizados ensaios por líquidos penetrantes e ensaios de dureza sucedido por uma análise microestrutural por metalografia.

Palavras-chave: Processos de soldagem. Ensaios mecânicos. Aço SAE 1020. Aço SAE 1045.

ABSTRACT

KOSINSKI, Guilherme. **The weld bead analysis into the welding process MAG using SAE 1020 steel and SAE 1045 steel.** Course Conclusion Work. Mechanical Engineering. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.

The following work offers contributions to cost improvements, optimization and reduction to the welding process which has been demanded in metallurgic and mechanic industries. In this view, the welding process MAG will be used to assess the weld bead using AWS A5.18 ER70S-6 wires put into SAE 1020 steel and SAE 1045 steel changing the welding parameters in order to provide a weld bead steadier and steel's metal base. For this work three samples will be used to each piece of steel, they will be cut and prepared to be welded by the MAG process and in each sample the current and voltage welding parameters will be altered and varied with constant speed. For each welded sample will be carried out tests with penetrating liquid, toughness tests followed by a microstructural analysis by metallography.

Keywords: Welding processes. Mechanical assay. SAE 1020 steel. SAE 1045 steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de Fase, Fe-C	13
Figura 2 – Formação de aços Hipoeutetóide	15
Figura 3 – Esquema do equipamento de soldagem MIG/MAG	18
Figura 4 - Processos de Soldagem MIG/MAG	19
Figura 5 - Definições de uma junta soldada	22
Figura 6 - Classificação das trincas de acordo com a localização. (1) Trinca por cratera. (2) Trinca transversal na ZF. (3) Trinca transversal na ZTA. (4) Trinca longitudinal na ZF. (5) Trinca na margem da solda. (6) Trinca sob o cordão. (7) Trinca na linha de fusão. (8) Trincas na raiz da solda.....	24
Figura 7 - Representação esquemática da região da solda em uma liga de aço.	24
Figura 8 - Estrutura da ZTA em aços de baixo carbono. A - Região de crescimento de grãos. B - Região de refino de grãos. C - Região intercrítica	25
Figura 9 - (a) chanfro feito nas chapas, (b) características do chanfro.....	26
Figura 10 - Pontos das análises de dureza	28
Figura 11 - Amostra 1, aço SAE 1020	30
Figura 12 - Amostra 2, aço SAE 1020	30
Figura 13 - Amostra 3, Aço SAE 1020	31
Figura 14 - Amostra 1 (a), amostra 2 (b) e amostra 3 (c) do aço SAE 1045 após a aplicação do revelador	32
Figura 15 – Micrografia do metal base ampliadas (a) 20x e (b) 50x	35
Figura 16 - Micrografia da amostra 1, aço SAE 1020.....	36
Figura 17 - Micrografia da amostra 2, aço SAE 1020.....	36
Figura 18 – Micrografia da amostra 3, aço SAE 1020.....	37
Figura 19 - Transformação do aço com baixo teor de carbono resfriado lentamente	38
Figura 20 - Micrografia do metal base ampliada 100x.....	39
Figura 21 - Micrografia da amostra 1, aço SAE 1045.....	40

Figura 22 - Micrografia da amostra 2, aço SAE 1045.....	40
Figura 23 – Micrografia da amostra 3, aço SAE 1045	41

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Perfil de dureza média das amostras 1, 2 e 3 do aço SAE 1020	33
Gráfico 2 - Perfil de dureza média das amostras 1, 2 e 3 do aço SAE 1045	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do Aço SAE 1020 (% de Massa).....	14
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do Aço SAE 1020	14
Tabela 3 - Composição química do Aço SAE 1045 (% de massa).	16
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do Aço SAE 1045.....	16
Tabela 5 - Propriedades mecânicas dos arames de classe AWS A5.18.....	21
Tabela 6 - Composição química dos arames de classe AWS A5.18	22
Tabela 7 - Parâmetros utilizados no processo de soldagem MAG	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZF	Zona Fundida
MB	Metal Base
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
TIG	Tungsten Iner Gas
SAE	Society Automotive Engineers – EUA
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
Fe	Ferro
C	Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
S	Enxofre
Mn	Manganês
P	Fósforo
He	Hélio
O ₂	Oxigênio
A	Ampere
V	Volts

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVO GERAL.....	10
1.1.1	Objetivos Específicos	10
1.2	JUSTIFICATIVA.....	10
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1	DEFINIÇÕES DO AÇO	12
2.2	AÇO SAE 1020.....	13
2.3	AÇO SAE 1045.....	16
2.4	SOLDAGEM.....	17
2.5	PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG	17
2.5.1	Parâmetro de Soldagem MIG/MAG.....	19
2.6	ARAME AWS A5.18 ER70S-6	20
2.7	ZONA TERMICAMENTE AFETADA (ZTA).....	22
3.	MATERIAS E MÉTODOS	26
3.1	LOCAL DO EXPERIMENTO	26
3.2	OBTENÇÃO DE MATERIAIS	26
3.3	PROCESSO DE SOLDAGEM UTILIZADO	27
3.4	ANÁLISE E INSPEÇÃO DE SOLDA	27
3.4.1	Ensaios não destrutivos de líquido penetrante	28
3.4.2	Ensaios destrutivos de dureza.....	28
3.4.3	Ensaios Metalográficos	29
4.	RESULTADO E DISCUSSÕES	29
4.1	ENSAIOS POR LÍQUIDOS PENETRANTES	29
4.2	ENSAIOS DE DUREZA	33
4.3	ENSAIOS METALOGRAFICOS.....	35
5.	CONCLUSÃO	42
6.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS:.....	43
	REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

Com a alta exigência sobre equipamentos, máquinas e peças, o desgaste acompanhado do surgimento de trincas ou até mesmo a quebra da peça ou do componente são inevitáveis. Em muitos casos, a empresa ou indústria não podem parar uma linha de produção para substituir a peça ou o equipamento danificado.

Para evitar a indisponibilidade de máquinas e diminuir as perdas com novas peças e horas de máquinas paradas, ações rápidas e efetivas são necessárias. O processo de soldagem se encaixa perfeitamente, sendo um reparo rápido de peças e equipamentos mecânicos danificados, com o objetivo de manter a disponibilidade do mesmo e até maximizar a vida útil da peça.

O presente trabalho visa analisar os cordões de soldas produzidos no processo de soldagem MAG, utilizando um arame AWS A5.18 ER70S-6 depositados em aço SAE 1020 e aço SAE 1045. Esses aços possuem uma gama de utilização industrial, mecânica e metalúrgica.

O processo de soldagem tem como fundamento a união entre duas superfícies ou junções metálicas, usando uma fonte de calor externa. A solda é o resultado desse processo. (WAINER; BRANDI; MELLO, 2011).

O processo de soldagem é um método já utilizado há mais de dois séculos, quando houve a descoberta do arco elétrico por volta de 1800, mas há relatos de civilizações antigas que já possuíam esse conhecimento. Segundo Marque, Modenesi, Bracarense (2014) existe no museu do Louvre em Paris, um pingente de ouro com evidências de ter sido soldado. Esta jóia foi fabricada na Pérsia por volta do ano 4000 a.C.

Foi em meados da Primeira Guerra Mundial que o desenvolvimento e aperfeiçoamento de novas técnicas de soldagem teve um salto, com a crescente demanda na melhoria do aspecto e qualidade dos elementos soldados, os processos Metal Inert Gas (MIG), Metal Active Gas (MAG) e Tungsten Inert Gas (TIG) se destacaram nas indústrias (WAINER et al. 1992).

Segundo Wainer, Brandi e Mello (1992), o processo de soldagem teve seu grande impulso durante a II Guerra mundial, devido a necessidade de fabricação de aviões e navios armas, automóveis, caminhões e tanques de guerra que utilizavam uma grande parte de suas estruturas soldadas, entre outras demandas.

Ao longo das décadas, a necessidade de se desenvolver novas tecnologias no processo de soldagem fez com que a demanda sob esse produto nas indústrias crescesse muito, afetando

diretamente alguns de seus segmentos, como: naval, aérea, civil, mecânica e elétrica. Para sanar a necessidade desse mercado foi aplicado o desenvolvimento de novas pesquisas em diversas áreas da ciência dos materiais e processos de fabricação, sempre buscando eficiência acompanhado de otimização do processo e baixo custo de produção.

1.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo dessa pesquisa é analisar os efeitos causados no metal base, zona termicamente afetada (ZTA) e cordão de solda dos aços SAE 1020 e SAE 1045, variando os parâmetros de soldagem (tensão e corrente). Para que haja uma identificação da correlação de cada parâmetro com a microestrutura e os efeitos causados no material, a fim de encontrar o melhor parâmetro para cada aço.

1.1.1 Objetivos Específicos

- ✓ Comparar os efeitos da variação de tensão e corrente em amostras soldadas utilizando o processo MAG nos aços SAE 1020 e SAE 1045;
- ✓ Caracterizar a microestrutura das zonas termicamente afetadas (ZTA's), dos cordões de solda e do metal base, avaliando a influência da variação de tensão e corrente aplicada;
- ✓ Analisar as amostras soldadas utilizando os ensaios não destrutivos (inspeção visual e líquido penetrante) e os ensaios destrutivos (macro dureza e metalografia) nas região das amostras soldadas.

1.2 JUSTIFICATIVA

A contribuição científica desse estudo está no fato de que o tema tratado é atual e dispõe de poucas pesquisas realizadas até o momento. Sendo que nestas poucas pesquisas não houve menção ou comparação sobre a diferenciação de dois aços, com variações de parâmetros de soldagem em uma solda MAG utilizando um eletrodo AWS A5.18 ER70S-6 como material de deposição de solda.

Este trabalho pretende contribuir para uma melhor análise e desempenho das grandezas envolvidas no processo, assim como, na formação da solda e na qualidade do cordão de solda gerado, podendo auxiliar futuramente em novas e melhores técnicas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 DEFINIÇÕES DO AÇO

Devido a sua grande variedade e complexidade, essas definições não são simples, visto que o aço nem sempre é apenas uma composição de ferro e carbono.

Ao se produzir aços em siderúrgicas, estes apresentem normalmente, além do carbono como principal elemento de liga, uma série de impurezas de natureza metálica ou não, as quais se originam entre as matérias primas empregadas ou de outros tipos de reações, normalmente são: enxofre (S), fósforo (P) e manganês (Mn) (CHIAVERINI, 2008).

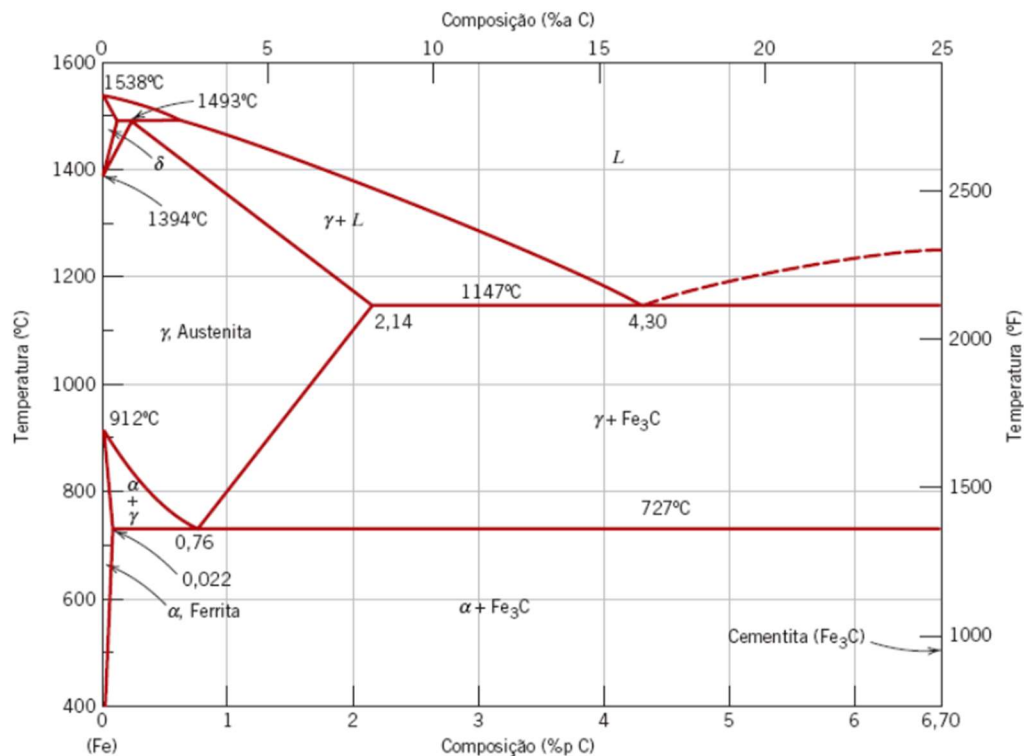
A Figura 1 ilustra o diagrama Fe-C. Este diagrama esquemático demonstra as curvas de transformação de fase até o teor de 6,7% de carbono, acima do qual pouco se conhece. Ligas de aço com teor de carbono acima de 4% a 4,5% tem pouca ou nenhuma utilidade comercial (CHIAVERINI, 2008).

O limite inferior de 0,022% corresponde a máxima solubilidade de carbono no ferro a temperaturas ambientes, já o limite superior de 2,14% corresponde a máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro quando alcançados 1147°C (CALLISTER, 2018).

Dado a grande variedade de aços, foram criados sistemas para sua classificação. Como base foi utilizado a composição química desses aços. Dentre os sistemas mais conhecidos, são os mais utilizados os da American Iron and Steel Institute (AISI) e a Society of Automotive Engineers (SAE) (PANDOLFO, 2009).

Nesse sistema, os dois primeiros algarismos diferenciam os vários tipos de aço entre si, sendo assim, quando os dois primeiros algarismos são “10”, os aços são simplesmente ao carbono; quando “11”, os aços são de usinagem fácil com alto teor de enxofre. Nesse sistema, as letras “XX” correspondem às cifras que indicam o teor de carbono, por exemplo 10XX. Deste modo, por exemplo, nas designações AISI-SAE, a classe de aço 1020 significa aço carbono com 0,20% de carbono (CHIAVERINI, 2008).

Figura 1 - Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro



Fonte: CALLISTER (2018)

De um modo geral, a soldabilidade de aços de baixo carbono acarreta problemas como a formação de trincas induzida pelo hidrogênio. Outro problema mais técnico, envolve a perda de tenacidade na ZTA (Zona Termicamente Afetada) ou na ZF (Zona Fundida), que é associada com a formação de estruturas de granulação grosseiras durante um processo que utiliza uma energia de soldagem muito elevada. Há possibilidades de formação de trincas na solidificação, devido a contaminação da peça ou, por conta de uma energia de soldagem com aporte térmico elevado (MODENESI, 2011).

2.2 AÇO SAE 1020

Os aços de baixa liga SAE 1020, constituem o mais importante grupo de materiais utilizados na engenharia e na indústria. De fato, as propriedades mecânicas desses aços, e na maioria das vezes sem qualquer tratamento térmico, são suficientes para atender qualquer aplicação prática (CHIAVERINI, 2008).

A formação química no aço SAE 1020 é basicamente composta por carbono (C), manganês (Mn), fósforo (P) e enxofre (S), dispostos nas seguintes proporções demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do Aço SAE 1020 (% de Massa)

Elementos	C	Mn	P máx.	S máx.
% de massa	0,18-0,23	0,30-0,60	0,040	0,050

Fonte: Manual de Aços (2020)

Já as propriedades mecânicas deferidas a esse aço encontram-se na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do Aço SAE 1020

Densidade (g/cm ³)	7,87
Resistencia a tração (MPa)	420
Limite de escoamento (MPa)	350
Dureza (HB)	121
Alongamento (%)	15

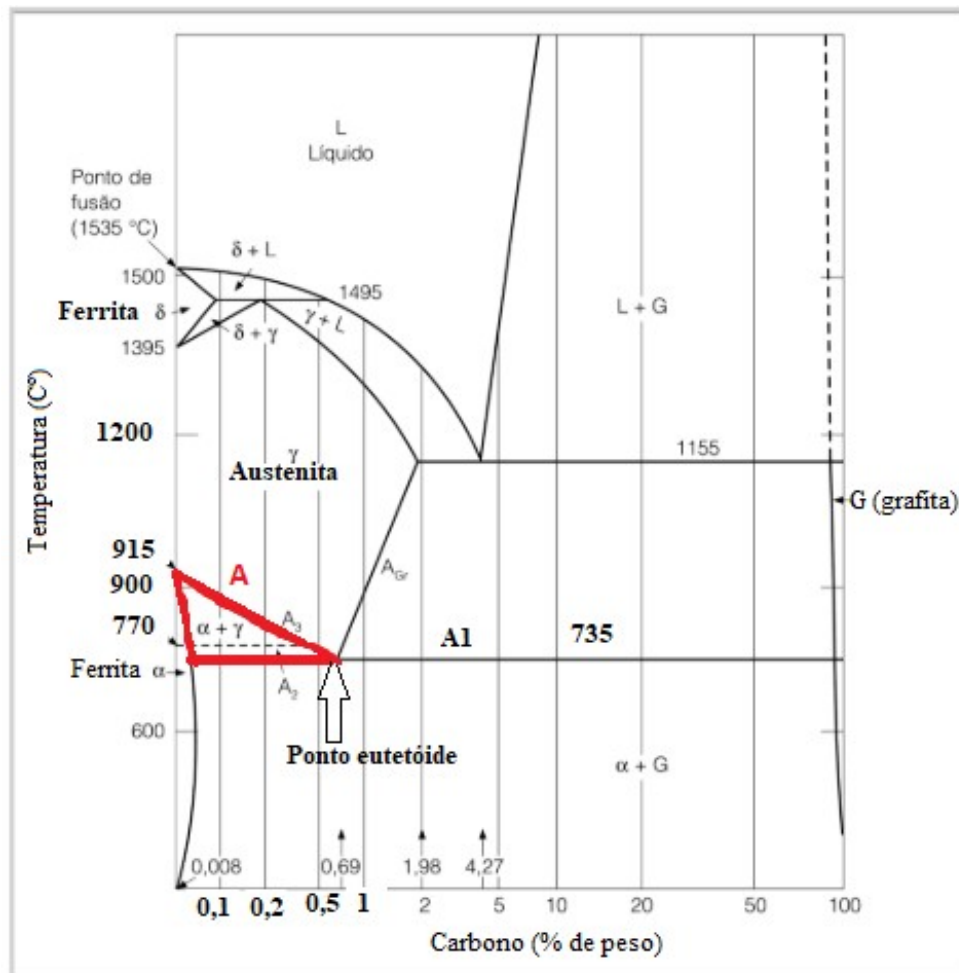
Fonte: Adaptado Aço Carbono SAE 1020 (2020).

O aço 1020 é considerado o melhor em aplicação na indústria metalúrgica, devido ao seu custo baixo e características elevadas de plasticidade e soldabilidade.

Os aços 1020 tem baixos teor de carbono, aproximadamente 0,2% C, classificado com liga hipoeutética, ou seja, o início da sua microestrutura tem-se na região “A” do diagrama de fases Fe-C (JUNIOR, 2017), representado melhor na Figura 2.

O aço SAE 1020 é composto basicamente por microestruturas de perlita mais ferrita, e por se tratar de um aço com baixo teor de carbono, sua microestrutura é constituída por ferrita pré-eutetóide, ou seja, a ferrita se forma em um ponto acima da temperatura eutetóide. Por possuir essa composição de fase torna-se um aço com baixa resistência mecânica e tenacidade alinhada a alta ductilidade (SILVA; MEI, 2010; JUNIOR, 2017).

Figura 2 – Formação de aços Hipoeutetóides



Fonte: Adaptado de SILVA (2010)

A formação de cementita, que é o carboneto de ferro Fe_3C , ocorre quando o limite da solubilidade da ferrita é ultrapassado a temperaturas abaixo de $725^\circ C$. A cementita tem a função mecânica que caracteriza a dureza e fragilidade quando comparados com a ferrita, dessa forma é a responsável por aumentar a resistência mecânica dos aços (SILVA; MEI, 2010).

A ferrita contendo em sua composição química traços do carbono, forma-se por difusão, nucleando preferencialmente nos contornos de grãos da austenita. Com o aumento da taxa de resfriamento a ferrita passa a nuclear também no interior do grão austenítico. Possuindo baixa dureza e baixa resistência a tração, porém, com excelente resistência ao choque e elevado alongamento (PANDOLFO, 2009; SILVA; MEI, 2010).

Já a perlita é formada por lamelas de cementita e perlita, sendo que as combinações dessas duas formações tornam a perlita mais resistente em relação a ferrita, e menos frágil com

relação a cementita. De modo que, quanto menor o teor de carbono presente, mais ferrita e menos perlita se formam, por consequência, maior ductibilidade e menor dureza (JUNIOR, 2017; PANDOLFO, 2009).

2.3 AÇO SAE 1045

O Aço SAE 1045, assim como o aço 1020, é muito utilizado na construção mecânica devido sua porcentagem de carbono que gira em torno de (0,43% a 0,50%), entre outras ligas. Este aço é utilizado, dentre outras aplicações, torres de ventilação, eixos de bombas, eixos de ventiladores, também muito utilizado em indústrias petrolíferas.

Sua composição química, assim como do aço 1020, é composta por carbono (C), manganês (Mn), fósforo (P) e enxofre (S), representado na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do Aço SAE 1045 (% de massa).

Elementos	C	Mn	P máx.	S máx.
% de massa	0,43-0,50	0,60-0,90	0,030	0,050

Fonte: Manual de Aços (2020).

Já as propriedades mecânicas referidas a este aço se encontram na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do Aço SAE 1045

Densidade (g/cm ³)	7,87
Resistencia a tração (Mpa)	585
Limite de escoamento (Mpa)	450
Dureza (HB)	163
Alongamento (%)	16

Fonte: Adaptado Aço Carbono SAE 1045 (2020).

Este aço apresenta características marcantes quando submetido há processos de soldagens, por apresentar uma composição de 0,43% a 0,50% de carbono. Quando submetido a ciclos térmicos de soldagem acaba desenvolvendo uma dureza elevada na ZTA e apresentando baixa resistência ao revenimento (AZEVEDO, 2002).

2.4 SOLDAGEM

Basicamente a soldagem é descrita como a união de dois materiais, sejam eles de composição química iguais ou diferentes, contudo, existem mais de um método ou processo utilizado para realizar a deposição de material sobre a superfície, com o intuito de promover o reparo de uma peça com um determinado defeito ou desgaste (MODENESI, et al., 2012).

Os processos mais utilizados na soldagem são: o método por arco com proteção gasosa (Gas Metal Arc Welding – GMAW), também conhecida por MIG/MAG e a soldagem a arco de tungstênio com proteção gasosa (Gas Tungsten Arc welding – GTAW), que possui a nomenclatura usual TIG.

Para realizar o processo de união das peças metálicas, é realizada o aquecimento e logo após a fusão através de um arco elétrico entre um eletrodo consumível (arame) que é utilizado no processo MIG/MAG, ou um eletrodo não consumível de tungstênio utilizado no processo de soldagem TIG (AWS, 1991).

Por possuírem aplicações em uma ampla gama de materiais e produzir soldas de alta qualidade com baixo custo, estes processos são referências nas indústrias, destacando-se o processo MIG/MAG, por ser aplicável em todos os metais comercialmente importantes como os aços, alumínio, aços inoxidáveis, cobre e vários outros metais (FORTES, 2005).

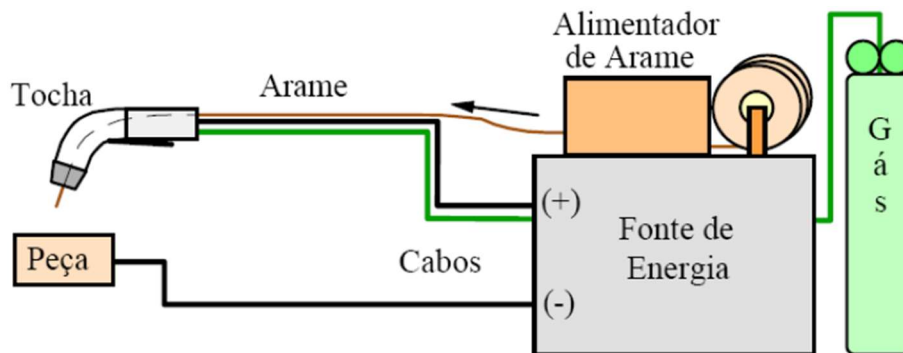
2.5 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG

Na soldagem com arco elétrico de proteção (GMAW – Gás Metal Arc Welding) um arco elétrico é mantido entre a peça e o consumível na forma de arame. O arco funde continuamente o arame à medida que este é alimentando à poça de fusão, o metal da solda é protegido da atmosfera por um fluxo de gás (ou mais de um gás). Se este gás for inerte como (Ar/He), o processo é chamado de MIG (Metal Inert Gas). Se o gás for ativo (CO₂ ou misturas Ar/O₂/CO₂), o processo é denominado MAG (Metal Activ Gas) (FORTE, 2005; MODENESI, et al, 2012).

Podemos considerar o processo MIG/MAG de duas formas, automática, quando o movimento da tocha é feito por uma máquina, ou semiautomática, quando a tocha é conduzida manualmente pelo operador (soldador). Em ambos os casos, a alimentação do arame é feita mecanicamente, ou seja, o equipamento mantém por si só, a velocidade de alimentação e o comprimento do arco constante (SCOTTI et al, 2008).

O equipamento básico para soldagem MIG/MAG consistem em: uma fonte de energia, tocha de soldagem fonte de gás e alimentador de arame. A Figura 3 mostra uma representação esquemática do equipamento de soldagem.

Figura 3 – Esquema do equipamento de soldagem MIG/MAG



Fonte: Adaptado de MARQUES (2009)

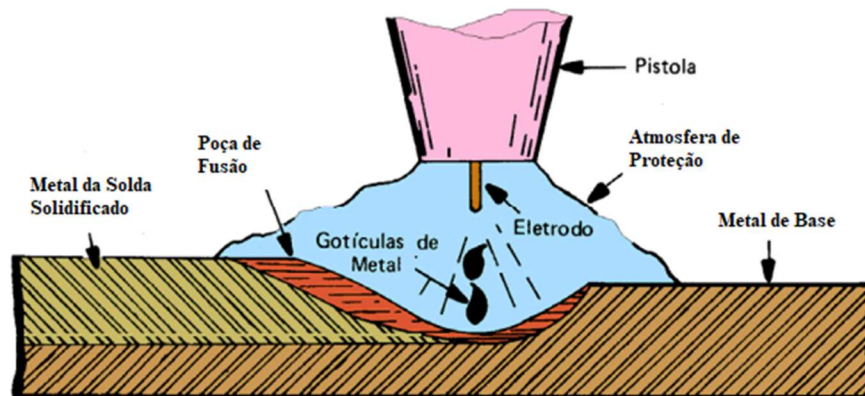
O processo de transferência de metal através do arco se dá, geralmente, por três mecanismos mais comuns: aerossol (spray), globular e curto-circuito (short arc). Essas técnicas descrevem a maneira que o metal é transferido para a poça de fusão (MODENESI, et al, 2012; SCOTTI et al, 2008).

Segundo Forte (2005) e Wainer (1992) a transferência por aerossol (spray) ocorre quando é aplicado altas densidades de corrente e usando argônio ou uma mistura rica em argônio, desta forma, pequenas gotas de metal fundido se desprendem da ponta do arame e são projetadas na poça de fusão.

A transferência globular ocorre com baixa densidade de corrente em qualquer tipo de gás de proteção, as gotas produzidas nesse método são relativamente grandes.

Já a transferência por curto-circuito ocorre com densidades de correntes mais baixas que a utilizada na transferência globular, qualquer tipo de gás de proteção pode ser utilizado. O metal é depositado quando o arame toca na poça de fusão ocorrendo o curto-circuito. A Figura 4 demonstra o processo de soldagem MIG/MAG.

Figura 4 - Processos de Soldagem MIG/MAG



Fonte: Adaptado de Fundação Brasileira de Tecnologia de soldagem (FBTS): Processos de Soldagem MIG/MAG

O gás de proteção tem a função de evitar contaminação do arame, das gotas de metal fundido em transferência e da poça de fusão pelos gases da atmosfera. Este gás tem o papel de ser o meio ionizante, conferindo as propriedades do arco e controlando a transferência metálica, consumo do eletrodo e fusão do metal de base. O processo MAG é utilizado apenas na soldagem de materiais ferrosos, tendo como gás de proteção o CO_2 ou misturas ricas em gás (CO_2 mais Ar), enquanto a soldagem MIG pode ser usado para materiais ferrosos quanto não ferrosos, como alumínio, cobre, magnésio, níquel e suas ligas (SCOTTI et al, 2008; MARQUES, 2005).

Para a manutenção industrial a soldagem MIG/MAG tem uma ampla gama de vantagens, como: alta taxa de deposição de metais, a solda pode ser executada em todas as posições, não há necessidade de remoção de escória, altas velocidades de soldagem proporcionando menor distorção da peça e por fim, a soldagem pode ser realizada em matérias ferrosos e não ferrosos (MODENESI, et al, 2012; FORTE, 2005).

Por conta desses fatores o processo é amplamente utilizado na fabricação e manutenção de peças e equipamentos metálicos, recuperação de superfícies desgastadas e no recobrimento de superfícies desgastadas com materiais especiais (TEIXEIRA, 2011).

2.5.1 Parâmetro de Soldagem MIG/MAG

Os parâmetros de soldagem no processo MIG/MAG tem grande influência na forma e geometria da solda, bem como a sua penetração na peça, da mesma forma possui um efeito

direto na microestrutura do material soldado, podendo causar variações na dureza, fragilidade do cordão de solda e também na peça soldada (COSTA, 2019).

Tais parâmetros podem ser organizados em dois grupos, variáveis ajustáveis de primeira ordem e de segunda ordem. Para as variáveis de primeira ordem se encontram os parâmetros de intensidade da corrente, tensão e a velocidade de soldagem. Para as variáveis de segunda ordem temos o ângulo da tocha, comprimento do fio (arame-eletrodo) entre o bico e o contato com a peça e a taxa de fluxo do gás (KARADENIZ, et al., 2005).

Fixando-se no processo convencional, existem basicamente três tipos de regulagens possíveis ao operador, sendo elas: tensão, corrente e velocidade de alimentação do arame. Sendo assim, a regulagem de um ou ambos parâmetros é o que definirá o comportamento do processo (SCOTTI, et al., 2008).

A tensão é um fator importante na determinação da largura do cordão de solda e no modo de transferência do metal arame-eletrodo até a peça. Um ajuste de tensão abaixo da recomendada causa defeitos como: a falta de fusão e porosidade no cordão de solda. Tensões muito elevadas causam mordeduras e porosidade na solda. (TEIXEIRA, 2011; SCOTTI, et al, 2008).

No processo MIG/MAG a corrente de soldagem (amperagem de saída) está diretamente ligada com a velocidade de alimentação do arame, sendo assim, quando a corrente é alterada, a velocidade de alimentação do arame se altera no mesmo sentido. A corrente exerce também influência na penetração do cordão de solda, ou seja, da distância da superfície do material soldado até onde a linha de fusão se estende, quanto maior a corrente, maior é a penetração da solda (FORTE, 2005).

A velocidade de soldagem tem grande influência na deposição de material fundido (arame-eletrodo) assim como na geometria do cordão de solda. Dessa forma, uma velocidade excessiva pode causar um alongamento no cordão de solda e a poça fundida pode se solidificar, causando alguns vazios denominados “crateras” (FBTS, 2017; TEIXEIRA, 2011).

2.6 ARAME AWS A5.18 ER70S-6

A especificação AWS A5.18 descreve uma classificação de eletrodo sólido ou composto, amplamente utilizado nos processos de soldagem GMAW (Gás Metal Arc Welding), GTAW (Gás Tungsten Arc Welding) e PAW (Plasma Arc Welding) para a soldagem de aço carbono (LINCOLN ELETRIC, 2020).

Para os critérios de classificação do arame, existe o padrão ERXXY-X, onde o termo “XX” diz respeito ao limite de ruptura em ksi, o termo “Y” indica se o eletrodo é sólido ou composto e o “X” indica a faixa de composição química (REZENTE, 2018).

Com isso, a Tabela 5 demonstra as propriedades mecânicas do eletrodo citado acima.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas dos arames de classe AWS A5.18

Classificação AWS	Gás de proteção (a)	Ensaio de Tração		A (%)	Ensaio de Impacto
		LR ksi – Mpa	LE ksi – Mpa		
ER70S-3	SG-C	70-480	58-400	22	27J a -20 °C
ER70S-6	SG-C	70-480	58-400	22	27J a -30 °C
ER70S-G	SG-C	70-480	58-400	22	(c)
ER70C-6(X)	(b)	70-480	58-400	22	27J a -30 °C
ER70C-G(X)	(b)	70-480	58-400	22	©

Fonte: Lincoln Electric do Brasil (2020).

Segunda a LINCOLN ELETRIC (2020), tem-se as seguintes caracterizações para uso do gás:

- a) Na utilização do processo GTAW deve-se utilizar SG-A;
- b) O gás de proteção é definido pelo fornecedor/cliente, portanto, (X) pode ser definido como “C”, quando se utiliza SG-C ou M quando se utiliza mistura de outros gases;
- c) O requerimento de ensaio de impacto é definido pelo cliente/fornecedor.

De mesmo modo que as propriedades mecânicas dos principais eletrodos foram demonstradas, na Tabela 6 encontra-se a composição química para o arame de solda AWS A5.18 ER70S-6.

Tabela 6 - Composição química dos arames de classe AWS A5.18

Classificação	Análise Química (%)										
	AWS	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
ER70S-3	0,06-0,015	0,9-1,4	0,45-0,75	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5	
ER70S-6	0,06-0,015	1,4-1,85	0,8-0,15	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5	
ER70S-G	Não especificado - Acordo entre fornecedor e Cliente										
ER70C-6(X)	0,12	1,75	0,9	0,03	0,03	0,5	0,2	0,3	0,08	0,5	
ER70C-G(X)	Não especificado - Acordo entre fornecedor e Cliente										

Fonte: Adaptado Lincoln Eletric do Brasil (2020).

2.7 ZONA TERMICAMENTE AFETADA (ZTA)

Durante a realização de uma soldagem, o material da solda, e as regiões adjacentes do metal base são submetidas a ciclos térmicos. Com isso, podem-se esperar alterações na microestrutura do material de origem, com variações ao longo de suas seções transversais. Em uma solda por fusão, podemos distinguir três regiões básicas: zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e metal base (MB). A Figura 5 ilustra melhor esses conceitos (MODENESI, et al., 2012).

Figura 5 - Definições de uma junta soldada

Fonte: Adaptado de SOUZA (2016)

A zona fundida (ZF) é constituída pelo metal da solda, que nada mais é do que a soma da parte fundida do metal base com o metal de adição. Já a zona termicamente afetada (ZTA) é a região do metal base que tem sua estrutura e propriedades alteradas pelo calor da solda. A região do metal base (MB) é a região mais afastada do cordão de solda, portanto é a parte que não sofreu alterações pelo processo de soldagem (MODENESI, et al., 2012).

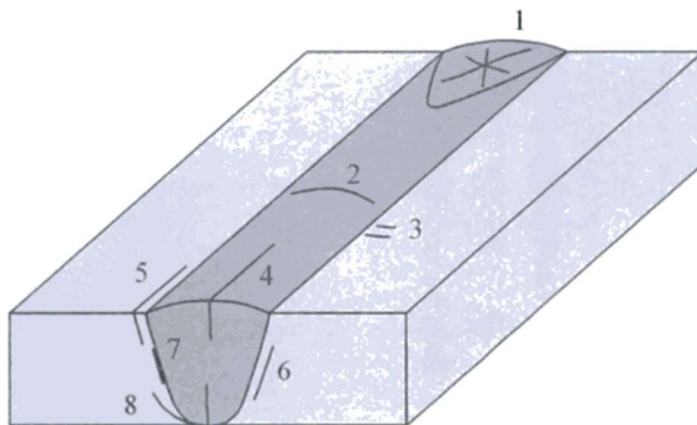
Posteriormente a zona de fusão, o metal líquido começa a se solidificar dando origem ao cordão de solda. Este processo de solidificação é o que molda as características macro e microscópicas do cordão de solda. Após a solidificação e o resfriamento do cordão até a temperatura ambiente, a zona fundida pode ainda sofrer alterações, estas alterações podem causar um crescimento de grãos, formações de carbonetos e nitretos, dentre outras fases intermetálicas. Nos aços carbono de baixa liga, que é o foco desse trabalho, a poça de fusão normalmente se solidifica como ferrita delta, que logo se transforma em austenita (MARQUES, et al., 2009).

A zona termicamente afetada (ZTA) é a região da solda que não se fundiu durante o processo de soldagem. O calor gerado pela soldagem e posteriormente o seu resfriamento causam mudanças estruturais na área circundante a solda. Esta região pode se tornar um elo fraco na junta soldada que normalmente seria resistente. Sendo a causa dessa fragilidade a estrutura molecular da ZTA, que não é tão refinada, se torna mais fraca que o metal base ou o metal da solda (EEEP, 2020).

O principal problema na soldabilidade desses aços é a formação de trincas induzidas pelo hidrogênio, principalmente na zona termicamente afetada (ZTA), podendo ainda existir perda de tenacidade na ZTA ou na zona fundida. Estes efeitos são associados com a formação de estruturas de granulação grosseiras durante a soldagem, com elevado aporte térmico, ou na formação de martensita na soldagem com baixo aporte térmico (MODENESI, 2011).

As trincas são consideradas as descontinuidades mais agravantes na soldagem. Isto é, trincas são fortes concentradores de tensões, favorecendo o início de fratura frágil na estrutura soldada. As trincas podem ser externas, ou seja, na superfície da solda, ou internas, localizadas no interior da solda, ambas podem ser localizadas através de ensaios não destrutivos como, líquido penetrante, raio-X, ultrassom, dentre outros. Essas trincas podem ser localizadas tanto na ZTA e ZF, como no metal de base, podendo ser micro ou macroscópica (MARQUES, et al., 2009). A Figura 6 a seguir demonstra as localizações típicas de trincas em um cordão de solda.

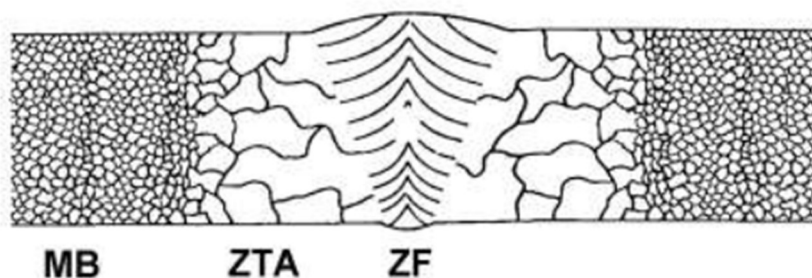
Figura 6 - Classificação das trincas de acordo com a localização. (1) Trinca por cratera. (2) Trinca transversal na ZF. (3) Trinca transversal na ZTA. (4) Trinca longitudinal na ZF. (5) Trinca na margem da solda. (6) Trinca sob o cordão. (7) Trinca na linha de fusão. (8) Trincas na raiz da solda.



Fonte: Adaptado de MARQUES (2009)

As características das ZTA dependem diretamente do tipo de material base e do procedimento e processo de soldagem utilizado, isto é, os ciclos térmicos. Dependendo do tipo de material que está sendo usado na soldagem os efeitos do ciclo térmico podem variar. Em aço carbono de baixa liga, a ZTA será mais complexa, tendo como principal caracterização o crescimento de grãos próximos a linha de fusão, como ilustra na Figura 7. (MODENESI, et al., 2012).

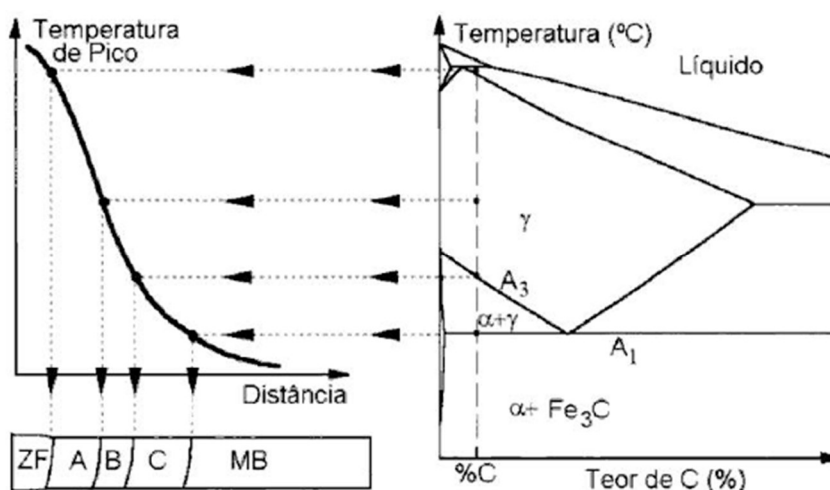
Figura 7 - Representação esquemática da região da solda em uma liga de aço.



Fonte: Adaptado de MODENESI (2012)

A ZTA será mais complexa em metais transformáveis, no caso dos aços carbono de baixa liga, estas apresentam regiões com certas características, demonstradas na Figura 8 a seguir.

Figura 8 - Estrutura da ZTA em aços de baixo carbono. A - Região de crescimento de grãos.
B - Região de refino de grãos. C - Região intercrítica



Fonte: Adaptado de MARQUES (2009)

Segundo Marques, Modenesi, Bracarense (2009) sendo a região A a mais próxima da solda, a qual foi submetida a temperatura a cerca de 1200°C, nessas condições, a estrutura austenítica sofre um grande crescimento de grãos. Com a granulação grosseira da austenita acaba dificultando a sua transformação durante o resfriamento, com isso aumenta sua temperabilidade, o que pode ser acentuado se o aço tiver um elevado teor de carbono, como o aço 1045.

A região B está próxima da temperatura habitualmente utilizada na normalização dos aços, (entre 900°C até 1200°C). Após o processo de soldagem, essa região normalmente é caracterizada por uma estrutura fina de perlita e ferrita.

Por estar mais distante da zona fundida, a região C compreende temperaturas que variam entre 727°C (temperatura eutetoide), que varia entre e linha A3 da Figura 8, nesta faixa de temperatura a austenitização é pequena, portanto, pouco alterada pelo aporte térmico.

O tamanho final dos grãos na região da ZTA vai depender diretamente da temperatura de pico e o tempo de permanência acima dessa temperatura. Assim, o tamanho do grão final

tenderá a ser maior próximo à linha de fusão e será afetado de acordo com os procedimentos de soldagem (MODENESI, et al., 2012).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

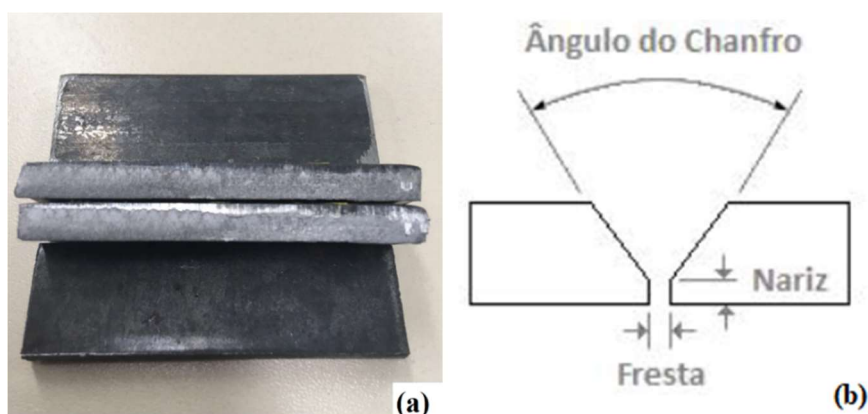
3.1 LOCAL DO EXPERIMENTO

O desenvolvimento experimental e as respectivas caracterizações foram realizadas no Campus de Guarapuava da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Os procedimentos de soldagem foram realizados no laboratório de máquinas de soldagem. Já os ensaios por líquidos penetrantes, microscopia óptica e ensaios de dureza foram realizados no laboratório de ensaios de materiais.

3.2 OBTENÇÃO DE MATERIAIS

Para realizar os ensaios de soldagem obteve-se o aço SAE 1020 pela empresa WW soluções, situada na cidade de Irati-PR. Já o aço SAE 1045 foi obtido pela empresa Fex - Ferro e Aços, situada na cidade de Ponta Grossa-PR. Ambas as empresas forneceram as chapas de aço com 5mm de espessura, 30mm de largura e 50mm de comprimento, todas as já divididas ao meio e com chanfro de 45°, mostrado na Figura 9, para a realização da soldagem.

Figura 9 - (a) chanfro feito nas chapas, (b) características do chanfro



Fonte: Autoria própria.

3.3 PROCESSO DE SOLDAGEM UTILIZADO

A soldagem foi realizada pelo processo MAG, e o equipamento utilizado foi a máquina de solda MIG/MAG, modelo SUMIG 255. O arame utilizado para realizar a solda foi o AWS A5.18, tipo ER70S-6.

Para realizar o processo de soldagem, alguns cuidados foram necessários com as variações de parâmetros de soldagem, de modo que fossem bem apresentadas as diferenciações causadas por esta. Deste modo, foi realizada a soldagem em três amostras, tanto para o aço SAE 1020 como para o aço SAE 1045, utilizando três parâmetros de soldagens da máquina de solda MAG. Os parâmetros estão representados na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7 - Parâmetros utilizados no processo de soldagem MAG

Amostra	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Velocidade de alimentação do arame de solda (m/s)	Vazão do gás de proteção (L/min)
1	95-105	3	25	5	10
2	105-115	4	25	5	10
3	115-125	5	25	5	10

Fonte: Autoria própria

Após a soldagem, as amostras foram isoladas para se separar as melhores por análise visual.

3.4 ANÁLISE E INSPEÇÃO DE SOLDA

Após o resfriamento em temperatura ambiente das amostras soldadas, uma escova de aço foi utilizada para remover a ferrugem e a oxidação presente no cordão, assim como respingos e impurezas indesejáveis. Para a análise e inspeção foram utilizados os ensaios não destrutivos de líquidos penetrantes e inspeção visual e, destrutivos de metalografia e dureza.

3.4.1 Ensaios não destrutivos de líquido penetrante

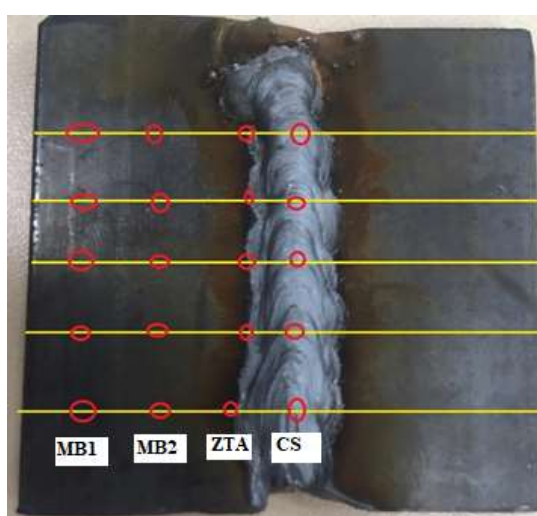
Para o ensaio não destrutivo por Líquidos Penetrantes (marca Spotcheck SKL-WP) primeiramente foi realizada a limpeza da superfície (área a ser analisada) das amostras, com água e sabão, posteriormente secadas para enfim, realizar-se a aplicação do líquido penetrante. Foi aguardado o tempo indicado pelo fornecedor de 15 minutos e, em seguida, realizou-se a remoção com água corrente, secagem e aplicação do revelador, o qual tem o objetivo de revelar as descontinuidades presentes na peça.

3.4.2 Ensaios destrutivos de dureza

Neste ensaio foi medida a dureza de cada amostra, obtidas na escala Rockwell B (HRB), através do equipamento Durômetro de Bancada para Dureza Rockwell Normal Digimess com edentador esférico de 1/16" de medida e carga de 100 kgf.

As medidas foram realizadas em cinco pontos diferentes seguindo uma linha horizontal das amostras demonstrados na Figura 10, após as aferições o maior valor e o menor valor foram excluídos, com os três valores restantes foi feito uma média para se obter um resultado mais homogêneo.

Figura 10 - Pontos das análises de dureza



Fonte: Autoria própria.

3.4.3 Ensaios Metalográficos

Para o ensaio metalográfico foi utilizada primeiramente uma cortadora metalográfica CM40/60 da marca Teclago, para realizar o corte das amostras e, posteriormente serem embutidas a quente através da Prensa Embutidora Metalográfica Manual EM30D (Ø 30mm), sendo utilizada como material embutidor a baquelite.

Na etapa seguinte foi realizado o lixamento manual, as lixas usadas foram, nessa ordem de granulometria: 150, 220, 320, 360, 400 e por último uma lixa de 600. Para o lixamento automático foi utilizado uma Politriz automática com lixa 1200 da marca Teclago.

O polimento foi efetuado através da Politriz Lixadeira Metalográfica - PL02E, o qual foi utilizado um pano de polimento (flanela) com pasta de alumina, começando o polimento com alumina de 3 microns dando continuidade até 0,5 microns.

Na sequência foi realizado o ataque químico feito através do reagente Nital a 5% (95 ml de álcool etílico 5 ml de ácido nítrico concentrado) com o tempo de ataque de 10 segundos. Por fim, para a limpeza da peça, foram utilizados água e álcool etílico.

Após esse processo de preparação foram realizadas capturas de imagem no microscópio óptico da marca Olympus BX51 para realização da análise da micrografia, na qual foram utilizadas lentes de ampliação de 10x, 20x, 50x e 100x. Neste ponto foram realizadas a análise macroscópica do cordão de solda, análise da penetração e a análise da zona termicamente afetada entre o material base e a solda, estas foram feitas no microscópio óptico.

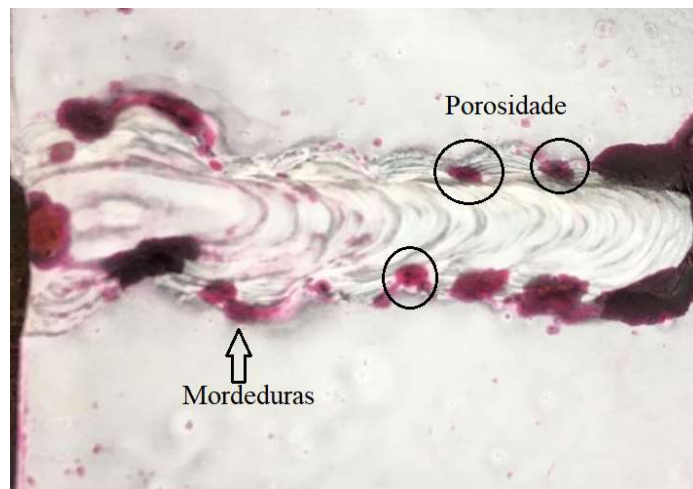
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIOS POR LÍQUIDOS PENETRANTES

Os ensaios por líquidos penetrantes das amostras 1, 2 e 3 dos aços SAE 1020 mostram algumas falhas como mordeduras, poros e respingos que poderão ser vistas nas figuras 11, 12 e 13 a seguir.

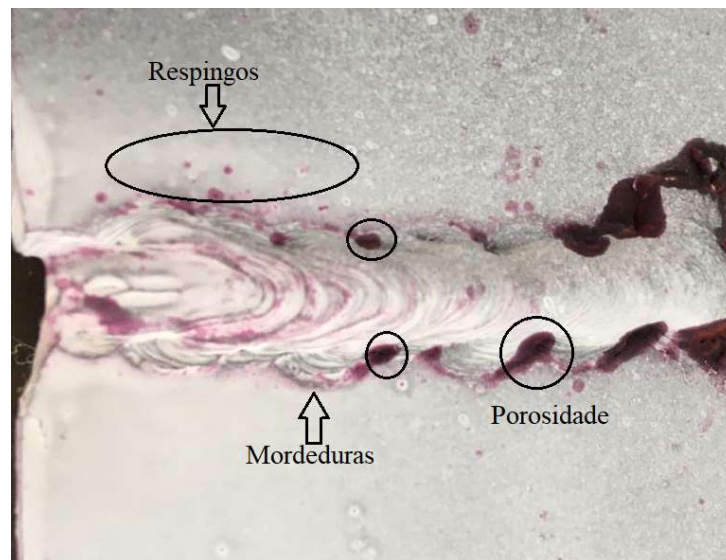
As mordeduras são encontradas as margens da solda, são decorrentes de descontinuidades superficiais, ocorre quando muito metal base é absorvido pela solda, nota-se que elas estão presentes nas duas primeiras amostras. Já a porosidade (poros) e respingos estão presentes nas três amostras.

Figura 11 - Amostra 1, aço SAE 1020



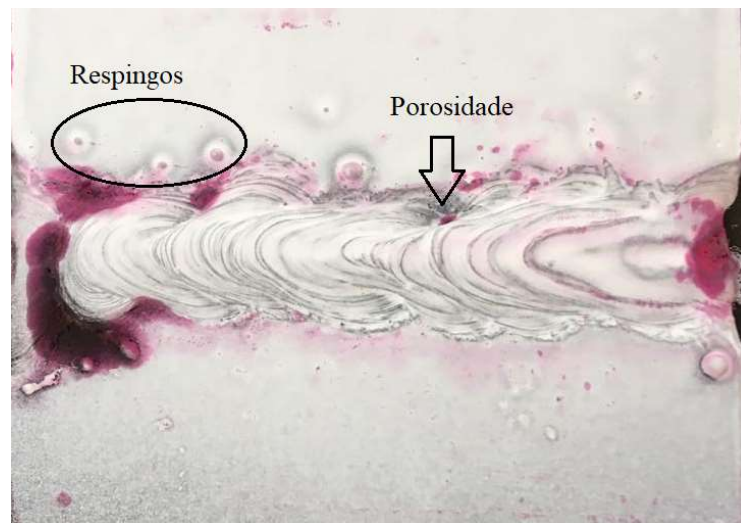
Fonte: Autoria própria.

Figura 12 - Amostra 2, aço SAE 1020



Fonte: Autoria própria.

Figura 13 - Amostra 3, Aço SAE 1020

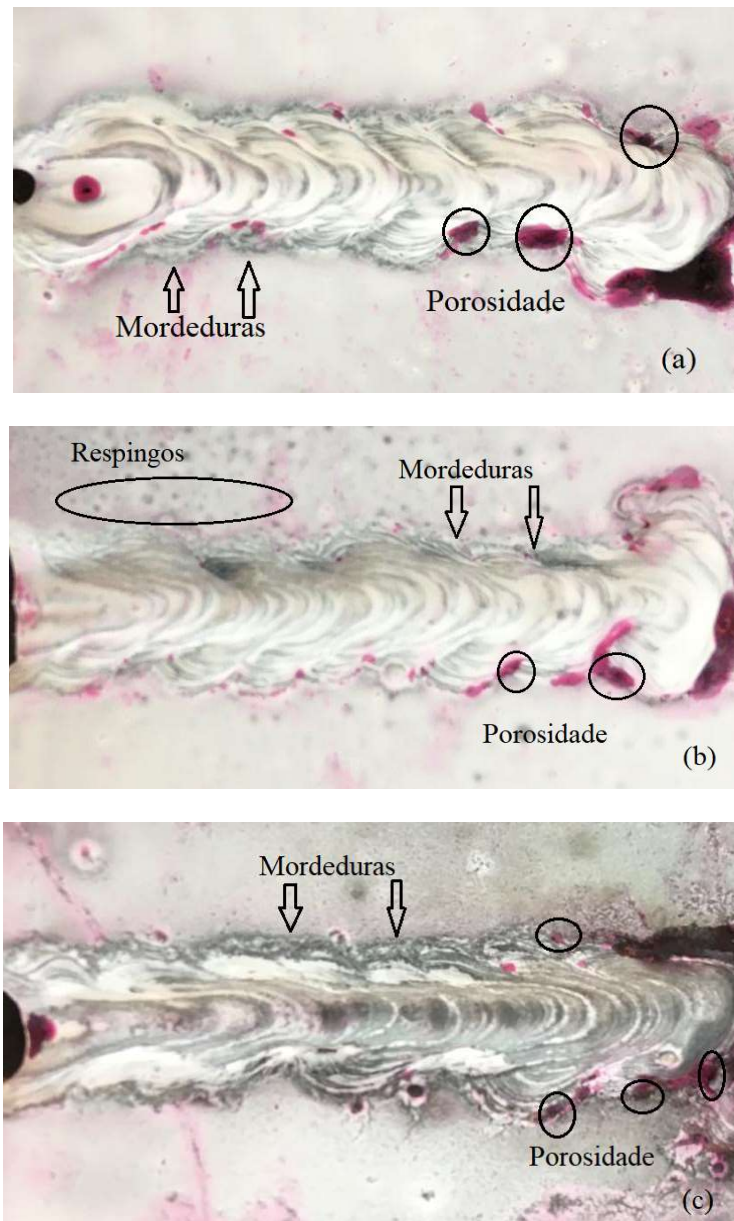


Fonte: Autoria própria.

A porosidade vai diminuindo quando a tensão aumenta, o que indica que a tensão é proporcional ao aumento ou diminuição dos poros e respingos. Isso se dá por conta da contaminação do metal ou uso inadequado da tensão e do gás utilizados na soldagem (BIGLIA, 2016).

Nas amostras do aço SAE 1045 demonstradas na Figura 14, foram detectados mordeduras, respingos e porosidade assim como do aço SAE 1020.

Figura 14 - Amostra 1 (a), amostra 2 (b) e amostra 3 (c) do aço SAE 1045 após a aplicação do revelador



Fonte: Autoria própria.

Assim como no aço SAE 1020 as mordeduras encontradas são decorrentes do excesso do metal da zona fundida na raiz da solda, que são fatores que posteriormente podem levar a trinca da solda.

A porosidade está ligada com o efeito direto do mau uso do gás, quando a tensão utilizada está inadequada para o fluxo de gás, o que pode ser notado na amostra 2 do aço SAE

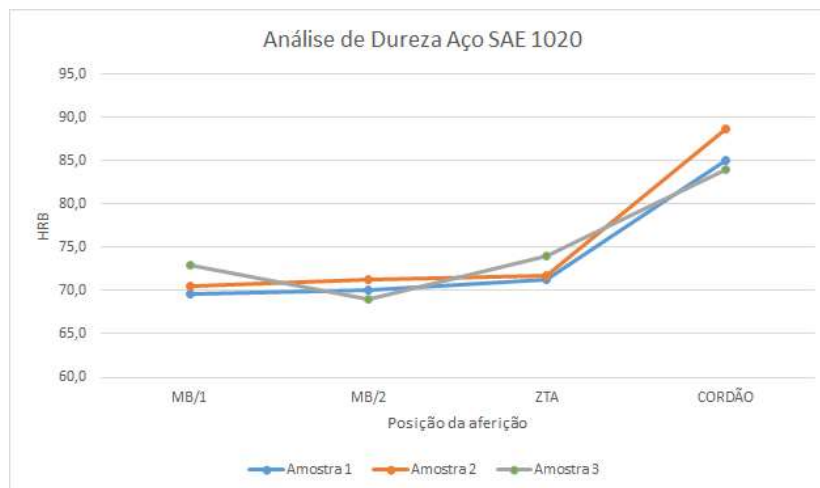
1045 onde há poucas descontinuidades presentes, indicando que a tensão está bem alinhada com a vazão de gás utilizado.

4.2 ENSAIOS DE DUREZA

Os ensaios de dureza nos aços 1020 e 1045 utilizando a escala Rockwell B são demonstrados nos Gráficos 1 e 2.

Para o aço SAE 1020 obtivemos o maior valor na ZTA de 74 HRB na amostra 2 e menor valor na amostra 1 de 73,3HRB, ambos os valores bem próximos. Contudo, a dureza mais elevada se encontra no cordão de solda (CS).

Gráfico 1 - Perfil de dureza média das amostras 1, 2 e 3 do aço SAE 1020



Fonte: Autoria própria

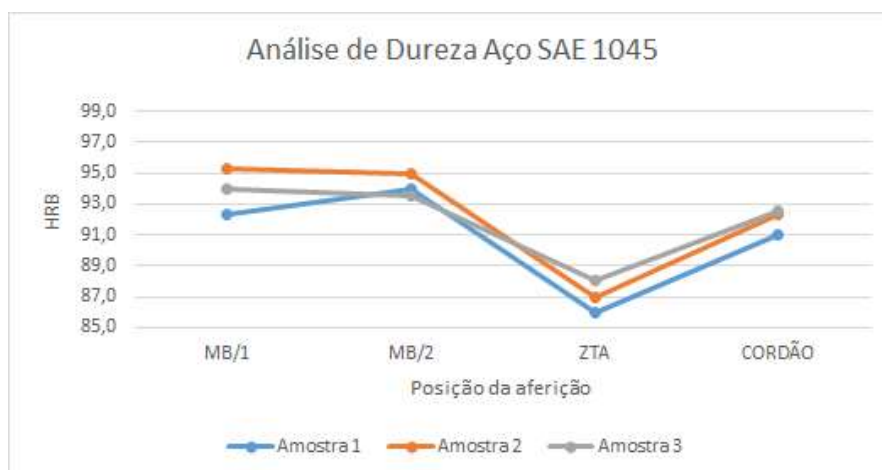
Em comparação com o metal base (MB/1 e MB/2) a ZTA teve poucas alterações. Já o cordão de solda apresentou uma dureza elevada, devido a sua microestrutura típica que consiste em uma estrutura de solidificação acircular (tipo agulhas) (BIGLIA, 2016).

Os valores médios encontrados nas ZTA de cada amostra foram:

- Amostra 1: (95-105 A – 71,3 HRB)
- Amostra 2: (105-115 A – 71,7 HRB)
- Amostra 3: (115-125 A – 74,0 HRB)

Portanto, é possível afirmar que o valor da dureza é inversamente proporcional a corrente aplicada (BIGLIA, 2016).

Gráfico 2 - Perfil de dureza média das amostras 1, 2 e 3 do aço SAE 1045



Fonte: Autoria própria

Já o aço SAE 1045 apresentou uma redução na dureza nas ZTA, onde na amostra 1 obteve-se o menor valor de 86 HB, contudo, é possível se observar no gráfico que em ambas as amostras houve uma redução na dureza nas ZTA. Isso se dá pelo fato de que o aporte térmico no qual o aço foi submetido durante o processo de soldagem causou, devido ao aquecimento e resfriamento, um ajuste nos tamanhos dos grãos causando assim uma diminuição da dureza.

De modo geral, essa região é caracterizada por uma estrutura grosseira, com a ferrita apresentando uma morfologia em placas, essas condições são notadas por conta do resfriamento ser lento.

Esta região (ZTA), também tende a ser mais problemática em aços com alto teor de carbono, podendo causar uma diminuição na tenacidade e com isso tornar-se um local ideal para formação de trincas (MODENESI, et al., 2009).

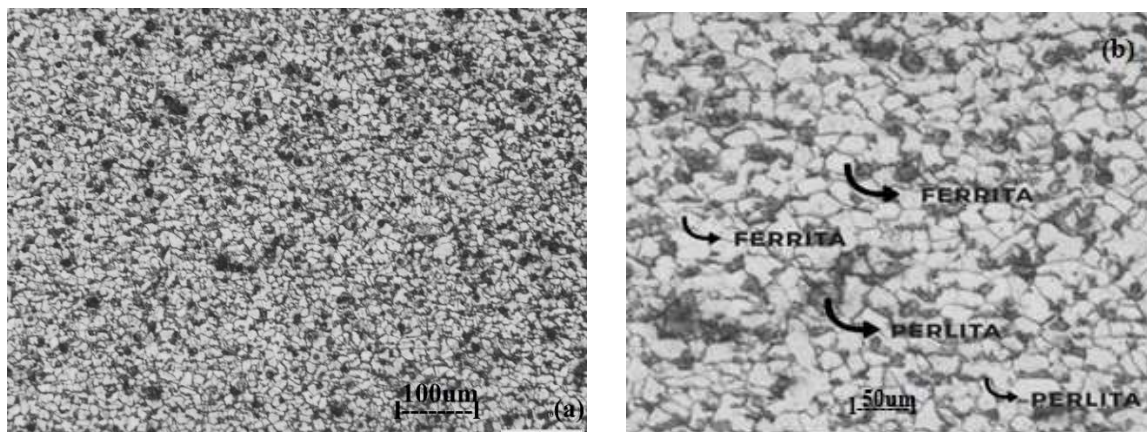
Os valores médios encontrados nas ZTA de cada amostra foram:

- Amostra 1: (95-105 A – 86,0 HRB)
- Amostra 2: (105-115 A – 87,0 HRB)
- Amostra 3: (115 - 125 A – 88,0 HRB)

4.3 ENSAIOS METALGRÁFICOS

A Figura 15 (a) e (b) a seguir apresenta a micrografia do metal base do aço SAE 1020 ampliadas (20x e 50x).

Figura 15 – Micrografia do metal base ampliadas (a) 20x e (b) 50x



Fonte: Autoria própria.

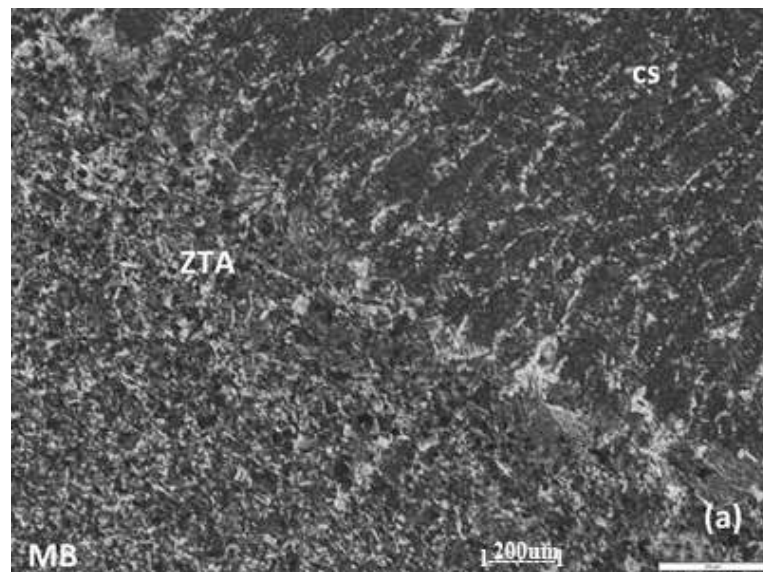
Através da micrografia do aço SAE 1020 é possível observar as fases ferrita e perlita, assim como os contornos de grãos.

Por se tratar de um aço com baixo teor de carbono (0,18-0,23%), sua microestrutura é constituída em sua maior parte de ferrita pré-eutetóide, pelo fato de ter sido formada antes da temperatura eutetóide, representada na Figura 2. Essa composição de fase torna o aço com baixa resistência mecânica e tenacidade alinhada a alta ductilidade (SILVA; MEI, 2010; JUNIOR, 2017).

Quando um aço é aquecido devido ao processo de soldagem e ultrapassa a linha A1 (Figura 2) até seu ponto crítico, temperatura próxima ou superior a 1157°C, e logo em seguida e resfriado lentamente e mantida a temperaturas inferiores a 727°C, a estrutura austenítica não será mais estável e ocorrerá a reação eutetóide. Esta reação, em aços, produz uma microestrutura característica chamada de “perlita” que não é apenas uma fase, e sim a mistura de duas fases, ferrita e cementita, que ocorre na forma de lamelas paralelas (PANDOLFO, 2009; SILVA; MEI, 2010).

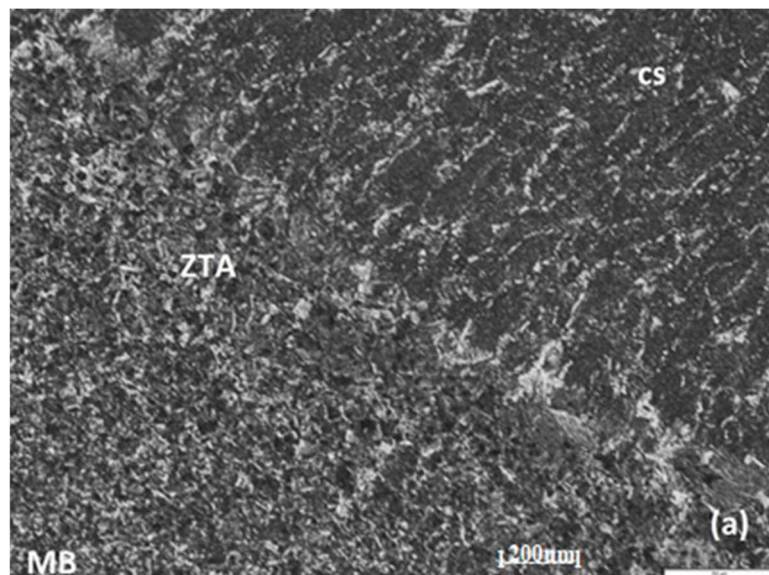
As Figuras 16, 17 e 18 mostra o resultado da microestrutura formada pelo cordão de solda (CS) e na ZTA nas amostras 1, 2 e 3, nessa ordem, utilizando uma ampliação de 10x.

Figura 16 - Micrografia da amostra 1, aço SAE 1020



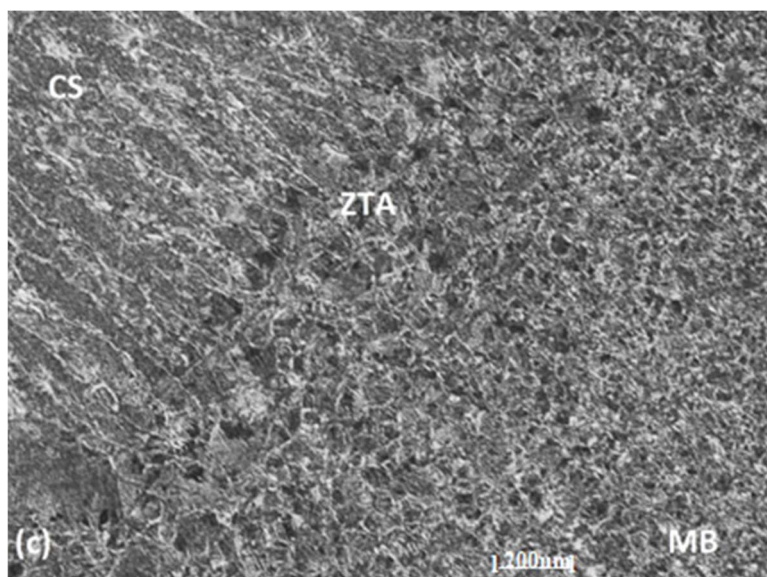
Fonte: Autoria própria.

Figura 17 - Micrografia da amostra 2, aço SAE 1020



Fonte: Autoria própria.

Figura 18 – Micrografia da amostra 3, aço SAE 1020



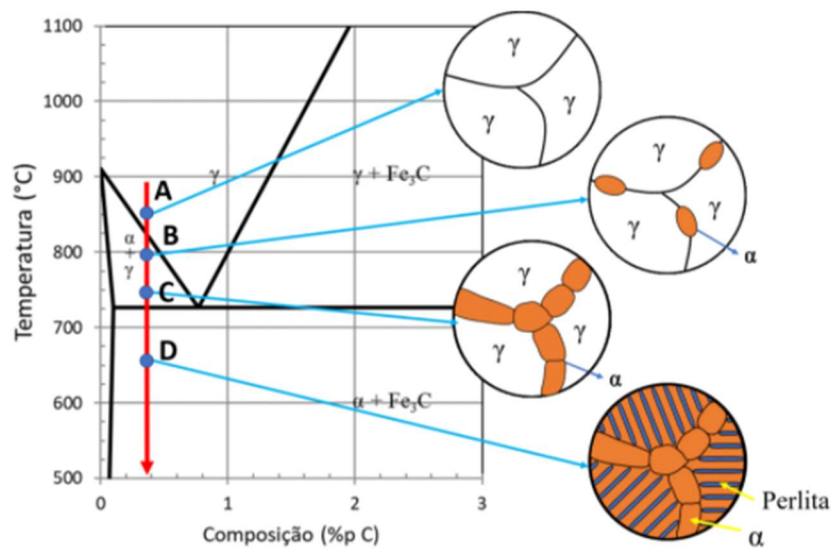
Fonte: Autoria própria.

É possível notar a diferença microestrutural tanto da ZTA como no cordão de solda, pois com o aumento da corrente e da tensão, gera um aumento significativo da temperatura de pico.

O tamanho final dos grãos na região da ZTA vai depender diretamente da temperatura de pico, tempo de permanência acima dessa temperatura e da velocidade de resfriamento. Assim, o tamanho do grão final tenderá a ser maior próximo à linha de fusão e será afetado de acordo com os procedimentos de soldagem (MODENESI, et al., 2012).

O resfriamento é um fator que teve uma grande influência na estrutura final do aço, por ter sido de forma lenta e constante. Tem-se as seguintes considerações: no momento da soldagem as temperaturas de pico chegam próximas ou superiores a 1157°C, por ser um aço com baixa concentração de carbono no momento da temperatura de pico o material se encontrava na zona austenítica (ponto A na Figura 19), ao submetê-lo ao resfriamento lento até próximo de 750°C (ponto B na Figura 19) a ferrita pré-eutetóide nucleou nos contornos de grão da austenita. Com o contínuo resfriamento do ponto B ao ponto C a ferrita pré-eutetóide continuou a crescer. Abaixo de 723°C com a permanência das condições de equilíbrio, a estrutura autenítica remanescente foi convertida em perlita pela reação eutetóide (astenita → ferrita + cementita) (ARAI, BAKER, BATES, 1992; NETO, 2010).

Figura 19 - Transformação do aço com baixo teor de carbono resfriado lentamente

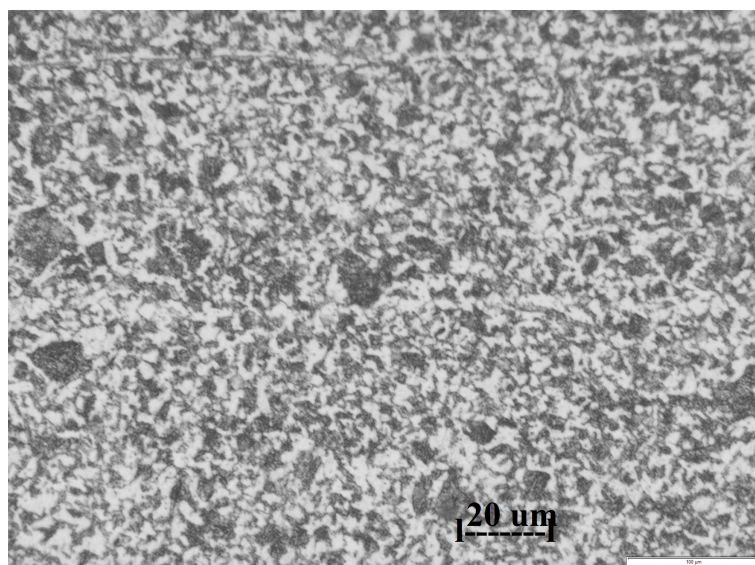


Fonte: CALLISTER (2008).

Dessa forma o material que teve sua microestrutura mais afetada foi a amostra 3 onde, por ter sido submetida ao maior ciclo de soldagem em termos de temperatura, foi possível notar pela Figura 18 uma granulação mais grosseira logo após a linha de fusão.

A Figura 20 representa a micrografia do metal base do aço SAE 1045 ampliada 50x e 100x, onde é possível notar sua microestrutura nas partes claras que correspondem a ferrita e as escuras, que correspondem a perlita.

Figura 20 - Micrografia do metal base ampliada 100x

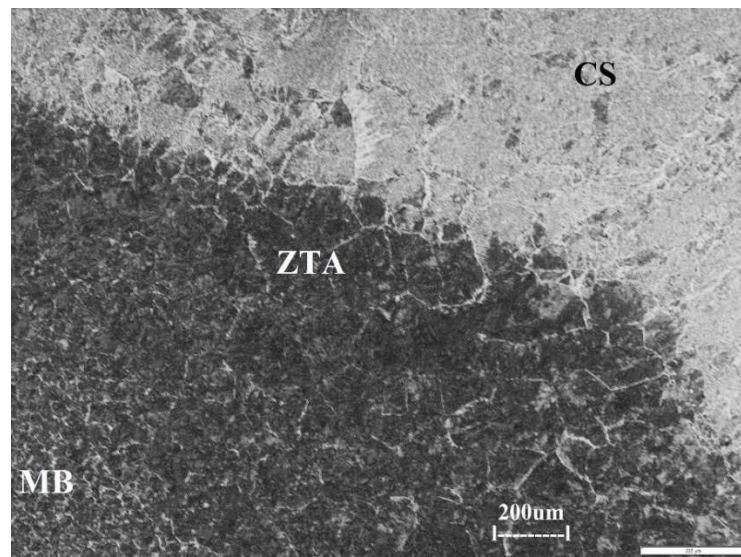


Fonte: Autoria própria.

Através da Figura 20, é possível verificar uma quantidade significativa de perlita no aço, mistura eutetóide, cuja estrutura é formada por lâminas alternadas de ferrita e cementita. A perlita é mais dura e resistente que a ferrita, porém mais dúctil que a cementita. Por conter essas características macroestruturais, o aço 1045 possui resistência mecânica superior ao aço 1020 (LEITE, et al., 2017).

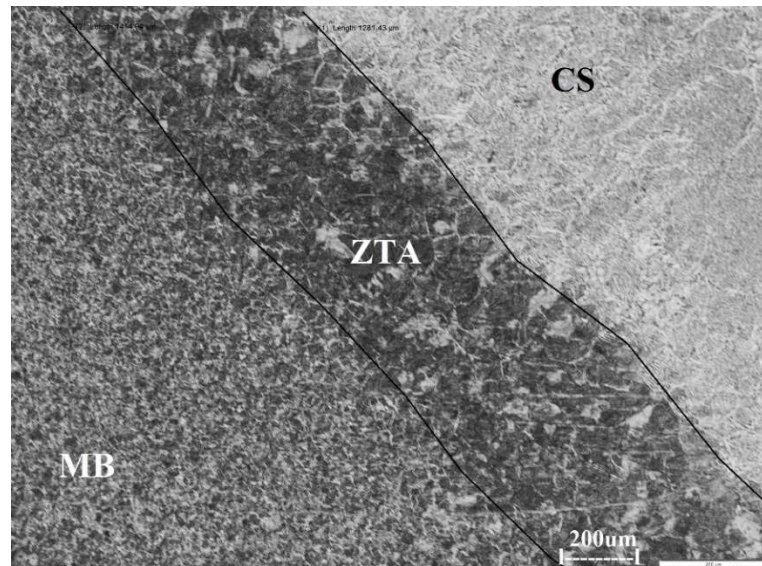
Para melhor identificar os efeitos dos parâmetros de soldagem aplicado no aço SAE 1045, segue as Figuras 21, 22 e 23 que demonstram as microestruturas formadas pelo cordão de solda (CS), ZTA e metal base das três amostras, todas ampliadas 10x.

Figura 21 - Micrografia da amostra 1, aço SAE 1045



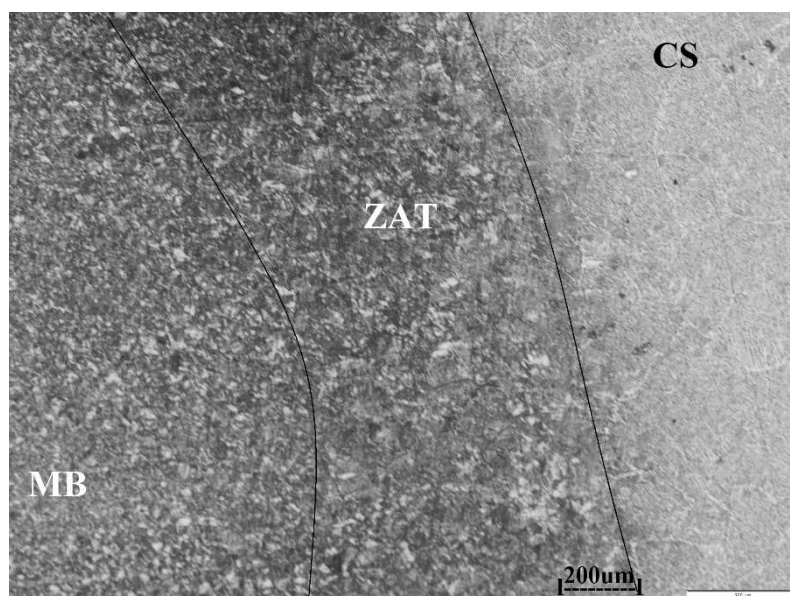
Fonte: Autoria própria

Figura 22 - Micrografia da amostra 2, aço SAE 1045



Fonte: Autoria própria

Figura 23 – Micrografia da amostra 3, aço SAE 1045



Fonte: Autoria própria.

Através da Figura 22 é possível ver a diferença microestrutural do material base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e cordão de solda (CS). A estrutura do cordão de solda é muito similar aos do aço SAE 1020, pois os mesmos parâmetros de soldagem foram utilizados.

O efeito mais aparente dentre as três amostras é observado na ZTA, onde é possível se perceber a diferença do tamanho de grãos, principalmente na amostra 2, onde o efeito do ciclo térmico de soldagem é bem visível.

Como o material foi submetido ao resfriamento lento isso gerou o que podemos identificar como um tratamento térmico nessa região o que causou uma alteração nos tamanhos dos grãos, conseqüentemente, alterações dos valores da dureza, comprovando assim os dados obtidos pelos ensaios de dureza.

5. CONCLUSÃO

Pelos resultados das análises por líquidos penetrantes foi possível constatar que o aumento da corrente acarretou numa melhora na forma e geometria do aço SAE 1020, assim como numa diminuição nas descontinuidades, tais como respingos, mordeduras e porosidades, sendo a amostra 3 a que se diferenciou dentre as outras duas amostras, obtendo o melhor resultado.

Para o aço SAE 1045 constatou-se que com o aumento da corrente houve também uma melhora da forma e geometria da solda, porém, a amostra 3 mostrou que o parâmetro aplicado foi excedente, causando maior descontinuidade como mordeduras, principal fator que ocasiona trincas e/ou rompimento da solda, sendo assim o melhor parâmetro aplicado foi o da amostra 2.

Através da análise de dureza o aço SAE 1020 mostrou-se menos afetado na sua região mais crítica, tendo um aumento na dureza quase imperceptível na região da ZTA ao decorrer do aumento da corrente. Já no aço SAE 1045 a dureza foi consideravelmente reduzida na sua região mais crítica, tendo pouca diferença de dureza na ZTA dentre as três amostras.

Com a análise microestrutural feita através da metalografia foi possível constatar que para as três amostras do aço SAE 1020 a faixa da ZTA era pequena, provocando assim pouca alteração no material base e na microestrutura próxima a linha de fusão. Já o aço SAE 1045 teve alterações bem visíveis na sua zona crítica.

Portanto, com as três análises pode-se concluir que para o aço SAE 1020 o melhor parâmetro analisado foi para amostra 3, já para o aço SAE 1045 constatou-se que o melhor parâmetro utilizado foi na amostra 2.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS:

- ✓ Após a soldagem realizar o resfriamento das amostras em água e em óleo;
- ✓ Comparar as diferenças microestruturais causadas nas amostras devido ao resfriamento utilizado;
- ✓ Realizar ensaios de dureza para verificar a diferença causada pelos diferentes tipos de resfriamento.

REFERÊNCIAS

- ARAI, T.; BAKER, G. M.; BATES, C. E. **ASM Handbook: Heat treating**. 3ª Ed. ASM, v. IV, 1992.
- AWS. **Welding Handbook: Materials and Applications - Part 1**. 8. ed. Miami: AWS, 1991. v. 3
- AZEVEDO, Alessandra Gois Luciano de. **Aplicação da Técnica da Dupla Camada na Soldagem do Aço ABNT 1045**. Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais. UFC, 2002.
- AZEVEDO, Sarah Cristina. **Avaliação de Aspectos operacionais do processo de soldagem TIG-MIG/MAG**. Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFG, 2019. Disponível em: <<http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/9527>>. Acesso em: 31/03/2020.
- CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro. LTC, 2008.
- CALLISTER JR, W. D. RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais : uma introdução** . 9. ed. - [Reimpr.]. Rio de Janeiro. LTC. 2018.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Fundição, 2008.
- COSTA, Gabriella Cristina da Silva. **Avaliação de Potencialidade do Processo de Soldagem TIG-MIG/MAG Com Variação de Polaridade no Eletrodo MIG/MAG**. Pós-Graduação, UFO, Catalão, 2019.
- EEEP - Escola Estadual de Educação Profissional. **Processo de Soldagem**. Curso Técnico em Mecânica. Disponível em: <https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2012/06/mecanica_processos_de_soldagem.pdf>. Acesso em: 10/04/2020.
- FBTS – Fundação Brasileira de Tecnologia e Soldagem. **PROCESSOS DE SOLDAGEM MIG/MAG**, Disponível em: <http://www.fbts.org.br/quantum/cursos/000071/downloads/M1_D4_T4_MIG%20MAG.pdf> . Acesso em: 30/03/2020.
- FORTES, C. **“Soldagem MIG-MAG”**. p. 5-7. Capítulo I. ESAB. Janeiro, 2005.
- GERDAU. **Manual de Aços**. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_aços_gerdau.pdf>. Acesso em: 6/04/2020.
- SILVA JUNIOR, Gilson. **Estudo da influência do processo ECAP (Equal Channel Angular Pressing) nas propriedades mecânicas e características microestruturais do aço SAE 1020**. p. 146, 2017.

KARADENIZ, Erdal; OZSARAC, Ugur; YILDIZ, Ceyhan. **The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes**. 2005. Disponível em: <<https://booksc.xyz/ireader/8729842>>. Acesso em: 1/04/2020.

LEITE, Matheus Corrêa; SANTOS, Matheus Rodrigues; ZAQUEU, Renan Aragão. **ENSAIO DE TRAÇÃO MECÂNICA E ANÁLISE METALOGRÁFICA DO AÇO SAE 1045**. v. 02, p. 83–93, 2017.

LINCON ELETRIC. **CONSUMÍVEIS DE SOLDA**. Disponível em: <<https://inspecaosoldagem.files.wordpress.com/2011/08/apostila-consumc3adveis-de-soldagem.pdf>>. Acesso em: 21/05/2020.

LUZ, Gelson. **Aço Carbono SAE 1020**. Gelson Luz Blog Materiais. Disponível em: <<https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1020-propriedades-mecanicas.html>>. Acesso em: 1/05/2020.

LUZ, Gelson. **Aço Carbono SAE 1045**. Gelson Luz Blog Materiais. Disponível em: <<https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1045-propriedades-mecanicas.html>>. Acesso em: 1 maio 2020.

MARQUES, Paulo V; MODENESI, Paulo J; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Ed. da UFMG, 2014.

MARQUES, Paulo V; MODENESI, Paulo J; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. [s.l.]: UFMG, 2009.

MODENESI, Paulo J. **Solubilidade de Algumas Ligas Metálicas**. p. 26, 2011. Disponível em: <http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/EME733/Arquivos%20da%20disciplina/Soldabilidade%20de%20Algumas%20Ligas%20Met_licas%20Modenesi.pdf>. Acesso em: 16/04/ 2020.

MODENESI, Paulo J; MARQUES, Paulo V; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte, 2012.

NETO, J. R. D. B. **Influência da taxa de Resfriamento na Microestrutura e nas Propriedades Mecânicas de Barras de Aço**. UFC, 2010.

PANDOLFO, Diogo. **Estudo da Tenacidade ao impacto de um aço SAE 1020 Submetido a Tratamentos Térmicos**. Monografia, PUC-RS, Rio Grande do Sul, 2009. Disponível em: <<http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/graduacao/article/view/6045/4352>>. Acesso em: 11/04/2020.

RAZENTE, João Vítor Baroni. **Avaliação do cordão de solda no processo de soldagem MIG utilizando arame AWS A5.18 ER70S-6 em aço SAE 4140**, 2018.

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

SILVA, André Luiz V. da Costa; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2010.

SOUZA, Clarissa Ferreira Martins de. **Análise Numérica e Experimental de Tensões Residuais em Juntas Soldadas de Aço de Baixo Carbono**. Tese de Mestrado em Engenharia Química e de Materiais, PUC-RJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2016. Disponível em: <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=29707@1>. Acesso em: 27/03/2020.

TEIXEIRA, Gustavo Simões. **Análise da influência dos Parâmetros de Soldagem sobre a geometria do Cordão de Solda depositado pelo processo de Soldagem TIG-MAG em Tandem**. 2011.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio D; MELLO, Fábio D. H. **Soldagem Processos e Metalurgia**. São Paulo. Editora Edgard Blucher Ltda, 1992.