

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATEIRAIIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Vitor Canesso Gonçalves

Avaliação da aplicação de pré-aquecimento e multipasses na
junta soldada de um aço SAE 1070

Belo Horizonte,

01 de dezembro de 2017

Vitor Canesso Gonçalves

Avaliação da aplicação de pré-aquecimento e multipasses na junta soldada de um aço SAE 1070

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Belo Horizonte,

01 de dezembro de 2017.

Vitor Canesso Gonçalves

Avaliação da aplicação de pré-aquecimento e multipasses na junta soldada de um aço SAE 1070

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 01/12/2017

Banca Examinadora

Orientador Prof. Ivan J. de Santana

Coorientador Prof. Aderci de Freitas Filho

Prof. Carlos Eduardo dos Santos

Prof. Victor Souza Esteves Lima

AGRADECIMENTOS

Sou grato a todos aqueles envolvidos em meu trabalho, seja de forma direta ou indireta. Fui ensinado a manusear e operar máquinas pelos técnicos do CEFET – MG e por meu coorientador Aderci de Freitas Filho. Também gostaria de reconhecer e valorizar a prontidão e disposição de ajudar do professor Carlos Eduardo dos Santos. Aprendi muito sobre procedimentos e técnicas de soldagem com o professor Ivan J. de Santana, o qual também foi responsável por conversas e reflexões pertinentes quanto à minha carreira e vida pessoal. À professora Elaine Carballo, a qual cedeu o material de análise. Agradeço aos meus pais, dado todo o suporte e base necessários para que eu pudesse focar apenas em me especializar e melhorar como eterno aprendiz. Por último, agradeço à Paula, pessoa responsável por um incentivo e suporte que vão além do imaginário, despertando o melhor de mim e me fazendo enxergar que não existem barreiras quando buscamos o que verdadeiramente desejamos.

RESUMO

O processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) se destaca dentre os demais por possibilitar ampla utilização nas indústrias de manufatura e reparo, dado a sua versatilidade e produtividade. A possibilidade de mecanizar o processo possibilita um controle mais efetivo do ciclo térmico e das alterações microestruturais observadas na junta soldada. No entanto, a soldagem de aços com alto teor de carbono ainda apresenta desafios a serem superados. O aço SAE 1070 é definido como aço de alto carbono e por consequente temperável. Sendo assim, este possibilita durante o processo de soldagem o aparecimento de fases metaestáveis e ou precipitados de elevada dureza na junta soldada, sobretudo na zona termicamente afetada, culminando, por consequência em sítios favorecedores da propagação de trincas. Esse aço é amplamente utilizado em componentes que demandam resistência ao desgaste abrasivo, como por exemplo, trilhos ferroviários. Neste trabalho, foi investigada a influência de diferentes procedimentos mecanizados de soldagem em corpos de prova de aço SAE 1070, como aplicação de pré-aquecimento, a utilização de multipasses e o uso de dispositivo para simular o resfriamento de componentes de médio porte. Após procedimentos de soldagem, as propriedades mecânicas e a macroestrutura da junta soldada foram avaliadas por meio de ensaios de microdureza e análises metalográficas. Os resultados demonstraram que a soldagem multipasses apresentou menor variação de dureza nas zonas de transição e menor ZTA em comparação ao corpo de prova soldado por passe único e sem pré-aquecimento. O pré-aquecimento de 300°C fez com que o corpo de prova apresentasse maior ZTA, porém com a menor variação de dureza entre os demais.

ABSTRACT

The GMAW welding process is highlighted amongst the others as it allows a wide use in the manufacture and recovery industries, as long as it is versatile and has a good rate of productivity. The possibility of mechanizing the process provides an effective control of the thermal cycle and furthermore, the microstructural changes observed on the welded joint. However, welding high carbon steels still represents countless challenges to be overcome. The SAE 1070 steel is defined as high carbon steel and consequently, quenchable. Hence, it allows the formation of metastable phases or high hardness precipitates on the welding joint during the welding process, especially on the Heated Affected Zone (HAZ), which in consequence may be a favorable site of nucleation and growth of cracks. This steel is widely used to build elements that require high abrasive resistance, such as rails. This work investigates the influence of different mechanized welding procedures on SAE 1070 samples: with and without pre-heating, the use of multilayer technique and the use of a fixation device that simulates similar cooling rates found in medium sized components. After the welding process, the mechanical properties and microstructure characteristics were assessed via micro hardness and metallographic tests. The results allowed comparing the influence caused by the pre heating process, the use of the multilayer technique, the effects caused by differences in the heat input, as well as accessing the mechanical properties and the microstructure formed on the welded joint.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Soldagem por Deformação	5
Figura 2 - Soldagem por Fusão	5
Figura 3 - Seção transversal de uma junta	7
Figura 4 - Distribuição esquemática das regiões de queda de tensão no arco elétrico.....	8
Figura 5 - Representação do jato de plasma	10
Figura 6 - Valores Típicos de Eficiência do Arco	11
Figura 7 - Ciclo Térmico imposto por processo de Soldagem	12
Figura 8 - Aportes de calor com e sem pré-aquecimento	13
Figura 9 - Medida da Diluição na seção transversal de uma junta soldada.....	15
Figura 10 - Representação dos crescimentos epitaxiais e competitivos.....	15
Figura 11 - Ilustração interface sólido/líquido	17
Figura 12 - Curva TRC para aços carbono	18
Figura 13 - Fatores que afetam o posicionamento da curva TRC	19
Figura 14 - Curvas TRC para diferentes zonas da junta soldada. EF = Ferrita equiaxial; WF = Ferrita de Widmanstatten; B = Bainita; P = Perlita; M = Martensita.....	20
Figura 15 - Regiões da ZTA e temperaturas durante processamento.....	21
Figura 16 – Perfis incorretos de solda	22
Figura 17 - Processo GMAW	25
Figura 18 - Propriedades dos aços em função do teor de carbono	30
Figura 19 - Diagrama Fe – Fe ₃ C	31
Figura 20 - Transformação hipoeutetóide	31
Figura 21 – Fluxograma de Pesquisa.....	38
Figura 22 – Desenho esquemático fixador	39
Figura 23 – Foto do dispositivo fixador	39
Figura 24 – Ferramenta para usinar canais.....	40
Figura 25 – Desenho dos corpos de prova – vistas superior e lateral.....	40
Figura 26 – Corpo de Prova.....	41
Figura 27 – Desenho esquemático do processo de soldagem.....	43
Figura 28 – Processo de soldagem automatizado.....	43
Figura 29 - Corpo de Prova pós-procedimento	46

Figura 30 – Desenho esquemático da sequência de cortes	47
Figura 31 – Corpo de Prova Seccionado	47
Figura 32 – Microdurômetro Vickers	48
Figura 33 – Desenho esquemático da sequência de obtenção de dados	49
Figura 34 – Macrografias dos Corpos de Prova	50
Figura 35 – Perfis de dureza para o procedimento de passe único	52
Figura 36 - Perfil de Microdureza Corpo de Prova Duplo Passe com e sem dispositivo.....	53
Figura 370 – Micrografia CP multipasses	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificação AWS para arames.....	28
Tabela 2 - Composição química do aço Copant 1070.....	29
Tabela 3 – Identificação Corpos de Prova.....	42
Tabela 4 - Especificações do procedimento de soldagem.....	45
Tabela 5 - Especificação do arame cobreado.....	45
Tabela 6 – Parâmetros de ensaio de análise química.....	46
Tabela 7 - Especificações Microdureza.....	48
Tabela 8 – Resultado espectroscopia de emissão ótica.....	50
Tabela 9 – Áreas estimadas das ZTAs.....	51
Tabela 10 – Área zona fundida.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWS – *American Welding Society*

MB – Metal Base

ZF – Zona Fundida

ZTA – Zona Termicamente Afetada

WM – Metal de Solda

TRC – Temperatura Resfriamento Contínuo

TTT – Tempo Temperatura e Transformação

GMAW – Gas Metal Arc Welding – Soldagem a arco com gás de proteção

CA – Corrente alternada

CC – Corrente Contínua

CC+ - Corrente Contínua polaridade inversa

CC- - Corrente Contínua polaridade direta

Stick-Out – Distância entre o bico de soldagem e a peça a ser processada

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO.....	1
2- OBJETIVOS.....	2
2.1 Objetivos Gerais	2
2.2 Objetivos Específicos	2
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1 Aspectos gerais da soldagem.....	3
3.1.1 Arco elétrico	8
3.1.2 Transmissão Metálica.....	11
3.1.3 Metalurgia da soldagem.....	11
3.1.3 Diluição	14
3.1.4 Solidificação da poça de fusão	15
3.1.4 Microestrutura na junta soldada	18
3.1.5 Zonas de uma junta soldada.....	19
3.1.6 Descontinuidades.....	21
3.2 Processos de soldagem a arco elétrico.....	24
3.2.1 GMAW (Gas Metal Arc Welding / Soldagem a arco com proteção gasosa).....	24
3.2.2 Modos de transferência metálica	25
3.3 Aço AISI 1070.....	28
3.3.1 Elementos residuais dos aços-carbono	29
3.3.2 Propriedades mecânicas do aço Copant 1065.....	29
3.4 Diagramas de fase.....	30
3.4.1 Diagrama de equilíbrio Fe – Fe ₃ C	30
3.4.2 Diagramas TTT e TRC	32
4 - ESTADO DA ARTE.....	33
5 – METODOLOGIA.....	38
5.1 Confeção do dispositivo fixador e dos corpos de prova	38

5.2 Soldagem dos corpos de provas	41
5.3 Análises metalográficas e aquisição do perfil de durezas	46
6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
7 – CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1- INTRODUÇÃO

A soldagem de componentes metálicos seja para a manufatura ou reparo de peças é um dos processamentos de união mais utilizados. O processo GMAW torna-se muito interessante neste contexto, uma vez que permite a união de metais de diversas composições químicas, soldagem de componentes com geometrias distintas e, também, por possibilitar a realização do processo em qualquer posição.

No entanto, a regulagem correta dos parâmetros de soldagem, os quais são interdependentes, se torna um desafio. Parâmetros estes, podendo ser listados resumidamente em: corrente e tensão de trabalho, indutância, gás de proteção, *stick-out*, diâmetro do arame-eletrodo, velocidade de deslocamento da tocha e taxa de resfriamento. Além disso, há procedimentos que podem ser realizados com objetivo de melhorar a soldabilidade do material e também promover alterações no ciclo térmico imposto. Tais procedimentos podem ser subdivididos em tratamentos térmicos pré-aquecimento e pós-aquecimento, além do uso da técnica multipasses.

Os parâmetros de trabalho utilizados, juntamente com os procedimentos impostos, somado as características do material são os responsáveis pela obtenção de características visuais e mecânicas da junta. Por exemplo, a corrente de trabalho contribui para determinar a profundidade de soldagem e também pela largura do cordão de solda. Outra análise realizada neste estudo foi o efeito provocado pela utilização de um dispositivo fixador de médio porte, o qual pode afetar as taxas de resfriamento experimentadas pelos corpos de prova. Além disto, procedimentos de pré-aquecimentos foram realizados e o uso da técnica multipasses aplicada em corpos de prova distintos.

O material de análise deste estudo é um aço AISI 1070, passível de produzir fases metaestáveis e de elevada dureza na zona termicamente afetada, a qual estará submetida a maiores taxas de resfriamento, conferindo-a propriedades distintas ao material da zona fundida e também do metal base. É importante ressaltar que para fabricação de componentes metálicos, é interessante haver a menor presença possível de descontinuidades e tensões residuais geradas pelo processamento de soldagem, garantindo maior confiabilidade e vida útil dos mesmos.

2- OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Caracterização e análise comparativa entre as propriedades mecânicas de corpos de prova de aço Copant 1070 soldados pelo processo GMAW por diferentes técnicas de soldagem.

2.2 Objetivos Específicos

- Confeção de um dispositivo para fixação e soldagem dos corpos de prova para simular o resfriamento de peças de grande dimensão;
- Mecanização do processo de soldagem;
- Avaliação do perfil de dureza na ZTA;
- Análise do efeito gerado por diferenças no aporte térmico de soldagem.

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aspectos gerais da soldagem

Há na literatura uma diversidade de conceitos para os processos de soldagem, destacando-se a definição dada pela *American Welding Society* (AWS), como um “Processo de união de materiais usado para obter a coalescência localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de tensão e/ou material de adição”. Todavia, tal definição abrange somente o espectro operacional, faltando conceitualmente com os tipos de forças envolvidas, o que gera a necessidade de outra definição: “Processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos.” (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Os processos de soldagem estão presentes em, virtualmente, todos os produtos manufaturados, seja para fabricação de aviões, navios ou veículos de forma geral, estruturas da construção civil como pontes, viadutos, dutos de transporte de matéria, plataformas marítimas, reatores nucleares, trocadores de calor, componentes eletrônicos e diversos outros produtos, envolvam eles muita tecnologia empregada em seu desenvolvimento ou não (BRANDI, WAINER, 1992; METALS HANDBOOK v.6, 1992).

A união de componentes metálicos é dada de duas formas distintas:

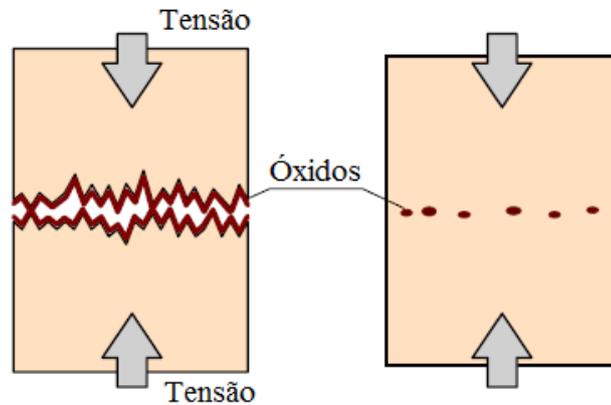
- Forças macroscópicas entre os componentes, sendo responsável por suportar esforços mecânicos sobre a junta. Os principais exemplos são os processos de parafusagem e rebitagem (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011);
- Forças interatômicas, as quais são obtidas através da aproximação atômica dos componentes que serão unidos e/ou ao material adicionado à junta, possibilitando a formação de ligações químicas, destacando-se a ligação metálica (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Considerando-se a estrutura cristalina de metais, seus átomos internos estão no menor estado de energia, ou seja, em equilíbrio. Tal estado é alcançado através da existência de outros átomos vizinhos ligados a uma distância adequada, minimizando a energia potencial do sistema. No entanto, os átomos superficiais do material não se encontram em um estado mínimo energético, que pode ser alcançado através de ligações atômicas. Portanto, ao se aproximar placas metálicas a uma distância suficientemente pequena, haverá a formação de uma ligação permanente, ou seja, as placas seriam soldadas. Porém, isso não ocorre, a não ser em situações específicas. Os motivos para que tal fenômeno não ocorra são devidos a impossibilidade real de se aproximar uma superfície à outra. O primeiro motivo é a rugosidade do metal, que por mais polido que esteja ainda apresentará irregularidades superficiais, promovendo o contato íntimo em apenas alguns pontos, insuficientes em quantidade, de forma que as ligações formadas não garantem resistência devida à junta. Somado a isso, camadas superficiais de óxidos, gordura e particulados físicos que impedem o contato real das superfícies, inibindo a formação da junta soldada (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Para que um processo de soldagem seja bem sucedido, ele deve cumprir com alguns requisitos. Primeiramente, a energia gerada deve ser o suficiente para promover a coalescência dos metais; ser capaz de remover as impurezas e óxidos na superfície enquanto protege a região de solda do ar atmosférico, evitando geração de óxidos e contaminação; somado a isso, é esperado que houvesse controle das transformações de fase, a fim de que o componente soldado possua propriedades mecânicas e químicas adequadas para sua utilização (BRANDI, WAINER, 1992).

A partir deste entendimento sobre como soldar os metais, surgem dois grandes grupos de processos de soldagem. O primeiro deles envolve aproximação atômica por meio da aplicação de esforços mecânicos. O esforço deve ser o suficiente para deformar plasticamente as imperfeições superficiais e possibilitar o contato íntimo entre os metais previamente limpos, ou seja, com quantidade mínima de óxidos, poeira e lubrificantes. A utilização de calor é opcional, uma vez que pode facilitar a deformação plástica local. O outro grande grupamento se baseia na aplicação localizada de calor na região preparada para se tornar uma junta, promovendo a fusão do metal base e, se utilizado, do metal de adição, o que extingue as superfícies entre as peças e uma vez que o metal solidifica, a solda é formada. As figuras 1 e 2 ilustram as duas formas de soldagem de materiais (BRANDI, WAINER, 1992; MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

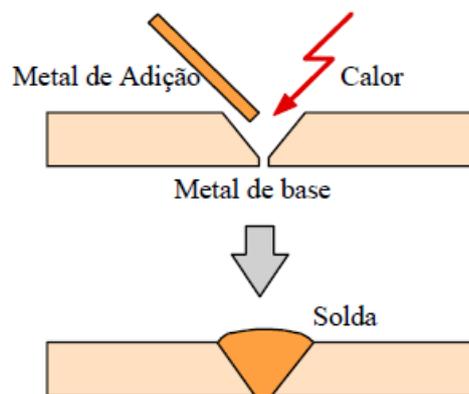
Figura 1 - Soldagem por Deformação



Fonte: Adaptado de (MONDENESI, MARQUES, 2000).

A Figura 1 mostra esquematicamente um processo de soldagem por deformação plástica. Pode ser necessária a aplicação de aquecimento ou corrente elétrica entre as peças a serem soldadas.

Figura 2 - Soldagem por Fusão



Fonte: (MONDENESI, MARQUES, 2000).

Dentre o grupo dos processos de soldagem por fusão, há subclassificações quanto à fonte de energia utilizada para se obter o aquecimento localizado. Destaca-se o calor gerado por energia química, proveniente da queima de gases reativos com oxigênio e projetado para a peça por meio de um maçarico e os processos que envolvem energia elétrica, dentre eles o aquecimento através do emprego do arco elétrico, sendo este de extrema utilidade e relevância industrial, uma vez que sua aplicação é flexível, podendo soldar peças de praticamente quaisquer dimensões com boas propriedades a altas taxas de produção e concentração de calor. É importante ressaltar que dada alta reatividade do metal fundido com a atmosfera, tais

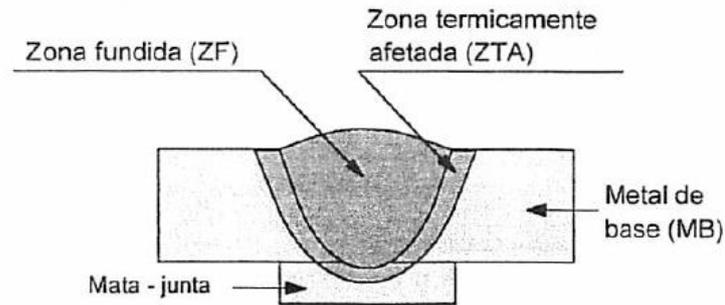
processos normalmente envolvem a utilização de gases protetores em torno da poça de fusão (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Durante o processo de soldagem, o ciclo de calor pode gerar mudanças no estado físico do metal, promover transformações de fases e gerar um stress transiente. Após a finalização da aplicação de ciclos de calor, pode haver a presença de descontinuidades físicas geradas pela solidificação excessivamente rápida do material, além da presença de microestruturas que conferem propriedades inadequadas ao componente, geradas pelo resfriamento inapropriado. Outras possíveis consequências de um processamento incorreto são a presença de tensões residuais, que podem alterar as tolerâncias dimensionais de um componente ou até comprometer totalmente um projeto de engenharia (METALS HANDBOOK v.6, 1992).

Naturalmente, existe uma nomenclatura específica para os processos de soldagem. A solda é o resultado de tal processamento, sendo esta realizada em um metal base (MB), podendo haver ou não o metal de adição. Durante a realização da soldagem, ambos os metais de adição e base são fundidos formando a poça de fusão, a qual irá solidificar e formar a junta. As juntas soldadas são determinadas pelo posicionamento relativo dos corpos a serem soldados. Em certos casos, dadas dimensões das peças, a facilidade de movê-las, o processo de soldagem e as necessidades de projeto torna-se necessárias preparações em suas extremidades, formando aberturas ou sulcos chamados de chanfros. Chanfros distintos permitem profundidades de solda, quantidade de material depositado diferentes e promovem tensões térmicas residuais próprias (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

A seção transversal de uma solda e especifica suas regiões distintas é mostrada na Figura 3. Somado a isto, há também uma peça colocada na parte inferior da raiz da solda, conhecido como cobre-junta. Sua principal finalidade é reter o material fundido dentro dos chanfros, impedindo que ele escoe, garantindo um acabamento superficial melhor, sendo muito relevante ao soldar tubos transportadores, pois o excesso de material poderia causar perdas de carga significantes. A chamada zona fundida (ZF) é caracterizada pelo metal de solda, o qual é composto por uma soma entre o metal de adição e parte do metal base a qual foi fundida. Devido ao fluxo de calor da poça de fusão para a peça, há uma região no metal base que sofre alterações em sua microestrutura e por consequente, suas propriedades chamada de zona termicamente afetada (ZTA) (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Figura 3 - Seção transversal de uma junta



Fonte: (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Inerentemente aos processos de soldagem, há existência de riscos, podendo eles causar danos às pessoas, ao equipamento e às instalações em que a operação é realizada. Torna-se necessário uma atenção especial em relação aos aspectos de segurança, sendo que o mais adequado é uma ação conjunta entre os gestores, engenheiros e operadores. Os responsáveis devem estabelecer condutas de comportamento, apoiando e orientando os envolvidos quanto aos planos de segurança. Por outro lado, os operários devem cumprir com o estabelecido e verificar as condições dos equipamentos em que trabalham (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

As pessoas envolvidas com soldagem estão expostas ao risco de haver explosões e incêndios, choque elétricos, exposição à radiação gerada pelo arco elétrico, fumos e gases nocivos à saúde. A fim de minimizar os danos causados por acidentes, é imprescindível que os operadores estejam equipados com roupas e óculos com filtros especiais, evitando queimaduras provenientes de respingos metálicos e danos a visão (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Em relação ao choque elétrico, precauções como correto aterramento do equipamento elétrico, ambientes e vestuário secos, cabos elétricos de diâmetros condizentes com os parâmetros de processo e evitar trabalhar com circuitos energizados tornam-se necessárias a fim de preservar a vida dos operadores e incêndios causados por falhas. Gases e fumos nocivos à saúde tem seu efeito reduzido ao se trabalhar em locais abertos ou que possuam ventilação adequada, podendo esta ser gerada por ventiladores e exaustores (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Quanto às explosões e incêndios, a presença de materiais inflamáveis, como cilindros de gás, tintas, solventes e óleos deve ser evitada, mantendo-os em recipientes próprios para sua

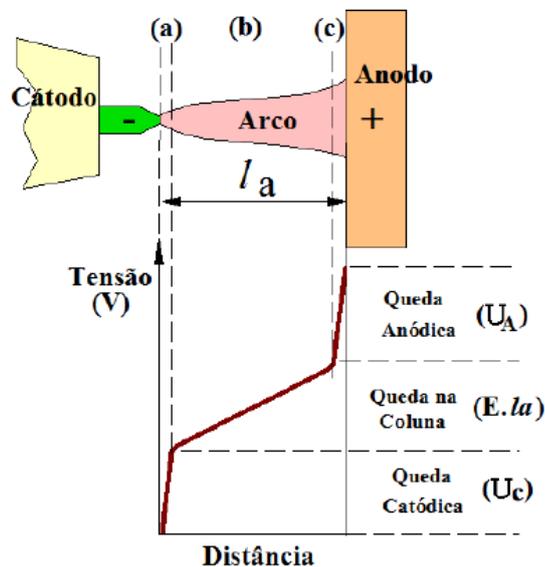
estocagem. Para o caso de processos que utilizam energia química, o efeito de “engolimento de chama” pode ser evitado pela utilização de válvulas de fluxo de sentido único. A limpeza e organização do local de trabalho são essenciais para minimizar as chances de quaisquer problemas (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

3.1.1 Arco elétrico

O arco elétrico consiste no fenômeno de manutenção de uma descarga elétrica entre eletrodos através de um gás ionizado, tendo uma queda de tensão na região do catodo da ordem do potencial de ionização do gás. Uma forma de se estabelecer um arco elétrico é por meio da formação de plasma, sendo este responsável pela condução da corrente elétrica pelo arco (BRANDI, WAINER, 1992; MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Uma forma de caracterizar o arco elétrico é pela diferença de potencial entre suas extremidades e pela corrente elétrica que o atravessa, sendo que as quedas de potencial se dão de formas distintas ao longo de seu comprimento, distinguindo-se em três regiões distintas, ilustrado pela Figura 4:

Figura 4 - Distribuição esquemática das regiões de queda de tensão no arco elétrico



Fonte: (MONDENESI, 2012).

Fontes possuem a chamada tensão em vazio, a qual facilitará a abertura do arco elétrico entre os eletrodos. Ao se encostar o eletrodo à peça de metal, haverá uma brusca queda de tensão para valores próximos de zero e por meio do efeito Joule, a peça aumentará de temperatura, favorecendo a transmissão termo iônica, ionizando não apenas o gás, mas também o vapor metálico gerado na região entre o metal base e o eletrodo, favorecendo a estabilização do arco elétrico (BRANDI, WAINER, 1992; MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Uma vez que o arco elétrico está estabelecido e estável, os valores de tensão e corrente passam a ter poucas variações, atingindo os valores de operação estabelecidos. A ionização do gás, dada pela colisão entre elétrons, íons e moléculas aquecidas é chamada de ionização térmica, sendo o calor transmitido à peça é proveniente da energia dissipada pelas colisões entre elétrons, íons e átomos gerados pela fusão de eletrodos consumíveis que se encontram na coluna de plasma (BRANDI, WAINER, 1992; MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

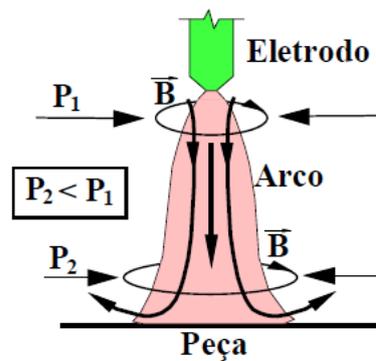
As regiões das extremidades do arco, ou seja, de queda anódica e catódica, apresentam os mais elevados gradientes térmicos e elétricos, sendo a soma das quedas de potencial elétrico nessas regiões constantes, sendo características ao arco e não variando muito com as condições de processo. A coluna de plasma, por sua vez, apresenta gradientes bem menores do que as outras regiões do arco, sendo que a diferença de potencial é linearmente dependente do comprimento do arco. Fatores como o comprimento do arco elétrico, forma, tamanho e material dos eletrodos, composição e pressão do gás na coluna e a corrente que atravessa o arco são fatores essenciais para a manutenção dos valores de diferença de potencial entre as extremidades do arco e por consequente, sua estabilidade (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

O arco elétrico apresenta uma elevada eficiência de conversão de energia elétrica em energia térmica e de transmissão da mesma para a peça. A energia gerada pelo arco elétrico é diretamente dependente da diferença de potencial e passagem de corrente estabelecida. A fim de manter esta alta taxa de transmissão, ou seja, manter a ionização do gás estável é necessário que altas temperaturas sejam mantidas no arco elétrico (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

A força promovida pela existência do campo de magnético promove a compressão do arco elétrico, que somado ao fato da diferença de tamanho superficial do eletrodo e da peça, contribuem para o formato cônico do arco elétrico. Considerando a diferença entre os raios do

arco elétrico em suas extremidades, é dada uma diferença de pressão, induzindo um fluxo de gás do eletrodo para a peça, independentemente das polaridades estabelecidas e do tipo de corrente utilizada. Tal fenômeno é conhecido por “jato de plasma”, ilustrado pela Figura 5. O jato de plasma é responsável direto quanto à penetração da solda, sendo este o direcionador dos gases e particulados a altas temperaturas contra a peça. Somado a isso, as forças magnéticas promovem um estrangulamento na extremidade fundida de eletrodos consumíveis, contribuindo para a sua separação e influenciando nos modos de transmissão metálica (BRANDI, WAINER, 1992; MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

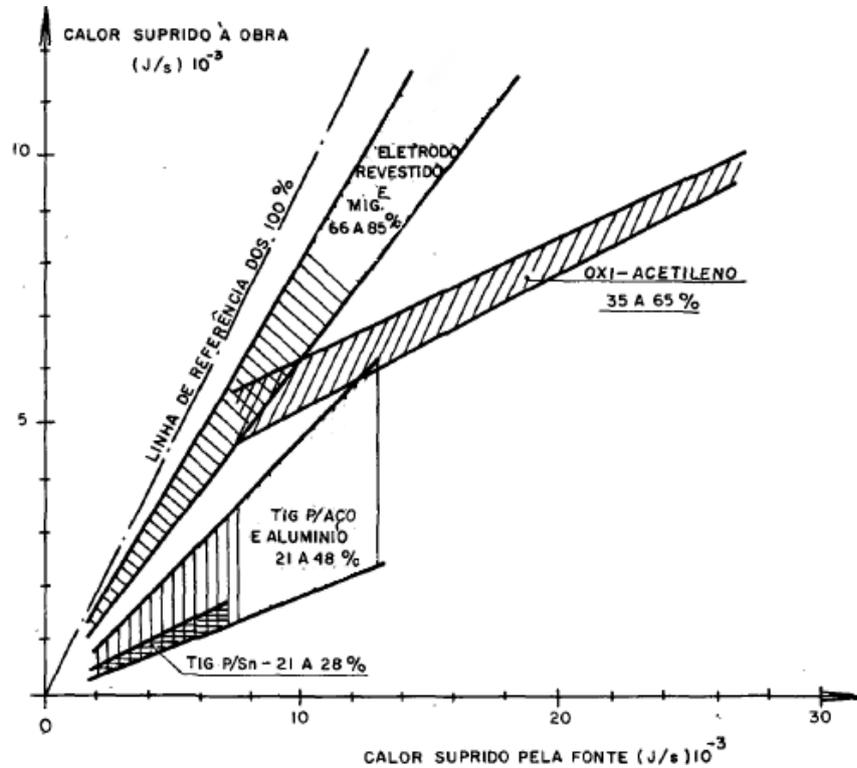
Figura 5 - Representação do jato de plasma



Fonte: (MONDENESI, 2012).

O rendimento térmico de um arco elétrico não é total, uma vez que parte da energia disponível é dissipada para a atmosfera por fenômenos de radiação e outra parcela é perdida por meio de convecção no meio gasoso o qual o arco é mantido. O restante é responsável pela fusão dos metais, sendo esta chamada de eficiência do arco (BRANDI, WAINER, 1992). A Figura 6 ilustra a eficiência de alguns processos de soldagem conhecidos.

Figura 6 - Valores Típicos de Eficiência do Arco



Fonte: (BRANDI, WEINER, 1992).

3.1.2 Transmissão Metálica

De maneira geral, há um consenso de cinco forças existentes em uma gota durante a transferência metálica. A primeira é o peso da gota, dependente da densidade do material e de suas dimensões; forças de tensões superficiais mantem em contato a gota fundida ao eletrodo nu em qualquer que seja a posição de soldagem utilizada; forças de arraste são provenientes do fluxo de gás protetor, agindo no sentido do desprendimento da gota do eletrodo; as forças de expansão gasosa contribuem para a transferência metálica na soldagem com eletrodos revestidos, as quais por meio de expansão gasosa geram micro explosões, projetando as gotas metálicas à poça de fusão; por ultimo, existem as forças eletromagnéticas geradas por um campo magnético induzido por cargas em movimento na coluna de plasma (BRANDI, WAINER, 1992; MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

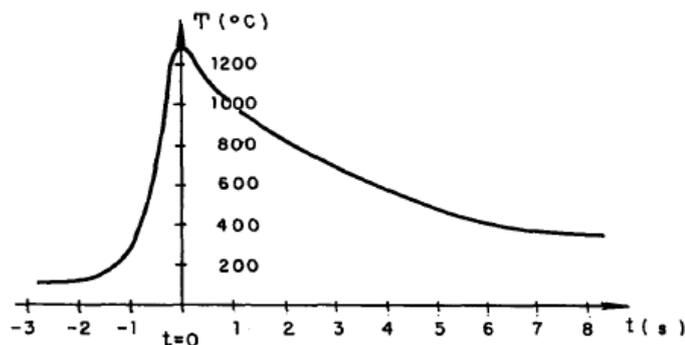
3.1.3 Metalurgia da soldagem

Muitos dos processos de soldagem utilizam o calor como principal fonte de energia para promover a fusão dos metais envolvidos. Sendo este elemento essencial à execução de soldas, porém, é uma potencial fonte de problemas, uma vez que promove alterações metalúrgicas e mecânicas na zona de solda. Tais efeitos são consequência dos ciclos térmicos os quais estão

submetidos, sendo relevante analisar alguns fatores a fim de minimizar problemas e melhor controle de qualidade do processo. Os principais fatores a serem considerados na análise da transferência de calor para juntas soldadas são o rendimento térmico do arco elétrico, a distribuição dos picos de temperatura, o tempo de permanência em tais temperaturas e a velocidade de resfriamento da zona de solda (BRANDI, WAINER, 1992).

O ciclo térmico o qual qualquer parte do metal base está submetido é uma função em relação a distancia da fonte de calor, representando as temperaturas em que cada ponto atinge a cada instante do processo, sendo composto basicamente por três etapas distintas. Tais etapas são: o aquecimento do material, dado início do processamento; fase em que o ponto alcança a temperatura máxima a qual estará submetido e por fim, o resfriamento gradual, até que o componente entre novamente em equilíbrio térmico com o meio. Tais etapas estão ilustradas na Figura 7 (BRANDI, WAINER, 1992).

Figura 7 - Ciclo Térmico imposto por processo de Soldagem



Fonte: (BRANDI, WEINER, 1992).

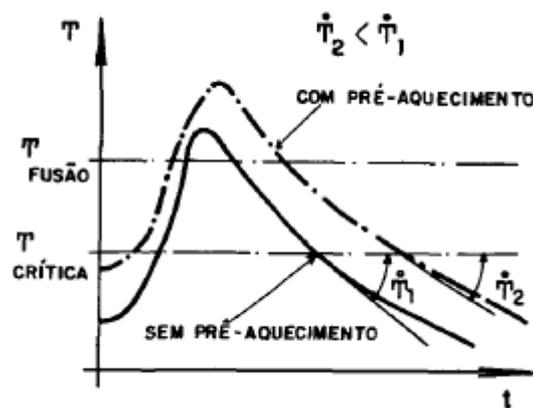
É relevante levar em conta certos aspectos do sistema ao se analisar seu ciclo térmico, sendo a temperatura de pico um indicador quanto à possibilidade de transformações de fase; o metal base, sendo que este pode possuir diferentes condutividades térmicas, dissipando o calor de forma rápida ou não ao longo do material; o tempo de permanência do ponto acima da temperatura crítica, podendo esta ser referente à temperatura de mudanças microestruturais ou de propriedades do material; a geometria e espessura da junta podem contribuir com diferentes taxas de resfriamento, sendo que metais mais espessos dissipam o calor mais rapidamente (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

A obtenção de ciclos térmicos em diversos pontos permite a confecção de linhas isotérmicas, representando diferentes pontos que em dado momento do processo, apresentam uma mesma

temperatura, sendo extremamente úteis ao fornecerem a possibilidade de contemplar as regiões que estão no início do ciclo térmico, outras que já passaram por ele, zonas submetidas a ciclos mais intensos ou mais brandos, dentre outras informações relevantes quanto à distribuição de temperaturas durante um processamento de soldagem (BRANDI, WAINER, 1992).

A Figura 8 demonstra como as taxas de resfriamento em uma junta soldada podem ser controladas, comparando situações em que há o pré-aquecimento da peça ou não. Em tal situação, o aço é pré-aquecido e a soldagem é realizada sem alterar o aporte de energia e a velocidade do eletrodo. Percebe-se uma ligeira diminuição na taxa de resfriamento a partir da temperatura crítica (BRANDI, WAINER, 1992).

Figura 8 - Aportes de calor com e sem pré-aquecimento



Fonte: (BRANDI, WEINER, 1992).

O fenômeno de deformações residuais é caracterizado como sendo de origem térmica e de natureza plástica, uma vez que diferentes gradientes de temperaturas acarretam em expansões e contrações distintas ao longo do material, podendo deformá-lo plasticamente, dando origem a tensões residuais. Por sua vez, tensões residuais na zona soldada podem propiciar o surgimento e propagação de trincas, corrosão sob tensão e apresentar comportamento inadequado em relação a fadiga (BRANDI, WAINER, 1992).

Aprofundando um pouco mais no que tange a taxa de resfriamento de um corpo, é evidenciado que o aporte de energia, sendo este dependente da velocidade do eletrodo e da temperatura inicial (pré-aquecimento), consiste como sendo o fator mais relevante quanto a este estudo. Processos de pós-aquecimento são relevantes quanto ao alívio de tensões residuais, provenientes de deformações residuais do material e recuperação de microestruturas

após o término da solda. Do ponto de vista operacional, a energia de soldagem aplicada e o pré-aquecimento são os parâmetros operacionais em que se há maior liberdade de variação, sendo essenciais para a definição da microestrutura e propriedades da junta soldada. (BRANDI, WAINER, 1992; MONDENESI, 2012).

Em processos de soldagem por fusão envolvendo eletrodos consumíveis, o metal de adição é transferido para a poça já no estado líquido, podendo estar a temperaturas acima de 2000°C para aços. Na região mais quente da poça, logo abaixo do arco elétrico, ocorre a mistura do metal de adição ao metal base, sob intensa agitação. Diversas regiões da poça de fusão podem se encontrar superaquecidas, onde há intensa interação do metal fundido com os gases e escória que estão presentes na região. Dentre algumas interações possíveis entre os tais elementos, destaca-se a absorção de hidrogênio pelo metal, a redução de óxidos com a transferência de oxigênio para o metal, a transferência de elementos de liga e impurezas do metal fundido para a escória ou vice-versa e a volatilização de alguns elementos químicos, como o cromo e o zinco, por exemplo (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

3.1.3 Diluição

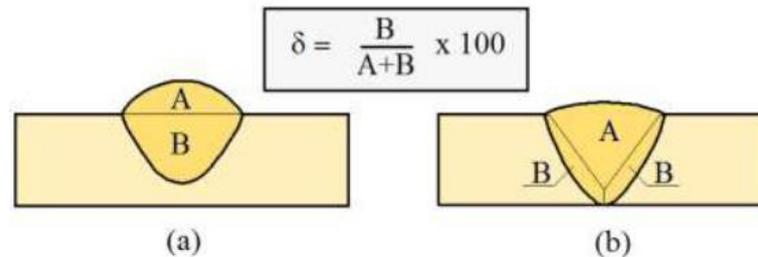
A composição química da zona fundida está diretamente relacionada com a participação relativa do resultado das interações entre o metal base e do metal de adição. Tal conceito é conhecido como coeficiente de diluição (δ). Ou seja, a proporção com que o metal base participa na zona fundida, e é dado pela Equação 1 (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

$$\delta = \frac{\text{Massa fundida do metal base}}{\text{Massa total do cordão de solda}} \times 100\% \quad (1)$$

A diluição é passível de ser medida por meio de análises macrográficas da seção transversal da solda, demonstrado pela Figura 14, onde a situação (a) representa um cordão depositado sob uma chapa e a (b) uma solda de topo. Soldas autógenas, ou seja, sem material de adição possuem coeficiente de diluição de 100% ao passo que processos de brasagem possuem δ de 0%. O controle efetivo da diluição é importante no controle da participação do metal base na solda, em casos onde há soldagem de materiais dissimilares, em processos de deposição de revestimentos em superfícies metálicas, em metais de composição química desconhecida, caso recorrente em soldagens de manutenção e metais que possuam altos teores de impurezas,

prejudiciais à zona fundida, como enxofre, fósforo e carbono (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Figura 9 - Medida da Diluição na seção transversal de uma junta soldada

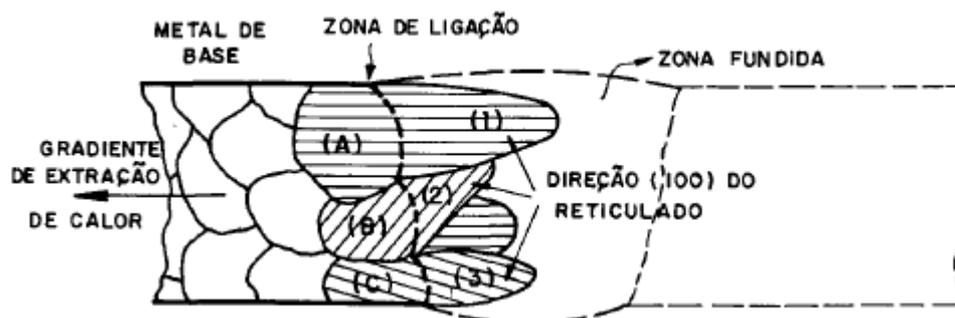


Fonte: (MONDENESI, MARQUES, SANTOS, 2012).

3.1.4 Solidificação da poça de fusão

A solidificação da poça de fusão envolve tanto o crescimento epitaxial quanto o crescimento competitivo. Somados, tais fenômenos determinam se a estrutura final da solda será grosseira ou refinada, e é ilustrado pela Figura 10. O crescimento epitaxial é definido como a solidificação e crescimento com a mesma orientação cristalográfica dos grãos da região parcialmente fundida (transição). O crescimento competitivo se dá em função do gradiente de calor e a direção cristalográfica que o fluxo de calor segue. A figura 10 representa regiões de crescimento epitaxial (entre A e 1; B e 2; e C e 3) e de crescimento competitivo (entre 1, 2 e 3) (BRANDI, WAINER, 1992).

Figura 10 - Representação dos crescimentos epitaxiais e competitivos



Fonte: (BRANDI, WEINER, 1992).

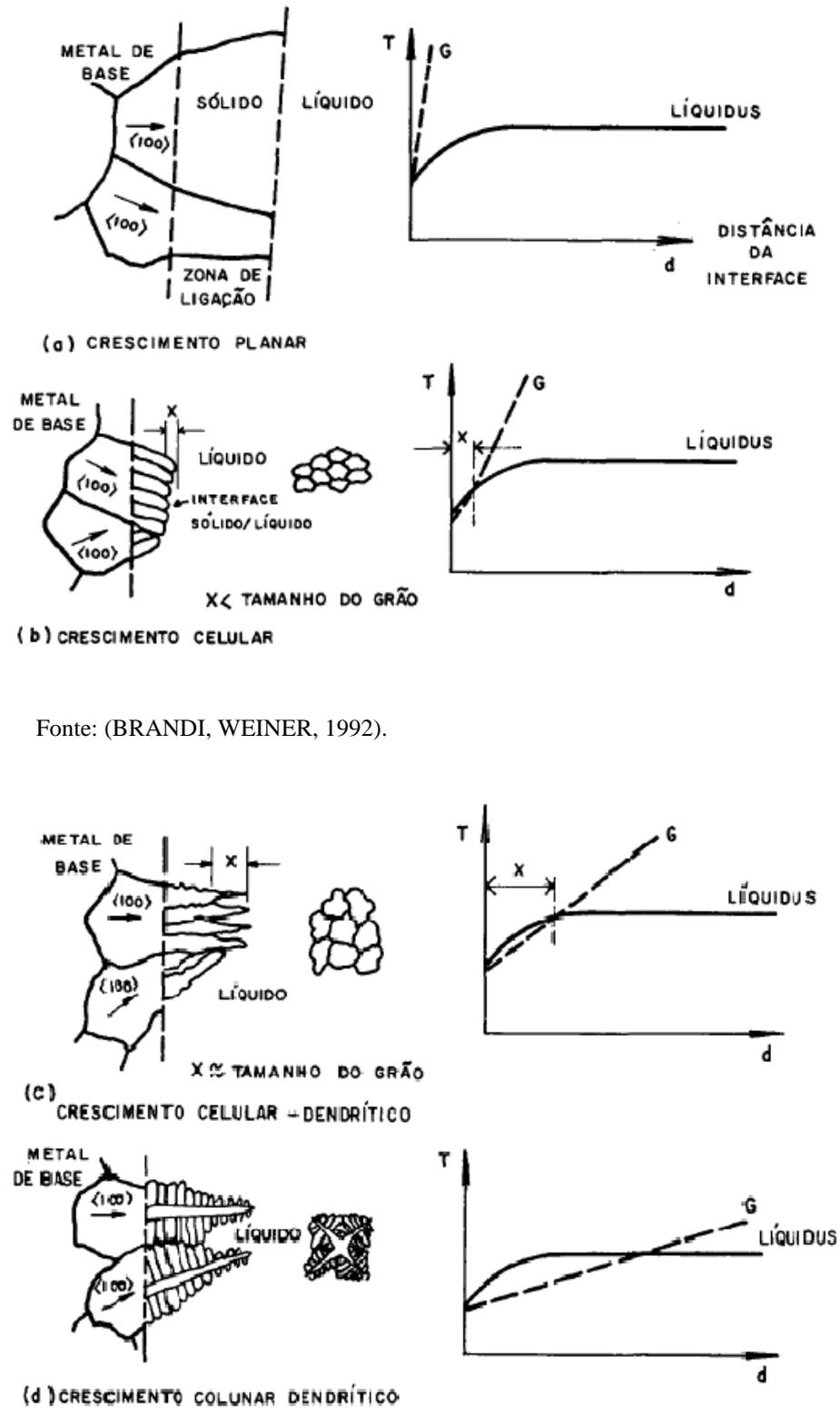
Ao se analisar outros fatores determinantes quanto ao refino dos grãos em uma poça de fusão, somados ao modo de crescimento de grãos também são levados em consideração. O tamanho de grão do metal base exerce grande influencia quanto a isso, sendo que quanto mais grosseiros os grãos do metal base, mais grosseiros serão os grãos da zona fundida após

solidificar. Por consequência, tem-se que quanto maior a temperatura de pico atingida na zona de ligação, maior será o grão e então mais grosseira será a estrutura da solda (BRANDI, WAINER, 1992).

A poça de fusão durante o processo de soldagem pode adquirir duas formas distintas, sendo o formato elíptico ou de gota. A geometria da poça será dada em função da velocidade de soldagem e pelo balanço térmico entre a energia de soldagem e as condições de transferência de calor no metal base. De forma geral, o formato elíptico ocorre quando a velocidade de solidificação é igual à de soldagem e o formato em gota, quando a velocidade de solidificação é inferior. A principal diferença entre essas duas morfologias é quanto ao gradiente térmico, sendo que na elíptica, permanece praticamente constante ao longo de toda a interface sólido/líquido, ao passo que o gradiente térmico da gota é menor no centro do que em relação às bordas (BRANDI, WAINER, 1992).

Os modos de solidificação de uma poça de fusão são determinados por fatores como o gradiente térmico, a velocidade de solidificação e pela concentração de soluto. Em uma solda, há normalmente uma pequena região de crescimento planar, seguida por crescimento celular, celular-dendrítico e em alguns casos, uma região totalmente dendrítica. A Figura 11 ilustra o aspecto da interface sólido/líquido durante a solidificação, onde a variável G está relacionado ao gradiente térmico imposto. O aumento de G é relacionado com a diminuição da energia de soldagem, fazendo com que a região super-resfriada tenda a possuir um crescimento planar, ao passo que a diminuição de G há a tendência do crescimento dendrítico (BRANDI, WAINER, 1992).

Figura 11 - Ilustração interface sólido/líquido

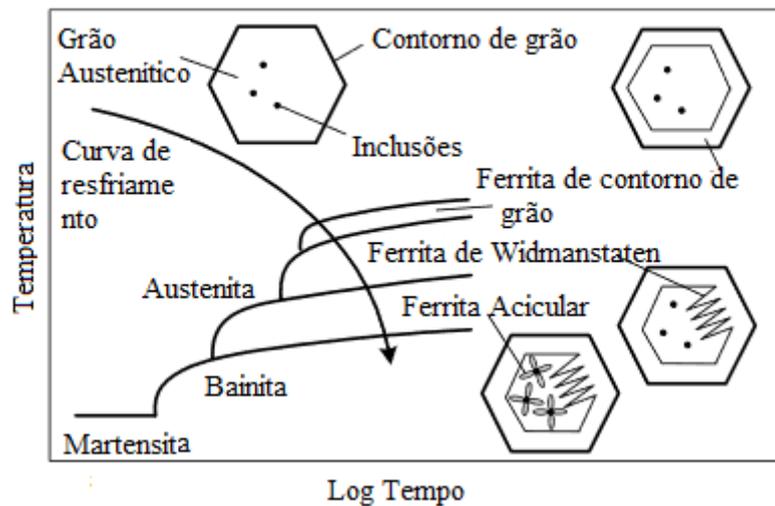


Fonte: (BRANDI, WEINER, 1992).

3.1.4 Microestrutura na junta soldada

As curvas TRC são as mais adequadas para a análise de mudanças microestruturais que ocorrem durante o resfriamento de uma junta soldada. A Figura 17 representa esquematicamente uma curva TRC para aços-carbono considerando as microestruturas a serem analisadas nos processamentos de soldagem (BRANDI, WAINER, 1992).

Figura 12 - Curva TRC para aços carbono



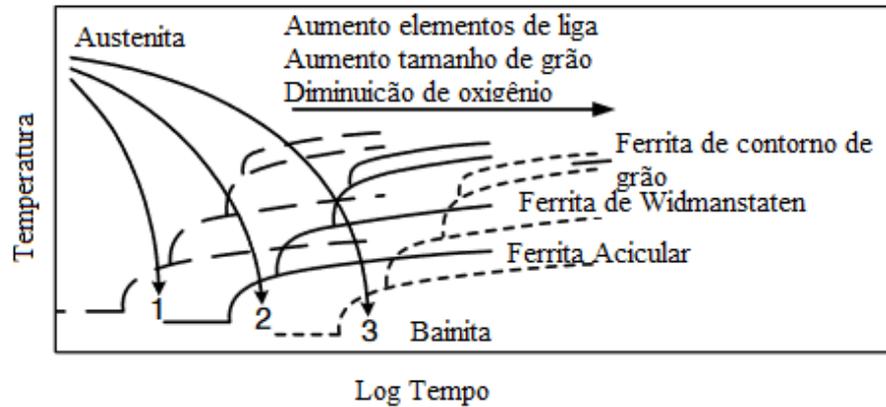
Fonte: (KOU, 2003).

Ao passo que a austenita é resfriada, a ferrita nucleia em seus contornos de grão, crescendo para dentro do mesmo. Tal ferrita é conhecida como ferrita alotropomórfica. Reduzindo a temperatura, o crescimento planar nos contornos de grão começa a perder mobilidade, dando início a formação da Ferrita de Widmanstätten (Sideplate Ferrite), sendo seu desenvolvimento favorecido pela movimentação do carbono até as extremidades laterais de crescimento. Sob temperaturas abaixo da possibilidade de formação de tal ferrita, é mais favorável que novas ferritas passem a nuclear, sobrepondo-se ao crescimento das ferritas de Widmanstätten, chamadas de ferritas aciculares, podendo nuclear em inclusões e tendo direções cristalográficas distintas e randômicas (KOU, 2003).

A ferrita também pode ser encontrada compondo os constituintes Bainita Superior e Bainita Inferior, formadas sob condições de taxas de resfriamento maiores em relação às citadas anteriormente. A Martensita, originada sob condições mais bruscas de resfriamento pode se apresentar de duas maneiras, maclada ou escorregada (BRANDI, WAINER, 1992).

Alguns fatores influenciam fortemente na microestrutura final do material, sendo estes, basicamente analisados por curvas TRC, ilustrado pela Figura 13.

Figura 13 - Fatores que afetam o posicionamento da curva TRC



Fonte: (KOU, 2003).

- Tempo de resfriamento: Como demonstrado na Figura 13, as taxas de resfriamento 1, 2 e 3 perpassam as curvas TRC em pontos distintos, conseqüentemente cada taxa de resfriamento dará origem a microestruturas únicas (KOU, 2003).
- Tamanho de grão austenítico: Considerando grãos maiores, haverá menos área de contornos de grão para a nucleação da ferrita, deslocando a curva TRC para a direita (KOU, 2003).
- Concentração de oxigênio: Foi observado que maiores concentrações de oxigênio promovem o decréscimo do tamanho dos grãos austeníticos. Somado a isso, há aumento no volume de inclusões ao passo que o tamanho médio das mesmas é reduzido, inibindo o crescimento de grão antes das transformações de fase ocorrer (KOU, 2003).
- Metais de adição: A adição de outros metais ao aço promove aumento na temperabilidade do mesmo, deslocando a curva TRC para a direita (KOU, 2003).

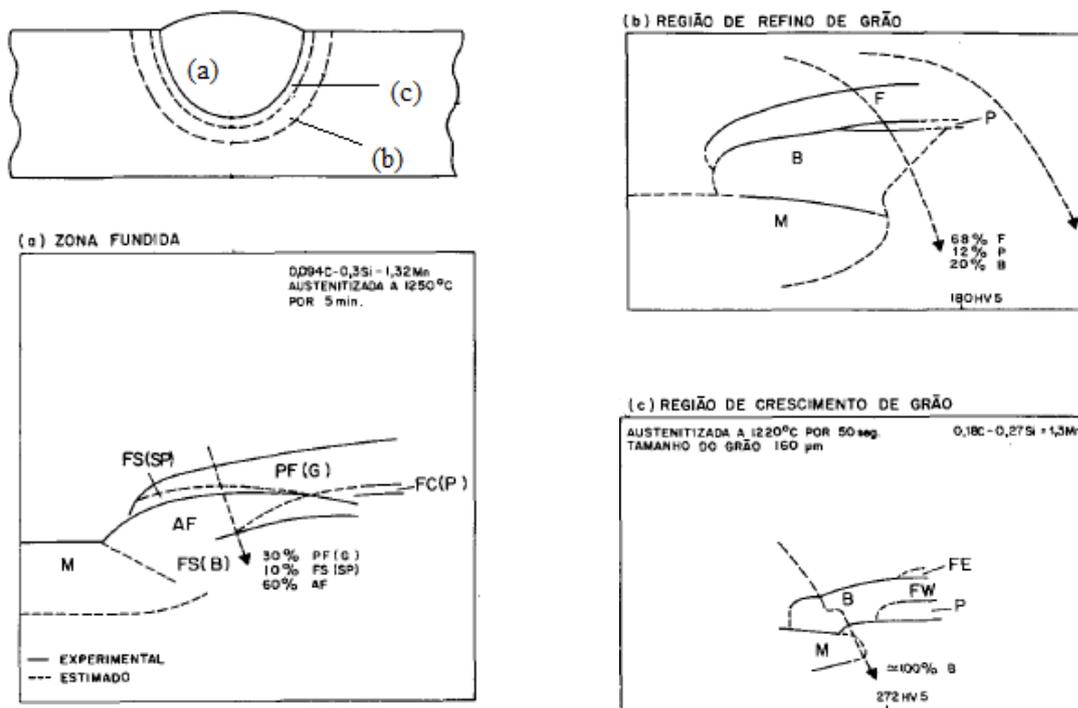
3.1.5 Zonas de uma junta soldada.

Adjacente ao metal de solda há o que é chamado de ZTA, sendo gerada no metal base da junta. Para este caso, não se altera sua composição química, sendo necessário o emprego de aços-carbono com teores de carbono e elementos de liga conhecidos, obtendo uma junta soldada com propriedades mecânicas previsíveis. Para o caso de metais não transformáveis, como o cobre e o zinco, a ZTA propicia o crescimento de grão do material, já para metais que sofrem transformações micro estruturais no estado sólido, esta análise é mais complexa.

A fim de compreender melhor os fenômenos que ocorrem na ZTA, ela é subdividida em três zonas: zona de crescimento de grão, a qual aumenta a temperabilidade dos aços e favorece a formação de constituintes abaixo de 500°C; adjacente a ela, se encontra a zona de refino de grãos, o que diminui a temperabilidade do metal base nessa região; zona intercrítica ou transformação parcial. É relevante para esta análise que cada zona da ZTA possui velocidades distintas de resfriamento, sintetizado pela Figura 14 (BRANDI, WAINER, 1992; MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

A região mais próxima à zona fundida é a de crescimento de grão, sendo influenciada pela transformação da ferrita a austenita, durante o aquecimento, podendo esta ser uma transformação que pode ocorrer sem difusão, ou seja, a ferrita sofre uma transformação do tipo martensítico, dada altas velocidades de resfriamento (300°C/s ou superior). Tal transformação ocorre por deformação plástica que, através da recristalização primária, acelera o crescimento de grãos. O posterior crescimento de grão dependerá de quanto tempo à zona estará exposta a temperaturas acima de 1300°C. O produto da decomposição desta austenita no resfriamento determinará as propriedades mecânicas dessa região, como mostrado pela Figura 14 (BRANDI, WAINER, 1992).

Figura 14 - Curvas TRC para diferentes zonas da junta soldada. EF = Ferrita equiaxial; WF = Ferrita de Widmanstatten; B = Bainita; P = Perlita; M = Martensita

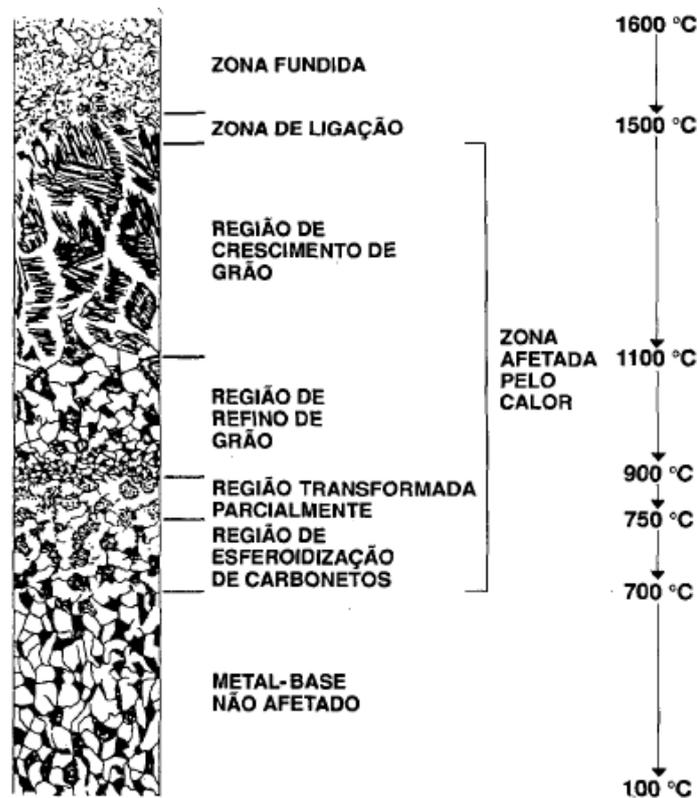


Fonte: (BRANDI, WEINER, 1992).

Na zona de refino de grãos também se admite que a transformação austenítica gere deformações, porém menos intensas do que na zona citada anteriormente. A austenita obtida em tal zona possui grãos refinados, os quais, no resfriamento, darão origem a ferrita e perlita, apresentando boas propriedades, como resistência e ductilidade (BRANDI, WAINER, 1992).

Na região intercrítica ou parcialmente transformada, há formação da austenita no aquecimento, a qual ao ser resfriada, pode gerar constituintes como perlita, bainita ou martensita maclada, podendo apresentar propriedades mecânicas inferiores ao metal base. A depender das faixas de temperatura de exposição, pode haver a esferoidização das lamelas de carbonetos da cementita e da perlita. Tais zonas de temperatura são exemplificadas pela Figura 15 para todas as regiões da junta soldada (BRANDI, WAINER, 1992).

Figura 15 - Regiões da ZTA e temperaturas durante processamento



Fonte: (BRANDI, WEINER, 1992).

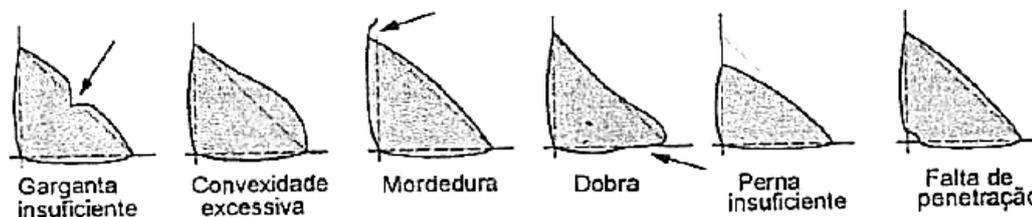
3.1.6 Descontinuidades

As operações de soldagem podem gerar descontinuidades, as quais são definidas como uma interrupção da estrutura esperada em uma junta. Em casos os quais tais descontinuidades prejudicam as propriedades da junta, passam a ser chamadas de defeitos, os quais devem ser sempre evitados por meio do estabelecimento correto de parâmetros de operação. De acordo

com a American Welding Society, existem três categorias de descontinuidades, as quais serão analisadas a seguir (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

O primeiro grande grupo de descontinuidades é o que envolve as dimensões e formatos da junta soldada. As distorções são alterações de forma e dimensões, gerados por deformação plástica devido ao aquecimento não uniforme localizado durante a operação, podendo ser evitadas através do uso de dispositivos fixadores ou reduzindo o calor envolvido. Outra descontinuidade dimensional é quanto às dimensões da solda, deixando atender os requisitos de propriedades mecânicas estabelecidos. Variações geométricas bruscas do perfil da solda podem ser grandes concentradores de tensão, propiciando o início e propagação de trincas, estando relacionado à manipulação incorreta do eletrodo ou parâmetros mal estabelecidos de processo. A Figura 16 mostra alguns perfis incorretos (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Figura 16 – Perfis incorretos de solda



Fonte: (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

O próximo grupo de descontinuidades é composto por problemas estruturais, incidindo na micro ou macroestrutura da solda, ocorrendo devido à falta ou excesso de matéria. A porosidade pode ocorrer devido à evolução de gases durante a solidificação da solda, sendo que podem afetar as propriedades mecânicas ao reduzir a seção efetiva da junta. As inclusões de escória podem ocorrer devido à manipulação incorreta dos eletrodos consumíveis, podendo aprisionar parte da escória entre o cordão de solda e o metal base, sendo um grave concentrador de tensões. A falta de fusão é caracterizada como uma descontinuidade metalúrgica entre a solda e o metal base adjacente, ocorrendo devido à falta de aquecimento necessário para fundir corretamente os metais, o que facilita a nucleação e propagação de trincas. Outra descontinuidade estrutural é dada pela falta de penetração da solda, não

preenchendo completamente a raiz de solda (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

As trincas são as descontinuidades mais graves em processos de soldagem, sendo grandes concentradores de tensão, podem evoluir e dar início a fraturas frágeis da estrutura. A aplicação localizada de calor acarreta em expansões e contrações heterogêneas no material, provocando o aparecimento de tensões residuais, as quais, juntamente com a fragilização ocasionada por transformações microestruturais e a presença de outros concentradores, podem ocasionar trincas. A localização dessas trincas não é previsível, podendo ocorrer em todas as zonas que compõe uma junta soldada, ou seja, na zona fundida, na zona termicamente afetada e até no metal base (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

As trincas podem ser formadas em diversos momentos, desde quando a solda solidifica até quando o componente estiver operando. A fissuração por hidrogênio, ou fissuração a frio ocorre de maneira mais frequente em aços com baixo e médio teor de carbono, principalmente os que apresentam boa temperabilidade. Este tipo de trinca ocorre principalmente na ZTA, surgindo algum tempo após o processamento e cresce lentamente, podendo levar até dois dias para se desenvolver completamente (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011). Existem quatro fatores que propiciam o aparecimento de tal trinca:

- Presença de hidrogênio: Oriundo de matéria orgânica ou em umidade excessiva de eletrodos, este pode ser absorvido pela poça de fusão e então aprisionado no interior da solda durante a solidificação (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011);
- Microestrutura sensível: Microestruturas que possuem baixa tenacidade e elevada dureza, como a martensita, a fissuração por hidrogênio é agravada. Portanto, aços temperáveis são mais susceptíveis ao surgimento deste tipo de defeito (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011);
- Elevada solitação mecânica: Tensões excessivas aplicadas a áreas em que há maiores chances de ocorrer a fissura promovem a facilitação das mesmas. Materiais que possuam mais facilidade para deformar ou estejam fixados tendem a ser mais sensíveis ao surgimento das trincas, uma vez que não conseguem acomodar de maneira eficaz as solitações aplicadas (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011);
- Temperatura: A fissuração causada por hidrogênio ocorre em faixas de temperatura entre 100°C e 200°C. A manutenção da temperatura da junta soldada acima desta faixa de temperatura por determinado tempo permite a completa difusão do hidrogênio para

fora da estrutura, minimizando a possibilidade de ocorrência da fissuração (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011);

3.2 Processos de soldagem a arco elétrico

3.2.1 GMAW (Gas Metal Arc Welding / Soldagem a arco com proteção gasosa)

O processo de soldagem com proteção gasosa promove a união de peças através do aquecimento promovido por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo nu e consumível e a peça de trabalho. Os gases utilizados no processo podem consistir em apenas um gás ou uma mistura, sendo estes ativos (*Metal Active Gas / Gás ativo*) ou inertes (*Metal Inert Gas / Gás inerte*) (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

O processo GMAW é semiautomático ou automático, no qual a alimentação do arame (eletrodo) é feita de maneira automática por um alimentador programável, cabendo ao soldador o início e fim da soldagem e de movimentar a tocha ao longo da junta. Responsabilidades estas passíveis de serem automatizadas (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Uma ampla faixa de materiais pode ser soldada por tal processo, podendo estes ser metais ferrosos e não ferrosos, sendo que normalmente uma mistura de gases ativos, incluindo CO₂ é utilizada para a soldagem de metais ferrosos e uma mistura de gases inativos é utilizada para soldar metais como alumínio, cobre, magnésio, níquel e ligas. (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

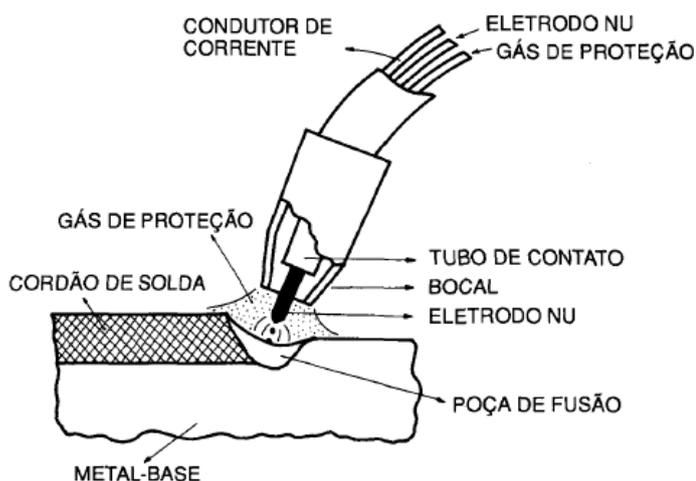
Dentre as características do processo, é possível destacar algumas vantagens na utilização do processo: (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011; BRANDI, WAINER, 2004).

- Altas taxas de deposição e fator de ocupação do soldador;
- Grande versatilidade quanto à espessura e composição química do material soldado;
- Não produz escória, o que evita possíveis problemas de inclusões;
- Processo com baixo teor de hidrogênio, minimizando a possibilidade de trincas a frio;
- Possibilidade de controlar a penetração e diluição durante o processo;
- Processo realizável em todas as posições;

Todavia, o processo possui limitações, como por exemplo, a grande sensibilidade aos parâmetros definidos para o processo, os quais influenciam diretamente no modo de transmissão metálica e conseqüentemente nas características do cordão (MARQUES,

MONDENESI, BRACARENSE, 2011). Somado a isto, a ausência de escória permite uma maior velocidade de resfriamento, aumentando a possibilidade de trincas, principalmente em aços temperáveis (BRANDI, WAINER, 2004). O processo é representado esquematicamente pela Figura 17:

Figura 17 - Processo GMAW



Fonte: (Wainer et al., 2004).

3.2.2 Modos de transferência metálica

Na soldagem, o eletrodo nu é fundido e então transferido para a poça de fusão, podendo ocorrer de maneiras distintas, influenciando diretamente diversas características do processo, tais como a estabilidade do arco, a quantidade de gases absorvida pelo metal fundido e o nível de respingos gerados. Há quatro classificações gerais para os modos de transmissão pelo processo MIG/MAG, sendo estas a transferência por curto-circuito, globular, spray ou aerossol e transmissão controlada. No entanto, estudos mais aprofundados mostram que há outros modos de transmissão a depender do material a ser soldado, da mistura gasosa e outros parâmetros de soldagem. (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

A transferência por curto-circuito ocorre normalmente ao se definir valores mais reduzidos de tensão e corrente, sendo preferencialmente utilizado em soldagens fora de posição e em peças com pequena espessura, ou seja, quando baixa energia de soldagem é necessária. O metal fundido no final do arame vai aumentando de tamanho até que entre em contato com a poça de fusão, que será atraída pela mesma, devido efeitos de tensão superficial. Tal modo de transmissão é responsável por um arco elétrico instável e com grande geração de respingos, os quais podem ser controlados pelo ajuste de parâmetros, como a indutância, a qual pode suavizar o curto-circuito (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

O modo de transferência globular ocorre a valores intermediários de tensão e corrente, resultando em um arco mais estável do que o mencionado anteriormente, porém a transmissão metálica é caótica e imprevisível. Neste, forma-se uma gota na ponta do arame, a qual cresce até diâmetros maiores do que o do eletrodo em si, se desprendendo e caindo a poça de fusão por ação da gravidade, o que limita sua utilização para posições planas (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

À medida que os valores de corrente aumentam, o diâmetro médio das gotas diminui, até que em certa faixa de transição, o modo de transmissão metálica passa a ser por aerossol. Neste modo, o diâmetro médio das gotas é inferior ao do eletrodo e estas estão presentes em grande quantidade, ocorrendo apenas em situações específicas de metal base e mistura de gases protetores. Uma vez que tal transferência ocorre somente em valores relativamente elevados de corrente de soldagem, sua utilização não é recomendada em chapas finas, as quais podem ser perfuradas e em processos fora da posição plana, dado o tamanho e controle da poça de fusão gerada (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Fontes eletrônicas mais modernas permitem variações dinâmicas nos parâmetros de soldagem e na alimentação do arame, controlando melhor o modo de transmissão metálica. Dentre os modos controlados, destaca-se a pulsada, a qual consiste na pulsação da corrente de soldagem em dois patamares que se situam abaixo e acima da corrente de transição. Quando a corrente está abaixo de tal patamar, há a formação e crescimento da gota metálica na ponta do arame, sendo transferida para a poça quando a corrente passa para o patamar superior (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

A fim de que um processo de transmissão metálica por eletrodo consumível seja estável, duas condições básicas devem ser satisfeitas. A primeira delas é que a taxa de alimentação do arame deve ser igual à velocidade média de fusão e que o metal fundido formado na ponta do arame deve ser transferido para a poça de fusão sem causar maiores perturbações no processo (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Existem duas maneiras para se obter a condição de equilíbrio entre alimentação e fusão do eletrodo. Uma delas é permitir que o equipamento controle a velocidade de alimentação, de modo que iguale a velocidade de fusão. A outra consiste na manutenção da velocidade de alimentação e alterações dinâmicas nos parâmetros de soldagem. Para o segundo caso, é utilizada uma fonte de tensão constante e um alimentador com velocidade constante. Observa-se que variações no comprimento do arco, acompanhadas por variações nos valores de tensão

tendem a causar grandes variações nos valores de corrente, de maneira que se o comprimento do arco se tornar maior do que a condição de equilíbrio, o valor de corrente é reduzido, diminuindo a velocidade de consumo, fazendo com que o comprimento do arco tenda a voltar para o tamanho original (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Os processos de soldagem MIG/MAG são normalmente realizados com uma fonte com características estáticas de saída tipo tensão constante e uma alimentação com velocidade constante de arame. Tal sistema faz com que a tensão, e conseqüentemente o comprimento do arco, seja constante, ao passo que os valores de corrente e comprimento energizado de eletrodo são dependentes da distancia da tocha à peça. Sendo assim, quaisquer perturbações nas condições de soldagem acarretam em alterações na corrente e no comprimento energizado do eletrodo (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

O equipamento utilizado para soldagem GMAW consiste na fonte de energia, alimentador de arame, tocha de soldagem e uma fonte de gás protetor, além de mangueiras e cabos auxiliares. A mecanização do processo pode ser obtida pelo uso de guias, posicionadores e sistemas de movimento (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

As fontes mais utilizadas para tal processo são geralmente do tipo transformador-retificador, o que possibilita o ajuste da tensão de saída. Quanto ao alimentador de arame, o mesmo é impulsionado por um motor, que fornece arame a uma velocidade constante e ajustável. Vale ressaltar que ambas as estruturas são independentes uma da outra, porém o ajuste da velocidade de alimentação do arame é diretamente relacionado ao ajuste da corrente de soldagem fornecida pela maquina, dadas características da fonte e processo (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

A tocha de soldagem é composta por um punho, o qual suporta o bico de contato que energiza o eletrodo, um bocal que orienta o fluxo do gás protetor e o gatilho de acionamento do sistema. O bico de contate é um tubo de ligas de cobre, o qual possui um diâmetro ligeiramente superior ao do arame, atuando como um contato elétrico. O bocal é normalmente produzido de material cerâmico refratário. As tochas de soldagem podem ser resfriadas a água ou pelo próprio gás protetor (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Os consumíveis utilizados para processos de soldagem MIG/MAG são o arame eletrodo, o gás de proteção e líquidos anti-adesão de respingos. Os arames possuem diferentes classificações, sendo constituídos de diferentes ligas metálicas. Arames de baixa qualidade

podem gerar falhas na alimentação, instabilidade do arco e descontinuidades no cordão de solda. Tradicionalmente, os arames são revestidos por uma camada de cobre, a qual protege o arame contra efeitos corrosivos da atmosfera e melhora o contato elétrico entre o mesmo e o bico de contato (MARQUES, MONDENESI, BRACARENSE, 2011).

Tabela 1 - Especificação AWS para arames

Especificação AWS	Tipo de eletrodo
AWS A 5.1	Eletrodos revestidos para soldagem a arco de aço-carbono
AWS A 5.3	Eletrodos revestidos para soldagem a arco de alumínio e suas ligas
AWS A 5.4	Eletrodos revestidos para soldagem a arco de aço inoxidáveis
AWS A 5.5	Eletrodos revestidos para soldagem a arco de aço baixa liga
AWS A 5.6	Eletrodos revestidos para soldagem a arco de cobre e suas ligas
AWS A 5.11	Eletrodos revestidos para soldagem a arco de níquel e suas ligas
AWS A 5.13	Eletrodos revestidos para soldagem a arco
AWS A 5.15	Eletrodos e varetas para soldagem do ferro fundido

Fonte: (MONDENESI, MARQUES, BRACARENSE, 2009).

Os gases de proteção utilizados podem ser gases inertes, ativos ou uma mistura deles. O gás utilizado tem influência nas características do arco, na transferência metálica, na penetração, largura e formato do cordão de solda, velocidade de soldagem e no aparecimento de descontinuidades durante a operação.

3.3 Aço AISI 1070

O Aço AISI 1070 pode ser classificando de formas distintas, sendo as mais relevantes, quanto às suas características predominantes, composição química e propriedades exigidas na utilização.

De acordo com a NBR NM 172:1998, o aço AISI 1070 é um aço para construção mecânica, ou seja, é amplamente utilizado na fabricação de componentes mecânicos depois de realizado tratamento térmico adequado, sendo utilizado em eixos, peças forjadas, engrenagens e componentes estruturais de máquinas. Além disso, a depender da finalidade, deve possuir controle rigoroso quanto a tolerâncias dimensionais e acabamento superficial adequado. Outra classificação para tal aço de acordo com esta norma é de aço de qualidade, dadas exigências de controles característicos do material, como composição química e propriedades mecânicas (ABNT, 2000; METALS HANDBOOK v.1, 1990).

Em se tratando da composição química, o aço Copant 1070 é um aço ao carbono e com composição química estabelecida de acordo com a NBR NM 87:2000 e demonstrada na tabela abaixo.

Tabela 2 - Composição química do aço Copant 1070

Designação Copant/AISI	Composição Química de corrida (%)			
	Carbono	Manganês	Fósforo	Enxofre
1070	0,60 - 0,70	0,60 - 0,90	0,04	0,05

Fonte: NBR NM 87:2000 [2].

3.3.1 Elementos residuais dos aços-carbono

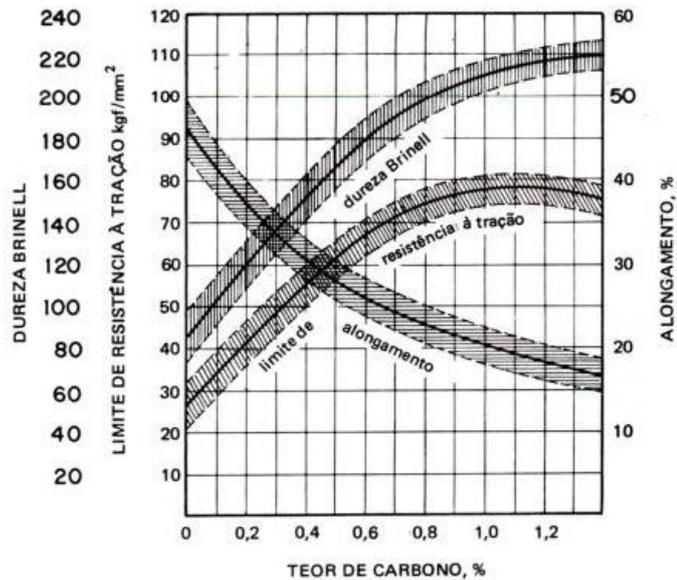
Inerentemente ao processo de fabricação dos aços, haverá elementos químicos solubilizados no ferro além do carbono, sendo este o principal elemento de liga. Tais compostos podem ser metálicos ou não, sendo os mais comuns o fósforo, o enxofre, o manganês, silício e alumínio. Durante a fase de desoxidação durante o processamento do aço, tais elementos podem reagir entre si, com o oxigênio ou nitrogênio, formando inclusões. A quantidade de inclusões pode variar de menos de 0,01% até 2,0% em peso, podendo afetar de formas distintas as propriedades do material (CHIAVERINI, 1986).

3.3.2 Propriedades mecânicas do aço Copant 1065

Ao se considerar apenas o resfriamento no equilíbrio do aço, suas propriedades mecânicas são diretamente afetadas pela microestrutura presente, variando com a proporção de cada constituinte. À medida que a quantidade de carbono cresce propriedades de resistência mecânica, como limite de escoamento, limites de resistência à tração e dureza são favorecidos, ao passo que propriedades relativas à ductilidade, como alongamento, estrição e resistência ao impacto são desfavorecidas (CHIAVERINI, 1986).

A figura 17 mostra a influência do teor de carbono no aço em suas propriedades mecânicas mais relevantes, sendo estas a dureza Brinell, resistência à tração e alongamento:

Figura 18 - Propriedades dos aços em função do teor de carbono



Fonte: (CRUZ, FRANÇA).

Para o aço AISI 1070, obtêm-se valores aproximados de suas propriedades, sendo sua dureza 180HB, seu limite de resistência à tração de 70 kgf/mm² e alongamento máximo por volta de 25%.

3.4 Diagramas de fase

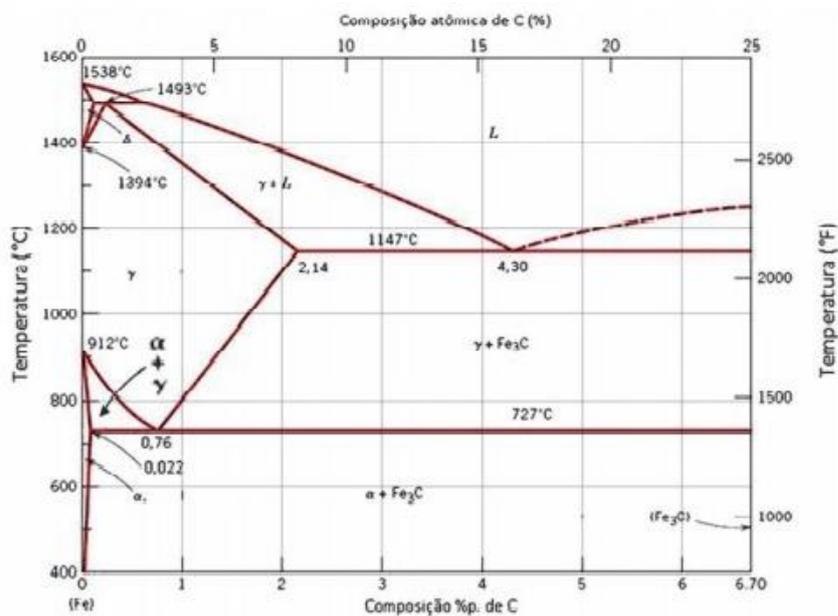
3.4.1 Diagrama de equilíbrio Fe – Fe₃C

O diagrama prevê, para o resfriamento extremamente lento o qual possibilita completa difusão do carbono no ferro, as fases que estarão presentes no aço e como elas se organizam fisicamente, formando os constituintes com arranjos cristalinos específicos, morfologia e tamanho característico, os quais estão intimamente ligados às propriedades finais do material (METALS HANDBOOK v.1, 1990; CALLISTER, 2002; HILL, 2002)

Ao se observar a Figura 18, destaca-se a reação invariante eutetóide, uma vez que a maioria dos aços comerciais não possuem percentuais de carbono maiores do que 1% em peso. Em tal transformação, a fase austenita (γ), de estrutura cristalina CFC e com aproximadamente 0,77% de C em peso se transforma isotermicamente nas fases ferrita (α) com 0,022% de C, com estrutura cristalina CCC e no composto cementita (Fe₃C). Uma vez que a austenita passa pelo ponto S do diagrama, a fase ferrita, cuja solubilidade máxima de carbono é muito menor começa a ser formada por nucleação e crescimento, ocorrendo preferencialmente nos

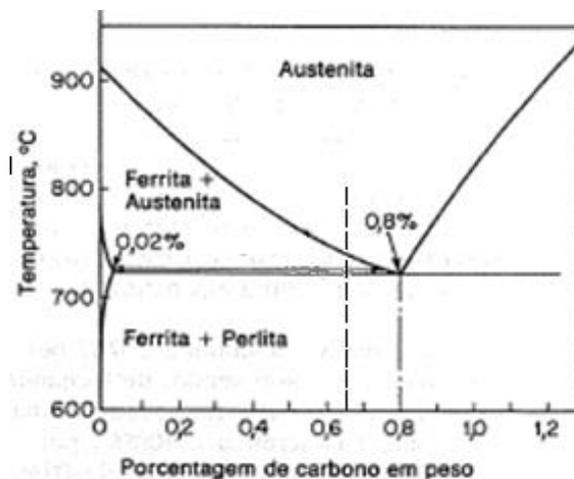
contornos de grão austeníticos, ocasionando um enriquecimento de carbono na fase γ , possibilitando a formação do composto Fe_3C , que juntamente com parte da ferrita irá constituir a perlita. Para aços hipoeutetóides, ou seja, com percentual de carbono inferior a 0,77%, os constituintes presentes serão ferrita próeutetoide e perlita, porém a perlita apresentará menos teor de cementita em suas lamelas alternadas, uma vez que há menor carbono disponível no sistema para sua formação (CHIAVERINI, 1986; CALLISTER, 2002; HILL, 2002).

Figura 19 - Diagrama Fe – Fe_3C



Fonte: (CALLISTER, 2002).

Figura 20 - Transformação hipoeutetóide



Fonte: (adaptado de HILL, 1992).

O entendimento do diagrama de equilíbrio Fe-Fe₃C permite a previsão das fases termodinamicamente estáveis a uma dada temperatura e seus constituintes, possibilitando o desenvolvimento de novos aços com propriedades mecânicas específicas para dada aplicação. Vale ressaltar que tal diagrama prevê as transformações quando o resfriamento é relativamente lento, o que foge das condições de processamentos reais (METALS HANDBOOK v.1, 1990); (HILL, 2002).

3.4.2 Diagramas TTT e TRC

O objetivo de analisar as transformações que ocorrem em um sistema Fe – Fe₃C, foram desenvolvidas as curvas TTT (tempo, temperatura e transformação), as quais podem ser subdivididas em ITT (*Isothermal Time Transformation*) e CCT ou TRC (*Continuous Cooling Transformation*). Tais curvas são obtidas por meio da utilização do dilatômetro, o qual capta variações no comprimento da amostra, tanto por dilatação térmica quanto por mudanças de fase (SILVA, MEI, 1988).

A decomposição da austenita em ferrita e cementita exige mudanças no retículo cristalino do ferro e também difusão de carbono ao longo da estrutura do material, possibilitando nucleação e crescimento de grãos, demandando tempo. Ao passo que a velocidade de resfriamento aumenta, transformações difusionais passam a ser desfavorecidas, ocorrendo também mudanças de fases sólidas por processos de deformação, ou seja, mecanismos displacivos (CHIAVERINI, 1986); (SILVA, MEI, 1988).

Constituintes não previstos pelo diagrama de equilíbrio, sendo estes a bainita e a martensita, os quais desempenham grande importância quanto às propriedades do aço, uma vez que cada um destes possui morfologia e características únicas (SILVA, MEI, 1988).

O diagrama TRC fornece informações quanto à temperatura na qual há o início de cada transformação de fase, a quantidade obtida, dado uma taxa de resfriamento e a taxa de resfriamento necessária para a transformação martensítica (TOTTEN, HOWES, INOUE, 2002).

A análise da curva TRC torna-se relevante, pois o resfriamento de uma junta soldada é contínuo e dada condição de operação ocorrerá mudanças de fase no material, as quais podem ser previstas e planejadas de acordo a utilização final do aço. Cada um dos constituintes está associado a uma taxa de resfriamento (BRANDI, WAINER, 1992).

4 - ESTADO DA ARTE

Uma equipe baseada na Universidade de Tecnologia de Kaunas, Lituânia buscou analisar comparativamente a microestrutura de juntas soldadas pelo processo GMAW e pelo processo SMAW (Soldagem a arco com eletrodo revestido) em um aço baixo carbono. Para análise, foi realizado ensaio de tração e ensaios micrográficos, a fim de comparar os constituintes e tamanhos de grão formados. Os chanfro em V usinados nos corpos de prova foram soldados em dois passes, para ambos os processamentos. Como resultados, foi discutido que os corpos de prova soldados por GMAW apresentaram tamanhos de grão médios menores do que o processo SMAW, o que proporciona melhores propriedades mecânicas para a junta soldada, sendo comprovado pela menor ductilidade e resistência mecânica das peças processadas por eletrodos revestidos (R. BENDIKIENE, G. JANUSAS, D. ZIZYS, 2015).

A definição dos parâmetros de soldagem é uma etapa essencial para qualquer processamento a ser realizado. Uma equipe da Universidade Tecnológica de Petronas conduziu um estudo para desenvolver equações matemáticas para que definição de parâmetros de soldagem, como velocidade de alimentação do arame, tensão de trabalho e gás de proteção necessária. O objetivo é modelar condições de soldagem para se atingir propriedades mecânicas desejáveis. Tal trabalho se desenvolveu por meio do preenchimento de um chanfro semi-V em um aço médio carbono. Três valores de taxa de alimentação e três valores distintos de tensão de trabalho foram utilizadas. Os ensaios mecânicos realizados foram de dureza e resistência à tração. Como resultado deste trabalho de pesquisa, foram desenvolvidas equações matemáticas passíveis de prever as propriedades mecânicas e profundidade de fusão em função de parâmetros de soldagem de entrada (P. SRINIVASA RAO, PRAGASH RAMACHANDRAN, JEBARAJ S., 2016).

A fim de se modelar experimentalmente os ciclos térmicos envolvidos em um processamento de soldagem, foi desenvolvido um sistema composto por termopares soldados a uma chapa de testes. Após esta preparação, diversos corpos de prova foram soldados e os ciclos térmicos determinados por meio deste sistema de obtenção de dados. Ao se obter tais ciclos dos processos, corpos de prova usinados em tamanho padrão para ensaios mecânicos foram submetidos a uma máquina capaz de promover aquecimento e resfriamento controlados, conforme determinado anteriormente. Por meio disto, foi possível se obter um material com a microestrutura semelhante aos corpos de prova obtidos experimentalmente. Ao se comparar as propriedades mecânicas dos corpos de prova soldados e os submetidos ao ciclo térmico

simulado, foram observadas grandes semelhanças, comprovando a eficácia da câmara de simulação e da veracidade dos ciclos térmicos obtidos de maneira (J. KULHANEK, P. TOMCIK, R. TROJAN, M. JURANEK, P. KLAUS, 2016).

Outro estudo foi desenvolvido para se avaliar a importância dos gases de proteção quanto à qualidade da junta soldada pelo processo GMAW. Para tal, foi construída uma câmara capaz de remover ar por meio de uma bomba de vácuo e então ser completamente preenchida por gás argônio a uma dada temperatura. Os corpos de prova de aço baixo carbono destinado à construção mecânica foram soldados nesta câmara e também fora dela, utilizando-se apenas do gás de proteção proveniente da tocha de solda. Após, todas as amostras foram submetidas a análises metalográficas e de ensaios mecânicos, como ensaio de tração, impacto Charpy, sob diferentes temperaturas e também à microdureza Vickers. Como resultado, foram discutidas que as atmosferas distintas de ensaios promoveram diferentes taxas de resfriamento. Os corpos de prova submetidos à câmara de gás apresentaram maior crescimento médio de grãos. Além disto, não foi identificada nenhuma inclusão ou porosidade gerada por solubilização de gases pelo metal fundido durante o processo de soldagem sob atmosfera controlada. Quanto às propriedades mecânicas, os mesmos apresentaram melhor desempenho quanto ao esforço desenvolvido durante ensaio de tração e tenacidade ao impacto. Dado justificado pelo maior nível de inclusões e porosidade nos corpos de prova soldados fora de atmosfera controlada. Os ensaios de dureza demonstraram maiores valores para os corpos de prova soldados sob condições normais, sendo justificado pela maior taxa de resfriamento ao qual foram submetidos, promovendo a formação de microestruturas por deformação plástica e consequentemente gerando constituintes com maiores valores de dureza (K. RAMAZAN, K. KORAY, 2005).

O estudo do efeito das distorções causadas pela técnica de multipasses de soldagem foi analisado comparativamente entre o método de elementos finitos e também experimentalmente. O corpo de prova de aço baixa liga foi usinado a se obter juntas de topo do tipo V e também de ângulo. Foram determinadas duas sequências distintas de soldagem do material em análise, o qual consistia em duas chapas a serem primeiramente soldadas por uma junta de entre a outra, e havendo em cada estrutura a ser soldada, uma junta de ângulo de filete duplo. Como resultado, foi observado que a distorção calculada e prevista pelo software foram similares às obtidas experimentalmente. Tais distorções variaram entre 1,82 mm e 4,44 mm; o lado a ser soldado primeiramente na junta de ângulo apresentou maior distorção quando comparado ao seguinte da ordem de soldagem. A sequência “de fora para dentro”, ou

seja, partindo das flanges externas para as internas, gerou menores distorções em relação ao sentido e ordem opostos de soldagem. Somado a isto, as pequenas variações de resultados observadas podem ser resultantes de heterogeneidades do material, variações geométricas do material e flutuação de parâmetros de processo (M.H.P. YUPITER, L. N. ROBERT, et al.,2015).

Foi estudada a consequência do uso de pré-aquecimento, pós-aquecimento e da técnica multipasses para o processamento GMAW sob a microestrutura e propriedades mecânicas de um aço micro ligado. As etapas de pesquisa se deram pela confecção dos corpos de prova, os quais foram submetidos ao processamento de soldagem de maneiras distintas. Alguns corpos de prova foram soldados por passe único, sem pré-aquecimento, outros com este tratamento térmico e outros corpos de prova foram soldados utilizando-se a técnica multipasses. Após este procedimento, foram realizados ensaios mecânicos de microdureza, tração e fadiga, além de análises micrográficas. Somado a isso, foram realizados tratamentos de pós-aquecimento em diversos corpos de prova e os ensaios mecânicos foram repetidos, a fim de analisar o efeito deste procedimento. O pré-aquecimento foi responsável por um aumento no tamanho da zona termicamente afetada, o que pode resultar em uma melhor distribuição de tensões e solicitações na junta. Foi observado que os tratamentos térmicos pós-soldagem resultaram em um aumento significativo, em torno de 14% da dureza apresentada na ZTA (A. MARTINEZ, V. MIGUEL, et al, 2011).

O efeito de diferentes temperaturas de pré-aquecimento para o processo de soldagem GMAW em aço alto carbono com 0,85% de Mn e 0,405% de Si, utilizado para construção de linhas férreas foi estudado. Para tal, foram usinadas cavidades na cabeça de trilhos removidos da linha férrea. Os corpos de prova sofreram pré-aquecimentos a temperaturas entre 200° a 400°, além de um corpo de prova soldado a temperatura ambiente, para fins comparativos. A técnica multipasses foi aplicada junta ao processo GMAW. Após o processamento de preenchimento dos canais, o excesso de material foi removido. As análises relevantes se deram por meio do levantamento do perfil de durezas, ensaio de tração e ensaios de impacto, somados a ensaios metalográficos. Os ensaios realizados mostraram que não houve diferenças significativas na microestrutura e nas propriedades mecânicas dos corpos de prova ensaiados sob diferentes condições de pré-aquecimento. A microestrutura dos mesmos consistiu majoritariamente de ferrita acicular e bainita, ao passo que o corpo de prova sem pré-aquecimento apresentou bainita e martensita, podendo ser relacionado a propriedades mecânicas inferiores quando comparada às demais. Portanto, uma vez que não houve

diferenças significativas entre os materiais ensaiados, o pré-aquecimento de aproximadamente de 200° torna-se interessante, uma vez que demanda menor consumo energético (Heshmat A. Aglan et al, 2013).

O estudo da fadiga considerando tensões residuais para juntas soldadas pela técnica multipasses do processo GMAW foi realizado de maneira a buscar compreender a vida útil à fadiga em um aço baixo carbono. O procedimento se deu primeiramente pela estimativa computacional dos padrões de tensão residual em processamentos de soldagem para as geometrias definidas. Em sequência, a estimativa da vida útil do elemento foi calculada levando-se em conta a influência destas tensões na zona crítica. Os dados calculados pelo método de elementos finitos foram comparados a experimentos realizados e testados quanto à resistência a tração e a fadiga. Como resultado, foi possível observar que a metodologia de análise por elementos finitos obteve resultados para a estimativa de vida útil do componente com erros muito inferiores aos citados em bibliografia, girando em torno de 15% para as configurações de juntas propostas. Portanto, esta sequência de procedimentos pode ser utilizada, em cenários conservadores, para estimar a vida útil de componentes e projetar juntas que possam apresentar características ótimas (A. LOPEZ-JAUREGI, J.A. ESNAOLA, et al.2015).

A análise do desenvolvimento de fraturas e resistência à fadiga em trilhos reparados pelo método *slot welding* foi realizada. Para tal, análises realizadas pelo método de elementos finitos foram comparadas a ensaios realizados com pré-aquecimento de um aço alto carbono utilizado para construção de trilhos. A fim de se caracterizar o material pós-procedimento de soldagem, foram realizados ensaios mecânicos de dureza, tração e fadiga, além de análises micrográficas. A partir da análise do método de elementos finitos, foi possível estimar a ZTA em 15 mm e a zona de fusão em 5mm. Somado a isso, observou-se que não houve fusão suficiente entre o metal de adição e o metal base, sendo necessária a realização de ajuste de parâmetros de soldagem, como a energia do processo e a velocidade de resfriamento. Quanto às propriedades mecânicas, o metal da zona fundida apresentou baixos valores de dureza, dada sua microestrutura constituída basicamente de ferrita (FATEH, M., 2014).

A fratura resultante pelo crescimento de trincas em um aço médio carbono reparado foi objeto de estudo, a fim de determinar a causa e o efeito de tensões residuais como causas de tais falhas. Para este propósito, corpos de prova que apresentaram trincas foram submetidos a ensaios químicos, visuais e de microdureza, com o propósito de enriquecer as condições de

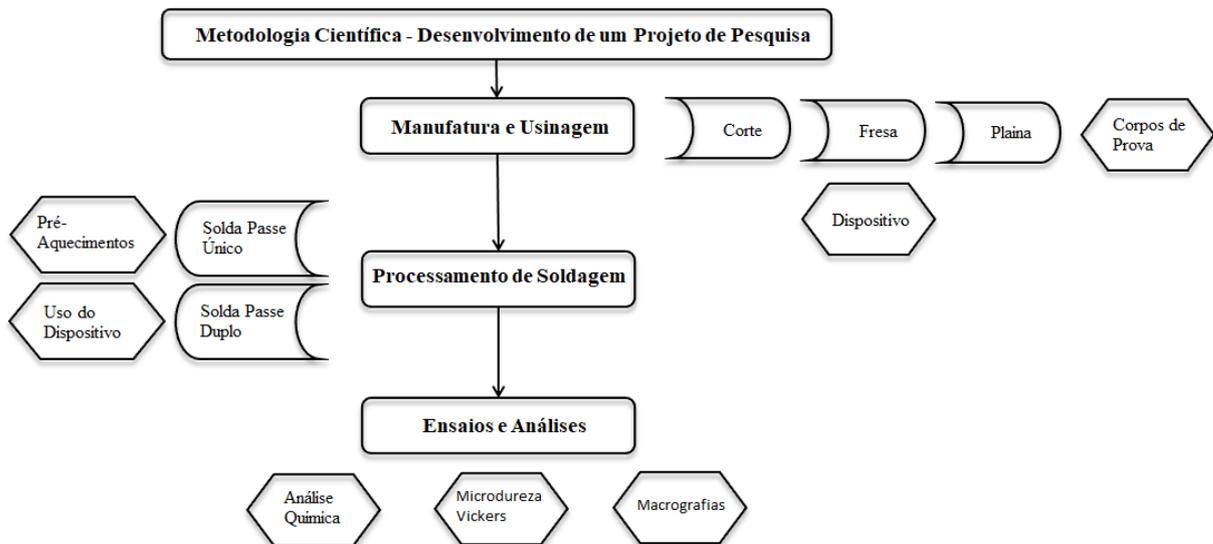
contorno estabelecidas para a metodologia de elementos finitos. Pode-se observar que as trincas foram originadas na interface do metal de adição e a ZTA, sendo que a diferença entre os valores de dureza das zonas de soldagem podem ser um fator que impacta negativamente na resistência à nucleação e propagação de trincas no material. As análises realizadas pelo método de elementos finitos, juntamente com as conclusões obtidas de processo experimental puderam levar a algumas conclusões, sendo elas: porosidades, diferenças bruscas na dureza do material, transição na composição química e microestrutural do material e tensões residuais de tração foram causas de falhas na estrutura dos trilhos. É possível reverter as tensões residuais para o sentido de compressão ao se aplicar uma carga após o procedimento de reparo, o que aumenta a vida útil do componente renovado. Somado a isso, o reparo realizado com 10 mm de profundidade apresentou maior vida útil pós-processamento (H. JUN, et al.. 2016).

5 – METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa aplicada a este trabalho pode ser dividida em três etapas:

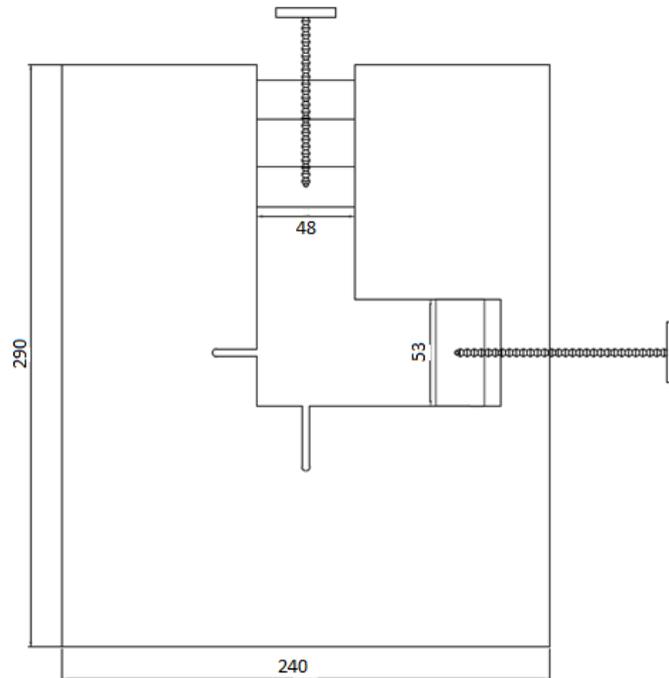
Figura 21 – Fluxograma de Pesquisa

- Confeção de dispositivo fixador e preparo dos corpos de prova;
- Soldagem dos corpos de provas com diferentes parâmetros;
- Análise metalográfica e aquisição do perfil de dureza.

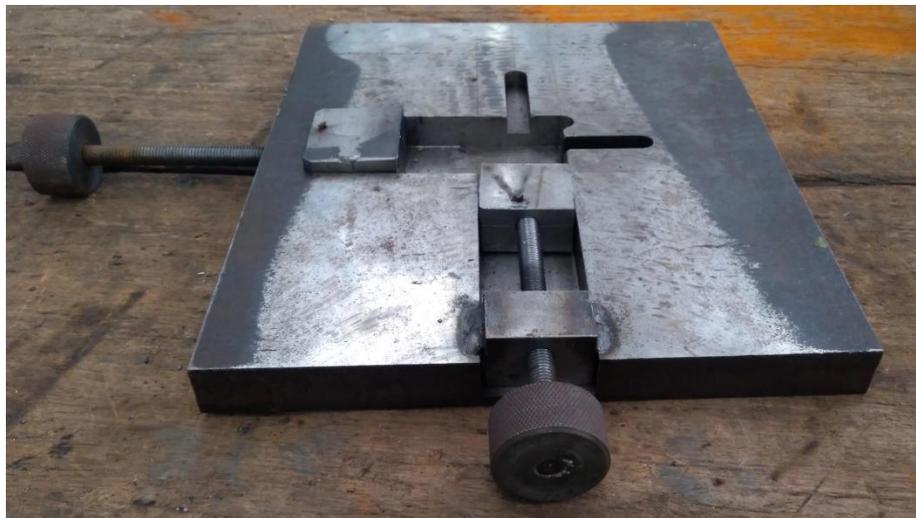


5.1 Confeção do dispositivo fixador e dos corpos de prova

Foi desenvolvido um dispositivo simulador de soldagem de componentes de médio porte, o qual consiste em um corpo de aço maciço com fixadores móveis, possibilitando o seu uso por corpos de provas com dimensões distintas. Uma vez que condições normais de soldagem de união de peças ou de reparo normalmente envolvem elementos de grandes dimensões, o dispositivo simula tal situação e ao mesmo tempo aperfeiçoa o processamento de soldagem dos corpos de prova. Ao atuar como um trocador de calor, aumentando a taxa de resfriamento do processo e possivelmente resultando em ZTAs mais próximas das situações reais e conseqüentemente, gerando uma análise mais completa das conseqüências causadas por alterações dos parâmetros de soldagem., mostrados pelas Figuras 22 e 23.

Figura 22 – Desenho esquemático fixador

Fonte: Autor.

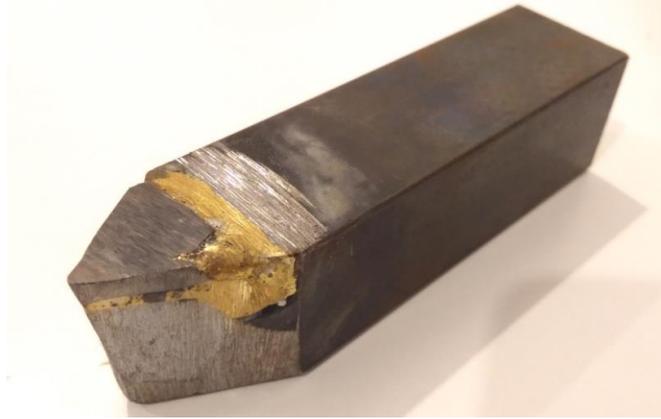
Figura 23 – Foto do dispositivo fixador

Fonte: Autor.

A confecção dos corpos de prova teve início com o corte transversal ao eixo longitudinal de um trilho. Após algumas etapas de corte na serra-fita, os corpos de prova sofreram uma sequência de processamento de fresagem, de modo a adquirirem um formato de paralelepípedo com as seguintes dimensões: 20 mm de altura, 75mm de comprimento e 50 mm de largura, como mostrado nas Figuras 25 e 26. A fim de simular uma situação mais

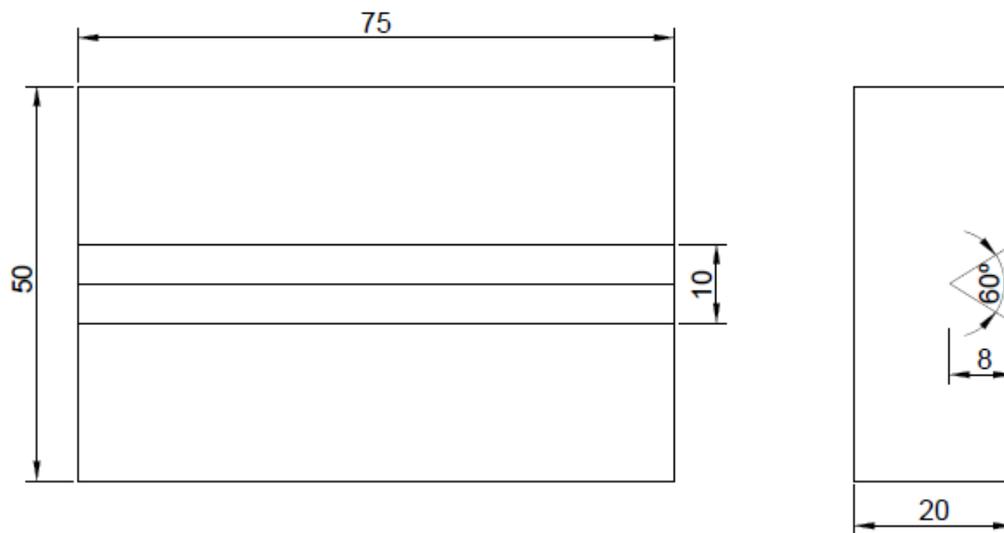
próxima do real, foi usinado um canal chanfrado ao longo do comprimento da peça, por meio do uso da plaina e uma ferramenta, mostrada pela Figura 24, confeccionada para exercer esta função, com o ângulo de aproximadamente 60° . As medidas do chanfro são dadas por 8 mm de profundidade e abertura total de aproximadamente 10mm.

Figura 24 – Ferramenta para usinar canais



Fonte: Autor.

Figura 25 – Desenho dos corpos de prova – vistas superior e lateral



Fonte: Autor.

Figura 26 – Corpo de Prova

Fonte: Autor.

O processo de usinagem, ainda mais se tratando de um aço alto carbono como objeto de estudo, é capaz de alterar a microestrutura do mesmo, além de, por meio da deformação plástica, gerar uma grande concentração de linhas de discordâncias, aumentando a susceptibilidade do material a sofrer trincas. Dado tal fato e somado ao intuito de se determinar uma padronização dos corpos de prova a serem soldados, foi realizado o tratamento térmico de normalização. O tratamento térmico das peças seguiu a seguinte metodologia: aquecimento dos corpos de prova juntamente com o forno, até que o mesmo atingisse a temperatura de 850°C, seguido por um tempo de encharque de 15 minutos, e resfriamento ao ar durante as próximas horas.

A temperabilidade do aço é calculada pela equação abaixo:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%P}{3} \quad (2)$$

5.2 Soldagem dos corpos de provas

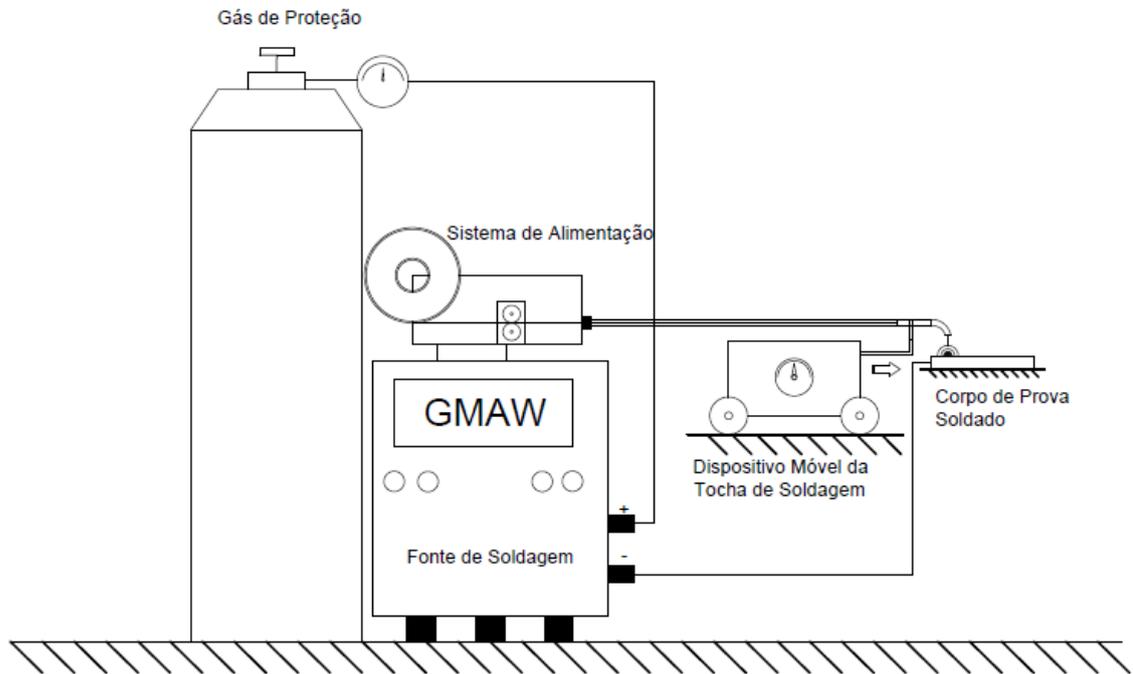
Os corpos de provas confeccionados foram separados em duas matrizes de teste, de modo a comparar duas variações de parâmetros de soldagem. A primeira matriz é a que compara o efeito do pré-aquecimento dos corpos de prova. A segunda matriz possibilita a análise das consequências geradas pelo uso da técnica multipasses em contraste com o preenchimento do chanfro em passe único, sem o uso de pré-aquecimento. Por fim, foi soldado um corpo de prova sem o uso do dispositivo com a aplicação da técnica multipasses. Estes dados são apresentados Tabela 3.

Tabela 3 – Identificação Corpos de Prova

Matriz de Corpos de Prova			
Corpo de Prova	Processo de Soldagem	Pré-Aquecimento	Uso do Dispositivo
1	Passe único	Sem pré-aquecimento	Sim
2	Passe único	Aquecimento a 200°C	Sim
3	Passe único	Aquecimento a 250°C	Sim
4	Passe único	Aquecimento a 300°C	Sim
5	Passe duplo	Sem pré-aquecimento	Sim
6	Passe duplo	Sem pré-aquecimento	Não

É certo que a qualidade de um processamento de soldagem depende de alguns fatores críticos, como a boa definição de parâmetros de soldagem, dentre eles a velocidade de alimentação do arame (relacionado à corrente de trabalho), a tensão em vazio, o gás de proteção utilizado e a habilidade do soldador.

Quanto ao fator habilidade do soldador, a fim de aumentar a exatidão do processo, o que garante padronização do mesmo, foi desenvolvido um sistema automatizado de deslocamento da tocha de soldagem. O sistema consiste em um braço com um acoplador da tocha de soldagem ligado a um motor elétrico com velocidade ajustável, o qual irá se locomover ao longo de um trilho. Como mostrado pelo desenho esquemático e pelas Figura 27 e 28.

Figura 27 – Desenho esquemático do processo de soldagem

Fonte: Autor.

Figura 28 – Processo de soldagem automatizado

Fonte: Autor.

Uma curva de calibração foi determinada para a velocidade de movimentação do suporte, fator este que será dado em função da velocidade de alimentação do arame e do volume a ser preenchido no canal do corpo de prova, conforme as equações a seguir:

$$\forall V = v \times A \quad (3)$$

Na qual:

- $\forall V =$ Taxa de Alimentação $[\frac{\text{mm}^3}{\text{min}}]$;
- $v =$ Velocidade de Alimentação $[\frac{\text{m}}{\text{min}}]$;
- $A =$ Área do arame $[\text{mm}^2]$.

$$V_d = \frac{\forall V}{A_c} \quad (4)$$

Na qual:

- $V_d =$ Velocidade de deslocamento da tocha $[\frac{\text{mm}}{\text{min}}]$;
- $\forall V =$ Taxa de Alimentação $[\frac{\text{mm}^3}{\text{min}}]$;
- $A_c =$ Área do canal $[\text{mm}^2]$.

É possível perceber que para se preencher o chanfro em dois passes, a velocidade de deslocamento do sistema automatizado deve ser o dobro em relação à utilizada para soldar em um passe único. Após a definição das velocidades de preenchimento do chanfro, os corpos de prova a serem soldados são anexados ao dispositivo fixador e então posicionados de forma a se dar início o processo de soldagem.

O transporte das peças pré-aquecidas do forno até o local de soldagem foi realizado em uma caixa metálica adaptada. As adaptações consistiram no posicionamento de tijolos refratários, formando um forro e uma tampa. Tal meio de transporte minimiza as perdas de calor por convecção, reduzindo as perdas térmicas da peça. As especificações da máquina de soldagem e a sua definição de parâmetros é demonstrada na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificações do procedimento de soldagem

Equipamento de Soldagem	
Fabricante	Lincoln Electric
Fonte	CF45
Alimentador	S350 Power Saver
Parâmetros de Soldagem	
Alimentação	5 m/min
Corrente Média de Trabalho	Aprox. 200 A
Tensão em vazio	23 V
Indutância	Posição 0
Gás de Proteção	80% Ar + 20% CO ₂
Vazão do gás	15 l/min
Preflow	1s
Stick – out	5,5 mm
Especificação Arame	ER70S6 – Ø 1mm
Velocidade de deslocamento	113 mm/min e 226 mm/min

Tabela 5 - Especificação do arame cobreado

Designação Arame	Composição Química (%)			
	Carbono	Silício	Manganês	Cobre
ER70S-6	0,06 - 0,15	0,8 - 1,15	1,4 - 1,85	0,5

Após cada processo de soldagem realizado, os corpos de prova foram deixados no dispositivo ao longo de 3 minutos, a fim de permitir trocas de calor por condução. Tempo similar ao definido como o intervalo entre os multipasses.

Figura 29 - Corpo de Prova pós-procedimento

Fonte: Autor.

5.3 Análises metalográficas e aquisição do perfil de durezas

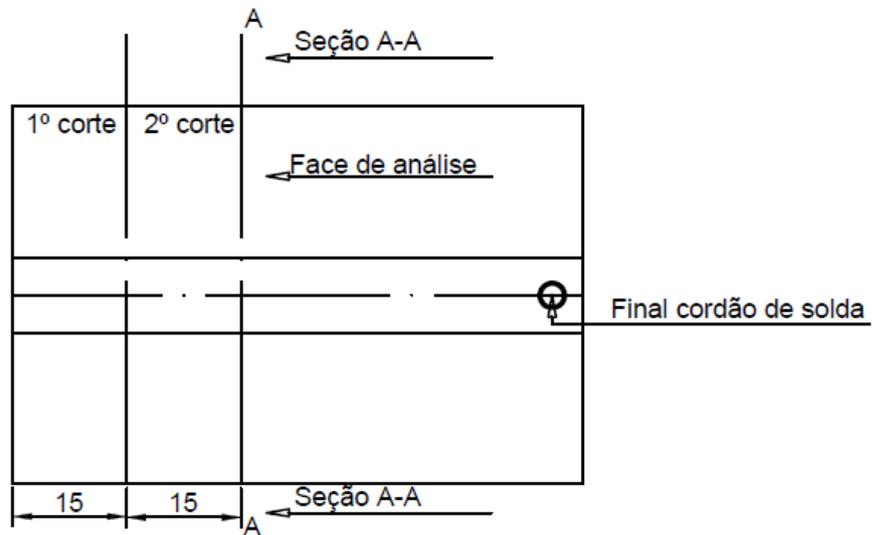
O primeiro ensaio realizado no material utilizado foi o de Espectroscopia de Emissão Ótica. Tal ensaio tem como objetivo a determinação tanto qualitativa como quantitativa da composição química do material analisado. As especificações do equipamento estão dispostas na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros de ensaio de análise química

Espectroscopia de Emissão Ótica	
Fabricante	OXFORD Instrumentos
Modelo	Foundry-Master Xpert
Calibração	ZAF Sistemas Analíticos (21/02/2017 a 21/08/2017)

A etapa seguinte de análise dos corpos de prova foi dada pelas análises metalográficas. O processo se deu por meio do corte dos corpos de prova soldados, a fim de revelar a seção transversal do mesmo. A sequência de corte foi feita de acordo com as Figuras 30 e 31m

Figura 30 – Desenho esquemático da sequência de cortes



Fonte: Autor.

Figura 31 – Corpo de Prova Seccionado



Fonte: Autor.

Após as etapas de corte, todos os corpos de prova foram retificados a fim de se obter uma superfície com um acabamento ótimo, o que permite ao reagente ser mais efetivo e revelar com mais intensidade a área atacada. O reagente utilizado foi Nital, a 10%, sendo o tempo de ataque do corpo de prova de aproximadamente 5s.

Uma vez reveladas as áreas relevantes para a análise, ou seja, a zona fundida, ZTA e o metal base, o corpo de prova foi fotografado e digitalizado, com o objetivo de se medir a área real de cada uma destas regiões por meio de um software. O objetivo desta etapa de processo é

verificar o efeito da variação da sequência de processo e parâmetros de soldagem no tamanho das mesmas.

Após tal procedimento, foi realizada a micrografia. Esta se deu pelo corte dos corpos de prova, a fim de embuti-los a frio e então realizar as análises no microscópio óptico com o aumento de 400x.

Em sequência, foi realizado o levantamento de propriedades mecânicas do material soldado, por meio do ensaio de microdureza. O equipamento e os parâmetros utilizados estão descritos na Figura 32 e Tabela 7.

Tabela 7 - Especificações Microdureza

Microdureza Vickers	
Fabricante	Shimadzu
Modelo	HMV
Carga	2,942 N
Tempo	15 s
Passe	0,3 mm
Passe ZTA	0,15 mm

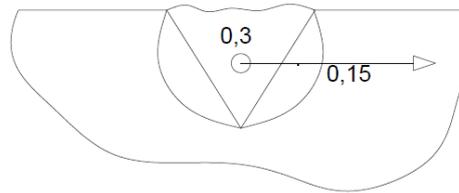
Figura 32 – Microdurômetro Vickers



Fonte: Autor.

A fim de se levantar o perfil de durezas ao longo das zonas de interesse, os dados foram coletados a partir do centro da zona fundida, passando pela ZTA e então alcançando o metal base, conforme o desenho esquemático abaixo. O passe dado entre cada coleta de dados foi de 0,3mm e ao atingir a zona termicamente afetada, o passe foi reduzido para 0,15mm, com a finalidade de aumentar a apuração e então confiabilidade dos dados, como mostrado na Figura 33.

Figura 33 – Desenho esquemático da sequência de obtenção de dados



6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado obtido pela espectroscopia de emissão óptica confirmou o fato de o aço possuir alto teor de carbono, como mostrado pela Tabela 8.

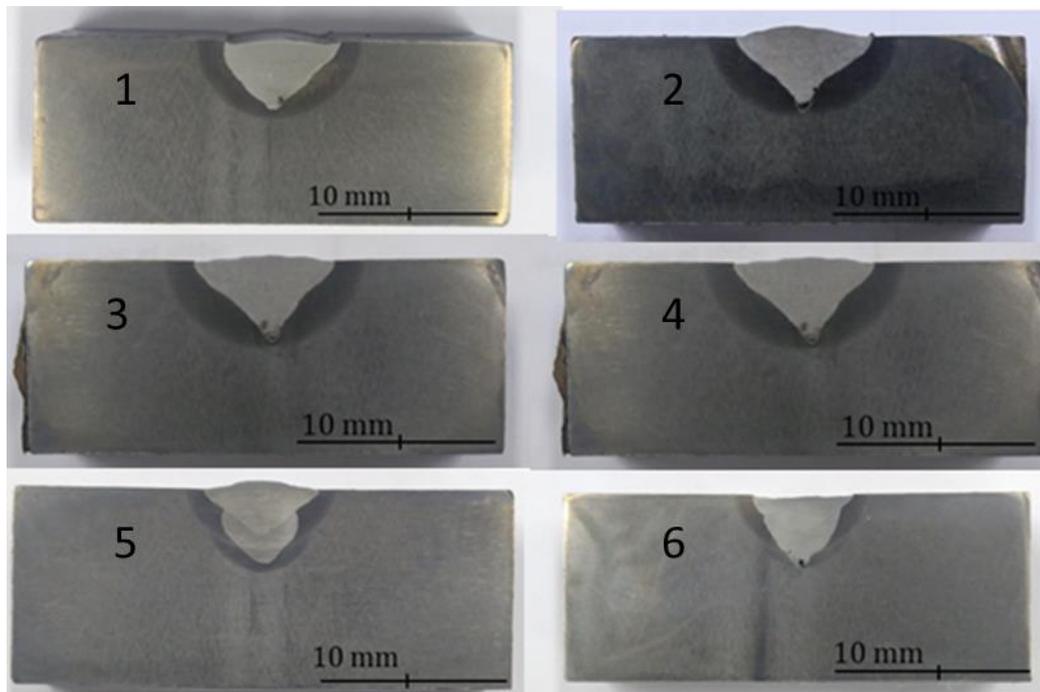
Tabela 8 – Resultado espectroscopia de emissão ótica

Composição química do aço analisado (%)									
Elementos	Ferro	Carbono	Silício	Cromo	Manganês	Molibdênio	Níquel	Cobre	Fósforo
-	97,9	0,636	0,31	0,0261	0,969	0,0050	0,0127	0,0021	0,0182

Em posse dessas informações, o Carbono Equivalente do material estudado foi calculado, obtendo-se o valor de 0,81. Este valor comprova a temperabilidade do aço, sendo este passível de gerar estruturas martensíticas na zona termicamente afetada da junta soldada, além de ser mais susceptível à formação de trincas durante o processo de solidificação do material.

As imagens digitalizadas das macrografias são mostradas na Figura 34.

Figura 34 – Macrografias dos Corpos de Prova



Fonte: Autor.

É possível observar que em alguns corpos de prova houve falta de penetração do cordão de solda. Tal ocorrido pode ter sido gerado por falta de aporte térmico necessário para fundir o

metal base. Uma solução plausível para este problema pode ser dada pela alteração dos parâmetros de soldagem, como a taxa de alimentação do arame.

É possível notar que houve falta de reforço do cordão de solda no corpo de prova 6. Este fato ocorreu devido a maior velocidade de deslocamento da tocha de soldagem, acarretando em um menor aporte térmico à peça, o que gerou falta de penetração do cordão.

Através do uso do software AutoCAD, foi possível estimar a área da ZTA para cada um dos corpos de prova analisados, sendo compilados na Tabela 9.

Tabela 9 – Áreas estimadas das ZTAs

Corpo de Prova	Área estimada (mm ²)
1	57,6
2	78,4
3	78,9
4	81,4
5	38,0
6	32,4

Em posse disto, é possível observar que para os corpos de prova soldados pelo procedimento de passe único, a ZTA aumentou em função do pré-aquecimento realizado, sendo cada vez maior quanto maior a temperatura utilizada. Este dado é coerente com o esperado, visto que o aporte térmico envolvido no processo impacta diretamente na dimensão da área de análise. Em se tratando dos corpos de prova soldados pelo procedimento de passe duplo, nota-se que as ZTAs apresentaram áreas menores em comparação ao procedimento anterior. Ao se comparar os corpos de prova soldados pela técnica multipasses, é possível observar que a ZTA gerada no corpo de prova que sofreu menor aporte térmico foi menor, comprovando a relação direta entre estas grandezas.

As áreas da zona fundida de alguns corpos de prova estão apresentadas na Tabela 10.

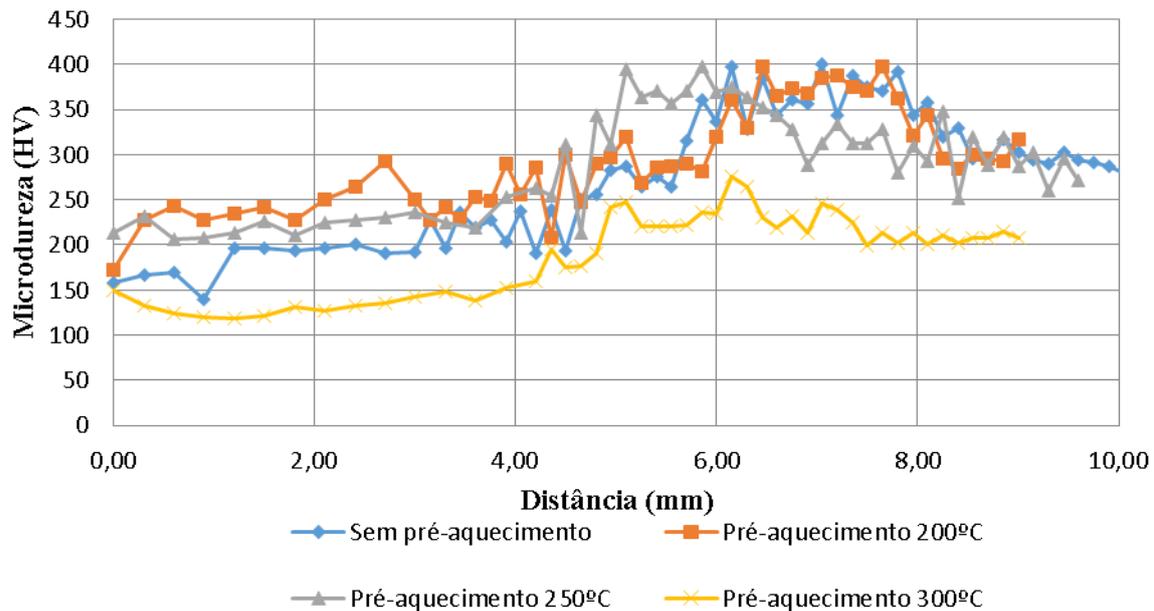
Tabela 10 – Área zona fundida

Corpo de Prova	Área estimada (mm ²)
1	59,6
4	60,3
6	44,9

Esta informação é relevante para mostrar o efeito do aporte térmico quanto ao tamanho da zona fundida. É possível perceber que a diferença entre os corpos de prova 1 e 4 não foi muito alta, mostrando que o pré-aquecimento teve efeito mais significativo apenas quanto ao tamanho da ZTA somente. Já o corpo de prova 6, o qual foi soldado com uma maior velocidade de deslocamento da tocha, e conseqüentemente menor aporte térmico, é possível notar uma diminuição no tamanho da zona fundida, redução fortemente impactada pela ausência de reforço do cordão de solda.

Os perfis de microdureza exibem a variação de propriedades mecânicas do corpo de prova em função da posição do qual foi obtido, partindo do centro da zona fundida, passando pela ZTA e alcançando o metal base. Os resultados obtidos para o procedimento de passe único são mostrados pela Figura 35.

Figura 35 – Perfis de dureza para o procedimento de passe único

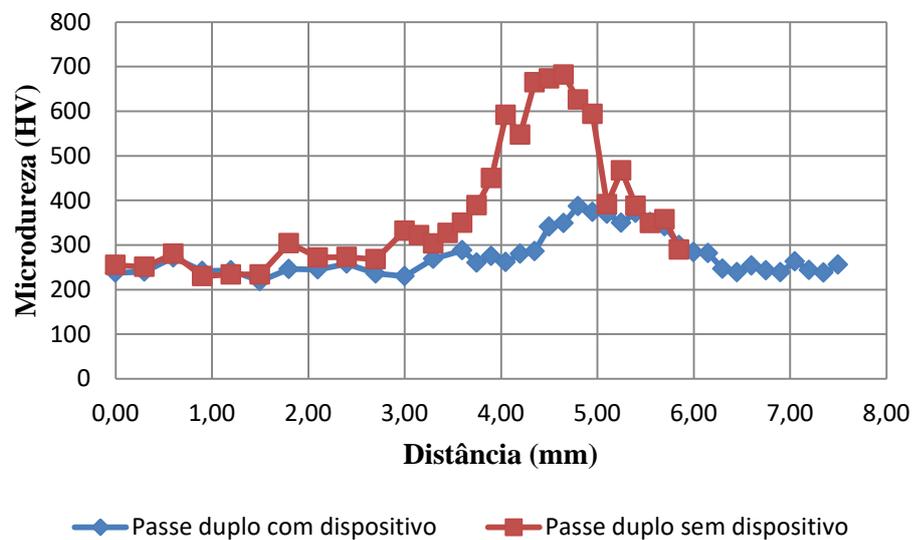


Os gráficos acima demonstram que o pré-aquecimento de até 250°C desenvolve propriedades mecânicas semelhantes em comparação à ausência do mesmo. É possível notar que os picos de dureza encontrados na ZTA foram de aproximadamente 400HV.

A análise do perfil de microdureza permite inferir que houve alterações significativas apenas com o uso do pré-aquecimento de 300°C, o qual pode ter sido responsável por uma menor

taxa de resfriamento do corpo de prova. A influência de tal pré-aquecimento é notada uma vez que a variação da propriedade de dureza foi a menor dentre os demais. O valor máximo de dureza, na ZTA, foi de 275HV, ao passo que os demais corpos de prova atingiram valores próximos de 400HV. Uma variação brusca de propriedades na estrutura de um componente metálico é um fator facilitador de iniciação e propagação de trincas, o que pode impactar diretamente a vida útil de componentes submetidos a esforços mecânicos, seja estático ou dinâmico.

Figura 36 - Perfil de Microdureza Corpo de Prova Duplo Passe com e sem dispositivo



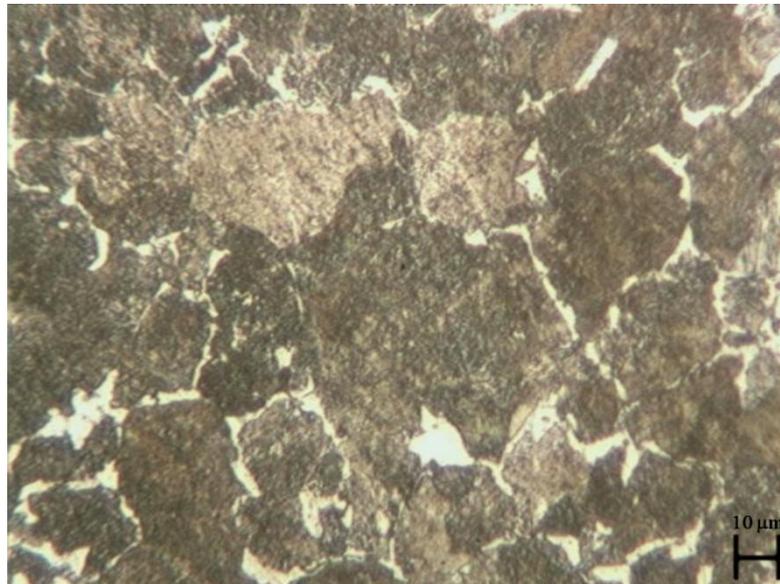
Ao se analisar a Figura 36 e compará-lo à Figura 35, nota-se uma diminuição média dos valores de dureza da ZTA obtida pelo uso da técnica multipasses. Isto mostra que o uso desta técnica é vantajoso em contraponto ao uso do passe único sem pré-aquecimento, uma vez que causa uma ligeira diminuição de tal propriedade mecânica, além de diminuir o tamanho da ZTA. Outra vantagem observada foi a penetração correta do cordão de solda, sendo vantajosa a utilização do multipasses para o preenchimento de canais com elevado volume.

A análise da Figura 36 também mostra que o menor aporte térmico ao qual o corpo de prova foi submetido, dada menor velocidade de deslocamento da tocha de soldagem gerou um resfriamento mais rápido do mesmo, o que pode ter levado à formação de constituintes metaestáveis de elevada dureza. É relevante discutir que o tamanho em da ZTA não é determinante para a qualidade de uma junta soldada, uma vez que a microestrutura da mesma pode ser prejudicial ao uso do componente, apresentando uma variação muito alta de propriedades mecânicas.

É visto na bibliografia que operações de soldagem de ideais não causam efeitos significativos na estrutura de um material, caracterizadas com descontinuidades. Tais descontinuidades, neste caso, podem ser consideradas como diferenças microestruturais e das propriedades mecânicas nas zonas de transição. É necessário determinar um balanço entre estas as quais seja considerada tolerável para seu uso fim.

A fim de se analisar as diferenças microestruturais geradas, foi realizada a micrografia dos corpos de prova 4 e 6, ou seja, o que apresentou maior ZTA e menor variação de propriedade contraposto ao que apresentou menor ZTA e maior variação de dureza, sendo apresentadas a nas Figuras 37 a 41

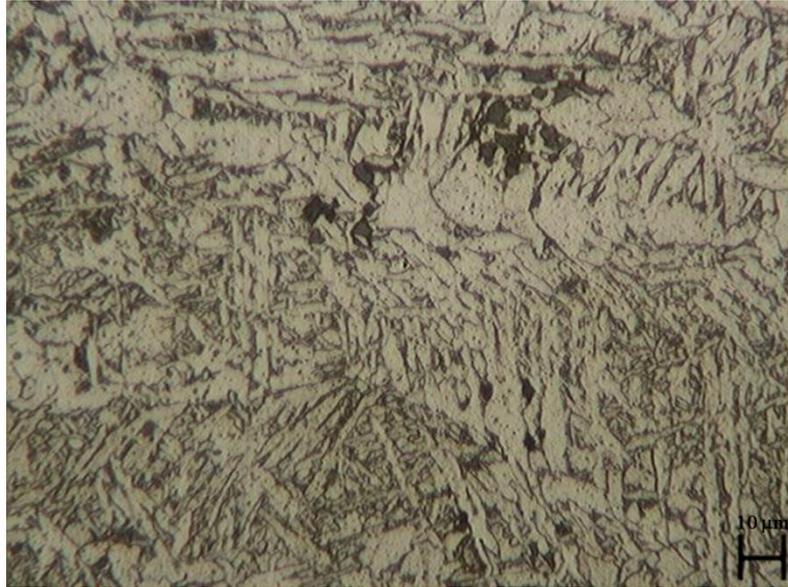
Figura 37 – Micrografia do metal base



Fonte: Autor.

A Figura 37 corresponde ao metal base das amostras, sendo possível observar a presença de colônias de perlita e ferrita, o que é esperado para um aço SAE 1070, de composição química pró-eutetóide.

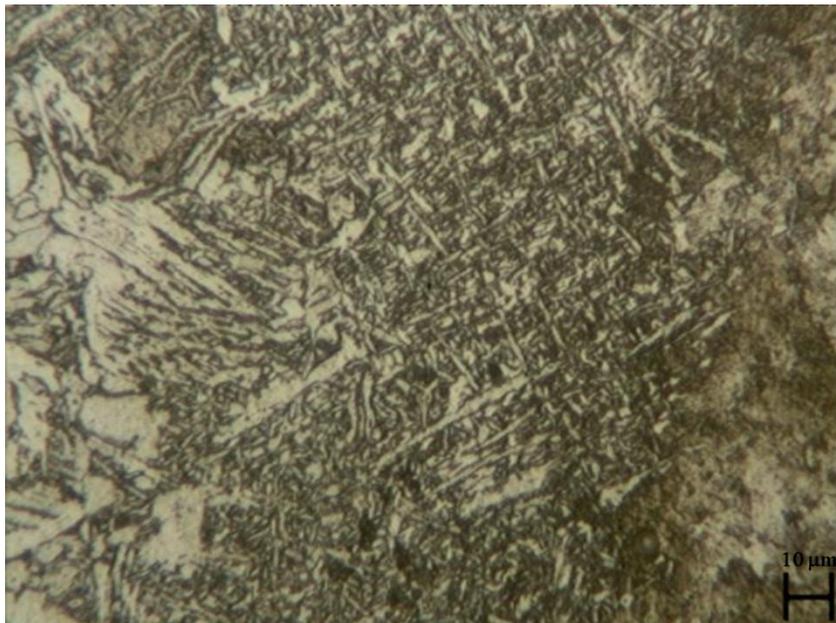
Figura 38 – Micrografia CP Pré-aquecido a 300°C



Fonte: Autor.

A Figura 38 mostra a zona fundida do corpo de prova pré-aquecido a 300°C. É possível perceber que há boa diluição na zona fundida, sendo esta composta por colônias de perlita com possíveis ferritas de Widmanstatten. Tal estrutura é formada graças ao grande aporte térmico ao qual esta região é submetida e por um resfriamento longo o suficiente para permitir processos difusivos e a organização cristalina dos elementos presentes.

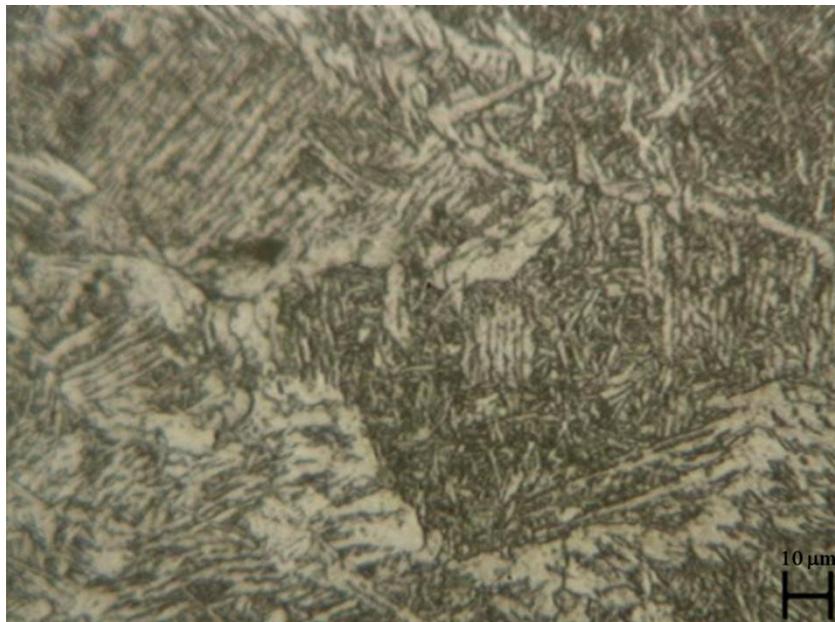
Figura 39 – Micrografia CP Pré-aquecido a 300°C



Fonte: Autor

A Figura 39 mostra a ZTA do corpo de prova submetido ao procedimento de soldagem por passe único, com pré-aquecimento de 300°C. É possível observar a presença, ao lado esquerdo, colônias de perlita e ferritas de contorno de grão, seguida pela ZTA, a qual apresenta estruturas martensíticas e então a zona de transição intercrítica. Essa diferença microestrutural é causada pela velocidade de resfriamento ao qual a seção do material foi submetida. Nota-se que o gradiente térmico de resfriamento é maior na zona central da imagem, dada a formação de uma microestrutura metaestável, a qual foi revenida, sendo esta comprovada pela propriedades mecânicas demonstradas na Figura 35.

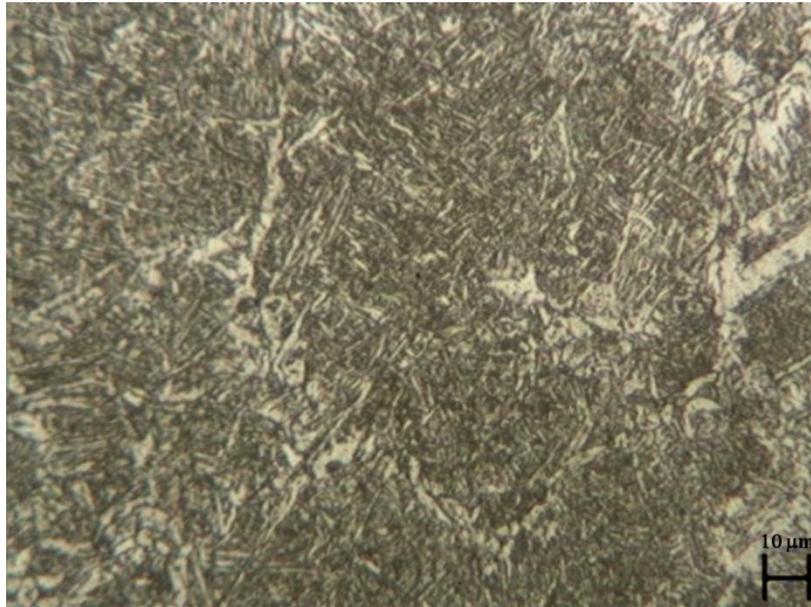
Figura 370 – Micrografia CP multipasses



Fonte: Autor.

A Figura 40 mostra a transição entre a zona fundida e a ZTA do corpo de prova em análise. Nota-se a transição de colônias de perlitas e ferritas para martensitas, sendo estas presentes devido às altas taxas de resfriamento e a composição química do aço, o qual apresenta carbono o suficiente para possibilitar a formação de microestruturas por processos displacivos.

Figura 41 - Micrografia CP multipasses



Fonte: Autor.

A Figura 41 mostra a ZTA do corpo de prova submetido ao procedimento de multipasses. É possível observar a presença de martensitas de alta dureza, fato este mostrado na Figura 36, apontando valores superiores a 700HV.

7 – CONCLUSÕES

Observando-se os resultados obtidos, é possível afirmar que o dispositivo desenvolvido possibilitou a simulação de componentes de médio porte. A ferramenta desenvolvida para a usinagem de canais cumpriu com o objetivo proposto, formando canais uniformes nos corpos de prova utilizados. Estes foram usinados e tratados termicamente de modo a sistematizar o estudo. O sistema mecanizado para a soldagem dos permitiu exatidão e também precisão do processamento, garantindo que os corpos de prova fossem submetidos às mesmas condições.

A soldagem multipasses em comparação ao passe único se mostrou vantajosa, uma vez que não houve falta de penetração, as propriedades mecânicas a um nível inferior, além de ter apresentado uma ZTA com menor área. O pré-aquecimento se mostrou eficaz quando realizado a 300°C, uma vez que apresentou menores variações de propriedades, além de estas terem alcançados picos inferiores em relação às demais.

A análise do corpo de prova soldado com menor aporte térmico apresentou a menor ZTA dentre todos os outros, porém com maior dureza na zona de transição, havendo uma variação significativa de propriedades. Isto mostra que é necessário buscar um balanço entre propriedades mecânicas e o tamanho da ZTA, a fim de gerar a menor variação possível na estrutura do componente, de forma a garantir a maior vida útil para seu uso.

O estudo também contribuiu para a análise de parâmetros interdependentes em um procedimento de soldagem GMAW quanto às propriedades finais de um aço alto carbono. A definição correta e ideal de parâmetros de soldagem deve ser tal que proporcione o melhor desempenho de um componente mecânico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAK, M.; MANDAL, N.r.. Numerical and experimental study of mitigation of welding distortion. **Applied Mathematical Modelling**, [s.l.], v. 34, n. 1, p.146-158, jan. 2010. Elsevier BV.

AGLAN, Heshmat A. et al. Effect of Preheating Temperature on the Mechanical and Fracture Properties of Welded Pearlitic Rail Steels. **Engineering**, [s.l.], v. 05, n. 11, p.837-843, 2013. Scientific Research Publishing, Inc.,.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aços Carbono e Ligados para Construção Mecânica - Designação e Composição Química**, NBR NM 87/2000. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Critério de Classificação dos Aços**, NBR NM 172/2000. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais Metálicos – Dureza Vickers. Parte 1 – Medição de Dureza Vickers**. NBR NM 188-1. Rio de Janeiro.

BRANDI, S; WAINER, E. **Soldagem – Processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda. 1992.

BENDIKIENE, R., JANUSAS, G., ZIZYS, D. Comparative analysis of microstructure and quality of gas metal arc welded and shielded metal arc welded joints. **MECHANIKA**, Lithuania v. 21 n.4, 2015.

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 2002;

CHIAVERINI, Vincente. **Aços e Ferros Fundidos**. Ed. São Paulo-SP: MacGraw-Hill, 1986.

CHIAVERINI, Vincente. **Tecnologia Mecânica – Processos de Fabricação e Tratamento - Volume II 2**. Ed. São Paulo-SP: MacGraw-Hill, 1986.

JHA, R., JHA, A.K. Influence of Welding Current and Joint Design on the Tensile Properties of SMAW Welded Mild Steel Joints. **INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH AND APPLICATIONS**, v. 4 n. 6, 2014.

JUN, Hyun-kyu et al. Fracture and fatigue crack growth analyses on a weld-repaired railway rail. **Engineering Failure Analysis**, [s.l.], v. 59, p.478-492, jan. 2016. Elsevier BV.

KAÇAR, Ramazan; KÖKEMLI, Koray. Effect of controlled atmosphere on the mig-mag arc weldment properties. **Materials & Design**, [s.l.], v. 26, n. 6, p.508-516, jan. 2005. Elsevier BV.

KOU, Sindo. **Welding Metallurgy**; 2ªed. New Jersey: A John Wiley & Sons, 2003.

KULHÁNEK, J., TOMCIK, P., TROJAN, R., JURÁNEK, M., KLAUS, P. Experimental Modeling of Weld Thermal Cycle of the Heated Affected Zone. **METALURGIJA** v. 55 n.4, 2016.

LOPEZ-JAUREGI, A. et al. Fatigue analysis of multipass welded joints considering residual stresses. **International Journal Of Fatigue**, [s.l.], v. 79, p.75-85, out. 2015. Elsevier BV.

MARTÍNEZ, A. et al. Influencia de la técnica de soldadura multipasada y de los tratamientos térmicos de precalentamiento y post-soldadura en el comportamiento de uniones GMAW de un aceromicroaleado HARDOX 400. **Revista de Metalurgia**, [s.l.], v. 47, n. 1, p.61-75, 28 fev. 2011. Departamento de Publicaciones del CSIC.

MARQUES, P. V., MONDENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Teconologia**. 2.ed. Belo Horizonte: UFMG. 363p.

MODENESI, P. J. **Introdução á Física do Arco Elétrico**. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 44p.

MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B. **Introdução a Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 1992. 297p.

MODENESI, P. J., MARQUES, P. V. **Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2000. 52p.

REED-HILL, R.E., **Princípios de Metalurgia Física**, Ed. Guanabara Dois, 2a. edição, 1982.

RAO, P Srinivasa; RAMACHANDRAN, Pragash; JEBARAJ, S. Models for selecting GMA Welding Parameters for Improving Mechanical Properties of Weld Joints. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s.l.], v. 114, p.12-27, fev. 2016. IOP Publishing.

SILVA, André Luiz V. Da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 2 Ed. Sumaré-SP: Editora Blücher, 1988.

WINCZEK, Jerzy. Modeling of Heat Affected Zone in Multipass GMAW Surfacing S235 Steel Element. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 136, p.108-113, 2016. Elsevier BV.