CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ANÁLISE MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DA ZONA TERMICAMENTE AFETADA DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO C-Mn OBTIDAS PELO PROCESSO GMAW COM ELETRODO ROTATIVO

FELIPE AUGUSTO DE CASTRO ALMEIDA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientadores: Jorge Carlos Ferreira Jorge, D.Sc.
Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc.

Rio de Janeiro

Setembro / 2019

ANÁLISE MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DA ZONA TERMICAMENTE AFETADA DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO C-Mn OBTIDAS PELO PROCESSO GMAW COM ELETRODO ROTATIVO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Felipe Augusto de Castro Almeida

Aprovada por:

_____

Presidente, Prof. Jorge Carlos Ferreira Jorge, D.Sc. (Orientador)

_____

Prof. Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc. (Coorientador)

_____

Prof. Humberto Nogueira Farneze, D.Sc.

_____

Prof. Matheus Campolina Mendes, D.Sc.

_____

Prof. Valter Rocha dos Santos, D.Sc. (PUC-RIO)

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

A447 Almeida, Felipe Augusto de Castro
Análise microestrutural e mecânica da zona termicamente afetada de juntas soldadas de aço C-Mn obtidas pelo processo GMAW com eletrodo rotativo / Felipe Augusto de Castro Almeida– 2019.
xiii, 53f. + anexo : il.color. , grafs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2019.
Bibliografia: f. 49-53.
Orientador: Jorge Carlos Ferreira Jorge
Orientador: Luís Felipe Guimarães de Souza

1. Aço – Tratamento térmico. 2. Aço – Propriedades mecânicas. 3. Aço fundido – Soldagem. 4. Tecnologia de materiais. I. Jorge, Jorge Carlos Ferreira (Orient.). II. Souza, Luís Felipe Guimarães de (Co-orient.). III. Título.

CDD 620.17

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes CRB-7/5281

Dedico aos meus pais, em especial a minha mãe, Chárita, que sempre me incentivou na busca dos meus objetivos pessoais e profissionais e no aperfeiçoamento de meus conhecimentos; a minha amada esposa Ilana, pelo apoio incondicional e irrestrito em todos os momentos e sem o qual, este estudo não seria possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela permissão concedida para concluir mais este desafio, sendo uma importante etapa na minha vida.

A minha mãe, Chárita de Castro Almeida, pela sua incansável luta e incentivo para a minha formação profissional, acadêmica e principalmente humana;

A minha amada esposa e melhor amiga, Ilana Campos da Rocha Almeida, por estar ao meu lado, pelo incentivo, parceria e companheirismo incondicionais;

Aos Professores Jorge Carlos Ferreira Jorge (D.Sc) e Luís Felipe Guimarães de Souza (D.Sc), pelos ensinamentos, orientação, atenção, disponibilidade e compreensão em todos os percalços e desafios que foram parte imprescindível para a conclusão deste trabalho;

Ao amigo Jeferson Frederico Monteiro Costa (M.Sc), por compartilhar todo conhecimento, experiência, atenção e muita disponibilidade, valores estes inestimáveis, que foram fundamentais desde a preparação até finalização deste trabalho;

Aos técnicos do Laboratório de Materiais do CEFET/RJ, Hiron Akira e Marcelo Avelelas por todo auxílio na realização das análises experimentais.

Ao CEFET/RJ pela infraestrutura dos seus Laboratórios usada na realização dos ensaios mecânicos e microscopia ótica;

A White Martins, por disponibilizar sua infraestrutura e materiais para a confecção dos corpos de prova avaliados nesse estudo.

Ao Centro Tecnológico do Exército (CTEx), notadamente ao Laboratório de Materiais, pelo auxílio na realização da análise química dos materiais.

“ A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”

Arthur Schopenhauer

RESUMO

ANÁLISE MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DA ZONA TERMICAMENTE AFETADA DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO C-Mn OBTIDAS PELO PROCESSO GMAW COM ELETRODO ROTATIVO

O presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento microestrutural e mecânico da zona termicamente afetada (ZTA) de juntas soldadas obtidas pelo processo GMAW com eletrodo rotativo (GMAW-RE), de modo a permitir uma análise comparativa de produtividade e propriedades mecânicas com o processo GMAW convencional (GMAW). Foram realizadas soldagens multipasse pelos dois processos GMAW com preaquecimento de 100 °C em chapas de dimensões 500 × 150 × 10 mm em aço ASTM A36, na posição plana e energia de soldagem média de 2,30 kJ/mm. Após a soldagem, foram realizados ensaios de medidas de tensões residuais, de impacto Charpy-V, microdureza e metalográficos em corpos-de-prova removidos transversalmente ao cordão de solda. Adicionalmente, foi realizada uma análise comparativa de produtividade entre os processos. Os resultados mostram que o processo GMAW-RE propicia um aumento de produtividade e redução de custos significativos em relação ao processo GMAW. Em relação às propriedades mecânicas, observou-se uma redução da tenacidade ao impacto na ZTA da junta obtida pelo processo GMAW-RE em comparação ao processo GMAW. Embora a literatura disponível destaque o elevado potencial deste processo para substituição do processo GMAW convencional em aplicações industriais, verifica-se a necessidade de mais evidências experimentais para um maior suporte para estas indicações.

Palavras-chave: Processo GMAW; Eletrodo rotativo; Produtividade; Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL ANALYSIS OF THE HEAT AFFECTED ZONE OF C-Mn STEEL WELDED JOINTS OBTAINED BY THE GMAW PROCESS WITH ROTATING ELECTRODE

Abstract: The main goal of the present work is to evaluate the mechanical and microstructural behavior of the heat affected zone (HAZ) of welded joints obtained by the GMAW with rotating electrode process (GMAW-RE) in comparison to the Conventional GMAW process (GMAW). Multipass welding by both processes were performed in ASTM A36 steel plates with dimensions of 500 × 150 × 10 mm, preheat of 100 °C in the flat position and average welding energy of 2.30kJ/mm. After welding, Charpy-V notch and microhardness tests and metallographic examination were performed in samples removed transversally to the weld bead. Additionally, a comparative analysis of productivity and costs between processes were done. The results show that the GMAW-RE promotes higher productivity and reduction of costs in comparison to GMAW. In regard to the mechanical properties, a reduction on the impact toughness of the HAZ of the welded joint obtained by the GMAW-RE process was observed in comparison to results obtained by GMAW process. Although the literature states the high potential of the GMAW-RE for replacement of the conventional GMAW in industrial applications, it was concluded that other experimental results are still necessary before the final conclusion.

Key-words: GMAW process; Rotating electrode; Productivity; Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Pag.

Figura II.1 - Esquema do Equipamento GMAW 15

Figura II.2 - Modos comuns de transferência metálica no processo GMAW 16

Figura II.3 - Tipos de arco e suas faixas de trabalho, para eletrodo de arame sólido com diâmetro de 1.2 mm e com misturas ricas em argônio... 19

Figura II.4 - Detalhe da tocha com efeito de rotação do arame. (a) Com bocal; (b) Sem bocal 20

Figura II.5 - Esquema básico da tocha GMAW- Eletrodo 22

Figura II.6 - Características do cordão de solda para diferentes velocidades de rotação, adaptado de Rao et al 23

Figura II.7 – Seções retas de soldas com diferentes velocidades de Rotação, adaptado de Guo et al. [24] 24

Figura II.8 – Sistemas de coordenadas utilizadas no modelo numérico de Krutz e Sergelind 26

Figura II.9 – Representação esquemática do modelo de fonte de calor de Goldak [32] 27

Figura II.10 – Representação do movimento rotativo do arame de soldagem, adaptado de Bai [36] 29

Figura II.11 – Distribuição das temperaturas para diferentes raios de rotação, com frequência de 5Hz, retirado de BAI et al, [36]. 31

Figura II.12 - Temperaturas no centro da poça de fusão para diferentes raios de rotação [36] 32

Figura II.13 - Picos de temperatura na ZTA para diferentes raios de rotação [36] 32

Figura II.14 – Resultados obtidos para dimensões da poça de fusão para diferentes raios de rotação [36] 33

Figura II.15 - Temperaturas no centro da solda para diferentes velocidades de rotação, [36] 34

Figura II.16 - Picos de temperatura na ZTA para diferentes velocidades de rotação [36] 34

Figura II.17 - Dimensões da poça de fusão para diferentes velocidades de rotação [36] 35

Figura.III.1 - Microestrutura do metal base. Ataque: Nital 2% 38

Figura III.2 – Geometria das juntas soldadas pelos dois processos. (a) GMAW; (b) GMAW-RE. 39

Figura III.3 - Posição dos perfis de Microdureza Vickers (HV 0,5).(a) GMAW, (b) GMAW-RE 41

Figura III.4 – Esquema de retirada do corpo de prova Charpy-V das juntas soldadas.(a) GMAW, (b) GMAW-RE 42

Figura IV.1- Aspecto visual das chapas soldadas: a) GMAW-RE Raiz; b)GMAW-RE Topo; c) GMAW Raiz; d) GMAW Topo 43

Figura IV.2 - Resultados de Microdureza Vickers (HV0.5) em diferentes regiões das chapas soldadas: a) GMAW; (b) GMAW-RE 45

Figura IV.3 - Resultados dos ensaios de impacto realizados nas diversas condições de análise. 46

Figura IV.4 - Macrografias das juntas soldadas. Ataque: nital 2% 46

Figura IV.5 – Medida da ZTA da chapa soldada pelo processo GMAW-RE. Ataque:nital 2% 47

Figura IV.6 - Medida da ZTA da chapa soldada pelo processo GMAW. .Ataque: nital 2% 47

Figura IV.7 - Evolução microestrutural da junta soldada por GMAW próximo da superfície. Ataque: nital 2% 48

Figura IV.8 - Evolução microestrutural da junta soldada por GMAW-RE próximo da superfície. Ataque: nital 2% 48

Figura IV.9 - Detalhamento das microestruturas da chapa soldada pelo processo GMAW. Ataque: nital 2% 49

Figura IV.10 - Detalhamento das microestruturas da chapa soldada pelo processo GMAW-RE. Ataque: nital 2% 50

Figura IV.11- Distribuição microestrutural na ponta do entalhe Charpy-V (indicada pela seta) posicionado na ZTA das juntas soldadas. Ataque: nital 2%. (a) GMAW; (b) GMAW-RE 51

Figura IV.12 - Microestrutura da ZTA na região correspondente à ponta do entalhe do corpo-de-prova Charpy-V 51

Figura V.1 - Diagrama esquemático do comportamento dos ciclos térmicos para os processos de soldagem [24]. (a) GMAW ; (b) GMAW-RE 55

Figura V.2 – Perlita esboroada presente nas juntas analisadas 57

Figura V.3 – Local da fratura do corpo-de-prova de tração transversal da junta soldada pelo processo GMAW-RE utilizada para qualificação de procedimento de soldagem 57

Tabela de Abreviaturas e Símbolos

A	Intensidade de Corrente em Amperes
AWS	American Welding Society
e	Espessura em milímetros
EWI	Edison Welding Institute
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GMAW-RE	Gas Metal Arc Welding – Rotating Electrode
J	Joule
kJ	Quilojoule
MO	Microscopia Óptica
MIG	Metal Inert Gas
B	Bainita
MS	Metal de Solda
P	Perlita
PD	Perlita degenerada
V	Tensão em Volts
W	Watt
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

	Pág
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	13
CAPÍTULO II – REVISÃO BILBIOGRÁFICA	15
II.1 – O processo GMAW	15
II.2 – A evolução do Processo GMAW para o GMAW com Eletrodo Rotativo	19
II.3 – Aspectos térmicos do processo GMAW-RE.	25
II.4 – Propriedades Mecânicas da ZTA de juntas soldadas pelo processo GMAW-RE	36
CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS	38
III.1 – Materiais	38
III.2 – Soldagem	38
III.3 – Medição de Tensões Residuais	40
III.4 – Ensaios Mecânicos	40
III.4.1 – Ensaio de Microdureza Vickers ($HV_{0,5}$)	40
III.4.2 – Ensaio de Impacto Charpy-V Reduzido	41
III.5 – Ensaios Metalográficos	42
CAPÍTULO IV – RESULTADOS	43
IV.1 – Soldagem	43
IV.2 – Medição de Tensões Residuais	43
IV.3 – Ensaios Mecânicos	44
IV.3.1. – Ensaio de Microdureza Vickers ($HV_{0,5}$)	44
IV.3.2. – Ensaio de Impacto Charpy-V Reduzido	45
IV.4 – Ensaios Metalográficos	46
CAPÍTULO V – DISCUSSÃO	52
V.1 – Produtividade	52
V.2 – Propriedades da Junta Soldada	53
V.3 – Aspectos Práticos dos Resultados	57
CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES	59
CAPÍTULO VIII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXO - 1	66

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

O aumento das operações de fabricação e reparo de componentes industriais tem motivado o aperfeiçoamento de processos de soldagem, visando a melhoria da produtividade com manutenção de qualidade assegurada e com baixo custo para manter a competitividade.

Neste contexto, é de conhecimento geral que o processo de soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding) é amplamente empregado nas mais diversas aplicações, visto suas características de elevada taxa de deposição, versatilidade, fácil adaptação para automação e custo relativamente baixo em comparação com outros processos a arco elétrico [1-5]. Com o aprimoramento das fontes de potência, o campo de aplicação do processo foi ainda mais ampliado [6]. Embora seja um processo bem conhecido e amplamente utilizado, apresenta limitações quanto a sua aplicação, como a sua utilização no campo, por conta da possibilidade de dispersão do gás de proteção e perda da proteção da poça de fusão, ou então, na sua utilização em fabricação de juntas com chanfro estreito, visto que, apresenta, em muitos casos falta de fusão lateral [1,3,4,5,7].

O desenvolvimento de novos processos com maior produtividade, em geral, é uma forma efetiva de buscar ganhos de competitividade. Entretanto, quando do surgimento de alguma inovação nesta área, faz-se necessária a definição das condições operacionais que efetivamente proporcionam algum benefício ou um melhor desempenho que o processo convencional.

O processo GMAW com eletrodo rotativo (GMAW-RE) é uma variação do processo GMAW, que foi patenteada em 1983 nos EUA, e que foi inicialmente desenvolvida para a soldagem de uma liga de alumínio usada numa aplicação aeroespacial [7]. A principal característica do processo GMAW-RE é que o arame-eletrodo alimentado continuamente na poça de fusão, como no GMAW, é submetido a um movimento de rotação, com diâmetro e velocidade de rotação pré-estabelecidos [8,9]. Como é de se esperar, o movimento imposto ao arame-eletrodo cria uma mudança na forma com que a energia do arco é transmitida a junta e, consequentemente, pode provocar alterações nas características do ciclo térmico quando comparado ao GMAW convencional.

Embora existam algumas publicações abordando o comportamento do arco elétrico e as características geométricas dos cordões de solda [6,7,9,10], a literatura envolvendo um estudo de propriedades mecânicas de juntas soldadas obtidas pelo

processo GMAW-RE é muito limitada, não permitindo uma melhor avaliação do potencial deste processo para substituição do processo GMAW convencional com qualidade assegurada.

O presente estudo faz parte de um amplo projeto de pesquisa, desenvolvido no Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET dos quais participam, além dos pesquisadores orientadores, 2 mestrandos e dois doutorandos. O projeto tem por objetivo avaliar o potencial do processo GMAW-RE como substituto do processo GMAW convencional em inúmeras aplicações industriais, tanto no aspecto de produtividade e custos quanto em relação as propriedades das juntas soldadas. Esta dissertação mostra uma primeira avaliação comparativa das propriedades mecânicas e microestruturais da zona termicamente afetada (ZTA) de junta soldadas de um aço C-Mn obtidas pelos processos GMAW e GMAW-RE, de forma a contribuir para um melhor entendimento sobre o efeito do movimento rotativo do eletrodo no comportamento mecânico de juntas soldadas por este processo.

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1. O Processo GMAW

Um dos processos de soldagem a arco mais utilizados na indústria e que será tratado neste estudo é o GMAW (Gas Metal Arc Welding). O processo GMAW promove a união de metais através da fusão gerada por um arco elétrico entre um arame alimentado continuamente e a poça de fusão [4]. Um fluxo de gás é continuamente usado, e assume o papel de meio ionizante além de proteger a poça de fusão da contaminação do ar. A Figura II.1, apresenta o esquema de montagem típico de um processo GMAW. Quando são utilizados gases inertes como Hélio, Argônio e suas misturas, o processo pode ser conhecido como MIG (Metal Inert Gas). Quando são utilizados gases que interagem com metal fundido (gases ativos) como o dióxido de carbono (CO_2), o processo é denominado de MAG (Metal Active Gas).

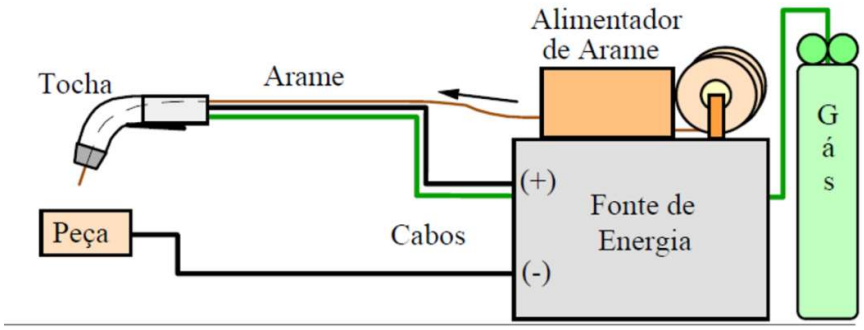


Figura II.1 - Esquema do Equipamento GMAW [9]

Destacam-se como vantagens do processo GMAW, a alta taxa de deposição e maior capacidade de penetração [4]. A alimentação contínua do arame, associada a uma elevada densidade de corrente, permite uma maior velocidade de soldagem em relação aos processos eletrodo revestido e GTAW, possibilitando produzir longos cordões de solda.

Em soldagem, um dos aspectos importantes diz respeito ao modo como o metal de adição é transportado do eletrodo para a peça através do arco, denominando-se isto de transferência metálica [11]. Os modos naturais de transferência metálica foram descritos por Van Adrichem em 1969 [9]. Posteriormente, a capacidade de controlar a transferência de metal usando o controle dinâmico da forma de onda da corrente de soldagem levou ao desenvolvimento de soldagem GMAW - pulsado, mas esta

abordagem foi mais recentemente estendida para soldagem controlada ou de arco curto, bem como arco de spray modificado para altas potências [3-5]. Os mecanismos subjacentes e as principais características dos modos de transferência modificados permanecem os mesmos que os definidos por Van Adrichen [9], mas o desempenho melhorado do processo, a estabilidade e a qualidade da articulação são obtidos usando técnicas de controle dos parâmetros de processo. Os parâmetros determinantes no modo de transferência metálica são: a corrente de soldagem, o diâmetro do arame, o comprimento do arco (tensão), as características da fonte e o gás de proteção [9,11].

Alguns modos de transferência metálica são mostrados na Figura II.2 e possuem as seguintes características:

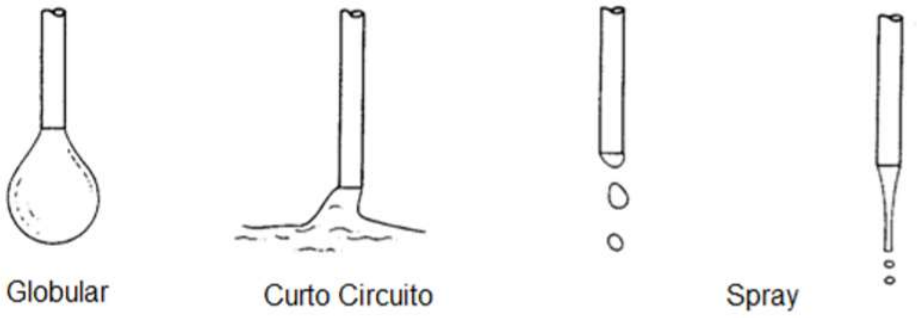


Figura II.2 – Modos comuns de transferência metálica no processo GMAW [9].

a) Transferência por curto-circuito - O metal fundido na ponta do arame toca periodicamente a poça de fusão causando um curto-circuito. Esse toque entre o eletrodo e a poça de fusão acontece numa faixa de 20 a 200 vezes por segundo [11]. A transferência por curto circuito ocorre basicamente em correntes e tensões de soldagem baixas (baixa força eletromagnética, permitindo um grande diâmetro crítico da gota, e arcos curtos o suficiente para que a gota toque a poça antes de se destacar) [12]. Essa técnica é muito útil na união de materiais de pequena espessura em qualquer posição, materiais de grande espessura na posição vertical e sobre-cabeça, no preenchimento de largas aberturas de junta. Outra grande vantagem é a distorção mínima da peça.

b) Transferência Globular – O metal é transferido através do destacamento de gotas de metal com diâmetro maior que o diâmetro do arame por gravidade, forças de arraste e forças eletromagnéticas. Essa técnica de transferência

metálica ocorre quando se utilizam tensões de arco moderadas a altas (arcos longos, evitando-se transferência por curto-circuito) e correntes muito baixas (forças eletromagnéticas muito menores) [12]. Esse método não é muito efetivo, por aliar baixa qualidade (respingos e fusões incompletas) com baixa produtividade (baixa taxa de deposição do arame). Outra desvantagem desse processo é ser limitado a posição plana de soldagem, devido ao mecanismo depender quase totalmente da gravidade para o destacamento das gotas de metal transferido.

c) Transferência Spray – O metal é transferido através de pequenas gotas uniformes (diâmetro próximo ao do eletrodo) sequencialmente em uma alta frequência. Ocorre normalmente em polaridade reversa (eletrodo positivo), altas correntes, tensões superiores a 20V e atmosfera inerte com pelo menos 80% de argônio. Uma condição necessária para ocorrer à transferência por Spray é que o valor da corrente alcance um valor crítico conhecido como corrente de transição. Valores de corrente abaixo desse valor de referência acarretam a transferência metálica globular (previamente descrita), a uma taxa de algumas gotas por segundo. Valores de corrente acima da corrente de transição acarretam transferência metálica spray a uma taxa de centenas de gotas por segundo.

A corrente de transição (que é dependente da tensão superficial no metal fundido) é proporcional ao diâmetro do eletrodo e, em menor escala, da extensão livre do eletrodo. Isso varia com a temperatura de fusão do metal de adição e a composição do gás de proteção [12,13]. A Tabela II.1 apresenta correntes de transição para alguns dos metais mais comuns, enquanto que a Figura II.3 ilustra a variação do modo de transferência metálica de acordo com os parâmetros de soldagem.

Destacam-se como vantagens na transferência por Spray: a elevada estabilidade do arco; boa qualidade (baixo índice de respingos); boa penetração e alta taxa de deposição. Por aliar boa qualidade e alta taxa de deposição, a transferência por Spray, normalmente, é a mais desejada dentre as descritas anteriormente [8,9,11].

Tabela II.1- Correntes de Transição para vários eletrodos [11].

Tipo de eletrodo	Diâmetro do eletrodo (mm)	Gás de Proteção	Corrente de Transição (A)
Aço baixo carbono	0,8	98% Ar – 2% O_2	150
Aço baixo carbono	0,9	98% Ar – 2% O_2	165
Aço baixo carbono	1,1	98% Ar – 2% O_2	220
Aço baixo carbono	1,6	98% Ar – 2% O_2	275
Aço Inoxidável	0,9	98% Ar – 2% O_2	170
Aço Inoxidável	1,1	98% Ar – 2% O_2	225
Aço Inoxidável	1,6	98% Ar – 2% O_2	285
Alumínio	0,8	Ar	95
Alumínio	1,1	Ar	135
Alumínio	1,6	Ar	180
Cobre Desoxidado	0,9	Ar	180
Cobre Desoxidado	1,1	Ar	210
Cobre Desoxidado	1,6	Ar	310
Bronze ao Silício	0,9	Ar	165
Bronze ao Silício	1,1	Ar	205
Bronze ao Silício	1,6	Ar	270

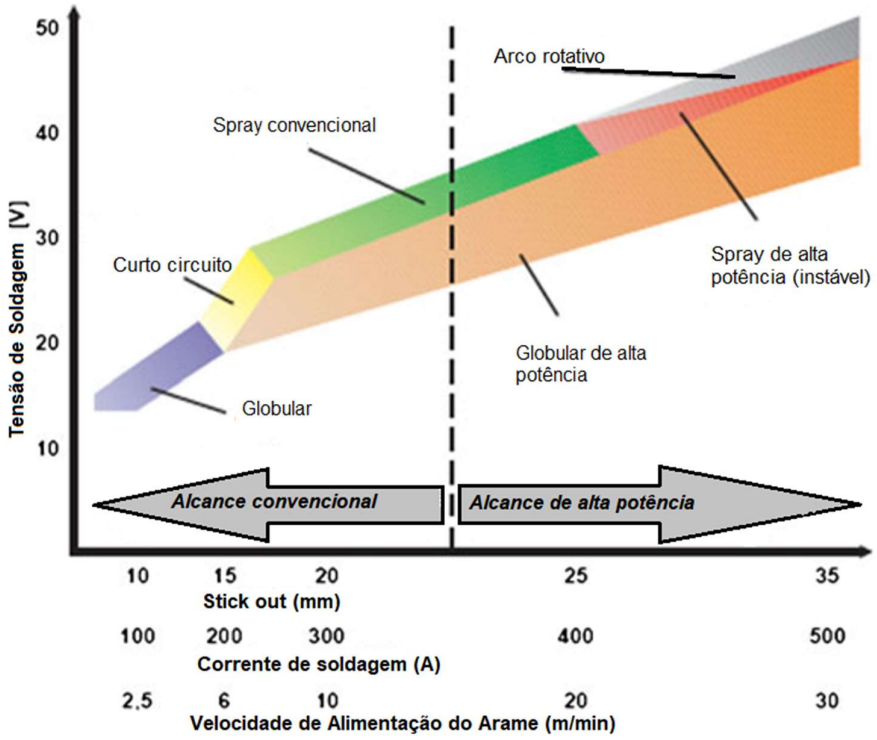
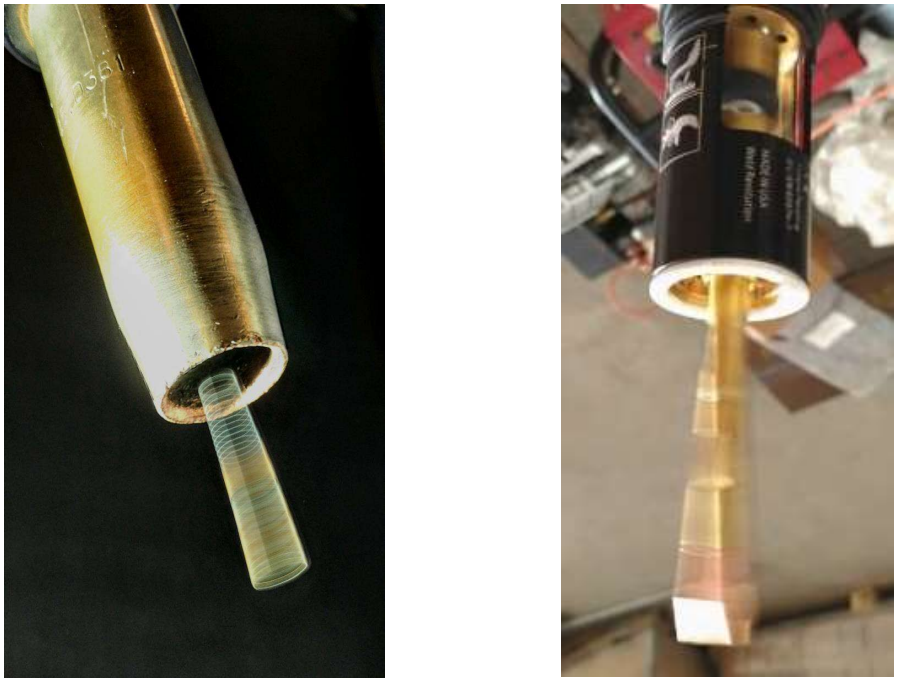


Figura II.3 – Modos de transferência metálica e suas faixas de trabalho, para eletrodo de arame sólido com diâmetro de 1,2 mm e proteção gasosa rica em argônio [10].

II.2. Evolução do Processo GMAW para o GMAW com Eletrodo Rotativo

O processo de soldagem GMAW com eletrodo rotativo (GMAW-RE) é uma evolução do GMAW convencional (GMAW), pois consiste na utilização uma tocha modificada a partir da tocha tradicional, conforme mostrado na Figura II.4, na qual o arame-eletrodo é movimentado em trajetórias circulares que podem chegar a velocidades de até 6000 rpm.



(a) (b)

Figura II.4 – Detalhe da tocha com efeito de rotação do arame.
(a) Com bocal; (b) Sem bocal

O movimento giratório do eletrodo faz com que o arco elétrico estabelecido entre este e o metal base, durante a soldagem, seja submetido a esse mesmo movimento de giro. Como o movimento giratório do arame é de pequeno diâmetro, o movimento do arco elétrico contorna a poça de fusão, enquanto a tocha é deslocada ao longo de sua trajetória para formar o cordão de solda. A diferença essencial em relação ao processo GMAW, é que enquanto neste processo o arame permanece apontando para o centro da poça de fusão, no GMAW-RE este arame se movimenta continuamente em torno desta, fazendo também o arco se movimentar [14].

Uma questão relevante envolve a correta terminologia aplicada ao processo GMAW-RE, visto que alguns autores [15,16,17] optaram pela designação do processo como GMAW com arco rotativo. De fato, embora essa designação descreva uma característica do processo, em recente revisão da terminologia dos modos de transferência metálica do processo GMAW, Kah et al. [15] estabeleceram que uma “transferência metálica rotativa” pode ocorrer para faixas de energia mais elevadas, associada com altas correntes e tensões do arco elétrico, conforme a Figura II.3 . Nesse caso, a rotação ocorre apenas no arco elétrico, na ponta do arame, e é provocada pelas forças eletromagnéticas atuantes. Portanto, essa designação para o novo processo como GMAW com arco rotativo pode provocar alguma confusão, caso não seja

especificado se a origem da rotação é eletromagnética ou mecânica, em especial, porque se referem a processos com características completamente distintas.

Outros autores [14,22] fazem menção ao processo como GMAW com eletrodo rotativo (GMAW-RE), enquanto que Zhang [23], o designa como processo GMAW com arame rotativo (GMAW-RW). Nesses dois casos a diferença é sutil, pois em geral, o arame utilizado no processo GMAW é também o eletrodo. A exceção ocorre quando há a adição de um arame extra, que pode ser frio ou quente, mas independentemente de ser um ou outro, o arame extra não se configura como um eletrodo no processo. Existem ainda alguns trabalhos [14,15] nos quais é possível encontrar menção ao processo pela sua marca comercial “Spin Arc ®”, que pertence a Binzel. Assim como também não é raro encontrar no mesmo texto mais do que uma dessas formas apresentadas, o que demonstra haver uma falta de padronização na designação do processo. No presente trabalho, a designação adotada para o processo é GMAW com eletrodo rotativo (GMAW–RE).

O processo GMAW-RE introduz uma modificação em relação ao convencional que influi no modo de transferência metálica do arame para a poça de fusão e na distribuição de calor na junta [12,17,19,24,25]. O movimento rotativo acelera as gotículas metálicas radialmente, por efeito da força centrífuga, sendo que esse efeito depende essencialmente do diâmetro e da velocidade de rotação [20]. A projeção radial das gotículas metálicas permite um controle adicional das condições de transferência de calor na junta, principalmente no sentido de direcioná-la para as paredes do chanfro, reduzindo o risco de falta de fusão lateral, que historicamente é uma limitação do processo GMAW [26]. Esta característica contribui para viabilizar a soldagem em chanfro estreito, principalmente em juntas de maiores espessuras [17,27], com resultados significativos em relação a redução do volume de metal depositado, tempo de soldagem, preparação da junta e redução nos níveis de tensões residuais.

Segundo Prasad [16], este processo promove um aumento de produtividade e qualidade em soldagens realizadas tanto com arames sólidos quanto tubulares. Embora alguns estudos [16,20,22,24,27] mostrem resultados sobre as características operacionais do processo, a literatura com evidências sobre as possíveis vantagens competitivas e envolvendo propriedades mecânicas de juntas soldadas obtidas por este processo é ainda muito limitada [25,26,27] e mais evidências experimentais se fazem necessárias para confirmar as afirmações de possíveis melhorias na qualidade e produtividade de soldagens realizadas por este processo [27].

Três variáveis devem ser especificamente inseridas quando se trata de soldagem com arco rotativo: diâmetro de rotação, sentido de rotação e frequência de rotação. Por exemplo, num chanfro reto e profundo, um diâmetro pequeno de rotação poderá ser requerido, visando fusão na raiz da junta. Em outros casos, como soldas para revestimento com o depósito de ligas resistentes a corrosão, pode ser mais vantajoso aumentar o diâmetro de rotação, a fim de cobrir uma área maior a cada passe.

Na Figura II.5, é mostrado um esquema para como é a dinâmica do movimento do eletrodo em uma soldagem efetuada em uma junta com chanfro estreito.

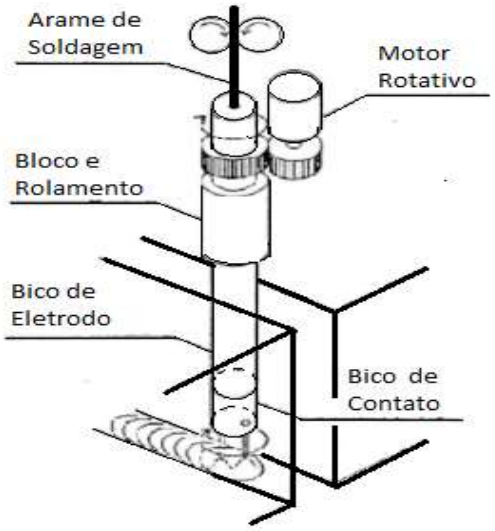


Figura II.5- Esquema básico da tocha GMAW- Eletrodo Rotativo [16].

Especialmente a partir dos anos 2000, esse processo vem sendo estudado com intuito de entender seus efeitos na forma, integridade e nas propriedades de juntas soldadas [15,16,19,20]. Serão citados abaixo alguns deles.

Rao et al. [28], apresentaram um mecanismo de rotação do eletrodo com o intuito de prevenir uma penetração do tipo convexa, indesejada, e que foi observada no GMAW convencional, pela dispersão da força do arco sobre uma determinada área. Além disso, a rotação aumentaria o tamanho da poça de fusão, já que o jato das gotas de metal é depositado sobre uma área maior quando comparado com o processo convencional. Assim, tanto a convexidade como a altura do cordão seriam reduzidos. Os

experimentos, apresentados na Figura II.6, foram feitos com diferentes velocidades de rotação do eletrodo e mostraram que, para uma amplitude de 3mm de raio de giro, a profundidade de penetração diminui com o aumento da velocidade de rotação.

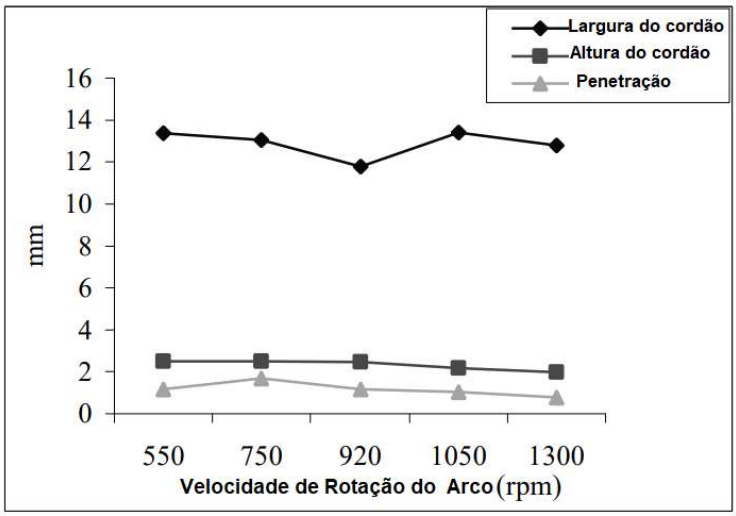


Figura II.6- Características do cordão de solda para diferentes velocidades de rotação, adaptado de Rao et al. [28].

Guo et al. [24,25] executaram soldas horizontais com eletrodo rotativo em juntas de aço temperado e revenido, com diferentes velocidades e rotação (Figura II.7), para estudar o problema de deflexão da poça de fusão, por conta da gravidade. Os autores verificaram a ocorrência de inclusão de escória na camada intermediária da parede lateral inferior, pois foi coberta com o metal fundido cuja temperatura não é alta o suficiente para evitar o afundamento de frações desprendidas durante o processo, e por isso resultam em inclusões durante o processo de soldagem. A resistência à tração das juntas produzidas pelo processo com eletrodo rotativo é igual a 100% do especificado em norma para o metal base e todas as juntas, quando submetidas a ensaio de tração, romperam no metal de base atendendo assim os requisitos da norma.

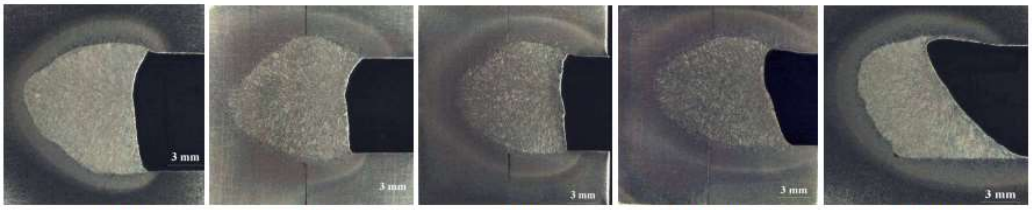


Figura II.7– Seções retas de soldas com diferentes velocidades de Rotação, adaptado de Guo et al. [24].

Em 2012, Jiangping et al. [29] estudaram o formato do cordão de solda e as propriedades mecânicas de três modos de movimento da tocha-robô de soldagem a arco. As características macroestruturais da seção reta do cordão foram analisadas. A partir de resultados experimentais, concluíram que a forma do cordão de solda com arco rotativo de alta velocidade é a melhor, o cordão trançado ocupa o segundo lugar e a solda de movimento linear é o de piores propriedades quando comparados entre os três. O aspecto macroscópico da solda do arco rotativo é melhor que a soldagem por arco de movimento linear e que a soldagem por arco oscilante.

Zhang et al. [23], investigaram o efeito do movimento giratório do arame no formato da zona de fusão e na microestrutura das soldas. O material utilizado no experimento foram chapas de aço carbono com composição básica: 0,14 a 0,22% C e 0,3% Mn de classificação Q235 segunda a norma ASTM, com dimensões de 200 mm x 60 mm x 6 mm. O experimento de soldagem foi realizado com parâmetros de processamento uniformes, exceto pela velocidade de rotação do arame eletrodo, que variou de 0 a 500 rpm. Um aumento na velocidade de rotação do arame eletrodo diminuiu a penetração porque o fluxo rotacional do metal líquido da poça de fusão reduziu o fluxo na direção vertical. A forma da zona fundida do metal de solda também ficou mais plana com o movimento rotativo do arame. Com base nos resultados, o processo de soldagem a arco com arame eletrodo rotativo mostrou-se como uma técnica promissora para controlar a diluição da solda, especialmente no revestimento por soldagem, que precisa de um cordão de solda com diluição mínima.

Raju et al. [18] introduziram em seus experimentos um processo de soldagem a arco para estudar o efeito da rotação do eletrodo na geometria do cordão de solda em junta de alumínio da liga EN AW 6061-T6 . Os autores verificaram que a rotação do arco na soldagem (GMAW) melhorou as características visuais do cordão de solda e suas

propriedades mecânicas, no entanto, sem relacioná-las diretamente com as mudanças microestruturais e metalúrgicas inerentes a mudança do processo.

A partir da literatura citada acima [13- 29], verifica-se que vários pesquisadores estudaram o efeito dos parâmetros do processo na geometria do cordão de solda por métodos analíticos e experimentais. No entanto, pouca literatura está disponível para estudar o efeito de parâmetros como: diâmetro do eletrodo de soldagem, gases de proteção e taxa de alimentação da tocha, nas propriedades mecânicas e microestruturais de soldas com diferentes materiais de base e consumíveis.

II.3. Aspectos térmicos do processo GMAW-RE

Para um bom entendimento do ciclo térmico e seus efeitos em uma junta soldada, é muito importante representar corretamente a fonte de calor. A fonte de calor total (Q) pode ser representada como [30]:

$$\boldsymbol{Q = U.i.\eta} \qquad 1$$

Onde, **U** é a tensão da fonte, $\boldsymbol{i}$ é a intensidade de corrente de soldagem e **η** a eficiência na transmissão de energia, que depende basicamente do tipo de processo utilizado.

Ao longo do tempo modelos diferentes tem sido propostos para o melhor entendimento do comportamento da fonte de calor. De forma geral, os estudos se baseiam em uma forma gaussiana, onde o maior fluxo encontra-se no centro da distribuição [10]. Essa metodologia pode ser dividida em duas análises: a distribuição superficial e a distribuição volumétrica.

A distribuição superficial apresenta um modelo mais simples, onde o fluxo de calor é distribuído em uma área circular de raio **r.** Inicialmente, Pavelic [31] propôs um modelo bidimensional composto por um “disco circular” na superfície da peça, para o qual a fonte de calor possui uma distribuição do tipo Gaussiana. Este modelo apresenta uma representação mais precisa em termos de distribuição térmica na zona de fusão e ZTA do que o primeiro modelo [31,32,33].

Krutz e Sergeland [34] sugeriram uma alternativa ao modelo de Pavelic [31], com dois sistemas de coordenadas: um que se movimenta com a fonte de calor, indicando a sua posição ao longo da direção da solda e outro sistema fixado sobre um plano de referência, mostrado na Figura II.8. A distribuição de potência da fonte de calor é dada

por:

$$\boldsymbol{q(x,\xi) = \frac{3Q}{\pi c^2} e^{\frac{-3x^2}{c^2}} . e^{\frac{-3\xi^2}{c^2}}} \qquad 2$$

Onde:

Q = energia de soldagem;

C = raio característico da distribuição do fluxo de calor;

A relação de transformação entre os sistemas de coordenadas móvel e fixo é definida pela equação:

$$\xi = z + v(\tau - t) \qquad 3$$

Onde,

z = posição na direção da soldagem, em relação a um sistema de coordenadas fixo;

v = velocidade da solda;

τ = fator de atraso, utilizado para definir a posição da fonte de calor no instante t = 0;

t = tempo.

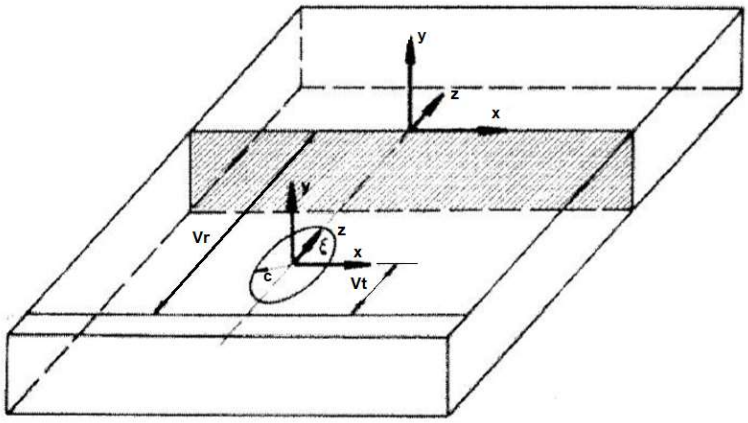


Figura II.8 – Sistemas de coordenadas utilizadas no modelo numérico de Krutz e Sergelind [31]

Os dois sistemas de coordenadas são coincidentes e a fonte de calor encontra-se na superfície de referência quando $\tau = t$ e $\xi = z$.

Porém, os modelos de superfície propostos por Pavelic [31], Krutz e Segerland [34] apresentaram eficácia apenas em pequenas penetrações na região de solda ou

peças de pequena espessura. Os modelos de fonte de calor volumétricos permitem representar a distribuição da potência ao longo da profundidade e são essenciais para simulação de fenômeno de transferência de calor na região soldada em peças com espessura elevada. Goldak et al. [32] desenvolveram o modelo de fonte de calor volumétrico onde dois elipsóides são combinados, sendo um a frente e outro atrás do centro da fonte de calor, conforme mostrado na Figura II.9. Uma distribuição Gaussiana hemisférica de potência é considerada para zonas soldadas simétricas. Este modelo é bastante utilizado em simulações de soldagem e tornou-se padrão para geometrias soldadas com formato elipsoidal [35].

Os modelos numéricos baseados no método de elementos finitos para análise dos processos de soldagem requerem a utilização de um modelo de fonte de calor para representar o fornecimento de potência à peça.

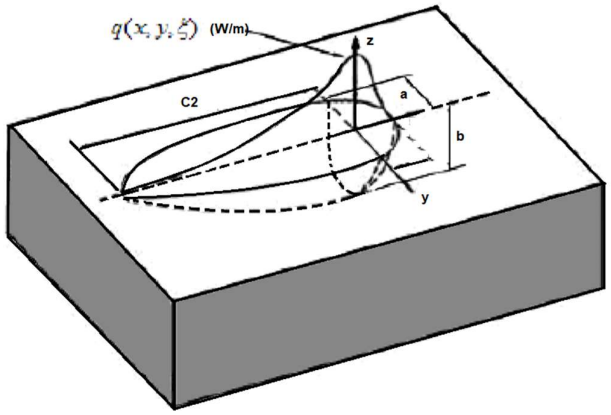


Figura II.9 – Representação esquemática do modelo de fonte de calor de Goldak [32].

A representação da fonte de calor através do modelo de Goldak é dada pela seguinte equação [32].

$$q(x,y,\xi) = \frac{6\sqrt{3}\,Qf}{abc\pi\sqrt{\pi}}\, e^{\frac{-3x^2}{a^2}} . e^{\frac{-3x^2}{b^2}} . e^{\frac{-3\xi^2}{c^2}} \qquad 4$$

Onde:

$q(x,y,\xi)$ =densidade de energia ou potência por unidade de volume;

a = largura do elipsóide;

b = profundidade do elipsóide;

c = comprimento da fonte de calor;

c_1 = comprimento da fonte de calor referente ao quadrante frontal do elipsóide;

c_2 = comprimento da fonte de calor referente ao quadrante posterior do elipsóide;

f = fração de energia depositada à frente e na parte posterior do elipsóide.

O modelo acima descreve com boa aceitação na comunidade científica o movimento e a distribuição de uma fonte pontual de calor para processos de soldagem como GMAW, por exemplo.

No processo GMAW-RE, o arame de soldagem não é somente direcionado ao movimento circular com velocidade de rotação (**f)** e raio (**r)** no plano de coordenadas XY, mas também direcionado para movimento linear uniforme na direção X para soldagem com a velocidade de Vs, como mostrado Figura II.9. A trajetória do arame de soldagem é alterada para um perfil diferente do GMAW que possui perfil linear. Nessa condição, a precisão dos resultados do cálculo deve ser reduzida se o movimento circular do arco de soldagem não for considerado. Além disso, a origem das coordenadas e a direção da fonte de calor são alteradas continuamente com o tempo. A distribuição de calor em GMAW-RE não pode ser caracterizada pelo tradicional "duplo elipsoide" de Goldak [32]. Um modelo para descrever como o eletrodo de soldagem e, por conseguinte, a fonte de calor, se desloca no processo GMAW-RE foi sugerido por Bai et al, em 2012 [36]. Este modelo, representado na Figura II.10 mostra que: quando t = 0, a origem da fonte de calor está no ponto O, que é assumido como sendo o ponto de origem no sistema de coordenadas x-z no qual o ponto é representado como (x, z). A origem da fonte de calor é movida para O′ durante o tempo de t e o sistema de coordenadas local x′-z′ é construído no qual o ponto é representado como (x1, z1). O′ é representado como (x0, y0, z0) no sistema de coordenadas original.

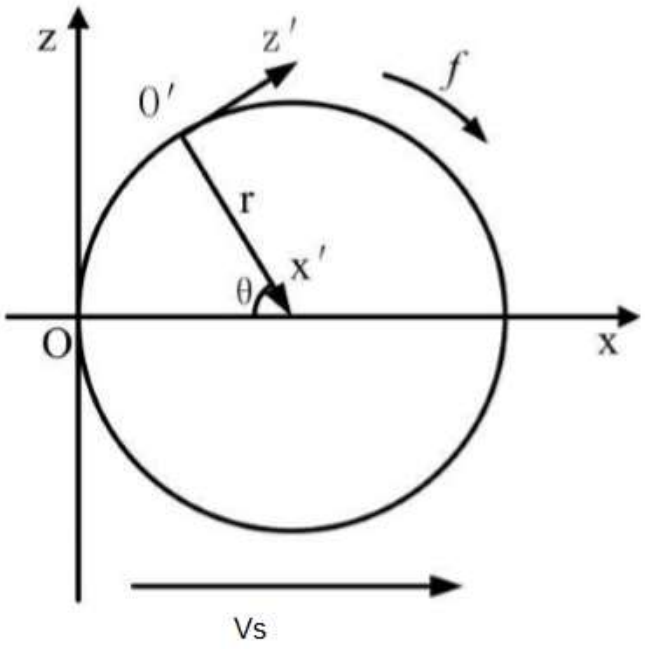


Figura II.10 – Representação do movimento rotativo do arame de soldagem, adaptado de Bai [36].

Isto pode ser obtido de acordo com a fórmula de transformação de coordenadas em que:

$$x1 = [(x - x0) - (z - z0)tan\theta]\, cos\theta = (x - x0)cos\theta - (z - z0)sen\theta$$

$$y1 = y \qquad 4$$

$$z1 = (z - z0)/cos\theta + [(x - x0) - (z - z0)tan\theta]\, sen = (x - x0)sen\theta + (z - z0)cos\theta$$

onde: Θ= 2πft. A equação da trajetória do movimento do arame de soldagem pode *ser descrita por:*

$$x_0 = r - rcos\Theta + V_s t$$

$$y_0 = y \qquad 5$$

$$z_0 = rsen\Theta$$

Ao substituir a equação (5) na equação (4), temos:

$$x1 = (x - r + rcos\theta - V_s t)\, cos\theta - (z - rsen\theta)\, sen\theta$$

$$y1 = y \qquad 6$$

$$z1 = (x - r + rcos\theta - V_s t) sen\theta + (z - rsen\theta)\, sen\theta$$

Ao substituir a equação (6) na equação de Goldak (4) do modelo do duplo elipsoide teremos como segue;

Para o hemisfério dianteiro:

$$q(r) = \frac{6\sqrt{3} f_1 \eta U i}{\pi^{\frac{3}{2}} abc_1} e^{\{-3\left[\frac{((x - r + rcos\theta - Vst)\, cos\theta - (z - rsen\theta)\, sen\theta)}{a}\right]^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{(x - r + rcos\theta \quad _s\, t) sen\theta)}{c_1}\right)^2\}} \qquad 7$$

Para o hemisfério traseiro:

$$q(r) = \frac{6\sqrt{3} f_2 \eta U i}{\pi^{\frac{3}{2}} abc_2} e^{\{-3\left[\frac{((x - r + rcos\theta - Vst)\, cos\theta - (z - rsen \quad)\, sen\theta)}{a}\right]^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{(x - r + rcos\theta \quad _s\, t) sen\theta)}{c_2}\right)^2\}} \qquad 8$$

Onde o η é a eficiência de transmissão térmica; U é a voltagem do arco de soldagem; i é a corrente de soldagem; f1, f2, a, b, c1, c2 são os coeficientes de distribuição térmica da fonte de calor.

Como consequência das diferenças das trajetórias dos eletrodos para os processos GMAW e GMAW-RE, as distribuições e os picos de temperatura na junta soldada serão diferentes para cada processo. Em 2012, Bai et al. [36] mostraram por meio de uma simulação numérica do modelo descrito acima, indicando assim como as temperaturas em uma junta se comportam diante a influência do incremento da velocidade e do raio de rotação do arame-eletrodo. Na Figura II.11 estão mostrados os resultados obtidos na simulação.

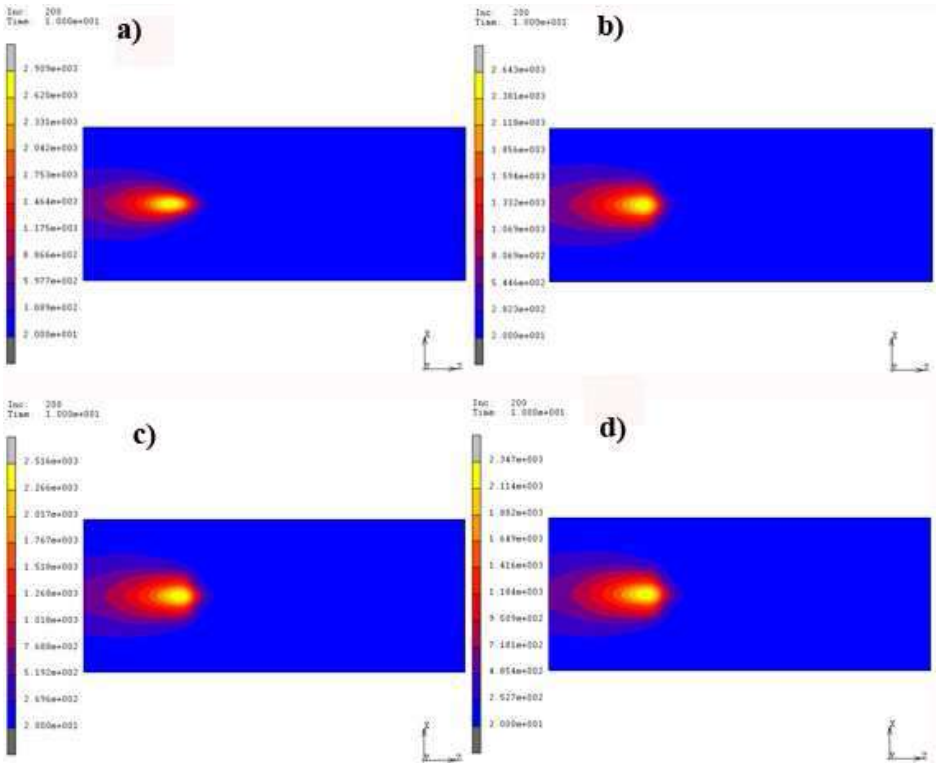


Figura II.11 – Distribuição das temperaturas para diferentes raios, com frequência de 5Hz, a) 0mm b) 2mm c) 3mm e d) 4mm, retirado de Bai et al, [36].

O raio de rotação do arame-eletrodo na soldagem a arco tem grande efeito na distribuição de calor. O campo de temperatura com diferentes raios de rotação do arco de 0, 2, 3, 4 mm, quando f = 5 Hz foi estudado e os resultados são mostrados na Figura II.11, onde as maiores temperaturas estão representadas nas cores mais claras, sendo a maior temperatura em amarelo. Pode ser visto que a largura de distribuição de temperatura aumenta e a temperatura do pico diminui com o aumento do raio de giro. A distribuição de temperatura do GMAW (Figura II.11 a), é representada com a forma de “azeitona” e muito mais estreito do que no GMAW-RE, nos quadros b, c, e d, especialmente na frente da fonte de calor. As temperaturas médias nos centros das poças de fusão das juntas soldadas com diferentes raios de rotação são apresentadas na Figura II.12. O pico de temperatura do centro do cordão de solda quando r = 4mm é cerca de 2200^{o}C que é mais baixo cerca de 700^{o}C em comparação com a temperatura, no mesmo ponto, para o processo GMAW (r = 0). A Figura II.13 mostra a temperatura máxima da ZTA com diferentes raios de rotação. O pico de temperatura da parede lateral imediatamente após a linha de fusão e ZTA aumenta com o raio de rotação. Quando r = 4 mm, a temperatura na ZTA subiu cerca de 300 ℃ em comparação ao GMAW. Os tamanhos das secções transversais da poça de fusão com raio

de rotação diferentes são mostrados na Figura II.14. A largura do cordão aumenta e a penetração diminui com o aumento do raio de rotação. Quando r = 4 mm, a largura máxima do cordão é de 10,5 mm e a profundidade mínima de penetração é de 4,5 mm.

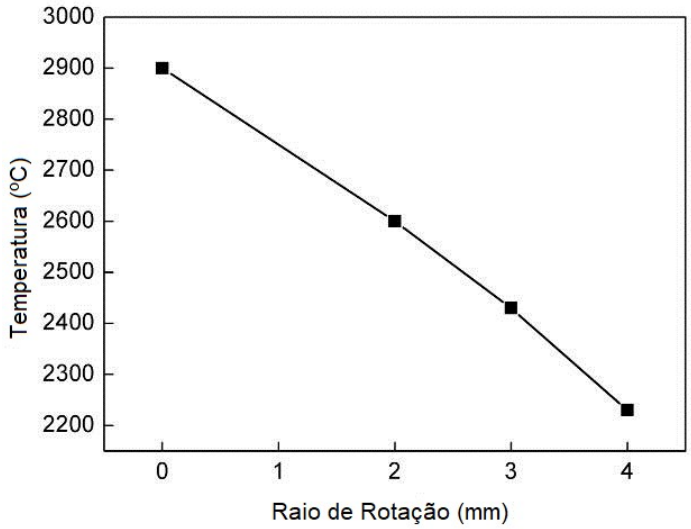


Figura II.12- Temperaturas no centro da poça de fusão para diferentes raios de rotação [36].

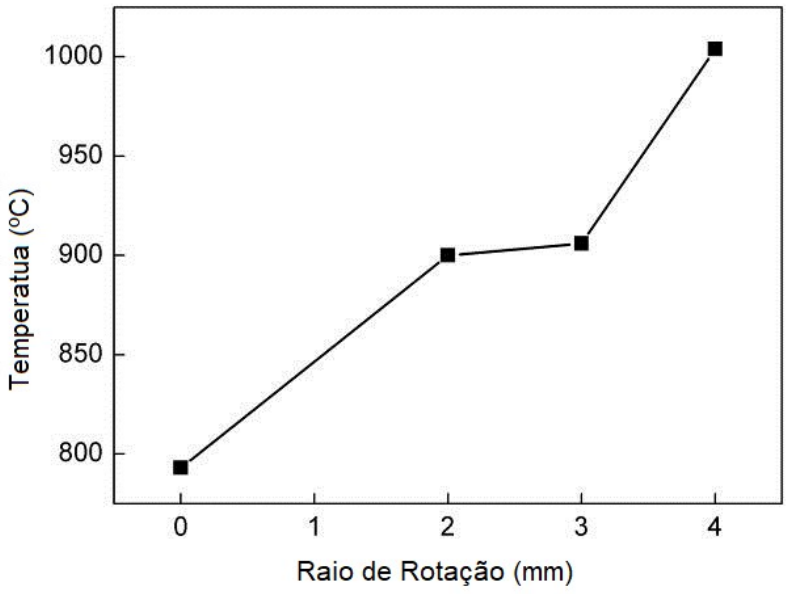


Figura II.13- Picos de temperatura na linha de fusão para diferentes raios de rotação [36].

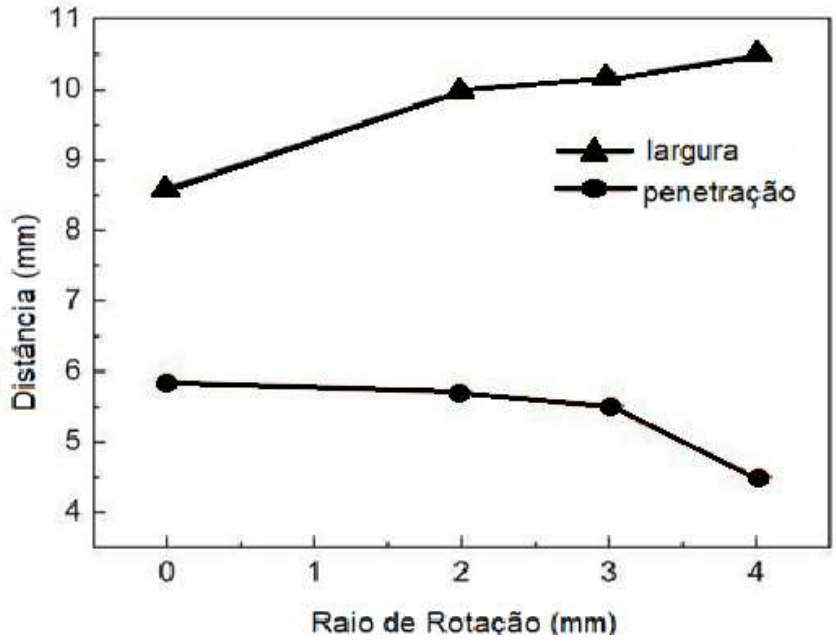


Figura II.14 – Resultados obtidos para dimensões da poça de fusão para diferentes raios de rotação [36], com velocidade de rotação constante de 5 Hz

Os resultados da distribuição da temperatura com diferentes raios de rotação do arame-eletrodo, obtidos por Bai, et al. [36], indicam que o raio tem um grande efeito na largura da distribuição de temperatura, o que é pertinente já que ao aumentar a área diminui-se a densidade de potência. Devido ao arame eletrodo rotativo, o pico máximo de temperatura nem sempre está no centro da poça de fusão. A posição do arco muda periodicamente no chanfro da soldagem. A largura da distribuição da temperatura é aumentada e resulta na diminuição do aporte de calor na região central da poça de fusão. No entanto, o alargamento da distribuição de calor faz aumentar as temperaturas nas regiões periféricas da solda. Este efeito é cada vez mais significativo com o aumento do raio de rotação. O aumento do fluxo de calor na região periférica da solda seria favorável para melhorar a fusão nas paredes do chanfro, para o caso de soldas com chanfro estreito. Também pode ser útil para a soldagem horizontal, já que, pela diminuição do fluxo de calor no centro de solda, levaria a uma diminuição do tempo de resfriamento e, por consequência, uma maior estabilidade da poça [36], que diminuiria a possibilidade de inclusões solidificadas dentro da poça de fusão. Esse cenário foi estudado por Guo et al. [25], em 2006, e apresentaram, como citado anteriormente, bons resultados em soldas horizontais com alumínio. Ao analisar a frequência de rotação, detecta-se que ela exerce grande efeito na frequência do aquecimento repetitivo da poça e paredes do chanfro devido à trajetória de movimento do arco no processo GMAW-RE.

A temperatura média da solda com diferentes frequências de rotação é mostrada na Figura II.15. Temperaturas de pico da ZTA com diferentes frequências de rotação são mostradas na Figura II.16. No processo com o eletrodo rotativo, o pico de temperatura do centro da poça de fusão aumenta com a frequência de rotação. Quando a frequência é inferior a 4,5 Hz, o pico da temperatura da região periférica aumenta com a frequência de rotação, e quando a frequência é superior a 4,5 Hz, a temperatura desta região tende a diminuir.

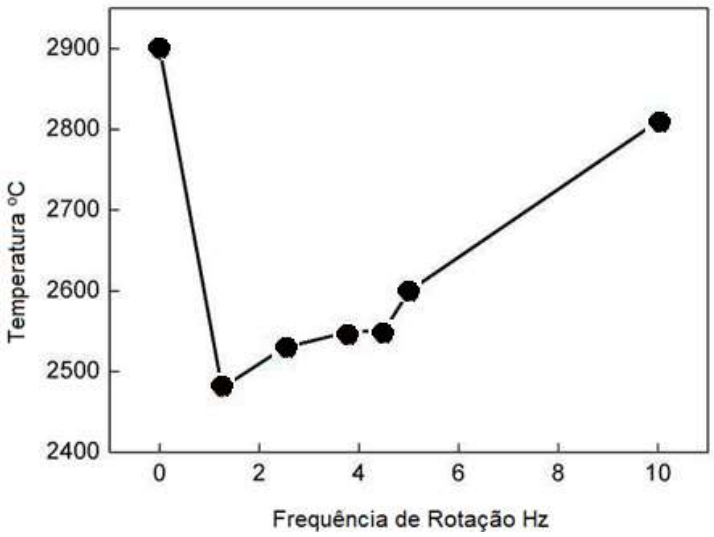


Figura II.15- Temperaturas no centro da solda para diferentes velocidades de rotação[36].

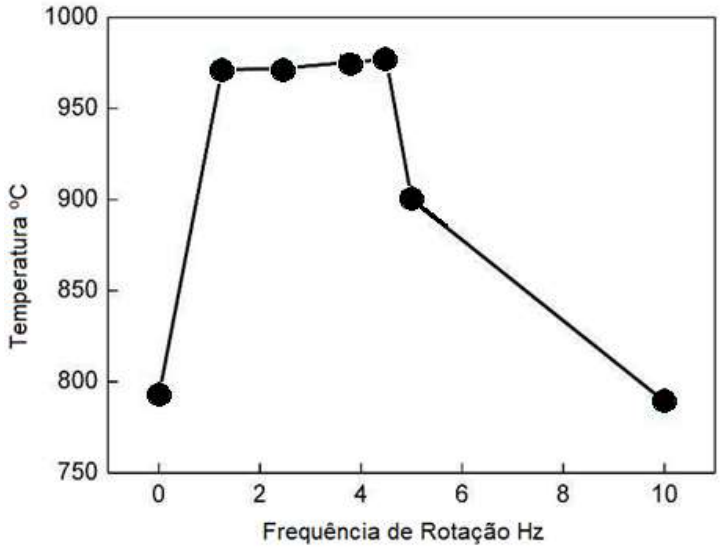


Figura II.16 - Picos de temperatura na ZTA para diferentes velocidades de rotação[36].

A temperatura máxima, 980℃, existe quando f = 4,5 Hz. Os tamanhos das seções transversais da poça de fusão com diferentes frequências de mostrado na Figura II.17. A mudança da largura da solda tem a mesma tendência que a temperatura da região periférica da solda que é oposta à mudança da penetração do cordão. Quando f = 4,5 Hz, a largura máxima da solda é de 10,7 mm e a profundidade mínima de penetração da solda é de 5,5 mm.

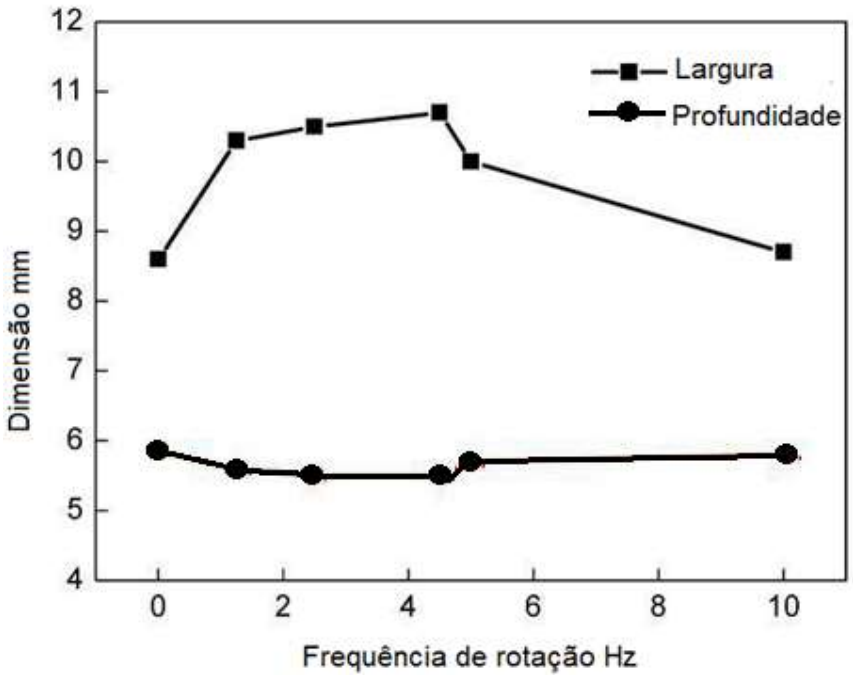


Figura II.17- Dimensões da poça de fusão para diferentes velocidades de rotação [36].

A mudança da distribuição de temperatura com a frequência de rotação pode ser explicada pelo entendimento de que a frequência de aquecimento repetitiva aumenta e o tempo efetivo de exposição localizada ao arco diminui como aumento da frequência de rotação. No centro de uma poça de fusão de GMAW-RE, que está próximo ao centro do arco, a transferência de calor diminui significativamente em comparação com o processo GMAW, devido ao menor número de vezes que a região é repetidamente aquecida quando a frequência de rotação é baixa.

A temperatura aumenta com o aumento da frequência de rotação pois o número de vezes que uma determinada região será reaquecida, de forma repetida, também aumenta. O efeito de aquecimento repetitivo é mais dependente do tempo efetivo de aquecimento, assim, com a frequência de rotação aumentando, a frequência de aquecimento repetitiva

aumenta, mas o tempo efetivo específico diminui. Então existe uma correspondência ótima entre a frequência de aquecimento repetitivo e o tempo efetivo para que a transferência de calor demonstre um valor máximo em uma determinada frequência de rotação. Essa é a razão por que a temperatura na parede lateral e na ZTA aumenta primeiro e depois diminui, assim como a temperatura máxima existe quando f = 4,5 Hz.

II.4- Propriedades Mecânicas da ZTA de juntas soldadas pelo Processo GMAW-RE

Como já citado anteriormente, existem poucas evidências sobre o efeito do ciclo térmico de soldagem nas propriedades mecânicas e metalúrgicas da Zona Termicamente Afetada de juntas soldadas por esse processo.

Na literatura disponível, há autores [13,16,17] que investigam se o processo GMAW-RE é viável na produção de juntas soldadas isentas de defeitos e com propriedades mecânicas comparáveis àquelas produzidas, sob os mesmos parâmetros, pelo processo GMAW convencional e, em sua maioria, com integridades equivalentes. Outros estudos [17-20] investigaram, além da viabilidade de produzir juntas integras, como o movimento rotativo do eletrodo modifica a transferência metálica, a profundidade de penetração e as geometrias da poça de fusão e cordão de solda, sempre comparando com as mesmas características nas juntas produzidas por GMAW convencional.

Há ainda estudos [25, 27, 29] que investigam como as propriedades mecânicas de juntas de mesmo metal base, parâmetros e consumíveis de soldagem, se alterariam ao serem produzidas por GMAW e GMAW-RE, respectivamente. As propriedades obtidas através de ensaios de tração e Charpy-V foram comparadas apenas em seus aspectos macroscópicos, não havendo grandes diferenças entre elas..

Embora estes estudos tratassem das propriedades mecânicas, não houve investigações mais profundas quanto as transformações microestruturais que ocorreram devido ao perfil térmico diferente que é inerente do processo GMAW-RE e suas implicações nas propriedades mecânicas.

Já Gusman-Flores et al. [26] investigaram como a morfologia do metal de solda e da ZTA se relacionariam com as propriedades mecânicas avaliadas nos ensaios e como essas microestruturas se diferenciavam por conta do processo que as produziu.

Como notado nesta revisão, a literatura disponível ainda é carente de evidências

experimentais que permitam uma conclusão efetiva sobre o potencial do processo GMAW-RE na produção de juntas soldadas com qualidade assegurada. Assim, fica evidente a necessidade de estudos mais detalhados que permitam uma decisão sobre a utilização do processo GMAW-RE em substituição ao processo GMAW convencional nas mais variadas aplicações industriais.

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

III.1 – Materiais

Como material base, foram utilizadas chapas de aço ASTM A36 com microestrutura constituída por ferrita e perlita (Figura III.1), com comprimento, largura e espessura nas dimensões de 500 x 150 x 10 mm, respectivamente. Como consumível de soldagem, foi utilizado um arame sólido da classe AWS ER 110S-G de 1,2 mm de diâmetro para ambos os experimentos. A Tabela III.1 mostra a composição química obtida por espectrometria de emissão ótica do metal base e dos metais depositados, além da composição do arame utilizado.

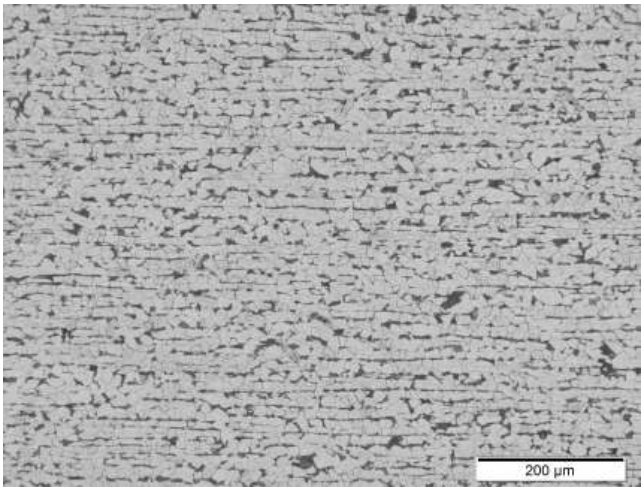


Figura III.1- Microestrutura do metal base. Ataque: Nital 2%.

Tabela III.1 - Composição química dos materiais (% em peso).

Elemento Material	C	Si	P	S	Mn	Mo	Ni	Cr	Cu
Metal base	0,22	0,14	0,017	0,020	0,71	0,022	0,09	0,03	0,02
Arame	0,05	0,5	-	-	1,4	0,35	2,0	0,3	-
Metal de solda GMAW	0,14	0,43	0,013	0,003	1,35	0,27	1,15	0,24	0,11
Metal de solda GMAW-RE	0,15	0,38	0,017	0,002	1,27	0,26	1,04	0,23	0,12

III.2. – Soldagem

As Figuras II.2 e II.3 mostram a geometria das juntas para a soldagem pelos processos GMAW-RE e GMAW, respectivamente. Para soldagem pelo processo GMAW-RE, as juntas foram preparadas com chanfro reto e abertura de 8 mm. Para o processo de soldagem GMAW, as juntas foram preparadas com chanfro em V, com ângulo de 60°, sem nariz e abertura de 5mm. Para ambas as juntas foi utilizado um "backing" nas dimensões de 100 mm x 500 mm.

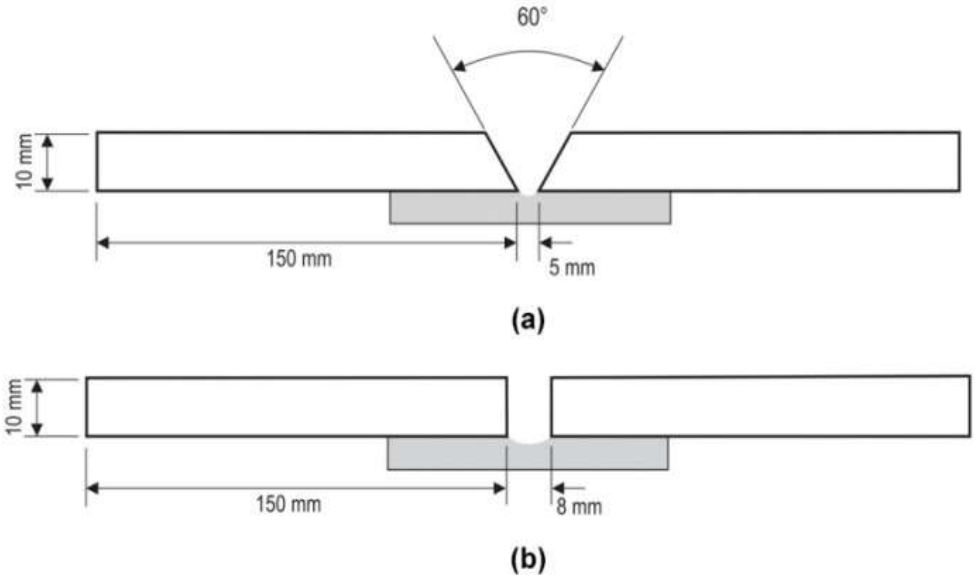


Figura III.2 – Geometria das juntas utilizadas para a soldagem.
(a) Processo GMAW; (b) Processo GMAW-RE

As juntas foram preaquecidas à temperatura de 100°C, através de chama oxiacetilênica, e posteriormente foi realizada a soldagem multipasse, na posição plana, com uma temperatura máxima entre passes de 150°C. O controle do preaquecimento e da temperatura entre passes foi realizado através de pirômetro de contato, devidamente calibrado. Como gás de proteção, foi utilizada uma mistura Ar-2%O2 com uma vazão de 20 l/min.

A soldagem foi conduzida com oscilação lateral em ambos os processos, de modo a obter energias de soldagem mais próximas e, consequentemente, velocidades de resfriamento similares. Foi ainda utilizado um sistema portátil de monitoramento de

processos de soldagem, que permite registrar a corrente e a tensão do arco elétrico, a vazão do gás de proteção e a velocidade de alimentação de arame-eletrodo, com taxa de aquisição de dados de 5 kHz. Para o processo GMAW-RE, foi utilizada uma velocidade de rotação de 50Hz e um diâmetro de giro de 3 mm.

A Tabela III.2 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados, obtidos a partir do sistema de monitoramento.

Tabela III.2– Parâmetros de soldagem das juntas soldadas, onde I = intensidade de corrente; U= tensão; Vs = velocidade de soldagem; Va = velocidade de alimentação; Es = energia de soldagem

Processo	Passe	I (A)	U (V)	Vs (mm/s)	Va (mm/s)	Es (kJ/mm)	Tempo de arco aberto (s)	Taxa de deposição (kg/h)
GMAW	1	216	26	2,2	1,0	2,5	225	3,25
	2	251	27	3,5	1,3	2,0	145	4,21
	3	257	27	3,3	1,3	2,1	153	4,22
Média GMAW		241	27	3,0	-	2,25	-	3,80
GMAW-RE	1	254	27	3,1	1,3	2,27	163	4,22
	2	241	27	5,5	1,3	2,39	182	4,21
Média GMAW-RE		247	27	5,8	-	2,33		4,21

III.3 – Medição de tensões residuais (Adicionar o local onde os ensaios foram feitos)

As tensões residuais foram medidas e analisadas na superfície das juntas através de tensometria por difração de raios-X utilizando o método $sen^2\Psi$, com analisador Stressrad. Foi utilizada radiação CrKα, difratando o plano (211) da ferrita (2θ = 156,41°), sob cinco ângulos de inclinação (Ψ) em cada ponto, a saber: 0°, 20°, 30°, 40° e 45°. O tempo de exposição par cada ângulo foi determinado em 10s. As amostras foram medidas no topo de ambas as juntas, nas direções transversal (T) e longitudinal (L) ao cordão de solda, na zona termicamente afetada (ZTA).

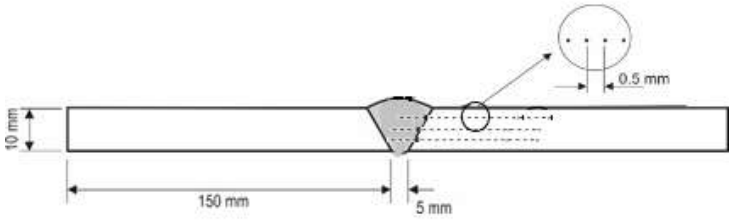
III.4 – Ensaios Mecânicos

Foram realizados ensaios de microdureza Vickers ($HV_{0.5}$) e de impacto Charpy-V reduzido, em corpos-de-prova foram retirados transversalmente ao cordão de solda.

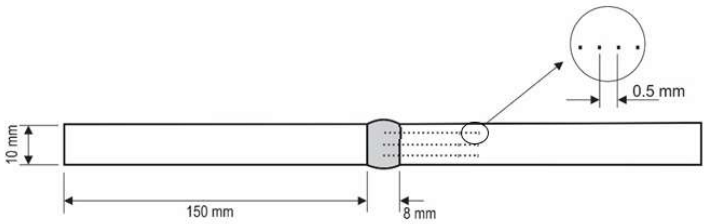
III.4.1 – Ensaios de Microdureza Vickers ($HV_{0,5}$)

Foram realizados ensaios de microdureza Vickers ($HV_{0,5}$) com aplicação de carga de 500gf por 15 s, à temperatura ambiente, em amostras retiradas da seção transversal das juntas soldadas pelos processos GMAW-RE e GMAW. Foram obtidos 3 perfis a partir de medidas executadas com espaçamento de 0,5 mm entre medidas, passando por metal de base, ZTA e metal de solda, a 2 mm do topo, na metade da espessura e a 2 mm da raiz, conforme mostrado na Figura III.3a e Figura 3b respectivamente.

Para realização dos ensaios, foi utilizado um microdurômetro marca Instron-Wilson®, modelo 402 MVD.



a)



b)

Figura III.3 – Posição dos perfis de Microdureza Vickers ($HV_{0,5}$).
(a) GMAW, (b) GMAW-RE.

III.4.2 –Ensaios de Impacto Charpy-V

Os ensaios de impacto Charpy-V foram realizados com um pêndulo de impacto da marca Wolpert com energia de 300 J, a temperatura de 23 °C em corpos-de-prova reduzidos de dimensões 5x10x55 mm, de acordo com a norma ASTM A-370 [37]. Os corpos-de-prova foram retirados transversalmente ao cordão de solda, sendo o entalhe posicionado no plano da espessura nas posições relativas à ZTA a 1 mm da linha de fusão (LF) e no metal base. Foram utilizados 3 corpos-de-prova para cada condição de análise. A Figura III.4 mostra detalhes do posicionamento dos copos-de-prova na ZTA.

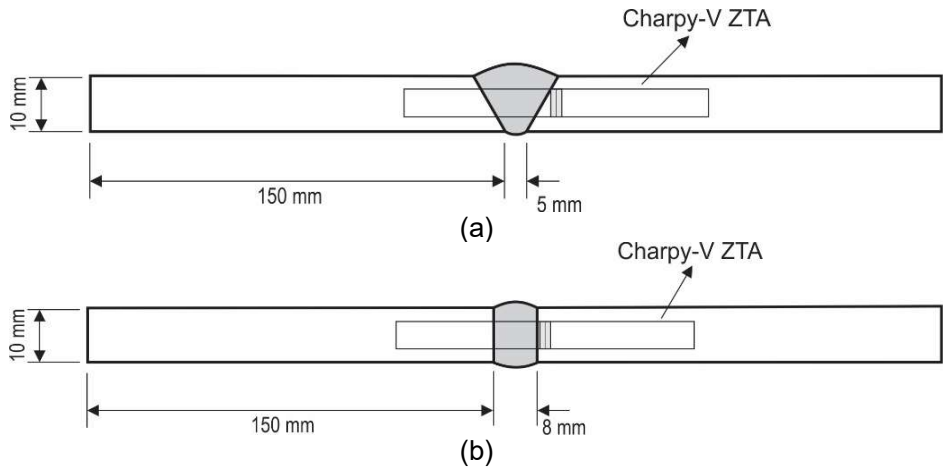


Figura III.4 – Esquema de retirada do corpo de prova Charpy-V das juntas soldadas. (a) GMAW, (b) GMAW-RE.

III.5 - Ensaios Metalográficos

Foi realizada análise metalográfica da ZTA e do metal de base, consistindo de macrografia e microscopia ótica (MO), montagem de mosaicos a partir e micrografias sequenciais, para avaliação das microestruturas presentes nas juntas soldadas pelos dois processos GMAW e GMAW-RE. Foram comparadas a evolução e as características das microestruturas a partir da linha de fusão até o metal base a 1mm da superfície, no meio da chapa e a 1 mm da raiz.

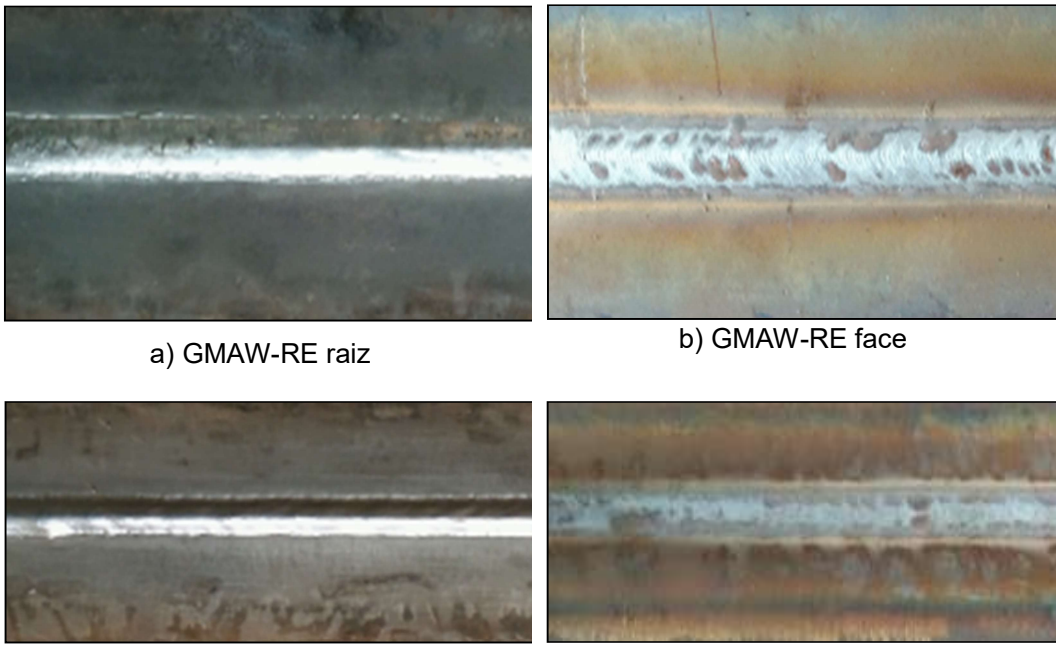
A preparação das amostras consistiu da técnica convencional de lixamento com lixas de granulometria 100, 220, 320, 400, 500 e 600 seguido de polimento com pasta de diamante de 6, 3 e 1 μm. Após o polimento realizou-se o ataque químico com reagente de nital 2%.

Para análise por microscopia óptica, foi utilizado um microscópio óptico OLYMPUS modelo BX-60M integrado a um sistema de aquisição de imagem Stream Essentials®.

CAPÍTULO IV - RESULTADOS

IV.1.- Soldagem

A Figura IV.1 apresenta o aspecto visual das duas juntas soldadas considerando as regiões de face e raiz. Desconsiderando as áreas normais de descarte, ambas as juntas soldadas apresentaram aspecto homogêneo e sem descontinuidades detectáveis visualmente, tanto na face quanto na raiz. Foi efetuado um ensaio de raios-x, cujo laudo consta no Anexo-1, que não detectou descontinuidades.



a) GMAW-RE raiz

b) GMAW-RE face

c) GMAW raiz

d) GMAW face

Figura IV.1- Aspecto visual das juntas soldadas nas regiões de face e raiz.

Na face foi encontrado, nos dois processos, a formação de pequenas regiões com óxido superficial.

IV.2 – Medição de tensões residuais

A Tabela IV.1 apresenta os resultados da medição das tensões residuais nas juntas

soldadas onde se nota que, na direção longitudinal de soldagem os valores de tensão residual são trativos e na direção transversal os valores são compressivos, em ambos os processos. Com base nestes resultados, não se observa diferenças significativas entre os resultados obtidos para os dois processos, estando os mesmos bem abaixo do valor do limite de escoamento de 330 MPa do material estudado [38].

Tabela IV.1- Resultados da medição das tensões residuais juntas soldadas.

GMAW-RE		GMAW	
Longitudinal (MPa)	Transversal (MPa)	Longitudinal (MPa)	Transversal (MPa)
58 ±2	-166 ±12	46 ±5	-164 ±20

IV.3 – Ensaios Mecânicos

IV.3.1 – Ensaios de Microdureza Vickers ($HV_{0,5}$)

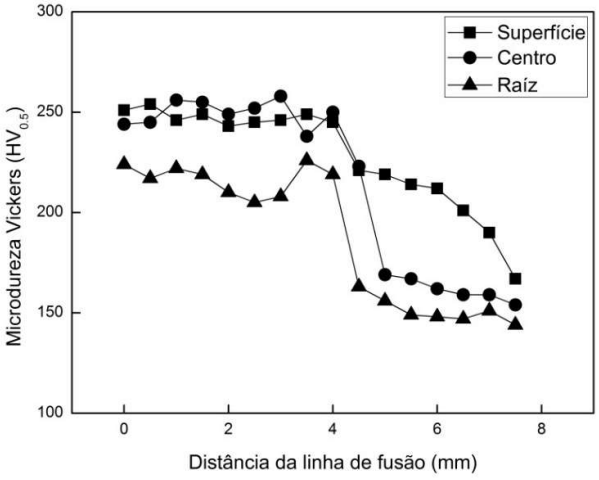
A Figura IV.2 mostra os perfis de microdureza Vickers das juntas soldadas, onde se notam que as seguintes características:

a) As durezas experimentam uma redução à medida que se afastam da linha de fusão em direção ao metal base;

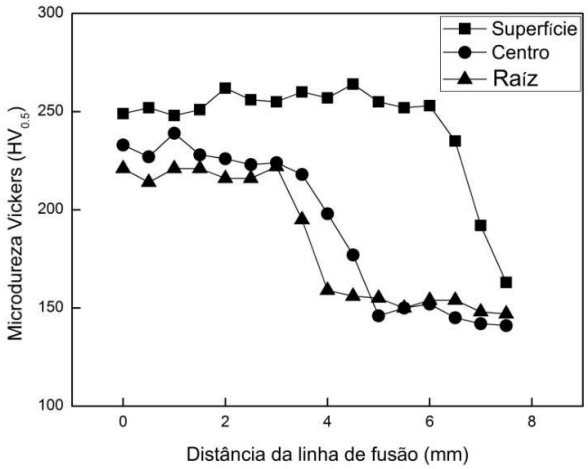
b) Os maiores valores de dureza foram encontrados próximos à superfície;

c) Na região da superfície, a queda de dureza ocorre para uma maior distância da linha de fusão para a junta GMAW-RE e; nas outras regiões houve há interferência dos aquecimentos interpasses

d) Não se observam diferenças significativas na comparação das juntas soldadas.



(a)



(b)

Figura IV.2 - Resultados do ensaio de microdureza Vickers ($HV_{0,5}$) em diferentes regiões das juntas soldadas: a) GMAW; (b) GMAW-RE.

IV.3.2 –Ensaios de Impacto Charpy-V

A Figura IV.3, mostra os resultados dos ensaios de impacto realizados para a ZTA e para o metal base. Nota-se que a ZTA do processo GMAW-RE apresentou valores de energia absorvida inferiores aos obtidos para a ZTA do processo GMAW e o metal base.

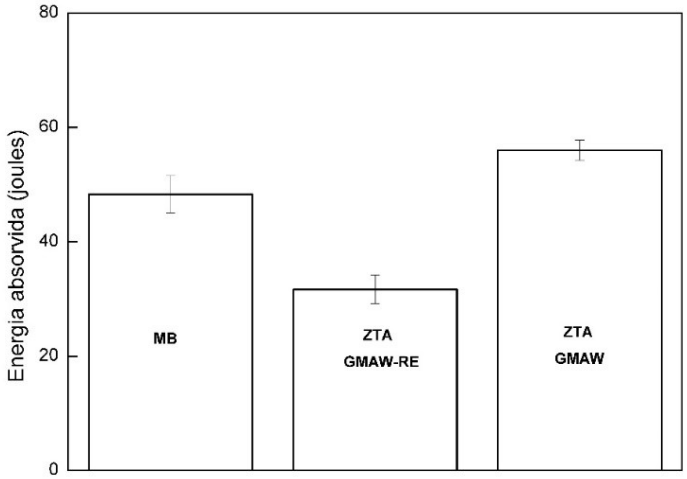
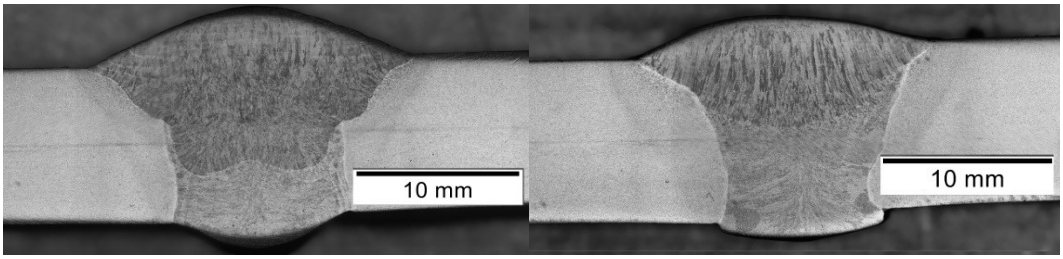


Figura IV.3 - Resultado dos ensaios de impacto realizados na região da ZTA dos processos GMAW-RE, GMAW e Metal base.

IV.4 - Ensaios Metalográficos

A Figura IV.4 mostra o aspecto macrográfico das juntas soldadas, onde se nota a característica da soldagem multipasse. A inspeção visual da seção macrográfica não revela a presença de descontinuidades. Nota-se ainda uma maior extensão da ZTA para o processo GMAW-RE.



a) **b)**

Figura IV.4 - Macrografias das juntas soldadas. Ataque: nital 2%,

a) GMAW b) GMAW-RE

As Figuras IV.5 e IV.6 mostram, para efeito de comparação, o quanto a ZTA da junta soldada por GMAW-RE é maior do que a ZTA da junta soldada pelo processo

GMAW. Nas medidas realizadas por microscopia óptica o maior comprimento de ZTA para o processo GMAW-RE foi de 6,73mm e para o processo GMAW 3,93 mm. Colocar a metodologia do

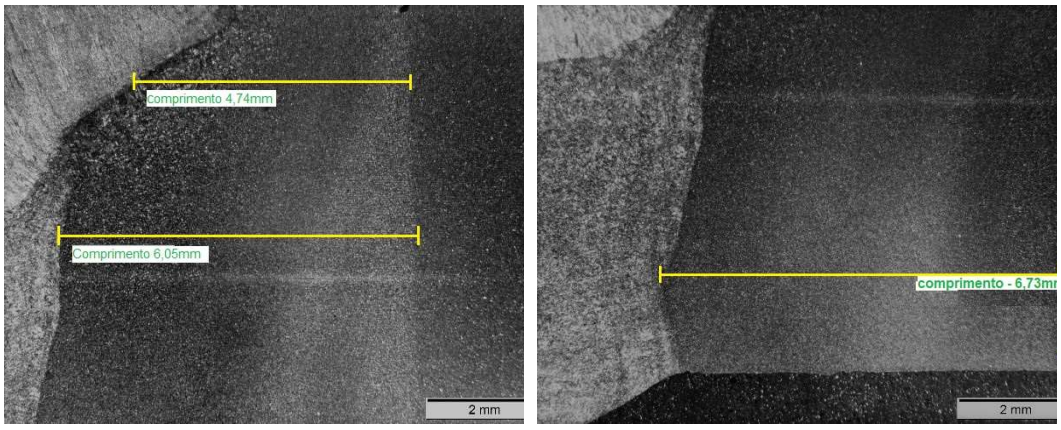


Figura IV.5 – Medida da ZTA da chapa soldada pelo processo GMAW-RE.
Ataque: nital 2%.

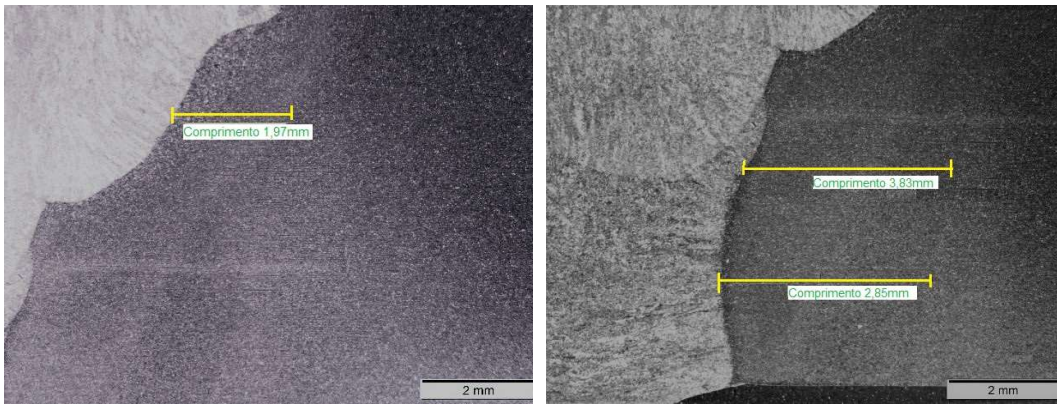


Figura IV.6 – Melhora a definição das micrografias Medida da ZTA da chapa soldada pelo processo GMAW.
Ataque: nital 2%.

Como apresentado no item II.3, as diferenças na distribuição de calor nas juntas em função das particularidades de cada processo, resulta em evoluções microestruturais diferentes, especialmente a 1mm da superfície, como pode ser observado nas Figuras IV.7 e IV.8.

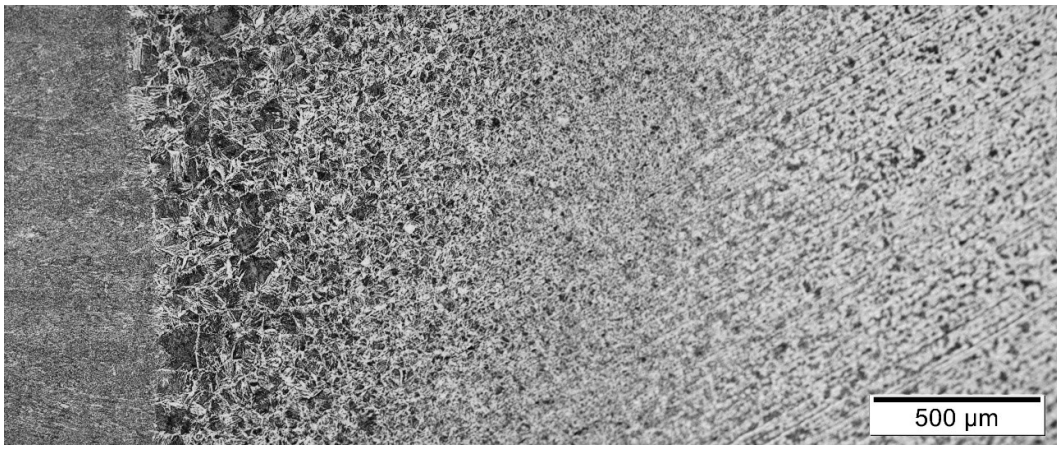
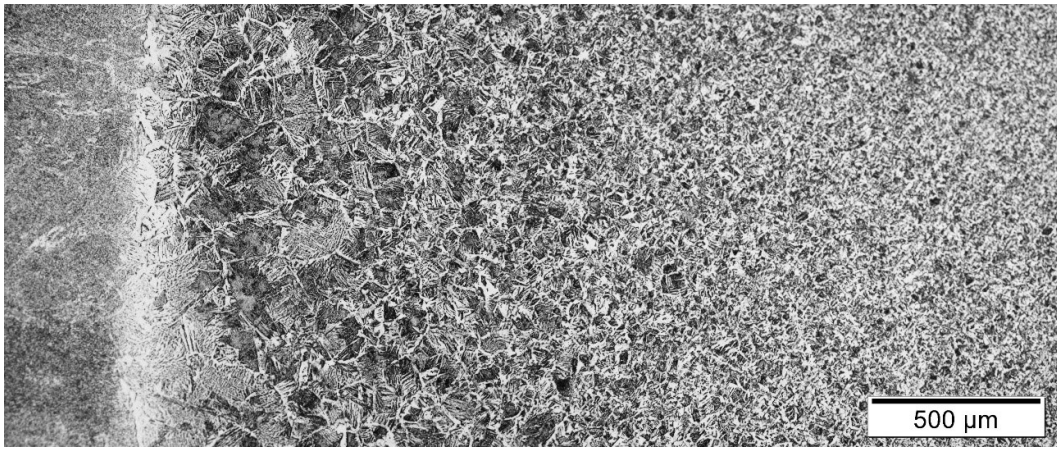


Figura IV.7 - Evolução microestrutural da junta soldada por GMAW próximo da superfície. Aumento de 250 x. Ataque: nital 2%.



FiguraIV.8 - Evolução microestrutural da junta soldada por GMAW-RE próximo da superfície. Aumento 250x. Ataque: nital 2%.

Como pode ser visto, as microestruturas diferem principalmente na granulometria próximo a linha de fusão, sendo a chapa soldada pelo processo GMAW-RE, a que possui uma microestrutura mais grosseira.

Um maior detalhamento dos constituintes microestruturais presentes é mostrado nas Figuras IV.9 e IV.10. Nas regiões com transformação de fase completa (RGG e RGF) verifica-se uma microestrutura composta predominantemente de ferrita de contorno de grão (FP), perlita (P) e bainita (B), com as variações esperadas de tamanho de grão. Nota-se ainda que a junta GMAW-RE proporcionou uma microestrutura mais grosseira na RGG, com tamanhos de grão de 241,02 μm para o processo GMAW-RE e de 118,76 μm para o processo GMAW, obtidos pelo método da interseção.

Nas outras regiões da ZTA , região intercrítica (RIC) e região sub-crítica (RSC), há predominância de ferrita e perlita, sendo que se observa ainda um esboroamento da perlita nesta última região.

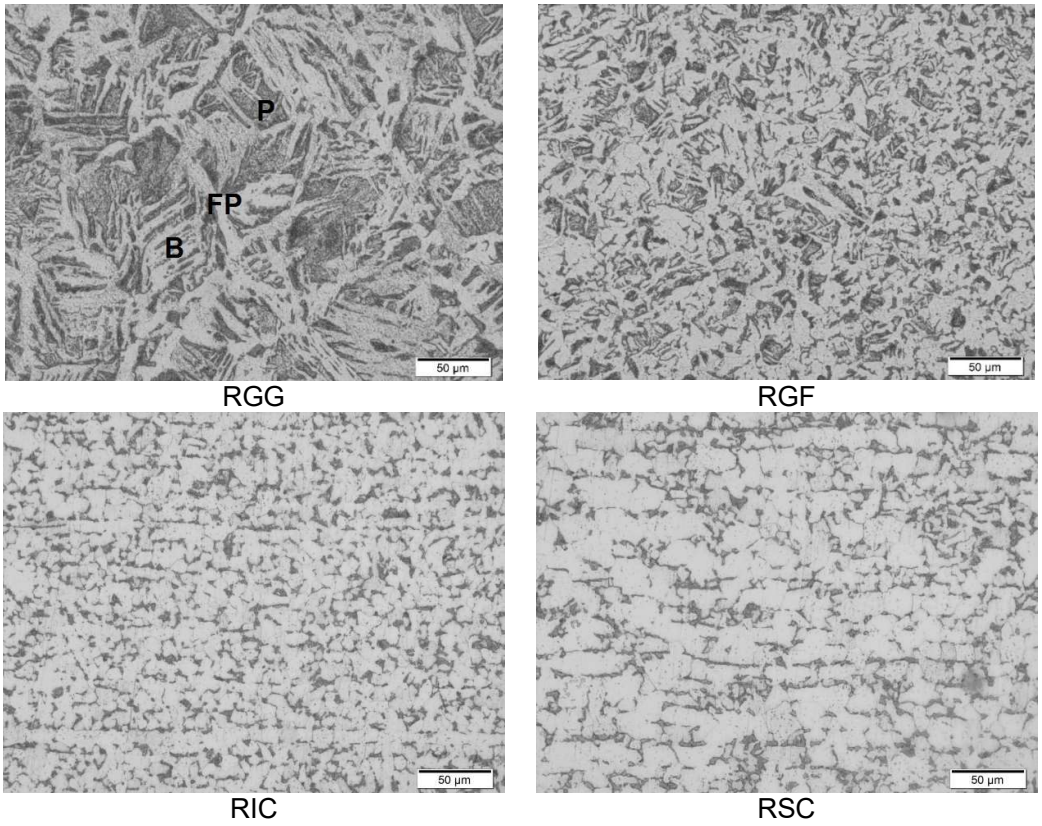


Figura IV.9 – Microestrutura observada por MO da junta soldada pelo processo GMAW. Aumento 500x. Ataque: nital 2%.

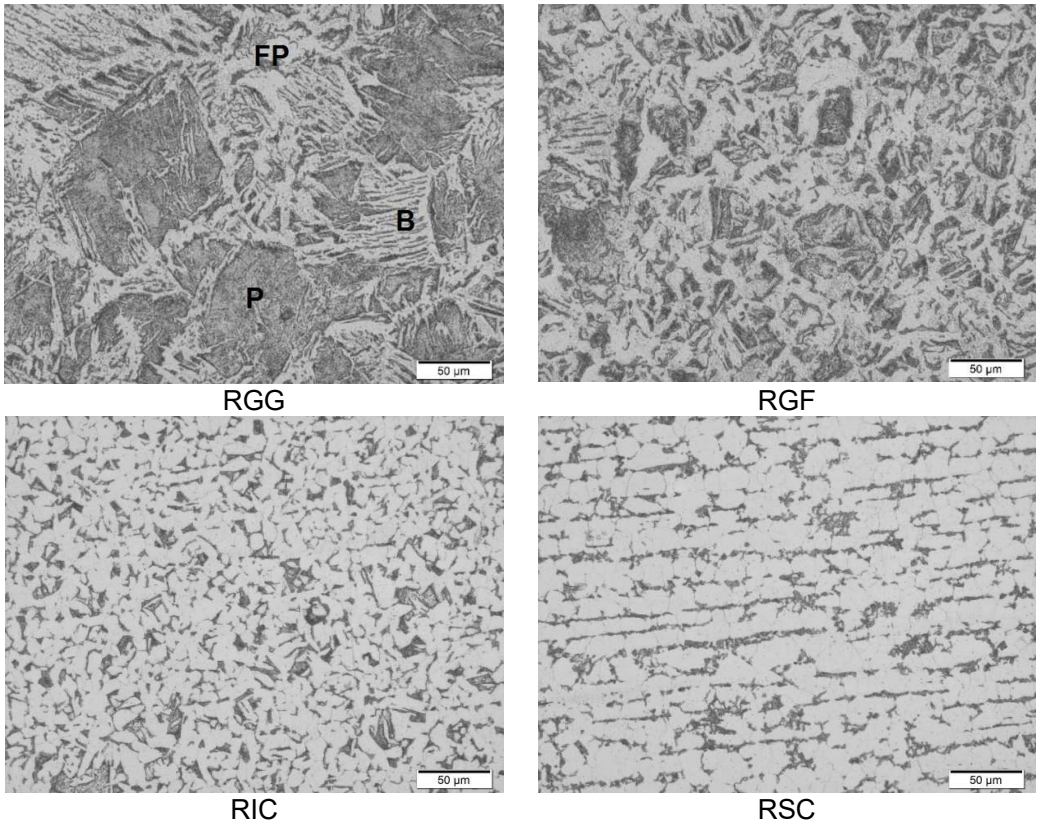


Figura IV.10 – Microestrutura observada por MO da junta soldada pelo processo GMAW-RE. Aumento 500x. Ataque: nital 2%.

A Figura IV.11 mostra a evolução da microestrutura ao longo da ponta do entalhe do corpo-de-prova do ensaio Charpy-V posicionado na ZTA das juntas soldadas pelos dois processos, onde se nota a contribuição de diferentes constituintes microestruturais. Um melhor detalhamento destes constituintes e sua contribuição percentual é apresentado na Figura IV.12, com destaque para o fato da junta soldada pelo processo GMAW-RE apresentar uma microestrutura muito mais grosseira.

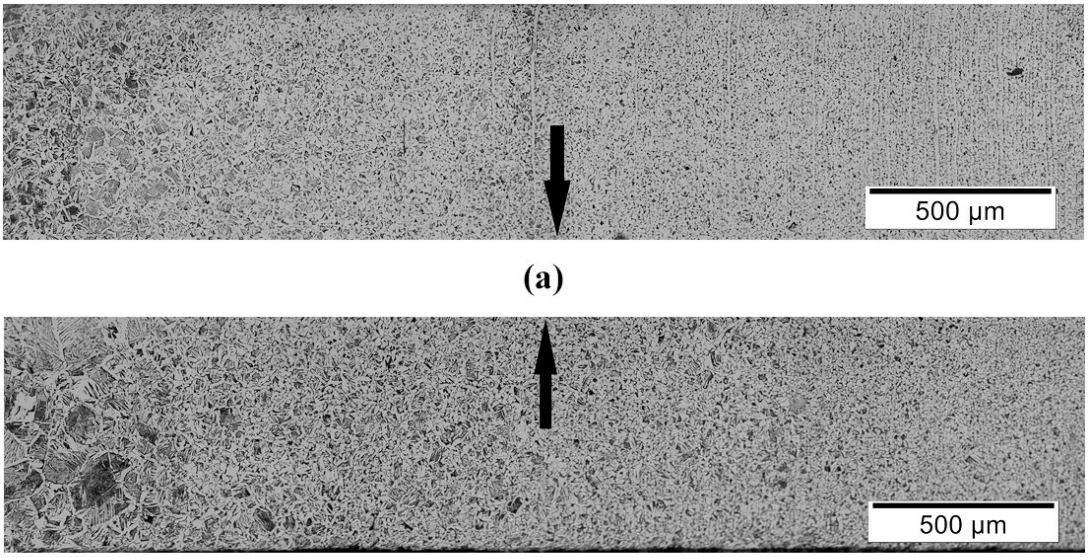


Figura IV.11- Distribuição microestrutural na superfície do entalhe no plano da espessura do Charpy-V (indicada pela seta) posicionado na ZTA das juntas soldadas. Aumento 500x. Ataque: nital 2%.
(a) GMAW; (b) GMAW-RE.

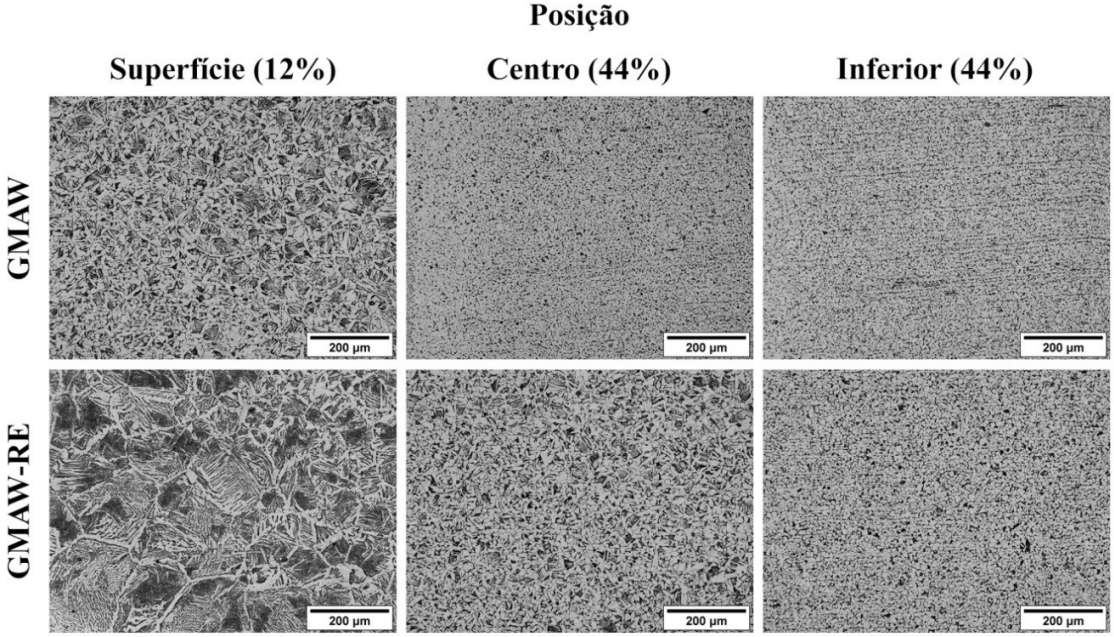


Figura IV.12 - Microestrutura da ZTA na região correspondente à ponta do entalhe do corpo-de-prova Charpy-V.
Onde: Os percentuais apresentados na legenda superior, se referem a participação de cada região no entalhe Charpy-V. Aumento 500x. Ataque: nital 2%.

Capítulo V - DISCUSSÃO

V.1- Produtividade

Segundo Myers [39] a taxa de deposição para o processo GMAW utilizando um arame sólido de 1,2 mm de diâmetro varia de 3,6 a 4,5 kg/h. Pode-se observar na Tabela III.2, que os valores obtidos no presente trabalho situam-se dentro destes limites para ambos os processos, estando de acordo com outros trabalhos experimentais [30-35]. Embora a taxa de deposição média observada com o processo GMAW seja inferior ao do processo GMAW-RE, deve-se destacar que este resultado é consequência da contribuição do passe de raiz, visto que os passes de enchimento e acabamento apresentaram resultados similares (Tabela III.2.). Neste aspecto, deve-se comentar que os parâmetros de soldagem para o passe de raiz do processo GMAW foram ajustados experimentalmente para obtenção do passe de raiz com a qualidade desejada, constatada com os ensaios de Raios-X. Para encontrar os parâmetros do GMAW-RE, foi realizada uma série de testes preliminares, variando o diâmetro de rotação, velocidade de rotação e abertura da junta, onde os parâmetros utilizados nesta dissertação foram os que representam as melhores condições de soldagem, inclusive reprodutibilidade

Outra questão importante envolve o fato que, mesmo utilizando uma espessura que se encontra no limite indicado por outros autores [36] para a qual existe ganho na aplicação do processo GMAW-RE, os resultados mostrados na Tabela IV.1 permitem verificar que o desempenho deste processo é ainda significativamente superior aquele propiciado pelo processo convencional.

Conforme já citado, a obtenção de juntas soldadas sem ocorrência de falta de fusão lateral mesmo com utilização de chanfro reto, a grande limitação do processo convencional [26], traz como consequência uma redução importante do tempo de arco aberto, menor volume de metal depositado, menor consumo de gás para soldagem, menor tempo para preaquecimento, menor necessidade de preparação de chanfro, entre outros. A combinação destes resultados permite um aumento da produtividade associada com a redução dos custos de soldagem da ordem de 30% no caso do presente estudo.

Tabela V.1 - Desempenho comparativo entre os processos GMAW e GMAW-RE por metro de solda.

Item	GMAW	GMAW-RE	Variação (%)
Metal depositado (kg)	1,10	0,81	27
Tempo de arco aberto (min)	17,4	11,5	34
Volume de Gás (L)	349	230	34
Taxa de deposição média (kg/h)	3,80	4,21	11

Para se obter o retorno do investimento do equipamento, seria necessária a fabricação de 4285 metros de junta. Entretanto, deve-se ressaltar que uma das principais vantagens do processo é o ganho de produtividade. Para soldar essa quantidade de metros de juntas seriam necessárias 820 horas de operação com o novo processo (GMAW-RE), contra 1245 horas para o GMAW convencional, uma redução de 425 horas de trabalho.

Estes cálculos foram baseados nos dados das juntas deste trabalho, em que os custos de fabricação do chanfro não foram considerados, fator que tornaria o retorno mais rápido.

V.2 - Propriedades da Junta Soldada

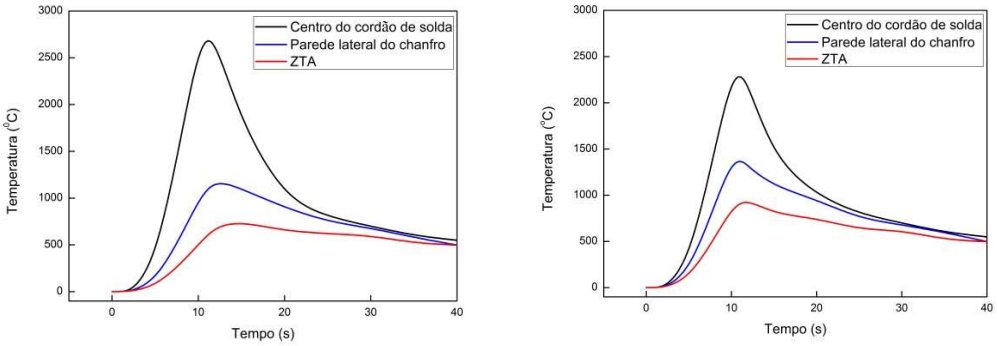
Conforme já citado anteriormente, o desenvolvimento do processo GMAW-RE tem como um de seus objetivos principais a obtenção de junta soldada isenta de defeitos com utilização de chanfro reto ao invés de junta chanfrada usualmente empregada pelo processo convencional. Assim, diferentes geometrias de junta foram intencionalmente utilizadas para simular as condições reais de emprego de cada processo. Estas alterações na geometria da junta, vistas na Figura III.2, fizeram com que as condições de soldagem para cada processo fossem diferentes de modo a obter juntas isentas de defeitos para análise das propriedades mecânicas. No caso da junta GMAW-RE, foi utilizado chanfro reto com abertura de raiz maior do que a aplicada na junta GMAW, enquanto neste último processo foi necessário um ajuste dos parâmetros de soldagem para obtenção de passe de raiz adequado, além do chanfro em V-60°.

Em relação a tensões residuais, embora fosse esperada uma redução das tensões residuais da junta soldada com o processo GMAW-RE em função da menor

contração volumétrica do metal de solda devido ao menor volume de material depositado, os resultados obtidos não evidenciam mudanças significantes neste aspecto (Tabela IV.1). Por outro lado, deve ser destacado que os resultados encontrados apresentam valores em baixa magnitude e comparáveis com o processo convencional, o que caracteriza não haver efeito nocivo para a junta soldada. Futuros estudos se fazem necessários, inclusive por outras técnicas para uma avaliação mais adequada desta questão, notadamente para espessuras maiores e materiais de maior temperabilidade, onde acredita-se haver outras vantagens competitivas.

As alterações na geometria de chanfro (Figura III.2), poderiam indicar também uma redução da largura da poça de fusão e da extensão da ZTA para a junta GMAW-RE, o que foi observado por outros autores [27,28], quando da soldagem em espessuras maiores. No entanto, no caso do presente trabalho, onde a espessura de 10 mm se situa no limite para a qual o processo GMAW-RE seria vantajoso [36], este fato não foi observado visto que a extensão da ZTA é muito superior no processo GMAW-RE (da ordem de 3,8mm para o processo GMAW e 6,7 mm para o processo GMAW-RE) enquanto que a largura da poça da fusão é equivalente para ambos os processos (da ordem de 19 mm no topo).

Uma análise mais detalhada das macrografias apresentadas nas Figuras IV.5 e IV.6, permite observar uma extensão da ZTA maior para o processo GMAW-RE, o que não é devido somente a maior energia de soldagem (Tabela III.2). De fato, embora a energia de soldagem deste processo seja ligeiramente superior, há de se ressaltar que o grande diferencial destes 2 processos envolve o fato do eletrodo ser rotativo. No processo convencional a energia do arco é concentrada no centro do cordão, enquanto que no GMAW-RE, a rotação do arame faz com que a energia seja direcionada de forma periódica para as paredes do chanfro, modificando a distribuição de calor na junta [47,48,49,51]. Assim, segundo Bai et al. [36], a extensão da largura da ZTA no processo GMAW-RE tende a ser maior devido a rotação do arco, o que resulta em uma diminuição na energia no centro do cordão de solda e um aumento na região periférica, conforme observado experimentalmente por Guo et al. [24] e mostrado esquematicamente na Figura V.1.



(a) (b)

Figura V.1 - Diagrama esquemático do comportamento dos ciclos térmicos para os processos de soldagem [24]. (a) GMAW ; (b) GMAW-RE

Outro efeito que pode ser esperado em função da rotação do arco elétrico é o aumento da largura da poça de fusão, que por sua vez, terá efeito sobre a densidade de potência do processo, ou seja, o aumento da largura da poça de fusão diminui a densidade de potência e a penetração na junta. Espera-se ainda que, com o calor redistribuído para as paredes do chanfro pela rotação do arco, o fluxo térmico na direção transversal ao deslocamento da fonte de calor seja mais intenso, o que contribuiria para uma maior extensão da ZTA. Como consequência, a microestrutura da ZTA deverá mais grosseira, por experimentar um ciclo térmico com maiores temperaturas de pico e permanência por tempos mais longos em temperaturas mais elevadas, o que foi observado no presente trabalho (Figuras IV.9 a IV.12).

No caso presente, como se trata de um aço C-Mn de baixa temperabilidade, os constituintes microestruturais presentes em ambas as juntas são os esperados para um aço C-Mn, somente diferindo no tamanho de grão em função do ciclo térmico experimentado por cada um. O efeito do reaquecimento pelos passes posteriores se traduz em um refino microestrutural e ocorrência preponderante de ferrita e carbetos na região central (Figura IV.11 e IV.12), todas estas evidências estando de acordo com outros trabalhos experimentais [47-52].

A similaridade microestrutural foi também observada no comportamento mecânico da junta soldada, pois como pode ser notado na Figura IV.2, os valores de microdureza são próximos para as duas juntas soldadas, apenas com diferença nos

valores na posição em que a queda acentuada de dureza se verifica, o que é atribuído à maior extensão da ZTA da junta GMAW-RE.

Esta é uma importante questão, dado que o posicionamento do entalhe Charpy-V a uma mesma distância da linha de fusão para condições diferentes de distribuição de calor na junta soldada pode se traduzir em efeitos diversos nas propriedades mecânicas, já que estruturas mais grosseiras submetidas a ciclos de resfriamento mais longos podem apresentar resultados inferiores de tenacidade ao impacto [53,54].

A discussão acima foi observada no comportamento comparativo da tenacidade da ZTA, pois uma maior proporção de microestrutura mais grosseira na ponta do entalhe Charpy-V (Figura IV.12), pode ter contribuído sobremaneira para um menor valor de energia absorvida no ensaio de impacto da junta soldada pelo processo GMAW-RE (Figura IV.3). No entanto, deve ser destacado o fato que na soldagem de aços como o aço ASTM A36 utilizado no presente trabalho, não existem requisitos de tenacidade ao impacto para o metal base [45]. Assim, a qualificação de procedimentos que, usualmente apresenta requisitos envolvendo ensaios de tração e dobramento, pode ser realizada com resultados satisfatórios, conforme verificado recentemente por Silveira [38]. Adicionalmente, mesmo com valores inferiores aos obtidos pelo processo GMAW, os resultados de tenacidade ao impacto do processo GMAW-RE estão dentro de limites que permitem a sua utilização em alguns projetos e especificações com aços estruturais do tipo C-Mn [55,56,57].

Ainda neste aspecto, é digna de menção a ocorrência de perlita degenerada [59, 60, 61, 62] na região sub-crítica da ZTA de ambas as juntas soldadas (Figuras IV.9 e IV.10). A presença deste constituinte, mostrado em detalhe na Figura V.2, embora não tenha promovido alterações nocivas no comportamento de tração da junta soldada, uma vez que a fratura do corpo-de-prova utilizado na qualificação do procedimento de soldagem executado por Silveira [52.] tenha ocorrido no metal base (Figura V.3), usualmente está associada com uma baixa tenacidade [63] devido a presença de uma elevada frequência de contornos de baixo ângulo em sua sub-estrutura [62]. Considerando que esta ocorrência é esperada para aços C-Mn independente do processo de soldagem, é possível inferir que o menor valor de tenacidade obtido na ZTA para o processo GMAW-RE em comparação ao processo GMAW, não é um impeditivo para sua utilização, já que outras regiões da junta soldada podem apresentar valores equivalentes de tenacidade ao impacto.

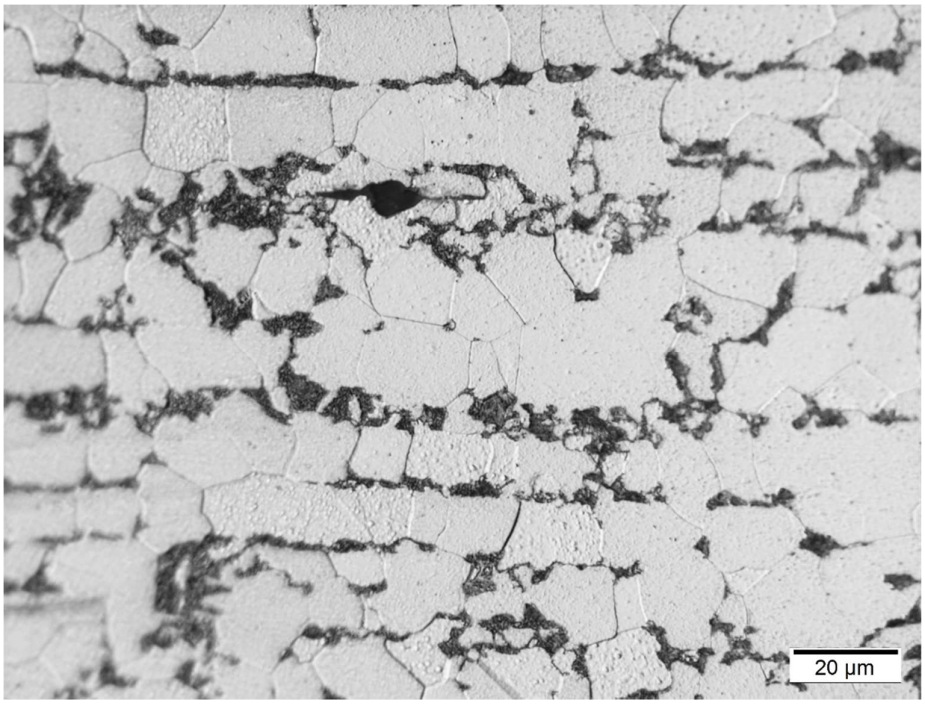


Figura V.2 – Perlita degenerada presente na ZTA das juntas analisadas. Aumento 1000x. Ataque: nital 2%.

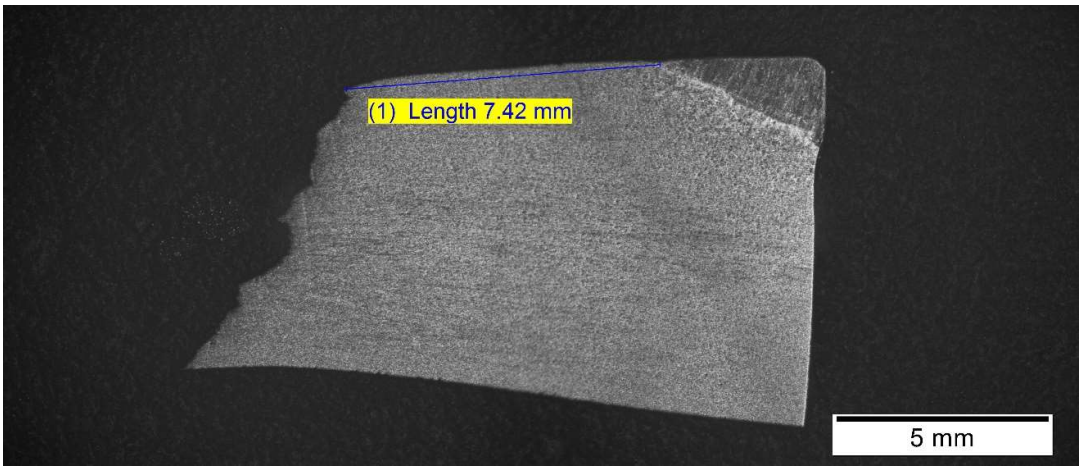


Figura V.3 – Local da fratura do corpo de prova de tração transversal da junta soldada pelo processo GMAW-RE utilizada para qualificação de procedimento de soldagem [52]. Aumento: 2,5x. Ataque: nital 2%.

V.3. Aspectos Práticos dos Resultados

Os resultados obtidos no presente trabalho correspondem a resultados iniciais de uma pesquisa mais ampla e objetivaram contribuir para um melhor entendimento do desempenho do processo GMAW-RE na proposta de substituição

do processo GMAW em aplicações industriais. Neste aspecto, foi confirmado o elevado potencial do processo GMAW-RE para prover as vantagens competitivas de ganho substancial de produtividade e redução de custos, mesmo para chapas mais finas. Isto permite inferir que em juntas mais espessas, os resultados neste aspecto podem ser ainda mais representativos.

No entanto, deve ser destacado que uma análise mais decisiva sobre as reais vantagens da utilização deste processo, ainda precisa de mais evidências que consolidem a tendência observada. Particularmente, algumas questões merecem um destaque para futuras avaliações, tais como, possíveis vantagens de utilização de um equipamento (tocha de soldagem) de custo elevado para um retorno financeiro adequado, possibilidade de soldagem fora de posição e sensibilidade a preparação da superfície da junta soldada. Uma análise inicial permitiu verificar que, sob o ponto de vista de investimento, a realização de soldagem a partir de 4.500 metros de juntas realizadas, já traria uma resposta positiva neste quesito, visto não ser apenas o custo do equipamento o fato fundamental, dado que a redução do tempo de preparação de chanfro e do tempo de soldagem e suas consequências, são também fatores de alto impacto. Em relação às propriedades mecânicas das juntas soldadas, fica evidente a necessidade de realização de outros experimentos que avaliem o comportamento de diversos outros materiais, espessuras e mesmo modificação de parâmetros de soldagem, visto que para procedimentos similares parece haver um certo compromisso das propriedades da ZTA em função do ciclo térmico com maiores temperaturas de pico. Neste aspecto, deve-se ainda considerar que na soldagem de aços de alta temperabilidade esta questão pode até contribuir para um menor risco de ocorrer trincas a frio, podendo ser este um fator favorável.

De uma maneira geral, parece haver uma indicação para o estudo prioritário da ZTA, região que é submetida aos maiores efeitos negativos da movimentação do arco, já que o metal de solda não deve apresentar mudanças muito significativas ou mesmo apresentar vantagens devido ao refino microestrutural, conforme já observado em outro trabalho experimental [64].

Apesar destas questões, os resultados iniciais se mostraram promissores mesmo na ZTA, visto que como comentado, é possível alcançar os requisitos de inúmeros projetos industriais e assim, é interessante a continuidade da pesquisa neste tema.

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES

Do exposto no presente trabalho, permite-se concluir que para as condições experimentais utilizadas:

a) O processo GMAW com eletrodo rotativo (GMAW-RE) permitiu um ganho de produtividade e redução de custos da ordem de 30% em relação ao processo GMAW convencional;

b) O processo GMAW-RE permitiu a obtenção de juntas soldadas com utilização de chanfro reto sem incidência de defeitos rejeitáveis e com propriedades mecânicas satisfatórias para algumas aplicações industriais;

c) Em comparação com o processo GMAW convencional, as propriedades de impacto da ZTA obtidas pelo processo GMAW-RE apresentaram uma redução significativa devido à microestrutura mais grosseira;

d) O ensaio de tensões residuais não detectou diferenças significativas nas tensões residuais das produzidas pelos dois processos;

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade no tema do presente trabalho, permite-se sugerir:

a) Avaliar o comportamento do ciclo térmico gerado pelo processo GMAW-RE, de forma a ser possível uma avaliação mais precisa da energia de soldagem;
b) Realizar experimentos para otimização dos parâmetros de soldagem e sua relação com as propriedades mecânicas;
c) Realizar experimentos sistemáticos para avaliação da influência do sentido de giro, frequência e diâmetro de giro nas características das juntas soldadas;
d) Realizar experimentos com materiais de maior espessura e de maior resistência mecânica;
e) Realizar experimentos com arame do tipo metal cored;
f) Realizar experimentos para análise do comportamento do metal de solda;
g) Realizar experimentos com outras técnicas de medição de tensões residuais e;
h) Realizar experimentos com soldagem fora de posição.
i) Realizar análise por MEV, para melhor caracterização dos microconstituintes, especialmente do metal de solda.
j) Embora o processo GMAW-RE apresente um elevado potencial para substituição do processo GMAW, são necessárias mais evidências experimentais sobre o comportamento mecânico e microestrutural de juntas soldadas produzidas por este processo antes de uma conclusão definitiva sobre este assunto.

CAPÍTULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CHAUHAN, J.; Review paper on gas metal arc welding (GMAW) of mild steel 1018 by using Taguchi technique, International Journal of Current Engineering and Scientific Research 2017;4(7):57-62

[2] PAULA, M. P. M. de, MODENESI, P. J., & TRINDADE, V. B. (2018). Análise da Influência de Parâmetros de Soldagem em Características Microestruturais e Mecânicas de Juntas Soldadas de um Tubo de Aço API X70Q para Aplicação Sour Service. Soldagem & Inspeção, 23(2), 180–190.

[3] SAHA, M.K.; DAS, S., Gas metal arc weld cladding and its anti-corrosive performance- A brief review, Athens Journal of Technology and Engineering, 2018; 5(2):155-174.

[4] MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V., Soldagem I -Introdução aos Processos de Soldagem,36, 2000, UFMG, 31-58.

[5] ASM, "Metals Handbook Volume 6 – Welding, Brazing and Soldering, ASM International, 2005.

[6] KAH, P.; SUORANTA, R.; MARTIKAINEN, J., Advanced Metal Gas Arc Welding Process, Advanced Manufacturing Technology, London, DOI 10.1007/s00170-012-4513-5, 2012.

[7] NORRISH, J.; Recent gas metal arc welding (GMAW) process developments: the implications related to international fabrication standards, Weldin in the Word, 2017, 61(4), 755 -767..

[8] JORGE, J.C.F.; MEIRA, O.G.; MADALENA, F.C.A; SOUZA, L.F.G; ARAUJO, L.S.; and MENDES, M.C., Evaluation of the AISI 904L alloy weld overlays obtained by GMAW and electro-slag welding processes, Journal of Materials Engineering and Performance 2017; 26(5):2204-2212.

[9] MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V; BRACARENSE, A.Q., "Soldagem – Fundamentos e Tecnologia", Belo Horizonte, Editora UFMG, 2007, 2ª edição

[10] ADRINCHEM, Van Th.J,; IIW Doc. 212–171-6,1969.

[11] AWS, "Welding Handbook Volume 2 – Welding Process", American Society Inc, 1997.

[12] SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; Soldagem MIG/MAG – Artliber Editora-2008.

[13] DEVAKUMARAN, K.; ANANTHAPADMANABAN, M.R., GHOSH, P.K., Variation of chemical composition of high strength low alloy steels with different groove sizes in multi-pass conventional and pulsed current gas metal arc weld depositions, Defence Technology, 2015; 11:147-156.

[14] CHOUDHARY, T; CHAUDHARY, K;, A Study on Effect of Various Process Variables in Gas Metal Arc Welding, International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering, volume: 3 Issue: 11, 2017, 147 – 154.

[15] ROEN, R.A.; US Patent 4,401,878 – “Consumable Arc Welding Torch” August 30, 1983.

[16] PRASAD, V., BABU, M., AJAY, P.; A Review on rotating arc welding process, Materials Today: Proceedings 2018; 5:3551-3555.

[17] WANG, J.Y., REN, Y.S., YANG, F., Guo, H.E.; Novel rotation arc system for narrow gap MAG welding, Science and Technology of Welding and Joining 2007; 12(6):505-507.

[18] RAJU, D., RAJU, G.; Effect of using a rotating electrode in GMAW on weld bead characteristic of aluminum alloy 6061-T6 weldment”, Proceedings of the World Congress on Engineering 2016, Vol II, London, U.K, July 2016.

[19] LI, W., GAO, K., WU, W., WANG, J., JI, Y.; Groove sidewall penetration modeling for rotating narrow gap MAG welding, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2015; 78(1-4):573-581.

[20] GUO, N., HAN, Y., JIA, C., DU, Y.; Effects of wire rotating frequency on metal transfer process in rotating arc narrow gap horizontal GMAW, Advanced Materials Research 2011; 189-193:3395-3399.

[21] KAH, P., LATIFI, H., SUORANTA, R., MATIKAINEN, J., PIRINEN, M.; Usability of arc types in industrial welding, International Journal of Mechanical and Materials Engineering 2014; 9(15):1-12.

[22] SANTOS, A.G.M., BRITO, H.O., DI,RENE H.F., OKUYAMA, M.P., SCHWEDERSKY, M.B., SILVA, R.H.G, Soldagem MIG/MAG com eletrodo rotativo destinado a tubulações, Anais da Rio Oil & Gas Expo and Conference 2018, 24-27 setembro, Rio de Janeiro, Brasil, 1-10.

[23] ZHANG, H, CHANG, Q, LIU, J, Lu H, FENG, J. A novel rotating wire GMAW process to change fusion zone shape and microstructure of mild steel, Materials Letters 2014; 123:101-103.

[24] GUO, N, LIN, S.B., GAO, C., FAN, C.L., YANG, C.L., Study on elimination of interface defects in horizontal joints made by rotating arc narrow gap welding, Science and Technology of Welding and Joining 2009; 14(6):584-586.

[25] GUO, N., WANG, M., GUO, W., YU, J., FENG, J., Study on forming mechanism of appearance defect in rotating arc narrow gap horizontal GMAW, International Journal of Advanced Manufacture Technology 2014; 75(1-4):15-20.

[26] GUZMAN-FLORES, I., VARGAS-ARISTA, B., GASCA-DOMINGUES, J., CRUZ-GONZALES, C.E., GONZALEZ-ALBARRÁN, M.A., PRADO-VILLASANA, J.. Effect of torch weaving on the microstructure, tensile and impact resistances, and fracture of HAZ and weld bead by robotic GMAW process on ASTM A36 steel, Soldagem & Inspeção 2017; 22(1):72-86.

[27] MIN, O., XIN-JUA, T., FENG-GUI, L., SHUN, Y. Welding of quenched and tempered steels with high-spin arc narrow gap MAG system, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2011; 55(5-8):527-533.

[28] RAO, P.S. A Study On The Weld Bead Charecteristics In Pulsed Gas Metal Arc

Welding With Rotating Arc, Proceedings of OMAE04 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering June 20-25, 2004,

[29] JIANPING. J. , Study On Weld Shaping And Mechanical Properties For Three Movement Types Of Arc Welding Robot Torch, Applied Mechanics and Materials Vol 127 (2012).

[30] KOU, S.; Welding Metallurgy, 2º ed., New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, 2003.

[31] PAVELIC, V.; TANBAKUCHI, R.; UYEHARA, O. A.; "Experimental and computed temperature histories in gas tungsten arc welding of thin plates", Welding Journal Research Supplement, v. 48, pp. 295s-3052s, 1969.

[32] GOLDAK, J.; CHAKRAVARTI, A.; BIBBY, M., "A New Finite Element Model for Welding Heat Sources", Metallurgical Transactions B, v. 15B, pp. 299-305, 1984.

[33] GOLDAK, J. A.; AKHLAGHI, M., Computational Welding Mechanics, New York, Springer, 2005.

[34] KRUTZ, G. W.; SEGERLIND, L. J.; "Finite element analysis of welded structures", Welding Journal Research Supplement, v. 57, pp. 211s-216s, 1978.

[35] NART, E.; CELIK, Y., "A practical approach for simulating submerged arc welding process using FE method", Journal of Constructional Steel Research, v. 84, pp. 62-71, March 2013.

[36] BAI, Q.; GUO N.; HAN, Y.; ZHANG, J.; WANG, M., Analysis of temperature distribution in rotating arc welding, Advanced Materials Research, 2012, 472-475:1346-1352.

[37] ASTM 370 Standard Test Methods and Definition for Mechanical Testing of Steel Products, 2005

[38] SILVEIRA, G.M.S., Estudo comparativo de juntas soldadas obtidas pelo processo GMAW convencional e GMAW com arame rotativo (GMAW-R), Projeto Final de Graduação, CEFET-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Novembro 2018.

[39] MYERS, D.; Metal cored wires: advantages and disadvantages. Welding Journal 2002;81(9):39-42.

[40] LINS,J.A.S.; COSTA, H. R. M,; SOUZA, L.F.G.; JORGE, J. C. F., Propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas do aço HY-80 pelos processos eletrodo revestido e GMAW. Soldagem e Inspeção 2014; 19(3):200-211.

[41] RUTZINGER, R.; Influence of the welding process to the dilution rate of weld overlays on unalloyed steel using the weld consumable ERNiCrMo-3 (Alloy 625). BiuletynInstytutu Spawalnictwa 2014; 5:72–5.

[42] GOMES, A. J. C.; QUEIROZ, S. S., JORGE, J. C. F., SOUZA, L. F. G., MENDES, M. C., ARAUJO, L,S., Propriedades mecânicas e microestrutura de metais de solda de alta resistência obtidos pelos processos GMAW e SMAW, Anais do 720 Congresso Anual da ABM 2017; 72(1):1177-1186, DOI:10.5151/1516-392X-30429..

[43] SOEIRO JUNIOR, J. C., LUZ, M. A, BRANDI, S.D., Comparação da Taxa e

Eficiência de Deposição entre os Consumíveis ER70S-6 e E71T-1C, Soldagem & Inspeção. 2015; 20(1):2-15.

[44] JORGE, J.C.F., et al. Influence of welding procedure and PWHT on HSLA steel weld metals. Journal of Materials Research and Technology 2018; doi:10.1016/j.jmrt.2018.05.007

[44] GUO, N.; YANFEI, H.; ZHANG, L, ZOU, Y., A modified heat source model for rotating arc welding, China Welding 2011; 20(3):58-63.

[46] XU, G., LI, L., WANG, J., ZHU, J., LI P., Study of weld formation in swing arc narrow gap vertical GMA welding by numerical modeling and experiment, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2018; 96(5-8):1905-1917.

[47] XU, W.H., DONG, C.L., ZHANG, Y.P., YI, Y.Y., Characteristics and mechanisms of weld formation during oscillating arc narrow gap vertical up GMA Welding, Welding in the World, 2017, 61(2):241-248.

[48] XU, G., LI, L., WANG, J., ZHU, J., LI, P., Study of weld formation in swing arc narrow gap vertical GMA welding by numerical modeling and experiment, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2018; 96(5-8):1905-1917.

[49] SHINJI, I., MASATOSHI, M., YUJI, K., Application of narrow gap welding process with high speed rotating arc to box column joints of heavy thick plates, JFE Tech. Report, 2009, 14(12):16-21.

[50] XU, W., LIN S.B., FAN, C. L., YANG, C. L., Evaluation on microstructure and mechanical properties of high-strength low-alloy steel joints with oscillating arc narrow gap GMA welding, Int J Adv Manuf Technol 2014; 75:1439-1446

[51] YADAV, P. K., ABBAS, M., PATEL, S., Analysis of heat affected zone of mild steel specimen developed due to MIG welding, International Journal of Mechanical Engineering and Robtics Research 2014; 3(3):399-404.

[52] SILVEIRA, G.M.S., Estudo comparativo de juntas soldadas obtidas pelo processo GMAW convencional e GMAW com arame rotativo (GMAW-R), Projeto Final de Graduação, CEFET-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Novembro 2018.

[53]HASRIZAM, W. S., MUDA, W., NASIR, N.S.M., MAMAT, S., JAMIAN, S., Effect of welding heat input on microstructure and mechanical properties at coarse grain heat affected zone of ABS grade A steel, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences 2015; 10(20):9487-9495.

[54]JUAN, W., YAJIANG, L., PENG, L., Effect of weld heat input on toughness and structure of HAZ of a new super-high strength steel, Bulletin of Materials Science 2003; 26(3):301-305

[55] JORGE, J.C.F., SOUZA, L.F.G., MAROUCO, E.S., SANTOS FILHO, O.R., DINIZ, J.L.C., Propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas pelo processo a arco submerso com elevado aporte térmico, Soldagem & Inspeção, 2015;20(3):347-358.

[56] International Association of Classification Societies, Anchor chain cables and accessories including chafing chain for emergency towing arrangements, IACS W 18, 2004.

[57] International Association of Classification Societies, High strength steels for welded structures, IACS W16, 2016.

[58] AUCOT, L., WEN, S., DONG, H., On the relationship of microstructure, toughness and hardness properties in a submerged arc welded API-5L grade X65pipeline steel section, Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE 2014 June 8-13, 2014, San Francisco, California, USA OMAE 2014-23858.

[59] PARK, G. T.,KOH, S. U., JUNG, H. G., KIM, K. Y., "Effect of microstructure on the hydrogen trapping efficiency and hydrogen induced cracking of linepipe steel," Corrosion Science, 2008,50(7), pp. 1865-

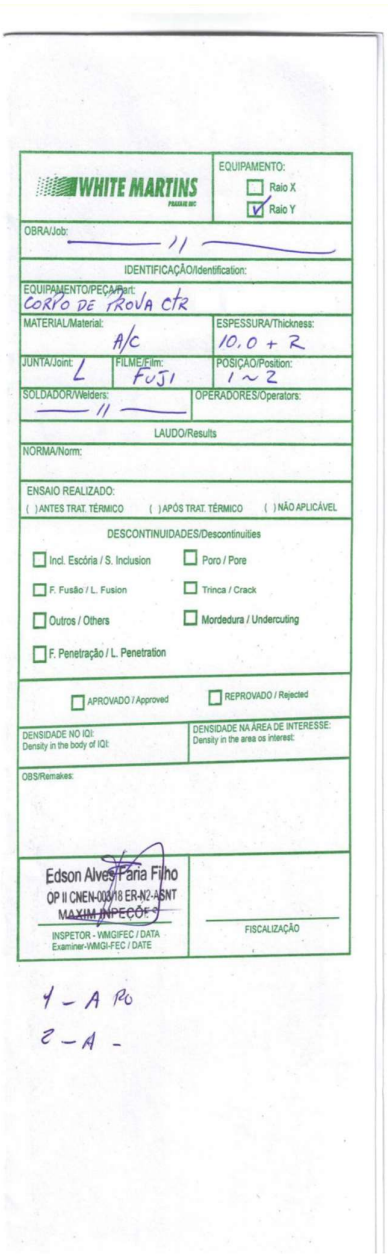
[60] ZAJAC, S., SCHWINN, V., TACKE, K.; Characterization and quantification of complex bainitic microstructures in high and ultra-high strength linepipe steels, Materials Science Forum Vols. 500-501 (2005) pp 387-394.

[61] FURUHARA, T., MOPRITANI, T., SAKAMOTO, K., MAKI, T., Substructure and crystallography of degenerate pearlite in an Fe-C binary alloy, Materials Science Forum Vols. 539-543 (2007) pp 4832-4837

[62] CHEN, Y.T., ZHU, C.M., Degenerate pearlite and M-A constituent formation in the simulated coarse-grained heat affected zone of a C-Mn HSLA steel, Mat. Sci. Technol.2009, 1718-1728.

[63] COSTA, J.F.M., SILVA FILHO, W.A., SILVEIRA, G.M.S., ALMEIDA, F.A.C., LOBATO, M.M., CHUVAS, T.C., et al. Comportamento de juntas soldadas de aço C-Mn obtidas pelo processo GMAW-RE com eletrodo rotativo. *Soldagem & Inspeção*. 2019;24:e2411. https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.11

Anexo 1 Laudo Radiográfico



WHITE MARTINS

EQUIPAMENTO:
☐ Raio X
☑ Raio Y

OBRA/Job: 11

IDENTIFICAÇÃO/Identification:

EQUIPAMENTO/PEÇA/Part: CORPO DE PROVA CTR

MATERIAL/Material: A/C

ESPESSURA/Thickness: 10,0 + R

JUNTA/Joint: L

FILME/Film: FUJI

POSIÇÃO/Position: 1 ~ 2

SOLDADOR/Welders: 11

OPERADORES/Operators:

LAUDO/Results

NORMA/Norm:

ENSAIO REALIZADO:
( ) ANTES TRAT. TÉRMICO ( ) APÓS TRAT. TÉRMICO ( ) NÃO APLICÁVEL

DESCONTINUIDADES/Descontinuities

☐ Incl. Escória / S. Inclusion ☐ Poro / Pore
☐ F. Fusão / L. Fusion ☐ Trinca / Crack
☐ Outros / Others ☐ Mordedura / Undercuting
☐ F. Penetração / L. Penetration

☐ APROVADO / Approved ☐ REPROVADO / Rejected

DENSIDADE NO IQI: Density in the body of IQI:

DENSIDADE NA ÁREA DE INTERESSE: Density in the area os interest:

OBS/Remakes:

Edson Alves Faria Filho
OP II CNEN-005/18 ER-N2-ABNT
MAXIM INSPEÇÕES

INSPETOR - WMGIFEC / DATA
Examiner-WMGI-FEC / DATE

FISCALIZAÇÃO

1 - A Ro

2 - A -



