



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**MAPEAMENTO DO PROCESSO MECANIZADO DE
SOLDAGEM UNILATERAL FCAW COM BACKING
CERÂMICO APLICÁVEL NO PASSE DE RAIZ EM AÇO
CARBONO.**

AUTOR: SILVIO TRIVELLATO ANDRADE

ORIENTADOR: ALEXANDRE QUEIROZ BRACARENSE, Dr.

Belo Horizonte, 29 de junho de 2007

Autor: **Silvio Trivellato Andrade**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MAPEAMENTO DO PROCESSO MECANIZADO DE
SOLDAGEM UNILATERAL FCAW COM BACKING
CERÂMICO APLICÁVEL NO PASSE DE RAIZ EM AÇO
CARBONO.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção de título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Curso: **Mestrado em Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: **Processos de Fabricação**

Orientador: **Alexandre Queiroz Bracarense, Dr.**

Escola de Engenharia UFMG
Belo Horizonte, junho de 2007
Minas Gerais - Brasil

Dedicatória

À minha mulher Rosana Torres

À minha mãe Virginia Trivellato Andrade

Aos meus irmãos e familiares

Em memória: José Penido Andrade (pai)

Agradecimentos

A minha mulher Rosana, por tornar mais brandas as dificuldades da superação dos obstáculos;

Aos meus irmãos, cunhados e sobrinhos e minha mãe, pela força e incentivo na realização desta importante etapa de vida;

Ao Prof. e Orientador Alexandre Queiroz Bracarense, pela confiança, compreensão e apoio ao ingresso ao mestrado e durante a sua realização;

A White Martins pela compreensão, apoio financeiro e estrutura fornecida;

Ao estudante do Curso de Eng^a. Mecânica da UFMG, João Paulo Messias pelo valioso suporte na execução da prática laboratorial;

Aos colegas do Laboratório Robótica e Simulação de Soldagem – DEMEC-UFMG pelas sugestões nas dúvidas surgidas e convívio acadêmico;

A Deus por ter me permitido realizar este trabalho com dignidade, persistência e humildade.

Meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade fazer o mapeamento da soldagem unilateral mecanizada, utilizando o processo FCAW sob proteção gasosa com *backing* cerâmico para o passe de raiz. Os testes foram realizados com robô da marca KUKA KR-16, soldando na posição plana, com arame tubular AWS A5.20-79 E 71T-1 de diâmetro 1,2 mm, em juntas de topo e chanfro tipo V em chapas de aço ASTM A-36. As variáveis analisadas foram corrente, tensão, velocidade de soldagem, abertura da face de raiz, ângulo de chanfro e ângulo de inclinação da tocha. Considera-se o aporte térmico fundamental, uma vez que ele constitui a energia fornecida pela composição dos parâmetros de corrente, tensão e velocidade, associada aos materiais envolvidos como aço carbono e *backing* cerâmico e, portanto, responsável diretamente pela formação da poça de fusão. Realizou-se a análise dimensional da altura e largura do reforço da raiz. As características de estabilidade do arco, em conjunto com o formato do reforço da raiz, qualidade visual do cordão de solda e macrografias foram analisadas como respostas para a solda com *backing* cerâmico. Foram caracterizadas doze curvas, demonstrando a evolução da altura e largura do reforço da raiz em função da corrente, da abertura da face de raiz, do ângulo do chanfro e do ângulo de inclinação da tocha. Em função dos resultados obtidos, estabeleceram-se as melhores condições de ajustes na soldagem do passe de raiz na posição plana que correspondem a corrente de 205A , a tensão de 26V, velocidade de soldagem de 20cm/min, abertura da face de raiz de 3 e 5mm, ângulo de chanfro de 40° e 60° e ângulo de inclinação da tocha de 15°. De forma geral, este trabalho demonstrou que a soldagem unilateral mecanizada FCAW com *backing* cerâmico é tecnicamente viável.

ABSTRACT

This work aims to evaluate one-sided welding automatic using the flux cored arc welding process with ceramic backing in the root bead. The tests were performed using a KUKA KR-16, robot for welding in the flat position. The wire is the AWS A5.20-79 E 71T-1, with 1.2 mm diameter, V-groove butt joints were design to be used in steel plate ASTM A-36. The process variables analyzed were Current, voltage, travel speed, root opening, groove geometry included angle and electrode inclination. It heat input was considered essential. It is the energy supplied for the composition of the parameters current, tension and speed, associated to the involved materials, steel carbon and backing ceramic and therefore responsible directly for the formation of the weld pool. The dimensional analysis considered height and width of the root reinforcement. The arc stability associated with the geometry of root reinforcement, visual quality of the bead, and macrographs were analyzed as the response for the ceramic weld backing. Twelve curves were elaborated, showing the relation of height and width root reinforcement with the parameters variation of Current, root opening, groove geometry included angle and electrode inclination.

The results allowed to establishing the best adjustment of the variables for root bead welding in flat position, that were current 205A, voltage 26V, travel speed 20cm/min, root opening 3 e 5mm, V-groove angle 40° e 60° and electrode inclination 15°, using ceramic backing with FCAW.

SUMÁRIO

RESUMO	v
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELA.	xiv
SIMBOLOGIA E LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xvi
LETRAS LATINAS	xvi
LETRAS GREGAS	xvii
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	xviii
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Introdução à soldagem	22
2.1.1 Definição de soldagem.....	22
2.1.2 Soldagem a arco elétrico.....	24
2.1.3 Soldagem a arco elétrico com arame tubular (FCAW).....	29
2.2 Soldagem unilateral.....	29
2.3 <i>Backing</i> usado na soldagem unilateral.....	32
2.3.1 Material cerâmico - Características e composição	33
2.3.2 Tipos de <i>backing</i> cerâmico usados na soldagem unilateral.....	35
2.3.3 <i>Backing</i> cerâmico e suas formas de aplicação.....	39
2.4 Soldagem unilateral com <i>backing</i> cerâmico – Características	41
2.4.1 Defeitos ocorridos na FCAW com <i>backing</i> cerâmico-passe de raiz.....	47
2.4.2 Aplicações da soldagem unilateral com <i>backing</i> cerâmico.....	51
2.5 Soldagem unilateral FCAW sem <i>backing</i> cerâmico – Características	54
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	57
3.1 Equipamentos utilizados na soldagem.....	58
3.1.1 Sistema de soldagem e bancada de testes.....	58
3.1.2 Sistema de medição de corrente e tensão de soldagem.....	59
3.1.3 Mecanismos utilizados para a preparação das amostras.....	60
3.2 Materiais utilizados na soldagem unilateral	61
3.2.1 Material base	61

3.2.2 Arame eletrodo.....	61
3.2.3 Gás de proteção	62
3.2.4 <i>Backing</i> cerâmico.....	63
3.2.5 Amostras.....	64
3.3 Avaliação visual e análise macrográfica do passe de raiz	66
3.4 Avaliação dimensional da altura e largura do reforço do passe de raiz .	67
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1 - Testes exploratórios preliminares.....	69
4.1 - Testes definitivos e mapeamento dos resultados.....	75
5. CONCLUSÕES.....	89
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
APÊNDICE A – TESTES PRELIMINARES.....	94
APÊNDICE B – TESTES DEFINITIVOS.....	97
ANEXOS	101

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Construção de Navio – Estaleiro [Muller e Koczera, 2003].....	xviii
FIGURA 2.1 - Evolução taxa deposição (Kg/h) função da corrente, posição de soldagem e diâmetro do arame tubular ER70T, CO ₂ [Gasmaster, 1999].....	26
FIGURA 2.2 - Evolução do consumo anual de metal de solda no mundo, fonte [ESAB, 2006]	27
FIGURA 2.3 - Efeito da velocidade de fusão (w) dos arames tubulares com a corrente (I) para diferentes gases de proteção,[Starling et all, 2004].....	28
FIGURA 2.4 - Características das regiões e dimensões do passe de raiz, usadas neste trabalho, fonte [Malin, 2001].....	30
FIGURA 2.5 - Macrografia do cordão de solda unilateral SAW, espessuras de A=9,5mm, B=17,5mm e C=25,4mm [Malin,2001]	31
FIGURA 2.6 - Sistema de <i>backing</i> de cobre provisório. Os anéis de cobre são posicionados dentro do tubo e suportam a poça de solda [Hahn, 2004].....	32
FIGURA 2.7 - Aparência mullita (A) e Aparência Cordierita 20x20x15mm (B), fonte: webmineral.com, foto de Jeff Weismann e John Betts, respectivamente..	34
FIGURA 2.8 - Variedade de <i>backing</i> cerâmico – fonte Folheto KATBAK®1105.	36
FIGURA 2.9 – Ilustrativo da variedade de aplicação do <i>backing</i> cerâmico, marca LASCENTRUM®, (A) cordão circular, (B) e (C) junta em ângulo, (D) posição horizontal, (E) posicionamento entre chapas de 90°, (F), (G) e (H) posição plana, fonte Folheto HYUNDAI	36

FIGURA 2.10 – Geometria e tipos de <i>backing</i> cerâmico [Muir, 1985]	37
FIGURA 2.11 <i>Backing</i> cerâmico aplicado a soldagem FCAW – sulco retangular - KATBAK®	38
FIGURA 2.12 <i>Backing</i> cerâmico aplicado no GMAW, MCAW e FCAW – sulco côncavo - KATBAK®	38
FIGURA 2.13 – Esquemático da fixação do <i>backing</i> cerâmico com fita adesiva de alumínio	39
FIGURA 2.14 – Esquemático da fixação do <i>backing</i> cerâmico com cabo de aço.....	40
FIGURA 2.15 – Esquemático do <i>backing</i> cerâmico suportado por base metálica tipo trilho.....	40
FIGURA 2.16 - Esquemático dos componentes do <i>backing</i> cerâmico com fita adesiva de alumínio para fixação.....	41
FIGURA 2.17 – Efeito da corrente na geometria do reforço da raiz. Altura do reforço (h_{rr}) e largura do reforço (w_{rr}), processo SAW [Malin, 2001]	44
FIGURA 2.18 – Efeito da abertura da junta na geometria do reforço da raiz, altura do reforço (h_{rr}) e largura do reforço (w_{rr}), processo SAW [Malin, 2001] ...	45
FIGURA 2.19 – Efeito da inclinação da tocha ($\alpha=0^\circ$ e 15°) na geometria do reforço da raiz, altura do reforço (h_{rr}) e largura do reforço (w_{rr}), SAW [Malin, 2001].....	46

FIGURA 2.20 – Efeito da abertura da junta (β) associada a corrente na geometria do reforço da raiz, altura reforço (h_{rr}) e largura reforço (w_{rr}), SAW [Malin, 2001]	47
FIGURA 2.21 – Efeito da técnica de soldagem no contorno do passe de raiz, arame ER70T-1, Chanfro tipo V – 60°, 240 A e 25 V – Mistura 75% Ar + 25% CO ₂ , [Cantrell, 1982]	48
FIGURA 2.22 – Defeito da porosidade vermiforme, no sentido lateral e tubular no centro da solda. Passe de raiz, FCAW com <i>backing</i> cerâmico.....	49
FIGURA 2.23 – Mecanismo da formação da porosidade vermiforme e tubular [Cantrell, 1982].....	50
FIGURA 2.24 – Mecanismo de rebaixamento metal de solda na FCAW, posição horizontal [Cantrell, 1982]	51
FIGURA 2.25 - Macrografias de cordões de solda com fusão lateral na região da raiz, gonte [Oliveira, 2002]	55
FIGURA 2.26 - Comparação entre cordões GMAW (esquerda) e FCAW (direita) Oliveira, 2002]	55
FIGURA 2.27 – ilustração com diagrama da formação da onda da corrente e série de fotos de alta velocidade da soldagem GMAW (MIG) da ponta do arame, fonte [KEMPPI, 2007]	56
FIGURA 3.1 - Esquema das características do reforço do passe de raiz considerado aceitável	57
FIGURA 3.2 - Fotografia do robô (a) Tocha(b) Máquina Solmig 403 CV (c)	58

FIGURA 3.3 – Fotografia do sistema de fixação por grampos para posicionamento do corpo de prova a ser soldado.....	59
FIGURA 3.4 – Fotografia maleta SAP-1 para aquisição de dados de soldagem.	59
FIGURA 3.5 – Ilustração do transdutor tipo turbina(esquerda) usado no medidor MVG-2 (direita)	63
FIGURA 3.6 – Características do <i>backing</i> cerâmico [Termari, 2006]	63
FIGURA 3.7 – Esquemático do módulo de 500 mm - <i>backing</i> cerâmico	64
FIGURA 3.8 – Foto da amostra preparada para a soldagem unilateral FCAW do passe de raiz	65
FIGURA 3.9 – Ilustração da forma de medição da altura(A) e largura(B) do reforço do passe de raiz	67
FIGURA 4.1– Macrografias do passe de raiz com fusão lateral da junta na região da raiz	70
FIGURA 4.2– Macrografia do rebaixamento lateral do reforço da raiz, FCAW posição plana.	71
FIGURA 4.3– Macrografia da altura do reforço do passe de raiz insuficiente....	73
FIGURA 4.4 - Esquema da inclinação da tocha em relação a direção de soldagem	75
FIGURA 4.5 - Amostras com solda do passe de raiz desqualificado. Excesso de reforço da raiz	77

FIGURA 4.6 - Efeito da corrente de soldagem (I) na geometria do reforço do passe de raiz – largura (w_{rr}) e altura (h_{rr}): ângulo chanfro $\beta=60^\circ$, $RO=5\text{mm}$, $a=15^\circ$. Amostras 6T5X.....	78
FIGURA 4.7 - Esquema do efeito da corrente de soldagem (I) na geometria do reforço do passe de raiz. Em a, b e c tem-se que $\beta = 60^\circ$ e $RO = 5\text{mm}$	79
FIGURA 4.8 – Efeito Abertura face de raiz (RO) na geometria do reforço do passe de raiz, largura (w_{rr}) e altura (h_{rr}), chanfro $V(\beta=40^\circ)$, $a=15^\circ$, amostras 4TWB.....	80
FIGURA 4.9 - Esquema do efeito da abertura da face de raiz (RO), para mesmo ângulo de chanfro (β), na geometria do reforço do passe de raiz.....	81
FIGURA 4.10 – Efeito da inclinação da tocha (a) na geometria do reforço da raiz – largura (w_{rr}) e altura (h_{rr}): chanfro V ($\beta=60^\circ$), $RO=5\text{mm}$. Amostras 6T5X-YZ.....	83
FIGURA 4.11 - Esquema do efeito da inclinação da tocha (a) na geometria do passe de raiz. Em a e b tem-se $RO = 5\text{mm}$, $\beta=60^\circ$ e corrente $I = 210\text{ A}$	83
FIGURA 4.12 – Efeito da Abertura do Ângulo de chanfro tipo V ($\beta = 40^\circ$ e 60°), na geometria do reforço da raiz – largura (w_{rr}) e altura (h_{rr}): $RO=5\text{mm}$, $a = 15^\circ$. Amostras 4T5X-YP e 6T5X-YP UT5X	85
FIGURA 4.13 - Esquema do efeito do ângulo chanfro (β) no passe de raiz. Em a e b tem-se que RO = 5mm e a corrente na faixa de I = 210 A	85
FIGURA 4.14 - Fotografia aspecto visual do acabamento do passe de raiz (esquerda) e respectivo reforço (direita). Amostras 6T3B-10E e 4T5B-40P.....	88

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Valores eficiência de deposição (ϕ_{tubular}) do arame tubular, [Starling et al, 2004].....	27
TABELA 3.1 - Composição química média chapa de aço carbono ABNT 1020..	60
TABELA 3.2 - Composição Química do arame ER71T-1 [Hyundai, 2001]	61
TABELA 3.3 - Propriedades Físicas do arame ER71T-1 [Hyundai, 2001]	62
TABELA 3.4 - Propriedades Físico-químicas Dióxido de carbono(CO_2) [White Martins, 2003]	62
TABELA 3.5 - Descrição do código de identificação dos corpos de prova	65
TABELA 4.1 - Resultados dos experimentos, amostras do grupo 6T5X-YP.....	78
TABELA 4.2 - Resultados dos experimentos, amostras do grupo 4TWB-YP.....	80
TABELA 4.3 - Resultados dos experimentos para as amostras do grupo 6T5X-YP e 6T5X-YE.....	82
TABELA 4.4 - Resultados dos experimentos para as amostras do grupo 4T5X-YP e 6T5X-YP.....	84
TABELA A.1a - Seqüência com parâmetros de corrente (I), tensão (V) e velocidade de soldagem (vs), aspecto visual e macrografia do passe de raiz. Testes preliminares. Amostras de 1 a 10	94

TABELA A.1– Seqüência com parâmetros de corrente(I), tensão (V) e velocidade de soldagem (vs), aspecto visual e macrografia do passe de raiz.. Testes preliminares. Amostras de 11 a 20.....	95
TABELA A.2 – Seqüência parâmetros de corrente (I), tensão (V) e velocidade de soldagem (vs), largura (w_{rr}) e altura (h_{rr}).Testes preliminares. Amostras 1 a 25	96
TABELA B.1a – Seqüência com parâmetros de corrente(I), tensão (V) e velocidade de soldagem (vs), aspecto visual e macrografia do passe de raiz.. Testes definitivos. Amostras de 26 A 31.....	97
TABELA B.1b – Seqüência com parâmetros de corrente (I), tensão (V) e velocidade de soldagem (vs), aspecto visual e macrografia do passe de raiz.. Testes definitivos. Amostras de 32 a 46.....	98
TABELA B.1c – Seqüência com parâmetros de corrente (I), tensão (V) e velocidade de soldagem (vs), aspecto visual e macrografia do passe de raiz.. Testes definitivos. Amostras de 47 a 53.	99
TABELA B.2 – Seqüência com parâmetros de corrente (I), tensão (V) e velocidade de soldagem (vs), largura (w_{rr}) e altura (h_{rr}). Testes definitivos. Amostras 26 a 53	100

SIMBOLOGIA E LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LETRAS LATINAS

a	Ângulo de inclinação da tocha.	°
Ar	Gás Argônio.	
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers.</i>	
AWS	<i>American Welding Society.</i>	
CC	Curto-circuito.	
C25	Mistura 75%Argônio+25% CO ₂ .	
CO ₂	Gás Dióxido de Carbono.	
d	Diâmetro do arame	mm
DBCP	Distância bico de contato peça.	
E	Espessura	mm
END	Ensaio Não Destrutivos.	
HI	<i>Heat Input</i>	Kj/cm
h_{rr}	Altura do reforço da raiz.	
w_{rr}	Largura do reforço da raiz.	
FIG	Figura.	
FCAW	<i>Flux Cored Arc Welding.</i>	
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding.</i>	
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding.</i>	
H ₂	Gás Hidrogênio.	
I	Corrente de soldagem	A
Im	Corrente média	A
Ic	Corrente crítica	A
L	Comprimento do arame	mm
MAG	<i>Metal Active Gas.</i>	
MCAW	<i>Metal Cored Arc Welding.</i>	
MIG	<i>Metal Inert Gas.</i>	

N	Número de testes	-
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.	
R	Rendimento	%
Re	Resistência elétrica	Ω
RO	Abertura da raiz.	
SMAW	<i>Shield Metal Arc Welding.</i>	
SAW	<i>Submerged Arc Welding.</i>	
Stick out	Distância bico de contato-peça.	
t	Tempo de soldagem	s
TAB	Tabela.	
TD	Taxa de deposição	kg/h
TRANSPETRO	Petrobras transportes S.A.	
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais.	
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá.	
V	Tensão	Volts
vs	Velocidade de soldagem	cm/min
w	Velocidade de fusão de arame	m/min
ZTA	Zona Termicamente Afetada.	

LETRAS GREGAS

β	Ângulo do chanfro tipo V	$^{\circ}$
μ	Média da amostra;	-
φ	Eficiência de deposição	%

1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Sabe-se que na indústria metal-mecânica é constante a busca por maior qualidade do produto e competitividade, ancoradas no binômio produtividade e redução de custos. Observa-se a necessidade de melhor conhecimento dos processos de fabricação aplicáveis na produção de peças e equipamentos e entre os processos existentes destaca-se o da soldagem a arco elétrico.

Os ramos de atividade que utilizam processos de soldagem a arco elétrico, em especial os de construção de navios, como mostrado na FIG 1.1, e de caldeiraria em geral, têm contribuído intensamente para a melhoria da qualidade e competitividade, muito em parte pela exigência de integridade mecânica da junta soldada, otimização do uso de mão de obra e principalmente pela mecanização do processo de soldagem.



FIGURA 1.1 - Construção de Navio – Estaleiro [Fonte: Müller & Koczera,2003]

A indústria naval brasileira inicia uma nova realidade com o atual aquecimento da produção ocorrido, já que foi o segundo maior fabricante de navios do mundo na década de 70, perdendo apenas para o Japão. A PETROBRAS (empresa brasileira estatal de petróleo) tem papel importante nesta retomada de produção, quando encomenda ao mercado interno a construção de embarcações de grande porte (26 navios, sendo dez do tipo "Suezmarx" capaz de transportar 160 mil toneladas) e de plataformas petrolíferas, conforme notícias veiculadas pelos meios de comunicação [Gazeta Mercantil, 2007 e Folha de Pernambuco, 2007]

Esse crescimento da produção propicia aumento na demanda dos processos de soldagem na linha de fabricação de painéis, oficinas de montagem de costados curvos e estruturas metálicas de grande porte. O custo de construção do navio consiste de aproximadamente 5% na fabricação do casco, 48 a 50% na montagem e elevação, 30 a 35% no setor de despesas de instalação, de 9 a 12% na pintura e em torno de 3% em outras operações. A soldagem representa aproximadamente 25 a 28% de toda a operação [Millar, 2000].

Tendo em vista o relevante papel desempenhado pela soldagem, no ramo de construção naval, tanto em termos de tecnologia adquirida, como na avaliação do custo do produto final, torna-se imperativo o desenvolvimento de procedimentos de soldagem que aliem baixo custo e alta qualidade [Macedo e Pereira, 1985]. Reside-se neste binômio - baixo custo e alta qualidade - a grande dificuldade da escolha de um processo de soldagem que encaixe neste propósito.

A existência de diferentes tipos de junta e posições de soldagem das mais variadas, nem sempre permite a soldagem dos dois lados da peça. Há situações em que a soldagem tem que ser realizada no equipamento já montado e a movimentação deste, para encontrar a melhor posição de soldagem, pode inviabilizar a sua fabricação. Além disso, existem outras situações em que se perde produtividade, tendo que girar a peça para acessar o outro lado e finalizar a soldagem já iniciada de um lado. Nestes casos torna-se uma opção atrativa a

utilização da chamada soldagem unilateral, que é a união aplicada apenas em um lado de duas chapas metálicas posicionadas e preparadas com junta adequada.

Existe na soldagem unilateral a presença de um cobre junta. O cobre junta, na maioria das vezes, é denominado pelo termo original do idioma Inglês de *backing* e será este o termo usado para designar este componente presente na soldagem unilateral.

A soldagem unilateral com *backing* pode ser realizada de forma manual (SMAW e GTAW), semi-mecanizada (GMAW/FCAW) e mecanizada (SAW e FCAW/GMAW). A forma mecanizada é sem dúvida a forma direta de alcançar baixo custo e alta qualidade e, normalmente, vem sendo utilizada com o processo SAW, quando se aplica o *backing* metálico ou cerâmico e fluxos modificados. Um trabalho amplo sobre este processo foi realizado por Malin [2001].

Entretanto, a indústria metal-mecânica percebe que existindo a viabilidade técnica e econômica, ocorre a substituição da soldagem SAW pela soldagem FCAW ou GMAW mecanizada, fato motivado pelo inconveniente do manuseio de fluxo e pelo maior investimento em equipamentos presentes na soldagem a arco submerso.

Na soldagem unilateral FCAW ou SAW torna-se necessária a escolha do material cerâmico ou metálico para exercer a função de cobre junta, denominado *backing* cerâmico e *backing* metálico respectivamente, aplicado no passe de raiz da junta soldada.

Este trabalho objetiva o mapeamento da soldagem unilateral mecanizada usando o processo FCAW com *backing* cerâmico, aplicável ao passe de raiz em chapas de aço carbono unidas por uma junta de topo chanfrada. A produção de amostras proporciona as condições de análise e parametrização das grandezas envolvidas na formatação do passe de raiz.

Para dar suporte a este objetivo que está sendo proposto, é realizado no capítulo 2 a revisão bibliográfica que mostra, de forma sucinta, as restritas informações colhidas na bibliografia nacional e internacional consultada, abrangendo, além do assunto soldagem unilateral, os aspectos relativos ao *backing* cerâmico.

No capítulo 3, é apresentada a Metodologia aplicada nos experimentos, a identificação das amostras, o detalhamento de todos os materiais e equipamentos utilizados, bem como as avaliações realizadas.

Após realizadas as soldagens das amostras e suas alternativas, foi elaborado o capítulo 4, com os resultados obtidos e as respectivas discussões, a partir das evidências e dos dados colhidos durante o processo experimental.

O capítulo 5 traz a conclusão deste trabalho, baseada nos resultados obtidos e na análise da bibliografia consultada.

Tendo em vista o vasto campo de pesquisa e aplicação da soldagem unilateral, no capítulo 6 estão apresentadas as sugestões para trabalhos futuros sobre o assunto.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão tem o objetivo de apresentar sucintamente o resultado da análise da bibliografia técnica consultada, evidenciando os principais aspectos do material consumível e dos processos envolvidos na realização deste trabalho. Serão apresentadas informações sobre a soldagem em geral, a soldagem a arco elétrico, o *backing* cerâmico, o *backing* metálico, a soldagem unilateral com e sem *backing* cerâmico e suas respectivas aplicações.

Direcionou-se a revisão para a busca de material bibliográfico de trabalhos práticos, apesar da pequena disponibilidade sobre o assunto. Com relação às informações conceituais dos processos de soldagem e suas características, facilmente encontradas na literatura acadêmica, considerou-se desnecessário inserir nesta revisão, uma vez que já é requisito preliminar o seu conhecimento para desenvolvimento do trabalho prático.

2.1 - Introdução à Soldagem

Um grande número de processos utilizados na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas são abrangidos pelo termo "Soldagem". Classicamente a soldagem é considerada como um processo de união, porém, na atualidade, muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para a deposição de material sobre uma superfície, visando a recuperação ou o revestimento com características especiais.

2.1.1 - Definição de soldagem

Na literatura encontram-se algumas tentativas de definição de soldagem:

"Processo de união de metais por fusão". Cabe ressaltar que não apenas os metais são soldáveis e que é possível se soldar sem fusão [Gasmaster, 1999].

"Operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando na junta a continuidade das propriedades físicas e químicas" [Gasmaster, 1999].

"Processo de união de materiais usado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição". Esta definição adotada pela AWS é meramente operacional e nada apresenta do ponto de vista conceitual [Gasmaster, 1999].

Assim, embora muito estudada e utilizada, a soldagem não foi ainda precisamente definida. Pode-se dizer que existem atualmente em utilização comercial cerca de cinquenta processos de soldagem, aplicáveis em quase a totalidade dos materiais metálicos e até alguns não metálicos. Isso confere a soldagem um campo infindável de pesquisa e desenvolvimento, não só dos processos existentes separadamente ou em conjunto (processos híbridos), como das novas descobertas.

Uma das formas de classificação dos processos de soldagem é segundo o tipo da fonte de energia empregada, na qual se destacam os que utilizam eletricidade, fontes químicas, energia mecânica, entre outros.

Este trabalho será focado nos processos de soldagem a arco elétrico, que utilizam fonte de energia que empregam a eletricidade, e na busca de informações sobre o cenário atual onde se encontram as aplicações direcionadas para o tema principal: soldagem unilateral.

2.1.2 - Soldagem a arco elétrico

Os processos de soldagem a arco elétrico, aplicado aos metais ferrosos ou não, buscam manter a integridade mecânica e para tal utilizam a conversão da energia do arco elétrico em calor suficiente para a união que se propõe.

É importante salientar que o desenvolvimento tecnológico aplicado na indústria em geral, observado no decorrer de décadas, mostra que a soldagem tem acompanhado esta evolução. A soldagem obteve vários avanços com ênfase no desenvolvimento do processo de soldagem a arco elétrico. A seguir serão listados alguns considerados importantes e/ou com maior aplicação comercial:

- SMAW, com sua versatilidade de materiais a serem soldados;
- GTAW, com seu controle de energia do arco;
- GMAW, com a sua alta produtividade a baixo custo;
- FCAW, com sua alta taxa de deposição e ótimo acabamento superficial do cordão de solda;
- SAW, com sua elevada taxa de deposição e exigência de mecanização;
- PAW (soldagem plasma), com sua densidade de energia concentrada no arco.

Mais recentemente vem sendo desenvolvido e aplicado os processos híbridos, como por exemplo, o processo que utiliza as características do processo GMAW associadas ao PAW, sendo denominados com Plasma-MIG, e para tal se faz necessário o uso de tocha específica. Essa associação busca aumentar a taxa de deposição com o aumento do aporte térmico proveniente das fontes de energia dos dois processos e, por conseguinte, aumentar a produtividade.

Entre os processos de soldagem a arco elétrico, a utilização dos processos semi-mecanizados torna-se hoje mais que uma tendência, devido à grande necessidade de incrementar a produtividade e a redução de custos na indústria da construção de estruturas soldadas de aço [Paula, 1987].

A tendência natural é que se desenvolvam dispositivos para viabilizar a mecanização destes processos, sendo que a soldagem FCAW surge como excelente alternativa e será o processo escolhido neste trabalho.

2.1.3 – Soldagem a arco elétrico com arame tubular (FCAW)

A soldagem FCAW, também conhecida como soldagem com arame tubular, foi introduzida no início dos anos 50 e é basicamente o processo GMAW no qual é empregado um eletrodo/arame tubular contendo fluxo. O fluxo pode ser metálico, quando é denominado MCAW (*Metal Cored Arc Welding*) ou não. O equipamento empregado para o processo GMAW pode ser também utilizado para o processo FCAW, apenas com adequação no sistema de tração do alimentador de arame.

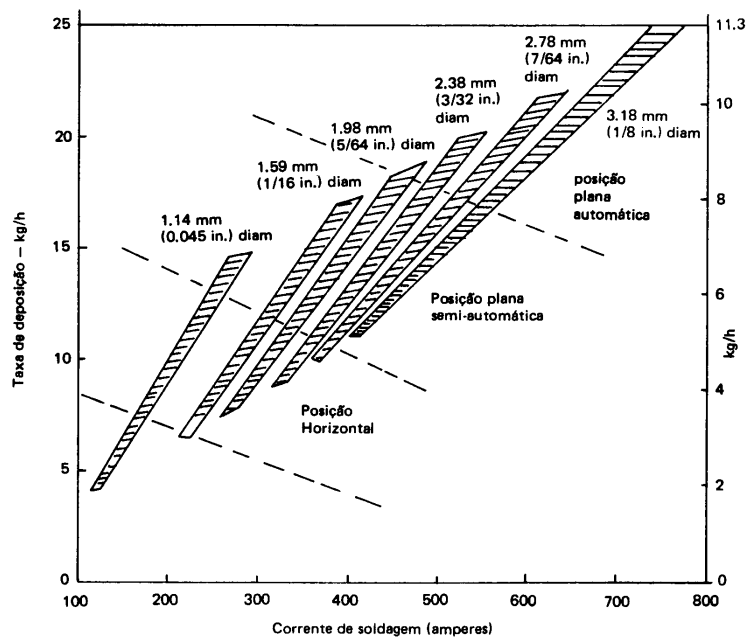
O processo FCAW possui duas variantes, se é utilizado com um gás de proteção ou não. No caso de usar sem o gás, denominado autoprotetido, o fluxo dentro do arame metálico tubular, ao queimar produz o gás que protege o metal fundido e também proporciona antioxidantes, ionizantes, agentes purificantes e, se necessário, elementos de liga. O fluxo no metal fundido, após a solidificação, resulta na formação de uma escória vítrea, que proporciona uma fina camada protetora no cordão de solda, o diferenciando do processo GMAW que não produz esta camada.

A soldagem a arco com arame tubular (FCAW) é um processo que acumula as principais vantagens da soldagem com arame maciço GMAW [Starling, 2004]. Inclui também as vantagens da soldagem SMAW, como alta versatilidade, possibilidade de ajustes da composição química e facilidade de operação no campo. Na verdade apresenta características em termos de flexibilidade e produtividade superiores às soldagens com SMAW e GMAW [Marques, 2007].

Na maioria das aplicações de soldagem com o processo GMAW pode-se também usar o FCAW, isso exige uma profunda análise para definir o processo mais viável

técnica e economicamente. Entretanto o maior benefício do FCAW é o seu desempenho em termos de produtividade, características de acabamento da soldagem e integridade da junta soldada. Este melhor desempenho do FCAW em relação ao GMAW se deve as seguintes características do arame tubular:

- Alta taxa de deposição, conforme mostrado na FIG. 2.1;
- Menor incidência de respingos, até mesmo com o uso do gás proteção CO₂ (um dos principais causadores de respingos no GMAW);
- Melhor acabamento superficial do cordão de solda;
- Elevada penetração.



qualidade, propiciam o aumento no consumo atual e projeção anual continua crescente, como visto na FIG 2.2.

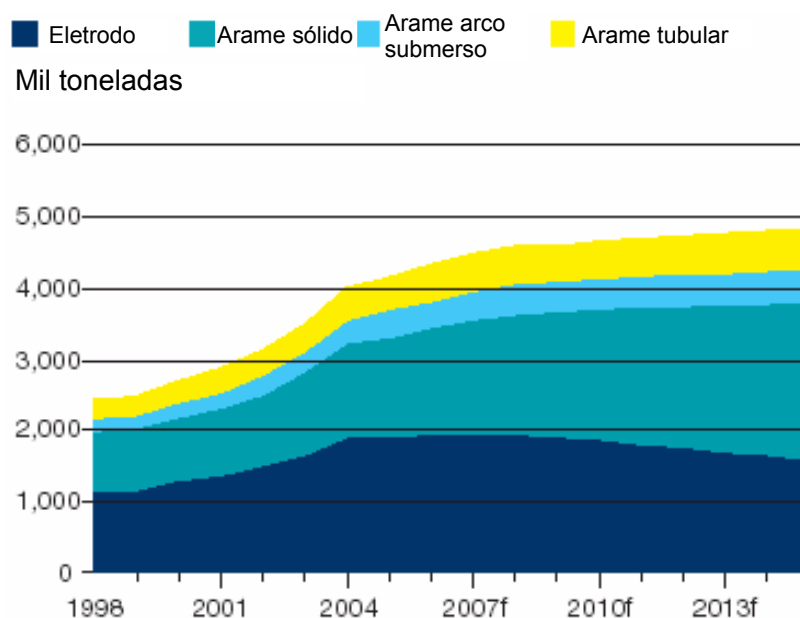


FIGURA 2.2 - Evolução do consumo anual de metal de solda no mundo [fonte: ESAB, 2006].

Na aplicação do processo FCAW é normalmente indicado, pelos fabricantes de arame tubular, o uso de dois gases de proteção: o CO₂ puro e a mistura de 75% Argônio + 25% CO₂. No estudo realizado por Starling et al [2004] o FCAW com o gás mistura (75%Ar+25%CO₂) propicia maior eficiência de deposição (φ_{tubular}), mostrado na TAB 2.1 .

TABELA 2.1 - Valores eficiência de deposição (φ_{tubular}) do arame tubular [Starling et al, 2004]

Arame Tubular Rútílico ER71T-1	
Condição Avaliada	φ_{tubular}
75% Ar – 25% CO ₂ , DBCP = 16,05 mm	0,8541
75% Ar – 25% CO ₂ , DBCP = 16,05 mm	0,8565
100% CO ₂ , DBCP = 16,05 mm	0,8250

Ainda de acordo com Starling et al [2004] os gases proteção não exercem maior efeito sobre velocidade de fusão de arame-w (m/min), mostrado na FIG 2.3.

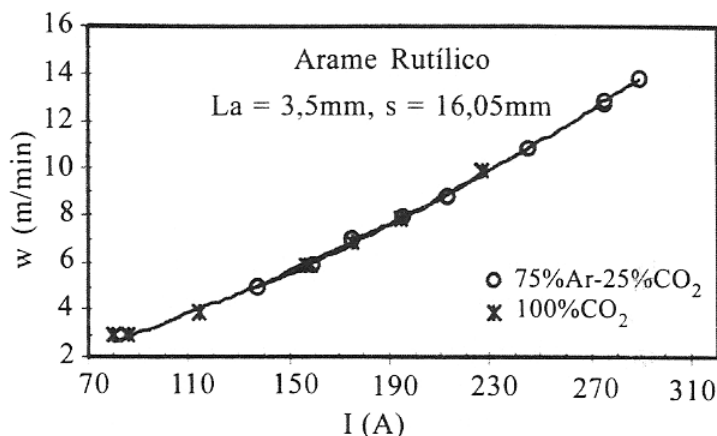


FIGURA 2.3 - Efeito dos gases sobre velocidade de fusão(w), arame ER71T-1 [Starling et al, 2004]

Na soldagem FCAW com backing cerâmico é recomendado algumas precauções sobre o uso com a mistura (75%Ar+25%CO₂) ou 100% CO₂, conforme será descrito a seguir sendo relacionadas as letras a-b-d-e para a posição plana, as letras a-b-c-d-e para a posição horizontal e as letras a-b para a posição vertical:

- a) Realizar limpeza da superfície de contato do *backing* com o mínimo necessário para o adesivo fixar bem;
- b) Pode ser necessário estocagem em local seco ou aquecido;
- c) Deve ser considerada a possibilidade de mordedura no cordão de solda;
- d) Movimentar o ângulo de 30-40 graus com o arco direcionado entre o centro e a borda da poça, para minimizar a possibilidade de porosidade vermiforme;
- e) Deve ser considerado o processo de exame volumétrico do cordão para assegurar a integridade [Cantrell,1982].

Cantrell [1982] ainda alerta que na soldagem FCAW na posição plana também pode ocorrer o aparecimento do defeito da porosidade conhecida como vermiforme, que será descrita posteriormente.

2.2 Soldagem Unilateral

O termo *soldagem unilateral* tem atrelado o conceito da união de juntas metálicas que exigem penetração total, com a soldagem apenas de um lado da peça, e quando é executada com um ou vários passes (raiz, enchimento e acabamento) na formação do cordão de solda em chapas de espessura acima de 4 mm.

Apesar da existência de várias aplicações com a soldagem de um lado só, a aplicação do termo unilateral se justifica quando há necessidade de penetração total da junta soldada. Contudo, quando há exigência de penetração total, é observado na prática que a soldagem é realizada dos dois lados da peça, como mostrado na FIG 2.4 e descrito nas etapas seguintes:

- a) Preparação da junta a ser soldada;
- b) Passe de raiz de um lado da peça, na base do chanfro;
- c) Passe de enchimento do chanfro, de um lado;
- d) Passes de acabamento da solda, na sequência do enchimento de um lado;
- e) Giro da peça, para acessar o lado oposto ao início da solda na etapa 2;
- f) Realização da goivagem ou esmerilhamento do passe de raiz executado anteriormente, retirando os defeitos inerentes e igualando a superfície do cordão de solda para receber o próximo passe;
- g) Finalização da soldagem através da realização, em cima do passe de raiz corrigido, do novo passe de acabamento do outro lado.

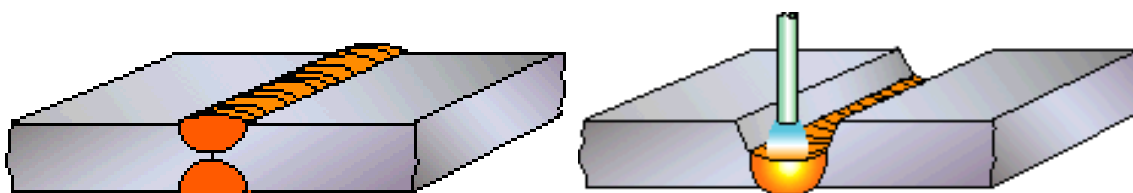


FIGURA 2.4 – Soldagem dois lados (esquerda) e Soldagem Unilateral (direita)

Diante das etapas descritas acima se entende que a soldagem unilateral, tem um atrativo campo de aplicação, pois é evitado a execução das etapas e, f e g, vindo

a reduzir custos operacionais e aumentar produtividade. De acordo com Muir [1985] obtém-se os seguintes benefícios potenciais:

- Redução dos ensaios não destrutivos (END) e dos reparos, comparado com a soldagem de duas passagens;
- Poucos passes de solda durante a manufatura do painel tendo como resultado a redução na distorção e nos custos;
- Redução na quantidade de exames radiográficos devido a prevenção do defeito da falta de fusão;

Para se alcançar os benefícios citados anteriormente vários autores de trabalhos técnicos, [Malin, 2001; Macedo, 1985; Muir, 1985 e Cantrell, 1982] destacam a importância da execução do passe de raiz na soldagem unilateral com qualidade. De acordo com Malin [2001] é necessário indicar algumas características geométricas pertinentes ao passe de raiz, como mostrado na FIG 2.4. Estas características merecem ser avaliadas não só nos estudos sobre o assunto, como também durante a aplicação do processo na produção industrial.

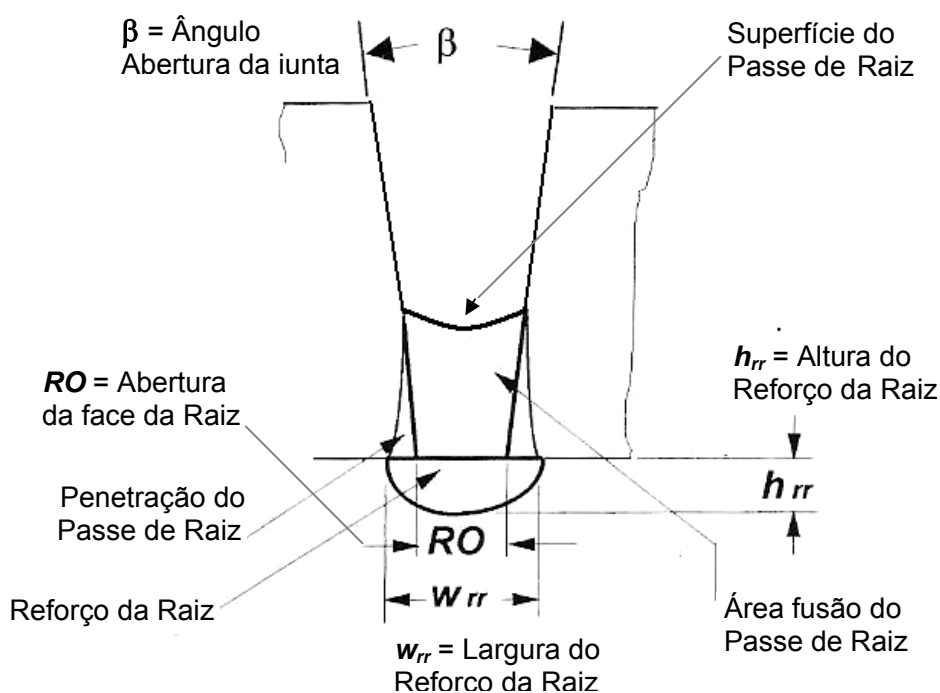


FIGURA 2.4 - Características das regiões do passe de raiz utilizadas neste trabalho [Malin, 2001].

Quando o assunto é produção industrial, conforme já foi dito na introdução, os setores que tem maior benefício com a aplicação deste processo, são os da indústria naval, da caldeiraria em geral e da soldagem de tubulação. Mesmo com estes benefícios, a soldagem unilateral não vem sendo muito difundida na construção naval de países, fora o Japão e Coréia considerados os gigantes deste setor, como por exemplo, a Inglaterra, os Estados Unidos [Muir, J, 1985] e o Brasil. Este cenário tende a mudar com o crescimento do setor naval no Brasil, conforme dito anteriormente.

Uma característica que diferencia a soldagem unilateral da soldagem convencional (dois lados) é a presença do *backing* tipo metálico (aço ou cobre) ou tipo cerâmico, na junta a ser soldada.

Com a evolução da engenharia cerâmica, a aplicação do *backing* cerâmico se tornou uma opção bastante viável. Vários grupos de tecnologia e pesquisa, dos países com indústria naval ativa, têm estudado a soldagem unilateral com *backing* cerâmico. Esta variação tem sido aplicada na linha de fabricação de plataformas e costados de navios (painéis), contribuindo assim para o aumento da participação deste processo com melhorias operacionais e de qualidade da solda produzida, conforme mostrado na FIG 2.5 [Malin,2001]

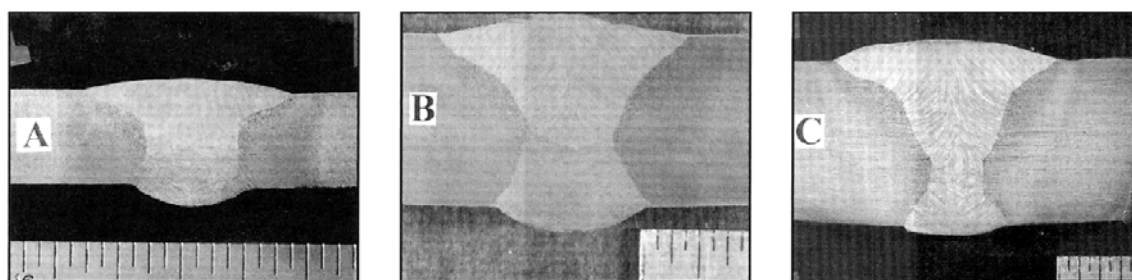


FIGURA 2.5- Macrografia do cordão de solda unilateral SAW nas chapas de várias espessuras (E) com abertura de raiz(RO). (A): E = 9,5mm e RO = 4,8mm; (B): E = 17,5mm e RO = 6,4 mm e (C): E = 25,4mm e RO = 6,4 mm. (escala 1 divisão = 1.6mm) [Malin,2001]

2.3 - *Backing* usado na soldagem unilateral

O *backing* é definido como o material colocado na raiz da junta de solda com a finalidade de suportar o metal fundido durante a soldagem. Sua função é facilitar a penetração total da junta. A FIG 2.6 representa um sistema do *backing* de cobre.



FIGURA 2.6 – Sistema de *backing* de cobre provisório. Os anéis de cobre são posicionados dentro do tubo e suportam a poça de solda [Hahn, 2004].

Pode-se classificar o *backing* em dois grupos distintos: permanente e provisório. O *backing* permanente pode ser de material similar àquele que está sendo soldado, como por exemplo, aço carbono para a chapa de aço carbono, e conseqüentemente torna-se parte integrante da junta porque é fundido junto com o passe de raiz da solda e, portanto, não necessita ser removido. O *backing* provisório deve ser de material dissimilar ao metal base e pode ser de cobre ou de material cerâmico, o qual não se torna parte fundida ao passe de raiz. Como é removido quando a soldagem é terminada, este tipo de *backing* é também referido como *backing* removível.

Para a qualificação do procedimento de soldagem algumas normas classificam o *backing* como variável essencial, mas outras normas não. Para a qualificação do soldador, o *backing* é classificado como variável essencial.

Há o consenso de que se o sistema de *backing* evoluir ao ponto que permita a penetração total na soldagem unilateral com altas taxas de deposição provenientes dos processos de soldagem, que seja bastante aceitável para absorver tolerâncias da construção e montagem, que seja relativamente fácil de usar, e que tenha o custo eficaz no ambiente de produção, a indústria da soldagem começará então uma nova era de eficiência [Cantrell, 1982].

Neste trabalho será usado o *backing* provisório e removível do tipo cerâmico, denominado pelo termo *backing* cerâmico, que será detalhado posteriormente.

2.3.1 - Material cerâmico - características e composição

As cerâmicas são formadas por uma diversidade enorme de materiais, os quais pertencem os segmentos tradicionais (como as louças/cerâmicas e os refratários) e os produzidos pela moderna engenharia cerâmica (como a alumina e Nitrato de Silício) encontrada nos dispositivos eletrônicos, componentes aeroespaciais, ferramentas de corte e na soldagem.

As cerâmicas apresentam uma fortíssima ligação iônica e/ou covalente, mais forte do que a ligação metálica, que confere as propriedades geralmente associadas às cerâmicas como: dureza elevada, força de compressão elevada, baixa condutividade térmica e elétrica e quimicamente inerte. Com estas propriedades podem ser usadas em alta temperatura, como isolante térmico, e aplicações de atmosfera corrosiva. Esta ligação forte também explica as propriedades menos atrativas das cerâmicas, tais como a baixa ductilidade e a baixa resistência a tração. [Taylor, 2001].

A grande preocupação com o material cerâmico é a sua composição química. Ainda segundo Taylor [2001], os principais grupos dos componentes cerâmicos são basicamente os óxidos, os nitretos e os carbetos. O óxido de alumínio,

Alumina (Al_2O_3) é um dos mais usados na engenharia cerâmica nos grupos dos óxidos, muito devido à disponibilidade de matéria-prima e o baixo custo. O Nitreto de silício (Si_3N_4), e o nitreto de alumínio (AlN) são a principal evolução da engenharia cerâmica na categoria dos nitretos. O Carbetto de Silício (SiC) é muito usado devido a sua baixa condutividade térmica, resistência à corrosão e dureza.

De acordo com Lima et al [1998] materiais cerâmicos constituídos por óxidos multielementares representam uma parcela significativa das cerâmicas com aplicação tecnológica bem estabelecida, sendo mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) e cordierita ($5\text{SiO}_2 \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{MgO}$), mostradas nas FIG 2.7 (A) e (B) respectivamente, bastante representativas desse grupo.

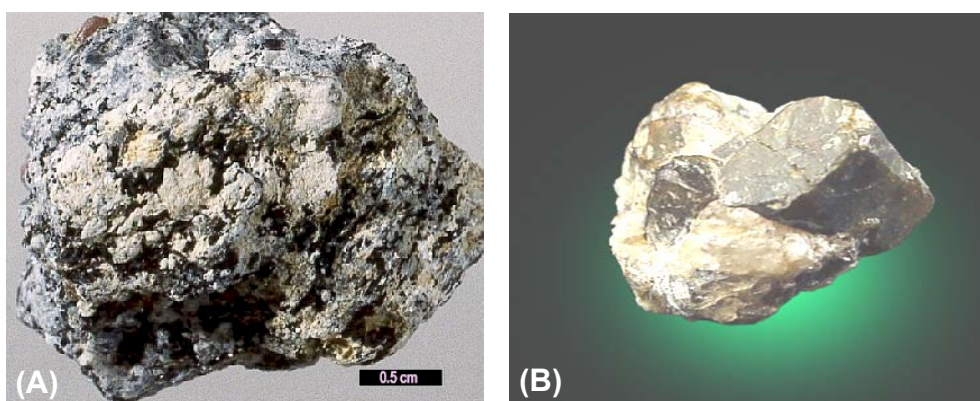


FIGURA 2.7 - Aparência Mullita (A) e Aparência Cordierita 20x20x15mm (B), fonte: webmineral.com, foto de Jeff Weismann e John Betts, respectivamente

A preparação da mullita, a partir da mistura de Al_2O_3 e SiO_2 com partículas de dimensões coloidais, acontece por volta de 1200°C e é semelhante a preparação da cordierita (Al_2O_3 e SiO_2 e MgO). As reações entre pós reativos ainda são muito utilizadas na preparação de material cerâmico como a mullita e a cordierita. Entretanto o processo sol-gel tem apresentado resultados promissores. O processo sol-gel é diferenciado dos demais pela possibilidade de preparação de géis com o mesmo grau de homogeneidade da solução inicial, facilidade de modelar os géis e com a obtenção de corpos cerâmicos com formato pré-definido [Lima et al, 1998].

Devido as suas propriedades termo-mecânicas excelentes, estes materiais (mullita e cordierita) podem ser utilizados como os auxiliares removíveis que suportam o metal fundido nos processos de soldagem [Tardei, 2004], conhecidos como backing cerâmico.

Assim sendo, a cerâmica é um material ideal para exercer a função de cobre junta no processo de soldagem unilateral, tendo a possibilidade de ser produzido vários formatos e de adaptar as diversas situações que surgem no ambiente de trabalho das indústrias.

2.3.2 - Tipos de backing cerâmico usados na soldagem unilateral

Tendo em vista que na soldagem unilateral existe uma diversidade enorme de situações de fabricação durante a produção de peças e equipamentos, como posição de soldagem, tipo de junta, tipo de chanfro, alinhamento/desalinhamento da junta, juntas dissimilares, peças de formato reto ou curvado e processo de soldagem aplicável, é exigido que o *backing* cerâmico se adapte as situações e, por conseguinte, possua diversas formas e dimensões.

Existem diversos fabricantes de *backing* cerâmicos, sendo que os maiores estão presentes nos países que possuem um parque industrial naval desenvolvido como: Singapura, Coréia do Norte e Sul e Japão, além dos Estados Unidos. Normalmente fornecem o produto com as mesmas características e formatos, as pequenas variações e opções entre eles ocorrem devido à demanda pelo atendimento as aplicações específicas. A variedade das configurações permitidas encontra-se na FIG 2.8. As opções com relação aos tipos de junta e posições de soldagem são mostradas na FIG 2.9.

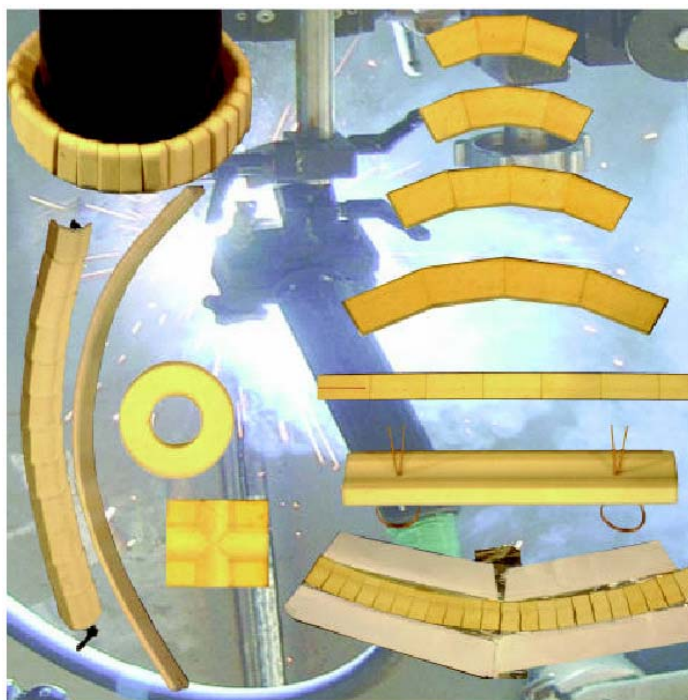


FIGURA 2.8 - Variedade de *backing* cerâmico KATBAK® [KATBAK 2005]

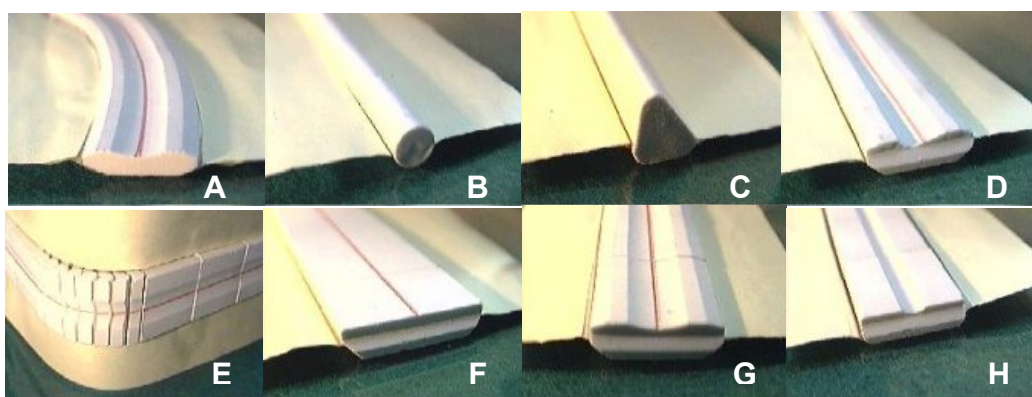


FIGURA 2.9 – Ilustrativo da variedade de aplicação do *backing* cerâmico, marca LASCENTRUM®: (A) cordão circular, (B) e (C) chanfro tipo K e X, (D) posição horizontal, (E) posicionamento entre chapas de 90°, (F), (G) e (H) posição plana e vertical, Folheto HYUNDAI

Para melhor avaliação e definição de qual tipo de *backing* cerâmico usar, devem ser consultados folhetos técnicos dos fabricantes, contendo as dimensões, o tipo de processo e posição de soldagem, entre outras características. Uma relação parcial dos tipos de *backing* encontra-se no ANEXO 1a e no ANEXO 1b.

Alguns artigos avaliam o desempenho da soldagem com vários tipos de *backing*. Muir [1985] usou três tipos com geometria e/ou composição diferentes, como mostrado na FIG 2.10.

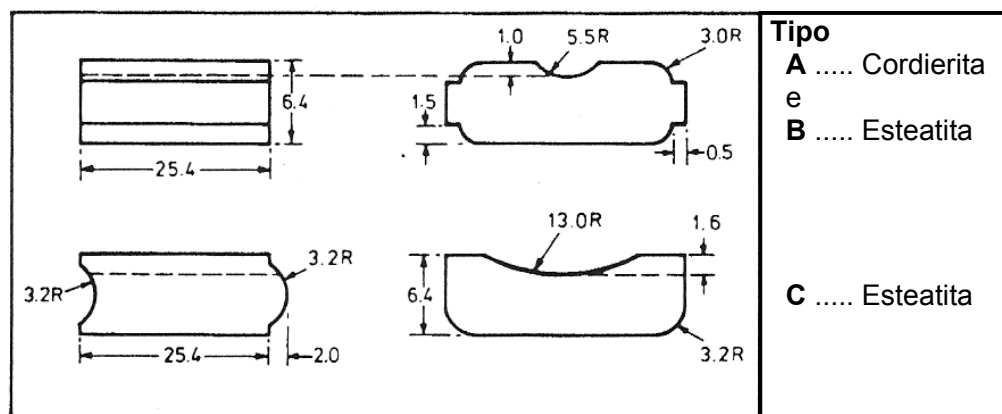


FIGURA 2.10 – Geometria e tipos de *backing* cerâmico [Muir, 1985]

O Formato da extremidade, arredondado e encaixável, do tipo C seria considerado sem vantagens, mas para a soldagem de superfície irregular e curvadas devem propiciar melhora no encaixe e minimizar o risco de perda do arco. Por causa do sulco menor no *backing* tipo A, comparado ao tipo C, foi possível obter um perfil aceitável do reforço da raiz com energia mais baixa do arco elétrico. O *backing* tipo B, com as mesmas dimensões que o tipo A, mas composição diferente (esteatita), apresentou acúmulo excessivo no perfil da superfície do cordão e muitas falhas na raiz. Conseqüentemente o *backing* tipo A (Cordierita) foi utilizado em todo o trabalho futuro [Muir,1985].

Quando se trata de *backing* cerâmico aplicado na soldagem FCAW nas posições plana e vertical com junta de topo chanfrada, alguns fornecedores oferecem duas opções com relação ao formato do rebaixo central denominado sulco: retangular ou côncavo. Segundo informação colhida com o fornecedor Gullco - KATBAK®, baseado em observações práticas no ambiente de trabalho, o sulco retangular é mais indicado para arames tubulares (FCAW), pois propicia maior espaço lateral para a escória fluir acarretando bom reforço da raiz, como mostrado na FIG 2.11.

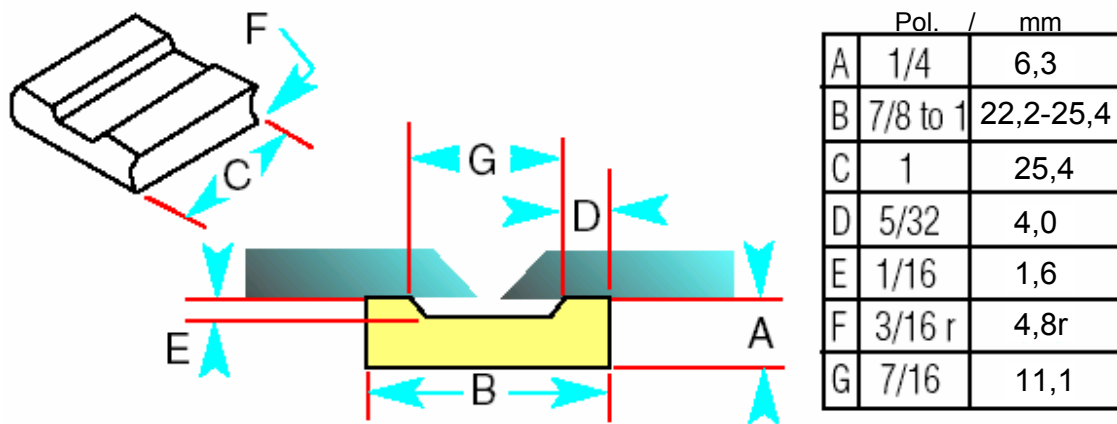


FIGURA 2.11 - Backing cerâmico aplicado a soldagem FCAW – sulco retangular [KATBAK 2005]

O formato côncavo pode também ser usado, mas produzirá reforço da raiz menor. Este formato é mais indicado para a soldagem GMAW e MCAW, como mostrado na FIG. 2.12.

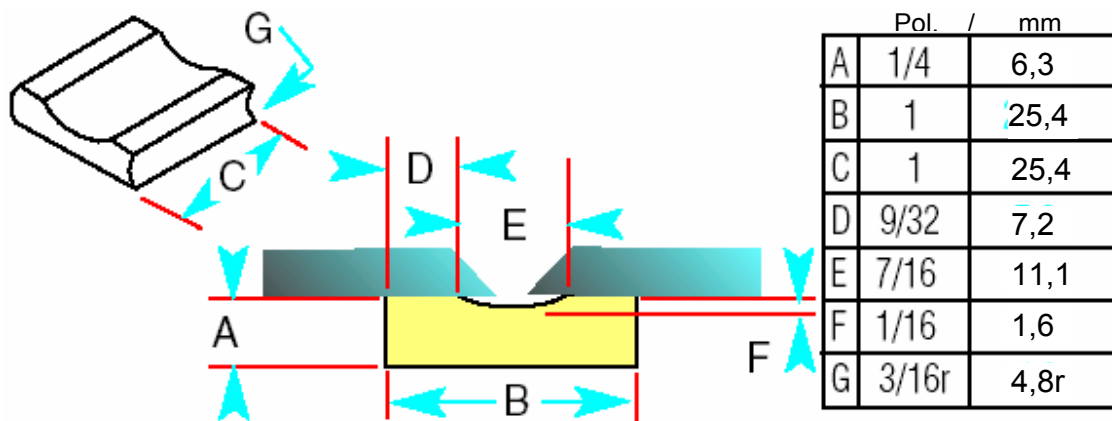


FIGURA 2.12 - Backing cerâmico aplicado no GMAW, MCAW e FCAW – sulco côncavo [KATBAK 2005]

Em consulta feita junto ao fornecedor da marca KATBAK®, verificou-se que a indústria naval demonstra certa preferência pelo uso do *backing* com sulco retangular na soldagem FCAW.

2.3.3 - Backing cerâmico e suas formas de aplicação

Através dos anos, numerosos sistemas de *backing* tipo cerâmico (recipientes do fluxo, fitas adesivas de fibra de vidro, fitas adesivas com fluxos, telhas cerâmicas, as sapatas de cobre, etc..) foram introduzidos e resistiram com variação nos níveis de sucesso e de adaptabilidade. Ainda assim, nenhum sistema encontrou a aceitação geral. Mesmo que o *backing* cerâmico, por si só, não seja novidade, existe um interesse e um entusiasmo renovados entre comerciantes deste consumível [Cantrell, 1982].

Uma das principais características que permite o uso do *backing* cerâmico em situações vantajosas, em comparação ao *backing* metálico, é a possibilidade de fixação direto na junta (chapa) a ser soldada e sua posterior remoção.

Os vários tipos existentes de *backing* cerâmico possibilitam variadas formas de executar a fixação e de acordo com Cantrell [1982] destacam-se as seguintes:

- a) Fixação com fita adesiva de alumínio, conforme mostrado na FIG 2.13;
- b) Fixação com cordão de fio de aço, conforme mostrado na FIG 2.14;
- c) Fixação com o auxílio de uma base metálica tipo trilho, mostrado na FIG 2.15;
- d) Fixação com a aplicação de uma base ou dispositivos magnéticos e
- e) Fixação com auxílio de grampo mola.



FIGURA 2.13 – Esquema de fixação do *backing* cerâmico com fita adesiva alumínio.

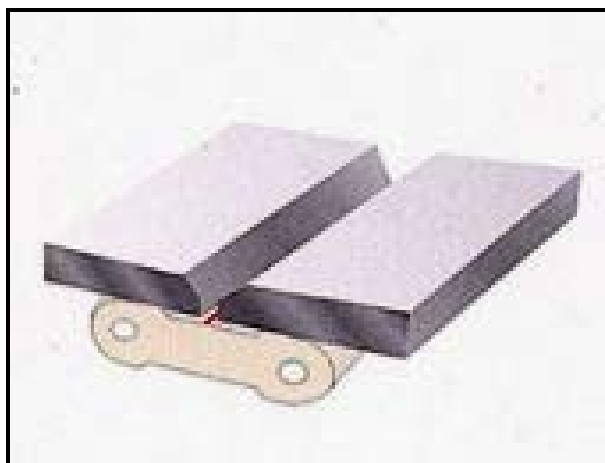


FIGURA 2.14 – Esquema de fixação do *backing* cerâmico com cabo de aço.

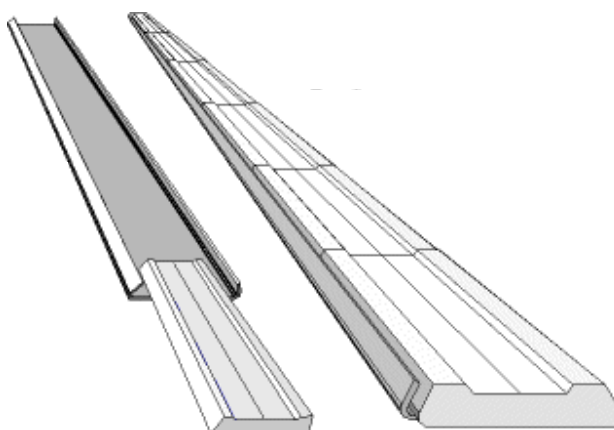


FIGURA 2.15 – Esquema do *backing* cerâmico suportado por base metálica tipo trilho.

Normalmente o *backing* Cerâmico é utilizado uma única vez, ou seja, aceita apenas a realização de um passe de solda e deve ser descartado. Esta característica consumível o diferencia do *backing* de ligas de cobre, que pode ser usado inúmeras vezes. O sistema de fixação que é mais adequado a atender esta característica é o com a fita adesiva de alumínio. Este tipo é o preferido nas atuais aplicações industriais da soldagem unilateral. Suas particularidades encontram-se na FIG 2.16.

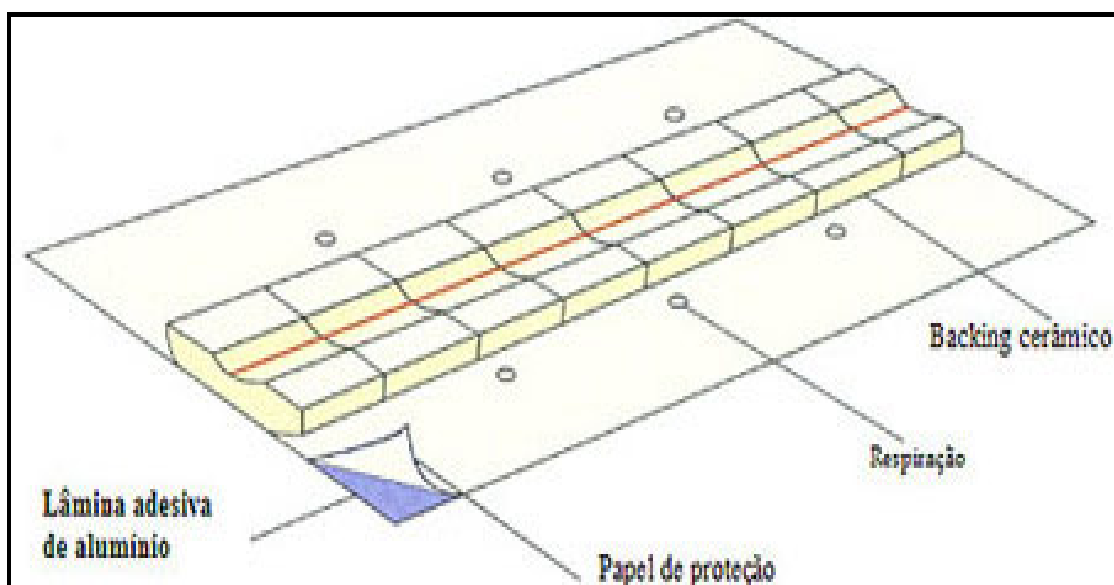


FIGURA 2.16 - Esquema dos componentes do *backing* cerâmico com fita adesiva de alumínio.

2.4 - Soldagem unilateral com *backing* cerâmico - características

Tradicionalmente, a soldagem unilateral tem sido executada com *backing* metálico tendo a preferência quando se trata de fabricação de peças que não alteram consideravelmente as dimensões, produzidas em grande escala e, por conseguinte, utilizando dispositivos dedicados.

Entretanto, no segmento de caldeiraria pesada (indústria naval e estruturas metálicas), um equipamento é formado por um conjunto de peças com características dimensionais e de construção distintas as quais exigem versatilidade, agilidade na montagem e conclusão da junta evitando retrabalho [Muir, 1985]. Nessa condição, o *backing* cerâmico apresenta vantagens em relação ao *backing* metálico.

A maioria dos trabalhos existentes sobre soldagem unilateral diz respeito ao processo SAW. Contudo a crescente aplicação do processo FCAW, cada vez mais presente na construção naval e na caldearia pesada, leva alguns autores a se interessarem em apresentar os aspectos envolvidos neste processo de soldagem, considerando a semelhança da junta soldada produzida por ambos os processos, ou seja, penetração total.

O FCAW é considerado um processo originalmente semi-mecanizado, assim o grande desafio é conseguir a soldagem unilateral com *backing* cerâmico de forma mecanizada. A automatização não é simplesmente uma questão de fazer com que a tocha de soldagem siga uma determinada trajetória independentemente de um soldador, mas é também uma questão de como fazer uma escolha adequada de parâmetros de soldagem a fim de que o primeiro intento seja possível [Dutra et al, 1987].

Na forma mecanizada ou semi-mecanizada com o FCAW, uma das grandes dificuldades da soldagem unilateral com *backing* cerâmico é a execução do passe de raiz. Na busca pela superação desta dificuldade, são conjugados os parâmetros de corrente, tensão, velocidade de soldagem, para manter a estabilidade do arco e produzir um passe de raiz com o formato que atenda as exigências de resistência mecânica da junta soldada. A realização do passe de raiz sem defeitos influenciará na consistência dos passes restantes, de enchimento e acabamento e, conseqüentemente, na obtenção de uma solda mecanicamente íntegra, que é a meta de todo processo de fabricação.

Malin [2001], com o uso do processo SAW, analisa de maneira bastante abrangente a influência das variáveis de soldagem e da geometria da junta envolvidas na formatação do passe de raiz. A soldagem foi realizada nas seguintes condições:

- Material da chapa = aço carbono;

- Espessura da chapa = 17,5 mm;
- Junta de topo;
- Chanfro: tipo V simples;
- Arame/eletrodo com diâmetro de 4,0 mm;
- Posição de soldagem: Plana;
- Desalinhamento: 0 (zero) mm;
- Polaridade eletrodo: Corrente contínua eletrodo negativo;
- Altura da face de raiz: 0 (zero) mm;
- Distância bico contato peça: 41 +/- 3 mm.

Foram elaborados gráficos relacionando as variáveis de soldagem com a geometria do reforço da raiz, entre outras características, a altura (h_{rr}) e largura (w_{rr}). Os efeitos causados pelas variáveis, estudadas neste trabalho, serão descritos a seguir:

a) A corrente produz efeito na geometria da raiz, devido a sua influência na taxa de deposição e penetração do arco, conforme mostrado na FIG 2.17.

O efeito da corrente na altura do reforço da raiz (h_{rr}) é complexo. Até corrente (I) menor que a crítica $I < I_{Cr}$ (600 A) o arco não penetrou o suficiente (ou inadequadamente) para o reforço da raiz ser formado (considerado igual a Zero). Com a $I = I_{Cr}$, o arco penetrou através das bordas da raiz e propiciou um desenvolvimento total da altura, com o máximo do $h_{rr} = 1,7$ mm. Então h_{rr} , diminuiu quando a corrente foi aumentada acima da I_{Cr} , até que $h_{rr} = 0,8$ mm para corrente de 1000 A. Com relação à largura do reforço (w_{rr}), com $I < I_{Cr}$ (600 A), o reforço da raiz formou-se inadequado (considerado Zero). Em $I = I_{Cr}$ (600 A), o arco penetrou nas bordas da raiz e formou um reforço da raiz com a largura total ($w_{rr} = 14,1$ mm). Com a corrente sendo aumentada de 600 A a 1000 A, a largura do reforço (w_{rr}) foi independente da corrente e variou muito pouco (entre 14,1 – 13,0 mm).

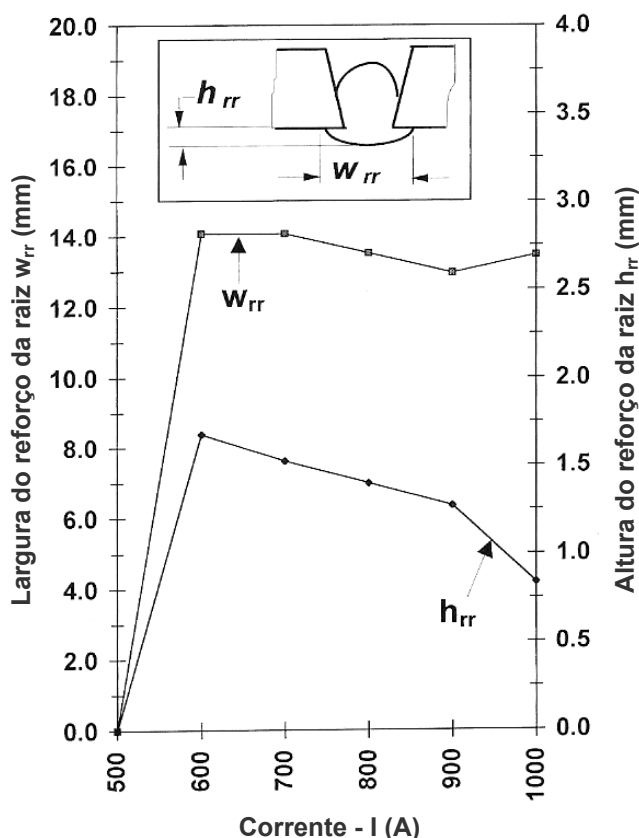


FIGURA 2.17 – Efeito da corrente na geometria do reforço da raiz, altura do reforço (h_{rr}) e largura do reforço (w_{rr}), processo SAW [Malin, 2001]

b) O efeito da variação da abertura da raiz (RO), mantendo-se a corrente ($I = 700$ A) e abertura da junta ($\beta = 30^\circ$) fixas, é mostrado na FIG 2.18.

Observa-se que a h_{rr} aumentou proporcionalmente a abertura da raiz. Este aumento é benéfico. Na RO menor que 2,4 mm, as bordas da raiz não foram fundidas suficientemente e não se formou o reforço da raiz. Um reforço pequeno apareceu em RO = 2.4 mm. Um aumento gradual nas aberturas da raiz de 2,4 a 7,2 mm resultou no aumento da h_{rr} , uma tendência oposta à corrente, discutida anteriormente. Assim, a h_{rr} melhora devido ao aumento da abertura da raiz e deteriora devido ao aumento da corrente. Com relação à largura do reforço da raiz (w_{rr}), também aumenta quando a RO aumenta. Para o exemplo apresentado, o aumento da abertura da raiz de 2,4 para 7,2 mm resultou em um acréscimo do w_{rr} (51%). Esta tendência difere daquela produzida quando se aumenta a corrente acima da I_{cr} pois, conforme visto anteriormente, a w_{rr} não mudou muito.

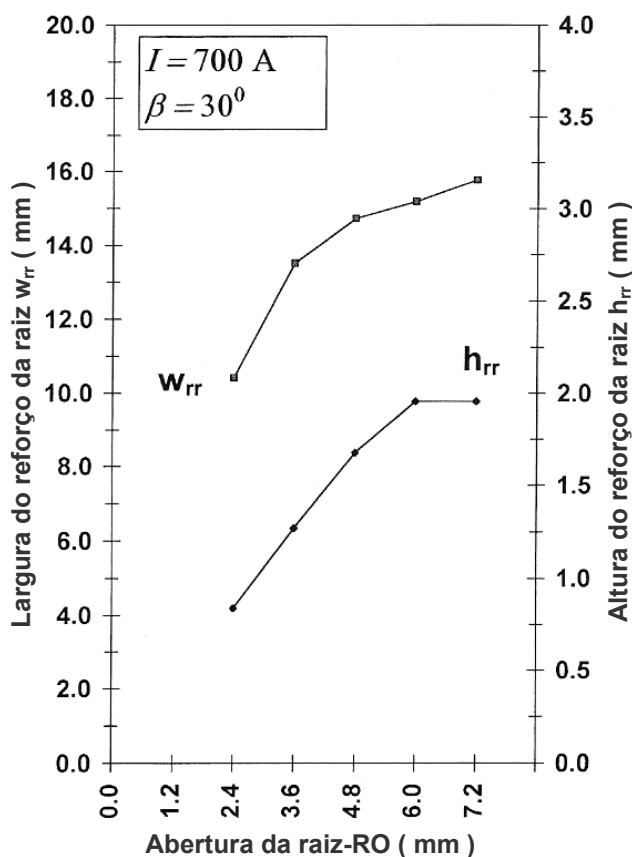


FIGURA 2.18 – Efeito da abertura da junta na geometria do reforço da raiz, altura do reforço (h_{rr}) e largura do reforço (w_{rr}), processo SAW [Malin, 2001]

c) A inclinação da tocha (α) em relação à direção de soldagem, mantida fixa a abertura da junta (β) e variando a corrente, influencia diretamente na altura (h_{rr}) e na largura do reforço da raiz (w_{rr}), como mostrado na FIG 2.19.

O gráfico mostra que, para $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 15^\circ$, a inclinação da curva muda de positiva para negativa, no ponto em que a corrente atinge 700 A (a corrente variou de 600 a 900 A). O efeito da inclinação da tocha, no formato do reforço da raiz é favorável para $\alpha = 15^\circ$. A altura do reforço da raiz (h_{rr}) aumentou consideravelmente com $\alpha = 15^\circ$, em comparação com $\alpha = 0^\circ$, quando a corrente ultrapassa 600 A. Este aumento é particularmente favorável porque a h_{rr} é tipicamente raso em correntes elevadas. A largura do reforço da raiz (w_{rr}) ficou ligeiramente maior em $\alpha = 15^\circ$ em todas as correntes usadas.

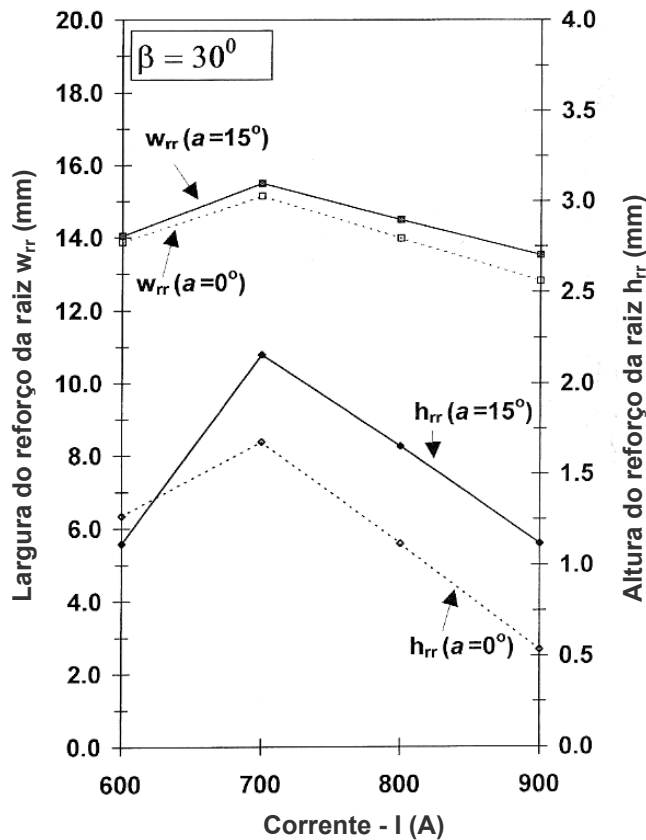


FIGURA 2.19 – Efeito da inclinação da tocha ($\alpha = 0^\circ$ e 15°) na geometria do reforço da raiz, altura do reforço (h_{rr}) e largura do reforço (w_{rr}), processo SAW [Malin, 2001]

d) O efeito da abertura da junta (β) na altura do reforço da raiz (h_{rr}) e largura do reforço da raiz (w_{rr}), mantendo fixa a abertura da raiz ($RO = 6,4\text{mm}$) e variando a corrente, é ilustrado na FIG 2.20.

A altura do reforço depende também da corrente. Em 600 A, a h_{rr} foi maior em 45° do que em 30° , porque um ângulo maior fornece uma penetração mais profunda da borda da raiz. Entretanto, em 700 A e $\beta = 30^\circ$ foram melhores os valores de h_{rr} e w_{rr} . Na realidade, o máximo da h_{rr} foi alcançado em 700 A e $\beta = 30^\circ$. Com o aumento da corrente, h_{rr} diminuiu em ambos os ângulos estudados. Entretanto, permaneceu aceitável dentro da escala explorada da corrente (600-900 A). A largura do reforço da raiz (w_{rr}) não se alterou muito com o aumento da corrente em ambos os ângulos de 45° e 30° , embora tenha ficado ligeiramente mais larga em 30° .

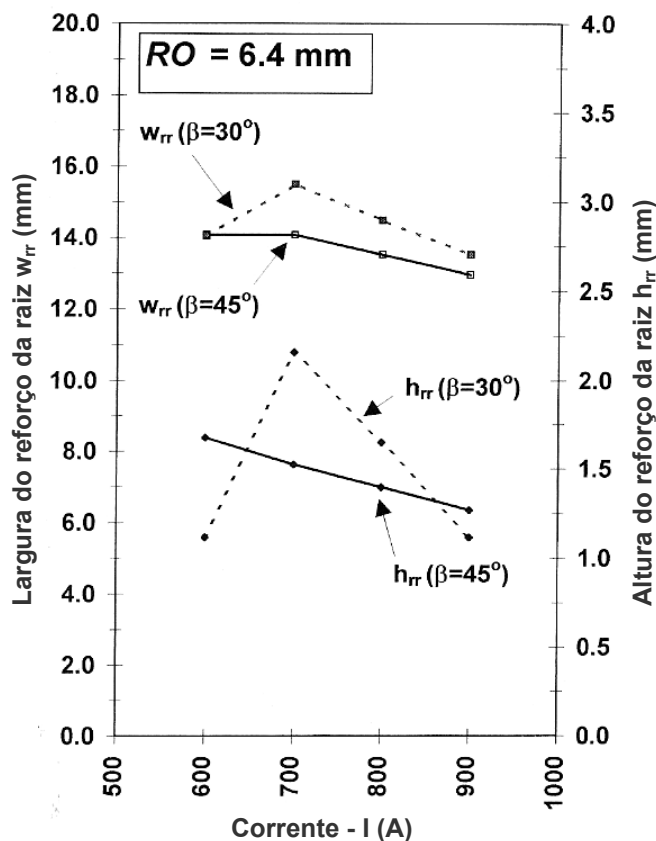


FIGURA 2.20 – Efeito da abertura da junta (β) associada a corrente na geometria do reforço da raiz, altura do reforço (h_{rr}) e largura do reforço (w_{rr}), processo SAW [Malin, 2001]

Portanto, com o conhecimento adquirido em trabalhos direcionados para a realização da soldagem unilateral com *backing* cerâmico, é possível associar as características comuns aos processos aplicáveis e cada vez mais desenvolver técnicas de utilização que permitam a soldagem de qualidade.

Entretanto, até se conseguir o domínio das variáveis envolvidas no processo, os defeitos da soldagem são inevitáveis, como os que ocorrem na soldagem unilateral FCAW com *backing* cerâmico.

2.4.1 - Defeitos ocorridos na FCAW com *backing* cerâmico - passe de raiz

Conforme dito anteriormente, na soldagem unilateral FCAW com *backing* cerâmico é dada uma atenção especial ao passe de raiz, pois dele depende todo o sucesso

da solda com penetração total. Os passes de enchimento e acabamento são também importantes contudo, não são normalmente abordados nos trabalhos uma vez que as características presentes nestes passes são inerentes à boa execução do processo de soldagem, sem que tenham relação com o *backing* cerâmico.

Os defeitos relativos ao formato do reforço da raiz decorrem, dentre outros, dos fatores presentes na soldagem como: abertura de junta, ângulo de chanfro, dimensão da face (nariz) da raiz, ângulo da tocha em relação à direção de soldagem, velocidade de soldagem, aporte térmico, manejo da tocha.

Cantrell [1982] obteve alguns formatos do reforço da raiz, atuando no manejo da tocha com e sem tecimento, conforme comparação mostrada na FIG 2.22. A velocidade de soldagem alta, causa o efeito de desvio do arco em direção à borda da poça de fusão e provoca pouca penetração da raiz. Baixa velocidade elimina este efeito de desvio do arco, com excesso de contorno do reforço da raiz.

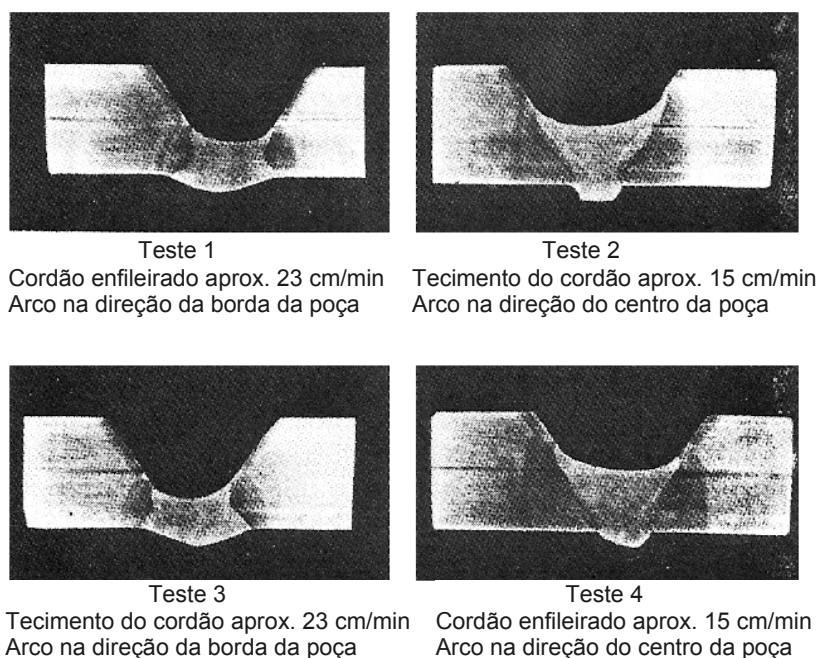


FIGURA 2.21 – Efeito da técnica de soldagem no reforço da raiz, arame ER70T-1 diâmetro 1,6 mm, posição plana, Chanfro tipo V – 60°, 240 A e 25 V – Mistura 75% Ar + 25% CO₂, sem face de raiz, abertura raiz aprox. 2,4 mm. [Cantrell, 1982]

O uso do *backing* cerâmico com FCAW foi prejudicado ocasionalmente pela porosidade interna descrita geralmente como porosidade vermiforme, uma vez que a forma e o arranjo das falhas ou vazios são semelhantes ao rastro deixado pelo verme. Quando isto ocorre, os pontos característicos da porosidade vermiforme apontam no sentido da soldagem e surgem sozinhos ou como depressão tubular na área da linha central da solda [Cantrell, 1982]. A FIG 2.23 ilustra um exemplo deste defeito, ocorrido durante a soldagem de uma amostra neste trabalho.

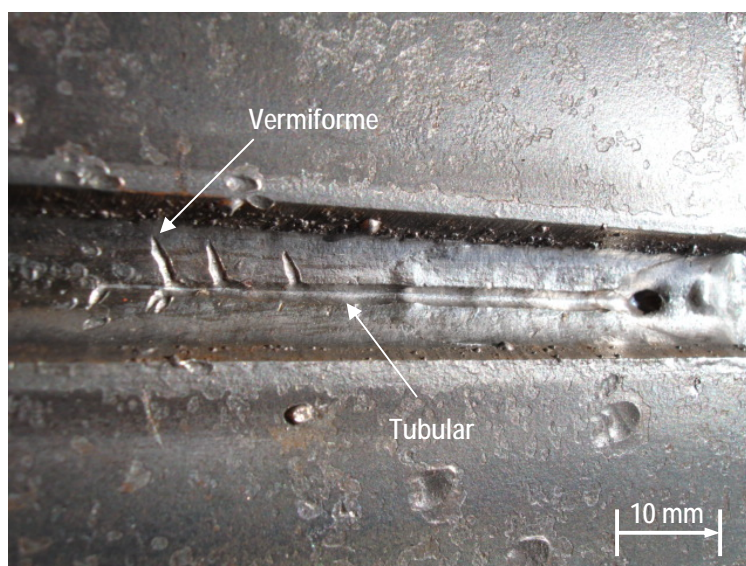


FIGURA 2.22– Defeito da porosidade vermiforme, no sentido lateral e tubular no centro da solda.
Passe de raiz, FCAW com *backing* cerâmico

As superfícies internas do defeito vermiforme são lisas e se apresentam na cor cinza metálico com formato do caminho de minhoca (*wormhole*). De acordo com Cantrell [1982], as porosidades vermiforme e tubular ocorrem na soldagem pelo FCAW com *backing* cerâmico nas posições plana e horizontal. Diversas fontes de gases, que causam porosidade, raramente podem ser originadas do *backing* cerâmico. Existe a possibilidade de absorção da umidade, presente no ambiente, por parte dos cerâmicos. A absorção da umidade é mais elevada na cordierita. Entretanto, para os cerâmicos secos, as porosidades vermiforme e tubular ocorrem na mesma frequência com a cordierita e esteatita.

Outra fonte de gás pode ser devido às quantidades residuais de pasta orgânica usada para aglomerar o pó cerâmico durante sua formação e que pode permanecer no cerâmico após o seu aquecimento. Em temperaturas de soldagem, estes residuais orgânicos liberariam CO_2 e H_2O . Tudo isso contribui para a porosidade. O mecanismo de formação do defeito é descrito e ilustrado na FIG 2.24.

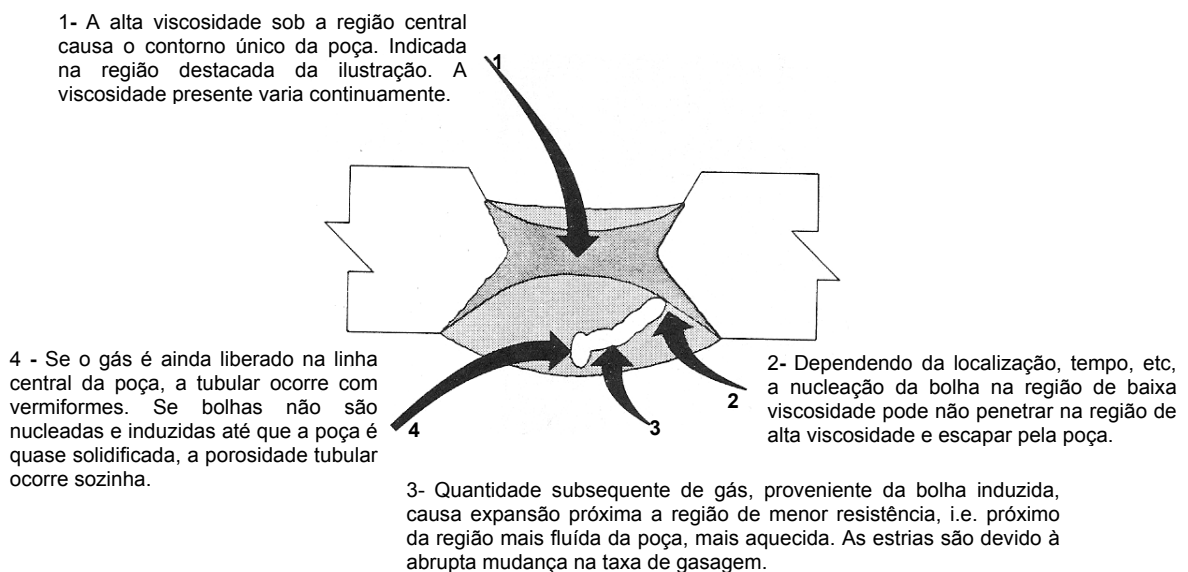


FIGURA 2.23 – Mecanismo da formação da porosidade tubular e vermiforme [Cantrell, 1982].

Existe ainda a possibilidade de alguma presença de Alumina (óxido de alumínio - Al_2O_3) no cordão de solda, proveniente dos constituintes do *backing* cerâmico. A alumina é o constituinte mais utilizado, devido a facilidade em termos de disponibilidade de matéria prima e de custo [Taylor, 2002]. Entretanto, com a evolução da engenharia cerâmica associada ao melhor conhecimento e domínio dos parâmetros envolvidos na soldagem com *backing* cerâmico, esta possibilidade é praticamente eliminada. Não foi encontrada na literatura referência sobre a presença de alumina no passe de raiz.

Outra defeito é o rechupe das bordas do passe de raiz da junta com profundo efeito no seu formato, também denominado rebaixamento. O mecanismo para a ocorrência do rechupe envolve a natureza refratária do backing cerâmico. O fluxo de calor no metal da poça de fusão é muito mais lento no *backing* cerâmico do que através do *backing* metálico. O Calor, que fluiria normalmente da poça de fusão através do *backing* metálico, propaga preferencialmente para o metal base quando a soldagem é executada sobre o *backing* cerâmico. Adicionalmente, há provavelmente uma densidade de corrente um tanto mais elevada na região da raiz desde que um material não condutor (*backing* cerâmico) foi introduzido em parte do trajeto original da corrente. Este fluxo de calor concentrado funde as bordas do material base junto ao *backing* cerâmico a uma profundidade muito maior do que em uma junta correspondente, quando se emprega o *backing* metálico. O rechupe é facilmente evidenciado nas macrografias das soldagens feitas pelo processo FCAW com *backing* cerâmico [Cantrell, 1982]. O mecanismo de formação do rechupe relacionando o *backing* cerâmico e o *backing* metálico, na posição horizontal, é mostrado na FIG 2.25.

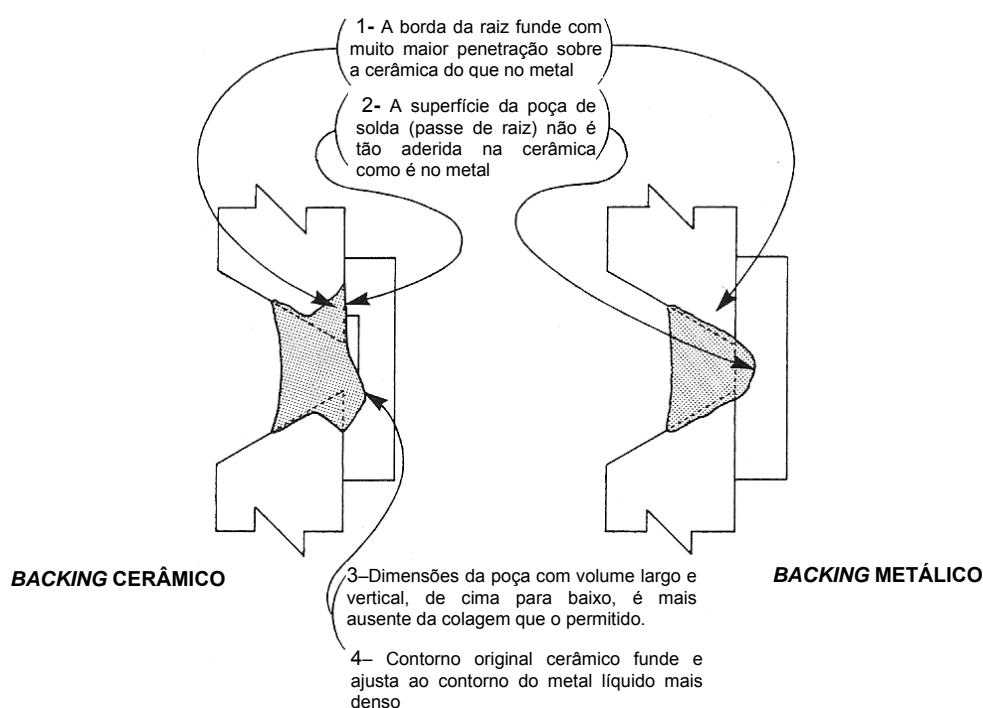


FIGURA 2.24 – Mecanismo explicando o surgimento do rechupe no metal de solda em FCAW na posição horizontal [Cantrell, 1982]

Outro situação muito comum que causa soldas defeituosas é a perda de estabilidade do arco, pois, caso o arame incida somente sobre o *backing* cerâmico, que por si só não conduz eletricidade, o contato elétrico será perdido. Além disso se a tolerância da preparação, que depende da abertura entre as placas, for muito maior do que o diâmetro do arame, o contato elétrico pode ser perdido [Muir, 1985].

Em todo processo de soldagem, os defeitos que surgem no ambiente de trabalho são contornados e evitados com o uso do conhecimento dos fenômenos ocorridos e o domínio dos parâmetros envolvidos. Uma vez dominado, principalmente o passe de raiz, no processo de soldagem unilateral FCAW com *backing* cerâmico, existirão diversas aplicações na indústria mecânica em geral.

2.4.2 - Aplicações da soldagem unilateral com *backing* cerâmico

Produzir uma solda de raiz aceitável é a tarefa mais difícil e é a chave do sucesso em todo o método de soldagem unilateral. Se uma solda de raiz aceitável for formada, o restante do chanfro pode ser preenchido usando-se o processo de soldagem aplicável sem maiores dificuldades [Malin, 2001].

A soldagem unilateral propiciará uma formação aceitável do passe de raiz se forem mantidas praticamente constantes a geometria do chanfro e as variáveis de soldagem. Entretanto muitas das vezes encontram-se situações no ambiente do chão de fábrica que prejudicam a aplicação da soldagem unilateral como:

- Tolerâncias de montagem muito frouxas;
- Grandes aberturas da raiz da junta;
- Desalinhamento significativo das chapas provocado por falha na montagem ou por distorção da soldagem previamente realizadas em componentes na estrutura;
- Variações no ângulo do chanfro e na face da raiz.

Uma vez controladas todas as etapas envolvidas na soldagem, o sistema de *backing* cerâmico pode ser usado em diversos segmentos:

- Construção de navios;
- Soldagem de tubulação;
- Calderaria em geral;
- Fábricas de estruturas metálicas;
- Bocas de visita em tanques.

Torna-se bastante atrativo o uso do processo FCAW na soldagem unilateral com *backing* cerâmico em relação ao processo SAW, pois os equipamentos utilizados para o FCAW têm custos reduzidos em relação ao SAW, além dos transtornos causados pela manipulação dos fluxos no SAW. Isto pode ser constatado principalmente na indústria naval onde a participação do SAW ainda é grande. Com o aumento de consumo do *backing* cerâmico percebe-se a entrada no país de empresas que comercializam este consumível, antes só adquirido pelos usuários através de importação direta.

A soldagem unilateral FCAW com *backing* cerâmico é normalmente executada de forma semi-mecanizada, ou seja, necessita da mão do soldador para conduzir a tocha de soldagem. Isto se explica devido à dificuldade no controle da incidência do arame dentro da poça de fusão durante a execução do passe de raiz. O soldador poderá compensar esta dificuldade, manipulando a tocha e mantendo o arco estável, ou seja, usando sua habilidade manual. Portanto o desafio é conseguir a soldagem unilateral FCAW com *backing* cerâmico de forma mecanizada, sem interferência da habilidade manual do soldador.

Alguns Pesquisadores estudaram a soldagem unilateral mecanizada com o processo FCAW sem a utilização do *backing* cerâmico e os resultados relatados devem ser considerados para eventuais comparações relacionadas aos benefícios com o seu uso.

2.5 - Soldagem unilateral FCAW sem backing - características

Na busca do ideal aparece a soldagem unilateral sem *backing*, metálico ou cerâmico, com o conceito de produtividade dos processos GMAW ou FCAW.

Entretanto ela normalmente vem sendo realizada com a utilização dos processos GTAW e SMAW na execução do passe de raiz, com ou sem remoção posterior (goivagem) e finalização desta raiz. Desta forma perde-se em produtividade, conforme visto anteriormente, contudo são considerados atualmente os processos mais confiáveis do ponto de vista da integridade mecânica da junta soldada.

Entre as várias aplicações com a ausência do *backing*, destaca-se a soldagem de tubulação, usadas em linha de gasodutos, minerodutos e liqüedutos. A referida ausência é principalmente devida à impossibilidade da aplicação do *backing* durante a soldagem do passe de raiz, do que propriamente à opção de seu uso.

Para adequar a soldagem unilateral sem *backing* a um processo de soldagem mais produtivo, que os atualmente aplicados (GTAW e SMAW), alguns estudos [Oliveira, 2002] e [Soraggi, 2004] foram realizados para viabilizar a soldagem com arame tubular de forma mecanizada, utilizando-se fonte de energia convencional (máquina de solda).

A dificuldade da aplicação do FCAW na soldagem sem *backing*, com máquina de solda convencional, reside na ocorrência de defeitos como fusão lateral, falta de fusão e falta de penetração na região do passe de raiz, os quais influenciam para a má formação deste. Pode ainda ocorrer o defeito de inclusão de escória ao longo do cordão de solda da junta chanfrada.

Quando da aplicação do FCAW na posição plana, foi observado por Oliveira [2002] o efeito da fusão concentrada em um dos lados da raiz da junta, ficando o outro lado inalterado. Este efeito ocorreu com ou sem aprisionamento de escória do lado não fundido, como mostrado na FIG 2.26. Este efeito não foi observado

nas outras posições de soldagem, o que leva a acreditar tratar-se de um problema exclusivo da posição plana [Oliveira, 2002].

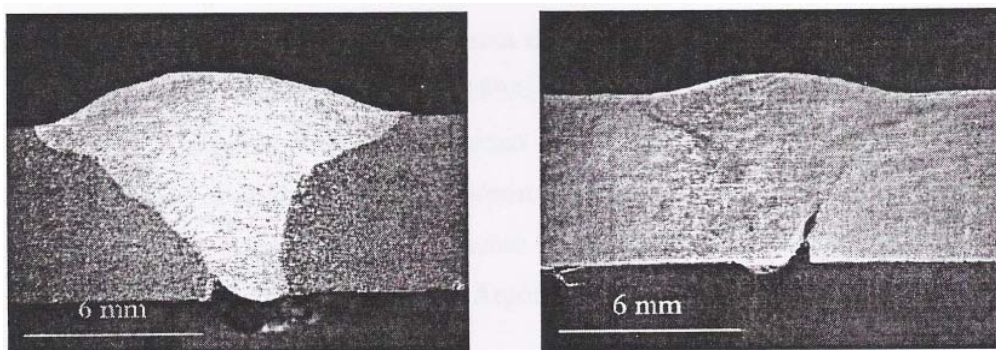


FIGURA 2.25 - Macrografias de cordões de solda com fusão lateral na região da raiz, Fonte [Oliveira, 2002]

Para fins comparativos foram feitos testes com arame sólido, processo GMAW, no intuito de buscar condições mais próximas das empregadas com arame tubular. O efeito da fusão lateral na região da raiz não se manifestou em nenhuma das treze soldas feitas pelo processo GMAW [Oliveira, 2002], como mostrado na FIG 2.27.

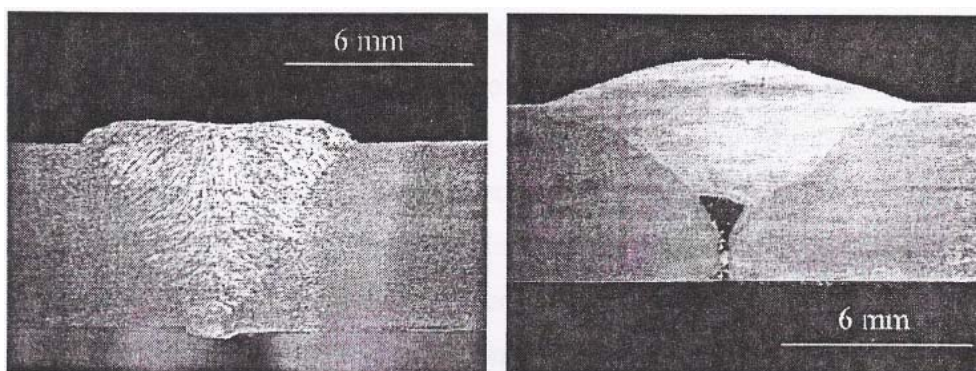


FIGURA 2.26 - Comparação entre cordões GMAW (esquerda) e FCAW(direita). [Oliveira, 2002]

A soldagem sem *backing*, aplicada principalmente em tubulação, vem sendo desenvolvida com arame sólido (GMAW), a partir da utilização de fonte de energia inversora eletrônica com tecnologia de transferência metálica denominada curto circuito controlado, apesar de ainda ter custo mais alto que as fontes de energia convencionais.

As empresas fabricantes de máquina de solda desenvolvem programas que controlam o curto circuito (CC), facilitando muito sua aplicação na soldagem do passe de raiz, entre eles encontra-se o ilustrado na FIG. 2.28, que atua no controle do arco elétrico como descrito a seguir:

- Durante o período do CC, a energia funde a gota do arame de adição. Ocorre então a transferência do metal no ponto de baixa corrente propiciando o arco livre de respingo;
- Após a transferência do metal, inicia-se o período do arco com alta corrente (arco aberto). O arco aberto forma a poça de fusão e leva energia ao metal base, propiciando a penetração da solda;
- O ciclo completo leva de 5,0 a 6,0 ms (período de curto circuito e arco aberto).

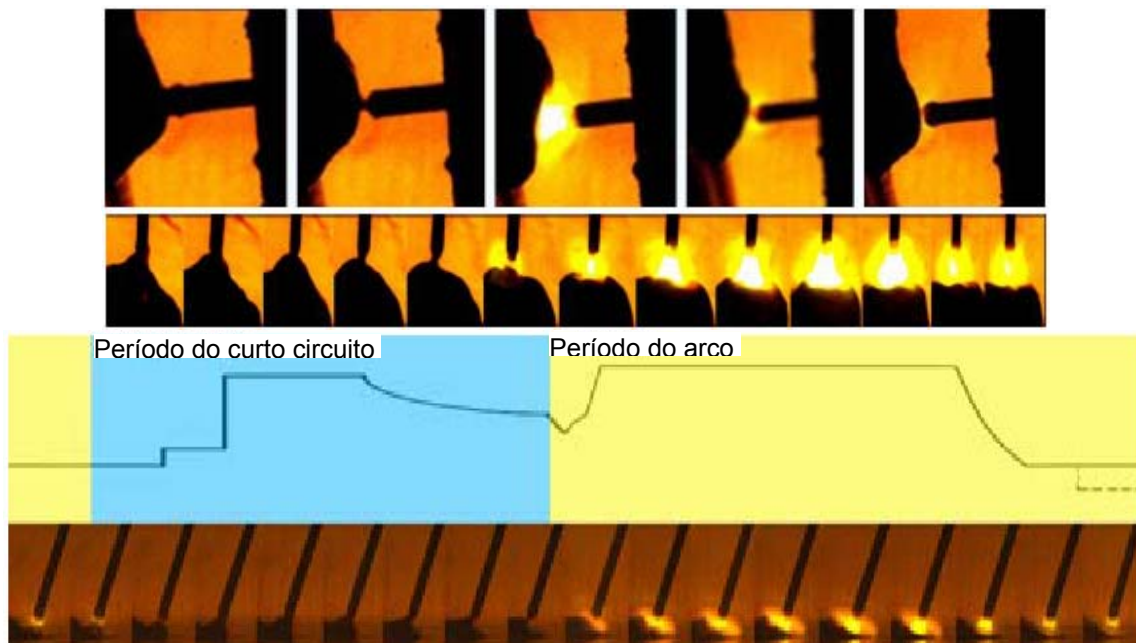


FIGURA 2.27 – ilustração com diagrama da formação da onda da corrente e série de fotos de alta velocidade da soldagem GMAW (MIG) da ponta do arame, fonte [KEMPPPI, 2007]

Devido às várias opções de soldagem do passe de raiz, o estudo que será mostrado a seguir torna-se importante por ser mais uma opção na tomada de decisão na aplicação do processo de soldagem adequado às diversas situações encontradas no ambiente de produção e fabricação.

3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados os materiais de consumo e material base, a descrição dos equipamentos e dos acessórios, a metodologia experimental, os sistemas de medição e as diretrizes empregadas no estudo os quais permitiram o mapeamento da soldagem FCAW com *backing* cerâmico em aço carbono do passe de raiz, em junta de topo com chanfro tipo V e na posição plana.

Testes preliminares foram realizados para melhor adequação e conhecimento dos efeitos das seis variáveis envolvidas neste estudo: corrente, tensão, velocidade de soldagem, abertura da face da raiz, ângulo do chanfro e inclinação da tocha. Além disso, a técnica operatória permitiu definir, de forma a manter constante o tipo de gás de proteção e respectiva vazão, a distância bico contato peça (DBCP), a altura da face de raiz, o tipo de *backing* cerâmico e o tipo de arame consumível. Esta fase objetivou a obtenção da mínima estabilidade de arco para a realização do passe de raiz, o qual foi posteriormente avaliado na sua formatação, sendo considerado como aceitável ou não para prosseguimento da soldagem da junta. A FIG 3.1 mostra o esquema do reforço da raiz, altura (h_{rr}) e largura (w_{rr}) considerado aceitável.

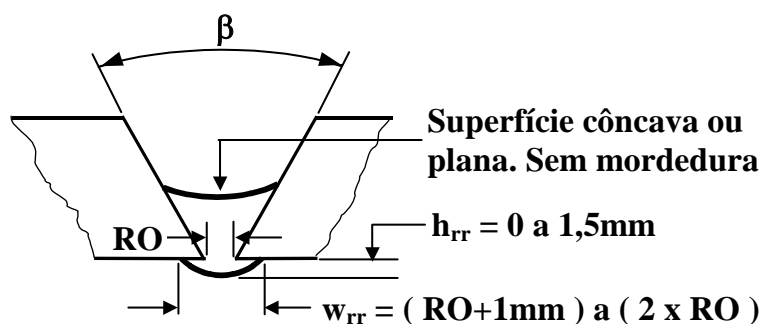


FIGURA 3.1 – Esquema das características do reforço do passe de raiz considerado aceitável

A análise dos resultados preliminares possibilitou a obtenção de referências para a próxima fase de testes, quando foi realizada a pesquisa dos parâmetros envolvidos nas seis variáveis de soldagem, citados anteriormente. Diante das

referências mencionadas, foi definido que seria mantido durante a soldagem das amostras o aporte térmico (HI), que é a conjugação dos parâmetros de tensão (V), corrente (I) e velocidade de soldagem (v_s), aplicados na fórmula: $HI = VI / v_s$, em patamares com variação de +/- 20%, enquanto se processavam as alterações das outras variáveis.

As dimensões da altura e largura do reforço da raiz em função dos parâmetros das variáveis propiciaram o levantamento das respectivas curvas. Muitas amostras resultaram em um passe de raiz não aceitável, não sendo consideradas para o levantamento das curvas, mas sendo registrados os dados, permitindo o mapeamento da soldagem unilateral para futuras consultas.

3.1 - Equipamentos utilizados

3.1.1 Sistema de soldagem e bancada de testes

Para elaboração das amostras analisadas utilizou-se um Robô KUKA, Modelo KR 16. Este robô conduziu uma tocha TBi modelo TBi RM 60W, sendo usada, como fonte de energia para a soldagem, uma máquina da White Martins (CEA), modelo SOLMIG 403 CV. O sistema é ilustrado na FIG 3.2 (A) e (B).

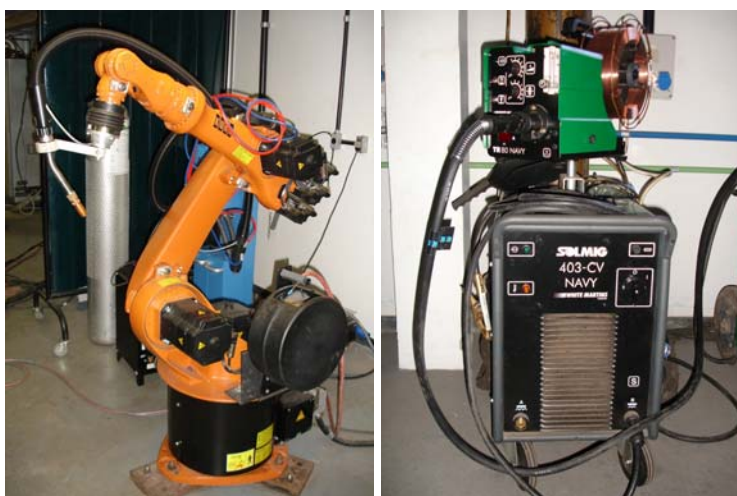


FIGURA 3.2 - Fotografia do robô (A) e Máquina Solmig 403 CV (B)

Para manter a amostra na mesma posição, facilitando a operação do robô e possibilitando a manutenção do alinhamento da tocha no centro da junta e o DBCP, foi utilizado um sistema de posicionamento conforme mostrado na FIG 3.3. Mesmo com este sistema, antes da realização da soldagem, iniciou-se o programa do Robô, sem o arco habilitado, não ocorrendo a soldagem, e sendo confirmados os parâmetros estabelecidos previamente.



FIGURA 3.3 – Fotografia do sistema de fixação por grampos para posicionamento da amostra.

3.1.2 - Sistema de medição da corrente e da tensão de soldagem

Os parâmetros de corrente (A) e tensão (V) de soldagem foram monitorados por uma maleta de aquisição de dados SAP-1, conforme ilustrado na FIG 3.4.



FIGURA 3.4 – Fotografia da maleta SAP-1 para aquisição de dados de soldagem

Durante a soldagem das amostras, este sistema foi usado para a determinação dos valores médios de tensão e corrente do arco elétrico. O sistema permite a aquisição das medidas dos parâmetros em intervalos de 1 em 1 s. Desta forma, para definir o parâmetro de corrente e tensão presentes na soldagem de determinada amostra, calculou-se a média aritmética das medidas, considerando o intervalo de estabilidade do arco.

Em determinadas soldas foi preciso recorrer ao amperímetro e voltímetro da máquina de solda SOLMIG 403 CV, pois o arco não apresentava boa estabilidade, sendo que a média aritmética poderia mascarar a regulação referencial estabelecida inicialmente.

A velocidade de soldagem foi regulada e monitorada pelo sistema de programação do robô KUKA Modelo KR 16 e convertida a unidade m/s em cm/min para as anotações devidas.

3.1.3 – Mecanismos utilizados para preparação da amostra

Para a preparação e avaliação dos resultados após a soldagem foram utilizados os seguintes mecanismos:

- a) Máquina de oxi-corte da marca White Martins, modelo MC-46 (Tartaruga);
- b) Serra hidráulica da marca Franho;
- c) Cortadora metalográfica da marca Arotec, modelo Cor 40, disco 9”;
- d) Politriz metalográfica da marca Arotec, modelo APL-4D, disco 8”;
- e) Lupa metalográfica da marca Olympus, modelo SZST, aumento de 6,3X, equipada com objetiva SZ60 e câmara de vídeo da marca Sony, modelo CCD IRIS/RGB.
- f) Paquímetro da marca Mitutoyo, escala de 150 mm, vernier de 0,02 mm.

3.2 - Materiais utilizados na soldagem unilateral

3.2.1 - Material base

Como material base, foi utilizada chapa de aço carbono ASTM-A36 de espessura 12,7 mm. A TAB 3.1 apresenta a composição química do metal base.

TABELA 3.1 - Composição química média da chapa de aço carbono ASTM-A36, fonte USIMINAS.

Elemento	Concentração (% máx.)
Carbono (C)-máx.	0,25
Silício (Si)	0,40
Manganês (Mn)	1,35
Fósforo (P)	0,040
Enxofre (S)	0,050

3.2.2 - Arame eletrodo

Neste trabalho os testes foram realizados com a utilização do arame tubular com proteção gasosa AWS ER71T-1 (rutílico) com 1,2 mm de diâmetro, fabricado pela Hyundai com a denominação comercial de SF71. A TAB 3.2 e a TAB 3.3 apresentam, respectivamente, a composição química e as propriedades físicas do arame utilizado.

TABELA 3.2 - Composição Química do arame ER71T-1 [Hyundai, 2001]

Elemento	Concentração (%)
Carbono (C)	0,04
Silício (Si)	0,49
Manganês (Mn)	1,293
Fósforo (P)	0,010
Enxofre (S)	0,009

TABELA 3.3 - Propriedades Físicas do arame ER71T-1 [Hyundai, 2001]

Característica	Valor
Posição de soldagem	Todas
Tensão Limite de Resistência (mín.)	582 (N/mm ²)
Tensão Limite de Escoamento (mín.)	548 (N/mm ²)
Alongamento (A)	28%
Peso do arame por metro	8,1 g/m

3.2.3 - Gás de proteção

Para o tipo de arame utilizado neste trabalho, o SF 71 da Hyundai, é recomendado pelo manual do fabricante [Hyundai, 2000] o uso do dióxido de carbono (CO₂), também conhecido como gás carbônico, na função do gás de proteção. Para a realização dos testes utilizou-se o gás CO₂ fabricado pela White Martins. A TAB 3.4 apresenta as propriedades físico-químicas do CO₂.

TABELA 3.4 - Propriedades físico-químicas Dióxido de Carbono (CO₂) [White Martins, 2003]

Propriedade	Característica
Estado Físico	Gás Liquefeito
Cor	Incolor
Peso molecular (HB)	44,01
Ponto de Sublimação, a 1 atm	-78,5 °C (-109,3 °F)
Densidade do Gás (ar = 1):	1,522 a 21,1 °C (70 °F) a 1 atm
Pressão de Vapor a 21,1 °C (70 °F)	5778 kPa (838 psig)
Massa Específica	1,833 kg/m ³ a 70 °C (21,1 °F) e 1 atm
Taxa de Evaporação (Acetato de Butila=1)	Alto
PH	3,7 (para o ácido carbônico)
Solubilidade em Água, Vol/Vol S	0,90 a 20 °C (68 °F) e 1 atm

Para o processo de medição de vazão do gás de proteção no bocal da tocha de soldagem, foi utilizado um medidor de vazão digital, modelo MVG-2 do fornecedor LABSOLDA, que utiliza o princípio de medição através do transdutor tipo turbina, com faixa de medição de 3 a 30 l/min, como ilustrado na FIG 3.5. Desta forma é possível verificar a vazão sem o inconveniente do posicionamento da tocha com o bocal voltado para cima na vertical, característica do medidor comumente conhecido como bibímetro.

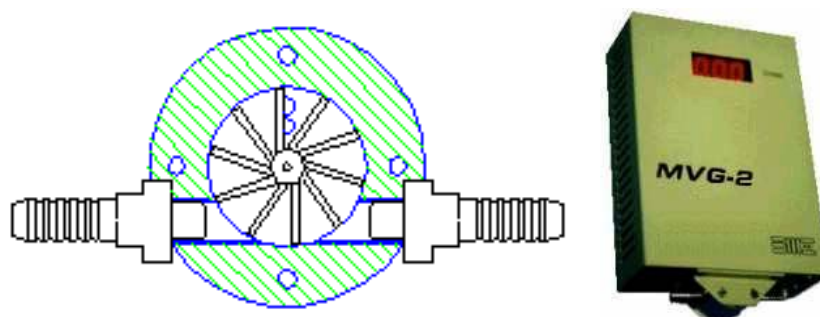


FIGURA 3.5 – Ilustração do transdutor tipo turbina (esquerda) usado no medidor MVG-2 (direita)

3.2.4 - *Backing* cerâmico

Foi selecionado o *backing* cerâmico com fita adesiva de alumínio modelo JN-401, com sulco arredondado, conforme as características apresentadas na FIG 3.6.


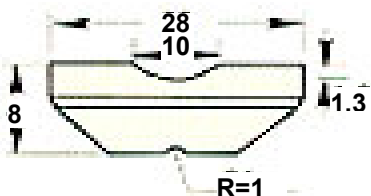
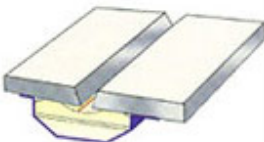
Modelo JN-401	Dimensões	Junta	Aplicação
			Utilizado com proteção gasosa. Soldagem com arame tubular ou sólido.

FIGURA 3.6 – Características do *backing* cerâmico com sulco curvo de largura 10 mm e profundidade 1,3 mm. *backing* de largura 28 mm e comprimento 25,4 mm (1") [Termari, 2006].

O *backing* cerâmico foi fornecido em módulo com comprimento total de 610 mm (24"), conforme visto na FIG 3.7. Normalmente existe uma marcação no centro para facilitar ajuste na junta a ser soldada.

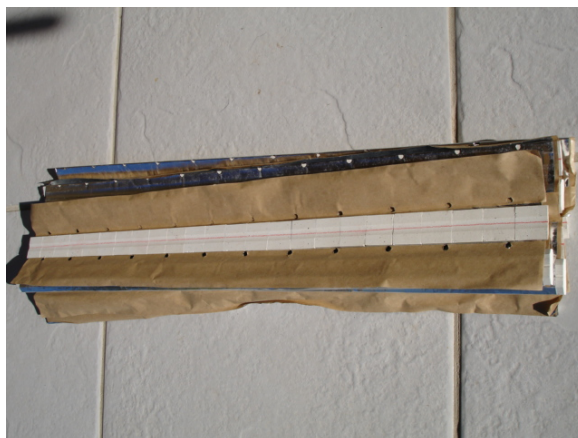


FIGURA 3.7 – Fotografia do *backing* cerâmico JN-401 com módulo de 610 mm (24")

3.2.5 - Amostras

As amostras foram elaboradas a partir de chapas de aço carbono espessura 12,7 mm, cortadas pelo processo oxi-corte e constituíram-se de duas peças de comprimento 150 mm e largura 75 mm. Foram ainda chanfradas e formaram uma junta de topo com chanfro tipo V com 30°, 40° e 60° (+/- 5°) e altura da face de raiz igual a 0 mm. As aberturas da face de raiz tiveram as dimensões de 3, 5 e 7 mm. Para garantir a abertura desejada, utilizou-se a soldagem de suporte metálico nas extremidades das amostras, após serem posicionadas as chapas, com o auxílio de gabarito nas medidas das respectivas aberturas. O *backing* cerâmico foi cortado com comprimento de 150 mm e fixado na parte inferior das chapas através da fita adesiva de alumínio que compõe este consumível. As amostras foram preparadas com o auxílio de retalhos de barra chata, soldados nas extremidades das chapas com a finalidade de manter fixa a abertura da raiz durante a soldagem, como mostrado na FIG 3.8. Além disso, possibilitava a abertura do arco e o início de formação da poça de fusão antes do contato com o *backing* cerâmico.



FIGURA 3.8 – Foto da amostra preparada para a soldagem unilateral FCAW do passe de raiz

As amostras foram identificadas a partir da criação do código UVWX-YZ, sendo que cada letra corresponde a uma determinada referência de parâmetro, como por exemplo a amostra de código 6T5A-50P. A descrição de cada letra está na TAB 3.5.

TABELA 3.5 – Descrição das letras que compõem o código de identificação das amostras

Código = UVWX-YZ	Significado	Descrição
U	Algarismo correspondente ao valor do ângulo do chanfro tipo V (β)	6 - $\beta = 60^\circ$ 4 - $\beta = 40^\circ$ 3 - $\beta = 30^\circ$
V	Letra correspondente ao tipo arame e o gás de proteção	T = Tubular com CO ₂
W	Algarismo correspondente ao valor da abertura da raiz, expressa em mm (RO)	3 - RO = 3 mm 5 - RO = 5 mm 7 - RO = 7 mm
X	Letra correspondente a faixa de valores da corrente de soldagem monitorada (I)	A - I = 160 a 190 A B - I = 191 a 230 A C - I = 231 a 280 A
Y	Algarismo correspondente ao número da amostra produzida	1 = primeira amostra e... prossegue na sequência crescente
Z	Letra correspondente a inclinação da tocha e respectivo valor definido (a)	E - Empurrando, a = -15° P - Puxando, a = 15° N - Neutro, a = 0°

3.3 - Avaliação visual e análise macrográfica do passe de raiz

A partir da avaliação visual da soldagem do passe de raiz da amostra e depois da mesma ter sido considerada aprovada ou aceitável para análise, realizou-se a preparação para a avaliação macrográfica.

Na consideração da amostra aprovada, foram utilizados alguns critérios na avaliação visual:

- a) Altura do reforço da raiz no mínimo "zero", ou seja, faceando a chapa;
- b) Estabilidade do arco durante a soldagem da amostra;
- c) Incidência do arame na poça de fusão durante a soldagem / arco aberto;
- d) Boa formação do reforço e da superfície do passe de raiz, isentos de defeitos como fusão lateral, falta de fusão, penetração em excesso, mordedura e porosidade vermiforme, ou seja, bom acabamento superficial;
- e) Passe de raiz realizado em parte da extensão da amostra, devido à eventual interrupção da soldagem por motivo inerente ao processo pesquisado.

Mesmo a amostra não tendo atendido aos critérios visuais de aprovação, poderia ser considerada aceitável para análise, pois permitiria conhecer o conjunto dos parâmetros envolvidos que não produziram o objetivo principal, solda de qualidade e, por conseguinte, formar banco de dados para os ajustes adequados ao alcance do objetivo. Os dados de todos os corpos de prova foram registrados para posterior definição de viabilidade da utilização neste trabalho.

A análise macrográfica das amostras foi feita a partir da retirada de corpos de prova através do corte transversal à solda, utilizando a serra hidráulica, na região a ser analisada e posteriormente reduzido o tamanho através da cortadora metalográfica de disco 200 mm. As amostras assim obtidas foram preparadas as superfícies com lixas # 120, em seguida receberam ataque com Nital 4% e finalmente foram fotografadas. Estas fotos foram usadas para analisar as características da geometria do passe de raiz e eventuais defeitos.

3.4 - Avaliação dimensional da altura e largura do reforço do passe de raiz

Uma vez realizada a avaliação visual anterior do passe de raiz e analisado o desempenho da soldagem, principalmente com relação à estabilidade do arco associado à incidência do arame na poça de fusão, o passe de raiz foi credenciado para análise da geometria.

Com a utilização do paquímetro, foram realizadas até quatro medidas da altura e largura do reforço do passe de raiz, nos trechos de 15 mm, 55 mm, 95 mm e 135 mm, medidos a partir do início da solda nas amostras, sendo os resultados registrados e apresentados nas Tabelas A.2 e B.2 do apêndice. A FIG 3.9 ilustra os pontos de medição e a geometria analisada.

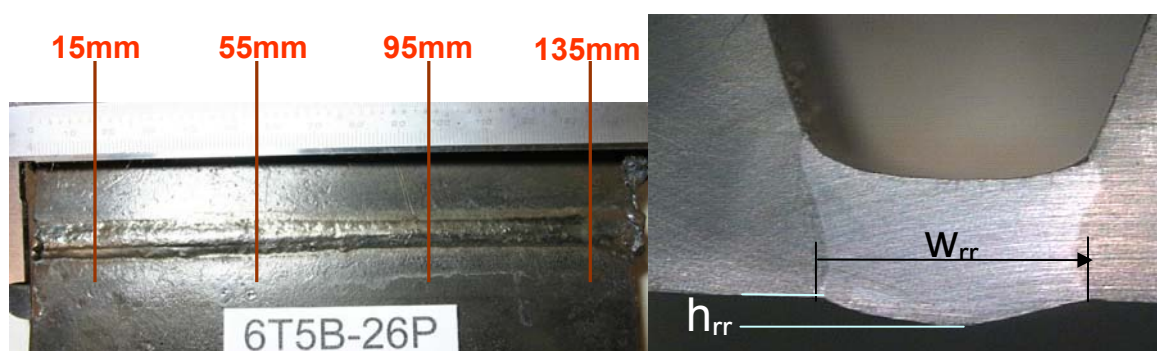


FIGURA 3.9 – Ilustração dos trechos medição (esquerda) da altura (h_{rr}) e largura (w_{rr}) da geometria do reforço do passe de raiz (direita).

Considerou-se a média aritmética simples de até quatro medidas, pois algumas amostras tiveram a soldagem interrompida e não foi possível realizar todas as medidas do critério anterior, FIG 3.9. Mesmo assim, esse método foi considerado aceitável, pois o objetivo era verificar a tendência do formato do reforço no trecho soldado. Caso fosse usado para a medição do formato, o corpo de prova retirado para a macrografia, seria analisado apenas um ponto da amostra, levando a uma incerteza, devido à variação existente em todo o cordão de solda. Os resultados obtidos, a partir do critério adotado, foram usados para elaboração das curvas do efeito de algumas variáveis estudadas no formato do reforço da raiz, altura e largura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discutida a influência dos parâmetros de soldagem unilateral FCAW mecanizada com *backing* cerâmico do passe de raiz. Tais os resultados e discussões serão abordados em duas etapas de testes, denominados preliminares e definitivos.

Na primeira parte foram analisados os resultados a partir do levantamento preliminar da soldagem realizada para se obter as condições mínimas de formação do passe de raiz, os quais permitiram formar uma base para prosseguir o mapeamento. Esses resultados serão apresentados de forma ilustrativa, no APÊNDICE A, com os respectivos parâmetros de soldagem utilizados para observação dos passes de raiz, algumas vezes considerados sem qualidade. Entretanto servirão para eventual consulta do usuário quando no ambiente de produção da soldagem unilateral FCAW com *backing* cerâmico.

A segunda parte corresponde aos resultados analisados, os quais serão exibidos na forma de mapeamento, contendo as tabelas e ilustrações decorrentes das alterações das variáveis pesquisadas. Como já foi dito anteriormente, as variáveis de corrente, tensão e velocidade de soldagem foram alteradas com base no critério de se manter o calor de entrada em patamares próximos. As demais variáveis de abertura da raiz, ângulo do chanfro e inclinação da tocha foram alteradas, baseando-se no critério de patamares previamente definidos a partir do teste exploratório, que será descrito no próximo capítulo. Nesta etapa foram realizadas as medidas do reforço do passe de raiz, seguindo a geometria adotada por Malin [2001], direcionando para a altura e largura, além da análise visual do desempenho alcançado e apresentado de maneira descritiva no APÊNDICE B.

4.1 - Testes preliminares

Os testes preliminares foram realizados a partir das características apresentadas anteriormente no capítulo 3, que foram mantidas constantes em todo o trabalho e serão descritas resumidamente a seguir:

- Junta de soldagem: tipo de topo, com chanfro tipo V
- Posição de soldagem: plana
- Altura da face da raiz: 0 mm (zero)
- Gás de proteção: CO₂ (dióxido de carbono ou gás carbônico)
- Vazão de gás: 18 l/min, medido no bocal da tocha
- DBCP: 20 mm (distância bico de contato peça)
- Backing cerâmico: tipo JN-401, referência Termari

Dentre as variáveis de soldagem selecionadas para estudo (corrente, tensão, velocidade de soldagem, abertura da raiz, ângulo do chanfro e inclinação da tocha), manteve-se constante a variável do ângulo do chanfro tipo V no valor de 60° até a obtenção das condições mínimas, considerando-se um cordão de solda viável na análise de sua geometria.

Para iniciar a soldagem mecanizada, com robô KUKA, foram usados como referência os parâmetros usados na soldagem FCAW semi-mecanizada, levantado em experiências práticas no ambiente de produção e consultado em folhetos e literatura técnicos. Nesta etapa a maioria dos cordões de solda foram considerados insuficientes e de qualidade ruim, acompanhados da observação de instabilidade ou interrupção do arco elétrico, formação insuficiente e/ou descontinuidade da poça e conseqüente má formatação do reforço da raiz. As características das amostras soldadas e selecionadas nesta etapa, com os respectivos parâmetros de soldagem e a macrografias são apresentadas na TAB A.1a e TAB A.1b e os resultados das amostras de 1 a 25 na TAB A.2, essas tabelas encontram-se no APÊNDICE A - testes preliminares.

Diante dos resultados obtidos nesta etapa preliminar, identificaram-se alguns defeitos ou características, os quais o estudo não foram tratados, no presente trabalho, uma vez que o estudo aprofundado dos fenômenos relacionados ao tema não consta da pauta proposta. Entretanto ponderou-se o seguinte:

a) Falta de fusão lateral na região da raiz, como ilustrado na FIG 4.1.



FIGURA 4.1– Macrografias do passe de raiz com falta de fusão lateral da junta na região da raiz.

O defeito é caracterizado pela fusão concentrada em um dos lados da região da raiz da junta, ficando o outro lado inalterado. Este defeito também foi encontrado em trabalhos feitos com a soldagem FCAW sem *backing* cerâmico, como relatado por Oliveira [2002], que por sua vez não foi observado nas outras posições de soldagem, indicando que seja um problema exclusivo da posição plana. Com o propósito de eliminar o problema, o autor realizou várias experiências com modificações na geometria da junta, como abertura da raiz, altura da face da raiz, ângulo do chanfro.

Apoiado em observações práticas de que o processo FCAW proporciona um perfil de penetração mais largo e agressivo na porção superior do chanfro, esperava-se que com aberturas maiores de raiz, ângulos de chanfro mais abertos e menores alturas de face de raiz, fosse possível trazer o perfil de fusão característico do processo para regiões mais profundas do chanfro, mais próximas da raiz, eliminando-se desta forma o problema. Este artifício não resultou em sucesso [Oliveira, 2002].

Estabeleceu-se comparação com o processo GMAW e os indícios mostraram que o fenômeno da fusão lateral no passe de raiz está associado exclusivamente ao processo FCAW. Testes foram realizados com o objetivo de direcionar o arco para o lado não fundido da junta e mais uma vez o procedimento mostrou-se inócuo. Por fim foram feitos testes que levavam em conta o local do início da abertura do arco, observando-se que o lado da raiz que funde é o lado da abertura do arco. Provavelmente, a chapa, onde se abre o arco, concentra mais calor e o faz mais rapidamente que a outra, concentrando assim a fusão. Acredita-se ser este fenômeno inerente à soldagem robotizada, uma vez que, na literatura estudada, não há relato de observação semelhante em outra circunstância e, na soldagem manual, o soldador, por visualizar a poça de fusão, manipula a tocha de forma a compensar efeitos semelhantes [Oliveira, 2002]. Outra causa provável para o defeito da fusão lateral da região da raiz é o desalinhamento das chapas na montagem da junta, que direciona a poça para um lado da junta, causando a falta de fusão do outro lado da chapa.

b) Rebaixamento lateral do reforço da raiz, como mostrado na FIG 4.2.

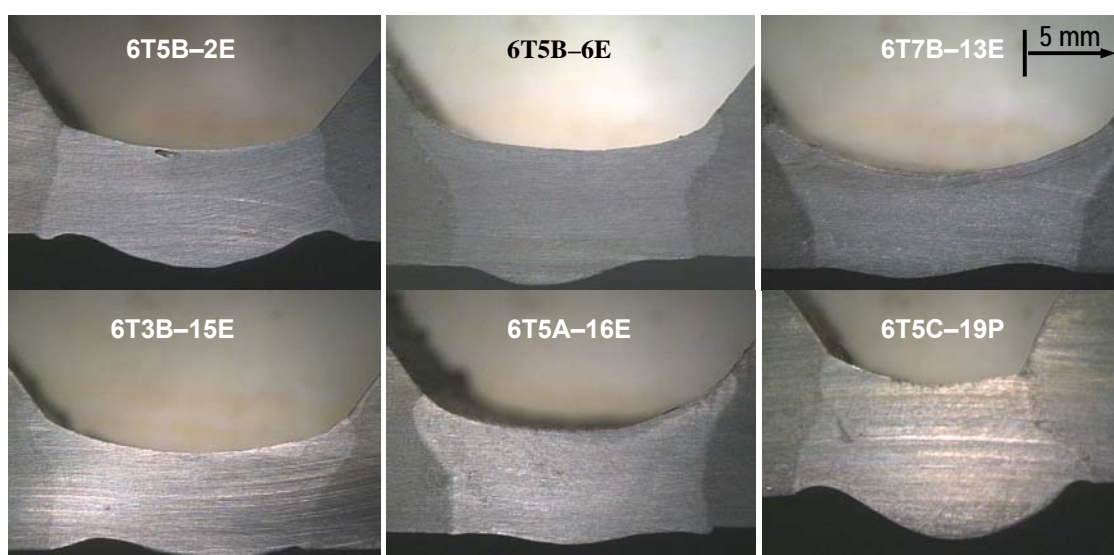


FIGURA 4.2 – Macrografia do rebaixamento lateral do reforço da raiz, FCAW posição plana.

O rebaixamento do reforço da raiz pode ocorrer de forma acentuada ou branda e nas duas laterais. O aspecto geral do restante do cordão pode ser saudável, não apresentando necessariamente mordedura no reforço da raiz, apesar de ocorrência próxima da região de incidência deste defeito. O formato superficial do cordão apresentou as condições ideais de concavidade e acabamento, para receber a soldagem dos próximos passes de enchimento. Considerou-se que caso o rebaixamento não ultrapasse o limite da face da chapa, não seria prejudicial à soldagem de penetração total, mantendo-se a resistência mecânica. Entretanto estudos futuros detalhados devem ser realizados para definir os limites do rebaixamento. A característica do rebaixamento ocorreu indistintamente nas três aberturas da face da raiz. Portanto, esta variável não indicou ter influência direta com o defeito ocorrido.

Nas amostras realizadas, a tensão encontrava-se em valores relativamente altos proporcionalmente à corrente de soldagem, em relação ao que normalmente ocorriado. Ancorado em observações práticas, a tendência nesta situação é de o arco ter um comprimento maior e apresentar perfil mais largo. O calor é então direcionado para a lateral da junta, proporcionando a penetração lateral, acarretando a falta de metal para a completa formatação do reforço da raiz. Esta ponderação mostra a importância do equilíbrio na conjugação de parâmetros associadas ao aporte térmico.

Uma maneira de evitar o rebaixamento consiste em usar *backing* cerâmico com o perfil do sulco retangular, possibilitando um espaço maior para fluir a escória e o metal presentes na parte de trás da poça. Esta ponderação vem ao encontro da informação colhida com o fornecedor de *backing* cerâmico, de que na indústria naval há a preferência pelo uso do *backing* com formato retangular, conforme citado anteriormente. Neste trabalho foi usado o de perfil arredondado, como visto no capítulo 3.2.4, por motivos da falta desta informação inicialmente, também por ser indicado para a soldagem FCAW e pela disponibilidade no mercado do tipo com sulco curvo.

Entretanto efeito semelhante foi apresentado na revisão bibliográfica, capítulo 2.4.1, no trabalho de Cantrell [1982], sendo o mesmo realizado na posição horizontal. Na oportunidade, o autor descreve como causa provável a falta de colagem da poça de fusão na lateral superior do sulco do *backing* cerâmico, fenômeno que não ocorre no backing metálico, e considera que o efeito da gravidade não favorece a soldagem na posição horizontal. Apesar de o efeito da gravidade não prejudicar a soldagem na posição plana, não se deve descartar o fato de que o efeito da colagem ocorra e contribua para o aparecimento do rebaixamento.

c) Altura do reforço do passe de raiz insuficiente, como observado na FIG 4.3.



FIGURA 4.3– Macrografia da altura do reforço do passe de raiz insuficiente.

Muitas vezes ocorre a penetração da solda nas laterais da junta, formando a largura do reforço, mas, nesse caso, ocorre uma boa formatação da altura do reforço da raiz. Como citado anteriormente, esses são os dois indicadores referenciais deste estudo. Quando não é atingida a altura mínima, devem ser descartadas as condições de soldagem, para fins de utilização no ambiente produtivo.

Considerou-se neste estudo que a altura mínima aceitável do reforço da raiz seria Zero, ou seja, faceando a chapa. A medida da altura negativa ou a verificação visual do perfil da macrografia abaixo da linha da chapa indicou que o cordão foi recusado. No trabalho de Malin [2001], foi considerada a altura mínima aceitável de 0,8 mm. Entretanto tem que se levar em consideração que o processo de

soldagem aplicado foi o SAW e as correntes utilizadas variaram de 500 A a 1000 A, muito acima dos valores usados neste trabalho, que foi no máximo de 270 A.

Portanto, como proposta para futura pesquisa, apresenta-se o conceito de aceitabilidade da altura e largura, a partir da aplicação dos ensaios mecânicos com o fim de garantir as propriedades requeridas para uma junta soldada com penetração total pelo processo FCAW.

Através da literatura e da prática, é possível comprovar que o aumento da penetração é influenciado diretamente pelo aumento da corrente de soldagem. Entretanto, no caso de soldagem com *backing* cerâmico, o aumento deste parâmetro, por si só, não é a solução para o problema da altura insuficiente do reforço da raiz, visto que a amostra 6T5C-20E, ilustrada na FIG 4.2, utilizou-se a maior corrente (270A) nesse estudo e proporcionou altura igual a zero.

A ocorrência anterior indica que o aporte térmico influencia fortemente na formatação do reforço do passe de raiz. Neste caso, para melhorar o desempenho da soldagem, devem-se conjugar os parâmetros envolvidos no aporte térmico e considerar que a poça de fusão é suportada por um material cerâmico que não conduz calor como o metal, possui baixa condutividade térmica e, portanto, não permite penetração do metal de solda. A utilização do material cerâmico proporciona, entre outros benefícios, a modelagem da poça de fusão.

d) A inclusão de escoria, amplamente conhecido na soldagem FCAW, não foi encontrada nas amostras soldadas nesta fase e no restante do trabalho.

Conforme dito anteriormente, os parâmetros de soldagem foram sendo ajustados para se obter as condições mínimas consideradas. Alcançada esta condição, iniciou-se a avaliação das seis variáveis, tomando-se como base o aporte térmico e desenvolvendo-se as outras variáveis.

4.2 – Testes definitivos e mapeamento dos resultados

O código da amostra, citado anterior na TAB 3.3, indica os valores das variáveis usadas no trabalho, facilitando a análise sem a necessidade de eventual consulta à tabela de dados.

A corrente de soldagem foi estudada em três faixas, tendo como pontos centrais os valores de 180 A, 210 A e 250 A, respectivamente, faixa A, B e C. Os valores de tensão e velocidade de soldagem foram ajustados para manter o aporte térmico em torno de 16 KJ/cm, com o objetivo de melhor controle do arco elétrico e da poça de fusão atrelada à incidência do arame na mesma.

Os ângulos de chanfro tipo V de 40° e 60° foram os considerados para comparação e elaboração de curvas de evolução. O ângulo de 30° foi estudado, mas não foram elaborados gráficos, sendo que posteriormente serão feitas ponderações a respeito. As características levantadas de $\beta = 30^\circ$ aparecem no APÊNDICE B, TAB B.1b.

A partir de consulta à tabela técnica de fornecedores de *backing* cerâmico, como o exemplo mostrado no ANEXO 2, e consultas aos usuários foram fixados três aberturas de face de raiz (RO) para a soldagem unilateral: 3mm, 5mm e 7mm.

Empregaram-se os valores de +15°, 0° e -15°, para os ângulos de inclinação da tocha (α) em relação à direção de soldagem, tendo como referência o trabalho de Malin [2001], conforme mostra o esquema da FIG 4.4.

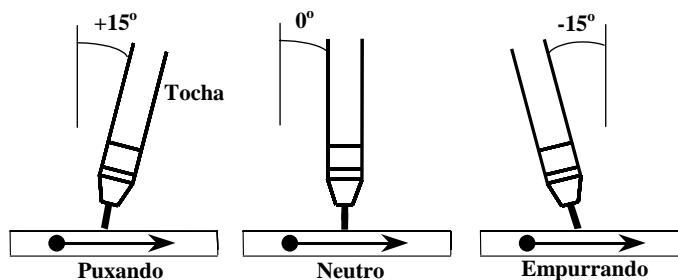


FIGURA 4.4 – Esquema da inclinação da tocha em relação a direção de soldagem

Não foi elaborada curva sobre o efeito da tensão de soldagem na geometria do passe de raiz, pois, quando a tensão variava, a corrente e velocidade de soldagem também variavam, para equalizar o aporte térmico previamente fixado. Observou-se que a tensão usada nos testes da soldagem FCAW com *backing* cerâmico foi maior que nos sem *backing*, para a mesma faixa de corrente. Segundo o trabalho de Oliveira [2002], na FCAW sem *backing*, a combinação de parâmetros mais adequada para a posição plana foi: $I = 251 \text{ A}$, $V = 24 \text{ V}$ e $v_s = 25 \text{ cm/min}$. Neste trabalho uma combinação de parâmetros, na mesma faixa de corrente, considerada adequada refere-se a: $I = 250 \text{ A}$, $V = 28,1 \text{ V}$, $v_s = 23,04 \text{ cm/min}$ (amostra 6T5C-31N).

Conforme citado anteriormente, estudou-se a soldagem com o ângulo de chanfro de 30° . Entretanto não foram elaboradas as curvas dos efeitos das variáveis, pois a formatação do passe de raiz não apresentou soldabilidade e características de geometria e acabamento que justificassem prosseguir na realização do estudo com este valor de β . O principal motivo para não prosseguir os testes neste ângulo de chanfro foi a restrição de acesso à junta, que comprometia a incidência do arame, com tendência para um só lado e dificultava o controle do arco elétrico e da poça de fusão (amostra 3T3B-35P). Com o aumento da abertura da raiz (RO) para 5 mm e a provável melhoria do acesso (3T5B-38P), a solda produzida manteve a formação do passe de raiz inconsistente. Com $RO = 7 \text{ mm}$ (3T7A-37P) não se conseguiu homogeneidade do cordão, o reforço foi crescendo durante o deslocamento da tocha e a tendência seria o excesso de altura e largura, descaracterizando o cordão de solda, apesar de ter sido usada faixa de corrente mais baixa do que nas outras aberturas. A viabilidade deste ângulo ($\beta = 30^\circ$) proporcionaria um menor volume de deposição do metal de solda na junta e, portanto, torna-se interessante o estudo técnico futuro da sua aplicação.

Durante a escolha dos parâmetros, o objetivo principal foi manter o formato do reforço da raiz homogêneo, sem grande variação em sua geometria, durante a realização da soldagem do passe de raiz.

As características das amostras soldadas e selecionadas nesta etapa, com os respectivos parâmetros de soldagem e as macrografias estão na TAB B.1a e TAB B.1b TAB B.1c e os resultados das amostras de 26 a 53, na TAB B.2, essas tabelas encontram-se no APÊNDICE B - testes definitivos.

O mapeamento da soldagem unilateral mecanizada FCAW com *backing* cerâmico baseou-se na metodologia utilizada por Malin [2001]. Foram elaboradas as curvas de evolução dos efeitos das variáveis citadas anteriormente sobre o formato do passe de raiz, especificamente sobre a altura do reforço da raiz (h_{rr}) e a largura do reforço da raiz (w_{rr}).

Deve ser ressaltado que alguns pontos extrapolaram os valores da escala definida no gráfico, pois o formato produzido não foi caracterizado como um cordão de solda aplicável ou a solda foi interrompida, conforme mostrado na FIG 4.5. Desta forma, o trecho da curva, associado ao ponto da amostra correspondente, não foi inserido no gráfico.

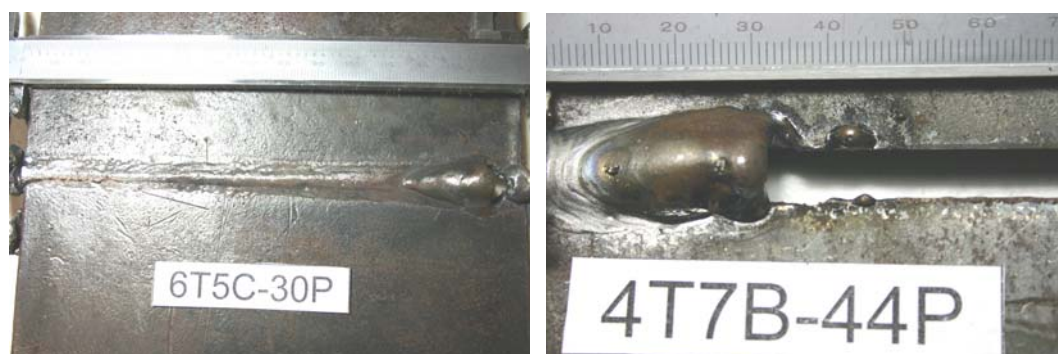





FIGURA 4.5– Amostras com solda do passe de raiz desqualificada. Excesso de reforço da raiz.

No estudo do efeito da corrente de soldagem sobre a altura do reforço da raiz (h_{rr}) e a largura do reforço da raiz (w_{rr}), foram usadas as amostras do grupo 6T5X-YP. Foram mantidos fixos os valores de $\beta = 60^\circ$, $RO = 5\text{mm}$ e $a = 15^\circ$. Os demais dados já são conhecidos e estão relacionados no início do capítulo 4.1. Os resultados das amostras selecionadas aparecem na TAB 4.1 e o respectivo gráfico encontra-se na FIG 4.6.

TABELA 4.1 – Resultados dos experimentos para as amostras do grupo 6T5X-YP.

Amostra Código	I (A)	V (V)	vs (cm/min)	$h_{rr}^{*(1)}$ (mm)	$w_{rr}^{*(1)}$ (mm)	HI (Kj/cm)	Fotografia do reforço da raiz
6T5A-27P	180	22	15	0,8	7,9	15,8	
6T5B-26P	215	26	20	1,0	9,0	16,8	
6T5C-30P *(2)	250	28	23	3,2	15,0	18,3	

Nota: *(1) Média aritmética de até 4 medidas, conforme FIG 3.8.

*(2) Solda da amostra 6T5C-30P foi considerada desqualificada.

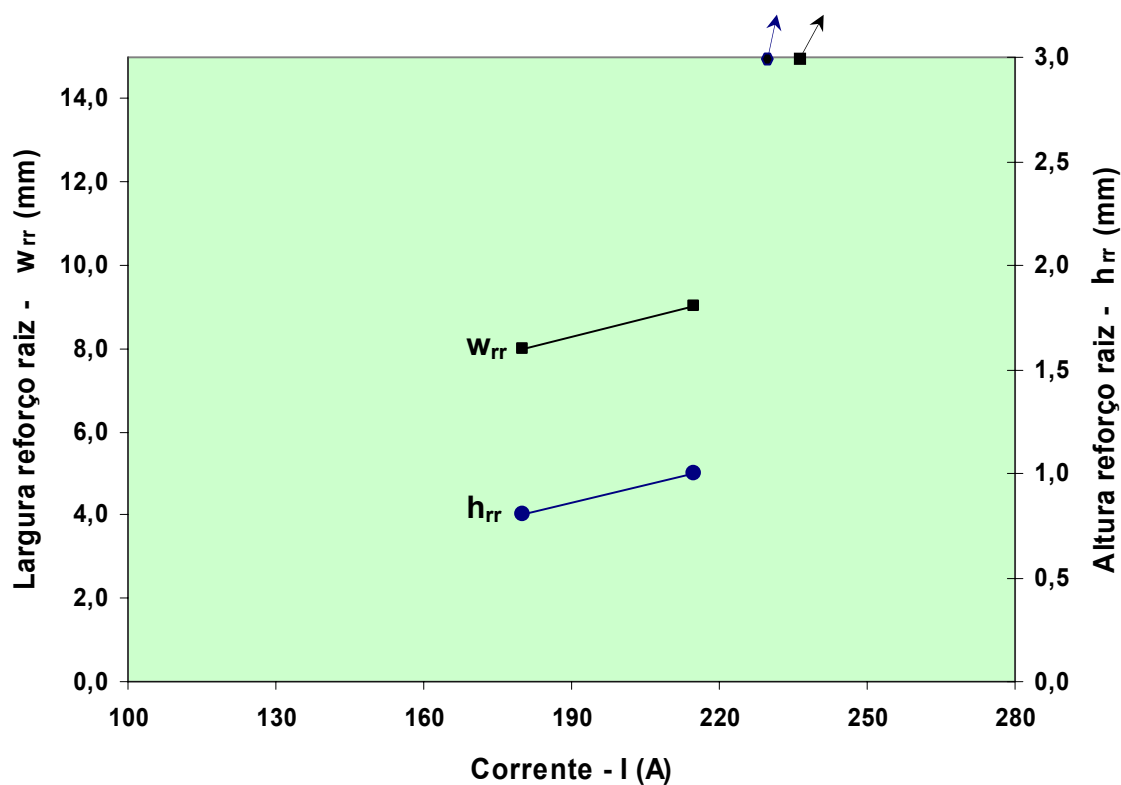


FIGURA 4.6 - Efeito da corrente de soldagem (I) na geometria do reforço do passe de raiz – largura (w_{rr}) e altura (h_{rr}): ângulo chanfro $\beta=60^\circ$, RO=5mm, $\alpha=15^\circ$. Amostras 6T5X.

Para este conjunto de amostras analisado, observa-se que o aumento da corrente propicia acréscimo da h_{rr} e w_{rr} . Tendência contrária foi encontrada na SAW, ou seja, o aumento da corrente deteriora a h_{rr} , Malin [2001]. Contudo com corrente na faixa $C = 250A$, o calor gerado aumenta e não é suportado pelo *backing* e nem dissipado pela junta, acarretando excesso de altura e largura do reforço da raiz, que significa cordão de solda descaracterizado. A corrente produz efeito na geometria da raiz, devido a sua influência na taxa de deposição e penetração do arco, Malin [2001]. A corrente elevada aumenta a taxa de deposição, que é excelente para melhorar a produtividade. Em contrapartida também aumenta a penetração do arco exigindo maior controle, evitando que a poça penetre em excesso, como aconteceu no experimento e mostrado na FIG 4.7. Vale a pena estudar o controle do aporte térmico, com alta corrente, e usufruir da maior produtividade.

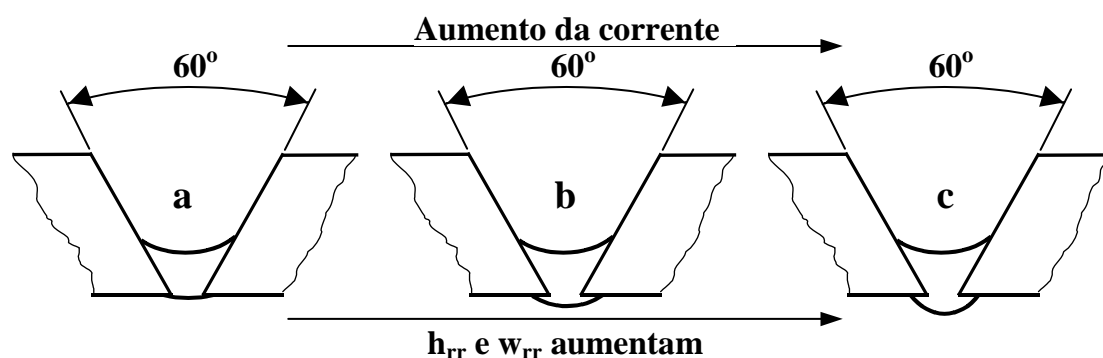

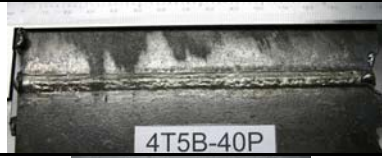



FIGURA 4.7 – Esquema do efeito da corrente de soldagem (I) na geometria do reforço do passe de raiz. Em **a, b e c** tem-se que $\beta = 60^\circ$ e $RO = 5\text{mm}$

Outra variável pesquisada foi a abertura de face da raiz (RO). As amostras usadas neste estudo pertencem ao grupo 4TWB-YP. Foram mantidos fixos o ângulo de abertura do chanfro tipo V ($\beta = 40^\circ$), a faixa de corrente ($I = 205\text{ A}$) e a inclinação da tocha ($\alpha = 15^\circ$). Os resultados estão apresentados na TAB 4.2 e FIG 4.8.

TABELA 4.2 – Resultados dos experimentos para as amostras do grupo 4TWB-YP.

Amostra Código	I (A)	V (V)	vs (cm/min)	$h_{rr}^{*(1)}$ (mm)	$w_{rr}^{*(1)}$ (mm)	HI (Kj/cm)	Fotografia do reforço da raiz
4T3B-53P	205	26	20	0,6	3,5	16,0	
4T5B-40P	210	26	20	0,9	7,0	16,4	
4T7B-44P ^{*(2)}	205	26	20	5,4	16,0	16,0	

Nota: ^{*(1)} Média aritmética de até 4 medidas, conforme FIG 3.8.

^{*(2)} Solda da amostra 4T7B-44P foi considerada desqualificada.

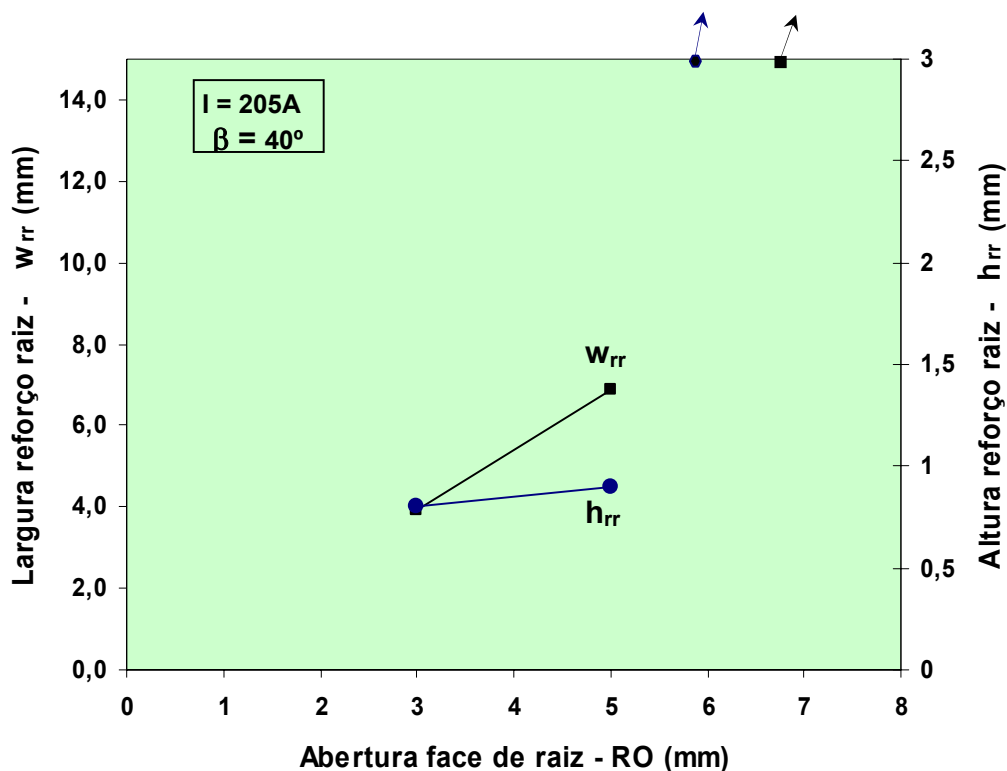


FIGURA 4.8 – Efeito da Abertura da face de raiz (RO) na geometria do reforço do passe de raiz – largura (w_{rr}) e altura (h_{rr}): chanfro tipo V ($\beta=40^\circ$), $a=15^\circ$, amostras 4TWB

Observa-se que a altura e largura do reforço da raiz tendem a aumentar com o aumento da abertura (RO), como era esperado e também verificado no trabalho de Malin [2001]. Contudo quando alcança valores altos, relativos à espessura da chapa soldada, afeta o passe de raiz, comprometendo sua formação. Tal observação é semelhante ao aumento de corrente. A ponderação neste caso é que, com o aporte térmico fornecido, o metal de solda não se funde suficientemente na junta e se concentra no *backing* cerâmico, que acaba não suportando o volume de metal depositado e levando ao excesso de altura, conforme o esquema da FIG 4.9. O equilíbrio entre estabilidade de arco e da poça e formação da raiz apresentou melhores resultados para uma abertura de face de raiz de 5 mm. A observação anterior é também aplicável para ângulo de chanfro (β) de 60° (amostras 6TWX), conforme está indicado nas TAB B.1 a-c e que encontram-se no APÊNDICE B,

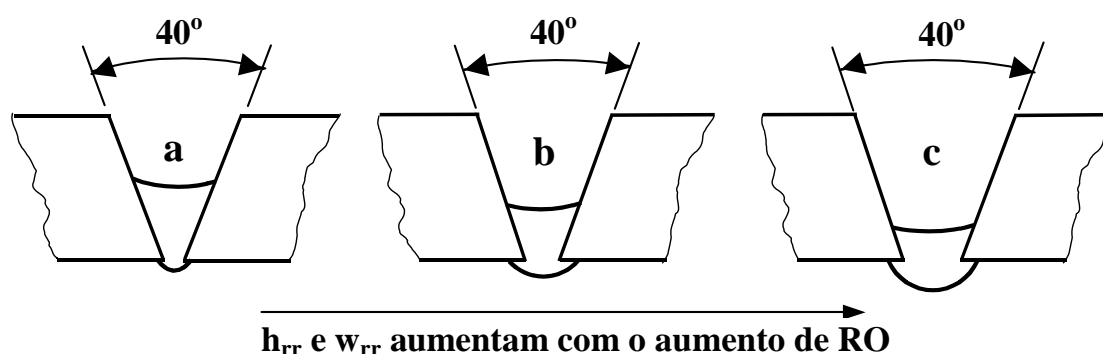








FIGURA 4.9 – Esquema do efeito da abertura da face de raiz (**RO**), para mesmo ângulo de chanfro ($\beta=40^\circ$), na geometria do reforço do passe de raiz. As medidas de RO em **a** = 3, **b** = 5 e **c** = 7mm.

Analisou-se a inclinação da tocha em relação à direção de soldagem (**a**) e a influência na geometria do reforço da raiz (h_{rr} e w_{rr}), sendo que as amostras usadas neste estudo foram do grupo 6T5X-YP e 6T5X-YE. Foram mantidos fixos o valor de $\beta= 60^\circ$ e **RO** = 5 mm, enquanto variou-se a corrente de 180 A a 250 A. Os resultados das amostras selecionadas apresentam-se na TAB 4.3.

TABELA 4.3 – Resultados dos experimentos para as amostras do grupo 6T5X-YP e 6T5X-YE

Amostra Código	I (A)	V (V)	vs (cm/min)	$h_{rr}^{*(1)}$ (mm)	$w_{rr}^{*(1)}$ (mm)	HI (Kj/cm)	Fotografia do reforço da raiz
6T5A-27P	180	22	15	0,8	7,9	15,8	
6T5B-26P	215	26	20	1,0	9,0	16,8	
6T5C-30P ^{*(2)}	250	28	23	3,2	15,0	18,3	
6T5A-16E	182	24	14	0,7	11,5	18,7	
6T5B-29E	215	26	20	0,7	10,1	16,8	
6T5C-20E	270	29	25	0,3	8,8	18,8	

Nota: ^{*(1)} Média aritmética de até 4 medidas, conforme FIG 3.8.

^{*(2)} Solda da amostra 6T5C-30P foi considerada desqualificada.

Com os resultados da TAB 4.3 foi elaborado o gráfico mostrado na FIG 4.10.

Observa-se que, para $\alpha = 15^\circ$, a inclinação da curva é positiva, indicando tendência de aumento dos valores de h_{rr} e w_{rr} em sintonia com o aumento da corrente e mais uma vez a soldagem progride para a interrupção ou descaracterização com a corrente regulada na faixa de 250A. Para $\alpha = -15^\circ$, a curva tem inclinação negativa, indicando decréscimo da altura e largura do reforço da raiz com o aumento da corrente.

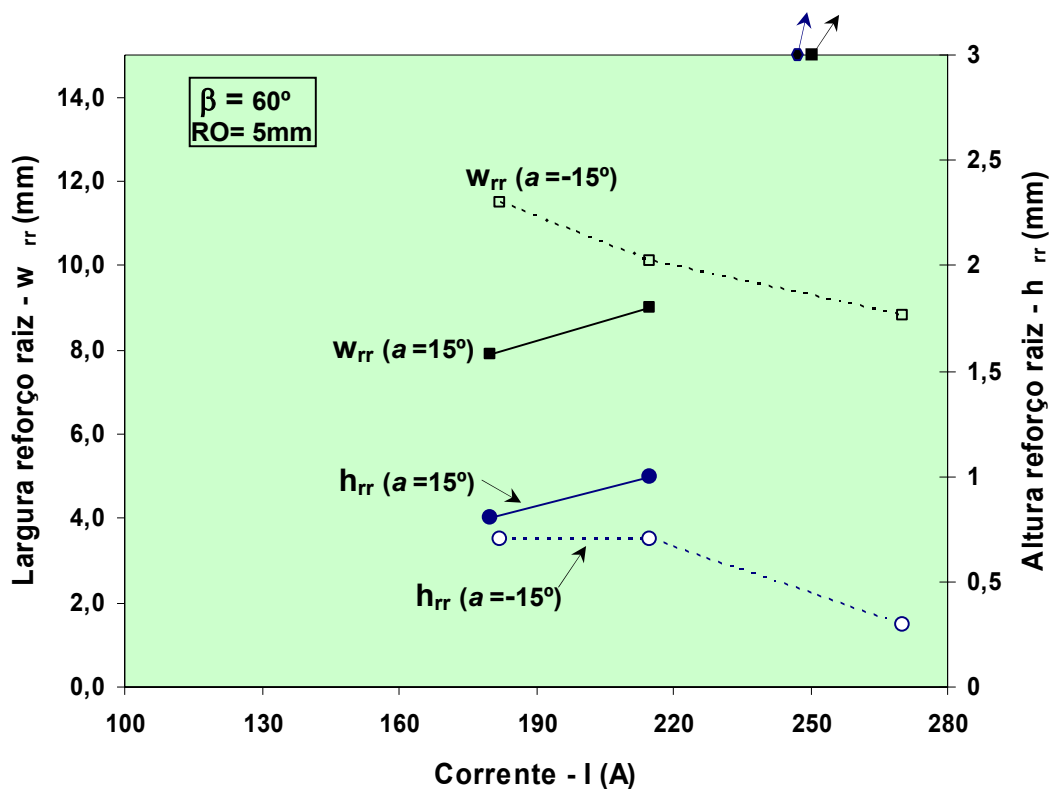


FIGURA 4.10 – Efeito da inclinação da tocha (a) na geometria do reforço da raiz – largura (w_{rr}) e altura (h_{rr}): chanfro tipo V ($\beta=60^\circ$), RO=5mm. Amostras 6T5X-YP e 6T5X-YE

Observa-se ainda que, numa mesma faixa de corrente, a altura h_{rr} tende a aumentar para a inclinação da tocha na situação em que $a = 15^\circ$ denominada puxando, conforme mostrado na FIG 4.11. Neste trabalho esta foi a inclinação que apresentou melhores resultados para a soldagem mecanizada.

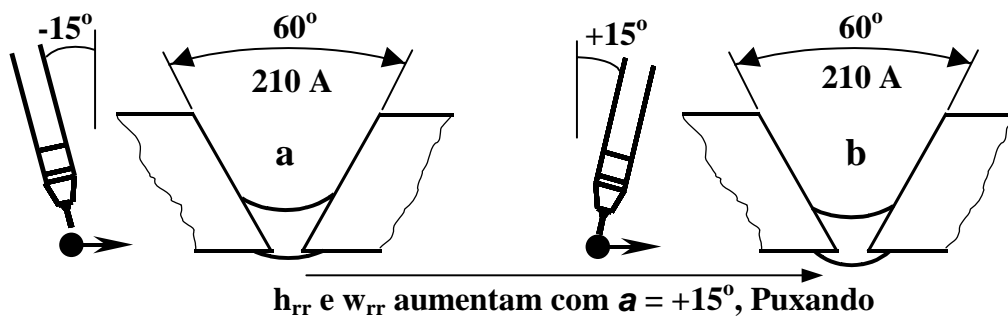








FIGURA 4.11 – Esquema do efeito da inclinação da tocha (a) na geometria do reforço do passe de raiz. Em **a** e **b** tem-se RO = 5mm, $\beta=60^\circ$ e corrente I = 210 A.

Observou-se também a influência sobre a geometria do reforço da raiz (h_{rr} e w_{rr}), do ângulo de abertura da junta de topo com chanfro tipo V (β). As amostras usadas neste estudo foram do grupo 4T5X-YP e 6T5X-YP. A abertura da face da raiz, $RO= 5\text{mm}$ e a inclinação da tocha, $\alpha = 15^\circ$ foram mantidas constantes e a corrente (I) usada nas três faixas já conhecidas. Os resultados das amostras selecionadas estão apresentados na TAB 4.4 e gráfico respectivo na FIG 4.12.

TABELA 4.4 – Resultados dos experimentos para as amostras do grupo 4T5X-YP e 6T5X-YP.

Amostra Código	I (A)	V (V)	vs (cm/min)	$h_{rr}^{*(1)}$ (mm)	$w_{rr}^{*(1)}$ (mm)	HI (Kj/cm)	Fotografia do reforço da raiz
6T5A-27P	180	22	15	0,8	7,9	15,8	
6T5B-26P	215	26	20	1,0	9,0	16,8	
6T5C-30P ^{*(2)}	250	28	23	3,2	15,0	18,3	
4T5A-51P	170	22	15	1,1	8,1	14,5	
4T5B-40P	210	26	20	0,9	6,9	16,4	
4T5C-52P	235	29	23	1,1	7,5	17,8	

* (1) Média aritmética de até 4 medidas, conforme FIG 3.8.

* (2) Solda da amostra 6T5C-30P foi considerada desqualificada.

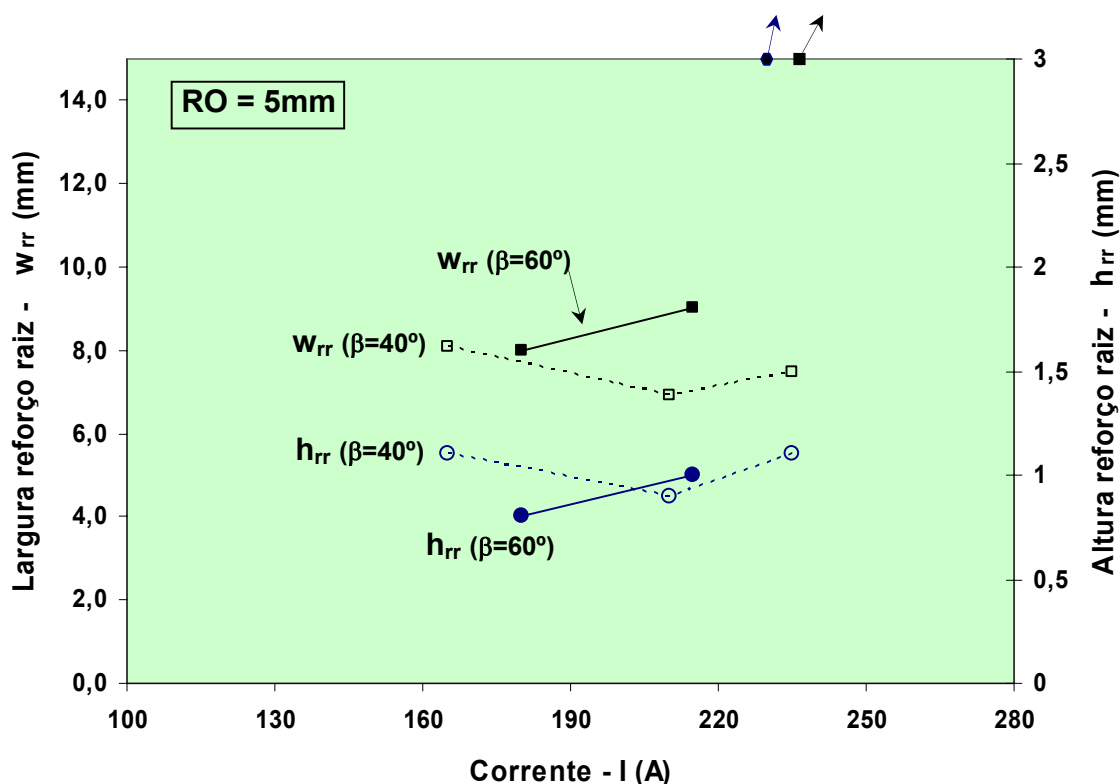


FIGURA 4.12 – Efeito da abertura do ângulo de chanfro tipo V ($\beta = 40^\circ$ e 60°), na geometria do reforço da raiz – largura (w_{rr}) e altura (h_{rr}): $RO=5\text{mm}$, $a = 15^\circ$. Amostras 4T5X-YP e 6T5X-YP.

A tendência é que o ângulo $\beta = 60^\circ$ propicie valores de h_{rr} e de w_{rr} maiores do que no $\beta = 40^\circ$. Ocorre que um ângulo maior tende a fundir mais a borda da raiz, Malin [2001]. A dissipação de calor é maior em ângulos maiores, proporcionando maior penetração lateral na junta. O aumento da corrente, a partir da faixa B de 210 A, leva ao aumento do reforço, h_{rr} e w_{rr} , como mostrado na FIG 4.13.

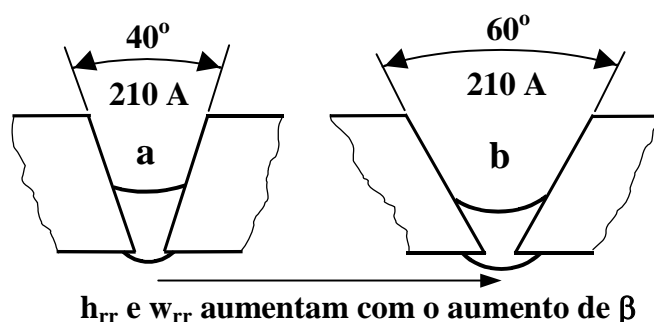


FIGURA 4.13 – Esquema do efeito do ângulo chanfro (β) no reforço da raiz. Em **a** e **b** tem-se que $RO = 5\text{mm}$ e a corrente na faixa de $I = 210\text{ A}$.

Com a corrente na faixa de 180 A, a força de penetração do arco é reduzida e a dissipação de calor menor, no ângulo $\beta = 40^\circ$, tende a provocar a concentração do metal de solda da poça no *backing* cerâmico, formando um reforço com h_{rr} maior que no ângulo $\beta = 60^\circ$, contrariando a tendência inicial.

A grande dificuldade encontrada na soldagem unilateral mecanizada com o processo FCAW é manter a incidência do arame na poça de fusão. Esta dificuldade é muitas vezes superada, no processo semi-automático quando a tocha é conduzida pelo soldador, pois se utiliza da habilidade manual para o ajuste da incidência do arame sempre na poça de fusão, ou às vezes na própria chapa, o qual retorna imediatamente à poça de fusão, não permitindo a extinção do arco.

Entretanto, no processo mecanizado, a dificuldade de manter o arco elétrico estável reside no fato de que, se a velocidade for acima da ideal, para determinado conjunto de parâmetros corrente e tensão, o arame incidirá sobre o *backing* cerâmico, que não conduz eletricidade/corrente, e conseqüentemente o arco torna-se instável vindo a extinguir-se. Por outro lado, se a velocidade estiver abaixo da ideal, a poça de fusão não será suportada pelo *backing* e formará o reforço da raiz com um volume de metal elevado, desproporcional às dimensões da junta, levando à descontinuidade da soldagem ou à formação do cordão de solda disforme. A principal causa deste volume excessivo de metal da poça de fusão é o aporte térmico desequilibrado.

Como visto anteriormente, o ângulo do chanfro tipo V no valor de 30° não produziu uma solda de qualidade. A abertura da face da raiz intermediária ($RO = 5\text{mm}$) tende a equilibrar os efeitos, sem contudo produzir um passe de raiz com acabamento aceitável. Seria importante e muito vantajoso viabilizar a aplicação do ângulo de 30° , principalmente devido à redução substancial do volume de metal de solda depositado. Talvez um estudo futuro deste ângulo para a soldagem FCAW manual mostre alternativas que possam superar os obstáculos encontrados na soldagem mecanizada.

Observou-se que a inclinação da tocha $\alpha = 15^\circ$, em relação à direção de soldagem, apresentou melhores resultados com relação ao reforço da raiz, como apresentado nas figuras anteriores. Além disso, proporcionou um melhor controle da estabilidade do arco em conjunto com o controle da incidência do arame na poça de fusão. Foram preparadas amostras com $\alpha = 0^\circ$ com o objetivo de analisar o comportamento para eventuais aplicações em campo. Observou-se que, em algumas situações, com $\alpha = 0^\circ$ tende a ter o mesmo comportamento de quando a tocha atua com $\alpha = 15^\circ$, por isso é recomendado seu uso em aplicação que exija esta inclinação de tocha.

Na soldagem manual, o soldador varia o ângulo de soldagem, para ajustar a poça de acordo com as condições impostas pela junta, o que não ocorre com o robô [Soraggi, 2004]. Para melhorar a incidência do arame na poça de fusão, recomenda-se o uso de um recurso disponível nos robôs, o tecimento da tocha durante o deslocamento, conforme abordado na FIG 2.21 do capítulo 2.4.1. O tecimento produz a oscilação da tocha, fazendo o arame incidir com frequência na lateral da junta metálica, evitando a interrupção do arco por falta de condução da corrente elétrica, no caso do arame incidir só no *backing* cerâmico. Este recurso de tecimento nem sempre está disponível nos sistemas de soldagem mecanizados. O Presente trabalho mostrou que é possível a soldagem unilateral mecanizada FCAW com *backing* cerâmico, com o uso de dispositivos mais simples na condução da tocha, produzindo solda de qualidade.

Na soldagem unilateral, percebe-se percebida a importância de tomar alguns cuidados na preparação da junta. Toda a literatura específica de soldagem com *backing* cerâmico consultada, Cantrell [1982], Muir[1985], Solingen [1996], Millar[2000] e Malin[2001], citam a importância do alinhamento da junta, da permissão de pequena variação na abertura e na altura da face de raiz, da centralização do *backing* cerâmico em relação à abertura da raiz e da perfeita aderência na chapa.

O resultado do acabamento superficial e o formato do passe de raiz foram considerados adequados, em todas as soldas analisadas, mesmo com o reforço da raiz irregular. Este acabamento é encontrado normalmente nos cordões de solda produzidos com o processo FCAW arame ER71T-1, independente da soldagem com ou sem *backing* cerâmico. Esta característica é muito importante na soldagem com penetração total realizada com múltiplos passes, pois facilita os próximos passes de enchimento e acabamento, contribuindo para a solda de qualidade e com integridade mecânica. A FIG 4.14 apresenta amostras com o acabamento da superfície do passe de raiz e respectivo reforço da raiz irregular.



FIGURA 4.14 – Fotografia aspecto visual do acabamento da superfície do passe de raiz (esquerda) e respectivo reforço (direita). Amostras 6T3B-10E e 6T3B-11E.

As amostras soldadas com os parâmetros na faixa de: $I = 205 \text{ A}$, $V = 26 \text{ V}$, $vs = 20 \text{ cm/min}$ (aporte térmico de 16 KJ/cm), $RO = 3$ e 5 mm e $\beta = 40^\circ$ e 60° , foram as que apresentaram melhor controle da soldagem com estabilidade de arco, incidência do arame na poça de fusão constante, volume de metal depositado na formação do reforço da raiz constante e arco aberto em toda a extensão do cordão, dimensões da geometria do reforço como altura e largura e acabamento do reforço da raiz satisfatórios.

5. CONCLUSÃO

Ancorado nos resultados obtidos e observações realizadas neste trabalho, na soldagem unilateral mecanizada com o processo arame tubular com proteção gasosa no passe raiz em posição plana, pôde-se concluir que:

- Dentre as variáveis envolvidas no estudo, o conjunto formado pela corrente, tensão e velocidade de soldagem, equilibrado na composição do aporte térmico, tem forte influência na geometria do reforço do passe de raiz;
- A soldagem mecanizada exige mais controle dos parâmetros aplicados do que a soldagem manual, inclusive nas soldas unilaterais com o *backing* cerâmico;
- A preparação da junta é fundamental para a realização da soldagem com qualidade, principalmente o alinhamento da junta e a uniformidade da abertura e altura de face da raiz.
- A melhor faixa de abertura de face da raiz para a espessura de 12,7mm, utilizada neste trabalho, foi de 3 a 5 mm, para ângulo de chanfro de 40° e 60°;
- A inclinação da tocha em relação à direção de soldagem usada neste trabalho, que propiciou melhor controle do arco, foi para o valor de $\alpha = 15^\circ$ (puxando);
- Para os experimentos realizados, a faixa de parâmetros que melhor desempenhou a soldagem foi $I = 205$ A, $V = 26$ V, $v_s = 20$ cm/min (aporte térmico de 16 KJ/cm), $RO = 3$ e 5 mm e $\beta = 40^\circ$ e 60°;
- É fundamental o controle de incidência do arame na poça de fusão, para manter o arco estável e o domínio da formação da poça no *backing* cerâmico;
- O acabamento da superfície do passe de raiz é inerente ao processo FCAW, não dependendo da característica do reforço, que é influenciada pelo *backing* cerâmico.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se:

- Avaliar o comportamento da soldagem unilateral MCAW (*Metal Cored Arc Welding*) mecanizada com *backing* cerâmico, explorando a característica de maior taxa de deposição que os arames tubular e sólido;
- Avaliar o comportamento da soldagem unilateral FCAW mecanizada com *backing* cerâmico utilizando o recurso de tecimento, disponível em sistemas mecanizados, como robô;
- Avaliar o comportamento da soldagem unilateral FCAW mecanizada com *backing* cerâmico nas posições horizontal e vertical;
- Dar seqüência aos experimentos ocorridos neste trabalho, realizando o preenchimento total da junta soldada, para avaliar a integridade mecânica da soldagem unilateral FCAW mecanizada com penetração total;
- Avaliar o comportamento de diferentes tipos de *backing* cerâmico, variando dimensões e formato de sulco, na soldagem unilateral FCAW mecanizada;
- Avaliar o efeito do *backing* cerâmico na microestrutura do cordão de solda.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BRACARENSE, A.Q. et al (2004), “*Avaliação da velocidade de fusão de arames tubulares*”, Soldagem & Inspeção ano 9 No.1, março.

CANTRELL, ROGER E. (1982), “*Ceramic weld backing evaluation*”, Welding Journal, vol. 61 pp.27-34, march..

DUTRA, J.C.; SCHNEIDER, C.A. e OLLÉ, L.F. (1987), “*Banco de Ensaio para Estudo e Automação do Processo de Soldagem MIG / MAG*”, anais 13^o ENTS.

ESAB (2007), “*Relatório Anual 2006*”, Charter plc grupo ESAB, pp.11, march

FOLHA DE PERNAMBUCO (2007), “*Terreno para estaleiro é vendido por R\$ 10,2 mi*”, reportagem do jornal, maio

GASMASTER 1 (1999), “*Introdução à Soldagem*”, apostila WHITE MARTINS, mód 3, cap.1, 29p.

GASMASTER 2 (1999), “*Soldagem com Arame Tubular*”, apostila WHITE MARTINS, mód 4, cap.2, 19p.

HAHN, H. (2004), “*Low-tech system mechanizes pipe welding: Backing device allows GMAW on open root*”, TJP- The Tube & Pipe Journal, march.

HENDERSON, S. (1987), “*Engineering Ceramics Welding*”, Welding & Metal fabrication, vol. 55 pp. 272-273, aug-set.

HYUNDAI, HANDBOOK WIRE, (2000), “*FCAW SF71*”, Hyundai Corporation,

JORNAL GAZETA MERCANTIL (2007), “*Programa da TRANSPETRO poderá alavancar o setor naval*”, abril.

KATBAK, FOLHETO TÉCNICO (2005), “*Ceramic Weld Backing*” – KATBAK, Gullco International,

KEMPPI (2007), “*Material de Treinamento FastMIG™ sinérgico-V1*”, KEMPPI slide 150-151, feb.

LIMA, P. T.; BERTRAN, C. A.; THIM, G.P. (1998), “*Rotas de Síntese e a Homogeneidade dos Precursores de Mullita e Cordierita*”, Unicamp, IQ,

MACEDO, W. A. E PEREIRA, L. (1985), “*Estudo para Implantação de Soldagem Unilateral ao Arco Submerso*”, anais 11^o ENTS,

MALIN, V. (2001), “*Root Weld Formation in Modified Refractory Flux One-Sided Welding: part 1 – Effect of Welding Variables*, Welding journal, vol. 80 pp. 217s-226s, e *part 2 – Effect of Joint Geometry*, Welding journal, vol. 80 pp. 227s-237s, September.

MARQUES, P.V. (coord.); MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q.; (2007), “*SOLDAGEM Fundamentos e Tecnologia*”, 2^a. ed., UFMG, Cap. 10, pp.-233-262.

MILLAR, D.W. (2000), *Welding automation in Japanese shipbuilding*, Welding & Metal fabrication, vol. 68 pp 8-10, mar.

MUIR, J. (1985), *Single side panel welding with ceramic tile backing*, Metal Construction , vol. ?? p.651-653, October

MÜLLER, R. E KOCZERA, S. (2003), *Shipyard uses laser-GMAW hybrid welding to achieve one-sided welding*, The fabricator, nov.

OLIVEIRA, J. E. M. (2002), *Estudo dos parâmetros para soldagem fora de posição com arame tubular*, Dissertação de mestrado, UFMG-PPGEM, março, 101p.

PAULA, A.G.G. (1987), *Influência da utilização dos processos de soldagem SMAW, GMAW, FCAW e SAW, no custo e no prazo de fabricação de estruturas metálicas*, anais 13^o ENTS,.

SILVA, E.M. (2006), “*Comparação de características operacionais no processo com eletrodo tubular utilizando as transferências por curto-circuito e pulsado na posição vertical descendente*”, Dissertação de mestrado UNIFEI, dezembro, 109p.

SOLINGEN, F.T. (1996), “*Aplication of ceramic backing in arc welding*”, Welding & Cutting , vol. 48 pp. 246-248, dez

SORAGGI, C.C. (2004), “*Estudo paramétrico para robotização da soldagem orbital de tubos com arame tubular*”, Dissertação de mestrado, UFMG, 76p., julho

STARLING, M.D.S.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q.; GUIMARÃES, A.F. (2004), “*Avaliação da Velocidade de Fusão de Arames Tubulares*”, Soldagem & Inspeção, ano 9, n^o1, pp.31-37, março.

TARDEI, G., GAVRILIU, G. E HAGIOPOL, M. (2004), “*Ceramic backing materials used in one-side welding methods*”, Key Engineering Materials vols 264-268 pp 671-674,

TAYLOR, A. (2002), *Ceramics - materials, joining and applications*, article TWI.

TERMARI, FOLHETO TÉCNICO (2006), "*Backing Cerâmico Dimensões e Aplicações*", Termari Comercial.

VALOR ECONÔMICO (2007), "*Vale assume a MBR e encomenda graneleiros*", *artigo do jornal* - seção empresas, maio.

WHITE MARTINS - FISPQ (2003), "*Dióxido de Carbono gasoso, Folha informações de segurança de produtos químicos*", WHITE MARTINS.

APÊNDICE A – TESTES PRELIMINARES

TABELA A.1a – Seqüência com parâmetros de corrente(I), tensão (V) e velocidade de soldagem (vs), aspecto visual e macrografia do passe de raiz.. Testes preliminares. Amostras de 1 a 10






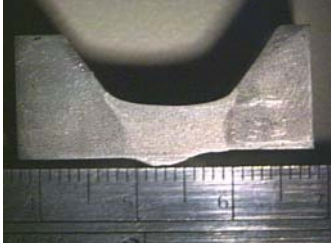

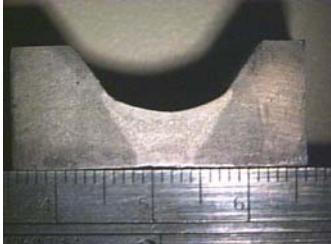


I (A)	V (V)	vs (cm/ min)	HI (Kj/ cm)	Reforço do passe de raiz	Macrografia do passe de raiz	Qualidade e observações
192	26	20	15,0			Solda irregular. Volume reforço raiz crescente. Rebaixamento lateral do reforço. Perda parcial do arco em 110mm
190	24	20	13,7			Solda irregular. Volume reforço raiz crescente. Rebaixamento lateral do reforço. Perda parcial do arco em 100mm
200	25	18	16,7			Solda irregular. Volume reforço raiz constante. Rebaixamento lateral do reforço. Arco estável
205	25	16	19,2			Solda irregular. Volume reforço raiz constante. Altura insuficiente do reforço da raiz. Arco estável
195	25	16	18,3			Solda irregular. Volume reforço raiz constante. Falta de fusão lateral reforço. Arco estável

TABELA A.1b – Seqüência com parâmetros de corrente(I), tensão (V) e velocidade de soldagem (vs), aspecto visual e macrografia do passe de raiz.. Testes preliminares. Amostras de 11 a 20.




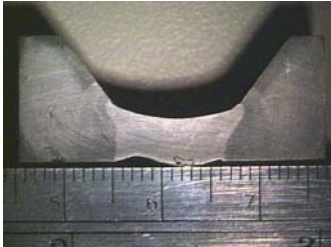





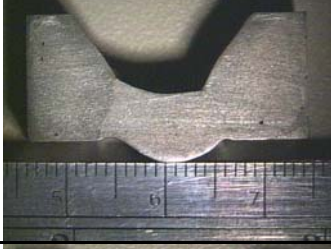


I (A)	V (V)	vs (cm/min)	HI (Kj/cm)	Reforço do passe de raiz	Macrografia do passe de raiz	Qualidade e observações
210	26	16	20,5	 6T7B-13E		Solda irregular. Volume reforço raiz constante. Rebaixamento lateral e Altura insuficiente do reforço da raiz. Arco estável
197	24	16	17,7	 6T3B-15E		Solda irregular. Volume reforço raiz constante. Rebaixamento lateral e Altura insuficiente do reforço da raiz. Arco estável
182	24	13	20,2	 6T5A-16E		Solda irregular. Volume reforço raiz constante. Rebaixamento lateral e acabamento ruim do reforço da raiz. Arco estável
189	24	10	27,2	 6T5A-17E		Solda irregular. Volume reforço raiz constante. Rebaixamento lateral e acabamento ruim do reforço da raiz. Arco estável
235	29	25	16,4	 6T5C-19P		Solda irregular. Volume reforço raiz constante. Rebaixamento lateral do reforço da raiz. Arco estável
270	29	25	18,8	 6T5C-20E		Solda irregular. Volume reforço raiz constante. Altura do reforço da raiz fazendo a chapa. Arco estável

TABELA A.2 – Seqüência com parâmetros de corrente(I), tensão (V) e velocidade de soldagem (vs), largura (w_{rr}) e altura (h_{rr}). Testes preliminares. Amostras de 1 a 25.

Amostra	I (A)	V (V)	vs (cm/min)	Altura reforço (mm)				Largura Reforço (mm)			
				Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4
6T5B 1E	x	x	x	Descartada a amostra				Descartada a amostra			
6T5B 2E	192	26	20	0,0	0,1	0,6	2,0	9,0	12,0	13,0	
6T5B 3E	190	24	20	0,0	1,0	2,0		6,0	10,0	15,0	
6T5B 4E	192	24	20	Descartada a amostra				Descartada a amostra			
6T5B 5E	200	25	20	0,6	0,2	1,1		9,0	12,0	14,0	
6T5B 6E	200	25	18	0,5	0,5	0,2	0,0	10,6	10,0	10,0	10,0
6T5B 7E	195	25	16	0,2	0,2	0,3	0,3	10,0	9,5	10,5	10,5
6T5B 8E	200	25	16	0,4	0,7	0,7	0,4	9,0	9,0	9,2	9,8
6T3B 9E	205	25	16	-0,3	-0,4	-0,2	-0,2	6,0	5,8	5,7	5,6
6T3B 10E	195	25	16	-	-	-	-	-	-	-	-
6T3B 11E	205	25	16	-	-	-	-	-	-	-	-
6T3B 12E	210	26	16	-	-	-	-	-	-	-	-
6T7B 13E	210	26	16	0,4	0,5	0,3	0,2	12,5	11,5	11,0	10,0
6T7B 14E	200	25	16	0,5	0,4	0,4	0,4	10,0	11,0	10,0	13,0
6T3B 15E	197	24	16	0,5	0,8	0,7	0,8	10,0	10,3	10,0	10,0
6T5A 16E	182	24	13	1,0	0,9	0,5	0,5	11,0	12,0	12,0	11,0
6T5A 17E	189	24	10	0,8	0,5	0,8	0,1	10,0	11,0	11,0	7,0
6T5C 18P	250	29	21	7,0	4,0	-	-	18,0	12,0	-	-
6T5C 19P	235	29	25	3,0	2,5	2,0	-	14,0	13,0	15,0	-
6T5C 20E	270	29	25	0,6	0,2	0,2	0,1	8,0	8,0	9,0	10,0
6T5C 21P	250	29	30	-	-	-	-	-	-	-	-
6T5B 22P	200	26	25	-	-	-	-	-	-	-	-
6T5B 23P	228	28	25	-	-	-	-	-	-	-	-
6T5C 24P	270	29	30	-	-	-	-	-	-	-	-
6T5B 25P	210	26	25	1,0	1,0	-	-	9,0	13,0	-	-

APÊNDICE B – TESTES DEFINITIVOS

TABELA B.1a – Seqüência com parâmetros de corrente(I), tensão (V) e velocidade de soldagem (vs), aspecto visual e macrografia do passe de raiz.. Testes definitivos. Amostras de 26 A 31.


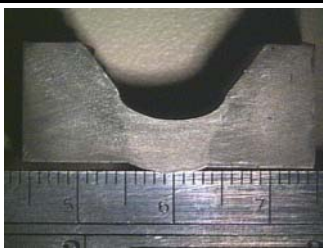

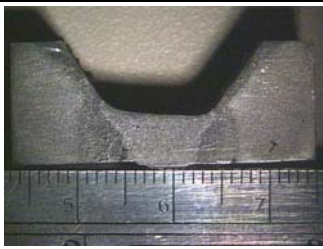

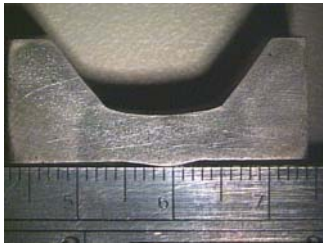

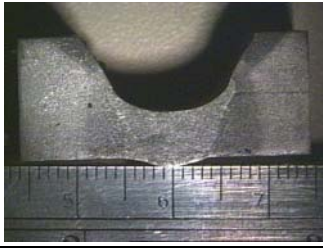

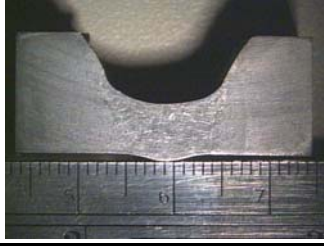
I (A)	V (V)	vs (cm/ min)	HI (Kj/ cm)	Reforço do passe de raiz	Macrografia do passe de raiz	Qualidade e observações
215	26	20	16,8	 6T5B-26P		Solda boa. Volume reforço pouco irregular Altura do reforço da raiz suficiente. Arco estável
180	22	15	15,8	 6T5A - 27P		Solda boa. Volume reforço constante. Altura do reforço da raiz suficiente. Arco estável
215	26	20	16,8	 6T5B-29E		Solda boa. Volume reforço constante. Altura do reforço da raiz suficiente. Arco estável
250	28	23	18,3	 6T5C-30P		Solda boa. Volume reforço crescente. Excesso altura do reforço da raiz no final do cordão. Arco estável
250	28	23	18,3	 6T5C-31N		Solda boa. Volume reforço constante. Altura do reforço da raiz suficiente. Arco estável

TABELA B.1b – Seqüência com parâmetros de corrente(I), tensão (V) e velocidade de soldagem (vs), aspecto visual e macrografia do passe de raiz.. Testes definitivos. Amostras de 32 a 46.


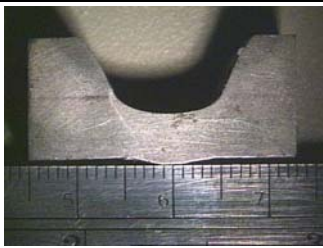

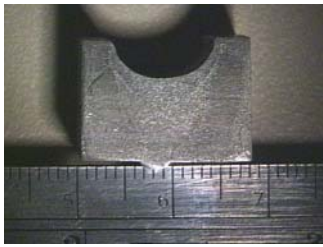

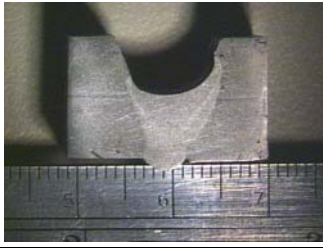

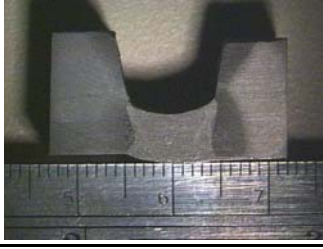




I (A)	V (V)	vs (cm/min)	HI (Kj/cm)	Reforço do passe de raiz	Macrografia do passe de raiz	Qualidade e observações
213	26	20	16,6	 6T5B-32N		Solda boa. Volume reforço constante. Altura do reforço da raiz suficiente. Arco estável
260	28	23	19,0	 3T3C-34P		Solda irregular. Volume reforço constante. Junta restrita formação irregular do reforço da raiz . Arco estável
220	26	20	17,2	 3T3B-35P		Solda irregular. Volume reforço constante. Junta restrita formação irregular do reforço da raiz . Arco estável
170	22	15	15,0	 3T7A-37P		Solda irregular. Volume crescente. Altura com tendência ao excesso e perda do arco. Arco estável
215	26	20	16,8	 3T5B-38P		Solda regular. Volume reforço constante. Dimensões do reforço da raiz satisfatório. Arco estável
210	26	20	16,4	 4T5B-40P		Solda boa. Volume reforço constante. Dimensões e acabamento do reforço da raiz, satisfatórios. Arco estável

TABELA B.1c – Seqüência com parâmetros de corrente(I), tensão (V) e velocidade de soldagem (vs), aspecto visual e macrografia do passe de raiz.. Testes definitivos. Amostras de 47 a 53.










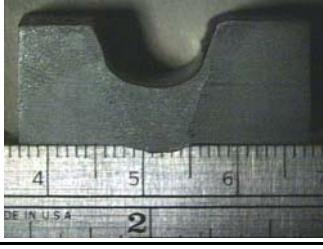


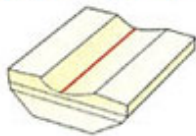
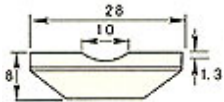
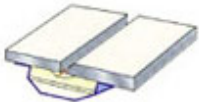
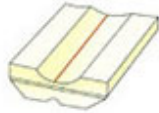
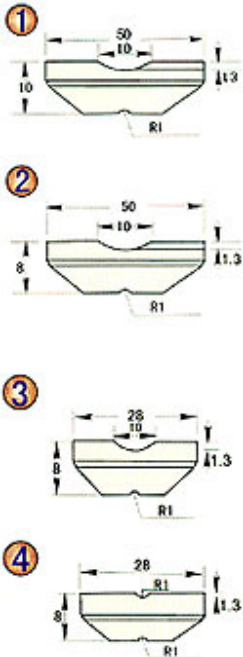
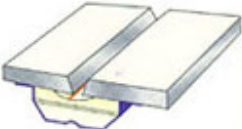
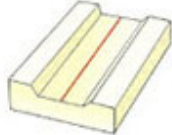
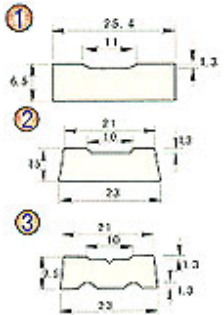
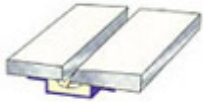
I (A)	V (V)	Vs (cm/min)	HI (Kj/cm)	Reforço do passe de raiz	Macrografia do passe de raiz	Qualidade e observações
203	26	20	15,8			Solda boa. Volume reforço constante. Dimensões e acabamento do reforço da raiz, satisfatórios. Arco estável
170	22	15	15,0			Solda irregular. Volume reforço raiz crescente. Rebaixamento lateral reforço. Perda parcial arco em 80mm e definitivo em 100mm
237	29	21	19,6			Solda irregular. Volume reforço crescente. Excesso de altura do reforço até a perda do arco em 80mm. Arco estável
170	22	15	15,0			Solda boa. Volume reforço constante. Dimensões e acabamento do reforço da raiz, satisfatórios. Arco estável
235	29	23	17,8			Solda boa. Volume reforço constante. Dimensões e acabamento do reforço da raiz, satisfatórios. Arco estável
205	26	20	16,0			Solda boa. Volume reforço início um pouco irregular. Dimensões e acabamento do reforço da raiz, satisfatórios. Arco estável

TABELA B.2 – Seqüência com parâmetros de corrente(I), tensão (V) e velocidade de soldagem (vs), largura (w_{rr}) e altura (h_{rr}). Testes definitivos. Amostras de 26 a 53.

Amostra	I (A)	V (V)	vs (cm/min)	Altura reforço (mm)				Largura Reforço (mm)			
				Medida 1	Medida 1	Medida 1	Medida 1	Medida 1	Medida 1	Medida 1	Medida 1
6T5B 26P	215	26	20	1,1	1,0	1,1	1,0	10,0	9,0	7,0	8,0
6T5A 27P	180	22	15	0,8	0,8	0,9	0,8	9,0	8,0	7,0	7,5
6T5C 28P	x	x	x	Descartada a amostra				Descartada a amostra			
6T5B 29E	215	26	20	0,6	0,7	0,5	0,8	8,7	9,2	8,6	9,0
6T5C 30P	250	22	15	1,0	1,2	1,3	6	8,0	9,0	12,0	16
6T5C 31N	250	28	23	1,2	0,9	0,8	1,3	9,4	9,0	10,0	11,0
6T5B 32N	213	26	20	0,7	0,9	0,8	1,2	8,8	8,6	9,0	11,0
3T7C 33P	240	28	23	Descartada a amostra				Descartada a amostra			
3T3C 34P	260	28	23	1,3	1,2	0,7	0,7	4,0	3,5	3,5	4,0
3T3B 35P	220	26	20	0,5	0,8	0,9	1,0	4,5	4,5	4,5	4,5
3T3B 36P	210	26	20	1,0	5,0	-	-	14,0	11,0	-	-
3T7A 37P	170	22	15	0,4	0,7	1,0	1,4	9,0	9,0	11,0	12,0
3T5B 38P	215	26	20	0,4	0,6	0,9	1,2	5,9	6,5	6,0	6,6
3T5B 39N	215	26	20	0,6	0,5	0,6	1,0	7,0	6,2	6,0	7,2
4T5B 40P	210	26	20	0,9	0,8	0,9	0,9	7,2	6,8	6,7	7,0
4T5B 41N	X	X	20	Descartada a amostra				Descartada a amostra			
4T5B 42N	205	26	20	1,1	1,2	-	-	12,0	14,0	-	-
4T5B 43N	210	26	20	0,4	0,8	0,9	1,0	6,0	6,3	6,3	6,6
4T7B 44P	205	26	20	5,4	-	-	-	16,0	-	-	-
4T7B 45E	190	26	18	6,0	-	-	-	18,0	-	-	-
4T7A 46P	170	22	15	1,7	2,0	-	-	10,0	15,0	-	-
6T3B 47P	203	26	20	1,6	1,0	1,1	1,2	6,0	5,4	5,3	5,5
6T7A 48P	170	22	15	1,0	1,1	1,4	-	12,0	14,0	15,0	-
6T7B 49P	195	26	18	0,7	0,7	-	-	14,0	14,0	-	-
6T7C 50P	237	29	21	0,6	0,2	-	-	8,0	14,0	-	-
4T5A 51P	170	22	15	1,0	1,0	1,0	1,2	8,0	8,0	8,5	8,0
4T5C 52P	235	29	23	1,3	0,8	1,2	1,2	9,0	7,5	6,5	7,0
4T3B 53P	205	26	20	1,2	1,0	0,6	0,4	5,0	3,6	3,6	3,2



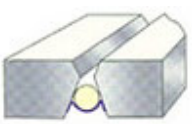
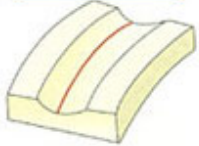

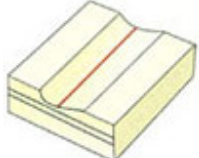
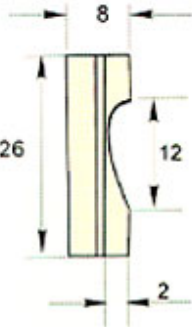
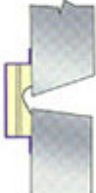


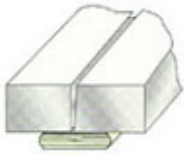

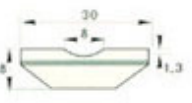
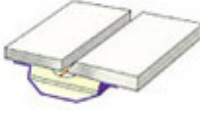
ANEXO 1a

Backing Cerâmico – processo SMAW, FCAW-aramé tubular e GMAW-aramé sólido.

Backing	Dimensões	Junta	Aplicação
<p>JN - 101</p> 			<p>Utilizado para soldagem unilateral com eletrodo revestido (SMAW).</p> <p>Apropriado para soldagem de aços baixo carbono e aços baixa resistência.</p>
<p>JN - 401</p> 			<p>Utilizado para soldagem unilateral com proteção gasosa.</p> <p>Apropriado para soldagem com arame tubular ou arame sólido.</p>
<p>JN - 403</p> 			<p>Utilizado para soldagem unilateral com proteção gasosa.</p> <p>Apropriado para soldagem com arame tubular ou arame sólido.</p>

ANEXO 1b

Backing Cerâmico – Posições e juntas diversas. Processo SAW.

Backing	Dimensões	Junta	Aplicação
JN - 408 	 $D = 7, 9, 10, \dots$		Utilizado para soldagem de junta tipo X.
JN - 410 	$R = 100, 125, 150, 200 \dots$		Utilizado para soldagem de aberturas de visitas.
JN - 411 			Utilizado para soldagem unilateral na posição horizontal.
JN - 801 			<p>Este backing consiste em uma lâmina de fibra de vidro, fluxo refratário e uma folha de papel. Este backing é aderido a face oposta da junta.</p> <p>Apropriado para arco-submerso (SAW).</p>
JN - 1101 			Apropriado para soldagem unilateral de aço inoxidável com eletrodo revestido, arame sólido ou tubular.

ANEXO 2

Tabela *Backing* Cerâmico – folheto técnico TERMARI Comercial.

Processo de soldagem	Posição de soldagem	Parâmetros de soldagem		Abertura raiz (mm)	Recomendações
		Corrente (A)	Voltagem (V)		
SMAW Eletrodo Revestido	Plana	140~160	25~26	5~8	Utilizar eletrodo de baixo hidrogênio (diam: 4mm)
	Vertical ascendente	125~150	25~26	4~8	
	Horizontal	140~160	25~26	5~8	
FCAW Arame Tubular	Plana	160~200	22~24	5~8	.
	Vertical ascendente	140~160	20~23	4~8	
	Horizontal	150~180	20~24	3~7	
GMAW Arame Sólido	Plana	150~200	22~24	5~8	.
	Vertical ascendente	130~160	20~24	4~8	
	Horizontal	150~180	20~24	3~7	
SEG ARC	Vertical ascendente	320~380	33~37	5~8	Espessura da chapa 14~22mm.
SAW Arco-submerso	Plana	500~900	33~37	2~4	.