

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

**“ESTUDO DO FORMATO DO CORDÃO NA SOLDAGEM A ARCO
ELÉTRICO”**

Autor: Rodrigo Silva de Andrade
Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica da USP
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi.

São Paulo 2002

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

**“ESTUDO DO FORMATO DO CORDÃO NA SOLDAGEM A ARCO
ELÉTRICO”**

Autor: Rodrigo Silva de Andrade
Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica da USP
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi.

Orientador _____.

São Paulo 2002

Data: ___/___/___

Banca Examinadora

Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi _____

Julgamento: _____ Assinatura _____

Prof. Dr. Stephan Wolynec _____

Julgamento: _____ Assinatura _____

Paulo Eduardo Alves Fernandes _____

Julgamento: _____ Assinatura _____

AGRADECIMENTOS

Aos meus amigos e família, à Danielle Wagatsuma e ao Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi.

SUMÁRIO

RESUMO

SUMMARY / ABSTRACT

Introdução.....	1
História térmica da soldagem.....	6
Repartição térmica	7
Repartição térmica TIG MIG	7
Ciclo térmico	8
Diferenças entre repartição térmica e ciclo térmico	8
Energia de soldagem	9
Eficiência térmica	10
Potência específica.....	11
Conceito de chapa.....	12
Chapa fina	12
Chapa grossa.....	13
Velocidade de resfriamento	14
Velocidade de resfriamento para alguns materiais	16
Aços carbono	16
Ferro fundido cinzento	16
Influências na velocidade de resfriamento	17
Extensão da zona afetada pelo calor	19
Cálculo da extensão da ZAC	20
Solidificação de poça de fusão	21
Tempo de residência	21
Formato da poça de fusão.....	22
Variáveis do processo:	24
Características de transferência:	24
Características da corrente de soldagem	26
Metodologia e Resultados.....	28
Análise do formato do cordão de solda	35
Dificuldades Encontradas.....	38
Discussão	39
Conclusões.....	51
Bibliografia	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: processo de soldagem MIG/MAG⁽⁷⁾	4
Figura 2: formato do cordão de solda durante a soldagem.⁽¹³⁾	6
Figura 3: repartição térmica de uma seção transversal de um cordão de solda.⁽¹³⁾	7
Figura 4: gráfico demonstrando o ciclo térmico de soldagem⁽¹³⁾	8
Figura 5: relação entre repartição térmica e ciclo térmico⁽¹³⁾	9
Figura 6: gráfico da temperatura máxima no corte transversal do cordão de solda.⁽¹³⁾	12
Figura 7: chapa fina.⁽¹³⁾	13
figura 8: chapa grossa.⁽¹³⁾	13
Figura 9: efeito da velocidade de soldagem no perfil térmico.⁽¹³⁾	17
Figura 10: efeito da espessura no perfil térmico.....	18
figura 11: efeito da geometria na velocidade de resfriamento.⁽¹³⁾	18
Figura 12: formato elíptico.⁽¹³⁾	23
figura 13: formato de gota.⁽¹³⁾	23
Figura 14: diferentes tipos de transferência⁽¹⁾	27
Figura 15: corte transversal de um cordão de solda.....	35

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1:condições de emprego dos processos de soldagem⁽⁷⁾;**1
Tabela 2:eficiência térmica de cada processo de soldagem.⁽¹³⁾;10
Tabela 3:potência específica de cada processo de soldagem.⁽¹³⁾;11
Tabela 4:relação das variáveis que influem na velocidade de resfriamento.⁽¹³⁾;16
Tabela 5:relação das variáveis de soldagem com a velocidade de resfriamento.⁽¹³⁾;20
Tabela 6:efeito das variáveis de soldagem com a extensão da camada da ZAC.⁽¹³⁾;21
Tabela 7:efeito das variáveis de soldagem com o tempo de solidificação.⁽¹³⁾;23
Tabela 8:faixa de corrente e diâmetro utilizados.;30
Tabela 9:tipo de polaridade recomendada pelo fabricante do consumível e pela AWS.;31
Tabela 10:relações de área com o fluxo de metal.;32
Tabela 11:relação entre a extensão e diâmetro do arame com a corrente.;32
Tabela 12:relação entre corrente, diâmetro polaridade e extensão do arame.;33
Tabela 13:listagem das amostras analisadas.;34
Tabela 14:composição química nominal da chapa de aço.;35
Tabela 15:dados técnicos do equipamento.;36
Tabela 16:medidas do formato do cordão de solda T1.;38
Tabela 17:medidas do formato do cordão de solda T5.;40

RESUMO

A forma do cordão de solda é muito sensível às variações do processo de soldagem. Alguns cordões apresentam em sua forma defeitos como o undercut e humping. A formação desses cordões de solda irregular é causada pelas soldas de alta velocidade e alta corrente.

Nesse processo um jato magneticamente induzido forma-se na coluna do arco, em baixas e moderadas correntes liberada na solda.

Se a corrente for muito grande, a parte aonde vai a corrente pode retirar uma parte do material e assim formar o humping.

Estas são as forças que podem afetar o perfil da corda de solda. gravidade, força do arco e forças magnéticas.

Uma boa qualidade de solda, pode ser obtida com um bom operador para balancear as forças favoráveis e desfavoráveis, e um eletrodo de baixa escória celulósica.

Aço carbono não é favorável utilizar-se solda e mesmo a solda por fusão é restrita a reparos, devido à baixa energia de superfície, que pode fazer com que ocorra o undercut.

Palavra-chave: Cordão de solda, MIG, arco elétrico.

SUMMARY / ABSTRACT

The weld shape is very sensible with the welding process. Some welds show defects like undercut and humpig. These problems occurs because of the high speed and high current of the welding.

If the current is too high, the part in which the current touch can extract a piece of the material, and it is callec humping.

These are the power that can afect the weld shape: gravity, eletric arc, magnetic powers..

A good quality of the weld can be get with a good operator to deal with the favourable and unfavourables powers.

Introdução

A soldagem é um processo de união de duas partes metálicas com o uso de calor. Ela é utilizada para se obter estruturas metálicas como pontes, torres ou aviões, carros, trens, prédios, oleodutos trocadores de calor, equipamentos eletrônicos, reatores nucleares,

Tabela 1: condições de emprego dos processos de soldagem⁽⁷⁾

Materiais e espessuras		Eletrodo revestido	Arco submerso	MIG ou MAG	Eletr. tubular	TIG	Plasma	Eletrocerâmica	Resistência	Óxigas	Folha de elétrons	Laser	Brasegem	Soldagem branca	Difusão	Arco
Aço-carbono	F	x	x	x		x			x	x	x	x	x	x	x	x
	I	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x
	M	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x
	G	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x
Aço de baixa liga	F	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x
	I	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x
	M	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x
	G	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x
Aço inoxidável	F	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
	I	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
	M	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
	G	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
Ferro fundido	I	x							x	x		x				
	M	x	x	x	x				x	x		x				
	G	x	x	x	x				x	x		x				
Níquel e suas ligas	F	x	x	x		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
	I	x	x	x		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
	M	x	x	x		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
	G	x	x	x		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
Alumínio e suas ligas	F		x		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x
	I		x		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x
	M		x		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x
	G		x		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x
Titânio e suas ligas	F		x		x	x		x		x	x	x	x	x	x	x
	I		x		x	x		x		x	x	x	x	x	x	x
	M		x		x	x		x		x	x	x	x	x	x	x
	G		x		x	x		x		x	x	x	x	x	x	x
Cobre e suas ligas	F		x		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x
	I		x		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x
	M		x		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x
	G		x		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x

Espessuras: F = até 3 mm I = de 3 a 6 mm M = de 6 a 19 mm G = acima de 19 mm

barcos etc. para que se haja uma soldagem é necessário que seja gerada uma quantidade de energia capaz de unir dois materiais, similares ou não; remover as contaminações das superfícies a serem unidas; evitar que o ar contamine a superfície durante o processo de soldagem; propiciar o controle da metalurgia da soldagem, para que a solda alcance as propriedades desejadas, sejam elas físicas, químicas ou mecânicas.

Os processos de soldagem podem se classificados pelo tipo de fonte de calor ou pela natureza da união. O processo MAG é um processo de soldagem por fusão com arco elétrico o qual gera o calor necessário para a soldagem.

O processo MIG (metal inert gas) e MAG (metal active gas) utilizam como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar, a proteção da região de soldagem é feita por um fluxo de gás inerte (MIG) ou gás ativo (MAG). A soldagem pode ser semi-automática ou automática.

O processo MIG é adequado à soldagem de aços-carbono, aços de baixa, média, e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio e ligas, magnésio e ligas, cobre e ligas. O processo MAG é utilizado na soldagem de aços de baixo carbono e aços de baixa liga.

As vantagens do processo MIG/MAG são:

Processo bastante versátil, podendo ser adaptado facilmente para a soldagem automática;

O eletrodo nu é alimentado continuamente;

A soldagem pode ser executada em todas as posições;

A velocidade da soldagem é elevada;

Taxa de deposição elevada devido à densidade de corrente alta na ponta do arame;

Não há formação de escória e, consequentemente, não se perde tempo na sua remoção, nem se corre o risco de inclusão de escória na soldagem em vários passes;

Penetração de raiz mais uniforme que no processo com eletrodo revestido;

Processo com baixo teor de hidrogênio que, no caso de eletrodos nus, fica ao redor de 5ppm/100g de metal;

Problemas de distorção e tensões residuais diminuídos;

Soldagem com visibilidade total da peça de fusão;

Possibilidade de controlar a penetração e a diluição durante a soldagem;

Facilidade de execução da soldagem;

O soldador pode ser facilmente treinado para soldar em todas as posições;

Limitações:

A maior velocidade de resfriamento por não haver escória, o que aumenta a ocorrência de trincas, principalmente no caso de aços temperáveis;

A soldagem deve ser protegida de correntes de ar;

Como o bocal da pistola precisa ficar próximo do metal-base a ser soldado, a operação não é fácil em locais de acesso difícil;

Projeção de gotas de metal líquido durante a soldagem;

Grande emissão de raios ultravioleta;

Equipamento de soldagem mais caro e complexo que o do processo com eletrodo revestido;

Equipamento menos portátil que o do eletrodo revestido.

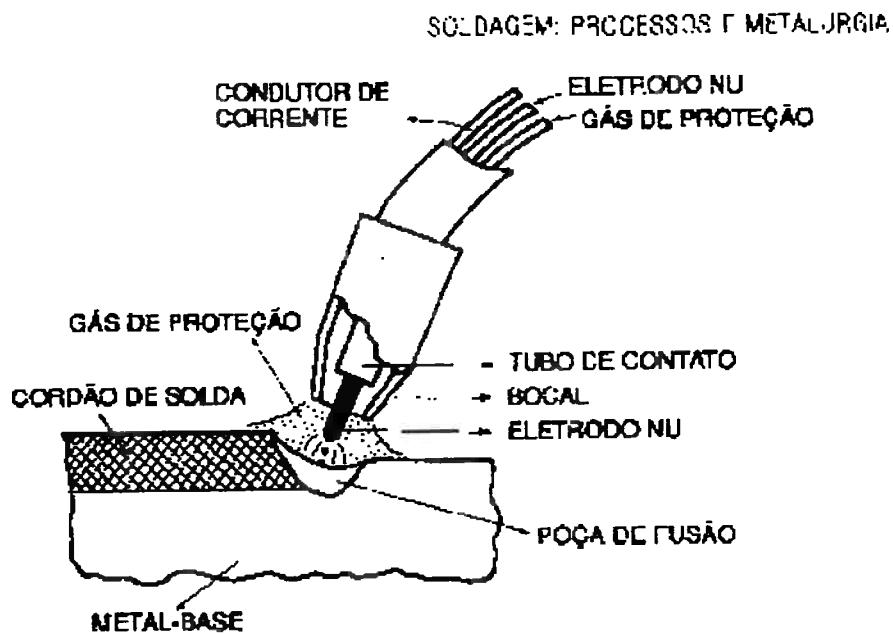


Figura 1: processo de soldagem MIG/MAG⁽⁷⁾

A fonte de energia pode ser um gerador ou um retificador, ambos com características de potencial constante. A soldagem pelo processo MIG/MAG é geralmente feita em corrente contínua, que pode até ser pulsada. Há estudos para desenvolver o processo para corrente alternada.

O alimentador do eletrodo é ligado à fonte de energia e possui controle para a velocidade de alimentação; a velocidade junto com a tensão selecionada na fonte, determina o valor da corrente de soldagem.

A pistola pode ser refrigerada a ar ou água, dependendo da escolha da corrente de soldagem, do tipo de gás de proteção e do tipo de junta.

Os fenômenos envolvidos na transferência metálica são de difícil quantificação. Dos processos de soldagem a arco elétrico, os processos TIG e MIG/MAG são os mais estudados. No experimento foi utilizado o processo MIG.

Os diversos modos de transferência metálica são determinados por: corrente de soldagem, tensão do arco, diâmetro do arame e gás de proteção.

Os cordões de solda feitos com arame tubular de revestimento rutilico (T1) variaram da seguinte forma:

A largura aumenta com a corrente e com a extensão do arame tubular. Quando se combinam polaridade negativa e aumento da extensão do arame tubular e baixa corrente a largura diminui.

A penetração aumenta com a corrente, diminui com o aumento do diâmetro do arame, diminui com a polaridade negativa;

A altura aumenta com a corrente, com o diâmetro e com a polaridade negativa e com o aumento da extensão do arame tubular.

A área aumenta com a corrente , com a polaridade negativa e com ao aumento da extensão do arame tubular.

Os cordões de solda feitos com arame tubular de revestimento simples (T5) variam da seguinte forma:

A largura aumenta com a corrente, diminui com o aumento do diâmetro do arame, diminui com a polaridade negativa e aumenta com o aumento da extensão do arame tubular.

A penetração aumenta com a corrente, com o diâmetro do arame, com a polaridade negativa e com o aumento da extensão do arame tubular.

A altura diminui com o aumento do diâmetro do arame, com a polaridade negativa, aumenta com a corrente.

A área aumenta com a corrente, diminui com o aumento do diâmetro do arame, diminui com a polaridade negativa, aumenta com o aumento da extensão do arame tubular.

História térmica da soldagem

Por história térmica entende-se a evolução de temperatura para um dado material e procedimento de soldagem, tanto em função do tempo quanto da distância ao centro do cordão de solda. Assim, a história térmica abrange tanto a repartição térmica quanto o ciclo térmico de soldagem. No processo de soldagem, ocorre primeiramente a fusão dos metais a serem soldados os quais irão passar por um processo de solidificação que se dá por nucleação e crescimento do grão.

Os cordões de solda podem ter os seguintes aspectos:

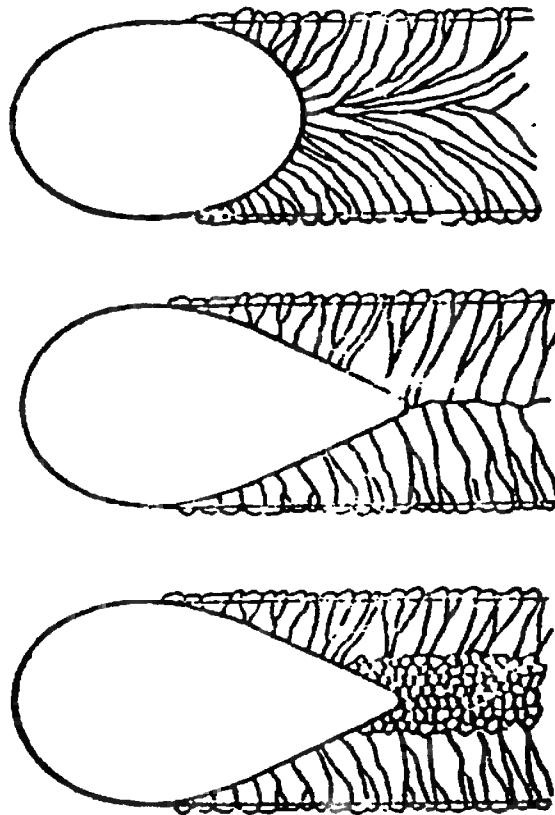


Figura 2: formato do cordão de solda durante a soldagem.⁽¹³⁾

O primeiro cordão mostra uma soldagem com baixa energia e baixa velocidade de soldagem. O segundo mostra um cordão com alta energia e velocidade de soldagem mas sem nucleação, já o terceiro mostra um cordão com alta energia e velocidade de soldagem mas com nucleação.

Repartição térmica

A repartição térmica é representada pela máxima temperatura atingida em cada ponto, em função da distância deste ponto ao centro do cordão de solda. Ela está associada basicamente à extensão da zona afetada pelo calor. Esta, por sua vez, é determinada pela mínima temperatura (T_{ZAC}), que afeta a microestrutura e/ou as propriedades do metal de base.

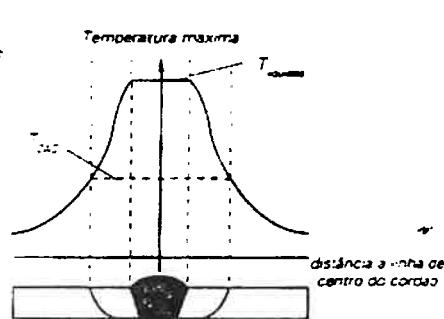


Figura 3: repartição térmica de uma seção transversal de um cordão de solda.⁽¹³⁾

Repartição térmica TIG MIG

A diferença entre a repartição térmica do processo TIG e a do MIG está no fato que, no processo TIG, a vareta entra fria na região do arco e absorve um pouco do calor gerado pelo processo. Já no processo MIG, o arame é aquecido por efeito Joule, antes de ser fundido.

Comparando-se os dois processos, TIG e MIG, com a soldagem com eletrodo revestido, percebe-se que as eficiências térmicas dos processos TIG e MIG são inferiores às do processo com eletrodo revestido; a explicação está na perda de calor que, nos processos TIG e MIG, ocorre através do bico de contato feito de cobre e do fluxo de gás de proteção, o qual se encontra em uma temperatura bem abaixo da temperatura do arco elétrico. Já o eletrodo revestido perde energia por meio da fusão do revestimento e do aquecimento da alma metálica. Esta perda de energia é bastante inferior à ocorrida nos processos TIG e MIG.

Ciclo térmico

O ciclo térmico de soldagem é o lugar geométrico dos pontos de variação de temperatura em função do tempo, em uma distância fixa a partir do centro do cordão.

O ciclo térmico está relacionado às transformações de fase que ocorrem durante o resfriamento da junta soldada. A tangente em uma dada temperatura crítica (T_c) determina a velocidade de resfriamento (R) na mesma temperatura.

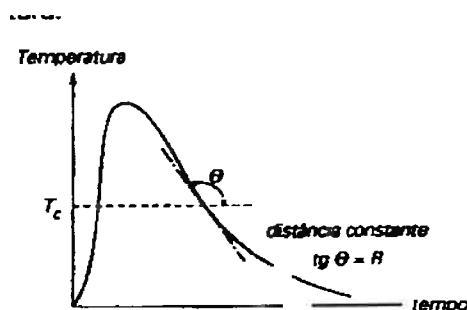


Figura 4: gráfico demonstrando o ciclo térmico de soldagem⁽¹³⁾

Diferenças entre repartição térmica e ciclo térmico

A transferência de calor controla as transformações de fase na ZF e na ZAC, portanto é importante conhecer a distribuição de temperatura máxima, a velocidade de resfriamento e a velocidade de solidificação do metal de solda.

A transferência de calor é tipicamente por condução

A repartição térmica e o ciclo térmico de soldagem são funções das propriedades físicas do material, geometria da junta e procedimento de soldagem. Contudo há diferenças entre eles. Na repartição térmica trabalha-se com a máxima temperatura atingida durante a soldagem em função da distância. Já no ciclo térmico utiliza-se a temperatura e não a temperatura máxima. Assim, para um dado material e condição de soldagem, existe apenas uma repartição térmica, mas infinitos ciclos térmicos de soldagem.

A repartição térmica e o ciclo térmico estão relacionados no espaço tridimensional, ou 3-D. Sempre que for definida uma repartição térmica, automaticamente são definidos também os ciclos térmicos de soldagem. Isto significa que tanto a extensão da ZAC como a sua microestrutura estão determinadas para um dado material e parâmetros de soldagem.

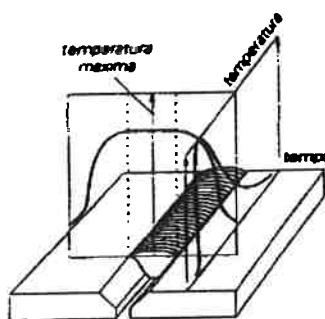


Figura 5: relação entre repartição térmica e ciclo térmico⁽¹³⁾

Energia de soldagem

Energia de soldagem (E) é a energia introduzida o metal de base por unidade de comprimento do cordão de solda. A energia de soldagem é calculada por meio de uma equação na qual o produto V.I tem unidade de potência e está relacionado com a energia elétrica produzida no arco elétrico pelo equipamento de soldagem.

$$E = \eta * V * I / v$$

De acordo com a própria definição de energia de soldagem, a energia elétrica produzida pelo arco deve ser corrigida para a energia térmica que efetivamente foi introduzida na peça. A fração de energia térmica perdida é função das particularidades de cada processo de soldagem. Por isso, para corrigir a energia de soldagem é definido o adimensional η que é chamado eficiência térmica do processo de soldagem.

Eficiência térmica

A eficiência térmica característica de cada processo de soldagem é vista no quadro.

Tabela 2: eficiência térmica de cada processo de soldagem.⁽¹³⁾

processo	eficiência térmica (%)
lazer, feixe de elétrons	5 a 20
TIG	30 a 60
plasma	50 a 60
MIG	70 a 80
eletrodo revestido	90
arco submerso	90

Uma eficiência térmica bastante baixa é a dos processos de soldagem e corte a laser e feixe de elétrons. Na soldagem a laser, por exemplo, ocorrem perdas por refrigeração nos espelhos refletores do feixe, tanto na cavidade quanto na transmissão do feixe de laser para soldagem ou corte. O valor da eficiência térmica deste processo deixa uma dúvida: como um processo com eficiência térmica tão baixa tem uma velocidade de soldagem e corte tão elevada? A resposta está na potência específica do processo.

Potência específica

Potência específica é a potência disponível por unidade de área da fonte de calor. Quanto maior for a potência específica, mais concentrada é a fonte de calor e mais eficiente é a fusão localizada. O quadro mostra potência específica de alguns processos de soldagem.

Tabela 3: potência específica de cada processo de soldagem.⁽¹³⁾

processo	potência específica (W/m ²)
lazer, feixe de elétrons	10^8
TIG; plasm; MIG/MAG	10^5
eletrodo revestido	10^4
arco submerso	10^3

Apesar de os processos laser e feixe de elétrons terem eficiências térmicas baixas, suas potências específicas são bastante elevadas. Este fato é devido a uma área pequena de

incidência do feixe, de 0,1 mm aproximadamente, comparada com 5 a 10 mm para os processos de soldagem a arco elétrico. Em outras palavras, a potência específica do processo é uma medida da concentração de calor por unidade de área.

Tanto a eficiência térmica quanto a potência específica do processo determinam a repartição térmica durante a soldagem por um dado processo. Dessa maneira, processos com potência específica elevada apresentam uma zona afetada pelo calor mais estreita e velocidades de resfriamento bastante elevadas. Já o comprimento da zona fundida (ZF) e o da ZAC são diferentes para os diversos processos de soldagem, sendo que a espessura da chapa influi tanto na largura da ZF como na da ZAC.

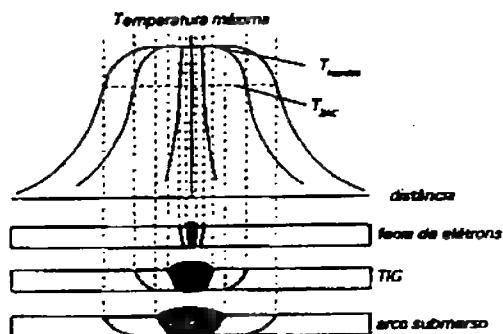


Figura 6: gráfico da temperatura máxima no corte transversal do cordão de solda.⁽¹³⁾

Conceito de chapa

Em soldagem, o conceito de chapa fina ou grossa não está relacionado apenas à espessura da chapa. Assim, uma chapa de 100 mm tida como chapa grossa para o processo TIG, pode ser considerada como chapa fina para o processo de soldagem por eletroescória.

Chapa fina

O conceito de chapa fina está relacionado a um escoamento de calor bidimensional em uma junta. Isto significa que as isotermas ao longo da espessura da chapa são linhas retas paralelas e perpendiculares à superfície da chapa. ,...

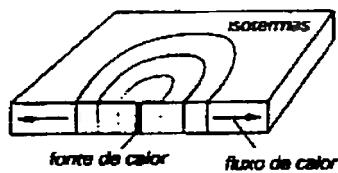


Figura 7: chapa fina.⁽¹³⁾

Chapa grossa

Uma chapa é grossa quando envolve um escoamento de calor tridimensional em uma junta. As isotermas ao longo da espessura da chapa são círculos concêntricos com origem na fonte de calor.

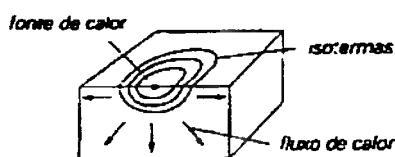


figura 8: chapa grossa.⁽¹³⁾

É interessante observar, nas chapas fina e grossa, o formato da fonte de calor e das isotermas ao longo da espessura da chapa. Também são ressaltadas as direções de escoamento de calor ao longo das chapas.

Para saber com precisão se a espessura de uma chapa em questão é classificada como chapa fina ou grossa, basta utilizar o adimensional τ , desenvolvido por Adams, e

$$\tau = e \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot C \cdot (T_c - T_{pré})}{E}}$$

e = espessura da chapa
 ρ = densidade do material
 C = calor específico do material
 T_c = temperatura crítica
 $T_{pré}$ = temperatura inicial da chapa
 E = energia de soldagem

aplicá-lo na fórmula. O adimensional dá um critério aproximado de classificação das chapas; para chapa fina o adimensional τ é igual ou menor que 0,75; para chapa grossa, é maior que 0,75.

Tome-se como exemplo uma chapa de 10 mm de espessura de aço carbono, na temperatura ambiente de 25°C soldada pelos processos TIG e MAG e com energias de soldagem de 400 J/mm no caso de processo TIG e 700 J/mm no caso de MAG. Sabendo que ρC é igual a $4,44 \cdot 10^6$ J/m³K e T_c igual a 550°C, é possível calcular τ para os dois processos, bem como classificar as chapas.

Substituindo-se os valores dados e compatibilizando as unidades de medida, encontra-se o resultado 0,76, que classifica a chapa como grossa no caso de processo TIG; e o resultado 0,54, que classifica a chapa como fina no processo MAG.

Observa-se então que, dependendo dos parâmetros de soldagem, das constantes físicas e da temperatura de pré-aquecimento, uma chapa que à primeira vista pode ser classificada como grossa, pode ser na realidade fina para uma dada condição de soldagem.

A classificação de chapa fina e chapa grossa está relacionada com os modos de transferência de calor bi e tridimensional. Isso significa que quanto mais caminhos houver

para o calor escoar, maior será a velocidade de resfriamento da junta soldada. Assim, é importante saber se a chapa é fina ou grossa para calcular a velocidade de resfriamento. Pode-se desejar o resfriamento lento ou rápido da chapa em função da transformação da fase ocorrida da ZF e na ZAC do material.

Velocidade de resfriamento

Na soldagem, ao contrário do que ocorre com o tratamento térmico, o aquecimento é localizado. Isso resulta que chapas grossas resfriam mais rápido que chapas finas. Pode-se desejar o resfriamento lento ou rápido da chapa em função da transformação de fase ocorrida. A velocidade de resfriamento pode ser calculada por meio das inúmeras soluções das equações de transferência de calor. Uma delas é a solução simplificada proposta por Adams para chapas grossa e fina.

No caso da chapa grossa, a velocidade de resfriamento (R) no centro do cordão em uma chapa grossa é dada por uma equação chamada de equação de Adams para chapa grossa.

$$R = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot (T_c - T_{pre})^2}{E}$$

k = condutividade térmica

Já no caso da chapa fina, a velocidade de resfriamento (R) no centro do cordão é dada por outra equação, conhecida como equação de Adams para chapa fina.

Mudanças nas variáveis envolvidas afetam de modo diferente a velocidade de resfriamento em chapas finas e grossas. O efeito dos parâmetros de soldagem na velocidade de resfriamento (R) de chapas finas e chapas grossas pode ser visto no quadro.

Tabela 4: relação das variáveis que influem na velocidade de resfriamento.⁽¹³⁾

origem do efeito	variáveis	classificação das chapas	
		chapa fina (2D) efeito em R	chapa grossa (3D) efeito em R
material	k (↑)	I (↑)	I (↑)
	ρ (↑)	I (↑)	NI
	C (↑)	I (↑)	NI
	T_c (↑)	I3 (↑↑↑)	I2 (↑↑)
parâmetros do processo de soldagem	E (↑)	η (↑) V (↑) I (↓) v (↓)	I2 (↓↓) I (↓)
	T_{pre} (↑)	I3 (↓↓↓)	I2 (↓↓)
	e (↑)	I2 (↑↑)	NI

I influi
NI não
↓ influi
↑ diminui

Velocidade de resfriamento para alguns materiais

Para alguns materiais é desejável uma velocidade de resfriamento baixa e em outros uma velocidade de resfriamento elevada. Isto significa tempos de resfriamento longos e curtos, respectivamente.

Aços carbono

Na soldagem de aços carbono com temperabilidade, a junta deve esfriar em velocidade a mais lenta possível, para evitar a formação de martensita na ZF e na ZAC. Quando possível, a velocidade de resfriamento pode ser controlada por um aumento na corrente de soldagem e na temperatura de pré-aquecimento.

A soldagem de manutenção de um ferro fundido cinzento também deve produzir uma velocidade de resfriamento a mais baixa possível. Isto porque, quando a velocidade de resfriamento é elevada, forma-se ferro fundido branco na zona de ligação, além de

martensita de alto carbono na zona afetada pelo calor. Ambas as fases são frágeis e podem destacar o cordão de solda.

Ferro fundido cinzento

A soldagem de aços inoxidáveis austeníticos requer uma velocidade de resfriamento alta, a fim de evitar a precipitação de carbeto de cromo nos contornos de grão na zona fundida e na zona afetada pelo calor. Resulta que nem sempre o pré-aquecimento é recomendado.

Influências na velocidade de resfriamento

Assim como a velocidade de resfriamento influí no formato do cordão de solda, a velocidade de soldagem também o faz, como podemos ver na figura.

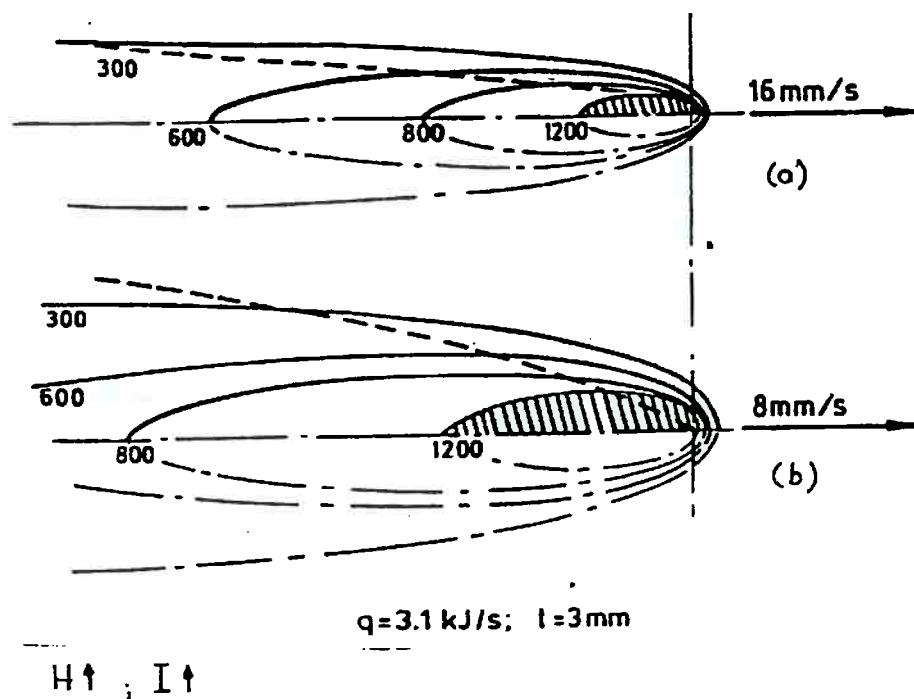


Figura 9: efeito da velocidade de soldagem no perfil térmico.⁽¹³⁾

Mantendo-se todos os parâmetros de soldagem iguais, uma chapa grossa resfria muito mais rápido que uma chapa fina. Da mesma maneira, uma junta topo-a- topo pode apresentar dois caminhos para extração do calor. Já uma junta em ângulo apresenta três caminhos para extração de calor. Isto mostra que a geometria da junta também influí na velocidade de resfriamento.

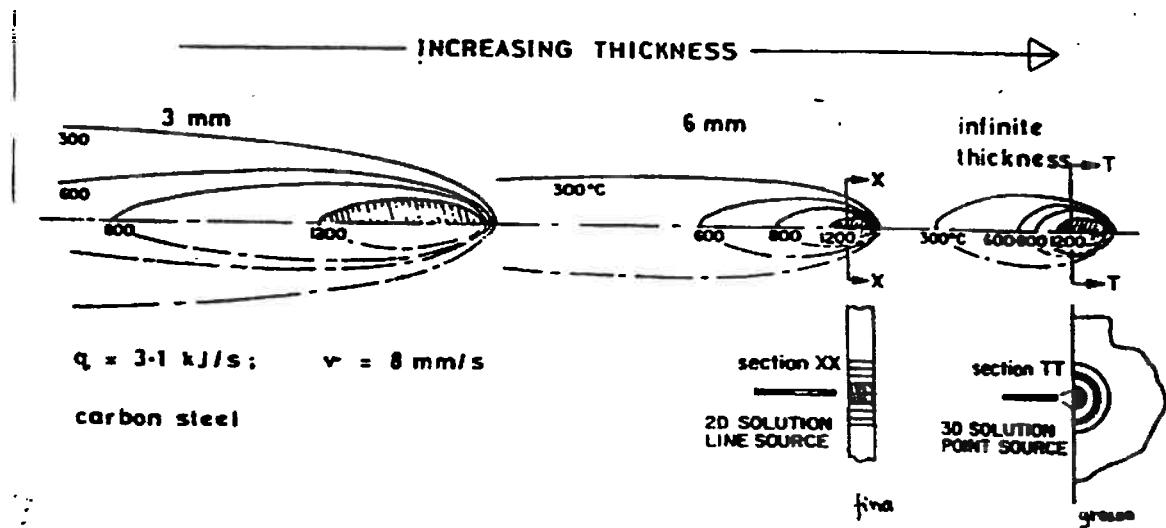


Figura 10: efeito da espessura no perfil térmico.

Pode-se perceber o efeito da espessura da chapa na velocidade de resfriamento por meio do cálculo da velocidade de resfriamento aplicado a chapas de aço carbono, finas e grossas, em função da temperatura de pré-aquecimento e da energia de soldagem, admitindo-se T_c igual a 550°C . Os cálculos, já realizados, podem ser encontrados em um quadro para chapa grossa e chapa fina, em que as velocidades de resfriamento das chapas grossas são bem maiores que as das chapas finas.

influências na velocidade de resfriamento

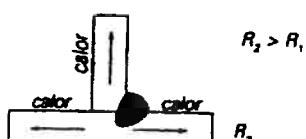


figura 11: efeito da geometria na velocidade de resfriamento.⁽¹³⁾

Tabela 5: relação das variáveis de soldagem com a velocidade de resfriamento.⁽¹³⁾

temperatura de pré aquecimento	energia de soldagem	velocidade de resfriamento	
		chapa grossa	chapa fina
25 C	700J/mm	69,18C/s	5,8C/s
	1400J/mm	34,73C/s	1,4C/s

A energia de soldagem e a temperatura de pré- aquecimento têm uma influência maior na velocidade de resfriamento da chapa fina que na da chapa grossa. Essas diferenças podem-se tornar maiores, dependendo da espessura das chapas.

Extensão da zona afetada pelo calor

A extensão da zona afetada pelo calor pode ser calculada por uma equação que descreve a evolução da temperatura máxima (T_{\max}) da chapa em função da distância a partir da zona de ligação. Essa equação é derivada do conceito de chapa fina e com 100% de penetração do cordão de solda.

A T_{\max} é utilizada para calcular a extensão da zona afetada. O valor de T_{\max} depende das condições de fornecimento do material antes da operação de soldagem. Para uma chapa de aço normalizada ou recozida, o valor de T deve ser o da temperatura eutetóide do aço (ao redor de 723°C). Isso significa que a região da chapa aquecida a uma temperatura acima de 723°C teve mudanças de microestrutura e de propriedades mecânicas.

Para a reparação em um eixo de aço carbono média liga ao Cr-Ni-Mo, temperado e revenido a 400°C, o cálculo da extensão da ZAC considera que o valor de T_{\max} deve ser

o da temperatura de revenido, uma vez que as mudanças microestruturais ocorrerão principalmente acima desta temperatura.

Cálculo da extensão da ZAC

Para uma chapa de um material deformado a frio o valor de T_{max} é o de início de recuperação do material. Percebe-se então que a extensão da zona afetada pelo calor depende da condição inicial da chapa a ser soldada. Chapas de aço com a mesma composição mas com tratamentos térmicos diferentes, têm diferentes extensões da zona afetada pelo calor.

Pode-se obter um exemplo de como o tratamento térmico afeta diferentes zonas de chapas de aço. calculando-se a extensão da zona afetada pelo calor.

Suponha-se o cálculo da extensão da ZAC para uma chapa de aço carbono com 5 mm de espessura, nas condições normalizada, temperada e revenida a 450°C. Deve-se verificar o efeito de temperatura de pré-aquecimento (25 e 100°C) e da energia de soldagem (700 e 1400 J/mm) na extensão da ZAC e admitir a temperatura de fusão do aço em 1500°C e ρC igual a 0.0044J/mm³. Substituindo os valores na equação, obtêm-se os valores mostrados no quadro.

Tabela 6: efeito das variáveis de soldagem com a extensão da camada da ZAC.⁽¹³⁾

temperatura de pré aquecimento	energia de soldagem	extensão da ZAC	
		chapa normalizada	chapa temperada e revenida
25 C	700J/mm	5,8mm	12,9mm
	1400J/mm	11,6mm	25,8mm
100 C	700J/mm	6,9mm	16,5mm
	1400J/mm	13,8mm	33,0mm

Com o resultado encontrado, é possível concluir que a extensão da ZAC é bem mais influenciada pela energia de soldagem do que pela temperatura de pré-aquecimento da chapa. Da mesma maneira, a chapa temperada e revenida apresenta uma ZAC mais extensa.

É muito importante conhecer os efeitos dos parâmetros de soldagem, da natureza do material e da geometria da junta na velocidade de resfriamento e na extensão da ZAC. Trata-se de conceitos indispensáveis para avaliar a presença de defeitos ou mesmo o comportamento da junta soldada em serviço.

Solidificação de poça de fusão

Nos processos de soldagem por fusão ocorre o fenômeno de solidificação da região da chapa que foi fundida. Disto resulta que a chapa fica com uma descontinuidade tanto de microestrutura como de homogeneidade de composição química.

Os defeitos gerados na zona fundida, como porosidade e inclusão de escória, podem ser minimizados pelo tempo de residência da poça de fusão no estado líquido, o qual também é útil para melhorar as propriedades mecânicas do cordão de solda através da diminuição da microssegregação e tamanho de grão na zona fundida.

Tempo de residência

Tempo de residência (t_s) é o tempo em que a poça de fusão permanece no estado líquido. Na verdade. Trata-se de uma simplificação para indicar o tempo de solidificação de uma poça de fusão estacionária com um determinado volume de líquido, visto que não é

possível calcular o tempo de solidificação real da poça de fusão quando esta se desloca sobre a chapa.

Para dar um exemplo, calcula-se o tempo de solidificação da poça de fusão de um aço carbono, com calor latente de fusão 2 J/mm^3 e temperatura liquidus de 1500°C , admitindo-se temperaturas de pré-aquecimento de 25 e 100°C e energias de soldagem de 700 e 1400 J/mm . O tempo de solidificação é dado por um quadro.

Tabela 7: efeito das variáveis de soldagem com o tempo de solidificação.⁽¹³⁾

Temperatura de pré aquecimento	energia de soldagem	tempo de solidificação
25 C	700J/mm	0,83s
	1400J/mm	1,66s
100 C	700J/mm	0,92s
	1400J/mm	1,85s

Os cálculos efetuados permitem observar que o tempo de solidificação da poça de fusão situa-se ao redor de 2s . Trata-se de um tempo bem pequeno, comparado com o de uma peça fundida em molde de areia.

A poça de fusão solidifica-se ao se deslocar continuamente sobre a superfície de uma chapa. Cada vez que isto ocorre, o cordão de solda fica marcado por escamas. Escamas de aparência e formato regulares indicam se o processo de soldagem foi realizado dentro de parâmetros adequados e se a alimentação de arame foi regular.

Formato da poça de fusão

Com relação ao formato, a poça de fusão pode ser no formato elíptico ou de gota. No formato elíptico, os grãos são mais refinados e não existe um plano central definido pelos grãos que se encontram no meio do cordão. Trata-se de um tipo de formato menos suscetível à trinca de solidificação.

A poça, no formato de gota, apresenta grãos grosseiros e um plano central no meio do cordão, definido pelo encontro dos grãos. Este tipo de formato é bastante suscetível à trinca de solidificação.

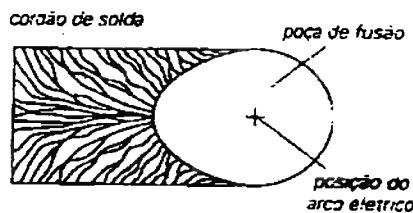


Figura 12: formato elíptico.⁽¹³⁾

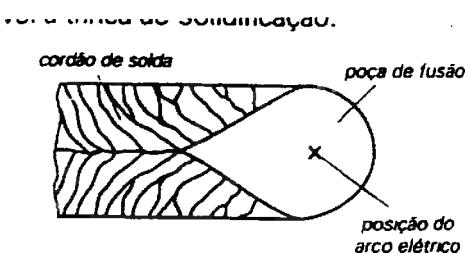


figura 13: formato de gota.⁽¹³⁾

Na soldagem ao arco submerso de aços carbono, a poça de fusão no formato de gota pode causar perda de propriedades mecânicas devido à presença de microssegregação no centro do cordão. Por isso as normas recomendam o posicionamento do entalhe do ensaio Charpy no centro do cordão.

Variáveis do processo:

As variáveis do processo, segundo a norma ASME, seção IX, edição de 1983, são as seguintes:

-qualificação do procedimento: metal base; metal de adição; tratamento térmico após soldagem; pré aquecimento; posição de soldagem; características elétricas; e técnica de soldagem.

As três primeiras são consideradas essenciais e as quatro últimas, não; o pré aquecimento e o tipo de gás de proteção podem ser essenciais ou não, dependendo da aplicação.

-qualificação do soldador (todas as variáveis são essenciais): tipo de junta; metal base; metal de adição; posição de soldagem; tipo de gás de proteção; e características elétricas.

Características de transferência:

Existem quatro tipos de transferência metálica no processo (MIG/MAG); globular (MIG/MAG); por curto-circuito (MIG/MAG); por pulverização axial e rotacional (MIG); e pro arco pulsado (MIG).

Transferência globular: ocorre para baixas densidades de corrente e qualquer tipo de gás de proteção, especialmente para CO₂ e hélio. A gota que se forma na ponta do eletrodo nu tem o diâmetro maior que ele, daí resultando a dificuldade em soldar fora de posição. A quantidade de calor colocada na peça a ser soldada tem um valor intermediário, comparando com os outros modos de transferência. Este tipo de transferência pode gerar falta de penetração, falta de fusão e/ou reforço do cordão de solda excessivo.

Transferência por curto-circuito: ocorre para eletrodos nus de diâmetros menores que os convencionais (0,8 a 1,2 mm), para valores mais baixos de corrente que a transferência globular e para qualquer tipo gás de proteção. A gota que se forma na ponta do eletrodo nu toca a poça de fusão, formando um curto-circuito. A gota é puxada para a poça de fusão pela tensão superficial desta e, por isso, este modo de transferência é adequado para todas as posições. A quantidade de calor colocada na peça é bem menor que a da transferência globular, sendo assim recomendada para soldar chapas finas. A penetração não é muito grande e existe problema de respingo e instabilidade do arco.

Transferência por pulverização: ocorre para elevadas densidades de corrente e quando se usa argônio ou misturas ricas em argônio como gás de proteção. A gota que se forma na ponta do eletrodo nu tem o diâmetro menor que o próprio eletrodo e é axialmente direcionada. A quantidade de calor colocada na peça para a solda é bastante elevada, sendo esse modo de transferência adequado para soldar chapas grossas. No caso da soldagem de

aço carbono, solda-se nas posições plana e horizontal (solda em ângulo). A penetração é bem elevada e o arco é bastante suave.

Para um dado diâmetro de arame, o tipo do transferência metálica muda de globular para pulverização axial, à medida que se aumenta a corrente. A essa corrente dá-se o nome de corrente de transição globular/pulverização.

Existe ainda uma segunda corrente de transição, na qual a transferência metálica passa de pulverização axial para pulverização rotacional. Neste modo de transferência, a ponta do eletrodo nu faz um movimento circular em torno de seu eixo, tornando a transferência bastante instável.

Transferência por arco pulsado: a transferência é do tipo pulverização axial. O equipamento de soldagem afeta dos níveis de corrente. No primeiro, a corrente de base é tão baixa que não há transferência, mas somente o início da fusão do arame. No segundo, a corrente de pico é superior à corrente de transição globular/pulverização, ocasionando a transferência de uma única gota. Com isso consegue-se uma transferência com características de pulverização, porém com uma corrente média bem menor. A quantidade de calor colocada na peça é menor que a da pulverização axial convencional, por isso, solda-se espessuras bem menores e consegue-se soldar em todas as posições.

Características da corrente de soldagem

A intensidade de soldagem influí no modo de transferência metálica. Além disso. A polaridade da corrente também tem grande influência no modo de transferência.

SOLDAGEM: PROCESSOS E METALURGIA

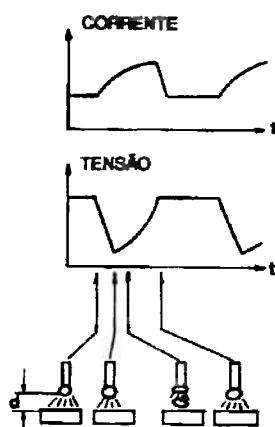


Figura 2.57 — Esquema do modo de transferência globular, mostrando como varia a tensão e a corrente de soldagem durante a transferência. Nesse tipo de transferência, a gota viaja através do arco, para somente depois tocar a poça de fusão.

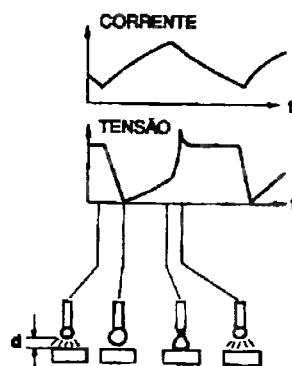


Figura 2.58 — Esquema da transferência metálica por curto-círcuito, mostrando o comportamento da tensão da tensão e corrente de soldagem durante a transferência.

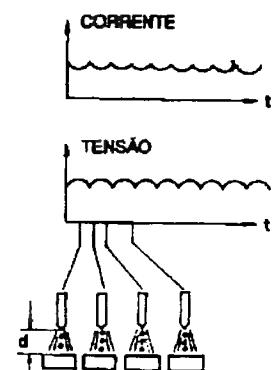


Figura 2.59 — Esquema de transferência metálica por pulverização axial, mostrando o comportamento de tensão e da corrente de soldagem durante a transferência. Nota-se que, a menos de pequenas variações, a tensão e a corrente são constantes.

Figura 14: diferentes tipos de transferência⁽¹⁾

Corrente contínua com polaridade reversa CCPR(+): é o tipo de corrente geralmente utilizado com o processo MIG/MAG. No caso do gás de proteção ser argônio ou misturas

ricas em argônio, pode-se ter os quatro modos de transferência metálica, dependendo do valor da corrente de soldagem e de ser ela pulsada ou não. No caso de CO₂, hélio e misturas ricas em hélio, obtém-se somente transferência globular (hélio, CO₂) ou de curto-círcuito (CO₂).

Corrente contínua com polaridade direta CCPD(-): neste caso existe uma repulsão da gora gerada pelas forças dos jatos de plasma e de vapor metálico, como foi mostrado no estudo da transferência metálica. Tanto com o argônio como com o CO₂, a gota é empurrada para cima e pode ser desviada da sua trajetória normal. A transferência torna-se bastante instável, dificultando a soldagem.

Resumindo a polaridade mais indicada para a soldagem é a CCPR(+), enquanto que para soldagem de revestimento é a CCPD(-).

Metodologia e Resultados

Escolha das variáveis a serem estudadas

As variáveis que serão estudadas podem ter um efeito marcante no diâmetro médio das gotas. Dessa maneira, podem afetar a estabilidade do arco e, consequentemente, o controle do processo de soldagem.

Tipo de eletrodo de arame tubular

Neste trabalho utilizaram-se dois tipos de arames tubulares. Eles obedecem a norma ANSI/AWS A5.20 e são classificados como E71-T1 e E71-T5, que são considerados respectivamente como arame tubular com revestimento do tipo rutilico e revestimento do

tipo básico. Cada um dos tipos de revestimento estudados produzem modos de transferência, observados na prática, bastante diferentes.

Diâmetro do eletrodo de arame tubular

Os diâmetros escolhidos dos eletrodos de arame tubular foram de 1,20 mm e 1,60 mm. Estes valores estão dentro da faixa mais utilizada na soldagem com este processo.

Corrente de soldagem

A corrente de soldagem está diretamente relacionada com o diâmetro do eletrodo de arame tubular, existindo uma faixa de corrente recomendada pelo fabricante para cada arame tubular, como pode ser visto na tabela 1 abaixo.

Tabela 8

Classificação do arame tubular	Diâmetro(mm)	Faixa de corrente(A)
E71-T1	1,2	150-290
E71-T1	1,6	180-400
E71-T5	1,2	100-325
E71-T5	1,6	200-500

Polaridade

A tabela 1 mostra as polaridades recomendadas pela norma AWS 5.20 e pelo fabricante. Os experimentos com a polaridade não recomendada visam conhecer o efeito desta variável na estabilidade do arco elétrico.

Tabela 9- Tipo de polaridade recomendada pelo fabricante do consumível e pela AWS

Classificação do arame tubular	Polaridade recomendada pela norma ASW A5.20 e pelo fabricante
E71-T1	CCPR(+)
E71-T5	CCPR(-)

Extensão do arame tubular

O arame tubular que se estende além do tubo de contato até o início do arco elétrico sofre um aquecimento por efeito Joule proporcional ao seu comprimento ,segundo a relação:

$$\text{Equação 1 } Q_j = p l^2/ A$$

A extensão do arame tubular recomendada pelo fabricante situa-se na faixa de 10 a 20 mm. Assim, a primeira extensão escolhida foi a de 10 mm. Mas, para a escolha da segunda extensão de arame tubular, foram feitas algumas considerações para a sua determinação.

Como o efeito Joule depende de três das quatro variáveis que se está analisando, procurou-se trabalhar com dois níveis de aquecimento Joule. Para utilizar a equação 1 foi preciso medir a área da casca metálica do arame tubular. Os resultados estão apresentados na tabela 2.

Tabela 10

Arame Tubular		Área Total (mm ²)	Área da casca metálica (mm ²)	Área do fluxo (mm ²)	massa por unidade de comprimento (10 ³ kg/m)	Relação Fluxo Metal
T1	1,2 mm	1,3160,03	0,9460,02	0,3760,01	7,3960,07	0,39
	1,6 mm	2,53 60,20	1,7960,15	0,7460,05	13,6160,22	0,41
T5	1,2 mm	1,2960,06	1,0060,04	0,2960,02	7,7560,09	0,29
	1,6 mm	2,4260,06	1,8160,02	0,6160,04	13,8460,04	0,34

Utilizando-se as áreas das cascas metálicas para o diâmetro do arame tubular E71- T1 de 1,2 mm, a extensão de 10 mm e admitindo-se que a resistividade elétrica é igual para todos os arames, calculou-se a energia gerada pelo efeito Joule para as duas correntes escolhidas. Tendo estes valores, foi calculada a extensão do eletrodo que produziria um aquecimento similar para o eletrodo E71- T1 com 1,6 mm de diâmetro e corrente de soldagem de 200 A. O valor determinado foi de aproximadamente 18 mm. Tendo o valor da extensão do eletrodo, calculou-se a corrente de soldagem para os valores intermediários de diâmetro de eletrodo. O resultado está mostrado na tabela 3.

Tabela 11

Extensão do arame tubular	Diâmetro do arame tubular	$Q_{j1} = 2,39 \cdot 10^8 p$ (W)	$Q_{j2} = 4,26 \cdot 10^8 p$ (W)
10	1,2	150 A	200 A
10	1,6	207 A	276 A
18	1,2	112 A	149 A
18	1,6	154 A	206 A

Resumo das variáveis escolhidas.

A tabela 4 apresenta os valores das variáveis escolhidas para este trabalho em dois níveis, conforme a técnica do delineamento fatorial.

Variáveis escolhidas e faixas estudadas

Tabela 12

Variável	nível baixo	nível alto
Corrente de soldagem (A)	150 A	200 A
Diâmetro do arame tubular (B)	1,20 mm	1,60 mm
Polaridade (C)	CCPR (+)	CCPR(-)
Extensão do arame tubular (D)	10 mm	18 mm

Tabela 13

Código da experiência	(A) Corrente de soldagem	(B) Diâmetro do arame	(C) Polaridade	(D) Extensão do arame tubular
1	150	1,2	(+)	10
2	200	1,2	(+)	10
3	150	1,6	(+)	10
4	200	1,6	(+)	10
5	150	1,2	(-)	10
6	200	1,2	(-)	10
7	150	1,6	(-)	10
8	200	1,6	(-)	10
9	150	1,2	(+)	18
10	200	1,2	(+)	18
11	150	1,6	(+)	18
12	200	1,6	(+)	18
13	150	1,2	(-)	18
14	200	1,2	(-)	18
15	150	1,6	(-)	18
16	200	1,6	(-)	18

Consumíveis e equipamentos

Metal base

Utilizou-se chapas de aço comercial SAE 1010, com 4,75 mm de espessura, 50mm de largura e 150 mm de comprimento como corpo de prova. A composição química nominal do aço 1010 está apresentada na tabela 6.

Tabela 14- Composição química nominal da chapa de aço.

Aço SAE	C	Mn	P	S
1010	0,090	0,300	0,011	0,009

Metais de adição.

Utilizou-se eletrodos consumíveis, para a soldagem das chapas de aço, do tipo AWS E71T-1 e E71T-5 com diâmetros de 1,20 e 1,60 mm.

Gás de Proteção

O gás de proteção utilizado foi o C25, gás comercial de Argônio com 25% de CO₂. Empregou-se nos ensaios uma vazão de 20 l/min para o bocal de 22 mm, conforme recomendado pelo fabricante dos consumíveis.

Equipamento de soldagem

Utilizou-se um equipamento de soldagem multiprocesso Inversal 300, com fonte de energia inversora.. desenvolvida pelo Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina. Empregou-se este equipamento com característica estática do tipo tensão constante. Os dados técnicos do equipamento segundo o fabricante são apresentados na tabela 15.

Tabela 15

Parâmetro	Valores máximos
Tensão em vazio	56 V
Corrente nominal	300 A
Potência máxima consumida	12 kW
Fator de potência	0,94

Análise do formato do cordão de solda

Procedimento:

Foram medidos os seguintes parâmetros do cordão de solda:

- meia largura do cordão, partindo de 0%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90% da profundidade como mostra a figura 2;
- altura da corcova;

- penetração.

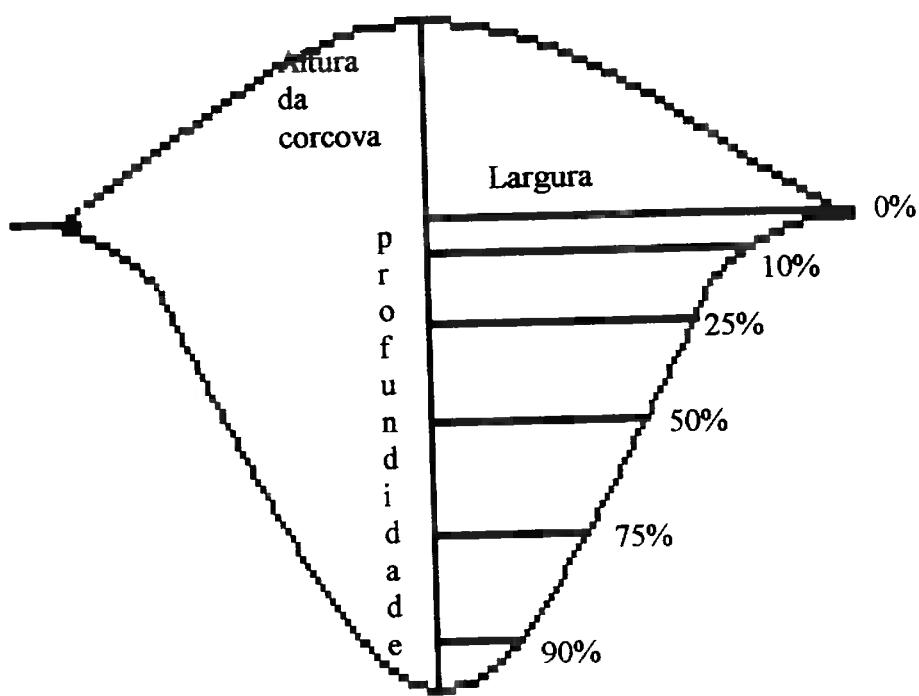


Figura 15: corte transversal de um cordão de solda

Foram analisadas de três a quatro amostras de cada tipo, sendo elas classificadas conforme seus parâmetros de soldagem dados nas tabelas 2 e 5, e em A, B, C e D.

Tabela 16 – medidas do formato do cordão de solda

TIPO	LARGURA	PROF	LARG. 10%P	LARG. 25%P	LARG. 50%P	LARG. 75%P	LARG. 90%P	ALTURA	área(mm ²)
T1 1A	8,46	0,92	7,85	7,15	4,85	2	0,46	1,54	13,0532646
T1 1 B	8,23	1,08	7,54	5,31	2,31	0,85	0,38	1,62	12,623072
T1 1 C	7,46	0,85	5,85	4,62	2,08	1	0,54	1,31	9,06734914
T1 10 A	11,92	1,31	10,15	4,69	2,85	1,54	0,69	2,15	22,6403505
T1 10 C	12,62	1	10,54	8,15	3,62	1,62	0,38	2,08	22,7189162
T1 11 A	8,46	0,77	6,1	4,7	2,6	1,1	0,4	1,46	10,7690714
T1 11 B	8,46	0,69	5,92	5,23	1,69	0,77	0,23	1,54	10,8466465
T1 12 A	11	0,77	9,46	8,08	4,69	1,46	0,31	2,08	19,402937
T1 13 B	7,77	0,69	6,38	5,46	2,77	0,77	0,23	2	13,0539022
T1 14 A	11,54	0,69	10,69	9,46	6,54	1,46	0,31	2,15	20,957357
T1 14 C	10,46	0,77	9,77	6,54	4,31	0,77	0,31	1,92	17,0601708
T1 15 A	7,85	0,38	6,08	5,92	1,85	0,46	0,15	2,23	13,4835131
T1 15 B	7,31	0,69	4,92	4,15	2,62	1,77	1,15	1	6,99974312
T1 15 C	7,77	0,69	4,38	2,85	1,46	0,46	0,31	2,15	13,1618374
T1 16 A	10,5	0,85	8,38	4,77	2,38	1	0,69	2,23	19,0448821
T1 2 A	11,77	1,08	9,54	7,92	6,15	4	2,69	1,69	20,0364179
T1 2 C	11	1,15	6,85	5,77	4,69	3,23	0,77	1,77	18,394052
T1 2 D	11,77	1,31	10,92	8,62	3,62	2,54	1	2,08	23,5586108
T1 3 B	7,92	0,77	5,85	1,92	1,08	0,54	0,23	1,77	11,176482
T1 3 C	8,31	0,77	7,46	5,62	3,54	1,85	0,31	1,69	12,5573639
T1 4 B	11	1,31	9,38	6,46	3,69	2,15	0,92	1,69	18,5054622
T1 4 C	11,15	1,08	10,15	6,69	5	1,31	0,38	1,62	17,342799
T1 5 A	8,15	0,46	6,54	3,62	1,92	0,85	0,38	2,08	13,0738452
T1 5 B	8	0,46	7,08	5,38	2,15	1	0,23	2,15	13,528325
T1 6 B	11,38	0,92	9,54	7,15	4,08	1,38	0,38	2	19,7038784
T1 7 B	7,46	0,54	6,08	4,38	1,92	0,62	0,15	2	11,9058796
T1 7 C	8,69	0,54	6,92	4,69	1,85	0,46	0,08	2	13,56175
T1 8 A	10	0,85	8,38	5,31	3,08	1,23	0,38	1,92	16,2821358
T1 8 B	10,92	0,54	6,62	5,38	2,23	1,77	1,15	1,92	16,2046626
T1 9 A	8,38	0,92	7	5,23	3	1,23	0,38	1,69	12,8491337
T1 9 B	8,92	1,23	5,15	3,54	2	0,92	0,46	1,85	14,4909752

T1 9 C	9,08	1	6,23	4	1,92	0,69	0,38	1,85	14,2532236
T5 1 A	9,62	0,38	8,38	8,08	4,23	1,77	0,31	2,15	16,0532711
T5 11 C	11	2,08	10,46	8,69	6,23	2,92	0,69	2,38	30,2089194
T5 12 A	11,23	1,54	10	8,31	6,62	4,23	1,77	2,31	27,430932
T5 12 B	11,62	1,62	10,62	9,38	4,38	2	0,77	2,85	31,8063554
T5 13 A	7,46	1	7	6,62	4	1,77	0,31	2	14,4543893
T5 13 B	8	0,85	7,08	5,69	2,54	1,23	0,46	2	14,0311259
T5 13 C	7,92	0,77	6,77	5,77	3,46	2,23	0,92	1,92	13,5396236
T5 14 A	10,15	0,92	9,54	8,31	6,54	3,38	0,31	2,15	20,2987277
T5 14 B	9,93	1,62	9,46	8,31	5,62	3,15	1,08	2,54	26,5988774
T5 14 D	10,77	1,54	9,77	8,69	6,23	3,46	0,85	2,54	28,0363287
T5 15 A	6	0,54	5,38	3,92	1,77	0,92	0,38	1,85	9,24373261
T5 15 C	7,31	0,69	6,15	5,23	3,38	1,38	0,31	1,85	11,7574412
T5 15 D	7,77	0,77	7,08	5,08	2,31	0,92	0,54	1,69	11,4734032
T5 16 A	9,23	1,15	7,85	6,77	4,92	2,62	0,62	2,46	21,2792402
T5 16 B	9,46	1,54	9	8,38	6,9	6,3	5,9	2,54	27,8114101
T5 3 A	8,85	1,08	7,62	6,31	4,23	2,23	0,46	1,92	16,2929699
T5 3 B	5,61	0,54	3,92	2,38	1,54	0,62	0,38	1,54	7,06236091
T5 3 C	7,62	0,69	6,85	5,77	2,54	0,69	0,38	1,92	12,4389381
T5 4 A	10,54	1,38	9,38	8,62	6,77	4,85	1,62	2,54	27,3413094
T5 4 B	9,38	1,23	7,69	6,38	5,15	1,69	0,69	2,38	21,0511847
T5 4 C	11,62	1,77	10,69	8,85	7,08	2,77	0,92	2,15	27,9565905
T5 5 B	5,46	0,69	4,85	4,15	2,46	1,08	0,23	2	9,78856988
T5 6 A	9,62	1,38	8,92	8	7,31	4,92	2,15	2,46	25,2618355
T5 6 B	8	1,46	7,62	7,46	6,15	4	1,23	2,46	21,8718236
T5 6 C	7,46	1,38	7	6,62	6	4,69	2,92	2,38	20,2252139
T5 9 A	9,77	1,08	8,08	5,31	2,85	0,85	0,31	2,31	19,4445304

Dificuldades Encontradas

O ataque químico feito nas amostras foi problemático pois foi difícil escanear para depois fazer as medidas. Para que as medidas fossem feitas, as figuras escaneadas tiveram que ser trabalhadas no computador para que sua forma ficasse bem definida.

Discussão

Os resultados obtidos nos forneceram informações que nos indicam a variação do formato do cordão de solda com os parâmetros utilizados.

Tabela 17 – medidas do formato do cordão de solda

TIPO T1	LARGURA	PROF	LARG.10%P	LARG.25%P	LARG.50%P	LARG.75%P	LARG.90%P	ALTURA	Área(mm ²)
1	8,1	1,0	7,1	5,7	3,1	1,3	0,5	1,5	11,6
2	11,5	1,2	9,1	7,4	4,8	3,3	1,5	1,8	20,7
3	8,2	0,7	6,9	4,3	2,8	1,4	0,4	1,7	11,7
4	11,1	1,2	10,1	7,6	4,2	1,9	0,8	1,7	18,1
5	8,2	0,5	7,0	4,7	2,3	0,9	0,3	2,1	13,3
6	11,2	0,8	9,7	7,3	4,4	1,1	0,4	2,0	18,9
7	8,0	0,5	7,0	5,2	3,0	0,8	0,2	2,0	12,8
8	10,3	0,7	8,4	6,6	2,9	1,2	0,6	2,0	16,9
9	8,8	1,1	6,1	4,3	2,3	0,9	0,4	1,8	13,9
10	12,3	1,2	10,3	6,4	3,2	1,6	0,5	2,1	22,7
11	8,4	0,7	6,5	4,7	2,3	0,9	0,3	1,6	11,5
12	11,2	1,1	9,6	6,4	3,8	1,8	0,6	1,9	19,6
13	7,8	0,6	5,9	4,9	1,9	0,6	0,2	2,1	13,1
14	11,3	0,7	10,1	7,7	5,0	1,5	0,6	2,2	20,0
15	7,6	0,6	5,1	4,3	2,0	0,9	0,5	1,8	11,2
16	10,5	0,9	8,4	4,8	2,4	1,0	0,7	2,2	19,0

TIPO T2	LARGURA	PROF	LARG.10%P	LARG.25%P	LARG.50%P	LARG.75%P	LARG.90%P	ALTURA	Área(mm ²)
1	9,6	0,4	8,4	8,1	4,2	1,8	0,3	2,2	16,1
2	10,6	1,6	10,0	9,2	7,6	5,5	2,7	2,3	27,6
3	7,4	0,8	6,1	4,8	2,8	1,2	0,4	1,8	11,9
4	10,5	1,5	9,3	8,0	6,3	3,1	1,1	2,4	25,4
5	6,4	0,6	5,6	4,8	2,8	1,5	0,5	1,9	10,3
6	8,4	1,4	7,8	7,4	6,5	4,5	2,1	2,4	22,5
7	5,5	0,7	4,8	3,9	2,8	1,5	0,8	1,6	8,0
8	9,1	1,4	8,7	8,0	6,6	4,2	2,2	2,3	22,7
9	9,8	1,1	8,1	5,3	2,9	0,9	0,3	2,3	19,4
10	12,1	1,6	11,3	10,0	7,5	5,3	3,4	2,7	34,1
11	9,9	1,6	9,1	7,4	5,4	2,8	0,9	2,0	22,6
12	11,4	1,6	10,3	8,8	5,5	3,1	1,3	2,6	29,6
13	7,8	0,9	7,0	6,0	3,3	1,7	0,6	2,0	14,0
14	10,3	1,3	9,6	8,5	6,3	3,7	1,3	2,4	25,3
15	7,0	0,7	6,2	4,7	2,5	1,1	0,4	1,8	10,8
16	9,3	1,3	8,4	7,6	5,9	4,5	3,3	2,5	24,5

Os resultados a seguir estão dadas de acordo com a numeração da tabela 5, sendo que os dados de base são o de número 1 e os demais são comparações com este, que possui: corrente de soldagem 150 A ; diâmetro do arame 1,2 mm; polaridade positiva; extensão do arame tubular 10mm.

T 1:

-2: aumento na corrente de soldagem:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
2	200	1,2	(+)	10
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
2	42	20	20	78

-3: aumento do diâmetro do arame:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
3	150	1,6	(+)	10
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
3	0	-30	13	0

-4: aumento da corrente e do diâmetro do arame:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
4	200	1,6	(+)	10
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
4	37	20	13	56

-5: polaridade negativa:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
5	150	1,2	(-)	10
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
5	0	-50	40	15

-6: aumento da corrente e polaridade negativa:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
6	200	1,2	(-)	10
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
6	38	-20	33	63

-7: aumento do diâmetro do arame e polaridade negativa:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
7	150	1,6	(-)	10
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
7	0	-50	33	10

-8: aumento da corrente e do diâmetro do arame e polaridade negativa:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
8	200	1,6	(-)	10
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
8	27	-30	33	46

-9: aumento da extensão do arame tubular:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
9	150	1,2	(+)	18
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
9	9	0	20	20

-10: aumento da corrente e da extensão do arame tubular:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
10	200	1,2	(+)	18
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
10	52	20	40	96

-11: aumento do diâmetro do arame e da extensão do arame tubular:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
11	150	1,6	(+)	18
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
11	9	-30	0	0

-12: aumento da corrente, do diâmetro do arame e da extensão do arame tubular:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
12	200	1,6	(+)	18
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
12	38	0	27	69

-13: polaridade negativa e aumento da extensão do arame tubular:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
13	150	1,2	(-)	18
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
13	-4	-40	40	13

-14: aumento da corrente, polaridade negativa e aumento da extensão do arame tubular:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
14	200	1,2	(-)	18
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
14	40	-30	47	72

-15: aumento do diâmetro do arame, polaridade negativa e aumento da extensão do arame tubular:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
15	150	1,6	(-)	18
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
15	-6	-4	20	-3

-16: aumento da corrente, do diâmetro do arame, da extensão do arame tubular e polaridade negativa:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
16	200	1,6	(-)	18
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
16	30	0	47	64

T5:

-2: aumento na corrente de soldagem:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
2	200	1,2	(+)	10
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
2	11	300	0	71

-3: aumento do diâmetro do arame:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
3	150	1,6	(+)	10
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
3	-23	100	-18	-26

-4: aumento da corrente e do diâmetro do arame:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
4	200	1,6	(+)	10
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
4	9	275	9	58

-5: polaridade negativa:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
5	150	1,2	(-)	10
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
5	-33	50	-14	-36

-6: aumento da corrente e polaridade negativa:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
6	200	1,2	(-)	10
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
6	-13	250	9	40

-7: aumento do diâmetro do arame e polaridade negativa:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
7	150	1,6	(-)	10
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
7	-43	75	-27	-50

-8: aumento da corrente e do diâmetro do arame e polaridade negativa:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
8	200	1,6	(-)	10
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
8	-5	250	0	41

-9: aumento da extensão do arame tubular:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
9	150	1,2	(+)	18
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
9	2	175	0	21

-10: aumento da corrente e da extensão do arame tubular:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
10	200	1,2	(+)	18
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
10	26	300	23	111

-11: aumento do diâmetro do arame e da extensão do arame tubular:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
11	150	1,6	(+)	18
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
11	3	300	-9	40

-12: aumento da corrente, do diâmetro do arame e da extensão do arame tubular:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
12	200	1,6	(+)	18
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
12	19	300	18	84

-13: polaridade negativa e aumento da extensão do arame tubular:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
13	150	1,2	(-)	18
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
13	-19	125	-9	-13

-14: aumento da corrente, polaridade negativa e aumento da extensão do arame tubular:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
14	200	1,2	(-)	18
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
14	7	225	9	57

-15: aumento do diâmetro do arame, polaridade negativa e aumento da extensão do arame tubular:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
15	150	1,6	(-)	18
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
15	-27	75	-18	-33

-16: aumento da corrente, do diâmetro do arame, da extensão do arame tubular e polaridade negativa:

Código da experiência	Corrente de soldagem	Diâmetro do arame	Polaridade	Extensão do arame tubular
16	200	1,6	(-)	18
Código da experiência	variação da largura %	variação da penetração %	variação da altura %	variação da área %
16	-3	225	14	52

Conclusões

Os cordões de solda feitos com arame tubular de revestimento rutilico (T1) variaram da seguinte forma:

A largura aumenta com a corrente e com a extensão do arame tubular. Quando se combinam polaridade negativa e aumento da extensão do arame tubular e baixa corrente a largura diminui.

A penetração aumenta com a corrente, diminui com o aumento do diâmetro do arame, diminui com a polaridade negativa;

A altura aumenta com a corrente, com o diâmetro e com a polaridade negativa e com o aumento da extensão do arame tubular.

A área aumenta com a corrente, com a polaridade negativa e com ao aumento da extensão do arame tubular.

Os cordões de solda feitos com arame tubular de revestimento simples (T5) variam da seguinte forma:

A largura aumenta com a corrente, diminui com o aumento do diâmetro do arame, diminui com a polaridade negativa e aumenta com o aumento da extensão do arame tubular.

A penetração aumenta com a corrente, com o diâmetro do arame, com a polaridade negativa e com o aumento da extensão do arame tubular.

A altura diminui com o aumento do diâmetro do arame, com a polaridade negativa, aumenta com a corrente.

A área aumenta com a corrente, diminui com o aumento do diâmetro do arame, diminui com a polaridade negativa, aumenta com o aumento da extensão do arame tubular.

Bibliografia

- 1) Snape,E.; Church, N.L. - "Microduplex processing of low alloy steels". *J. of Metals*,24(1):23-29,1972.
- 2) Suutala, N.; Takalo,T.; Moisio,T. - "The relationship between solidification and microstructure in austenitic and austenitic-ferritic stainless steel welds" . *Met. Trans.*, 10A(4):512-514,1979.
- 3) Takalo,T. ; Suutala,N.; Moisio,T. - "Austenitic solidification mode in austenitic stainless steel welds". *Met. Trans.* 10A(8):1173-1181,1979.
- 4) Lippold, J.C.; Savage, W.F. - "Solidification of austenitic stainless steel weldments : part II - The effect of alloy composition on ferrite morphology". *Weld.J.*, 59(2):48s-58s,1980.
- 5) Brandi, S.D. - "Estudo da soldabilidade do aço inoxidável duplex DIN W. Nr. 1.4462 (UNS S31803), tese de doutoramento, EPUSP, 1992, 265 pgs.
- 6) Ramirez. Londoño, A.J.; Brandi, S.D. - "Efeito da composição química do gás de proteção na soldagem de aço inoxidável duplex UNS S31803".IN: *Anais do XXII Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem*, Blumenau, SC, 30/07 a 02/08/96, pg. 277 - 287.
- 7) Brandi, S.D.; Padilha, A.F. - "Precipitação de fase sigma em aço inoxidável duplex". IN : *Anais de Congresso, II Seminário Brasileiro INOX 90*, ABM (Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais), 26-28 nov., 1990, São Paulo, SP, pg. 135-152.
- 8) Rechemberg, H.R.; Brandi, S.D.; Padilha, A.F. - "Aplicação de espectroscopia Mössbauer no estudo da formação da fase α' nos aços inoxidáveis duplex". In: *Anais do Seminário de Ciência dos Materiais, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*, julho de 1993, São Paulo, SP, pg. 477-486.
- 9) S. D. Brandi; A.F. Padilha; S. Wolynec - "Corrosion resistance of GTAW and EBW welded joints of DIN W. Nr. 1.4462 (UNS S31803): effect of post-weld-heat treatment". IN: *Offshore Mechanics and Artic Engineering, OMAE 96*; Florença, Itália; 18 a 21 de junho de 1996; pg. 309-322.
- 10) van Nassau, M.L. - "Le soudage des aciers austenito-ferritiques au Cr-Ni-Mo". *Soud. Tech. Connexes*, 37(1/2):66-70,1983.
- 11) Bonnefois, S.B.; Soulignac, P.; Catelin, D. - "Soudage des aciers inoxydables destinés aux milieux corrosifs soués". *Soud. Tech. Connexes*, 44(3/4):63-71, 1990.
- 12) Brandi, S.D. - "Transferência metálica em soldagem com arco elétrico". IN: "Soldagem: processos e metalurgia", coord.: E. Wainer, S.D.Brandi e F.D.H. de Mello, pg. 9-30, 1992.
- 13) Brandi, S.D; Almeida, A. C; Silva, F.L.T.; Pirani, J.L.; Ramalho, J.P.; Poepcke, J.S.; Gimenes, L.; Clara, M.S.; Tremonti, M.A.; Murakami, M.M.; Fantazzini, M.L.; Prisco, M.; Fernandes, P.E.; Brito, P.; Andreucci, R.; Joaquim, R. – "Soldagem" . Org. Sielma Ziedas e Ivanisa Tatini. São paulo, 1997. 553p. (Coleção Tecnologia Senai).