



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

ESTRADO

Otimização do Processo de Fabricação
de Perfis de Aço Carbono Soldados

Para fins Estruturais, Através do Processo de
Solda SAS – Soldagem a Arco Submerso.

1210001500



Ilha Solteira - SP





UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PERFIS DE AÇO CARBONO SOLDADOS PARA FINS ESTRUTURAIS, ATRAVÉS DO PROCESSO DE SOLDA SAS – SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO

Gilson Pereira dos Reis

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**

Orientador: PROF. DR. Ruís Camargo Tokimatsu

Ilha Solteira, 20 de Dezembro de 2001

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da FEIS/UNESP

R375o Reis, Gilson Pereira dos
Otimização do processo de fabricação de perfis de aço carbono soldados para fins estruturais, através do processo de solda SAS – Soldagem a Arco Submerso / Gilson Pereira dos Reis. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2001
xix, 73 p. il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2001

Orientador: Ruís Camargo Tokimatsu

Bibliografia: p. 66-68

1. Solda e soldagem. 2. Aço – Estruturas. 3. Arco de soldagem submersa.

“Otimização do Processo de Fabricação de Perfis de Aço Carbono Soldados para Fins Estruturais, Através do Processo de Solda SAS – Soldagem a Arco Submerso”

Gilson Pereira dos Reis

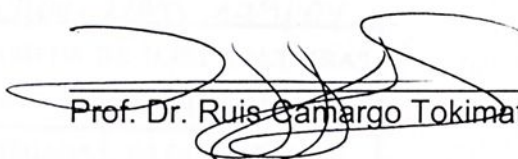
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE

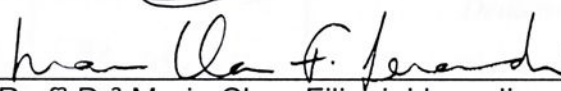
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

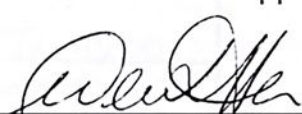
NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. João Antonio Pereira – Coordenador

COMISSÃO EXAMINADORA:


Prof. Dr. Ruis Camargo Tokimatsu - Orientador


Profª Drª Maria Clara Filippini Ierardi


Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella

Ilha Solteira – SP, dezembro de 2001

1210001500



Proc. 063/04 - NPD 129/04

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
02.08.04	31.08.04
REGISTRADO POR	TOMBO
Ailza	Tc. 1500
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Ilustração Autor R\$ 10,00	R3750

*Dedico este trabalho a
a minha esposa Marisa*

CO sup 227821
sys 56349

30505003

AGRADECIMENTOS

Ao criador por ter me dado a serenidade e determinação para a realização deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Ruís Camargo Tokimatsu, orientador deste trabalho, meus sinceros agradecimentos, pela paciência, dedicação, amizade e pela excelente orientação com a qual muito aprendi e evolui tecnicamente;

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da FEIS/UNESP, que de uma maneira ou de outra colaboraram para a realização deste trabalho;

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” UNESP – Campus de Ilha Solteira, pela minha formação acadêmica;

A minha família, e em especial a minha esposa Marisa, pelo estímulo e pela compreensão da minha ausência em determinados momentos, a meu pai e amigo Nicolau e principalmente a minha mãe Juracy pelo incentivo e apoio.

Sumário

Ficha Catalográfica	ii
Aprovação	iii
Oferecimento	iv
Agradecimentos	v
Sumário	vi
Índice de Tabelas	ix
Índice de Figuras	xi
Simbologia e Abreviações	xvi
Resumo	xviii
Abstract	xix
 CAPÍTULO I INTRODUÇÃO	 1
 CAPÍTULO II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 3
2.1 - Soldagem com arco submerso	3
2.1.1 - Variáveis de processo de SAS	4
2.1.2 – Consumíveis	6
2.1.2.1 – Tipos de fluxos	7
2.1.2.2 – Eletrodos	9
2.1.3 – Variantes do processo SAS	9
2.2 – Microestrutura do metal de solda de aços ferríticos	10
2.2.1 – Efeitos da microestrutura na tenacidade do metal de solda ..	16
2.2.1.1 – Tamanho de grão	17
2.2.1.2 – Inclusões não metálicas	18
2.2.1.3 – Produtos de transformação	18
2.3 – Aporte de calor	19
2.4 – Perfil soldado	19
2.4.1 – Custos de fabricação	22
2.5 – Ensaio de fratura	23
2.6 – Descontinuidades geradas pelo processo	24



CAPÍTULO III	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 – Máquina de solda		26
3.2 – Materiais e procedimentos de soldagem		28
3.2.1 – Combinação arame-eletrodo e fluxo		28
3.2.2 – Metal de base		29
3.3 – Procedimento de soldagem		30
3.4 – Avaliação da ZAT e metal de solda		32
3.5 – Ensaios mecânicos		32
3.5.1 – Dobramento		32
 CAPÍTULO IV	 RESULTADOS	 33
4.1 – Avaliação da penetração de solda em função da alteração de variáveis na junta soldada		33
4.1.1 – Etapa 1 de ensaios de soldagem à SAS – Metal de base com espessura máxima de 25,4 mm		33
4.1.2 – Etapa 2 de ensaios de soldagem à SAS		36
4.2 – Caracterização Microestrutural por Intermédio de Microscopia Óptica		47
4.2.1 – Análise micrográfica em uma junta soldada com penetração parcial		47
4.2.2 – Análise micrográfica de uma junta soldada com penetração total		49
4.3 – Microdureza Vickers		51
4.3.1 – Junta soldada com penetração parcial		52
4.3.2 – Junta soldada com penetração total		53
4.4 – Insumo de Calor		53
4.5 – Tenacidade ao Impacto		54
4.6 – Ensaio de Dobramento		55
4.7 – Análise Qualitativa e quantitativa para junta soldada com penetração parcial		56
4.8 – Melhores Parâmetros Encontrados		56



CAPÍTULO V	DISCUSSÃO	57
5.1 – Penetração da solda em função da alteração de variáveis na junta soldada		57
5.2 – Análise metalográfica		58
5.3 – Dureza		58
5.4 – Insumo de calor		59
5.5 – Tenacidade ao impacto		62
5.6 – Ensaio de dobramento		62
5.7 – Custos		62
CAPÍTULO VI	CONCLUSÕES	63
SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS		65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		66
APÊNDICE A	CLASSIFICAÇÃO MICROESTRUTURAL	69



ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1:	Faixa de corrente indicada por diâmetro de eletrodo [05]	04
Tabela 2-2:	Composição química e classificação AWS dos principais tipos de eletrodos disponíveis no Brasil.....	09
Tabela 2-3:	Classificação de perfil soldado quanto a sua massa por metro linear, para efeito de composição de custos de produção.....	22
Tabela 2-4:	Custos de produção do perfil soldado – Fonte ICEC Indústria de Construção Ltda.	23
Tabela 3-1:	Composição química do material utilizado para o arame-eletrodo	28
Tabela 3-2:	Composição química do material utilizado para análise química e propriedades mecânicas do Fluxo.....	29
Tabela 3-3:	Composição química do material utilizado como metal de base	29
Tabela 4-1:	Resultados obtidos para penetração da solda em função dos parâmetros variáveis.	34
Tabela 4-2:	Resultados obtidos para soldagem SAS, quanto a penetração do metal de solda em função dos parâmetros variáveis de soldagem.....	37
Tabela 4-3:	Dureza Vickers em uma junta soldada com penetração parcial	52
Tabela 4-4:	Dureza Vickers em uma junta soldada com 100% de penetração de Solda	53
Tabela 4-5:	Valores medidos e médias de energia de impacto Charpy V no metal de adição usado nos corpos de prova das juntas em ângulo tipo “T”	54



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1:	O arco elétrico permanece sob uma camada de fluxo, que protege o metal de solda de contaminações. O fluxo fundido sobre-nada a poça de solda, desoxidando e limpando o metal de solda líquida e, formando uma escória protetora sobre o metal depositado.....	03
Figura 2-2:	Figura 2-2: ângulo de deslocamento ou de inclinação do eletrodo e ângulo de trabalho	06
Figura 2-3:	Figura 2-2: Microestrutura do metal de solda mostrando os vários constituintes microestruturais [09].....	13
Figura 2-4:	Fluxograma para classificação dos constituintes microestruturais do metal de solda [09]	14
Figura 2-5a:	Comparação entre Ferrita Acicular (AF) e Ferrita Poligonal (PF)	15
Figura 2-5b:	Comparativo entre Ferrita com Segunda Fase Alinhada FS(A) e Ferrita Acicular (AF)	15
Figura 2-5c:	Diferenciação entre agregado de ferrita (FC) e ferrita acicular (AF)	16
Figura 2-6:	Seção transversal de um perfil soldado tipo I	19
Figura 2-7:	Fluxograma da fabricação de perfil soldado.....	21
Figura 2-8:	Modelo esquemático de aplicação de força, no ensaio de fratura	23
Figura 3-1:	Máquina de solda SAS utilizada	27
Figura 3-2:	Aspiradores para reaproveitamento de fluxo não fundido durante o processo de soldagem	28



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-3:	Corpo de prova a ser soldado, junta em ângulo sem chanfro ou abertura para raiz de solda e modelo esquemático do corpo de prova com o dimensional	30
Figura 3-4:	Modelo esquemático de uma junta em ângulo soldada, para auxiliar no entendimento da equação 3-1.....	31
Figura 3-5:	Desenho esquemático do ensaio de fratura. (a) representa uma junta soldada apenas de um lado, enquanto (b) representa uma junta soldada de ambos os lados	32
Figura 4-1a:	Evolução gráfica da penetração de solda, variação da corrente enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 27 Volts; velocidade de soldagem de 800 mm / min; ângulo de soldagem de 45°	34
Figura 4-1b:	Evolução gráfica da penetração de solda, variação da velocidade de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 27 Volts; corrente de 950 ampères; ângulo de soldagem de 45°	35
Figura 4-1c:	Evolução gráfica da penetração de solda, variação do ângulo de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 27 Volts; velocidade de soldagem de 700 mm / min; corrente de 950 ampères.....	36
Figura 4-2:	Evolução gráfica da penetração de solda, variação da corrente de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 27 Volts; velocidade de 1000 mm/min	38



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-3:	Evolução gráfica da penetração de solda, variação da corrente de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 27 Volts; velocidade de 1100 mm/min.....	39
Figura 4-4:	Evolução gráfica da penetração de solda, variação da velocidade de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 27 Volts; corrente de 900 ampères; ângulo de soldagem de 45°.....	40
Figura 4-5:	Evolução gráfica da penetração de solda, variação da corrente de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 27 Volts; velocidade de 1200 mm/min	41
Figura 4-6:	Evolução gráfica da penetração de solda, variação da velocidade de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 26,5 Volts; corrente de 900 ampères.....	42
Figura 4-7:	Evolução gráfica da penetração de solda, variação da corrente de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 26 Volts; velocidade de 1200 mm/min	43
Figura 4-8:	Evolução gráfica da penetração de solda, variação da velocidade de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 26 Volts; corrente de 850 ampères.....	44
Figura 4-9:	Evolução gráfica da penetração de solda, variação da corrente de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 27 Volts; velocidade de 1100 mm/min.....	45
Figura 4-10:	Evolução gráfica da penetração de solda, variação da velocidade de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 26,5 Volts; corrente de 900 ampères;.....	46



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-11: Corpo de Prova T 06 . Preparado para análise micrográfica. Apresenta 90 % de penetração do metal de adição , aba de 25,4 mm e alma de 12,5 mm. Condições de soldagem: 950 A; 700 mm/min; 27 V; ângulo do eletrodo 40°	47
Figura 4-12: Fotomicrografia característica do metal de base(aba). Matriz ferrítica com grãos de perlita alinhados com o sentido de laminação (Cond.: 950A / V700 / AT40).	47
Figura 4-13: Fotomicrografia característica do metal de Solda Observa-se região de grãos Colunares (Cond.: 950A / V700 / AT40)	48
Figura 4-14: Fotomicrografia característica do metal de solda. Na região central observa-se uma faixa(contorno de grão) de ferrita de contorno de grão. No lado esquerdo e direito observa-se grãos de ferrita poligonal e acicular (Cond.: 950A / V700 / AT40).....	48
Figura 4-15: Fotomicrografia característica da interface metal de solda/ZAT. Observa-se no lado esquerdo inferior a região do metal de solda (grãos colunares). No lado direito a ZAT contendo ferrita com segunda fase alinhada (Cond.: 950A / V700 / AT40).....	49
Figura 4-16: Corpo de Prova Cp 07 B. Preparado para análise micrográfica. Apresenta 100% 100 % de penetração do metal de adição, aba de 9,5 mm e alma de 8,0 mm. Condições de soldagem: 900 A; 1000 mm/min; 26,5 V; ângulo do eletrodo 40°.....	49
Figura 4-17: Fotomicrografia característica do metal de base (Mesa ou Aba)	50
Figura 4-18: Fotomicrografia característica do metal de solda (Mesa ou Aba)	50
Figura 4-19: Fotomicrografia característica do metal de Solda.....	51



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-20: Direção segundo a qual foram realizadas as medidas de dureza	51
Figura 4-21: (a) Representa a localização dos pontos onde foram verificadas as microdureza, o corpo de prova utilizado é o T 06, visto na figura 4-11. O distanciamento entre os pontos é de 5 mm. (b) Gráfico para dureza Vickers obtido para a junta soldada cuja a penetração foi parcial.....	52
Figura 4-22: (a) Representa a localização dos pontos onde foram verificadas as microdureza, o corpo de prova utilizado é o CP 07B, visto na figura 4-16. O distanciamento entre os pontos é de 5 mm. (b) Gráfico para dureza Vickers obtido para a junta soldada, cuja a penetração foi total.....	53
Figura 4-23: Ensaio de Dobramento em um perfil tipo T. Espessura das chapas do corpode prova 8 mm e 10 mm.....	55
Figura 4-24: Ensaio de dobramento, apresentando deformação sofrida pelo corpo de prova após carregamento máximo.....	55
Figura 5-1: Avaliação do metal de solda, considerando a porcentagem de AF e o insumo de calor utilizado, em uma junta soldada com aço baixo carbono	59
Figura 5-2: Avaliação do metal de solda, considerando sua dureza e o insumo de calor utilizado, em uma junta soldada com aço baixo carbono	60
Figura 5-3: Fotomicrografias do metal de solda ferrítico mostrando os constituintes microestruturais (classificação IIW).	60
Figura 5-4: Fotomicrografias ótica mostrando microconstituintes presentes no metal de solda	61



SIMBOLOS E ABREVIACOES

Símbolo	Descrição
SAS	Soldagem a arco submerso
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CC-	Corrente contínua polaridade negativa
CC+	Corrente contínua polaridade positiva
C	Carbono, elemento químico
AWS	American Welding Society
AF	Ferrita Acicular
FC	Agregado Ferrita Carboneto
FS(A)	Ferrita com Segunda Fase Alinhada
FS(NA)	Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada
IIW	Internal Institute of Welding
M	Martensita
P	Perlita
PF(G)	Ferrita Primária de Contorno de Grão
PF(I)	Ferrita Primária Poligonal Intragranular
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Fase Centrada
MO	Microscopia ptica
CS	Coluna Soldada
CVS	Coluna ou Viga Soldada
VS	Viga Soldada
VSA	Viga Soldada Assimétrica
V	Volts
I	Intensidade de Corrente
v	velocidade de soldagem
ZAT	Zona Afetada Termicamente
Cpd	Corpo de Prova
ME	Microestrutura



SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

END	Ensaio Não Destrutivo
WF	Ferrita de Widmanstatten
σ_E	Tensão de Escoamento
σ_i	Tensão de Atrito
d	Diâmetro do Grão
b_f	Largura da Mesa ou Aba de um Perfil Soldado
t_f	Espessura da Mesa ou Aba de um Perfil Soldado
t_w	Espessura da Alma de um Perfil Soldado
e_c	Espessura do Cordão de Solda ou Perna de Solda
h	Altura da Alma de um Perfil Soldado
h_l	Altura Total de um Perfil Soldado



RESUMO

REIS, P.G.(2001). Otimização do Processo de Fabricação de Perfis de Aço Carbono Soldados Para fins Estruturais, Através do Processo de Soldagem SAS – Soldagem a Arco Submerso. Ilha Solteira, 2001, 73p.Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Este trabalho consiste em uma otimização do processo de fabricação de perfis de aço carbono soldados para fins estruturais, através do processo de solda a arco submerso. Inicialmente variando-se os parâmetros de soldagem: intensidade de corrente, velocidade de soldagem e ângulo do eletrodo, de forma a conferirem às juntas soldadas, soldas com alto poder de penetração no metal base, mesmo quando as juntas não se apresentam com chanfros, permanecendo-se isentas de descontinuidades, isto quando aplicadas a uma junta em ângulo do tipo “T”. Uma preocupação neste trabalho foi com a zona termicamente afetada dos perfis no que se diz respeito à resistência mecânica, fragilização e microestrutura.

Palavras-chave: soldas, otimização, parâmetros de soldagem, zona afetada termicamente, microestrutura



ABSTRACT

REIS, P.G. (2001). Optimization of the process of producing welded carbon steel beams to be used in structures, through the process SAW (Submerged Arc Welding). Ilha Solteira, 2001, 73p. Composition (Mastership) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

This study consists in an optimization of the process of producing welded carbon steel beams to be used in structures, through the process of submerged arc welding. At first alternating the standards of welding: amps, travel speed and the work angle, enable the weld joints, welds with strong capability of penetration in the base metal, even when the joints are not shown with grooves, keeping it free of defects. That when it's applicated to a corner joint. One important point in the study is the Heat-Affected Zone of the beams related to the mechanical resistance, fragility and microstructure.

Key words: welds, optimization, standard parameter for welding, Heat-Affected Zone, microstructure.



CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

São vários os processos de soldagem conhecidos e aplicados como processo de fabricação, sendo estes amplamente utilizados em diversos setores industriais tendo, na maioria das vezes, uma influência significativa no custo e no desempenho do produto. Dependendo da complexidade da construção soldada, os métodos de controle requeridos podem abranger as atividades de projeto, de seleção de materiais, de fabricação e de inspeção, a fim de garantir a qualidade especificada do produto. No entanto muitos desses controles podem ser executados a partir da escolha e monitoramento das variáveis de processo adotadas para os trabalhos de soldagem. Estas variáveis determinam o tamanho do cordão de solda, penetração, diluição, assim como o surgimento de descontinuidades como mordeduras, trincas, inclusões e porosidade. Portanto torna-se importante estudá-las separadamente, de forma a adquirir o conhecimento necessário ao interferir ou definir um procedimento de soldagem [01, 02]. Por outro lado a utilização da solda de filete em perfis soldados tipo I ou H é crescente em nosso país devido à utilização cada vez maior deste tipo de perfis na construção de edifícios industriais, comerciais e residenciais a partir de estruturas metálicas, o que confere uma opção aos construtores, quanto à aspectos como: custos, redução de cronograma de fabricação e montagem, precisão nas etapas de montagem, canteiros de obras com menor número de andaimes e escoras. No entanto os custos de obtenção dos perfis soldados ainda são elevados, quando comparado com perfis de aço carbono laminado ou estruturas em concreto, sendo necessários estudos que possibilitem a otimização dos processos de obtenção do perfil soldado. As soldas de composição dos perfis de aço carbono tipo I ou H, podem ser otimizadas, quanto à penetração no metal de base e geometria de cordão de forma a obter-se uma melhor qualidade e melhor aproveitamento dos consumíveis muitas vezes utilizados em excesso para correção de descontinuidades. Esta otimização pode tornar este tipo de perfil mais competitivo, quanto à qualidade e aos custos, no mercado da construção civil, principalmente na construção de edifícios de múltiplos andares e pontes, até então dominados pelas construções em “concreto armado”, uma vez que perfis em aço carbono laminados na forma I ou H, de custo menor que os soldados, no mercado nacional são ofertado em pequena



variedade de formas (altura e/ou largura) e espessuras, ao contrário dos países europeus, Japão e Estados Unidos onde a oferta destes mesmos perfis laminados é da ordem de 600 tipos distintos, contra pouco mais que uma dezena ofertado pelo mercado nacional [03]. Em muitas situações construtivas, a estrutura metálica a partir de perfis do tipo I ou H oferece soluções que o concreto não pode oferecer, como em galpões comerciais e industriais onde há a necessidade de vencer grandes vãos com uma estrutura leve. E frente às dificuldades com o perfil em aço carbono tipo I ou H laminado, buscou-se através deste trabalho a ICEC Indústria de Construção Ltda, empresa nacional do ramo metalúrgico, juntamente com o Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp, desenvolver o conhecimento necessário para ter agregado ao seu produto final, tecnologia e qualidade a um custo menor, oferecendo este produto como opção ao mercado da construção civil.

Partindo do princípio de que o processo de solda mais indicado para a produção de perfil soldado em aço carbono é o processo de solda a arco submerso (SAS) devido às possibilidades quanto à alta taxa de deposição e alta velocidade de soldagem com o processo inteiramente automatizado, os trabalhos foram desenvolvidos em uma máquina automática de modo a se conseguir o máximo aproveitamento da mesma quanto aos seus recursos e potencialidade. Para isto, foram confeccionados e soldados corpos de provas visando os seguintes objetivos:

- encontrar as principais variáveis de processo para se obter um melhor aproveitamento dos consumíveis de solda;
- obter o máximo de penetração do metal de adição em uma junta em ângulo do tipo “T”, sem a necessidade da realização de chanfro na chapa de alma;
- Analisar a zona termicamente afetada devido às soldas;
- Estudar e determinar a faixa ótima de operação da máquina de soldagem empregada.



CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Soldagem a Arco Submerso

O processo de soldagem a arco submerso (SAS) produz coalescência* de metais, aquecendo-os com um arco elétrico comum desenvolvido entre um eletrodo metálico e o metal de base. O arco elétrico e o metal de solda estão submersos em uma cobertura de fluxo granular que os protege da contaminação atmosférica. O fluxo é continuamente alimentado por gravidade à frente (ou concentricamente) do eletrodo e distribuído sobre o metal de base. Durante a soldagem, o calor produzido pelo arco elétrico funde o arame, uma parte do fluxo e do metal de base, formando a poça de fusão sob uma camada de escória líquida, conforme mostra figura 2-1. À medida que o arco elétrico se desloca, o metal de solda e o fluxo resfriam e se solidificam, formando o cordão de solda protegido por uma camada sólida denominada escória de um resfriamento brusco [01, 04].

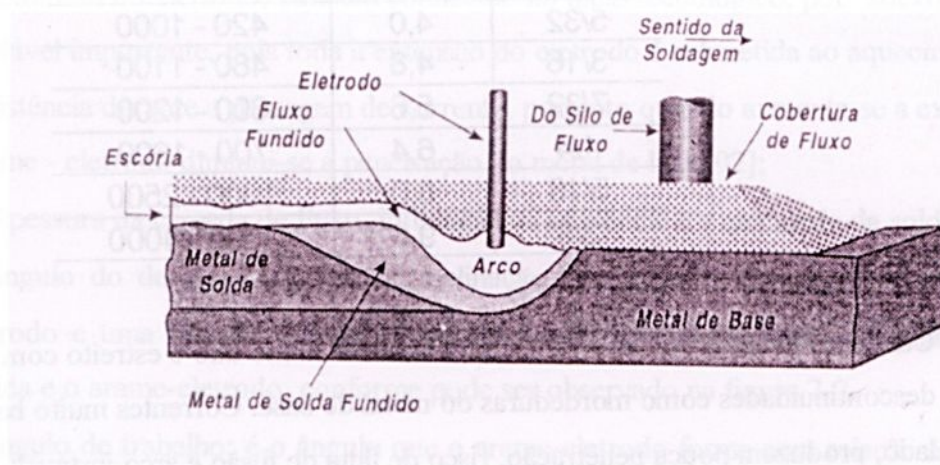


Figura 2-1: O arco elétrico permanece sob uma camada de fluxo, que protege o metal de solda de contaminações. O fluxo fundido sobre - nada a poça de solda, desoxidando e limpando o metal de solda líquida e, formando uma escória protetora sobre o metal depositado.[02]

O equipamento básico para SAS é formado de fonte de energia, tocha de soldagem, alimentador

* Coalescência: união; liga;.

de arame – eletrodo, alimentador de fluxo e painel de controle. Equipamentos adicionais podem ser utilizados, como sistema para deslocamento automático da tocha de soldagem ou da peça de trabalho e mecanismo para reciclagem do fluxo.

2.1.1 - Variáveis de Processo de SAS

As variáveis básicas do processo de soldagem com arco submerso são:

- a corrente de soldagem, que controla a taxa de fusão do arame, a penetração do cordão de solda e a quantidade do metal de base fundido (diluição*). É importante que a corrente escolhida esteja dentro das faixas recomendadas para o diâmetro do eletrodo que será utilizado.

Tabela 2-1: Faixa de corrente indicada por diâmetro de eletrodo [05]

Diâmetro do Eletrodo		Faixa de Corrente
Pol.	mm	A
5/64	2,0	200 - 600
3/32	2,4	230 - 700
1/8	3,2	300 - 900
5/32	4,0	420 - 1000
3/16	4,8	480 - 1100
7/32	5,6	600 - 1200
1/4	6,4	700 - 1600
5/16	8,0	1000 - 2500
3/8	9,5	1500 - 4000

Correntes muito elevadas produzem um cordão muito alto e estreito com possibilidade de descontinuidades como mordeduras do metal de base. Correntes muito baixas, por outro lado, produzem pouca penetração, risco de falta de fusão e arco instável;

- a tensão do arco, que determina principalmente o perfil e a aparência externa do cordão de solda, isto é, mantendo-se os demais parâmetros constantes, e aumentando-se a tensão do arco o cordão de solda tende a ser mais largo e mais baixo, visto que diminuindo a tensão do arco o cordão tende a ser mais estreito e alto [02, 04];

*Diluição: No contexto desse trabalho o termo diluição refere-se ao metal de base fundido homogeneizando-se ao metal de adição.



- velocidade de soldagem, que controla o tamanho e a penetração do cordão de solda e, juntamente com a corrente de soldagem e a tensão de arco elétrico, determina o aporte de calor. Velocidade de soldagem muito alta pode propiciar o aparecimento de descontinuidades como mordeduras do metal de base, porosidade no cordão de solda, trincas e cordão de solda de formato não uniforme[02, 04];
- polaridade, que no caso do SAS recomenda-se a CC polaridade positiva (CC+), onde uma rápida seqüência de deposição de passes ou penetração total são fatores importantes para uma linha de produção, oferecendo uma menor possibilidade quanto à porosidade, um melhor controle do formato e aparência do cordão de solda e uma maior penetração do cordão. O uso de CC polaridade negativa (CC-), oferece uma taxa de deposição cerca de 30% superior a obtida com CC+, mas produz menor penetração, isto devido a maior parte do calor se desenvolver na ponta do eletrodo ao invés de na superfície do metal de base [02];
- diâmetro do arame exerce influência sobre a penetração e a geometria do cordão de solda, bem como sobre a taxa de fusão, a experiência e boa prática levou à tabela 2.1, bastante utilizada como parâmetro inicial para desenvolvimentos de procedimentos de SAS [05];
- extensão do eletrodo, também conhecido no meio tecnológico, por “stickout”, é uma variável importante, pois toda a extensão do eletrodo é submetida ao aquecimento por resistência durante a passagem de corrente, portanto quando aumenta-se a extensão do arame - eletrodo diminui-se a penetração no metal de base[02];
- espessura da camada de fluxo, influência na aparência e a qualidade da solda[02, 04];
- ângulo do deslocamento ou de inclinação do Eletrodo: é o ângulo formado entre o arame-eletrodo e uma reta de referência, perpendicular ao eixo da solda, no plano comum ao eixo da solda e o arame-eletrodo, conforme pode ser observado na figura 2-2.
- ângulo de trabalho: é o ângulo que o arame-eletrodo forma com relação à superfície do metal de base num plano perpendicular ao eixo da solda, conforme observado na figura 2.2.



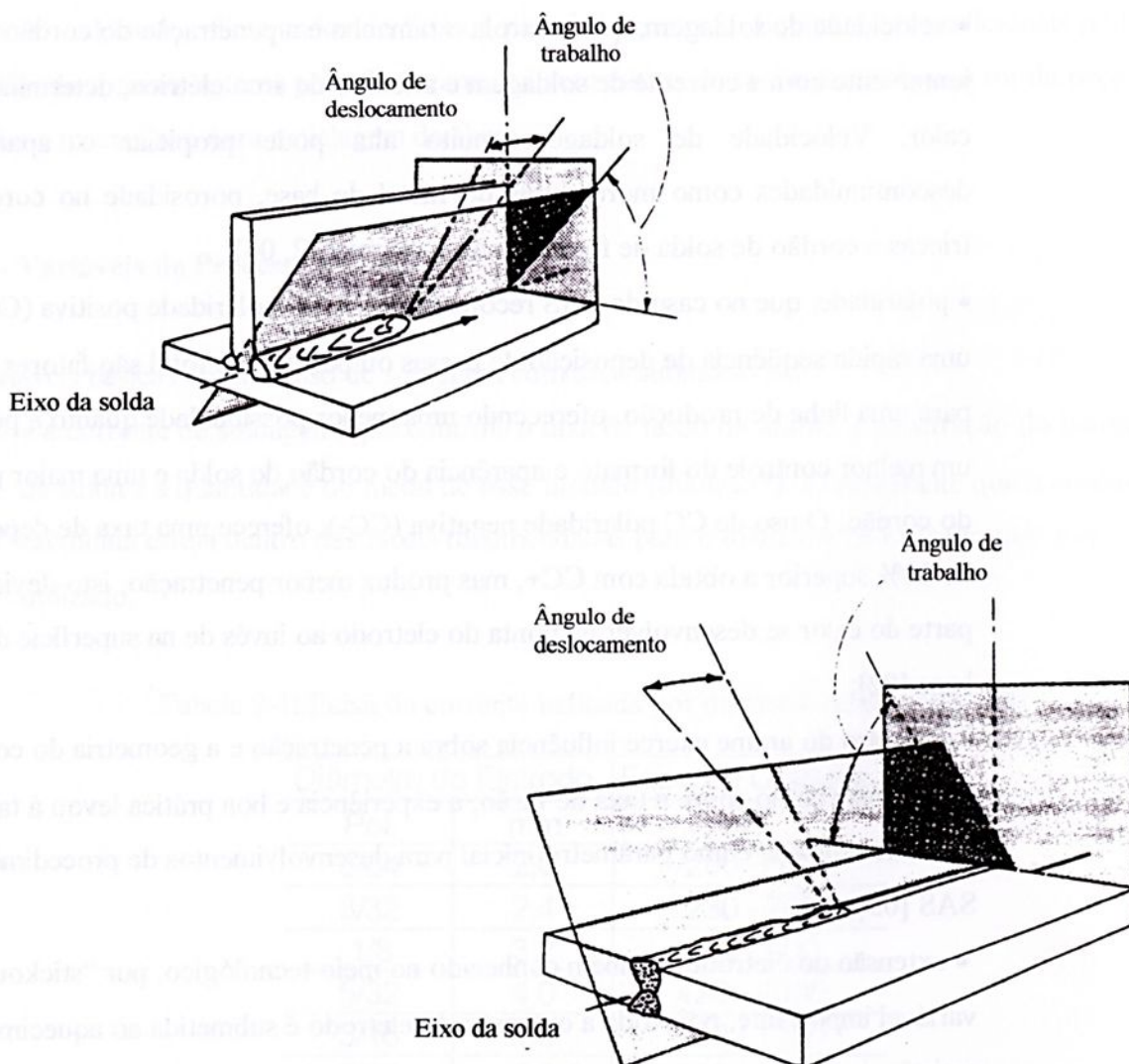


Figura 2-2: Ângulo de deslocamento ou de inclinação do eletrodo e ângulo de trabalho[19]

2.1.2 - Consumíveis

Os consumíveis empregados na soldagem com arco submerso são uma combinação Arame-eletrodo + fluxo, onde o arame-eletrodo e/ou fluxo devem possuir as seguintes características [04]:

- prover boas propriedades como ignição e estabilidade de arco elétrico;
- proteger as gotas metálicas durante a sua transferência da ponta do arame – eletrodo para a poça de fusão;

- proteger o metal de solda;
- permitir a obtenção de metal de solda e de escória com propriedades físicas adequadas, como por exemplo, viscosidade, temperatura de fusão, tensão superficial e expansão/contração térmica;
- desoxidar o metal de solda;
- permitir a obtenção do material de solda com geometria adequada;
- transferir elementos de liga para o metal de solda;
- ser fácil e barato de fabricar

2.1.2.1 - Tipos de Fluxos

Os fluxos para a soldagem com arco submerso são compostos minerais granulares misturados de acordo com várias formulações. Segundo o processo de fabricação, os fluxos são classificados como aglomerados, fundidos e misturados mecanicamente [02, 04, 08].

Os fluxos aglomerados são constituídos de compostos minerais finamente moídos como óxidos de manganês, silício, titânio, zircônio, magnésio ou cálcio e ferro – ligas como o ferro – silício, ferro – manganês ou ligas similares que têm como principal função desoxidar a poça de solda. A esses ingredientes é adicionado um agente aglomerante, normalmente silicato de sódio. O produto agregado e granulado é sinterizado em fornos com temperatura entre 600°C a 900°C obtendo as seguintes características:

- permite a utilização de desoxidantes e a adição de elementos de liga;
- permite a utilização de uma camada de fluxo mais espessa na zona de solda, por ser um material de baixa densidade;
- a escória se destaca facilmente;
- baixo custo de fabricação;
- são higroscópicos, principalmente os fluxos básicos, necessitando de secagem antes da utilização;
- os finos não devem ser totalmente removidos, pois podem alterar a composição original do produto;
- a poça de solda pode evoluir gases.

Fluxos Fundidos são constituídos dos mesmos compostos minerais citados para os fluxos aglomerados, porém os ingredientes são fundidos em fornos que permitam temperaturas entre



1300 e 1500°C. O fluxo fundido é vazado contra um jato d'água, adquirindo aspecto granular e vítreo. Apresentam as seguintes características:

- excelente homogeneidade química;
- a poça de solda não libera gases;
- os finos podem ser removidos sem mudança da composição do fluxo;
- não são higroscópicos, dispensando secagem;
- não se pode adicionar elementos de liga, pois eles se oxidam durante o processo de fusão;
- elevado custo de fabricação.

O fluxo misturado forma uma mistura mecânica de dois ou mais tipos de fluxos, em proporções selecionadas de forma a se obter uma propriedade definida. A característica deste tipo de fluxo é não apresentar uma boa uniformidade dos componentes, além de que estes podem se separar ainda na embalagem ou na manipulação.

Todo fluxo interfere na composição química do metal de solda em relação ao arame - eletrodo utilizado. De acordo com a neutralidade, os fluxos podem ser classificados como [02]:

- fluxos neutros, apresentam pouco ou nenhum elemento de liga, portanto não modificam significativamente a composição química na poça do metal fundido. Por não apresentarem ligas ativas em sua composição, as soldas feitas com este tipo de fluxo são mais sensíveis à trincas e/ou porosidade causada por contaminantes na chapa, necessitando que sejam removidos antes da soldagem. Estes fluxos são utilizados principalmente onde é necessário fazer passadas múltiplas, especialmente quando a chapa exceder 25mm (1") de espessura.
- fluxos ativos, apresentam quantidades médias de desoxidantes Si e dessulfurantes Mn para melhorar a resistência à trincas e porosidades ocasionadas por contaminantes no metal base. A participação deste fluxo na composição química do metal de solda está diretamente ligada à voltagem do arco; quanto maior a voltagem, maior a participação do fluxo. São recomendados para soldagem de filete, de topo ou sobreposta. Partes dos elementos desoxidantes e dessulfurantes vão para a escória na forma de compostos e outra parte fica depositada na parte superior do cordão, portanto não é recomendada a utilização desse fluxo em soldagem de múltiplos passes.
- fluxos ligados, possuem elementos de liga em sua composição química, que ao serem combinados com eletrodos de baixo C, produzem um metal de solda ligado melhorando



suas características. Seu principal emprego é na soldagem de aços de baixa liga como revestimento de superfícies para aumentar a dureza e/ou tenacidade.

2.1.2.2 – Eletrodos

Os arames são sólidos ou tubulares e, são classificados de acordo com a sua composição química pelas normas da AWS (American Welding Society), sendo os tipos no Brasil disponíveis, apresentados na tabela 2-2. O eletrodo para SAS tem usualmente composição química muito similar a composição do metal base. Todos eletrodos de arame sólido apresentam uma fina camada de cobre que melhora o contato elétrico entre o arame - eletrodo e o bico para uma melhor estabilidade do arco e maior vida útil do bico.

Tabela 2-2: Composição química e classificação AWS (American Welding Society) dos principais tipos de eletrodos disponíveis no Brasil [02]

Classe AWS	Composição Química							
	C	Mn	Si	P	S	Cu*	Mo	Outros
EC-1	0,15	1,80	0,90	0,035	0,035	0,35	—	—
EL-12	0,04	0,25					—	—
	0,14	0,60	0,10	0,030	0,030	0,35		
EM-12K		0,85	0,15					—
	0,15	1,25	0,35	0,030	0,030	0,35		—
EM-13K		0,90	0,35					—
	0,16	1,40	0,75	0,030	0,030	0,35		—
EA2	0,07	0,95					0,45	—
	0,17	1,35	0,20	0,025	0,030	0,35	0,65	—
EA3	0,07	1,65					0,45	—
	0,17	2,20	0,20	0,025	0,030	0,35	0,65	—
EF-6	0,07	1,45	0,10				0,40	Cr=0,20 - 0,55
	0,15	1,90	0,30	0,015	0,015	0,35	0,65	Ni=1,75 - 2,25
EB2	0,07	0,45	0,05				0,45	
	0,15	1,00	0,30	0,025	0,030	0,35	0,65	Cr=1,00 - 1,75

Nota: * O teor de cobre inclui o revestimento do arame - eletrodo

2.1.3 – Variantes do Processo SAS

O processo de SAS admite variante, com o objetivo de se aumentar a produtividade e facilitar operações específicas. Algumas dessas variações são arco gemeos ou “twin arc” e a soldagem com arcos múltiplos conhecidos como “tandem arc”.

O arco gêmeo ou twin-arc, trabalha com dois eletrodos por fonte de alimentação, isto é, a soldagem que utiliza dois eletrodos de pequeno diâmetro em uma única poça de fusão, onde os eletrodos são alimentados por um único alimentador de arame, porém com duas guias, dois roletes de arraste ou, um rolete com dois sulcos e, energia fornecida por uma só fonte. Este tipo de solda apresenta uma elevada taxa de deposição, alta velocidade de soldagem e menor calor imposto que o arco simples.

Arcos múltiplos ou “tandem arc”, consistem na utilização de dois ou mais eletrodos numa mesma poça de fusão, alimentada individualmente. São utilizados eletrodos com diâmetros maiores, com parâmetros individuais o que permite alta flexibilidade no processo, onde há a possibilidade de incumbir cada eletrodo de executar uma função na soldagem. Normalmente o primeiro eletrodo é conectado a uma fonte de CC+ e, com ângulo negativo com o objetivo de promover maior penetração. Por outro lado o segundo não pode ser conectado a uma fonte de corrente contínua devido à grande possibilidade de ocorrência de sopro magnético quando duas correntes contínuas de alta intensidade são aplicadas num único arco. Assim, o segundo, ou demais eletrodos, são ligados a uma fonte de corrente alternada, com ângulo positivo para maior largura do cordão de solda. A possibilidade de se utilizar diferentes diâmetros e tipos de eletrodos torna o processo “tandem arc” a melhor opção para algumas aplicações que requerem tipos de composição de metal de solda. As principais vantagens desse processo são:

- alta taxa de deposição;
- alta velocidade de soldagem e;
- boa penetração no metal de base.

2.2 - Microestrutura do Metal de Solda de Aços Ferríticos

O metal de adição não necessita ter exatamente a mesma composição química que o metal de base, isto porque é mais importante que o metal de solda seja mais resistente e tenha melhores propriedades que o metal de base. Estas propriedades são governadas pela microestrutura, por isso torna-se tão importante o conhecimento sobre a influência de diferentes fatores na transformação de fases no metal de solda [23].

A seguir, estão presentes as definições de alguns dos mais importantes constituintes microestruturais de soldas de aço carbono de baixa liga[17].

- Ferrita Acicular: solução sólida de carbono no ferro (α). Por apresentar estrutura



cristalina CCC, seus espaços interatômicos são pequenos e alongados, logo não acomoda facilmente pequenos átomos como o de carbono (muito pequeno para formar uma solução sólida substitucional e muito grande para formar uma solução sólida intersticial). Apresenta um máximo de 0,025% de C a 723 °C, e uma elevada ductilidade;

- **Cementita:** carboneto de ferro, Fe_3C , com 6,68% de C. Este microconstituente é característico por não apresentar subdivisão de grãos. A principal propriedade mecânica da cementita é a sua elevadíssima dureza;
- **Austenita:** solução sólida de carbono no ferro (γ) com estrutura cristalina CFC. Apresenta-se na forma de grãos poliédricos. Sua ocorrência nos aços carbono se dá acima de 723 °C;
- **Perlita:** constituinte micrográfico formado por ferrita α e cementita. Apresenta-se na forma de finas lamelas, que somente podem ser visualizadas com aumentos superiores a 200 vezes. São localizadas nos contornos de grãos de ferrita;
- **Martensita:** solução sólida supersaturada e metaestável de carbono no ferro α , que apresenta uma estrutura tetragonal de corpo centrado. A composição da martensita será idêntica à da austenita, se não ocorrer difusão atômica. Em termos de propriedades mecânicas é conhecida por sua elevada dureza.

A nomenclatura utilizada para identificação dos microconstituintes é proposta pelo documento 835 do IIS – IIW [09]. Segundo este documento os metais de solda ferríticos classificam-se em:

a) Ferrita de Contorno de Grão (PF(G))

A sua formação deve-se a taxas de resfriamento muito lenta e geralmente não é encontrada em metais de solda de aços de alta resistência, pois os elevados teores de elementos de liga desses aços retardam tanto a nucleação quanto às reações de crescimento difusional que ocorrem no contorno de grão da austenita. Normalmente a PF(G) adota a forma de veios, figura 2.3, delineando o contorno de grão colunar da austenita prévia e, portanto conferindo-lhe uma forma alongada.

b) Ferrita Poligonal Intragranular (PF(I))

Aparece na forma de grãos, normalmente poligonais e, nucleia quase que exclusivamente no interior dos grãos austeníticos, presumivelmente em inclusões ou outros sítios de nucleação heterogênea, ocorrendo em taxas de resfriamento muito lento. A PF(I) deve ser maior que cerca



de três vezes o tamanho médio das ripas de ferrita acicular ou ferrita com segunda fase circundantes, conforme pode ser verificado na figura 2-3.

c) Ferrita Acicular (AF)

Constituinte que se apresenta como grãos muito finos de ferrita não paralelas, separadas por contornos de alto ângulo, conforme observado na figura 2.3 e, nucleiam-se de forma não homogênea no interior do grão de austenita prévia, sob taxas de resfriamento mais elevadas que a ferrita primária. Pode incluir ainda ripas isoladas de elevada razão de aspecto. A quantidade ideal de ferrita acicular presente no metal de solda para se obter boas propriedades mecânicas e tenacidade, deve estar na faixa de 65 a 80%.

d) Ferrita com Segunda Fase Alinhada(FS(A))

Constituinte formado por grãos grosseiros e paralelos que crescem ao longo de um plano bem definido, formando duas ou mais ripas de ferrita paralelas. Quando observa -se somente duas ripas, estas só devem ser classificadas como FS se a sua relação comprimento largura for superior a 4/1. Caso tal não ocorra, o constituinte deverá ser classificado como AF ou PF. A nucleação da FS(A) ocorre no contorno de grão, figura 2.3, podendo seu crescimento iniciar-se a partir do contorno de grão austenítico.

e) Ferrita com Segunda Fase Não - Alinhada (FS(NA))

Formada por ferrita circundando completamente microconstituintes ou ripas de ferrita acicular. Não se apresenta em forma paralela como a FS(A), mas o mecanismo de formação e as características mecânicas são as mesmas da FS(A). Ver figura 2-3.

f) Agregados Ferrita - Carbonetos (FC)

É um constituinte formado fora dos contornos de grãos da austenita, apresentando uma estrutura fina de ferrita e carbonetos, incluindo perlita e ferrita com interfaces de carbonetos. O FC é um constituinte de aparência escura, pois apresenta uma estrutura interna cuja resolução fica abaixo da obtida por microscopia óptica, conforme pode ser observado na figura 2.3.

g) Martensita (M)

A martensita é o constituinte que se forma como produto final de transformação da austenita sob condições de alta taxa de resfriamento, além disso, metais de solda com elevado teor de C



também favorecem a formação desse constituinte. Dependendo do teor de C pode-se ter a “martensita em ripas” ou a “martensita maclada”. A martensita em ripas forma-se por um mecanismo de deslizamento, sendo encontrada em aços com teor de C menor do que 0,5% (peso). A martensita maclada é encontrada em aços com teor de C acima de 0,8% (peso). Na figura 2-3, é possível visualizar cada um dos constituintes citados.

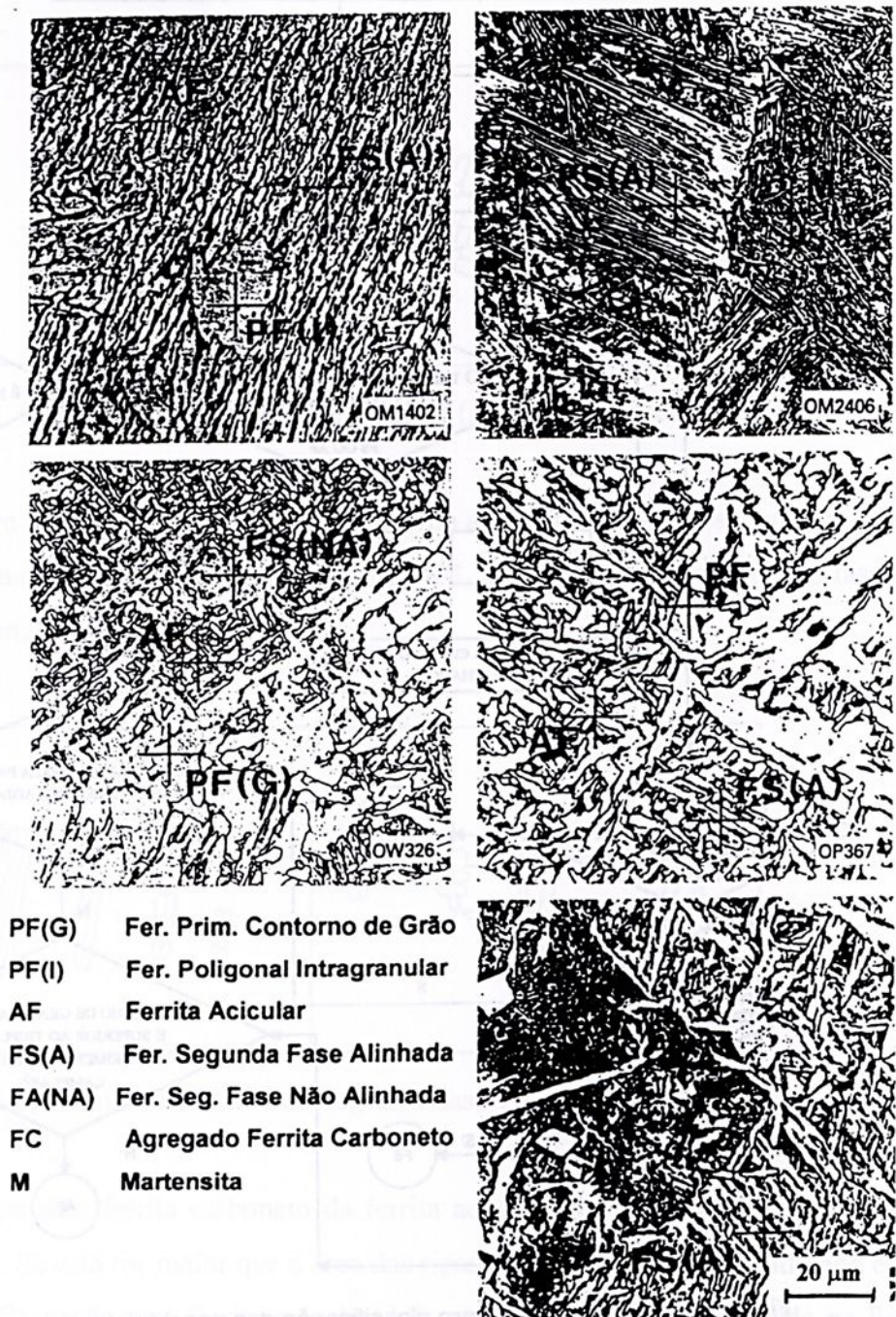


Figura 2-3: Microestrutura do metal de solda mostrando os vários constituintes microestruturais [09]

O IIW propõe um método para classificar as microestruturas sob um ponto de vista morfológico, isto é, feito através de um fluxograma que orienta os metalógrafos na caracterização da microestrutura. A figura 2-4 exibe um fluxograma com uma sequência de decisões a serem adotadas, até se encontrar o constituinte correto que está sendo analisado no metal de solda [09].

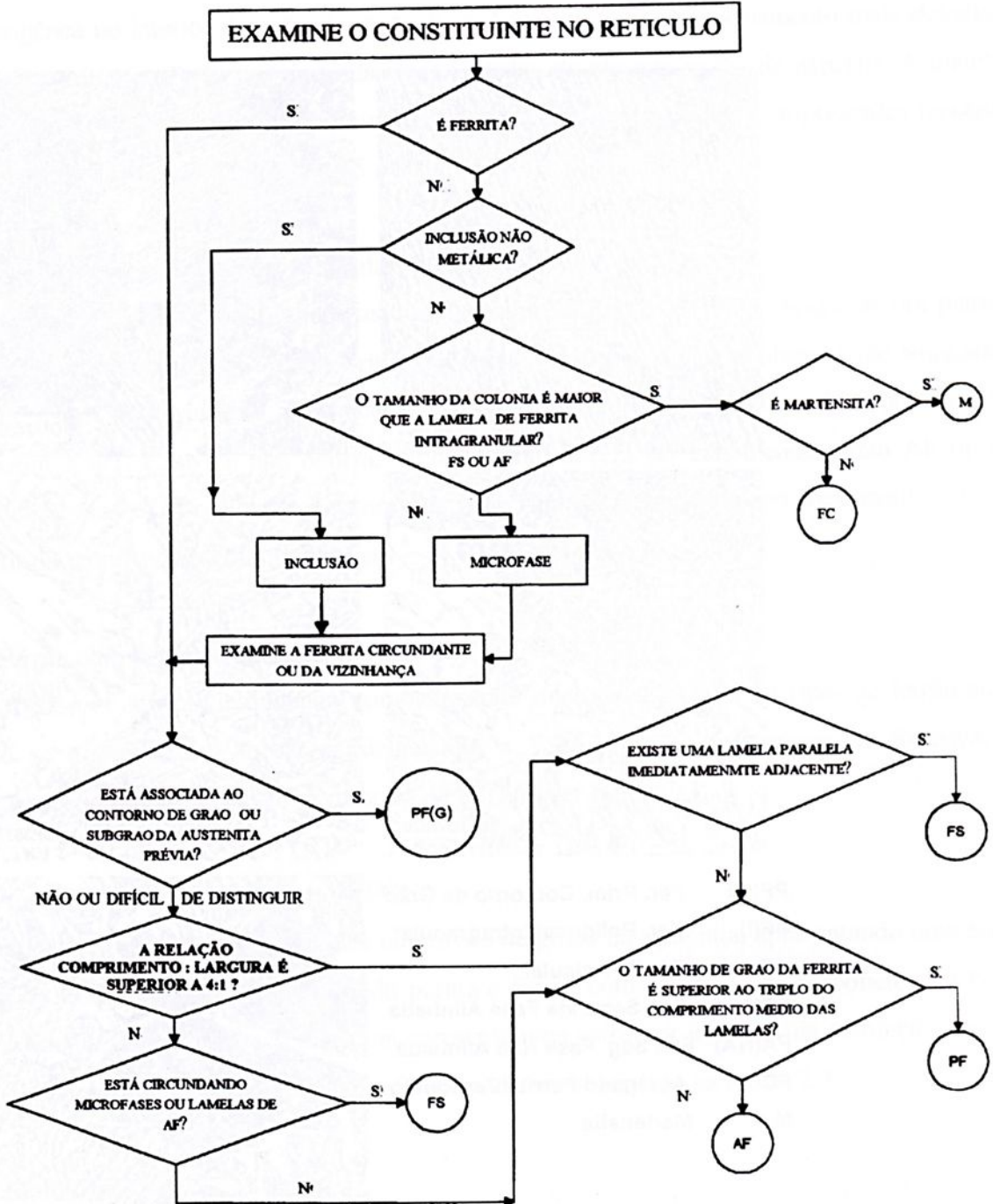


Figura 2-4: : Fluxograma para classificação dos constituintes microestruturais do metal de solda [9].

Juntamente com esse fluxograma deve-se observar as figuras esquemáticas que são mostradas nas figuras 2-5a a 2-5c, com o objetivo de distinguir entre o que é uma ferrita acicular(AF), ferrita poligonal(PF), agregado ferrita carboneto(FC) ou ferrita com segunda fase alinhada(FS(A)) devendo-se seguir o seguinte critério:

Se a ferrita sob o retículo apresentar dimensões inferiores a três vezes a largura média das ripas de ferrita que a circundam, esta será ferrita acicular(AF), senão será ferrita poligonal(PF(I)), conforme figura 2-5a.

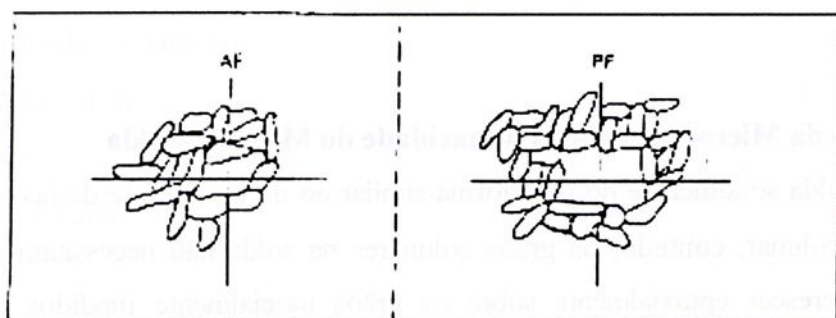


Figura 2.5a: Comparação entre Ferrita Acicular (AF) e Ferrita Poligonal (PF)

. A diferenciação entre a ferrita de segunda fase e a ferrita acicular deve ser observado na relação comprimento / largura de ambos. Se esta for superior a 4/1, então é ferrita com segunda fase(FS), senão é ferrita acicular(AF), figura 2-5b.

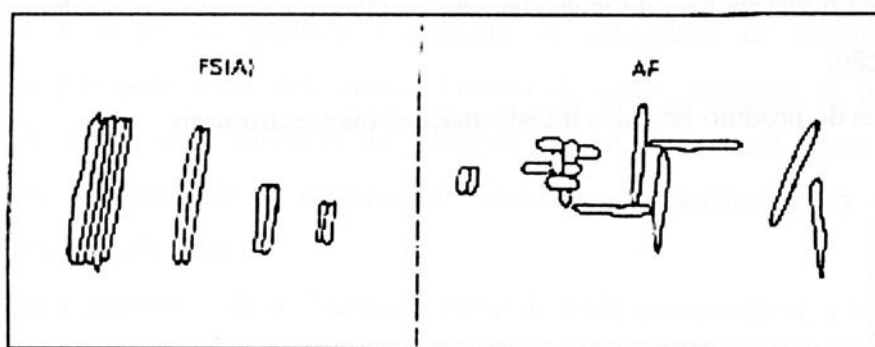


Figura 2-5b: Comparação entre Ferrita com Segunda fase Alinhada FS(A) e Ferrita Acicular (AF)

Para diferenciar o agregado ferrita carboneto da ferrita acicular, deve ser observada a área da colônia de carbonetos. Se esta for maior que a área das ripas de ferrita, então é considerado como agregado de ferrita(FC), senão será ferrita acicular(AF) conforme pode ser observado na figura 2-5c.

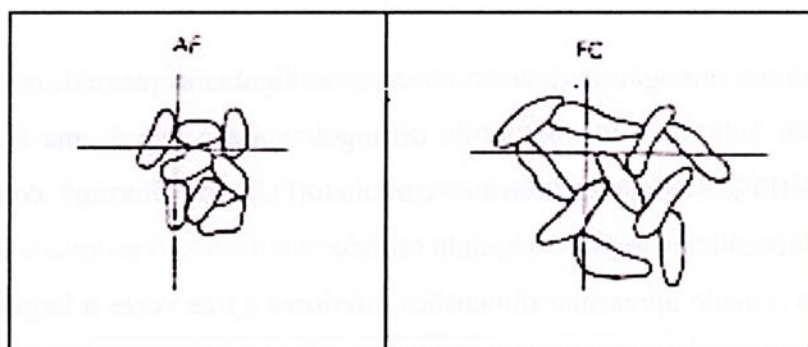


Figura 2-5c: Diferenciação entre agregado de ferrita(FC) e ferrita acicular(AF)

2.2.1 – Efeito da Microestrutura na Tenacidade do Metal de Solda

O metal de solda solidifica-se de uma forma similar ao de um lingote de aço devido à formação de estrutura colunar, contudo, os grãos colunares na solda não necessitam de uma nucleação, pois podem crescer epitaxialmente sobre os grãos parcialmente fundidos do metal de base. Durante o estágio da solidificação poderá ocorrer o aprisionamento de partículas de escória ou a formação de porosidade, prejudicando dessa forma a tenacidade[18].

Considerando que o metal de solda seja limpo e livre de defeitos, os fatores mais críticos que podem influenciar a tenacidade do metal de solda são os diferentes aspectos da microestrutura da solda, ou seja:

- Tamanho de grão;
- A presença e distribuição de inclusões não metálicas, as quais são resultantes das reações de desoxidação;
- A natureza do produto final das transformações microestruturais

2.2.1.1 – Tamanho de grão

A tensão de escoamento de um material, de acordo com a relação de Hall - Petch, é influenciada pelo seu tamanho de grão, ou seja:

$$\sigma_E = \sigma_i + E \cdot d^{-1/2} \quad (2-1)$$

σ_E = é a tensão de escoamento

σ_i = é a tensão de atrito

E = constante

d = diâmetro do grão

A tensão de escoamento pode ser melhorada através do aumento da tensão de atrito. Aumentando-se a tensão de atrito haverá um aumento acentuado na temperatura de transição dútil - frágil, mas diminuindo-se o tamanho do grão haverá diminuição na temperatura de transição pelo fato dos contornos de grão de alto ângulo inibirem a fratura por clivagem. O tamanho do grão colunar pode ser reduzido pela adição de elementos de liga ou pelo rápido resfriamento durante o estágio de solidificação e, os elementos de liga que produzem grãos colunares pequenos, usualmente introduzem algum endurecimento por solução sólida, contrapondo o efeito da granulação refinada. A velocidade de resfriamento da solda é determinada por parâmetros tais como: insumo de calor, temperatura de pré-aquecimento, espessura da chapa e a eficiência do processo de soldagem sendo, portanto, difícil alterar drasticamente a velocidade de resfriamento, pois estes parâmetros estão vinculados a outras condições pré-estabelecidas.

Supondo que a quantidade de inclusões no metal de solda seja aceitável, a tenacidade poderá ser melhorada através da obtenção de um produto de transformação que tenha boa tenacidade, isto é, um produto com tamanho de grão pequeno e contorno de alto ângulo.



2.2.1.2 - Inclusões Não Metálicas

As inclusões contidas no metal de solda exercem uma forte influência no patamar de energia da curva de transição da tenacidade, a qual representa a energia que causa a fratura dúctil e, esta envolve a nucleação de vazios, coalescência e crescimento, que podem ocorrer pela fratura de uma partícula de inclusão ou pela coesão da interface entre a matriz e a inclusão.

As inclusões podem nuclear vazio e também iniciar uma fratura por clivagem, ou atuar como obstáculo, interferindo com a propagação de uma trinca.

2.2.1.3 – Produtos de Transformação

Os aços podem ter uma grande variedade de microestruturas, dependendo da sua composição química e da sua condição se fundido, forjado ou tratado termicamente. A característica microestrutural da ferrita acicular é a mais desejável porque os contornos de grão de alto ângulo e tamanhos de grão pequenos fazem-na um eficiente bloqueador de fratura frágil. Apresenta os grãos em forma acicular, alinhando-se em ângulos uns com os outros. A presença de perlita é sempre considerada prejudicial à tenacidade dos aços.

A bainita é usualmente descrita como tendo duas morfologias com diferenças microestruturais formando a bainita superior e a bainita inferior.

A martensita tendo uma alta dureza não é tenaz, contudo, se esta for revenida pode precipitar carbonetos com uma fina dispersão que, juntamente com uma alta densidade de discordância reduz a propagação da fratura. A maior resistência à fratura por clivagem é obtida com uma alta proporção de ferrita acicular com grãos finos. Elementos de liga, tais como: Mn, Mo e Ti, favorecem a formação da ferrita acicular e melhoram a tenacidade. Uma alta fração volumétrica de ferrita acicular, por outro lado, concentrará deformações nas fases mais fracas, levando a uma baixa tenacidade.



2.3 – Aporte de Calor

Também denominado insumo de calor ou energia, é um fator que influencia diretamente a microestrutura do metal de solda. No processo de soldagem por arco submerso é empregada uma taxa de energia exercendo uma forte influência sobre a microestrutura resultante do metal de solda e que pode ser expressa correlacionando a quantidade de energia disponível para soldagem, tensão do arco elétrico dada em volts V e intensidade de corrente dada em amperes I com a velocidade de avanço v da fonte de calor, ou seja, velocidade de soldagem [24; 25]

$$\text{Aporte de energia total: } H_t = \frac{60 \cdot V \cdot I}{v} \text{ (J/cm)} \quad (2-2)$$

Porém, o rendimento ou eficiência do arco de cada processo de solda influencia a real quantidade de energia disponível para soldagem, sendo de 90% ou 0,9 no SAS, o que se expressa através da equação 2-3 [24; 25].

$$\text{Aporte líquido de energia total: } H_l = 0,9 \cdot \frac{60 \cdot V \cdot I}{v} \text{ (J/cm)} \quad (2-3)$$

2.4 – Perfil Soldado

Os perfis soldados no Brasil são fabricados segundo a norma NBR ABNT 5884 e, AWS D1.1 da American Welding Society e, para efeito de cálculo das estruturas metálicas a NBR ABNT 8800, porém, ao contrário dos perfis laminados ofertados no mercado nacional, o perfil soldado permite a confecção do mesmo com geometria da seção transversal, figura 2-6, bastante variável, dando liberdade de criação aos projetistas.

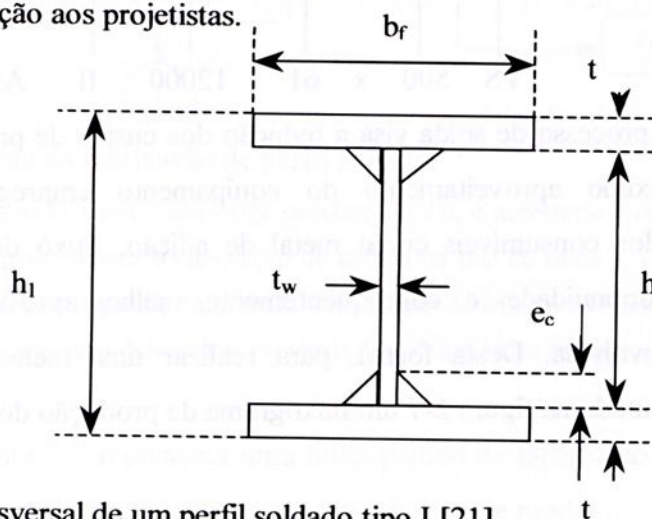


Figura 2-6: Seção transversal de um perfil soldado tipo I [21].

Abreviaturas

b_f - largura da mesa ou aba

t_f - espessura da mesa ou aba

t_w - espessura da alma

e_c - espessura do cordão de solda ou perna de solda

h - altura da alma

h_1 - altura total

Os perfis soldados podem ser classificados como:

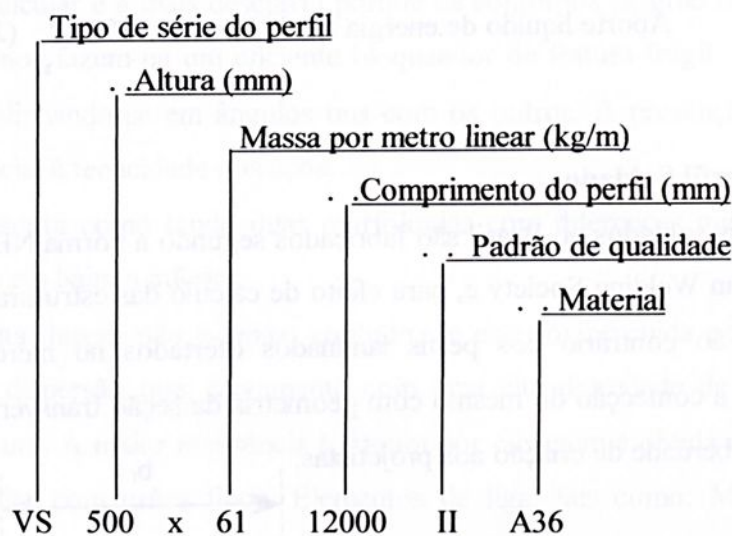
Série CS para colunas, tal que: $h_1/b_f = 1$

Série CVS para colunas e vigas, tal que: $1 < h_1/b_f \leq 1,5$

Série VS para vigas, tal que: $2 \leq h_1/b_f \leq 4$

Série VSA para vigas de rolamento, perfil assimétrico.

Especificação



A otimização do processo de solda visa a redução dos custos de produção do perfil tipo I ou H, atingindo o máximo aproveitamento do equipamento empregado, além de um melhor aproveitamento dos consumíveis como metal de adição, fluxo de proteção do arco elétrico, redução de descontinuidades e, conseqüentemente, melhor aproveitamento da hora homem e hora máquina envolvida. Desta forma, para realizar uma mensuração dos resultados deste trabalho, é apresentado na figura 2-7 um fluxograma de produção do perfil soldado.

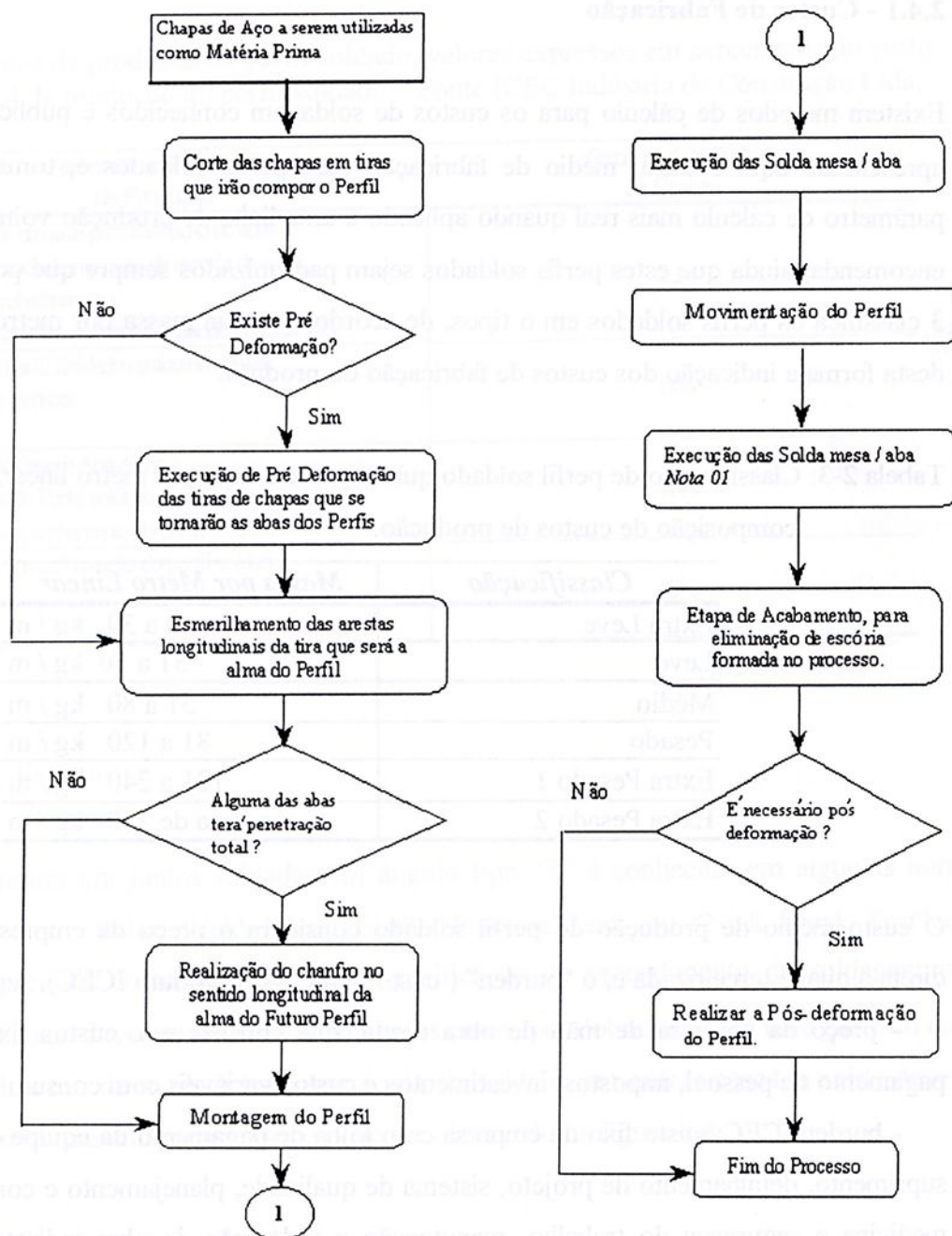


Figura 2-7: Fluxograma da fabricação de perfil soldado

Nota 01: Quando a solda entre mesa e aba exige penetração total, é necessário a realização de um passe de raiz, executar uma goivagem para limpeza e eliminação de defeito na raiz de solda e, finalmente executar a solda de enchimento e acabamento. A boa prática recomenda a realização de ensaios não destrutivo com líquido penetrante após a execução da goivagem, para detecção de possíveis descontinuidades na junta soldada.

O fluxograma da figura 2-7 representa uma linha padrão de fabricação de perfil soldado, porém não é regra que todos os fabricantes deste produto sigam este modelo.

2.4.1 - Custos de Fabricação

Existem métodos de cálculo para os custos de soldagem conhecidos e publicados[19], porém é apresentado aqui o custo médio de fabricação para perfis soldados e, tomando-se este como parâmetro de cálculo mais real quando aplicado a uma linha de produção voltada à produtos sob encomenda, ainda que estes perfis soldados sejam padronizados sempre que possível. A tabela 2-3 classifica os perfis soldados em 6 tipos, de acordo com sua massa por metro linear, facilitando desta forma a indicação dos custos de fabricação do produto.

Tabela 2-3: Classificação de perfil soldado quanto a sua massa por metro linear, para efeito de composição de custos de produção.

<i>Classificação</i>	<i>Massa por Metro Linear</i>
Extra Leve	0 a 30 kg / m
Leve	31 a 50 kg / m
Médio	51 a 80 kg / m
Pesado	81 a 120 kg / m
Extra Pesado 1	121 a 240 kg / m
Extra Pesado 2	acima de 240 kg / m

O custo médio de produção do perfil soldado considera o preço da empresa de mão de obra direta a qual é terceirizada e, o “burden” (custo indireto do produto ICEC), sendo:

- preço da empresa de mão de obra direta, que consiste em: custos fixos como folha de pagamento de pessoal, impostos, investimentos e custos variáveis com consumíveis.

- burden ICEC: custo fixo da empresa com folha de pagamento da equipe de coordenação de suprimento, detalhamento de projeto, sistema de qualidade, planejamento e controle de processo, medicina e segurança do trabalho, manutenção e toda mão de obra indireta, energia elétrica, investimentos.

Para que as informações aqui contidas quanto a valores não sofram perdas com as variações monetárias, adotou-se apresentar os valores sempre em forma de percentuais do preço total de produção do perfil soldado. Expressando-os de acordo com a tabela 2-3.

Tabela 2-4: Custos de produção do perfil soldado, valores expressos em percentuais do custo total de produção do perfil soldado – Fonte ICEC Indústria de Construção Ltda,

Atividade do Processo de Produção	Percentual do Custo do Produto
Corte de chapas em tiras para formação de abas e alma do perfil soldado, remoção de escoria de corte, acabamento e rebarbamento, Realização de chanfro para solda (quando necessário)	23%
Montagem do Perfil Soldado de acordo com as especificações técnicas	18%
Execução da soldagem Aba/Alma Movimentação do Perfil soldado para realização de solda pelo lado oposto, acabamento do perfil soldado	41%
Realização da pós deformação do perfil soldado confeccionado	18%

2.5 – Ensaio de Fratura

O ensaio de fratura em juntas soldadas em ângulo tipo “T” é conhecido em algumas normas internacional como: “Fillet Weld Break Test”, “Fracture Test” ou “Nick Break Test” e, é normalmente previsto como requisito para qualificação de procedimento de soldagem e de soldadores. O ensaio deve ser realizado, em alguns casos, por dobramento de uma parte do corpo de prova sobre outra, de modo a tracionar a raiz da solda e, em outros casos, a solda deve ser rompida a partir de um entalhe conforme pode ser observado na figura 2-8.

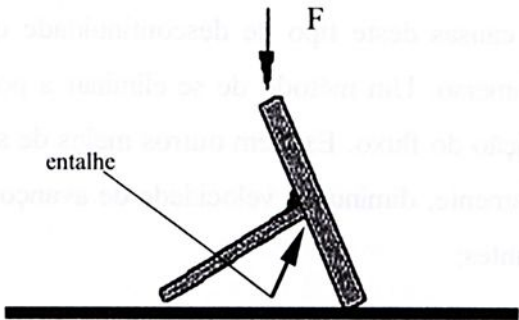


Figura 2-8: Modelo esquemático de aplicação de força, no ensaio de fratura.

Em ambos os casos, a raiz da solda fraturada ou não e, a solda fraturada a entalhe é examinada visualmente quanto á sua compacidade, isto é, quanto á penetração na raiz e quanto à presença de outras descontinuidades [05; 07].

A otimização do processo de fabricação através da otimização das variáveis de processo também tem como foco a redução dos custos com a preparação das chapas de alma quanto a chanfros através da redução de uma etapa do processo para obtenção de juntas com penetração total.

2.5 - Descontinuidades Geradas Pelo Processo

Assim como os outros processos de soldagem, no arco submersos podem ocorrer quase todo tipo de descontinuidade, sendo que as principais podem apresentar-se como:

a) falta de fusão:

pode ser proveniente de uma baixa energia de soldagem. Ocorre em cordões espessos executados em um único passe ou em soldagens muito rápidas;

b) falta de penetração:

A falta de penetração ocorrerá quando a máquina de solda estiver alinhada incorretamente com a junta a ser soldada;

c) Inclusões de escória:

Uma imperfeita remoção de escória na soldagem em vários passes é uma das causas de inclusões;

d) Mordeduras: em soldagens rápidas, a arco submerso, este tipo de descontinuidade ocorre com certa frequência.

e) Porosidade:

São bolhas de gás retidas sob a escória. A alta velocidade de avanço da máquina e o resfriamento rápido da solda são as principais causas deste tipo de descontinuidade que ocorre com certa frequência nas soldas por arco submerso. Um método de se eliminar a porosidade é diminuir a granulação ou modificar a composição do fluxo. Existem outros meios de se evitar a porosidade, são eles: limpar as juntas adequadamente, diminuir a velocidade de avanço da máquina e utilizar arames com maior teor de desoxidantes;

f) Trincas:

Tanto em temperaturas elevadas como em baixas temperaturas podem ocorrer trincas neste tipo de soldagem. As diferentes trincas que podem ocorrer são as seguintes:



- Trincas de cratera: normalmente as soldas a arco submerso apresentam este tipo de trinca para, se evitar estas trincas o operador deve ter uma perfeita técnica de enchimento de cratera. Uma forma prática de solucionar este problema é descartar o início e o final da peça soldada mas, caso não seja possível, deve-se utilizar chapas apêndices “run-off tabs” para deslocar o início e fim da soldagem para fora da peça;
- Trincas na garganta: estas trincas ocorrem em pequenos cordões de soldas em peças robustas. São mais comuns em soldas com elevado grau de restrição;
- Trincas na margem e na raiz: uma das principais causas destas trincas é a umidade no fluxo. Quando ocorrem após a operação de soldagem são devidas ao hidrogênio.
- Trincas devido a duplas laminações: quando associadas às altas tensões de soldagem, as duplas laminações podem resultar em trincas interlamelares. Além de duplas laminações, lascas e dobras no metal de base podem originar trincas na soldagem a arco submerso.

CAPITULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Máquina de Solda

A máquina de solda empregada neste trabalho consistiu-se de uma máquina híbrida composta de duas fontes de 1000 amperes cada, marca Lincoln, modelo Arc Welder, automatizada pela Metalpress Metalúrgica com seguintes características:

- velocidade de deslocamento: 0 a 3000 mm/min.;
- velocidade de alimentação do eletrodo: 0 a 450 in/min.;
- tensão: 0 a 67,2 V.
- arco gêmeo (Twin-Arc);
- orientação das tochas de soldagem por sensores tipo magnéticos;
- Dimensões limites para as peças a serem soldadas
- altura máxima: 1500 mm;
- altura mínima: 150 mm;
- largura máxima: 1000 mm;
- largura mínima: 150 mm
- comprimento máximo: 12000 mm;
- espessura mínima do metal base para soldagem: 6,3 mm

A máquina esta montada em um pórtico que se movimenta sobre um sistema pião/cremalheira, entre duas mesas de 12000 mm de comprimento por 1500 de largura cada, onde são posicionados os perfis já montados que serão soldados.

O equipamento dispõe ainda de três memórias eletrônicas por fonte de alimentação, onde é possível armazenar as variáveis de processo, amperagem / voltagem / velocidade de soldagem, programada de acordo com a espessura do material a ser soldado e dimensão do cordão de solda desejado – Figura 3-1. O recolhimento do fluxo não fundido durante o processo de soldagem é realizado através de aspiradores posicionados próximos as tochas de solda, levando o material recolhido até o reservatório de fluxo localizado na parte superior da máquina onde são peneirados e novamente aproveitado como proteção da possa de fusão, chegando até ela por efeito da gravidade - Figura 3-2.



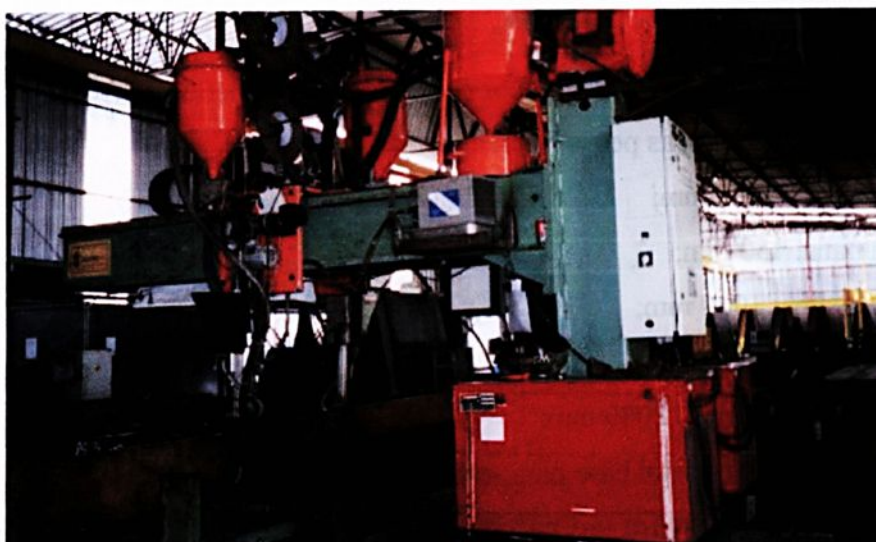
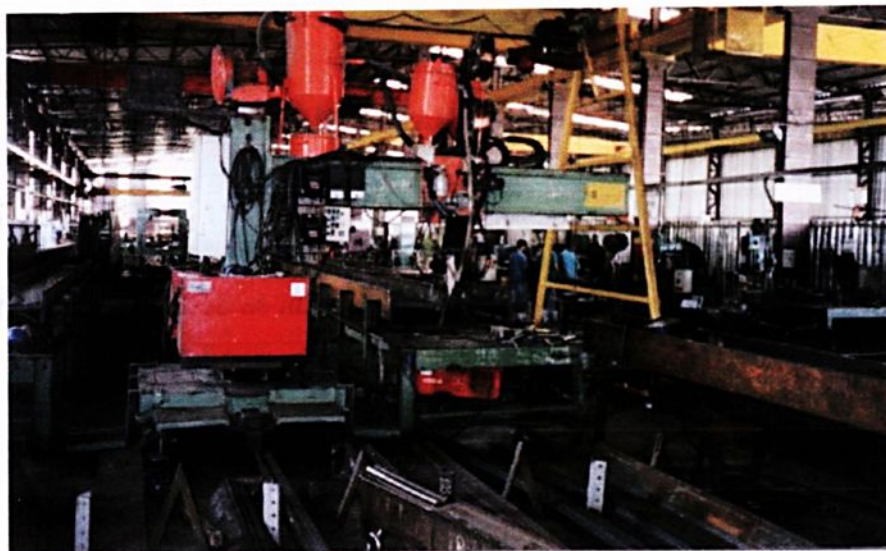


Figura 3-1: Máquina de solda SAS utilizada

A máquina utilizada localiza-se na linha de produção da empresa ICEC Indústria de Construção Ltda, sendo utilizada para soldagem dos perfis fabricados e utilizados pela empresa em seus diversos fornecimentos para o mercado da construção civil e industrial. A escolha da máquina com esta configuração deveu-se a necessidade da empresa em reduzir os custos de seus produtos e atender aos prazos requeridos pelo mercado, através de uma produção seriada, com alto padrão de qualidade e confiabilidade. No entanto a adaptação de um processo inteiramente artesanal à uma linha automatizada exigiu algumas medidas como: tempo, treinamento e aperfeiçoações, sendo este trabalho uma dessas medidas.



Figura 3-2: Aspiradores para reaproveitamento de fluxo não fundido durante o processo de soldagem

3.2 – Materiais e procedimento de soldagem

3.2.1 - Combinação Arame – Eletrodo e Fluxo

Arame eletrodo:

O arame – eletrodo utilizado, consistiu se no EL12 classificação AWS EA3 do fornecedor Belgo Mineira com 2,38mm de diâmetro;

Composição Química

Tabela 3-1: Composição química do material utilizado para o arame - eletrodo

C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Cr	Ni
0,060	0,400	0,014	0,010	0,008	0,000	0,019	0,00	0,00

Propriedades Mecânicas

Dureza (HB): 72,0 HRB

Fluxo: Fornecido pela Carboox Resende Química Indústria e Comércio Ltda, classificação F7AO – EM 12K, é um fluxo de característica ativa.

Para os resultados da análise química e propriedades mecânicas do fluxo, uma amostra do mesmo é utilizada em laboratório, combinado com um arame-eletrodo em solda a um

metal de base. Os resultados são apresentados como as características do metal de solda:

- Análise Química do Metal de Solda em percentuais

Tabela 3-2: Composição química do material utilizado para análise química e propriedades mecânicas do fluxo

Elemento	C	Mn	P	S	Si
Eletrodo	0,081	1,06	0,011	0,010	0,15
Metal de Solda	0,050	1,400	0,023	0,015	0,80

Parâmetros de Soldagem Utilizados

Eletrodo:	AWS EM 12K
Diâmetro:	3,97 mm
Polaridade:	Negativa (inversa)
Corrente:	550 A
Tensão:	28 V
Extensão do Eletrodo	25 mm
Número de passes	15

- Metal Base Utilizado Para Teste do Fluxo de Solda: ASTM A 36

- Resultados de Ensaio Mecânicos

Limite de escoamento:	525 MPa
Limite de Ruptura:	605 MPa
% de Alongamento:	30 % em um corpo de prova de 200 mm

3.2.2 - Metal de Base

Como metal de base foram utilizadas chapas de aço carbono, de especificação segundo a norma ASTM A36, com espessuras variando de 6,0 mm a 25,4 mm.

- Composição Química

Tabela 3-3: Composição química do material utilizado como metal de base

C _{máximo}	Mn	P _{máximo}	S _{máximo}	Si _{máximo}	Cu _{mínimo}
0,25	080 – 1,20	0,04	0,050	0,40	0,20

Propriedades Mecânicas

Limite de Escoamento: 250 MPa

Limite de Ruptura: 400 – 550 MPa

3.3 - Procedimento de Soldagem

Os corpos de provas foram preparados tal qual os perfis da linha de fabricação do processo em questão, sendo as juntas a serem soldadas em ângulo formando um “T” conforme observado na figura 3-3, sem apresentar chanfro entre as chapas ou abertura para “raiz de solda”. O processo prevê passe único de solda depositando metal de adição suficiente para atender as especificações da norma de fabricação de perfil soldado NBR 5884 revisão 2000 [22].

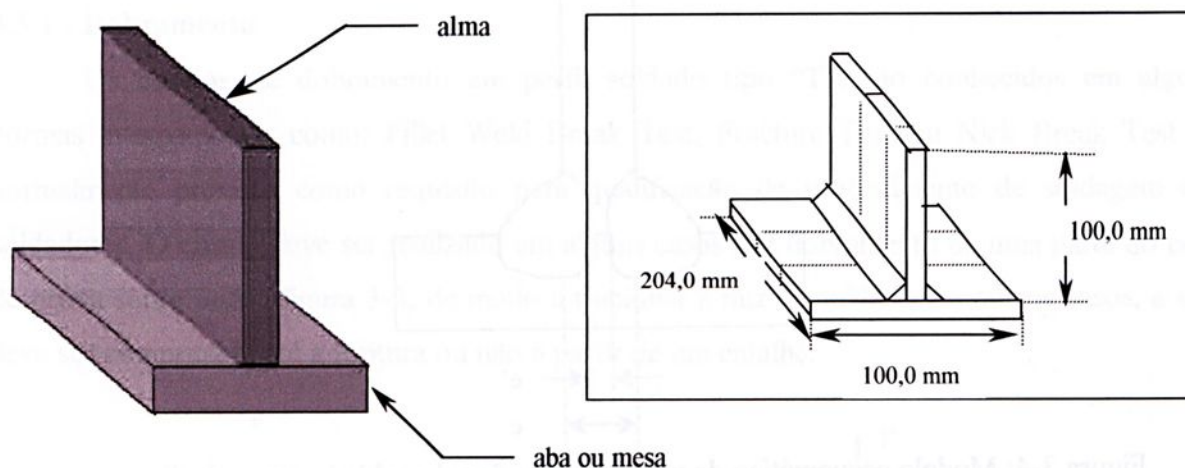


Figura 3-3: Corpo de Prova a ser soldado, junta em ângulo sem chanfro ou abertura para raiz de solda e modelo esquemático do corpo de prova com o dimensionamento.

Baseado na revisão bibliográfica, estabeleceu-se parâmetros fixos e variáveis para a confecção dos corpos de prova.

Parâmetros fixos:

- combinação arame-eletrodo e fluxo;
- extensão do eletrodo ou “stick out” de 25 milímetros;
- corrente contínua com polaridade direta ou positiva (CC+).

Parâmetros variáveis

- velocidade de soldagem;
- intensidade de corrente;
- tensão do arco;
- ângulo do arame-eletrodo.

Através dos corpos de prova (juntas soldadas) obtidos, figura 3-4 foi possível realizar o estudo quanto a penetração de solda no metal base P , utilizando-se para tanto de técnica fotomacrográfica e mensuração direta com auxílio de escala milimétrica e a equação 3-1,

$$P(\%) = 1 - [(e'/e) * 100] \quad (3-1), \text{ onde}$$

e' = medida da falta de penetração do metal de solda entre os dois cordões efetuados;

e = medida da junta soldada

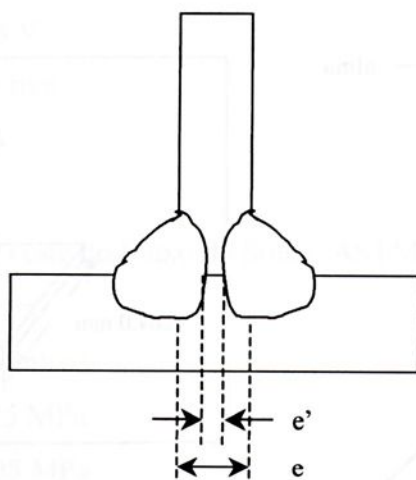


Figura 3-4: Modelo esquemático de uma junta em ângulo soldada, para auxiliar no entendimento da equação 3-1.

Foi realizado o total de 30 (trinta) condições de juntas em ângulo soldadas de ambos os lados conforme figura 3-4, onde calculou-se o insumo de calor para cada uma das mesmas, sendo a obtenção destas condições divididas em duas etapas:

- Etapa 1: Consistiu em se trabalhar com a espessura máxima proposta (25,4 mm) para todas as condições geradas em um total de 6 (seis). Para chegar-se a esta espessura máxima, considerou-se as informações técnicas do fabricante das fontes de solda.
- Etapa 2: Consistiu em utilizar-se dos resultados da etapa 1 e, gerou-se 24 (vinte e quatro) condições variando as espessuras do metal base e alterando os parâmetros variáveis de soldagem.

3.4 Avaliação da ZAT e metal de solda

Para avaliação da ZAT e do metal de solda adicionado, realizou – se 2 (dois) ensaios através da caracterização microestrutural, por intermédio de miscrocópia óptica, com o objetivo de avaliar qualitativamente os microconstituintes em situações distintas:

- Quando de uma penetração parcial total do metal de solda no metal de base da junta em ângulo e,
- quando de uma penetração total do metal de solda no metal de base da junta em ângulo.

E com o objetivo de avaliar o comportamento quanto à dureza desta região, levantou-se os perfis de dureza Vickers com 500g de carga ao longo da linha central das juntas soldadas.

3.5 – Ensaios Mecânico

3.5.1 - Dobramento

Os ensaios de dobramento em perfil soldado tipo “T”, são conhecidos em algumas normas internacionais como: Fillet Weld Break Test, Fracture Test ou Nick Break Test e, é normalmente previsto como requisito para qualificação de procedimento de soldagem e de soldadores. O ensaio deve ser realizado em alguns casos por dobramento de uma parte do corpo de prova sobre outra, figura 3-3, de modo a tracionar a raiz da solda e, em outros casos, a solda deve ser comprimida até a ruptura ou não a partir de um entalhe.

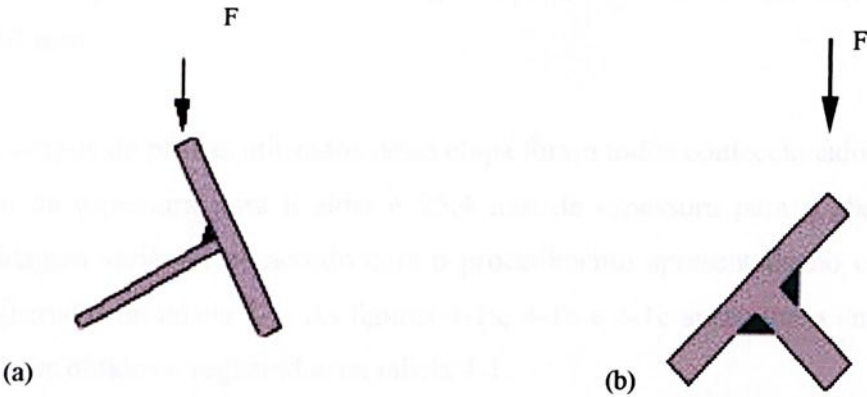


Figura 3-5: Desenho esquemático do ensaio de fratura. (a) representa uma junta soldada apenas de um lado, enquanto (b) representa uma junta soldada de ambos os lados.

Em ambos os casos, a raiz da solda, fraturada ou não e, a solda fraturada a entalhe, são examinadas visualmente quanto a sua compacidade, isto é, quanto á penetração na raiz e quanto à presença de outras descontinuidades.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Avaliação da Penetração de Solda em Função da Alteração de Variáveis na Junta Soldada

Os resultados obtidos são divididos em duas etapas:

A etapa 1 apresenta uma série de resultados obtidos para corpos de provas todos confeccionados igualmente, isto é, a partir de metais de bases de mesma espessura. Mostrando toda a evolução obtida para as várias combinações de variáveis estabelecidas após revisão bibliográfica. A etapa 2, apresenta o conhecimento adquirido com a etapa 1 de ensaios, aplicado em condições em que os corpos de provas possuem espessuras inferiores, estabelecendo assim um conjunto de parâmetros para as variáveis identificadas como ótimas do ponto vista da penetração do metal de solda às juntas ensaiadas.

4.1.1 Etapa 1 de Ensaios de Soldagem à SAS – Metal de Base com Espessura Máxima de 25,4 mm

Os corpos de provas utilizados nesta etapa foram todos confeccionados a partir de chapas de 12,5 mm de espessura para a alma e 25,4 mm de espessura para a aba, tendo os parâmetros de soldagem variáveis de acordo com o procedimento apresentado no capítulo III e, os resultados registrados na tabela 4-1. As figuras 4-1a, 4-1b e 4-1c apresentam uma evolução gráfica para os valores obtidos e registrados na tabela 4-1.

Tabela 4-1: Resultados obtidos para penetração da solda em função dos parâmetros variáveis

Identificação da Amostra	Intensidade de Corrente [A]	Velocidade de Soldagem [mm/min]	Tensão [V]	Ângulo de Soldagem [Graus]	Penetração de Solda [%]	Insumo de Calor [KJ/mm]
T 01	700	800	27	45	30	1,275
T 02	850	800	27	45	55	1,549
T 03	950	800	27	45	60	1,731
T 04	950	700	27	45	85	1,979
T 05	950	750	27	45	85	1,847
T 06	950	700	27	40	90	1,978

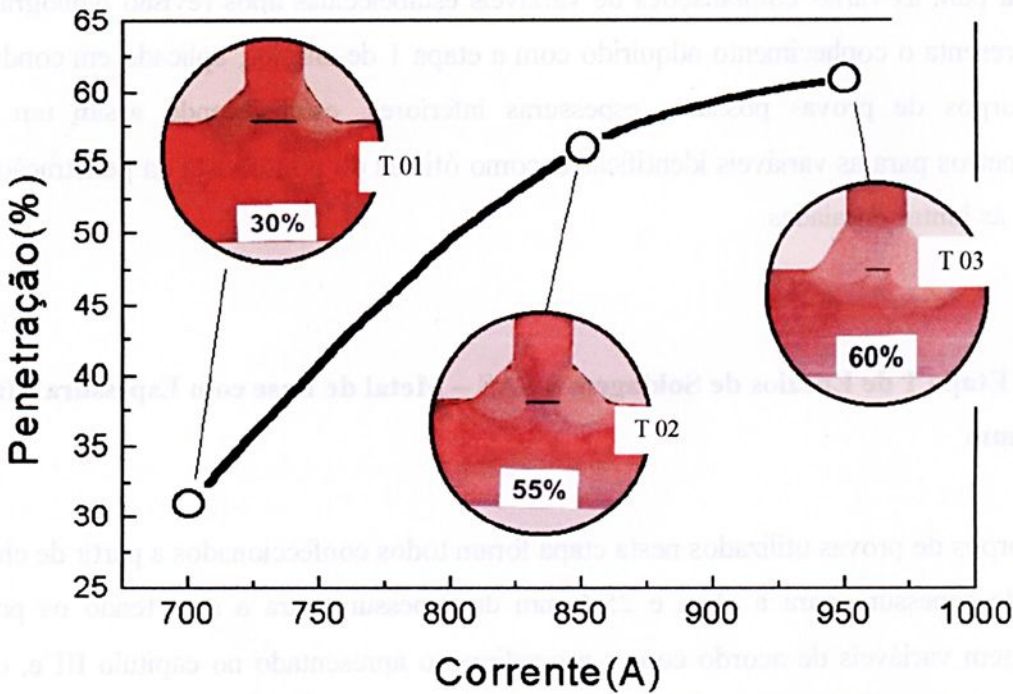


Figura 4-1a: Evolução gráfica da penetração de solda em função da variação da corrente enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 27 Volts; velocidade de soldagem de 800 mm / min; ângulo de soldagem de 45°.

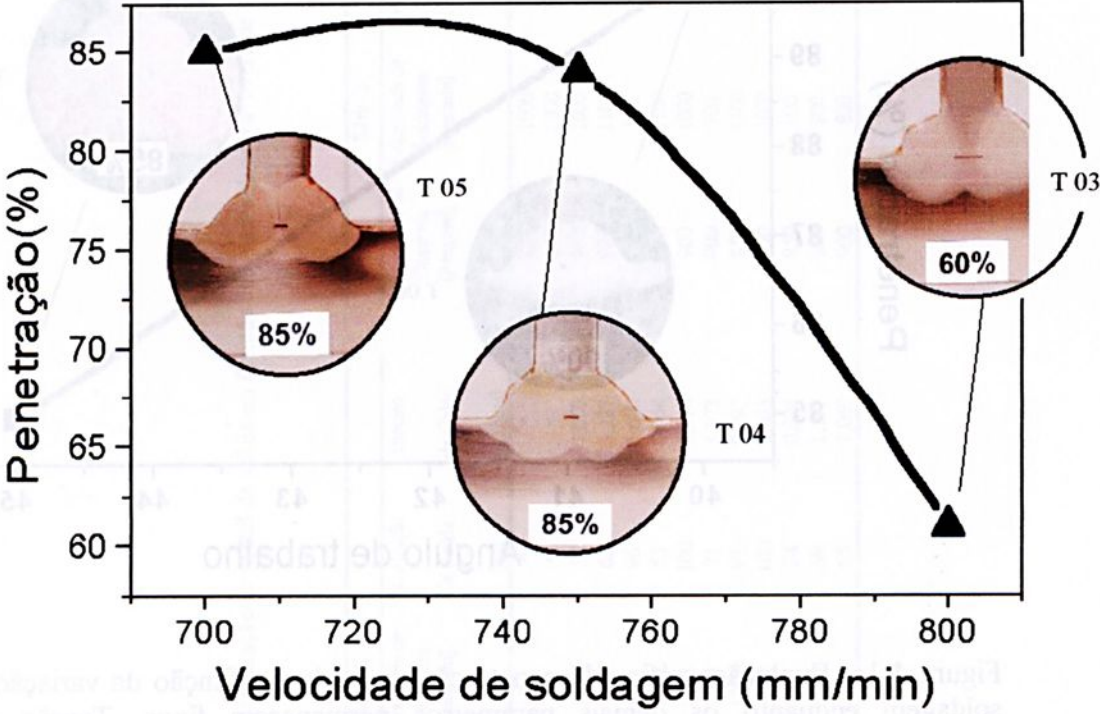


Figura 4-1b: Evolução gráfica da penetração de solda em função da variação da velocidade de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 27 Volts; corrente de 950 ampères; ângulo de soldagem de 45°.

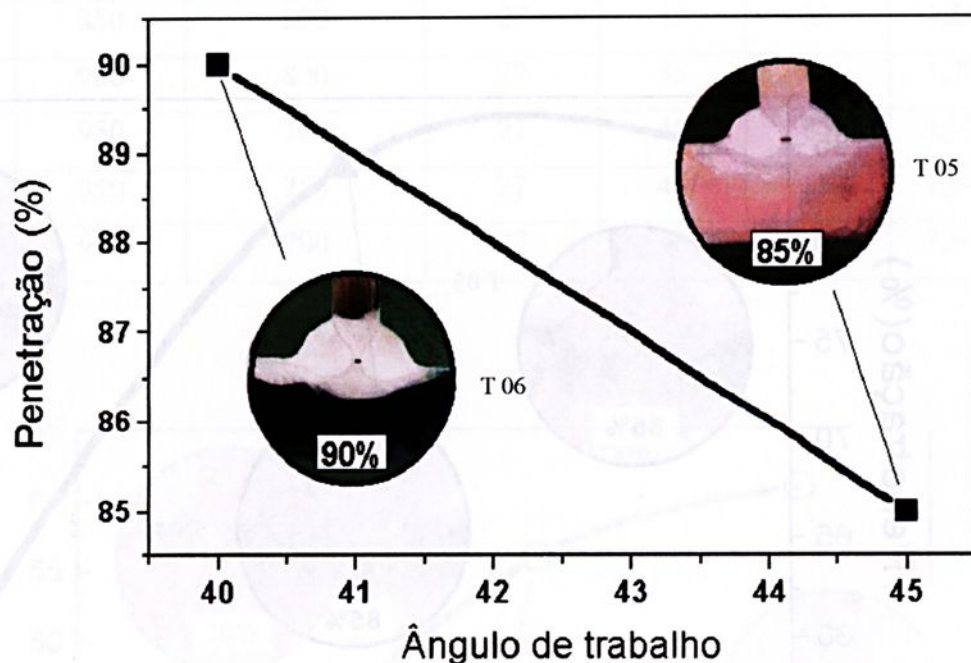


Figura 4-1c: Evolução gráfica da penetração de solda em função da variação do ângulo de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 27 Volts; velocidade de soldagem de 700 mm / min; corrente de 950 ampères.

4.1.2 Etapa 2 de Ensaios de Soldagem à SAS

Tomando como parâmetros de partida as variáveis que conferiram as melhores condições de soldagem, quanto a maior penetração de solda obtida na etapa 1 de ensaios, auxiliado sempre por tabelas de conhecimento público para valores de soldagem, estabeleceu-se parâmetros para corpos de provas confeccionados a partir de chapas de menor espessura e estes estão registrados na tabela 4-2 e apresentados através da sequência de figuras 4-2 a 4-10 representando graficamente os resultados encontrados para os corpos de prova gerados.

Tabela 4-2: Resultados obtidos para soldagem SAS, quanto à penetração do metal de solda em função dos parâmetros variáveis de soldagem.

Identificação Do corpo de Prova	Série A							Série B			
	Espessura	Espessura	Tensão	Intensidade de Corrente	Velocidade de Soldagem	Penetração	Insumo	Intensidade de Corrente	Velocidade de Soldagem	Penetração	Insumo
	De Alma [mm]	De Aba [mm]	[Volts]	[Ampère]	[mm/min]	De Solda [%]	de Calor [KJ/mm]	[Ampère]	[mm/min]	De Solda [%]	de Calor [KJ/mm]
CP 01	9,5	16,0	27,0	*	*	*	*	850	1000	58	1,239
CP 02	9,5	16,0	27,0	*	*	*	*	900	1000	75	1,312
CP 03	9,5	12,5	27,0	800	1100	54	1,060	900	1000	89	1,312
CP 04	9,5	12,5	27,0	850	1100	65	1,127	900	1100	81	1,193
CP 05	9,5	12,5	27,0	900	800	96	1,640	900	900	93	1,458
CP 06	8,0	9,5	26,5	800	1200	65	0,954	900	1100	100	1,171
CP 07	8,0	9,5	26,5	850	1200	100	1,014	900	1000	100	1,288
CP 08	8,0	9,5	26,5	900	1200	71	1,073	900	900	100	1,431
CP 09	6,3	8,0	26,0	850	1200	91	0,995	850	1100	100	1,085
CP 10	6,3	8,0	26,0	900	1200	100	1,053	850	1000	97	1,193
CP 11	6,3	8,0	26,0	800	1200	84	0,936	850	900	89	1,326
CP 12	12,5	12,5	27,0	900	1100	69	1,193	900	900	67	1,458
CP 13	12,5	12,5	27,0	800	1100	55	1,060	900	800	70	1,640

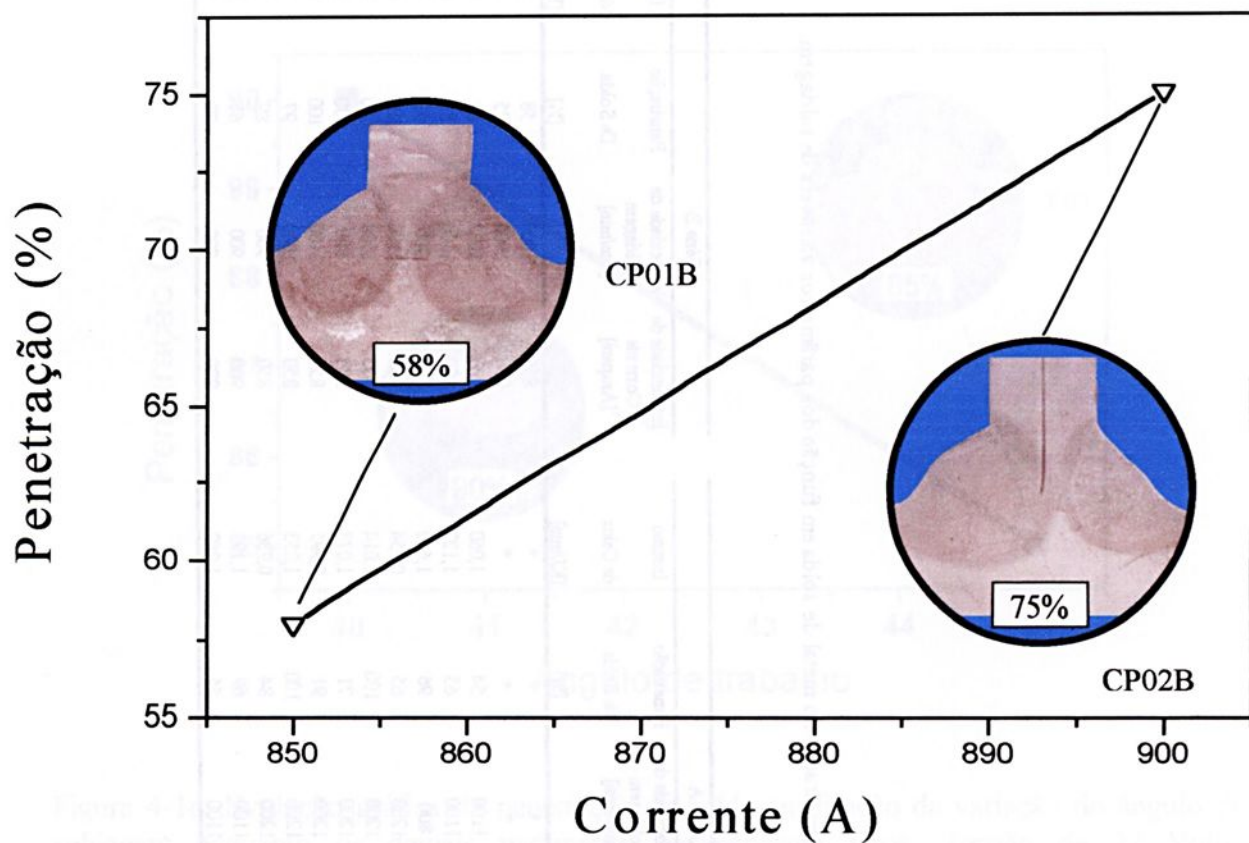


Figura 4 -2: Evolução gráfica da penetração de solda em função da variação da intensidade corrente de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 27 Volts; velocidade de 1000 mm/min.

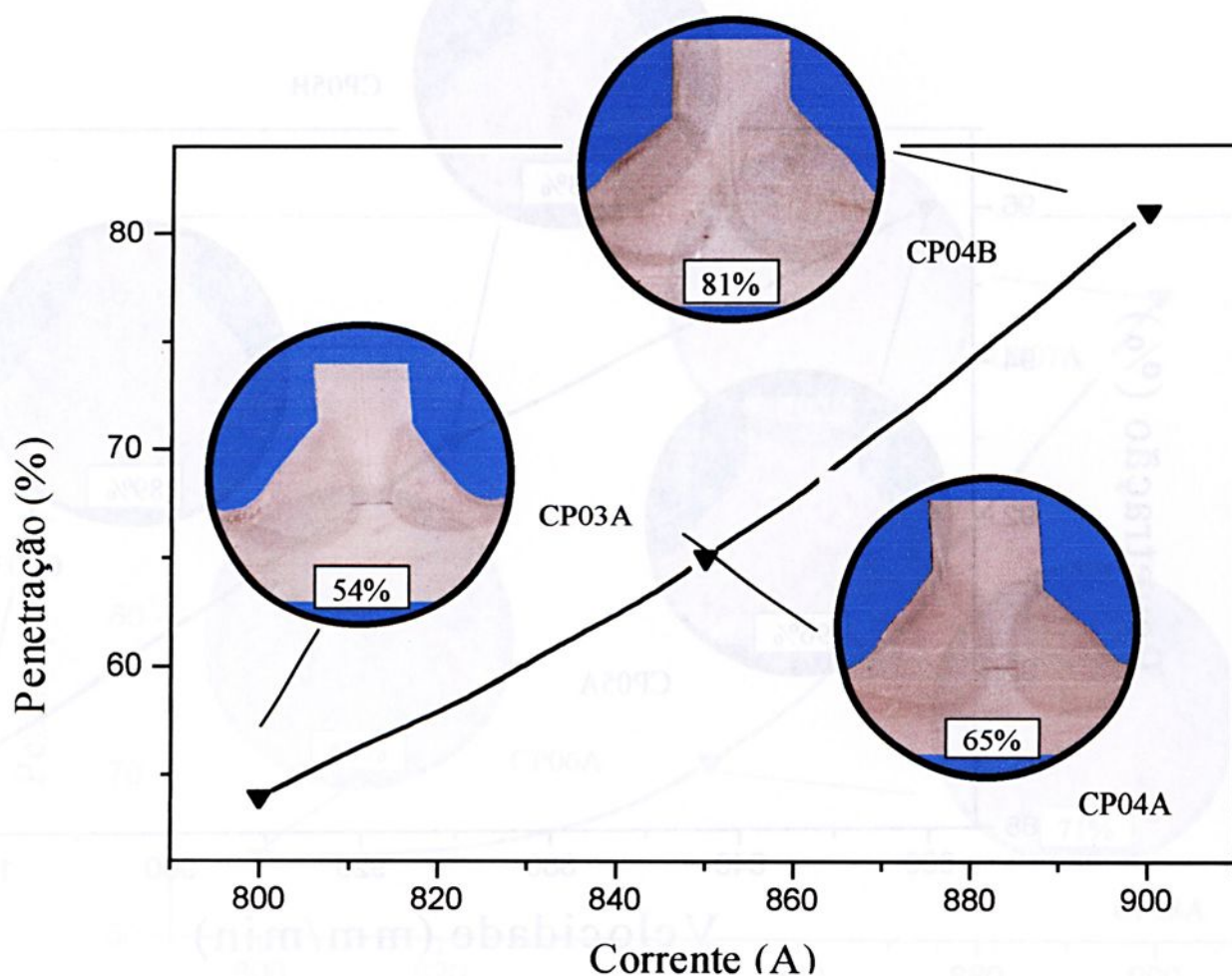


Figura 4-3: Evolução gráfica da penetração de solda em função da variação da intensidade de corrente de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 27 Volts; velocidade de 1100 mm/min.

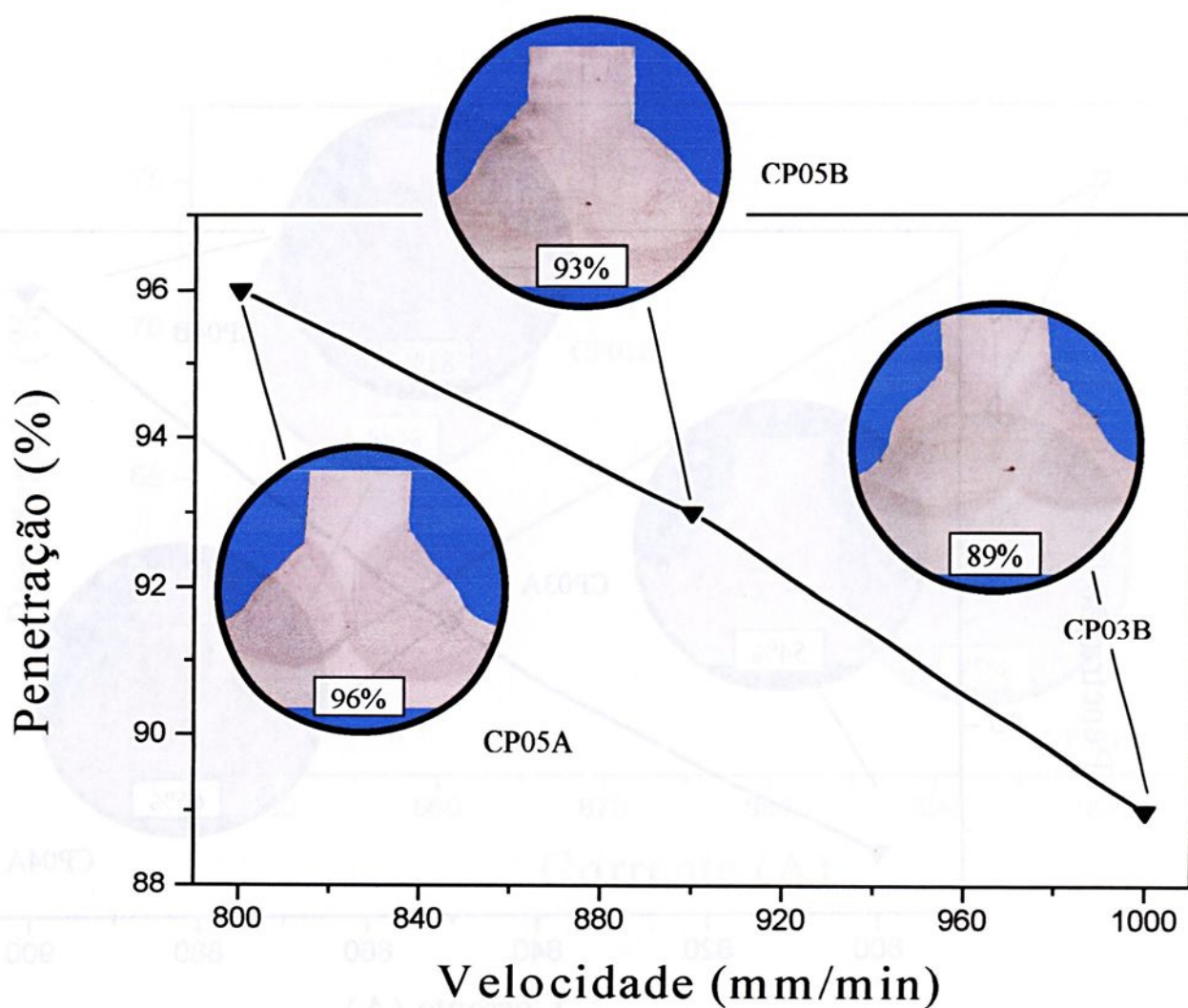


Figura 4 -4: Evolução gráfica da penetração de solda em função da variação da velocidade de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 27 Volts; corrente de 900 ampères.

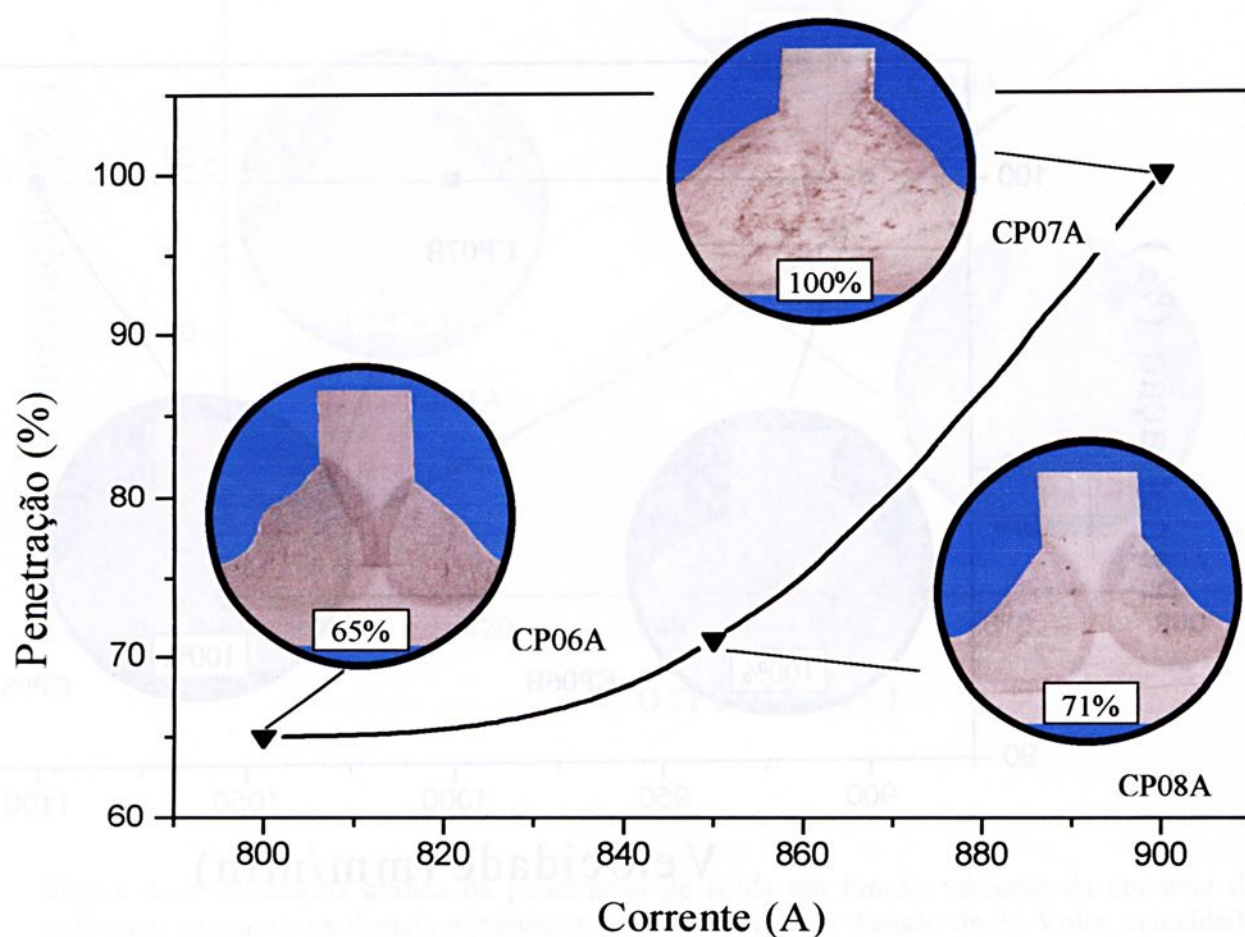


Figura 4 -5: Evolução gráfica da penetração de solda em função da variação da corrente de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 26,5 Volts; velocidade de 1200 mm/min.

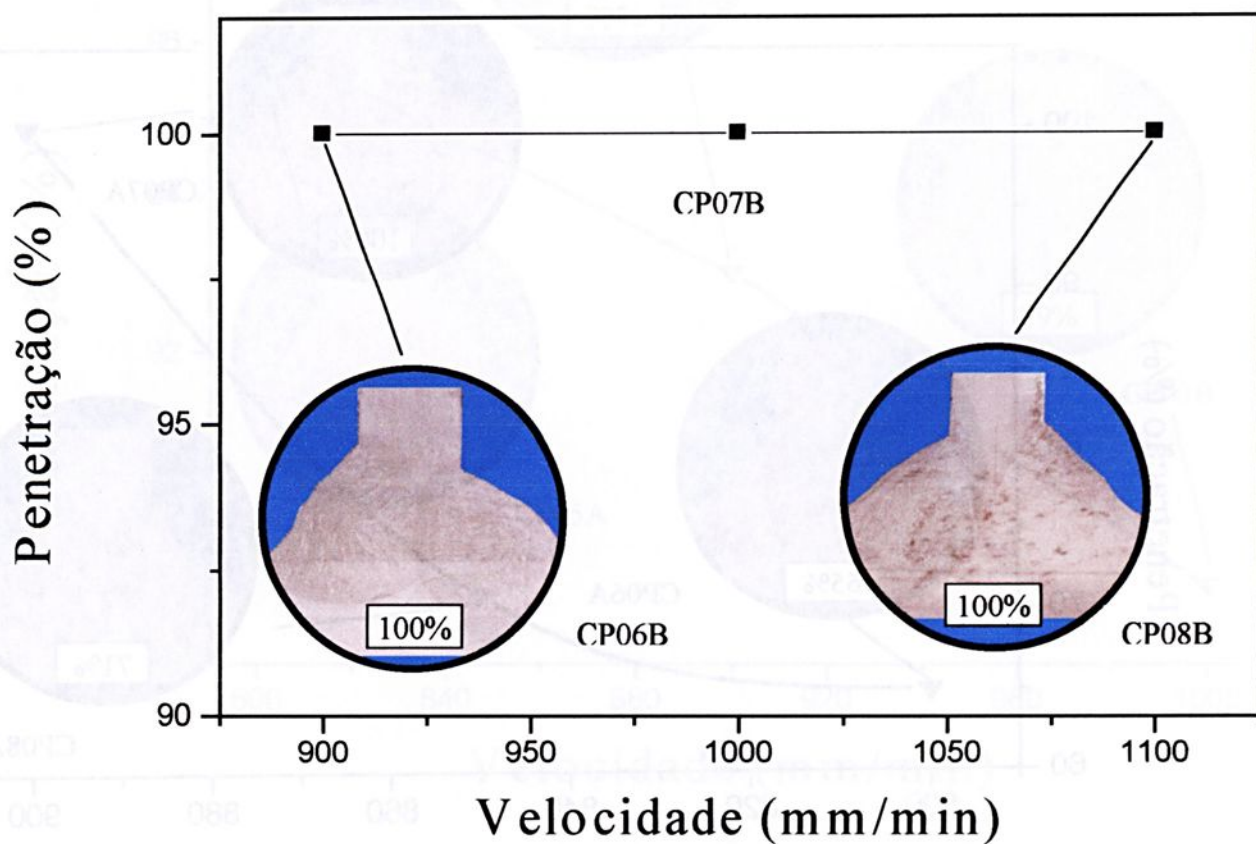


Figura 4 -6: Evolução gráfica da penetração de solda em função da variação da velocidade de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 26,5 Volts; corrente de 900 A.

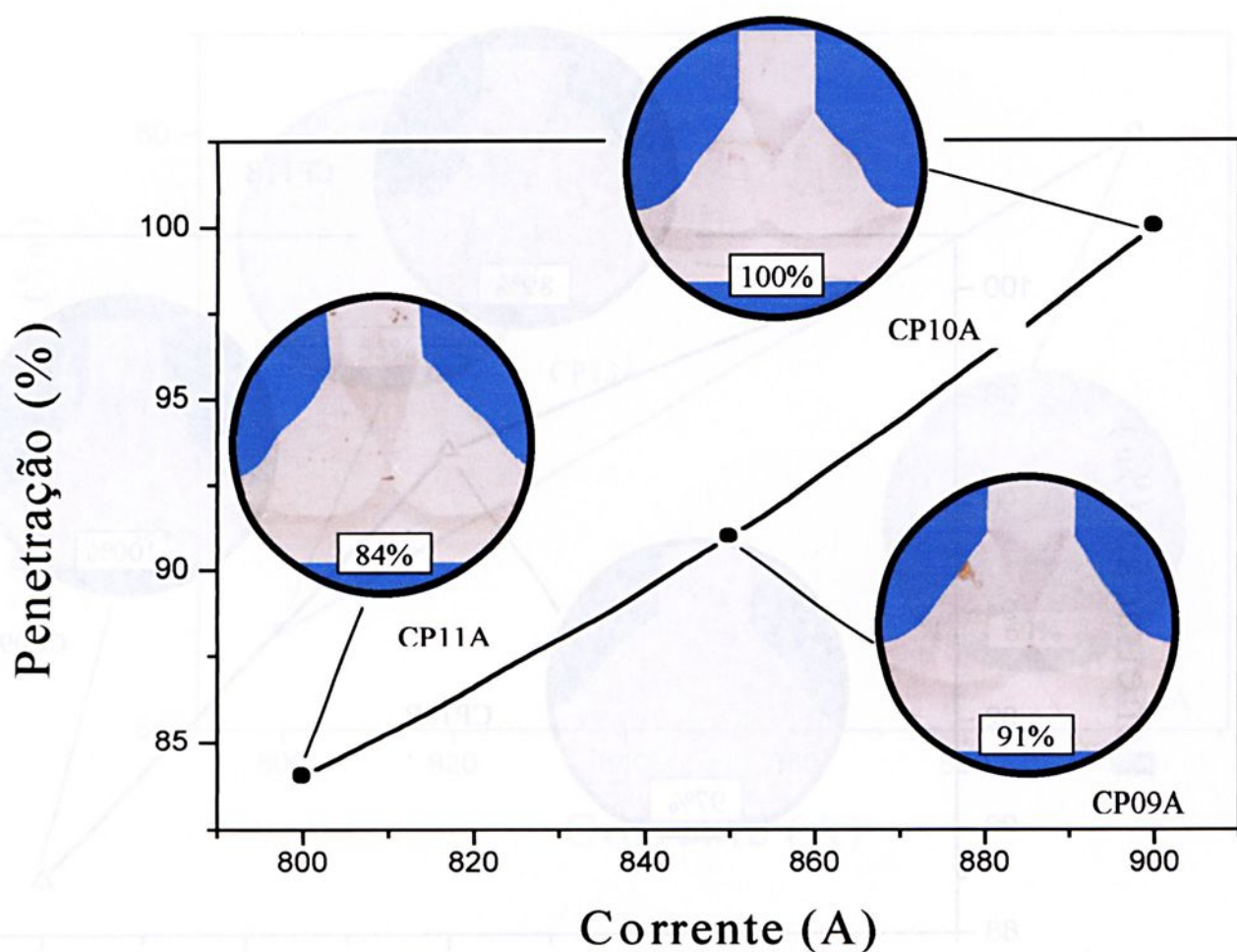


Figura 4 -7: Evolução gráfica da penetração de solda em função variação da corrente de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 26 Volts; velocidade de 1200 mm/min.

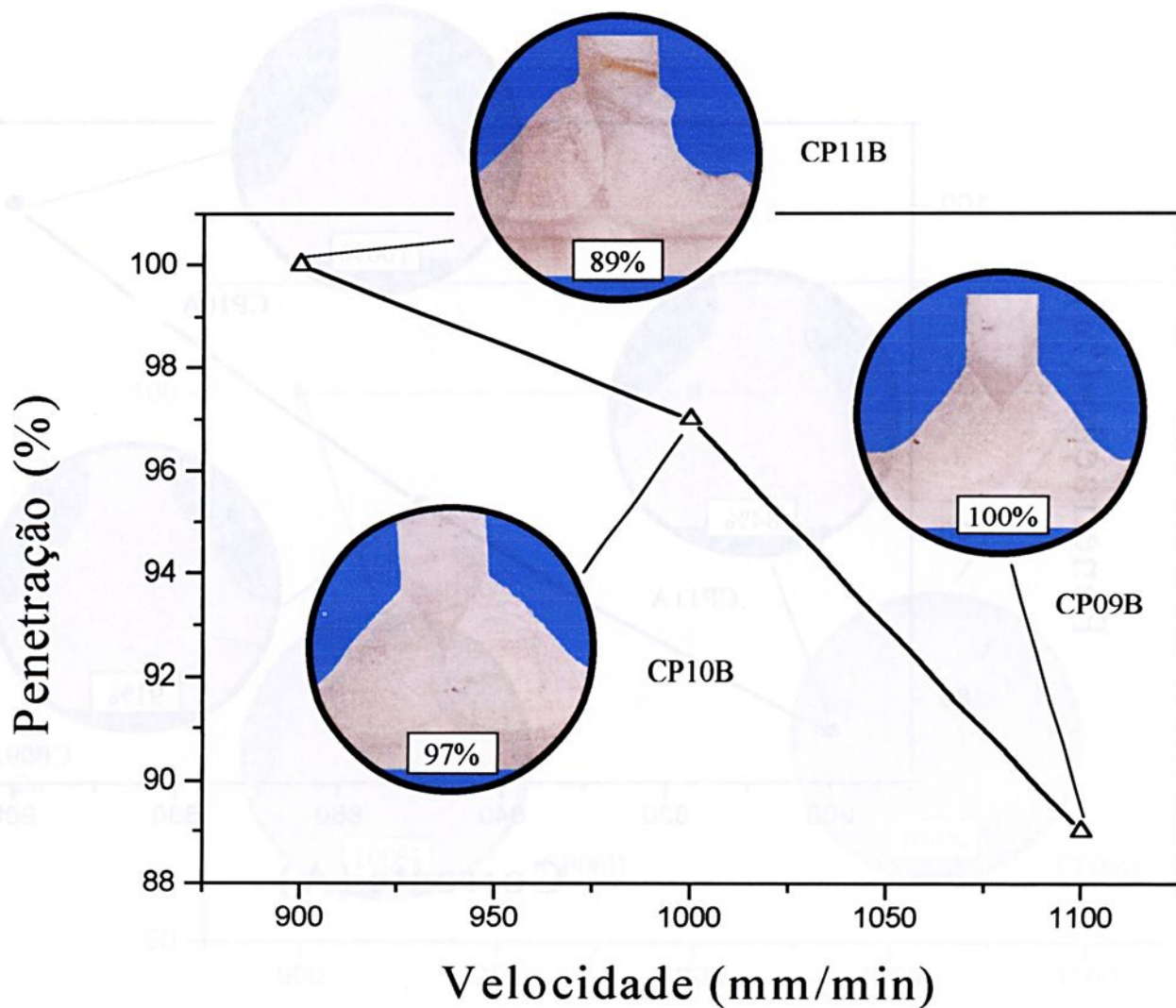


Figura 4 -8: Evolução gráfica da penetração de solda em função da variação da velocidade de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 26 Volts; corrente de 850 ampères.

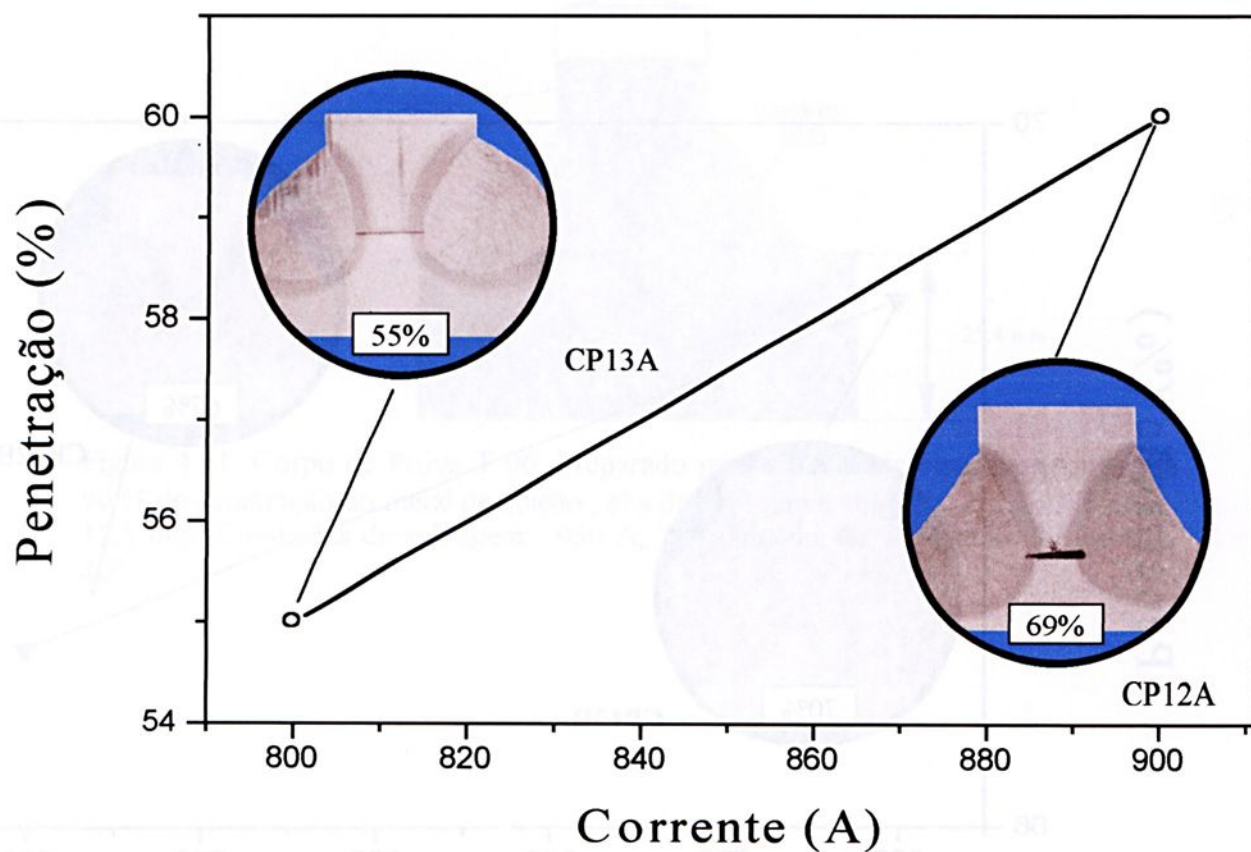


Figura 4 -9: Evolução gráfica da penetração de solda em função da variação da corrente de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 27 Volts; velocidade de 1100 mm/min.

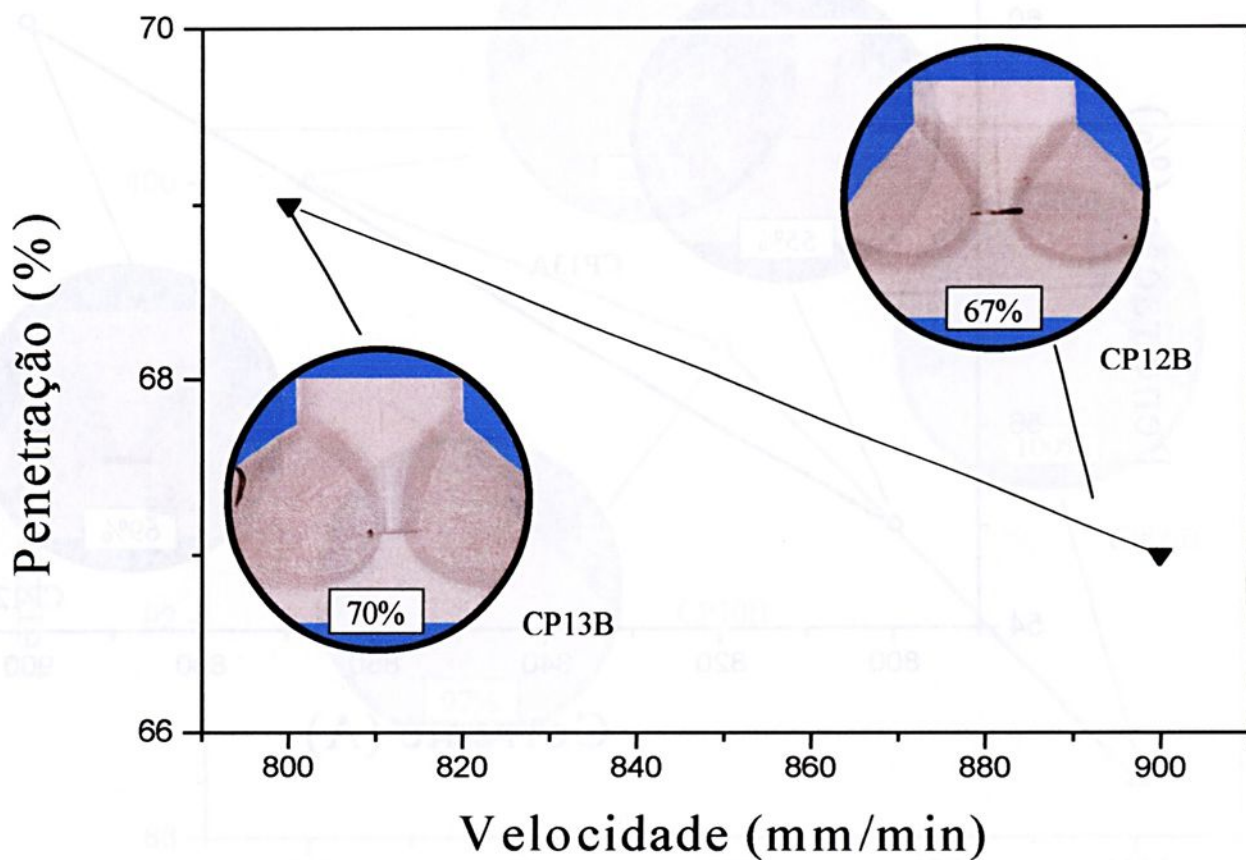


Figura 4 -10: Evolução gráfica da penetração de solda em função da variação da velocidade de soldagem enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Tensão de 26,5 Volts; corrente de 900 A.

4.2 Caracterização Microestrutural por Intermédio de Microscopia Óptica

4.2.1 - Análise micrográfica em uma junta soldada com penetração parcial.

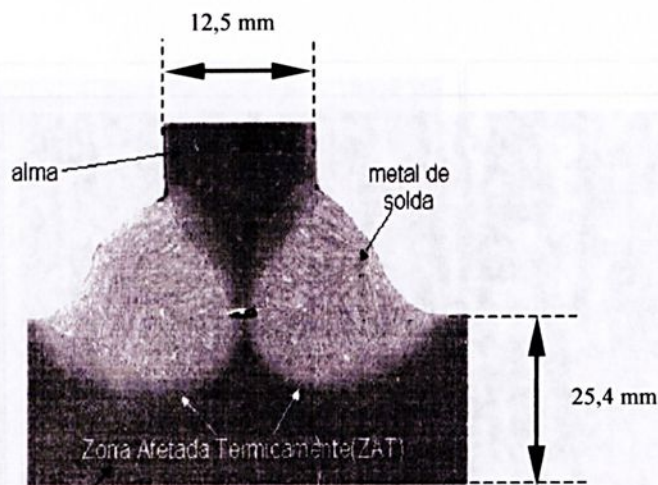
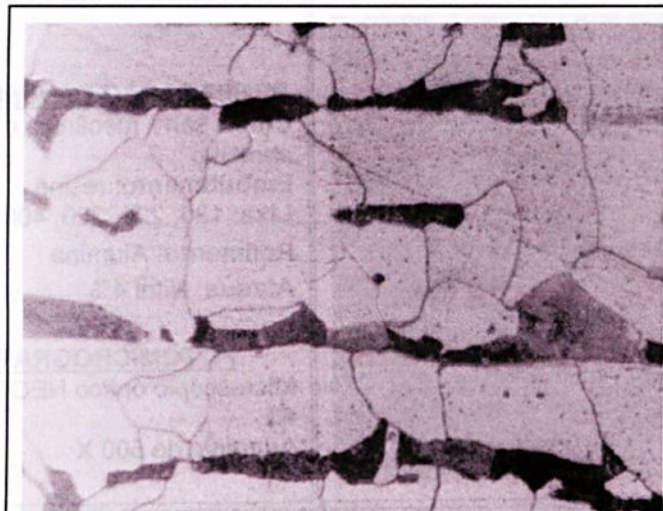


Figura 4.11: Corpo de Prova T 06. Preparado para análise micrográfica. Apresenta 90 % de penetração do metal de adição, aba de 25,4 mm e alma de 12,5 mm. Condições de soldagem: 950 A; 700 mm/min; 27 V; ângulo de trabalho 40°



PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Corte: serra mecânica e disco abrasivo

Embutimento: resina

Lixa: 120, 220, 320, 400 e 600

Polimento: Alumina 1µm

Ataque: Nital 4%

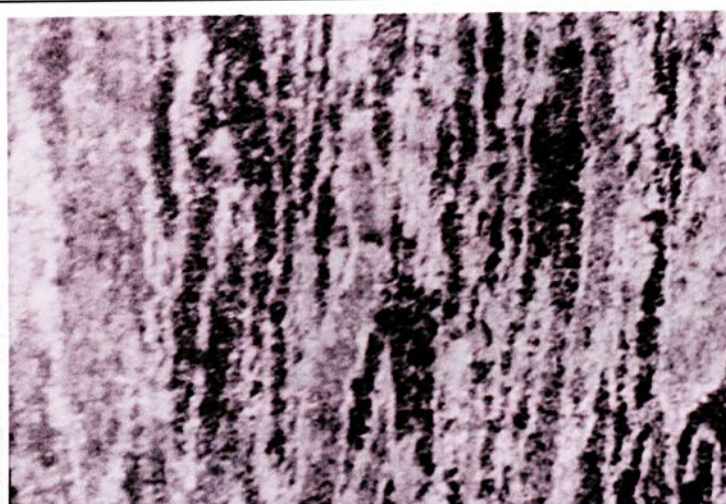
FOTOMICROGRAFIA

Microscópio óptico NEOPHOT 32

Aumento de 500 X

Figura 4-12: Fotomicrografia característica do metal de base(aba).

Matriz ferrítica com cerca de 15 a 20% de grãos de perlita alinhados com o sentido de laminação(Cond.: 950A / V700 / AT40).



PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Corte: Serra mecânica e Disco abrasivo

Embutimento: Resina

Lixa: 120, 220, 320, 400 e 600

Polimento: Alumina 1 μm

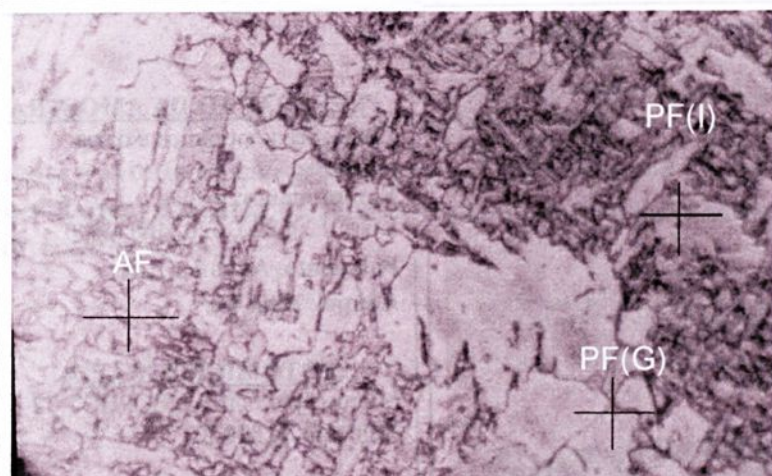
Ataque: Nital 4%

FOTOMICROGRAFIA

Microscópio óptico NEOPHOT 32

Aumento de 500 X

Figura 4-13: Fotomicrografia característica do metal de solda. Observa-se região com martensita e grãos colunares(Cond.: 950A / V700 / AT40).



PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Corte: serra mecânica e disco abrasivo

Embutimento: resina

Lixa: 120, 220, 320, 400 e 600

Polimento: Alumina

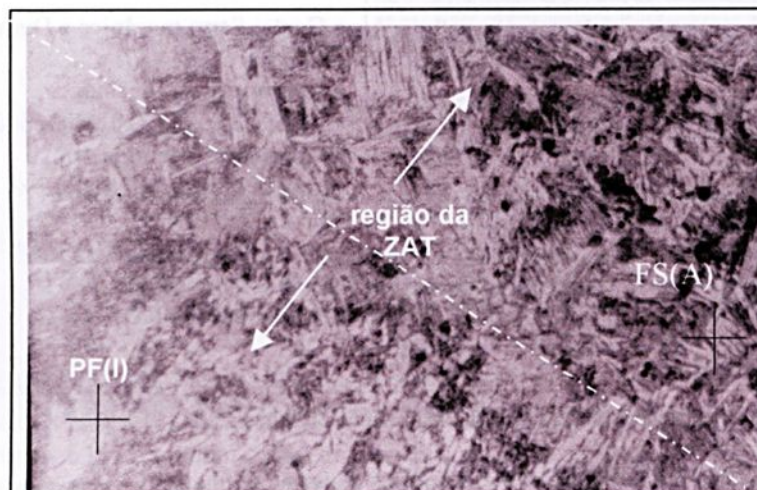
Ataque: Nital 4%

FOTOMICROGRAFIA

Microscópio óptico NEOPHOT 32

Aumento de 500 X

Figura 4-14: Fotomicrografia característica do metal de solda. Na região central observa-se uma faixa(contorno de grão) de ferrita de contorno de grão. No lado esquerdo e direito observa-se grãos de ferrita poligonal e acicular (Cond.: 950A / V700 / AT40).



PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Corte: serra mecânica e disco abrasivo

Embutimento: resina

Lixa: 120, 220, 320, 400 e 600

Polimento: Alumina

Ataque: Nital 4%

FOTOMICROGRAFIA

Microscópio óptico NEOPHOT

32

Aumento de 200 X

Figura 4-15: Fotomicrografia característica da interface metal de solda/ZAT. Observa-se no lado esquerdo inferior a região do metal de solda(grãos colunares). No lado direito a ZAT contendo ferrita com segunda fase alinhada (Condições: 950A / V700 / AT40).

4.2.2 – Análise Micrográfica de uma junta soldada com penetração total

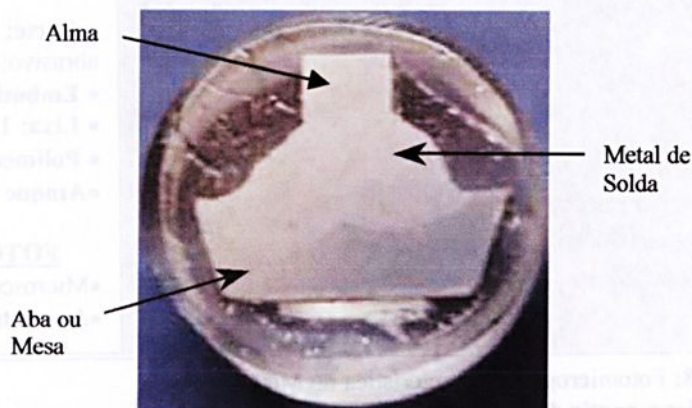
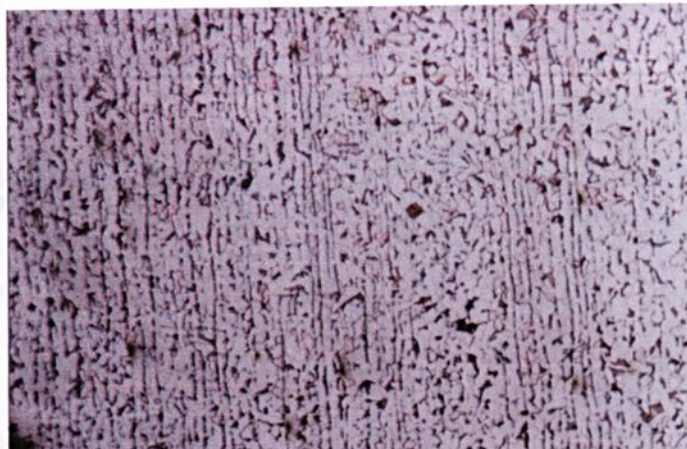


Figura 4-16: Corpo de Prova Cp 07 B. Preparado para análise micrográfica. Apresenta 100 % de penetração do metal de adição , aba de 9,5 mm e alma de 8,0 mm. Condições de soldagem: 900 A; 1000 mm/min; 26,5 V; ângulo do eletrodo 40°



PREPARAÇÃO DA AMOSTRA:

- **Corte:** Serra mecânica e Disco abrasivo;
- **Embutimento:** Resina;
- **Lixa:** 120, 220, 320 , 400, 600
- **Polimento:** Alumina 1 μ m
- **Ataque Químico:** Nital a 2%

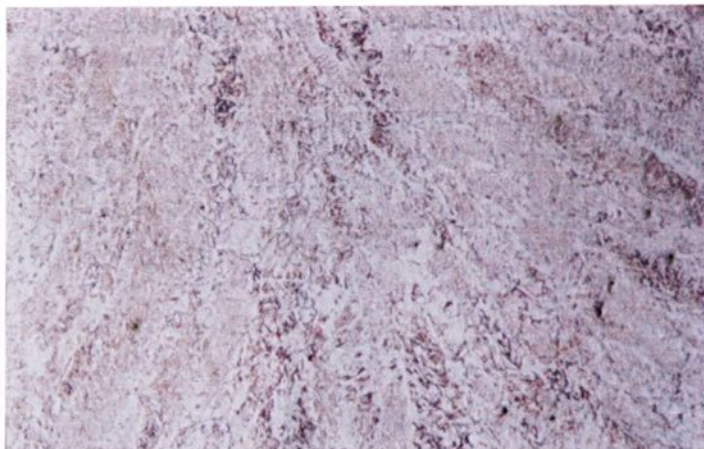
FOTOMICROGRAFIA

- Microscópio óptico
- Aumento de 100 X

Figura 4-17: Fotomicrografia característica do Metal Base (Mesa ou Aba).

Observações a partir da Análise:

- Matriz ferrítica com cerca de 15 a 20 % de perlita, dispostas de forma alinhada
- Tamanho de grãos 7 a 8 (ASTM E 112).
- Presença de inclusões de MnS. Microestrutura característica de Aço baixo Carbono, laminado a quente.



PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

- **Corte:** Serra mecânica e Disco abrasivo;
- **Embutimento:** Resina;
- **Lixa:** 120, 220, 320 , 400, 600
- **Polimento:** Alumina 1 μ m
- **Ataque Químico:** Nital a 2%

FOTOMICROGRAFIA

- Microscópio óptico
- Aumento de 100 X

Figura 4-18: Fotomicrografia característica do Metal de Solda

Observações a partir da Análise:

- Matriz mista de ferrita e martensita, apresentando estrutura colunar resultante de solidificação direcionada..

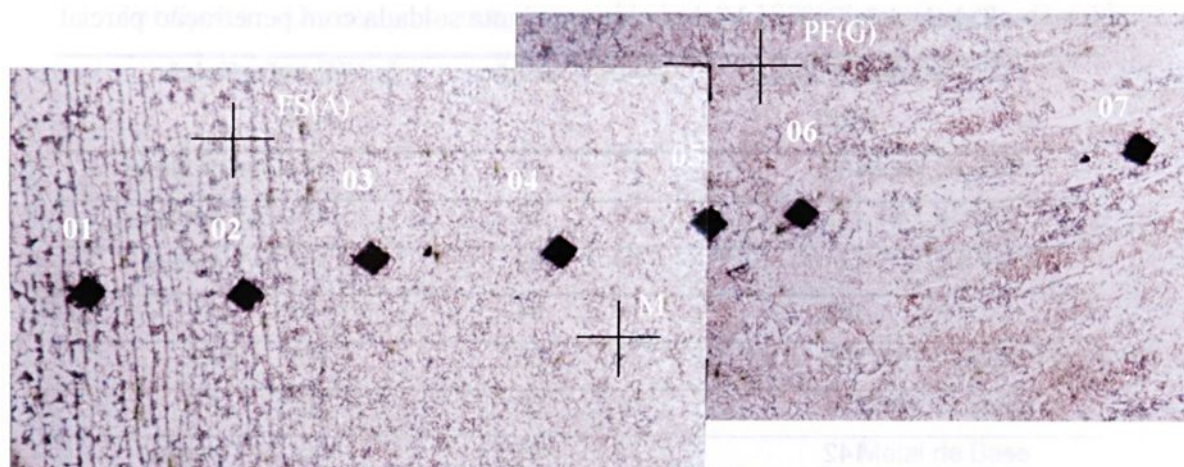


Figura 4-19: Fotomicrografia característica do Metal de Solda

Observações a partir da Análise:

- Transição do metal base (extremidade da foto da esquerda) para a solda, com impressões de microdureza.

FOTOMICROGRAFIA

•Microscópio óptico

•Aumento de 200 X

4.3 – Microdureza Vickers

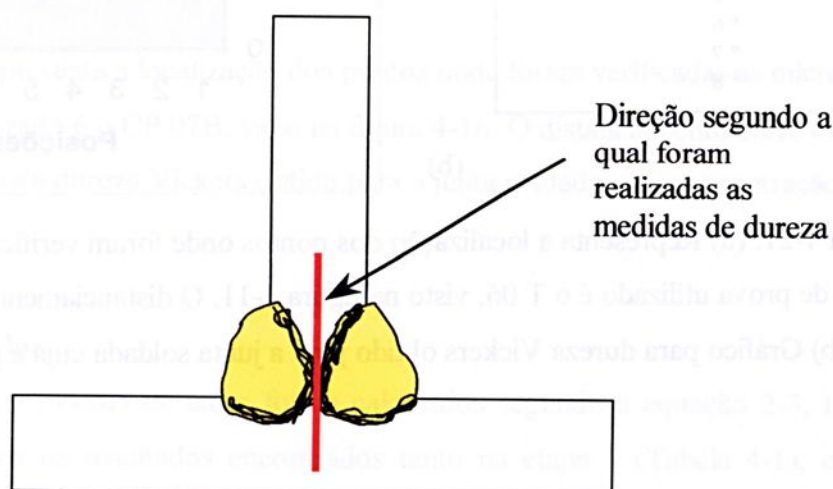
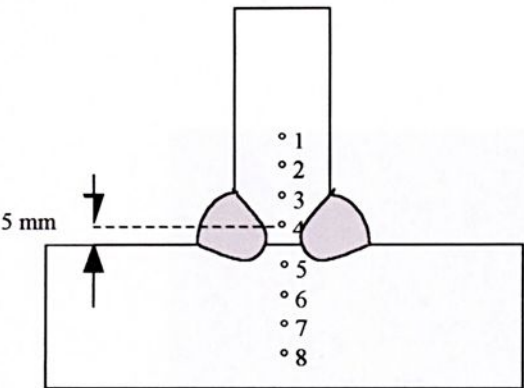


Figura 4-20: Direção segundo a qual foram realizadas as medidas de dureza

4.3.1 – Junta soldada com penetração parcial

Tabela 4.3: Dureza Vickers em uma junta soldada com penetração parcial

Dureza [HV _{0,065}] [Kgf]	Posição	Descrição
139	01	Metal de Base
141	02	ZAT parcial
145	03	ZAT parcial
160	04	ZAT
185	05	ZAT
174	06	ZAT
142	07	ZAT parcial
136	08	Metal de Base



(a)

(b)

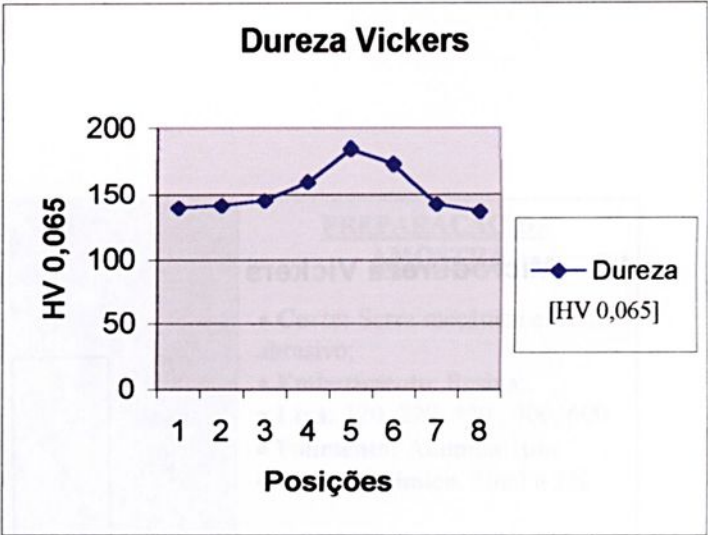


Figura 4-21: (a) Representa a localização dos pontos onde foram verificadas as microdureza, o corpo de prova utilizado é o T 06, visto na figura 4-11. O distanciamento entre os pontos é de 5 mm. (b) Gráfico para dureza Vickers obtido para a junta soldada cuja a penetração foi parcial.

4.3.2 – Junta soldada com penetração total

Tabela 4.4 – Dureza para uma junta soldada com 100% de penetração de solda.

Dureza [HV _{0,5}] [Kgf]	Posição	Descrição
150	01	Metal de Base
184	02	ZAT parcial
181	03	ZAT parcial
187	04	ZAT
184	05	ZAT parcial
187	06	Metal de Solda
151	07	Metal de Base

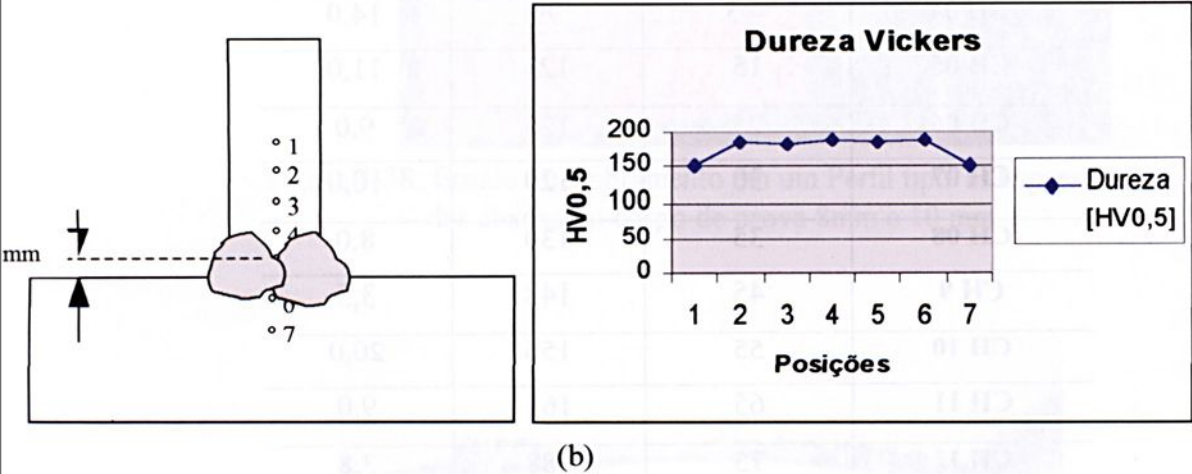


Figura 4-22: (a) Representa a localização dos pontos onde foram verificadas as microdureza, o corpo de prova utilizado é o CP 07B, visto na figura 4-16. O distanciamento entre os pontos é de 5 mm. (b) Gráfico para dureza Vickers obtido para a junta soldada, cuja a penetração foi total.

4.4 – Insumo de calor

Os resultados para o insumo de calor foram calculados segundo a equação 2-3, tomado como referência de ensaios os resultados encontrados tanto na etapa 1 (Tabela 4-1), como etapa 2 (Tabela 4-2) dos ensaios práticos de uma junta com penetração parcial de solda e uma com penetração total.

4.5 – Tenacidade ao impacto

A tabela 4-5 apresenta os resultados de energia Charpy V absorvida, valores experimentais e as suas médias aritméticas.

Tabela 4-5: Valores medidos e médias de energia de impacto Charpy V no metal de solda usado nos corpos de prova das juntas em ângulo tipo “T”.

Corpo de Prova	Temperatura °C	Valor Médio [J]	Desvio Médio [J]
CH 01	-196	5	0,0
CH 02	-70	42	9,0
CH 03	- 40	68	18,0
CH 04	- 5	99	14,0
CH 05	15	123	11,0
CH 06	25	123	9,0
CH 07	30	120	10,0
CH 08	35	130	8,0
CH 9	45	148	3,5
CH 10	55	156	20,0
CH 11	65	161	9,0
CH 12	75	188	3,8

4.6 – Ensaio de dobramento

Com o objetivo de efetuar uma avaliação, através de uma indicação qualitativa, da ductilidade da junta soldada realizou-se o ensaio de dobramento, tracionando-se a solda em um primeiro momento e em outro, fazendo-se com que a mesma fosse comprimida, uma vez que pelo lado oposto a solda, apresentava-se com um entalhe.

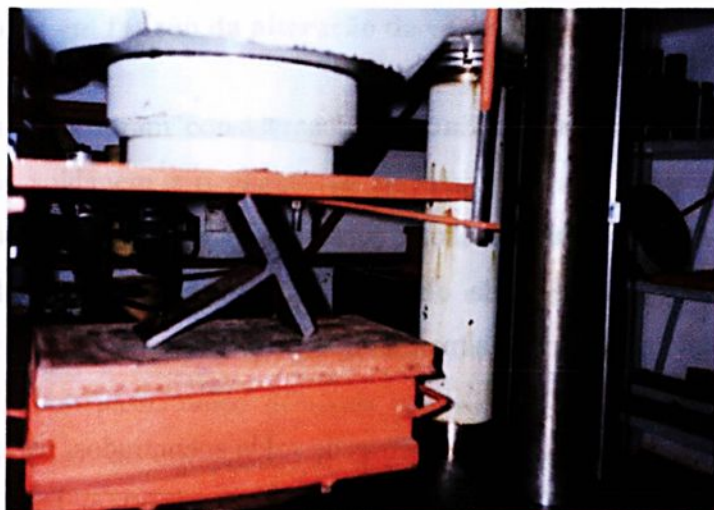


Figura 4-38: Ensaio de Dobramento em um Perfil tipo T. Espessura das chapas do corpo de prova 8mm e 10 mm

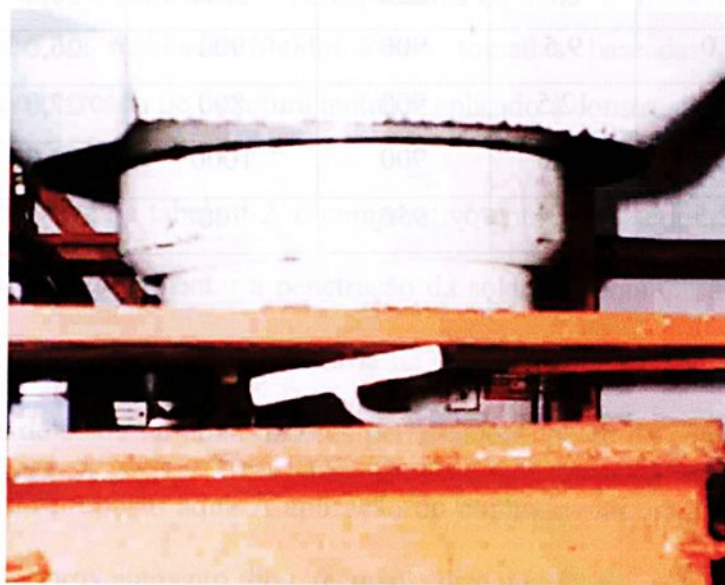


Figura 4-39: Ensaio de dobramento, apresentando deformação sofrida pelo corpo de prova após carregamento máximo.

Ambos os ensaios apresentaram indicação de boa ductilidade do junta soldada, principalmente no tocante a ZAT.

4.7 – Análise qualitativa e quantitativa para junta soldada com penetração parcial

Realizou-se uma análise qualitativa e quantitativa na região de solda para algumas condições de soldagem (Cpd), objetivando efetuar uma comparação entre elas, levando-se em consideração o aporte de calor e a microdureza. Os tem os seus resultados apresentados o item 5.4 deste trabalho, onde os mesmo são discutidos.

4.8 – Melhores Parâmetros Encontrados

A tabela 4-6, apresenta os melhores parâmetros encontrados no presente trabalho, com relação a máxima penetração de solda obtida, melhor acabamento superficial da solda em função da combinação de espessura de alma e aba

Tabela 4-6: Melhores parâmetros de solda encontrados, para a otimização do processo

Espessura do Material [mm]		Intensidade de Corrente [A]	Velocidade de Soldagem [mm/min]	Tensão [V]	Ângulo de Soldagem [Graus]
Alma	Aba				
6,3	8,0	850	1100	26,0	40
8,0	9,5	900	900	26,0	40
9,5	12,5	900	800	27,0	40
9,5	16,0	900	1000	27,0	40
12,5	25,4	950	700	27,0	40

CAPÍTULO V

DISCUSSÃO

5.1 – Penetração da solda em função da alteração de variáveis na junta soldada

Quatro parâmetros variáveis foram considerados neste trabalho: a intensidade de corrente, a tensão, a velocidade de soldagem e o ângulo de trabalho. Portanto para melhor entender os resultados da penetração de solda em função da alteração de variáveis na junta soldada, deve-se:

- considerar que na etapa 1(um) do resultados obtidos, adotou-se as espessuras de 12,5mm para alma do perfil e 25,4 mm para mesa ou aba como espessuras máximas a serem trabalhadas em passe único de solda na máquina utilizada para os ensaios, isto devido as limitações do equipamento e recomendações das bibliografias de referência. Desta forma trabalhou-se os parâmetros variáveis até encontrar-se um conjunto variáveis que conferissem o maior percentual de penetração da solda na junta soldada;
- Considera que as combinações de espessuras de alma e mesa ou aba utilizadas na etapa 2 (dois) dos resultados obtidos foram tomadas baseadas nos perfis de maior consumo pelo mercado de estrutura metálica aplicado à construção civil;

A etapa 2 (dois) apresenta na tabela 4-2, o comparativo entre duas séries de ensaios que refletem o sucesso ou insucesso em aumentar a penetração da solda na junta em ângulo. No início deste trabalho a linha de produção da ICEC Indústria de Construção Ltda, apresentava uma média de 29% de penetração de solda na junta de seus perfis independente da combinação de espessuras aba e alma, dentro do proposto aqui. A aplicação do conhecimento pode otimizar este processo no diz respeito ao aproveitamento dos recursos disponíveis do equipamento, aproveitando melhor os consumíveis e o tempo de processo com a redução dos retrabalhos em descontinuidades provocadas pela falta de procedimentos melhores desenvolvidos.



O aumento da penetração de solda através da elaboração de procedimentos confiáveis conferem aos calculistas e projetistas confiabilidade no produto fabricado e liberdade para desenvolver projetos que possam se utilizar deste conhecimento para diminuir custos tornando a estrutura metálica uma opção de maior competitividade no mercado de construção civil.

5.2 – Análise metalográfica

Nas observações da microestrutura das juntas soldadas, através de microscopia ótica utilizou-se de aumentos de 100 X, 200 X e 500 X, registrando o metal de base, o metal de solda e a ZAT nas duas juntas analisadas, com o propósito de identificar os constituintes de cada região e comparar os resultados para as duas situações quanto a penetração de solda na junta soldada.

A comparação entre duas situações mostra que no metal de base os constituintes permaneceram da mesma forma isto é, apresentando matriz ferrítica com cerca de 15 a 20% de perlita. No metal de solda aos constituintes também permaneceram inalterados, porém evidenciando a formação de uma estrutura colunar resultante da solidificação direcionada. Na região da ZAT observa-se a presença de ferrita com segunda fase alinhada, apresentada na forma de grãos grosseiros e paralelos que crescem ao longo de um mesmo plano, fato este que não é muito desejável em uma junta soldada, uma vez que este tipo de constituinte apresenta uma baixa resistência a propagação de trincas.

5.3 – Dureza

Os valores encontrados e apresentados nas tabelas 4-3 e 4-4 aumentam de acordo com que se distancia do metal de base e aproxima-se do metal de solda passando-se pela ZAT. Provavelmente em função da presença de elementos de ligas componente do metal de adição e também do tratamento térmico ao qual submeteu-se esta região.



5.4 – Análise qualitativa, quantitativa e Insumo de calor

Para a obtenção destes resultados, os quais são aqui discutidos tomou-se 3 (três) condições distintas quanto ao aporte de calor encontrado para realização das análises micrográficas. Utilizando um insumo de calor de 1.27 KJ/mm, obteve-se uma microestrutura diversificada; com presença de ferrita de contorno de grão PF(G), ferrita poligonal intragranular PF(I), ferrita de segunda fase alinhada FS(A), ferrita de segunda fase não-alinhada FS(NA) e uma pequena quantidade de ferrita acicular AF. Os Cdp soldados com 1,55 KJ/mm apresentaram um alto teor de AF, sendo sua ME composta predominantemente por este constituinte. Também se verificou a presença de PF(G). Aumentando o insumo de calor para 1,73 KJ/mm, ocorreu uma queda na porcentagem de AF e um aumento na quantidade de PF(G). A porcentagem de AF em função do insumo de calor está representada na figura 5-1.

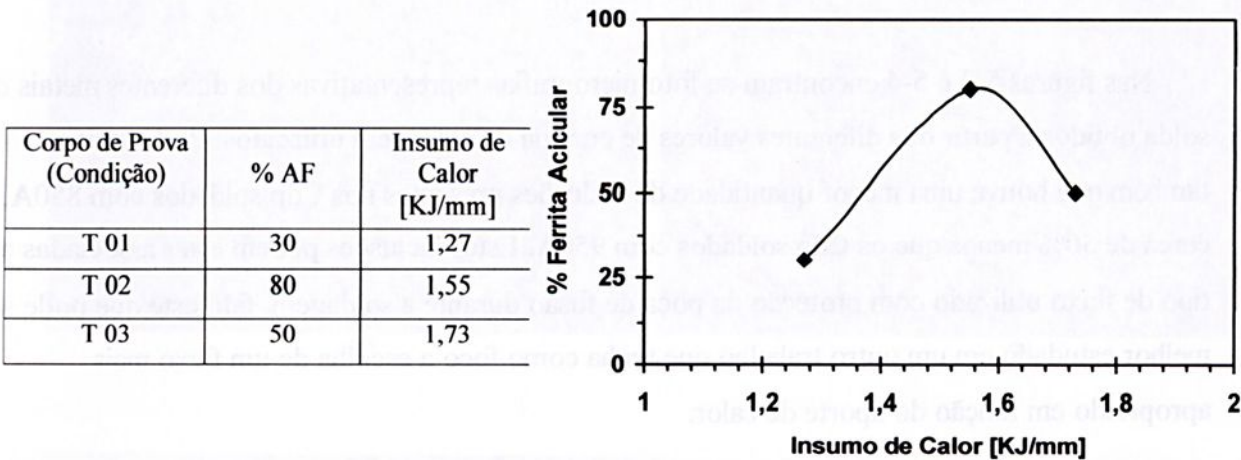


Figura 5-1: Avaliação do metal de solda, considerando a porcentagem de AF e o insumo de calor utilizado, em uma junta soldada com aço baixo carbono.

Com uma elevada taxa de resfriamento, baixo aporte térmico, o metal de solda apresentou uma maior dureza. Estes valores de dureza encontrados nos Cdp soldados com aportes mais baixos, são provenientes de uma maior quantidade de FS(A) presente em sua estrutura. Por outro lado, com menores taxas de resfriamento, maior aporte térmico, a dureza do metal de solda foi reduzida devido à presença de constituintes menos duros, tal como a PF(G), presente em grande

quantidade nas juntas soldadas com 1,73 KJ/mm. A figura 5-2 mostra os valores de microdureza em função do insumo de calor.

Corpo de Prova (Condição)	HV [0,065 Kgf]	Insumo de Calor [KJ/mm]
T 01	245	1,27
T 02	235	1,55
T 03	210	1,73

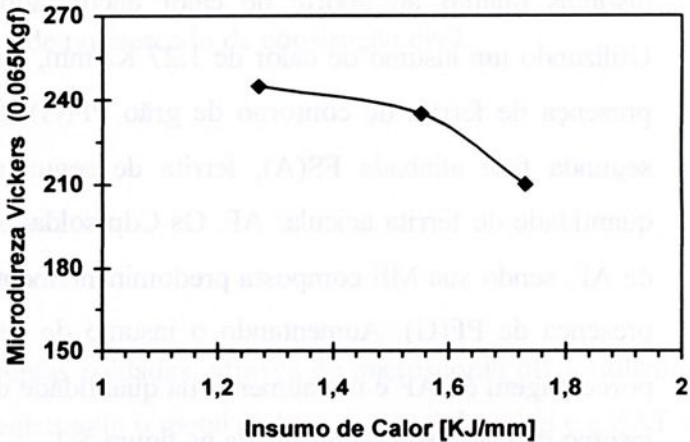
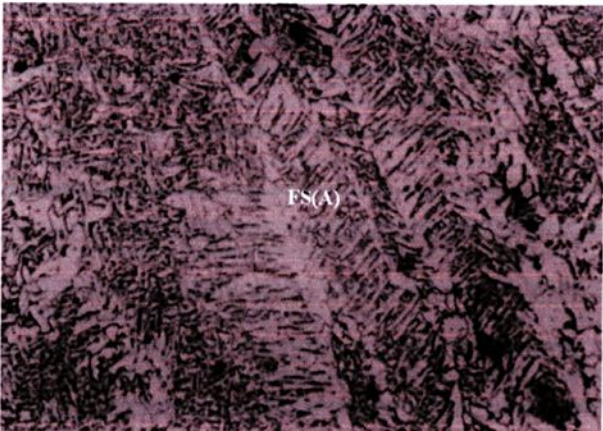
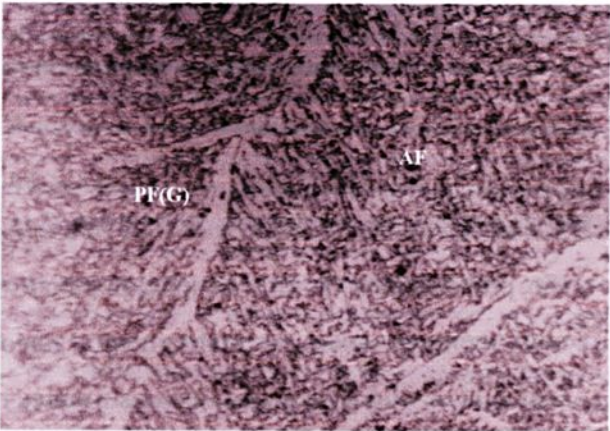


Figura 5-2 – Avaliação do metal de solda, considerando sua dureza e o insumo de calor utilizado, em uma junta soldada com aço baixo carbono.

Nas figuras 5-3 e 5-4 encontram-se fotomicrografias representativas dos diferentes metais de solda obtidos a partir dos diferentes valores de energia de soldagem utilizados. Pode verificar também que houve uma menor quantidade de inclusões presentes nos Cdp soldados com 850A, cerca de 50% menos que os Cdp soldados com 950A. Estas inclusões podem estar associadas ao tipo de fluxo utilizado com proteção da poça de fusão durante a soldagem, fato este que pode ser melhor estudado em um outro trabalho que tenha como foco a escolha de um fluxo mais apropriado em função do aporte de calor.



(a)



(b)

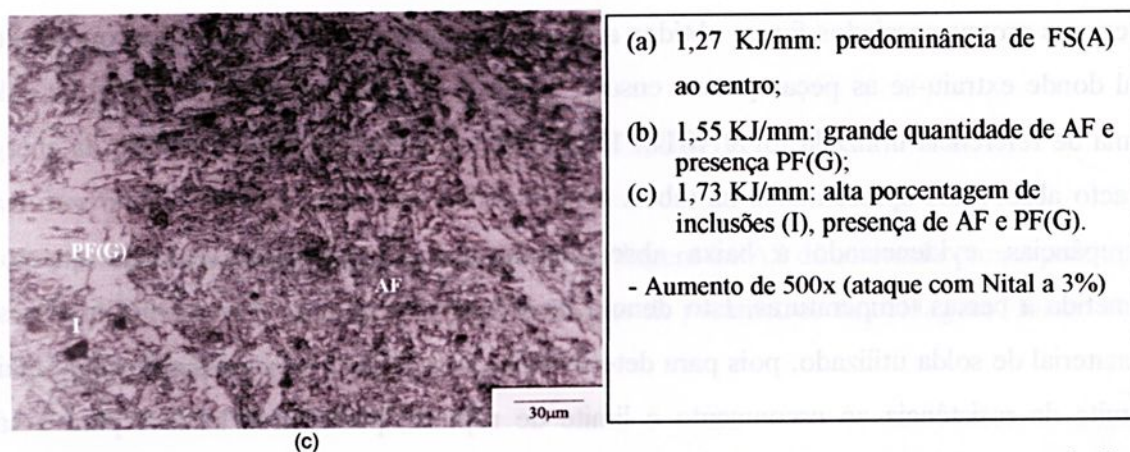


Figura 5-3: Fotomicrografias do metal de solda ferrítico mostrando os constituintes microestruturais (classificação *IIW*).

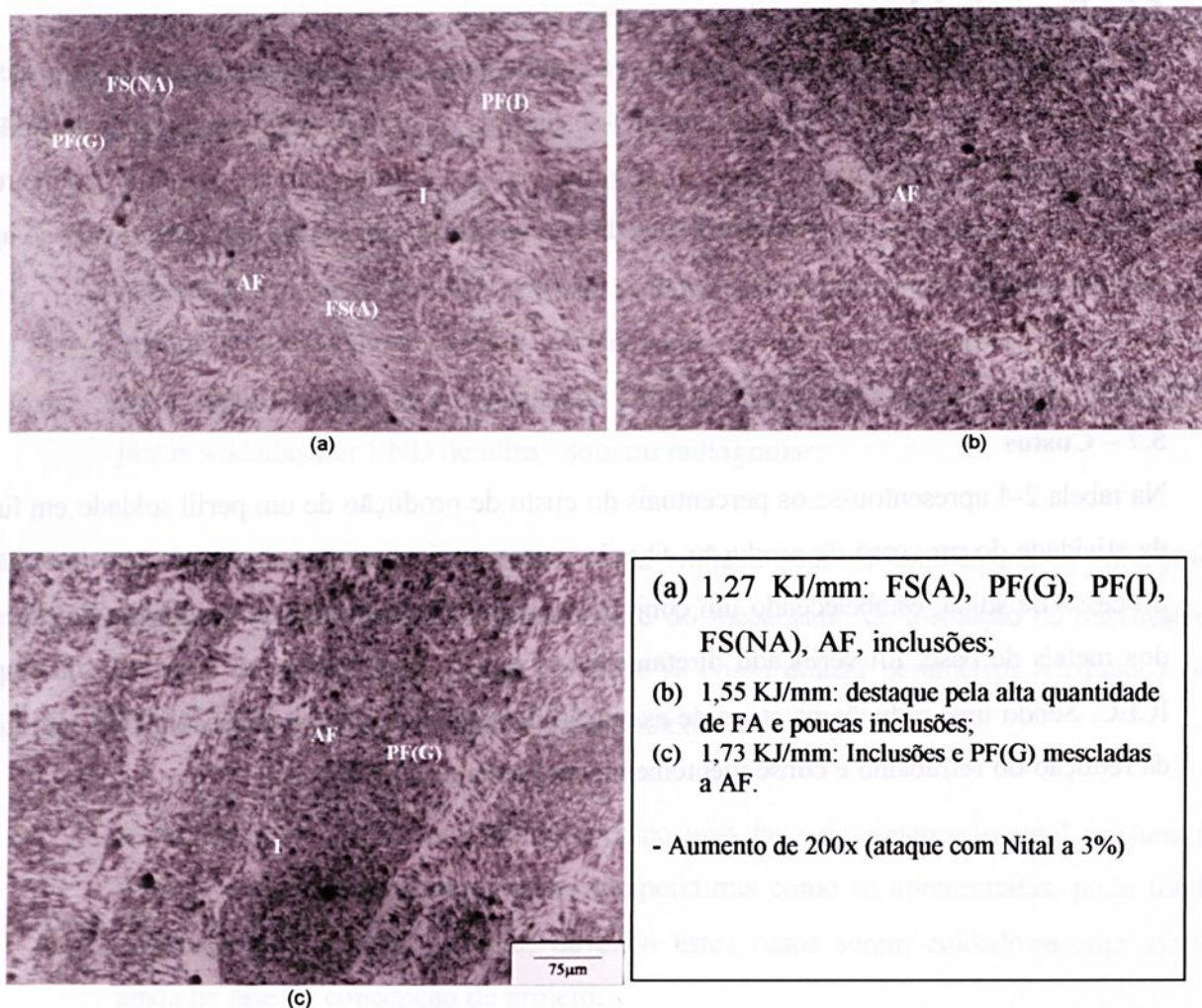


Figura 5-4: Fotomicrografias ótica mostrando microconstituintes presentes no metal de solda.

5.5 – Tenacidade ao impacto

Os corpos provas ensaiados foram obtidos a partir de uma junta de topo soldada com penetração total donde extraiu-se as peças para o ensaio, sendo o entalhe realizados no metal de solda. A norma de referência utilizada foi a ASTM E 23 – 96. Quanto aos valores médios da energia de impacto absorvidos apresentados na tabela 4-5, mostram-se com um desvio médio sem maiores discrepâncias, evidenciando a baixa absorção de energia pela junta soldada quanto esta submetida a baixas temperaturas. Isto denota uma preocupação quanto aos critérios de escolha do material de solda utilizado, pois para determinadas situações deve-se passar por algo mais que o limite de resistência ao escoamento e limite de ruptura, parâmetros básicos para o cálculo estrutural.

5.6 – Ensaio de dobramento

Os ensaios de dobramento apresentaram – se todos dentro do padrão de aceitação estabelecidos pela norma AWS D1.1 – 98, não notando-se fissuras ou fraturas visíveis ou falta de fusão em uma avaliação a “olho nu”. Demonstrando que o procedimento de variação dos parâmetros de soldagem obedeceu a uma premícia básica de não enfraquecer a região da ZAT, devido ao aporte térmico gerado.

5.7 – Custos

Na tabela 2-4 apresentou-se os percentuais do custo de produção de um perfil soldado em função da atividade do processo de produção. O valor apresentado como resultados desta otimização do processo de solda, estabelecendo um conjunto de parâmetros para solda em função da espessura dos metais de base, foi verificado diretamente na prática junto a linha de produção da empresa ICEC. Sendo uma redução na etapa de execução da soldagem alma/aba de 5% a 10%, em função da redução do retrabalho e conseqüentemente economia de consumíveis.



CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

No estudo para otimização do processo de soldagem à SAS direcionado para a produção de perfil soldado tipo I ou H, através do estabelecimento de parâmetros de soldagem, foram obtidas as seguintes conclusões:

1. O estabelecimento de parâmetros de soldagem específicos para cada combinação de metais de base (aba e alma), é de extrema necessidade para um melhor desempenho do processo produtivo, o que pode tornar menor o preço de custo do produto, deixando-o mais competitivo quanto ao custo, prazo e qualidade em relação às opções oferecidas pelo mercado;
2. Com a configuração da máquina utilizada para este trabalho, conclui-se que para espessuras de metais de base igual ou inferior a 8,0 mm pode-se obter 100% de penetração do metal de solda sem a necessidade da realização de chanfros ou extração da raiz de solda na junta soldada, eliminando-se assim etapa no processo produtivo. No entanto para se ter uma confiabilidade desta afirmação faz-se necessário a verificação das juntas soldadas por END de ultra - som ou radiografias;
3. A alta tenacidade proporcionada à junta soldada pela AF está ligada às condições de soldagem e, dessa forma o conhecimento do mecanismo de formação da microestrutura torna-se de grande importância para que se possa utilizar parâmetros adequados com a finalidade de obter determinada variação microestrutural;
4. A presença de uma descontinuidade como uma falta de penetração total em uma junta soldada quando submetida a baixas temperaturas como as apresentadas, pode fragilizar perigosamente o perfil soldado, devendo estes casos serem cuidadosamente avaliados ainda na fase de concepção de projeto;



5. O maior insumo de calor, provocou uma queda na quantidade de AF e um aumento de PF(G), devido a baixa taxa de resfriamento imposta por este nível de energia de soldagem;
6. Com o presente estudo realizado neste trabalho foi obtido um maior entendimento da máquina de solda, quanto à possibilidade de utiliza-la de forma a obter um maior aproveitamento dos consumíveis e da própria máquina, reduzindo o retrabalho do produto perfil soldado em função de discontinuidades oriundas de parâmetros não adequados, uma melhor qualidade da junta soldada principalmente no tocante a penetração da solda, mesmo para junta de penetração parcial;
7. Reduziu-se as preocupações como fabricante, quanto ao fornecimento do produto perfil soldado com as mesmas características atuais, como exportações à países cujas as temperaturas são baixas (Temperatura ambiente $< 5^{\circ}\text{C}$), em se tratando de junta soldadas que apresentam-se com um entalhe (região da junta de solda onde não há uma perfeita fusão), como é caso das juntas soldadas de penetração parcial.
8. A redução do custo final de produção do perfil soldado é da ordem de 2 a 4%, o que não é muito para o setor de atuação da ICEC, porém a confiabilidade adquirida para o processo após este trabalho permite-se deixar de ter um custo final do produção maior que o estimado, em função de retrabalhos de solda oriundos de desconhecimento de parâmetros não adequados.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

- Estudar a influência das inclusões presentes nas juntas soldadas quando de um aporte de calor maior, a fim de se determinar um melhor fluxo para proteção da poça de fusão para esta condição

- Partindo-se dos resultados aqui encontrados para juntas de penetração total e parcial, estudar do ponto de vista mecânico as vantagens quanto a fabricação de perfis soldados do tipo I ou H, soldados apenas de lado, isto é, “substituir material de solda por conhecimento”.

.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] LINCOLN ELETRIC COMPANY, “The Procedure Handbook of Arc Welding”, Cleveland. Ohio, 13 th Edition, USA, 1995
- [02] PARANHOS, R.; SOUZA, “A., Soldagem a Arco Submerso”, SENAI/RJ – CETEC de Solda, Rio de Janeiro ,1999.
- [03] Revista Técnica, nº 532/1999 “Engenharia”, Engenho Editora Técnica Ltda.
- [04] Ortega, L.P.C.(1999), “Efeitos da Adição de Ti e B na tenacidade do Metal de Solda Obtido Por Arco Submerso em Juntas de Dois Passes” Rio de Janeiro. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, 1999.
- [05] SENAI-SP, “Soldagem”, Organização Selma Ziedas e Ivanisa Tatini, São Paulo, pp. 215-216 1997.
- [06] Valenciani, V.C (1997), “Ligações em Estruturas de Aço”. São Carlos. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1997.
- [07] AMERICAN WELDING SOCIETY – “Structural Welding Code Steel”, AWS D1.1 – 96, 15 th Edition. USA 1996
- [08] O’Brien, R.L. (ed.), Welding Handbook, 8 th Edition, vol. 2, cap. 6, AWS, Miami, 1991.
- [09] “Guidelines for the classification of ferritic steel weld metal microstructural constituents using the lighth microscope”, IIS-IIW Doc. 835, 1986.
- [10] Alé, R.M, Jorge, J.C.F. e Rebello, J.M. – “ Constituintes microestruturais de soldas de aços C-Mn baixa liga. Parte II – Metal de Solda”, Soldagem & Materiais, vol. 1, Nº 2, pp, 18-25
- [11] ASM Handbook , “Metals handbook”, vol. 6, pp. 76-77, ASM , USA, 1993.



.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [12] Paranhos, R.P.R., Neves, S., Guimarães, A.S., “Otimização de Procedimento de Soldagem Para Juntas de Filete Executadas Pelo Processo Arco Submerso”, Anais do XXI ENTS, pp.1015-1023, 1995.
- [13] ASTM, “E112 - Standard Test Method for Determining Average Grain Size”, Ed. E112 – 88
- [14] ASTM, “E384 - Standard Test Method for Microhardness of Materials”, Ed. E384 – 89
- [15] ASTM, “E 23 - Standard Test Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials”, Ed. E23 – 96
- [16] Tokimatsu, R.C., Ferreira, I., “Ensaio Charpy – Limitações e Campo de Aplicação”, 54º Congresso da ABM, São Paulo, 1999.
- [17] Colparert, H., “Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns”, 3ª ed., São Paulo, 1994
- [18] Ventrella, V.A., “Identificação Microestrutural de Juntas Soldadas de Aços de Alta Resistência e Baixa Liga”., Tese apresentada na UFSCar, São Carlos, 1999.
- [19] Coordenação Wainer, E., Brandi, S.D., Mello, F.D.H “Soldagem, Processos e Metalurgia”, editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1992. Pp 133-152.
- [20] Neto, O.V.S., Tokimatsu, R.C., Ventrella, V.A., “Microestrutura do Metal de Solda do Aço ASTM-A36 Obtida Por Soldagem a Arco Submerso”, 55º Congresso da ABM., Rio de Janeiro, julho de 2000.
- [21] ASTM, “A36/A 36M - Standard Specification for Carbon Structural Steel”, Ed. – 94
- [22] NBR 5884 – Perfil I estrutural de aço soldado por arco elétrico – Especificação; ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, revisão Julho de 2000.



.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [23] Vishnu, P.R., 1995, ASM Handbook, vol.6 – Eelding, Brazing, And Soldering, USA;
- [24] Lancaster J. F., Metallurgy of Welding, fourth edition, Allen & Unwin Ltd, London, 1986.
- [25] Taniguchi C., Soldagem Processos e Metalurgia, Metalurgia de Soldagem, 8a ,ed. Edard Blücher Ltda, São Paulo, 1992.

CLASSIFICAÇÃO
MICROESTRUTURAL



APÊNDICE A

CLASSIFICAÇÃO MICROESTRUTURAL

CLASSIFICAÇÃO

MICROESTRUTURAL

Descrição:

A lamela consiste de um conjunto de grãos de grãos relativamente finos de uma única fase, ou de grãos com constituição de alta regularidade, sendo a espessura média de 1,5 a 2,0 μm . Apresenta uma distribuição de tamanho de grãos de forma irregular, sendo a maioria dos grãos de tamanho médio, com alguns grãos de tamanho pequeno e alguns de tamanho grande, sendo a maioria dos grãos de tamanho médio.

Corpo de Prova: 10.10.10.10

Observação da amostra: 10.10.10.10

Análise de 10.10.10.10

Constituinte:

FERRITA ACICULAR

Sigla:

AF

Microestrutura:

**Descrição:**

A ferrita acicular é um constituinte que se apresenta na forma de grãos extremamente finos de ferrita não paralelas, separadas por contornos de alto ângulo e razão de aspecto variando de 3:1 até 10:1. Apresenta uma morfologia de emaranhado e grãos se entrecruzando. Aparentemente as placas nucleiam-se intragranularmente em inclusões e estão associadas a grande tamanho de grãos austenítico.

Corpo de Prova: CP 10 A
Observação da zona fundida
Aumento de 200 X

Constituinte:

FERRITA POLIGONAL INTRAGRANULAR

Sigla:

PF(I)

Microestrutura:



Descrição:

São grãos de ferrita poligonal, que aparecem no interior dos grãos austeníticos prévios, os quais devem ser maiores que cerca de 3 vezes o tamanho médio das ripas de ferrita acicular ou ferrita de segunda fase circundante.

Corpo de Prova: CP 3 A

Observação do metal de base (aba)

Aumento de 500 X

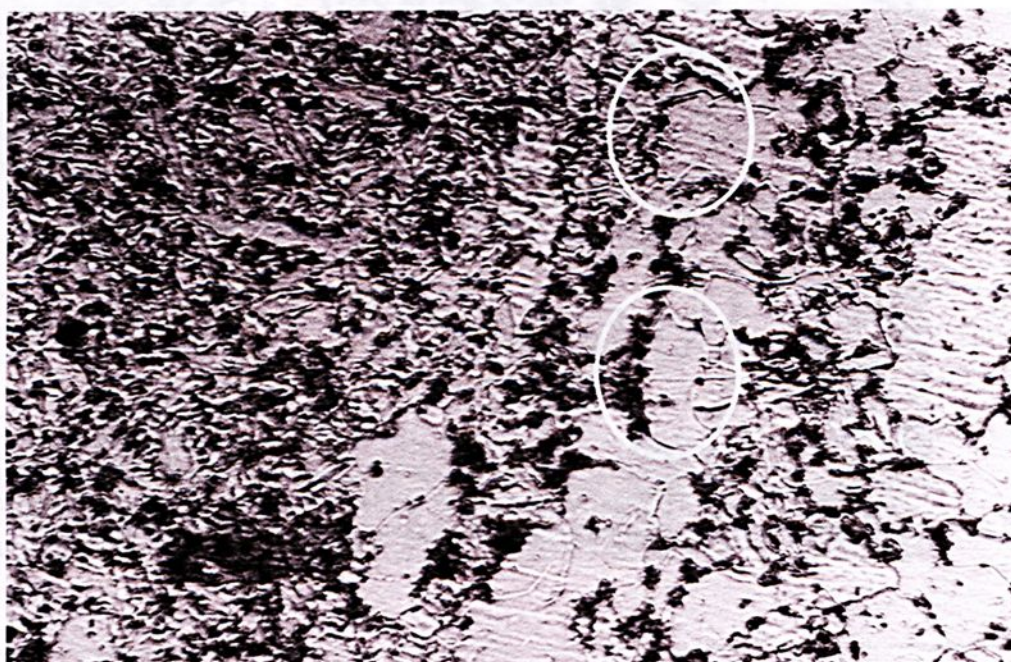
Constituinte:

FERRITA DE WIDMANSTATTEN

Sigla:

WF

Microestrutura:



Descrição:

A ferrita de Widmanstätten (WF), é caracterizada pela presença de ripas de ferrita paralelas, que nucleiam-se a partir de ferrita de contorno de grão, possuindo áreas enriquecidas em carbono entre ripas, as quais podem se transformar desde perlita até martensita, apresentando uma morfologia de aparência lisa e contínua.

Corpo de Prova: CP 3 A

Observação da zona fundida – zona afetada pelo calor metal de base (aba)

À esquerda temos a zona afetada pelo calor e à direita, a zona fundida.

Aumento de 500 X

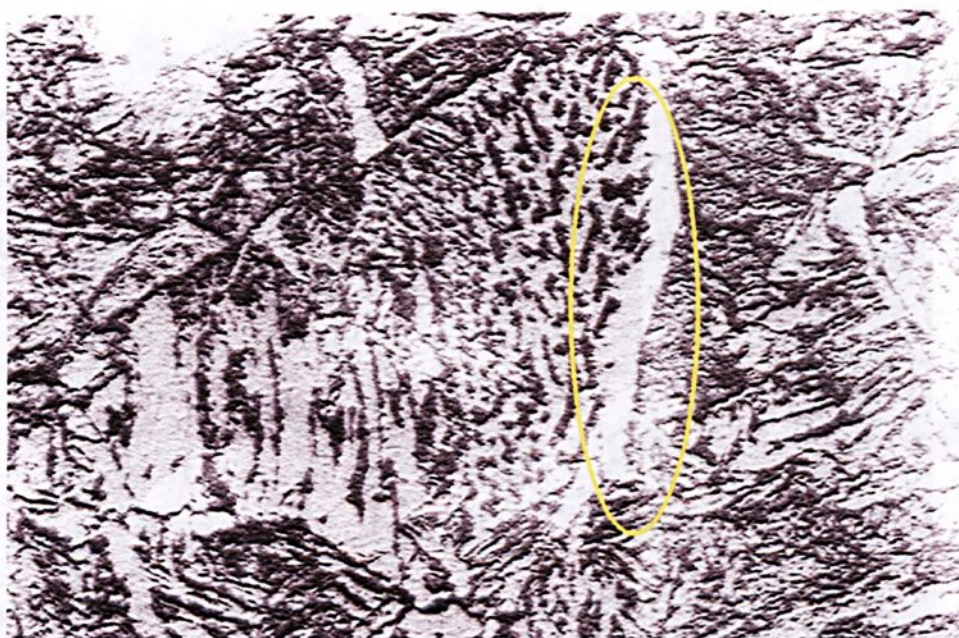
Constituinte:

FERRITA DE CONTORNO DE GRÃO

Sigla:

PF(G)

Microestrutura:



Descrição:

São veios de ferrita que estão associados ao contorno de grão colunar da austenita prévia. É o constituinte do metal de solda de mais fácil identificação, sendo facilmente identificado por microscopia ótica.

Corpo de Prova: CP 2 A

Observação da zona fundida

Aumento de 500 X



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dem.feis.unesp.br

