

MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA  
E DOS MATERIAIS

PROPRIEDADES MECÂNICO/METALÚRGICAS  
DE JUNTAS DE ALUMÍNIO 5083-O  
SOLDADAS PELO PROCESSO MIG

Por

ARNALDO RUBÉN GONZALEZ

Engenheiro Eletromecânico

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia Metalúrgica da  
Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos  
Materiais - PPGEMM

PORTO ALEGRE

1991

PROPRIEDADES MECÂNICO/METALÚRGICAS  
DE JUNTAS DE ALUMÍNIO 5083-O  
SOLDADAS PELO PROCESSO MIG

DISSERTAÇÃO

Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM, como parte dos requisitos  
para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Metalurgia de Transformação

Por

ARNALDO RUBÉN GONZALEZ

Engenheiro Eletromecânico

1991

Esta DISSERTAÇÃO foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração Metalurgia de Transformação, aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. IVAN GUERRA MACHADO

DEMEC/PPGEMM - UFRGS

Banca Examinadora:

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. JOSÉ CARLOS FERRAZ HENNEMANN

DECIV/UFRGS

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. TELMO ROBERTO STROHAECKER

DEMET/UFRGS

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. LÍRIO SCHAEFFER

DEMET/UFRGS

Coordenador do PPGEMM: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. ILDON BORCHARDT

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. IVAN GUERRA MACHADO, pela orientação e confiança depositada durante a execução do trabalho.

Ao CNPq e à CAPES, pelo suporte financeiro.

A ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL, nas pessoas dos Senhores Errol Dos Santos, Ernani Machado e Venozino Langoni pela doação da chapa de alumínio utilizada neste trabalho.

A White Martins Gases pela doação do hidrogênio, necessário para a realização das soldas.

Ao SENAI-RS-CETEMP, a seu Diretor Eng<sup>o</sup> Valny P. Borsa, que facilitou a utilização do Centro Tecnológico de Mecânica de Precisão; e aos Laboratoristas Luiz F.P. de Carvalhos e Carlos A.C. Alves, pela colaboração na execução das radiografias e nos ensaios de tração simples.

Aos funcionários Luiz M. Zaniratti, Juarês V. dos Santos e Denise R. Rolim, pela amizade e auxílio prestado.

Aos demais professores, funcionários e colegas da Escola de Engenharia que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Nesse trabalho, foram pesquisados os efeitos do nível de porosidade do cordão de solda e o ângulo da aplicação da carga, sobre as propriedades mecânicas da junta soldada. As soldas foram realizadas utilizando o processo a arco com proteção por gás e eletrodo consumível, continuamente alimentado -por simplicidade doravante denominado MIG ("Metal Inert Gas") e juntas tipo "V" simples em chapas de alumínio tipo 5083-0 com 8 mm de espessura, usando como metal de adição um arame de 1,2 mm de diâmetro tipo 5183, argônio como gás de proteção e energia de soldagem constante.

As juntas apresentavam quatro ângulos distintos em relação à direção perpendicular à aplicação da carga, isto é: 0, 15, 30 e 45 graus. Para cada ângulo, quatro diferentes misturas gasosas (resultando quatro níveis de porosidade) foram utilizadas.

A partir dos ensaios realizados, as seguintes conclusões podem ser obtidas para os diferentes níveis de porosidade e ângulos de carregamento empregados:

- (a) A resistência à tração e ductilidade foram significativamente afetadas pelos níveis de porosidade, enquanto o limite de escoamento não sofreu alteração sensível.
- (b) Não se obteve uma boa correlação entre os valores reais (medidos) de nível de porosidade e aqueles resultantes da análise radiográfica.
- (c) Quando o nível de porosidade no metal de solda aumenta,

para um mesmo ângulo de aplicação da carga, a ductilidade e a resistência à tração diminuem.

Em relação ao projeto de juntas soldadas, a conclusão mais importante obtida é a seguinte: para um mesmo nível de porosidade, a ductilidade e a resistência à tração aumentam com o ângulo do cordão em relação à aplicação da carga, isto é, estas propriedades mecânicas atingem seu valor máximo quando este ângulo é de  $45^{\circ}$  (no intervalo entre  $0^{\circ}$  -  $45^{\circ}$ ).

## SUMMARY

Research has been performed to study both the effects of porosity and loading angle, on the tensile strength of aluminium joints. Metal Inert Gas (MIG) V-groove butt welds were made on 8mm thick aluminium alloy 5083-O, using a 1.2mm diameter 5183 filler metal, argon as shielding gas, and a constant heat input. Those joints were welded at four distinct angles, i.e.,  $0^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ , and  $45^{\circ}$ , between their axis, and the right direction to the tensile test applied load. Furthermore, a set of four weld metal porosity levels were produced for each angle .

From the test results, and for the porosity levels and loading angles ranges analyzed in this work, the following main conclusions can be draft:

- (a) Weld metals ultimate tensile strength and ductility were markedly affected by porosity level, while yield strength was only slightly affected.
- (b) There is not a good correlation between the actual (measured) weld metal porosity level, and that taken from radiography.
- (c) As weld metal porosity level increases, for the same loading angle, ductility and ultimate tensile strength decrease.

Concerning weldment design, perhaps the most important

conclusion is: for the same porosity level, weld metal ductility and ultimate tensile strength increase with the loading angle, i.e., those mechanical properties have a maximum when this angle is  $45^{\circ}$  (in the  $0^{\circ}$ - $45^{\circ}$  range).

## ÍNDICE

	Pag.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.....	2
2.1. Generalidades.....	2
2.2. Características Térmicas.....	3
2.3. Modificações Devido à Temperatura.....	3
2.3.1. Características à Altas Temperaturas.....	3
2.3.2. Características à Baixas Temperaturas.....	5
2.4. Soldabilidade.....	5
2.5. Classificação das Ligas de Alumínio.....	6
2.5.1. Ligas Trabalhadas Não tratáveis Termicamente.....	7
2.6. Classificação Geral das Ligas de Alumínio Trabalhadas da "Aluminum Association".....	9
2.7. Ligas de Alumínio da Série 5000.....	10
2.7.1. Generalidades.....	10
2.7.2. Corrosão.....	11
2.7.3. Soldagem.....	12
2.8. Metal de Adição.....	14
2.9. Processos de Soldagem.....	15
2.10. Processo MIG.....	16
2.10.1. Equipamento Para a Soldagem MIG.....	17
2.10.2. Fontes de Energia.....	18
2.10.3. Funções do Gás de Proteção.....	20
3. CLASSIFICAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES NA SOLDA.....	21
4. POROSIDADE NO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.....	22

	Pag.
4.1. Generalidades.....	22
4.2 Porosidade no Processo TIG e MIG.....	22
4.3. Tipos de Gases Dissolvidos.....	23
4.4 Suscetibilidade à Formação de Poros.....	24
4.5. Fontes de Hidrogênio.....	25
4.6. Absorção do Hidrogênio.....	27
4.7. Mecanismo de Geração de Poros.....	30
4.8. Influência dos Elementos de Liga.....	31
4.9. Influência das Variáveis de Soldagem.....	33
4.10. Preparação de Superfícies.....	37
5. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	39
5.1. Concentração de Tensões.....	39
5.2. Efeito da Porosidade nas Propriedades Mecânicas.....	41
6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	51
6.1. Metal Base e Metal de Adição.....	51
6.2. Dimensões das chapas.....	53
6.3. Geometria da Junta.....	54
6.4. Equipamento Utilizado.....	54
6.5. Execução das Soldas.....	56
6.6. Determinação dos Níveis de Porosidade.....	59
6.7. Corpos de Prova para Ensaio de Tração.....	60
6.8. Ensaio de Dureza.....	61
6.9. Diluição.....	62
7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	63
7.1. Ensaios não Destrutivos.....	63

	Pag.
7.1.1. Exame Visual e Radiográfico.....	63
7.2. Medida da Diluição.....	69
7.3. Resultados do Ensaio de Dureza.....	70
7.4. Pecentual do Volume de Poros.....	72
7.5. Porosidade em função da Mistura de Gases.....	73
7.6. Ensaio de Tração.....	78
7.7. Análise Estatística dos Resultados Obtidos no Ensaio de Tração Simples.....	78
8. CONCLUSÕES.....	108
9. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	110
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111
APÊNDICE 1: Inspeção e Ensaio.....	117
APÊNDICE 2: Equações Estatísticas Aplicáveis nos Ensaio.....	121

## ÍNDICE DE TABELAS

	Pag.
Tab. 1: Propriedades físicas aproximadas dos vários materiais.	2
Tab. 2: Designação das ligas de alumínio.....	9
Tab. 3: Procedimentos gerais para preparação de superfícies de alumínio para soldagem.....	38
Tab. 4: Composição química do metal base e do metal de adição.....	52
Tab. 5: Propriedades mecânicas do metal base e do metal de solda.....	52
Tab. 6: Código empregado para a identificação das chapas.....	57
Tab. 7: Parâmetros de soldagem.....	58
Tab. 8: Distância entre bico de contato e peça para as misturas de gases utilizadas.....	58
Tab. 9: Avaliação das soldas, exame visual e radiográfico....	63
Tab. 10: Valores de diluição medidos.....	70
Tab. 11: Resultados de microdureza do metal de base e solda...70	
Tab. 12: Percentual do volume dos poros obtidos das soldas com as misturas de gases.....	72
Tab. 13: Número de micro e macroporos no metal de solda para as misturas de gases utilizadas.....	74
Tab. 14: Percentual dos micro e macroporos no metal de solda sem reforço para as misturas de gases utilizadas.....	75
Tab. 15: Dados estatísticos dos valores de resistência à tração.....	80
Tab. 16: Dados estatísticos dos valores de alongamento.....	81

	Pag.
Tab. 17: Dados estatísticos dos valores de limite de escoamento.....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Fig. 1: Resistência à tração e limite de escoamento da liga 5083-0 à várias temperaturas, expresso como percentual dos valores à temperatura ambiente.....	4
Fig. 2: Resistência à tração e limite de escoamento em função do encruamento e temperatura de recozido.....	8
Fig. 3: Propriedades mecânicas das ligas de alumínio.....	9
Fig. 4: Indicação esquemática dos corpos de prova que podem ser obtida da chapa laminada.....	10
Fig. 5: Sensibilidade à trinca relativa em função da percentagem do Mg na liga.....	13
Fig. 6: Processo de soldagem.....	17
Fig. 7: Equipamento básico do processo MIG.....	18
Fig. 8: Características estáticas de duas diferentes fontes de energia para soldagem. 1 - Tipo tensão constante; 2 - Tipo corrente constante.....	19
Fig. 9: Suscetibilidade do alumínio e do ferro à absorção do gás hidrogênio em função da temperatura.....	25
Fig. 10: Solubilidade do hidrogênio no alumínio em função da temperatura.....	27
Fig. 11: Representação esquemática da absorção de hidrogênio na poça de fusão.....	29
Fig. 12: Conteúdo de hidrogênio no metal de solda Al, Al-Mg, Al-Cu em função da raiz quadrada da pressão parcial de hidrogênio.....	32

Fig. 13:	Conteúdo de poros no cordão de solda em relação ao tempo de estocagem entre a limpeza e a soldagem das chapas. A - Chapa estocada ao ar livre; B - Chapa estocada em local fechado.....	34
Fig. 14:	Volume de poros no cordão de solda da chapa AMg6 em função do ângulo de soldagem.....	35
Fig. 15:	Efeito da posição de soldagem e forma da poça de fusão sobre os poros; (a) Ascendente, (b) Descendente, (c) Sobre-cabeça.....	36
Fig. 16:	Corrente-Voltagem em função da mistura dos gases de proteção (Ar e He). Posição sobre-cabeça.....	37
Fig. 17:	Distribuição de tensões próximas de um furo circular, em uma placa sujeita à carga axial.....	39
Fig. 18:	Efeito da porosidade sobre as propriedades mecânicas de tração da junta soldada, 5083/5356, processo MIG..	42
Fig. 19:	Resistência à tração em função da porosidade 7039-T6151/5039.....	43
Fig. 20:	Limite de escoamento em função da porosidade 7039-T6151/5039.....	44
Fig. 21:	Porcentagem do alongamento em função da porosidade 7039-T6151/5039.....	45
Fig. 22:	Resistência à tração em função do percentual total de poros 5083/5183.....	47
Fig. 23:	Porcentagem de alongamento (comprimento 25,4 mm) em função do percentual total de poros.....	48

Fig. 24:	Resistência à tração relativa da junta soldada em função do volume total de poros.....	49
Fig. 25:	Resistência à tração relativa da junta soldada em função do percentual de macroporos.....	48
Fig. 26:	Dimensões das chapas a serem soldadas.....	53
Fig. 27:	Geometria da junta utilizada.....	54
Fig. 28:	Caraterísticas Tensão-Corrente de saída.....	55
Fig. 29:	Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração..	60
Fig. 30:	Indicação esquemática para determinação da diluição..	62
Fig. 31:	Vista superior do cordão de solda obtido com a mistura (de gases) I. x2,5.....	64
Fig. 32:	Vista superior do cordão de solda obtido com a mistura (de gases) II. x2,5.....	65
Fig. 33:	Vista superior do cordão de solda obtido com a mistura (de gases) III. x2,5.....	65
Fig. 34:	Vista superior do cordão de solda obtido com a mistura (de gases) IV. x2,5.....	66
Fig. 35:	Radiografia da junta soldada 5083-O/5183. Cordão de solda com reforço, mistura (de gases) I.....	66
Fig. 36:	Radiografia da junta soldada 5083-O/5183. Cordão de solda sem reforço, mistura (de gases) I.....	67
Fig. 37:	Radiografia da junta soldada 5083-O/5183. Cordão de solda com reforço, mistura (de gases) II.....	67
Fig. 38:	Radiografia da junta soldada 5083-O/5183. Cordão de solda sem reforço, mistura (de gases) II.....	68

Fig. 39:	Radiografia da junta soldada 5083-O/5183. Cordão de solda com reforço, mistura (de gases) III.....	68
Fig. 40:	Radiografia da junta soldada 5083-O/5183. Cordão de solda com reforço, mistura (de gases) IV.....	69
Fig. 41:	Microdureza $HV_{200}$ na face da seção transversal da junta soldada.....	71
Fig. 42:	Média do volume total de poros no reforço do metal de solda e no metal de solda sem reforço .....	73
Fig. 43:	Macro-estrutura do cordão de solda (5083-O/5183). Mistura (de gases) I. x5.....	76
Fig. 44:	Macro-estrutura do cordão de solda (5083-O/5183). Mistura (de gases) II. x5.....	76
Fig. 45:	Macro-estrutura do cordão de solda (5083-O/5183). Mistura (de gases) III. x5.....	77
Fig. 46:	Macro-estrutura do cordão de solda (5083-O/5183). Mistura (de gases) IV. x5.....	77
Fig. 47:	Diagrama Tensão-Deformação do corpo de prova do metal base 5083-O.....	83
Fig. 48:	Diagrama Tensão-Deformação do corpo de prova I 45 I..	84
Fig. 49:	Efeito das misturas de gases sobre a características das curvas médias da Tensão-Deformação (ângulo do cordão de solda $0^{\circ}$ ).....	85
Fig. 50:	Efeito das misturas de gases sobre a características das curvas médias da Tensão-Deformação (ângulo do cordão de solda $15^{\circ}$ ).....	86

Fig. 51:	Efeito das misturas de gases sobre as características das curvas médias Tensão-Deformação (ângulo do cordão de solda $30^{\circ}$ ).....	87
Fig. 52:	Efeito das misturas de gases sobre as características das curvas médias Tensão-Deformação (ângulo do cordão de solda $45^{\circ}$ ).....	88
Fig. 53:	Efeito dos ângulos do cordão de solda sobre as características das curvas médias da Tensão-Deformação. Mistura (de gases) I.....	89
Fig. 54:	Efeito dos ângulos do cordão de solda sobre as características das curvas médias da Tensão-Deformação. Mistura (de gases) II.....	90
Fig. 55:	Efeito dos ângulos do cordão de solda sobre as características das curvas médias da Tensão-Deformação. Mistura (de gases) III.....	91
Fig. 56:	Efeito dos ângulos do cordão de solda sobre as características das curvas médias da Tensão-Deformação. Mistura (de gases) IV.....	92
Fig. 57:	Efeito da porosidade sobre a resistência à tração da junta soldada 5083-O/5183.....	93
Fig. 58:	Efeito do ângulo do cordão de solda sobre a resistência à tração da junta soldada 5083-O/5183.....	94
Fig. 59:	Efeito da porosidade sobre a relação da resistência à tração da junta soldada (5083-O/5183) e do metal base.....	95

Fig. 60:	Efeito da percentagem do volume total de poros sobre o limite de escoamento da junta soldada, 5083-O/5183...	96
Fig. 61:	Efeito do ângulo do cordão de solda sobre o limite de escoamento da junta soldada 5083-O/5183.....	97
Fig. 62:	Efeito da percentagem do volume total de poros sobre o alongamento da junta soldada 5083-O/5183.....	98
Fig. 63:	Aspecto macrográfico da fratura do CP I 0.....	99
Fig. 64:	Aspecto macrográfico da fratura do CP II 0.....	100
Fig. 65:	Aspecto macrográfico da fratura do CP III 0.....	100
Fig. 66:	Aspecto macrográfico da fratura do CP IV 0.....	101
Fig. 67:	Aspecto macrográfico da fratura do CP I 15.....	101
Fig. 68:	Aspecto macrográfico da fratura do CP II 15.....	102
Fig. 69:	Aspecto macrográfico da fratura do CP III 15.....	102
Fig. 70:	Aspecto macrográfico da fratura do CP IV 15.....	103
Fig. 71:	Aspecto macrográfico da fratura do CP I 30.....	103
Fig. 72:	Aspecto macrográfico da fratura do CP II 30.....	104
Fig. 73:	Aspecto macrográfico da fratura do CP III 30.....	104
Fig. 74:	Aspecto macrográfico da fratura do CP IV 30.....	105
Fig. 75:	Aspecto macrográfico da fratura do CP I 45.....	105
Fig. 76:	Aspecto macrográfico da fratura do CP II 45.....	106
Fig. 77:	Aspecto macrográfico da fratura do CP III 45.....	106
Fig. 78:	Aspecto macrográfico da fratura do CP IV 45.....	107

## LISTA DE SIMBOLOS

B:	Área da seção transversal do metal adicionado ( $\text{mm}^2$ ).
(A+B):	Área da seção transversal do metal de solda ( $\text{mm}^2$ ).
$C^{\text{Máx.}}$ :	Máxima solubilidade do hidrogênio no metal superaquecido.
CP:	Corpo de prova.
$C^{\text{f}}$ :	Solubilidade do hidrogênio à temperatura de solidificação.
$d_2$ :	Fator de desvio.
d:	Metade da largura da chapa.
D:	Diluição (%).
$K_t$ :	Coefficiente de concentração de tensões.
$L_0$ :	Comprimento inicial do corpo de prova para tração.
M B:	Metal Base (5083-0).
M S:	Metal de Solda.
n:	Número de microporos (médio), da seção transversal do cordão de solda.
N:	Número de macroporos (médio), da seção transversal do cordão de solda.
P:	Valor médio do volume percentual de microporos.
$P_M$ :	Valor médio do volume percentual de macroporos.
$P_p$ :	Média do volume de poros, determinados por contagem de pontos da seção transversal (%).
$P_T$ :	Soma das médias dos micro e macroporos, determinados na medição dos diâmetros dos poros da seção

transversal (%).

r: Raio (furo circular)(mm).

R =  $S_u/S_{mb}$ :Relação da resistência à tração da junta soldada e do metal base (%).

Smáx.: Tensão Máxima (MPa).

Smed.: Tensão média na seção mínima (MPa).

[Su]: Resistência à tração da junta soldada, zero de poros (MPa).

Su: Valor médio da resistência à tração (MPa).

$\Delta S_u$ : Faixa da resistência à tração e diferença entre valor máximo e mínimo (MPa).

Sy: Valor médio do limite de escoamento (MPa).

$\Delta S_y$ : Faixa do limite do escoamento e diferença entre valor máximo e mínimo (MPa).

$\epsilon$ : Valor médio do alongamento (%).

$\Delta \epsilon$ : Faixa do alongamento e diferença entre valor máximo e mínimo (%).

## 1. - INTRODUÇÃO

O alumínio e suas ligas apresentaram, entre os materiais de construção mais conhecidos, a maior taxa de crescimento na aplicação nos últimos anos, sendo isso consequência do constante aprimoramento das características tecnológicas dos mesmos.

Atualmente, existem ligas de alumínio de alta resistência, que possuem excelentes características mecânicas, tanto em baixas quanto em relativamente altas temperaturas, com grande resistência à corrosão, boa plasticidade e soldabilidade. É natural que a soldabilidade de um material seja um fator muito importante na escolha de uma liga para determinadas aplicações, já que os principais processos de fabricação pressupõem e incluem a soldagem.

Muitas partes da estrutura soldada deverão apresentar alta qualidade, o que torna questionável a presença de descontinuidades na solda, tal como a porosidade, que cresceu em importância com o desenvolvimento das ligas de alumínio de alta resistência. Como consequência disso, foram feitos vários estudos relativos aos fatores que influenciam a formação dos poros.

As especificações conhecidas, porém, têm em comum a desvantagem de não especificar a relação existente entre a redução das propriedades mecânicas, em função do nível de porosidade do cordão de solda.

## 2. - ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

### 2.1. - Generalidades

O uso do alumínio e suas ligas tem-se generalizado na construção de navios, tanques para gás natural liquefeito, estruturas metálicas, etc., como consequência das novas técnicas de soldagem e de controle, as quais permitem ao fabricante produzir com excelente qualidade e este metal competir com o aço /1/.

As ligas de alumínio apresentam maior facilidade no manuseio das peças e dos conjuntos antes e depois da soldagem, sendo essa uma importante vantagem a ser considerada em relação ao aço.

Resume-se na Tab.1 as propriedades físicas aproximadas do alumínio e de outros materiais.

Tab.1: Propriedades físicas aproximadas dos vários materiais /2/.

PROPRIEDADES	ALUMÍNIO (99,45 %)	COBRE ELETROLÍTICO	AÇO 0,06 % C	MAGNÉSIO (99,8 %)
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	2700	8890	7871	1738
Condutividade térmica a 25 C (W/(m C))	234	391	74,5	154 <sup>(a)</sup>
Coefficiente de expansão linear (1/ C).10 <sup>-6</sup>	23,6	16,8	11,7	25,2
Calor latente de fusão (kJ/kg)	393	180	205	372
Ponto de fusão ( C)	657	1083	1350	594
Módulo de elasticidade (MPa).10 <sup>3</sup>	69	110	200	45
Condutividade elétrica I.A.C.S. (%)	62	101	17,75	38

(a) Valor da condutividade termica, temperatura entre 100 e 300 C.

## 2.2. - Características Térmicas

O alumínio apresenta elevada condutividade térmica e baixo ponto de fusão. Como consequência, o calor necessário para fundir um volume de alumínio é somente a metade do que o aço precisa para igual volume. Também, devido a maior condutividade térmica do alumínio (3 vezes maior que a do aço) é necessário fornecer uma maior intensidade de calor, sendo que, na soldagem, o mesmo apresenta alta taxa de resfriamento, minimizando a zona afetada pelo calor (ZAC) do metal base.

## 2.3. - Modificações Devido à Temperatura

A temperatura ambiente, o limite de escoamento do alumínio é uma percentagem praticamente invariável da resistência à tração, sendo isso comum à maioria dos metais metálicos.

Aumentando-se a temperatura de exposição do metal, o limite de escoamento e a resistência à tração se mantêm na mesma percentagem; porém, ambos os valores diminuem notavelmente.

### 2.3.1. - Características a Altas Temperaturas

A perda da resistência mecânica nos materiais metálicos é notória quando a temperatura é maior do que a temperatura ambiente

(Fig. 1). Por exemplo, na liga 1100 a resistência à tração diminui em aproximadamente um terço de seu valor à temperatura ambiente, isto ocorre à temperatura de 150°C. Na liga 5052 a perda é somente de um sexto. A perda nas propriedades mecânicas apresenta diferença de uma liga para outra, com o aumento da temperatura.

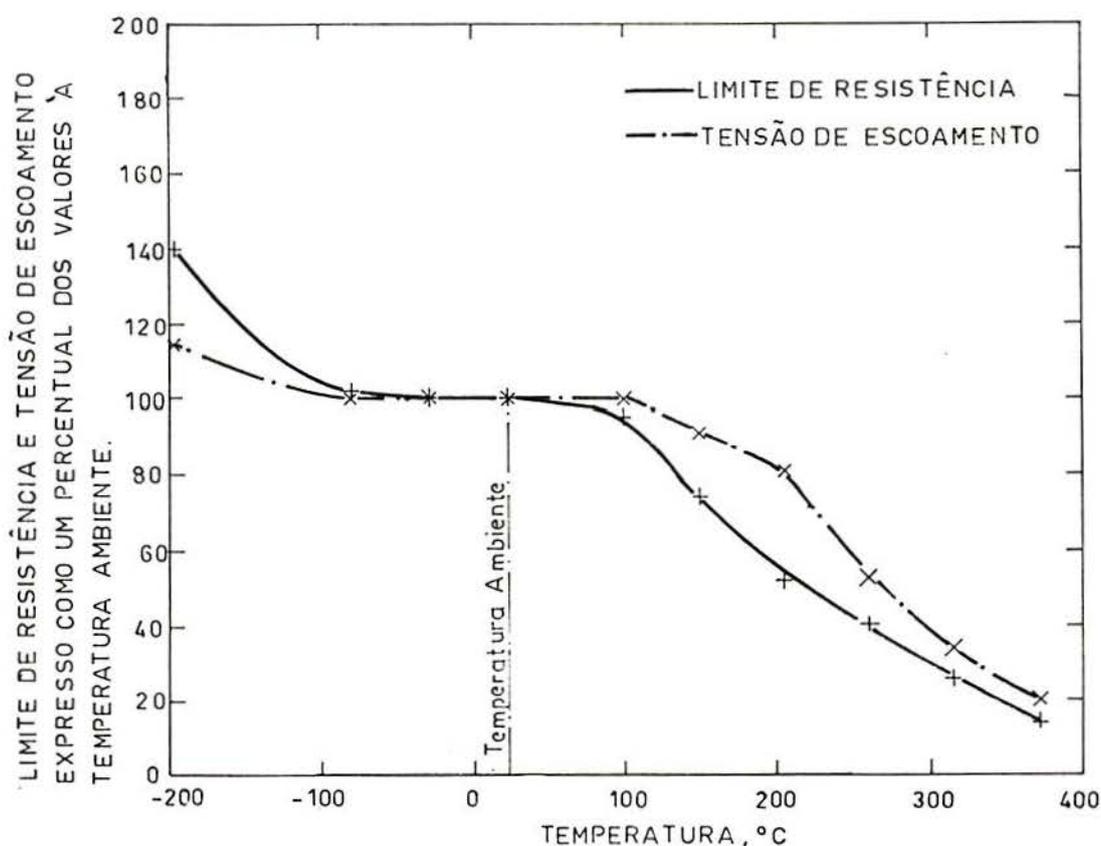


Fig. 1: Resistência à tração e limite de escoamento da liga 5083-0 à várias temperaturas, expresso como percentual dos valores à temperatura ambiente /1/.

### 2.3.2. - Características a Baixas Temperaturas

Em temperaturas menores do que a temperatura ambiente, a resistência mecânica das ligas de alumínio é afetada pelo incremento no limite de escoamento e da resistência à tração, sem perda da ductilidade na condição de soldado ou de não soldado. Esta é uma das vantagens que apresenta o material, que é aplicável em instalações criogênicas (Fig. 1).

Esse material possui as mesmas propriedades à  $-196^{\circ}\text{C}$  e à temperatura ambiente, além de não apresentar fragilidade a baixas temperaturas. As ligas forjadas apresentam, em geral, uma ligeira melhoria em seu alongamento, sendo que a resistência é melhorada com a diminuição da temperatura.

### 2.4. - Soldabilidade

O termo soldabilidade está associado à facilidade com que um material pode ser soldado, produzindo uma junta com adequada resistência mecânica, à corrosão e à outras propriedades, quando forem necessárias.

A condutividade térmica exerce uma grande influência na soldabilidade. Como já dito, a mesma é quase quatro vezes maior no alumínio, do que no aço. Isto significa que o alumínio necessita de um fornecimento de calor quatro vezes maior que o requerido para o aço, para atingir a mesma temperatura em um determinado local.

Portanto na solda por fusão, a fonte de energia deverá ter uma alta intensidade para produzir a poça fundida.

Por outro lado, a alta condutividade térmica, o alto coeficiente de expansão linear e a necessidade de maior fornecimento de calor, podem originar consideráveis distorções durante a soldagem, se não forem utilizadas as mais altas velocidades possíveis de trabalho, quando solda-se alumínio com fontes intensas de calor.

Uma vantagem da alta condutividade térmica, sob o ponto de vista do soldador, é que a mesma proporciona uma rápida solidificação do cordão de solda, tornando a soldagem do alumínio mais rápida que a do aço /3/.

## 2.5. - Classificação das Ligas de Alumínio

Em muitas aplicações comerciais e estruturais, o alumínio requerido deve ter elevada resistência mecânica e dureza, sendo que isso pode ser obtido pela adição de vários elementos de liga. Dependendo de como são produzidas, essas ligas podem dividir-se em dois grupos principais:

1. - Ligas para tratamento mecânico ou trabalhadas.
2. - Ligas de fundição.

No grupo 1, que é do interesse desse trabalho, o metal é

mecanicamente deformado por processos como laminação, extrusão, forjamento. e outros. Admite-se duas subdivisões:

(a) Ligas que não respondem ao tratamento térmico, nas quais as propriedades são obtidas pelo grau de trabalho a frio e conseqüente encruamento que sofrem, são chamados "Ligas Trabalhadas não Tratáveis ou Ligas Encruáveis".

(b) "Ligas Termicamente Tratáveis", nas quais as propriedades mecânicas são obtidas através do tratamento térmico.

#### 2.5.1. - Ligas Trabalhadas não Tratáveis Termicamente

As propriedades mecânicas obtidas são controladas por encruamento, o qual resulta da proporção de redução da seção total, depois do tratamento térmico de recozido. No caso da liga conter apreciável percentagem de magnésio e sofrer encruamento por deformação, pode-se realizar um tratamento de recozido final, para assegurar a retenção das propriedades mecânicas. Isso é chamado de tratamento de "Estabilização".

Os efeitos do encruamento sobre as propriedades mecânicas da liga de alumínio 5083, são mostrados na Fig. 2, onde todos os corpos de prova foram aquecidos acima de 260°C por quatro horas, e logo recozidos durante duas horas. O limite de escoamento e a resistência à tração são incrementados com o aumento do grau de deformação, enquanto que a ductilidade do material diminui /1/.

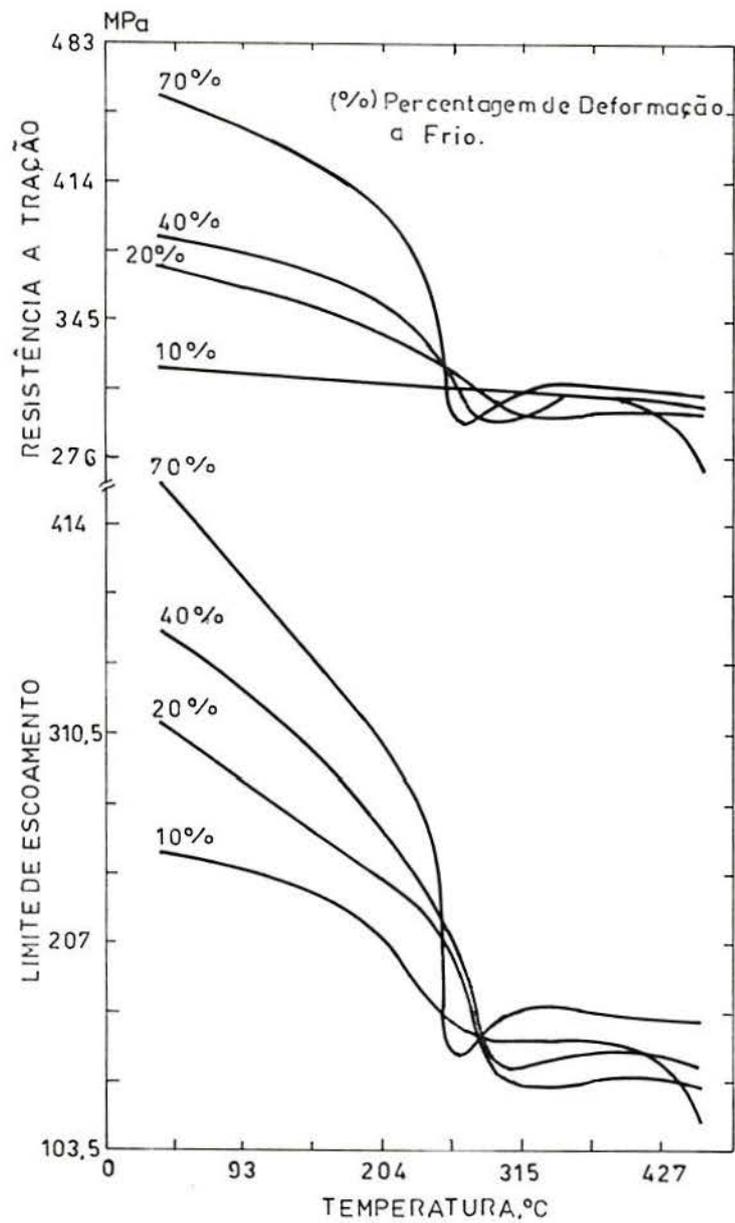


Fig. 2: Resistência à tração e limite de escoamento em função do encruamento e da temperatura do recozido /1/.

2.6. - Classificação Geral das Ligas de Alumínio Trabalhadas da "Aluminum Association".

A Tab. 2 apresenta a designação das ligas de alumínio adotada pela AA.

Tab. 2: Designação das ligas de alumínio /1/.

Série	Principal elemento químico de liga.
1000	99,0% de pureza ou maior
2000	Cobre
3000	Manganês
4000	Silício
5000	Magnésio
6000	Magnésio e Silício
7000	Zinco
8000	Outros elementos
9000	Série não utilizada

Enquanto a Fig. 3 ilustra a variação das propriedades mecânicas das ligas de alumínio com relação à série a que pertence.

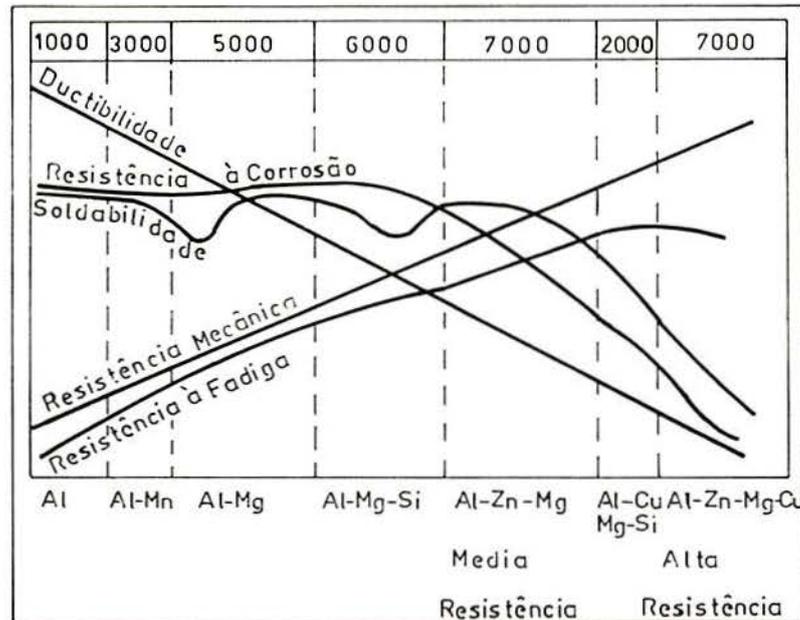


Fig. 3: Propriedades mecânicas das ligas de alumínio /4/.

## 2.7. - Ligas de Alumínio da Série 5000

### 2.7.1. - Generalidades

A série 5000 pertence às ligas trabalhadas não tratáveis termicamente. O principal elemento de liga é o magnésio, e o segundo é o manganês, obtendo-se valores de resistência mecânica de médios a altos.

Quando são laminados em chapas, os grãos são alongados paralelamente à laminação.

Nos ensaios realizados nos corpos de prova no sentido longitudinal, verificou-se uma diferença na resistência à tração, em comparação com os corpos de prova no sentido transversal.

Quando o corpo de prova é obtido no sentido normal à superfície de laminação (Fig. 4) também apresenta diferença na resistência à tração.

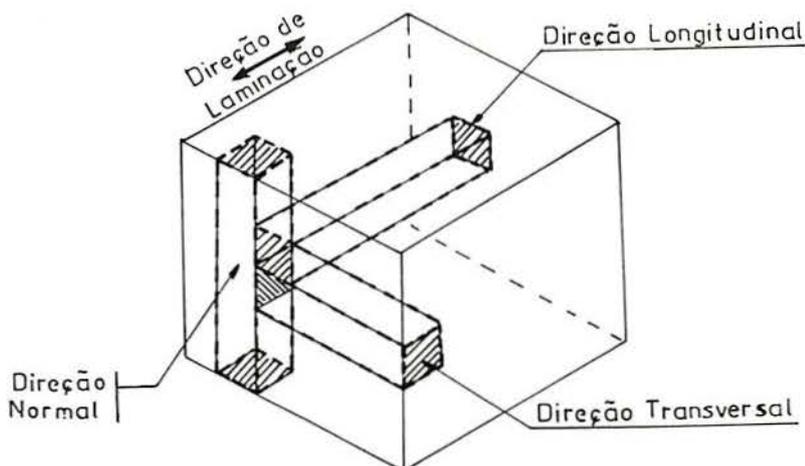


Fig. 4: Indicação esquemática dos corpos de prova que podem ser obtido a partir de uma chapa laminada.

### 2.7.2. - Corrosão

As ligas da série 5000 apresentam uma excelente resistência à corrosão provocada pelo ambiente marinho, em particular as ligas que têm alto conteúdo de magnésio, tais como. 5083, e 5454.

Na superfície desses materiais, forma-se um filme de óxido, o qual retarda o processo de corrosão química, também podendo-se usar os mesmos nas atmosferas de alto conteúdo de oxigênio, como em ambientes marinhos. O processo de "pite" é a forma predominante de corrosão desta série.

O trabalho feito por Sanders e McDowel /5/, nos fornece dados de "pite", coletados nos ambientes rurais e marinhos, com a relação à média das profundidades em função do tempo de exposição.

Os processos de "pite" ocorridos nos ambientes rurais nos primeiro dois anos está na faixa de  $2,54 \times 10^{-5}$  a  $5 \times 10^{-5}$  m, sendo que depois desse tempo a continuidade da corrosão foi desprezível.

No ambiente marinho a média das profundidades dos "pites" para os dois primeiros anos é aproximadamente  $3,8 \times 10^{-5}$  m, com máximo de profundidade variando de  $7,5 \times 10^{-5}$  até  $12,7 \times 10^{-5}$  m. A maioria dos casos de "pite" ocorridos no ambiente marinho, foram desenvolvidos nos primeiros quatro anos de exposição, sendo o processo contínuo, porém em menor proporção.

### 2.7.3. - Soldagem

As soldas por fusão das ligas de Al-Mg de baixo teor de Mg (por exemplo: 5252, 5052, 5005, 5050), são suscetíveis à trinca durante a solidificação, se for usado metal de adição da mesma composição química do metal base; o risco de trinca será ainda maior se a solda for realizada sob condições que impeçam a livre movimentação das peças a serem unidas. Este problema pode ser facilmente superado com aumento do teor de Mg (maior de 3%) na poça de fusão.

Os metais de adição da série 5000, AWS ER-5356 e AWS ER-5556 são muito eficazes para evitar essas trincas, também em juntas com movimento restrito e nas quais há considerável diluição do metal base. Uma vantagem do metal de adição com alto teor de Mg, é que neste caso, na zona afetada pelo calor (ZAC), a resistência do metal de solda supera a do metal de base /6/.

Dowd /7/ determinou a sensibilidade à trinca em corpos de prova na forma de T invertido (Fig.5), onde a sensibilidade à trinca aumenta rapidamente com a adição de Mg na liga, até um valor aproximadamente de 1,5%. A partir daí o aumento de Mg na liga diminui a sensibilidade à trinca, sendo vantajoso a soldagem com metais de adição contendo 3% ou mais de Mg.

As ligas 5083, 5086, 5454 e 5456 são amplamente usadas em estruturas metálicas soldadas de alta resistência, as quais exibem boa resistência mecânica e ductilidade, alta resistência à corrosão e uma excelente resistência à trinca.

A liga 5083 (Al-Mn-4,5Mg) é a mais resistente das ligas trabalháveis não tratáveis termicamente; há muitos anos vem sendo largamente usada na área de estruturas soldadas, em aplicações marítimas e criogênicas. A liga não apresenta tendência à trinca e pode ser soldada com os seguintes metais de adição AWS:

- . - ER-5356 (Al-5Mg)
- . - ER-5183 (Al-Mn-4,5Mg)
- . - ER-5556 (Al-Mn-5,2Mg)

ER-5356 é empregado comumente na fabricação em geral. ER-5183 proporciona uma união satisfatória com o metal base na condição de recozido. ER-5556 fornece maior resistência, porém, com ductilidade e tenacidade ligeiramente inferiores. Ambas as ligas ER-5183 e ER-5556 possuem resistência à tração ligeiramente superior na junta soldada, com moderada perda da ductilidade /6,7/.

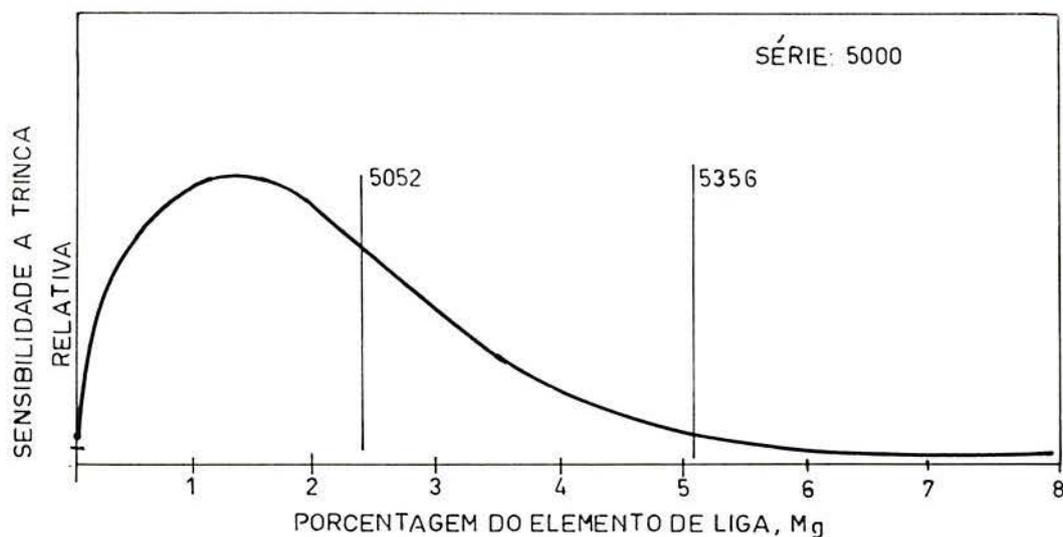


Fig. 5: Sensibilidade à trinca relativa em função da percentagem de Mg na liga /7/.

## 2.8. - Metal de Adição

A correta escolha do metal de adição na soldagem por fusão é muito importante, pois deve ser levado em consideração a existência da diluição, ou seja, a proporção do metal base no metal de solda. A escolha do metal de adição para a solda, é feita em relação à aplicação e prioridades de determinadas propriedades, entre elas ductilidade, resistência à corrosão, boa resistência mecânica, e outras. Em geral, quando escolhe-se o metal de adição, é importante eliminar ou reduzir significativamente os compostos intermetálicos, que são de baixa ductilidade quando apresentam-se no cordão de solda.

O metal de adição deve ser de alta pureza e composição química bem controlada. Também, é necessário que as condições superficiais e as variações no diâmetro sejam controladas.

No processo MIG é importante a condição superficial e a precisão diametral do arame, pois ambas tem acentuada influência nas características de alimentação. Neste processo a superfície do arame deve estar limpo, já que a área superficial do mesmo é grande em relação ao seu volume, podendo introduzir quantidades significativas de contaminantes na poça de fusão /8/.

## 2.9. - Processos de Soldagem

As ligas de alumínio podem ser soldadas por inúmeros processos, dependendo da aplicação em particular. Os principais processos de soldagem para ligas de alumínio, são mostrados /8/:

### Processo:

- Soldagem por fusão:
  - . - Processo TIG, convencional e pulsado.
  - . - Plasma.
  - . - Processo MIG, convencional e pulsado.
  - . - Eletrogás.
  - . - Eletroescória.
  - . - Arco submerso.
  - . - Solda ao arco elétrico com eletrodo revestido.
  - . - Solda oxiacetilênica.
  - . - Feixe de elétrons.
  - . - Laser.
- Soldagem por resistência: por ponto e por costura.
- Soldagem por projeção: a arco, sob pressão, para fixação de rebetes, etc.
  - . - Descarga de condensador.
  - . - Soldagem topo a topo, a arco, sob pressão.
  - . - Soldagem em fase sólida.
  - . - Soldagem por fricção.

- . - Soldagem por explosão.
- . - Ultrasónica.
- . - Soldagem a frio, sob pressão.
- . - Soldagem a quente, sob pressão.

Contudo, quando se exige uma alta qualidade, utiliza-se um dos processos /3/:

- (a) A Arco com Proteção por Gás e Eletrodo Consumível, continuamente alimentado ("MIG").
- (b) A Arco com Proteção por Gás e Eletrodo não Consumível ("TIG").

Embora sejam obtidos resultados satisfatórios, estes processos ainda apresentam limitações, que, muitas vezes, oneram sobremaneira o custo das estruturas.

#### 2.10. - Processo MIG

O processo MIG de soldagem é a arco, com atmosfera gasosa, e foi adotado para designar o processo de soldagem que utiliza corrente contínua; o arco elétrico é mantido entre o eletrodo consumível eletricamente positivo e a peça de trabalho, onde a proteção é por atmosfera de gás inerte. Ilustra-se o processo de soldagem MIG na Fig. 6.

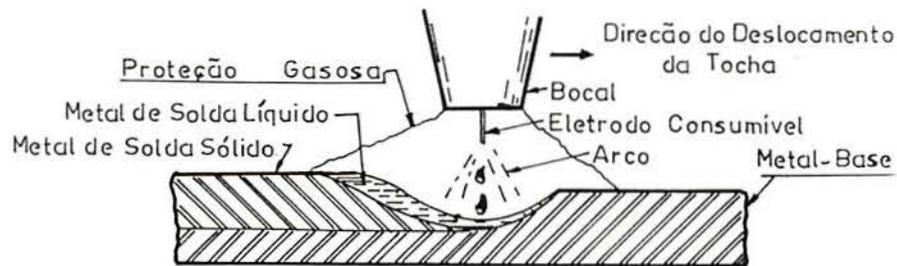


Fig. 6: Processo de soldagem MIG /9/.

#### 2.10.1. - Equipamento para Soldagem

O equipamento básico necessário para soldagem do alumínio pelo processo MIG (Fig.7), consiste em:

- . - Uma fonte de energia, necessariamente de corrente contínua.
- . - Um sistema de alimentação de arame.
- . - Uma tocha.
- . - Um suprimento de gás protetor.
- . - Um fluxímetro e regulador-reductor de pressão do gás de proteção.
- . - Um sistema de refrigeração com água, no caso da pistola ser refrigerada a água.

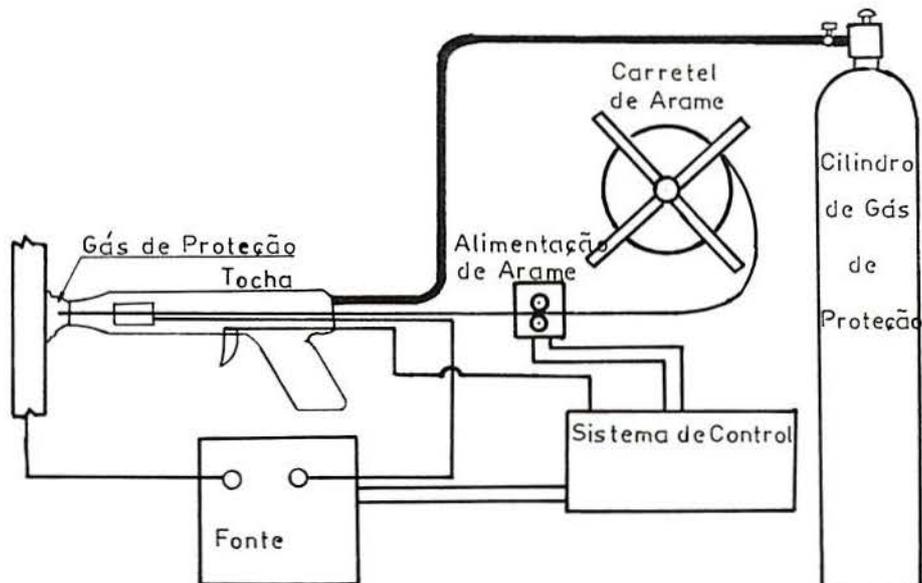


Fig. 7: Equipamento básico do processo MIG.

### 2.10.2. - Fontes de energia

As fontes de energia segundo suas características estáticas (Fig. 8), classificam-se em fontes de:

- 1.- Tensão constante.
- 2.- Corrente constante.

Se as características estáticas forem pouco tombantes (quase tensão constante), vê-se que uma pequena variação na tensão ( $\Delta V$ ) ocasiona uma grande variação na corrente ( $\Delta I$ ).

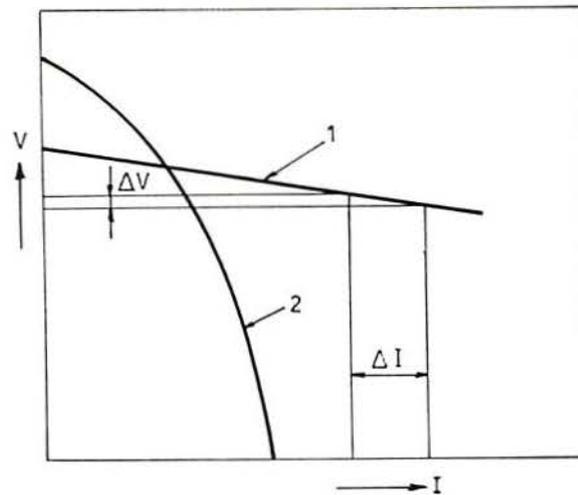


Fig. 8: Características estáticas de duas diferentes fontes de energia para soldagem. 1 - Tipo tensão constante; 2 - Tipo corrente constante.

Em operações de soldagem manual, existe variação no comprimento do arco ao qual corresponde uma variação na tensão. Assim, para pequena variação no comprimento do arco voltaico, o que é sempre provável em soldagem manual, haverá uma grande variação na corrente de soldagem e, como o principal parâmetro a influenciar na soldagem é a corrente, tais fontes não são aptos para a soldagem manual. Essas fontes utilizam-se para soldagem automáticas e semiautomáticas, nas quais o eletrodo consumível é alimentado automaticamente ao arco voltaico; o dispositivo de alimentação do arame-eletrodo não altera sua velocidade ao longo da soldagem. A própria característica estática da máquina induz um automatismo à

operação. Por exemplo, que o comprimento do arco tenda a diminuir em um determinado instante. Em resposta, a tensão decresce pouco, mas a corrente aumentará rapidamente fazendo com que a velocidade de fusão aumente tendendo a restabelecer o comprimento inicial do arco.

Uma fonte de energia que apresenta as características estáticas muito tombantes (Fig. 8), é indicada para soldagem manual, pois ainda que o operador varie bastante o comprimento do arco, a corrente variará muito pouco.

### 2.10.3. - Funções do Gás de Proteção

As principais funções do gás de proteção, no processo MIG /3/, são três:

- . - Prover um caminho mais fácil da ionização do que o obtido pelo ar.

- . - Criar uma atmosfera ao redor do arco e da poça de fusão, para que o alumínio fundido não reaja com gases ativos.

- . - Melhorar a ação da limpeza, a qual produz a remoção parcial do óxido de alumínio da junta quando a solda é feita com corrente contínua e eletrodo positivo. Não é bem conhecida a ação da limpeza, se é resultado dos íons que batem na superfície, de elétrons que saem da junta ou a combinação de ambos os efeitos.

### 3. - CLASSIFICAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES NA SOLDA

As descontinuidades podem ser agrupada, de acordo com sua natureza, em três tipos:

- a. - Devido ao processo e/ou procedimento de soldagem (Mordeduras, falta de fusão, falta de penetração, etc.).
- b. - De ordem metalúrgica (Trincas, porosidade, alterações da microestrutura da ZAC, etc.).
- c. - Devido ao projeto (Mudanças na espessura, presença de concentradores de tensões, etc.).

Os tipos de descontinuidades não podem ser atribuídas rigorosamente a uma categoria determinada, porque eles poderiam ter origem secundária /10/.

Outra classificação de vários tipos de descontinuidades pode ser encontrada na documentação da ISS/IIW-340-69, /11/.

- a. - De origem planar ou bidimensional (Trincas, falta de fusão, falta de penetração, mordeduras, etc.).
- b. - Abrangendo volume, ou seja tridimensional (Cavidades, inclusões sólidas, etc.).

#### 4. - POROSIDADE NO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

##### 4.1. - Generalidades

Em geral, a porosidade na soldagem de metais por fusão é formada por gases que são presos quando o metal está sendo solidificado /12/, esta é uma descontinuidade do tipo metalúrgico /10/.

Para obter porosidade nos cordões de solda por fusão, é necessário duas etapas /13/:

- a. - O gás deve ser introduzido no metal.
- b. - O gás deve permanecer no cordão de solda que está solidificando, sendo preciso impedir sua saída.

Se não temos uma das duas condições, pode-se produzir solda livre de poros.

##### 4.2. - Porosidade no Processo TIG e MIG

A porosidade que ocorre nos processos TIG e MIG pode ser de dois tipos:

- a. - Porosidade primária.
- b. - Porosidade secundária.

a. - A porosidade primária ocorre no metal líquido durante a solidificação, no caso de excesso de contaminação por nucleação de

bolha na frente da interface. Este tipo de poros está presente em maior volume que os secundários, e são os principais causadores da rejeição das soldas nas ligas de alumínio /14-16/.

A porosidade primária ocorrida durante a solidificação do metal de solda, apresenta duas morfologias /14/:

- . - Interdendríticos de baixo a moderado nível de saturação do líquido.
- . - Grandes poros esféricos para os níveis altamente saturados.

Os poros interdendríticos são, conforme D'annessa /14/, controlados pelo crescimento das subestruturas, o que faz que sejam dependentes do modo de solidificação, para uma determinada liga de alumínio. Variações no modo de solidificação (de dendrítico a planar), tamanho e taxa de crescimento, determinarão a forma, o tamanho e a taxa de crescimento dos poros interdendríticos. Os poros esféricos são controlados pela tensão superficial.

b. - A porosidade secundária é produzida por segregação do gás na interface sólido/líquido, a qual avança precipitando-se desde o estado sólido /14-16/.

#### 4.3. - Tipos de Gases Dissolvidos

Vários pesquisadores /12, 15, 17, 18/ determinaram que o hidrogênio é o principal causador da porosidade no alumínio e suas ligas, quando são soldados por fusão. Outros tipos de gases, tais

como oxigênio e nitrogênio, foram excluídos devido à sua pequena influência na porosidade, pois tem pressão de vapor baixa na temperatura de trabalho. Portanto, a solubilidade do hidrogênio é o fator mais importante na formação de poros.

Existem dados de solubilidade que diferem conforme o autor por exemplo: segundo Shore e McCauley /12/, a solubilidade do hidrogênio no alumínio à temperatura de fusão é 10 vezes maior no estado sólido, porém, Howden /15/ apresentou uma diferença ainda maior (de 70 vezes).

Um dos motivos da variação da solubilidade do hidrogênio é pela influência dos elementos de liga, pois estes agem sobre o intervalo (Líquido-Sólido) e no modo de solidificação /12,16/.

#### 4.4. - Suscetibilidade à Formação de Poros

O mais sério problema encontrado no processo de soldagem por fusão do alumínio e suas ligas é a porosidade, devido à contaminação por hidrogênio, o qual provém de diferentes fontes.

O alumínio e suas ligas são os materiais mais suscetíveis à porosidade, porque o valor da relação máxima solubilidade do hidrogênio no metal líquido superaquecido e solubilidade do hidrogênio à temperatura de solidificação ( $C^{líq.}/C^s$ ), é bem maior que em qualquer outro material estrutural.

Howden /15/ compara a absorção do hidrogênio no alumínio e no ferro em função da temperatura, as quais são mostradas na Fig. 9 de

forma qualitativa.

No caso do ferro, na poça de fusão, a solubilidade é incrementada por um fator de 1,6 vezes maior ao correspondente na temperatura de fusão, com isto têm-se que o conteúdo do hidrogênio é próximo ao obtido no ponto de fusão.

Porém, no alumínio, a quantidade do hidrogênio na poça de fusão é de quase 70 vezes maior do que o conteúdo no ponto de fusão. Esta é a razão pela qual o alumínio é mais sensível à formação de poros durante a solda por fusão.

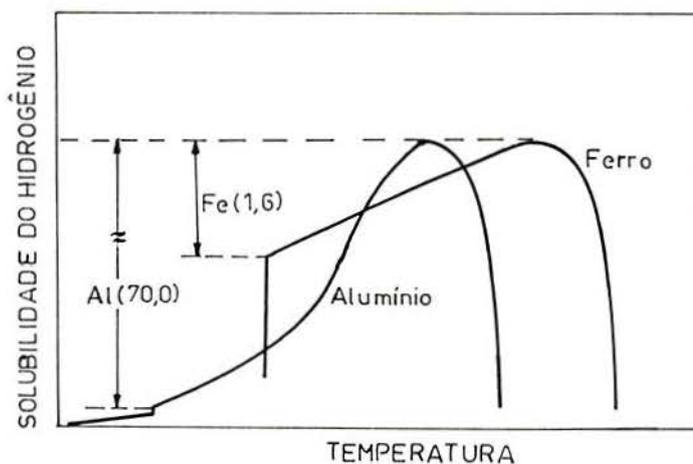


Fig. 9: Suscetibilidade do alumínio e do ferro à absorção do hidrogênio em função da temperatura /15/.

#### 4.5. - Fontes de Hidrogênio

Como visto, o hidrogênio é causador da porosidade nos processos de soldagem por fusão do alumínio e suas ligas, seja no processo TIG ou MIG, podendo estar presente:

. - Hidrogênio em solução sólida, no metal base e/ou metal de adição (consumível). Apresenta-se também nas frestas, trincas ou vazios do metal em consideração. Na prática, a quantidade de hidrogênio interno é muito pequena /16,17/.

. - O hidrogênio pode provir da contaminação por filme de óxido hidratado sobre a superfície do consumível /17-19/ e do metal base /16-19/.

. - Umidade absorvida pela superfície nua do metal base e do consumível /13, 15, 16, 17, 19, 20/.

. - Vapor d'água no gás de proteção /15,16/.

Para o caso particular do processo MIG, a umidade, a graxa e todos os tipos de hidrocarboneto (por exemplo: lubrificante com silicone), os quais são elementos contaminantes na superfície do consumível, são imediatamente vaporizados no arco e transformados em hidrogênio atômico, o qual está disponível para a absorção da poça de fusão /13/.

Resumindo, os fatores que afetam a transformação de poros na solda por fusão pelo processo MIG, destacam-se quatro mais importantes, os quais apresentam-se em ordem decrescente em relação à sua influência relativa /21/:

(a) Hidrogênio no metal de adição.

(b) Hidrogênio que é mantido em solução sólida e não forma parte dos poros.

(c) Hidrogênio no gás de proteção.

(d) Hidrogênio no metal base.

O metal de adição é considerado mais nocivo em virtude da sua alta relação de superfície/volume, tendo maior influência quando a sua superfície é rugosa, pois são oxidados e contaminados mais facilmente.

#### 4.6. - Absorção do Hidrogênio

Segundo Howden /15/ a absorção do hidrogênio é produzida em uma região anelar na superfície da poça de fusão. No centro desta área abaixo do eletrodo, a temperatura aproxima-se à ebulição do metal, e a quantidade de hidrogênio absorvida é pequena (Fig.10).

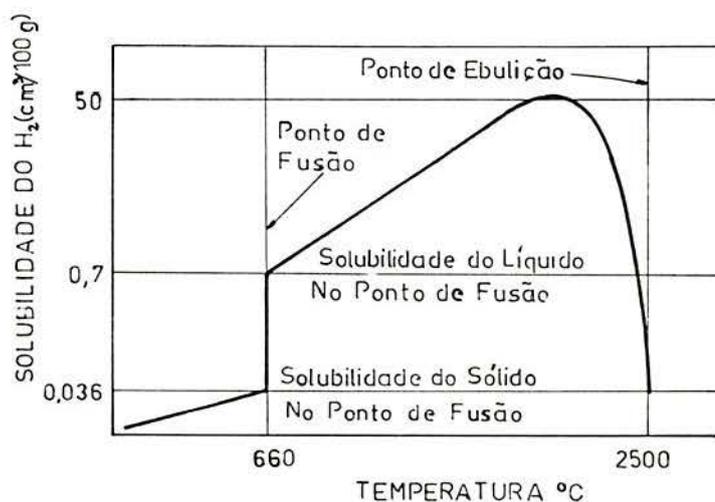


Fig.10: Solubilidade do hidrogênio no alumínio em função da temperatura /15/.

Na região exterior à anelar, a temperatura do metal líquido é menor; isto faz com que o metal apresente uma pressão de vapor

inferior, tornando-o capaz de absorver hidrogênio até a quantidade máxima ( $C^{máx}$ ). Este gás é, então, imediatamente distribuído nas regiões de menor temperatura da solda, por correntes convectivas do metal líquido (Fig.11).

O conteúdo de hidrogênio no metal líquido é maior do que a capacidade deste de manter em solução, fazendo com que o excesso de gás seja expelido em direção à zona de fusão.

O hidrogênio que ingressa na poça de fusão vem da atmosfera protetora, que é controlada pela lei de Sievert /15,16/.

A solubilidade do gás (neste caso o hidrogênio) é proporcional à pressão parcial do mesmo, acima do metal fundido.

$$[H] = Kx(P_H)^{1/2}$$

[H]: Solubilidade do Hidrogênio.

$P_H$  : Pressão parcial.

K : Constante de equilíbrio.

A lei de Sievert é verificada quando as condições são de equilíbrio. Nos processos de soldagem TIG e MIG, não chega-se à condição de equilíbrio /15-17/, mas apesar disso, foi determinada a solubilidade do hidrogênio na poça de fusão, em função da pressão parcial do hidrogênio /15,16/.

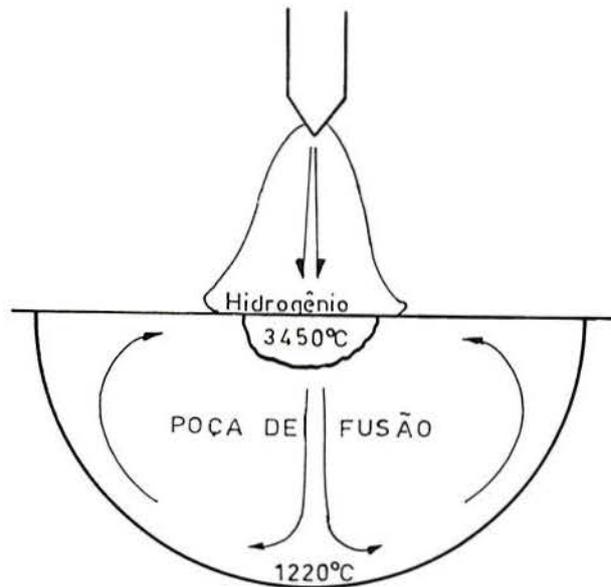


Fig. 11: Representação esquemática da absorção de hidrogênio na poça de fusão /15/.

Segundo Gedeon e Eagar /22/ a aplicação da lei de Sievert implica que gases diatômicos são absorvidos na poça de fusão, a uma simples temperatura de equilíbrio. Eles apresentaram um modelo em duas etapas:

- (a) A reação de dissociação do hidrogênio é governada pela capa limite do cátodo.
- (b) A reação de absorção do hidrogênio (mono e diatômico) é governada pela temperatura da poça de fusão.

Esses autores determinaram que o conteúdo de hidrogênio medido no teste de difusão é dado por três fenômenos:

- (1) Absorção do hidrogênio na poça de fusão.
- (2) Hidrogênio preso ou rejeitado pela frente de solidificação.
- (3) Difusão do hidrogênio desde o metal de solda solidificado.

Esses mesmos autores concluíram, ainda, que o hidrogênio monoatômico é absorvido pela poça de fusão com maior facilidade que o hidrogênio diatômico. Assim, a quantidade de hidrogênio absorvido dependerá da dissociação, e esta da temperatura, que por sua vez depende das regiões de alta temperatura da solda com o arco a plasma, que pode ter efeito significativo.

#### 4.7. - Mecanismo de Geração de poros

O mecanismo de geração de poros responde ao processo de nucleação e crescimento. Iniciando o processo de nucleação, seja homogêneo ou heterogêneo, a bolha tenderá a crescer, minimizando assim sua energia superficial na poça de fusão /19/.

Saperstein et ali /19/ usaram a liga de alumínio 3003 para seu estudo e para explicar qualitativamente o crescimento da bolha, o qual dependerá de:

- . - Taxa de resfriamento e solidificação do metal de solda depositado.
- . - Taxa de difusão do hidrogênio.

- . - Concentração de hidrogênio na poça de fusão.
- . - Concentração de núcleos estáveis.

Esses autores concluíram que a distribuição final e tamanho dos poros são fortemente influenciados e governados pelo tempo disponível para a nucleação e crescimento. Com altas taxas de resfriamento, o crescimento é mais demorado pois elimina o tempo necessário para a difusão.

#### 4.8. - Influência dos Elementos de Liga

Woods /16/ demonstrou a influência dominante dos elementos de liga com respeito à solubilidade do hidrogênio, por exemplo: com 3 % de cobre no alumínio, reduz-se notoriamente a solubilidade do hidrogênio no alumínio, porém, com adição de 6 % de magnésio, a solubilidade do hidrogênio no alumínio é duplicada (Fig. 12).

Os elementos de liga afetam o intervalo e o modo de solidificação, os quais podem contribuir positivamente na formação de poros.

A composição do metal de solda tem fundamental importância nas taxas de:

- . - Absorção de hidrogênio.
- . - Solubilidade de hidrogênio.

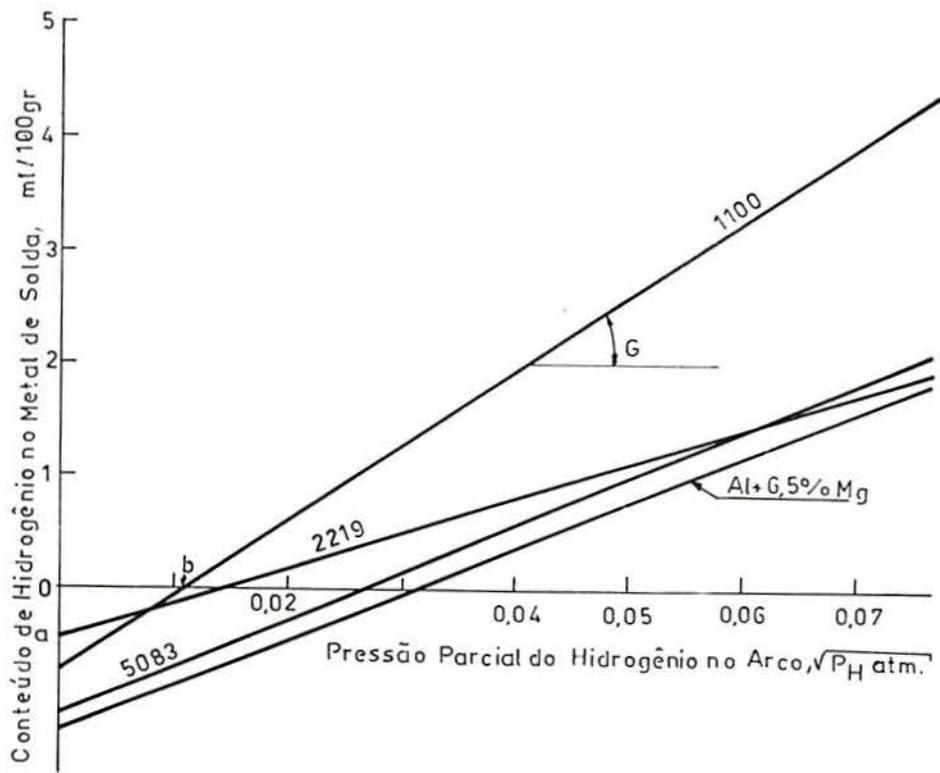


Fig.12: Conteúdo de hidrogênio no metal de solda Al, Al-Mg, Al-Cu em função da raiz quadrada da pressão parcial de hidrogênio /16/, sendo:

G : Suscetibilidade da liga para formar poros devido ao hidrogênio.

o-a : Volume de hidrogênio absorvido do arco e retido efetivamente em solução sólida no metal de solda.

o-b : Representa o umbral do nível de contaminação de hidrogênio, ou seja, o nível de hidrogênio a partir da qual aparece o primeiro poro.

Woods /16/ concluiu que o Mg no alumínio de pureza comercial incrementa significativamente a solubilidade efetiva do hidrogênio no metal de solda, e diminui a taxa de absorção do hidrogênio no arco. Conseqüentemente, as ligas tais como Al-Mg tem menos possibilidade de apresentar porosidade.

#### 4.9. - Influência das Variáveis de Soldagem

O tempo de estocagem entre a limpeza e a soldagem das chapas, afeta o nível de porosidade do cordão de solda, e em particular na posição sobre-cabeça. A Fig. 13 ilustra o incremento da suscetibilidade à formação de poros em função do tempo de estocagem da peça.

A corrente de soldagem afeta o nível de porosidade no cordão de solda das ligas de alumínio, já que são afetados o volume de metal fundido e a taxa de absorção de hidrogênio da fonte externa. Segundo Wood /16/ incremento na corrente de soldagem aumenta a temperatura na superfície da poça de fusão e a zona anelar é maior, com isso a absorção de hidrogênio é maior. O autor conclui que a porosidade devido ao hidrogênio aumenta com o incremento da corrente de soldagem, no processo TIG.

Altas taxas de resfriamento produzem muitos poros pequenos com volume mínimo. Com baixas taxas de resfriamento o metal de solda apresentou pouca quantidade de poros, porém esse poros eram de maior tamanho. Taxas moderadas de resfriamento deram máximo volume

de porosidade com tamanho médio dos poros /19/.

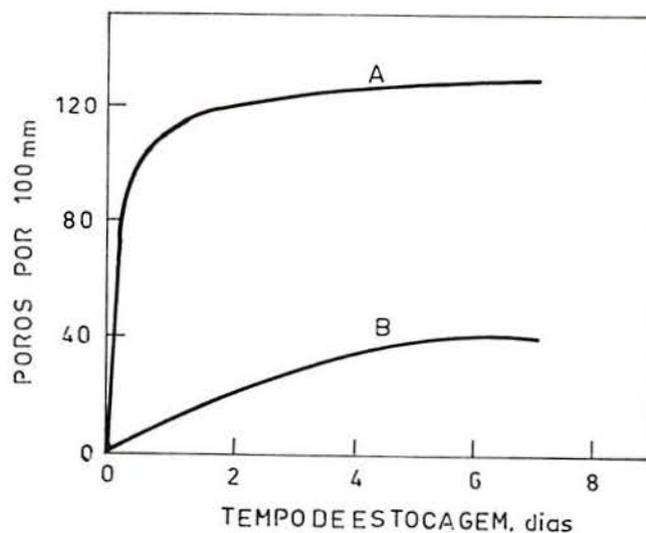


Fig. 13: Conteúdo de poros no cordão de solda em relação ao tempo de estocagem entre a limpeza e a soldagem das chapas. A - Chapa estocada ao ar livre; B - Chapa estocada em local fechado /23/.

Em geral a posição de soldagem influi sobre o nível de porosidade no cordão de solda, afetando a forma da poça de fusão.

Obturov & Erokhin /23/ demonstraram que o incremento relativo no nível de porosidade no cordão de solda da liga AMg6 (União Soviética), em função da posição angular de soldagem (de plana a sobre-cabeça), como é mostrada na Fig. 14.

Também o modo de solidificação é influenciado pela posição de soldagem, sendo que a tendência dos poros é de flutuar no metal

fundido (Fig. 15). Entretanto nem sempre a posição de soldagem pode ser escolhida, por exemplo, nas instalações de máquinas onde as soldas deverão ser feita praticamente em todas as posições /13,16/.

Collins /24/ estudou a influência das misturas dos gases de proteção (nos processos TIG e MIG) sobre o nível da porosidade do material base 5052 e metal de adição 5154. A mistura de 65 % de Hélio com 35 % de argônio apresentou cordões de solda de qualidade superior (em intervalos amplos de correntes e voltagem de soldagem) às soldas feita com argônio e hélio puros (Fig. 16).

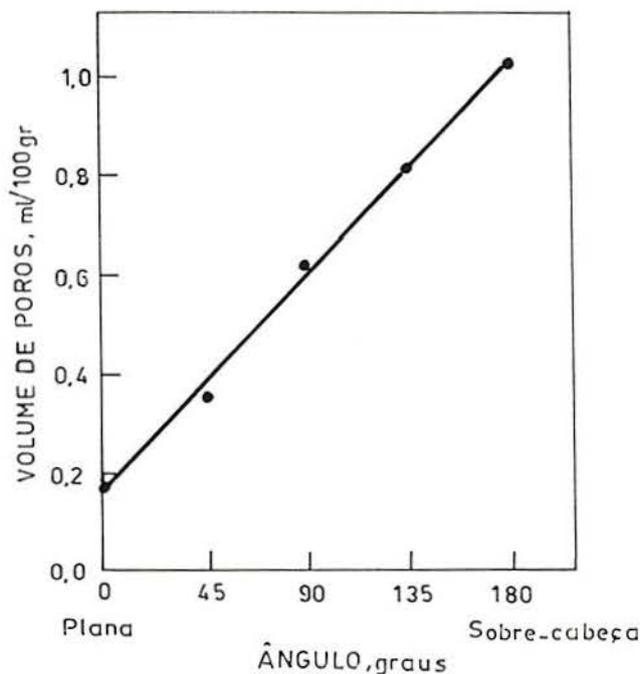


Fig. 14:Volume de poros no cordão de solda da chapa AMg6 em função do ângulo de soldagem /23/.

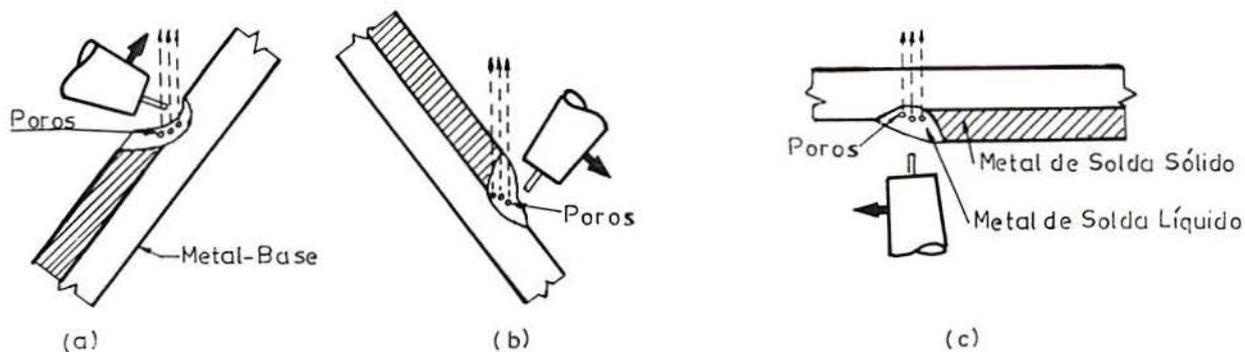


Fig. 15: Efeito da posição de soldagem e forma da poça de fusão sobre os poros, (a) Ascendente, (b) Descendente, (c) Sobre-cabeça /13, 16/.

Comparações feitas entre os processos TIG e MIG, demonstraram que o processo MIG é mais propenso à formação de poros /21/ por duas razões:

(a) A grande superfície associada com pequeno diâmetro do arame, proporciona uma ampla chance para que a superfície seja contaminada por umidade, lubrificante e outros hidrocarbonetos.

(b) A maior temperatura da gota aumenta a quantidade de hidrogênio absorvido durante a transferência do metal através do arco.

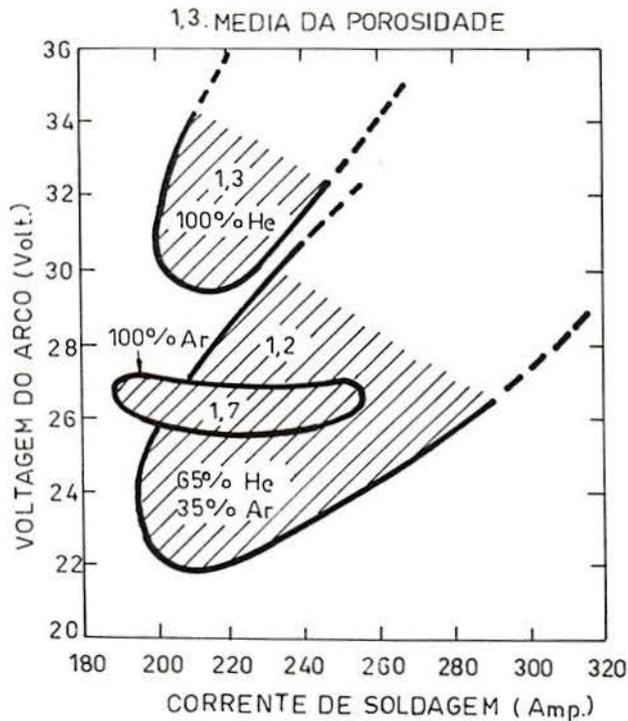


Fig. 16: Corrente-Voltagem em função da mistura dos gases de proteção (Ar e He). Posição sobre-cabeça /24/.

#### 4.10. - Preparação de Superfícies

A limpeza das superfícies a serem soldadas é um pré-requisito para obter alta qualidade na solda. Por isto, perfis, chapas e lâminas de alumínio devem ser estocadas, manuseadas e trabalhadas de tal maneira que seja mínima a pré-limpeza antes da soldagem.

Soluções alcalinas moderadas e solventes comerciais que não envolvam a geração de gases tóxicos durante a soldagem, são usados com sucesso para remover os contaminantes (quando existirem) na

superfície do alumínio.

Não devem ser utilizados solventes do tipo tricloroetileno ou tetracloreto de carbono, os quais geram gases tóxicos durante o processo soldagem.

Uma descrição resumida dos procedimentos usuais de limpeza é apresentada na Tab. 3.

Tab. 3: Procedimentos gerais na preparação de superfícies de alumínio para soldagem /1, 19/.

Componentes a serem removidos	Limpeza localizada (apenas Sup.soldadas)	Limpeza geral (limpeza total peças)
Óleo, graxa, umidade e poeira	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Lavagem com solução</li> <li>-Lavagem c/ solventes hidrocarbonetos como acetona ou álcool</li> <li>-Lavagem c/ solventes específicos para este fim</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Desengraxe por vapor</li> <li>-Desengraxe por spray</li> <li>-Imersão em solventes alcalinos</li> <li>-Imersão em solventes específicos</li> </ul>
Camada de óxido	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Lavagem das superfícies em solução alcalina forte, depois em água; solução de ácido nítrico e lavagem final c/ água</li> <li>-Lavagem com desoxidantes específicos</li> <li>-Remoção mecânica do óxido:               <ul style="list-style-type: none"> <li>a) escovamento com escova rotativa</li> <li>b) polimento</li> <li>c) remoção mecânica de material nas áreas adjacentes à junta.</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Imersão em solução alcalina forte, água, ácido nítrico e água novamente</li> <li>-Imersão em desoxidante específicos</li> </ul>

## 5. - PROPRIEDADES MECÂNICAS

### 5.1. - Concentração de Tensões

Quando a peça estrutural contém descontinuidades (furos, entalhaduras em todas suas formas, e outros), fatos comuns na prática dão origem à perturbações na distribuição das tensões, podendo ter valores altos nos pontos de descontinuidades.

O valor das tensões nas proximidades dos pontos de aplicação das cargas concentradas é muito maior que a tensão média ao longo da peça.

A relação entre tensão máxima e tensão média (da seção mínima) é o coeficiente de concentração de tensões:  $K_t$

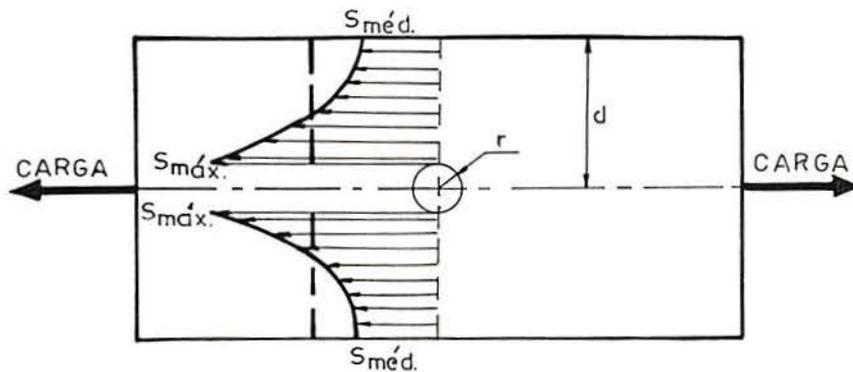


Fig. 17: Distribuição de tensões próximas a um furo circular em uma placa sujeita à carga axial.

Os resultados não dependem das dimensões das peças e do metal usado, mas unicamente das relações entre parâmetros geométricos

envolvidos ( $r/d$ ), no caso de furo circular (Fig. 17).

É importante saber que  $K_t$  é válido para tensões máximas que não ultrapassem o limite de proporcionalidade do material, pois os valores do mesmo são obtidos adotando-se uma relação linear entre tensões e deformações específicas /25/. Existem referências contendo gráficos, os quais são usados na determinação do valor de  $K_t$  para diferentes descontinuidades.

A relação entre as descontinuidades devido aos poros, e o fator de concentração de tensões, foi estudada por Lindh e Peshak /26/ na liga Ti-6Al-4V através de análise fotoelástica. Esses autores observaram que poros internos incrementavam o fator  $K_t$  ao redor de 2,05, independentemente do tamanho dos poros. Porém, quando a localização dos poros era mais próxima da superfície (a uma distância aproximada de 2,5 vezes o diâmetro do poro) o valor de  $K_t$  teve um aumento significativo. Se o poro estava situado a uma distância de até um diâmetro da superfície, o valor de  $K_t$  tendia a 5.

Aproximadamente todos os materiais soldáveis usados nos projetos de engenharia tem a capacidade de absorver e/ou redistribuir a magnitude da tensão local.

Masubuchi /27/ discutiu os efeitos das descontinuidades, tais como o comportamento da porosidade em materiais dúcteis, aplicando nos mesmos uma carga axial de tração. Grandes deformações ocorrem antes da ruptura. Regiões plásticas eram formadas nas áreas submetidas à valores de tensões maiores do que o limite de escoamento. A deformação plástica reduz o efeito da concentração de

tensão ao redor da descontinuidade. Assim, a perda das propriedades mecânicas nas juntas soldadas associada à porosidade, não resulta diretamente da concentração de tensões ao redor do poro.

Usualmente, a solda feita nas ligas de alumínio não é muito sensível ao entalhe, porém a perda de resistência é proporcional à diminuição da seção (devido a porosidade) sem ter em consideração a localização dos poros /13, 27, 28/. Os aços de baixa resistência apresentaram o mesmo comportamento /29, 30/.

Também Masubuchi /27/ observou que a ruptura dos metais dúcteis era por cisalhamento e ocorria quando a resistência à tração aproximava-se ao valor da tensão de ruptura. Nesse caso a fratura propagava-se lentamente.

## 5.2. - Efeito da Porosidade nas Propriedades Mecânicas

Os efeitos dos níveis da porosidade nas propriedades mecânicas da junta soldada de alumínio, podem ser obtidas por ensaio de tração simples. Apesar dessa descontinuidade ter sido estudada cuidadosamente, mais do que qualquer outra, os resultados publicados não são completamente concordantes.

No trabalho apresentado por Baysinger /31/ concluiu-se que a porosidade não tinha efeito na resistência à tração, até existir grande quantidade do poros. Esse estudo não contém informações quantitativas do limite de escoamento, resistência à tração e deformação específica, em relação aos níveis de porosidade (Fig.

18).

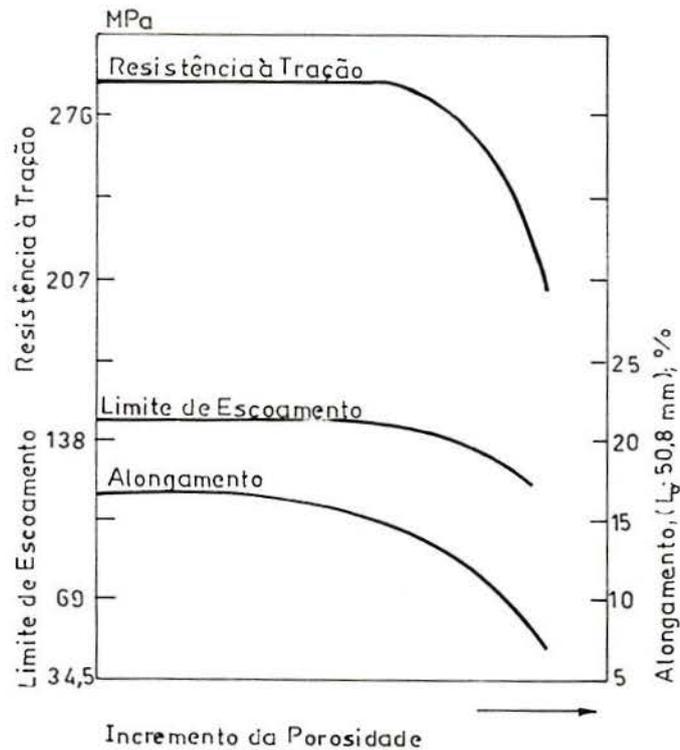


Fig. 18: Efeito da porosidade sobre as propriedades mecânicas de tração da junta soldada, 5083/5356, Processo MIG /31/.

Rudy e Rupert /13/, na análise feita sobre as propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração, verificaram que fatores tais como tamanho, distribuição e localização dos poros, não eram tão significativo como a influência da redução da área resistente do metal de solda na superfície da fratura.

A diminuição no valor da resistência à tração do cordão de solda, transversal ao esforço aplicado, é proporcional à perda da

área do metal no plano de fratura. Esses dados foram obtidos com poros essencialmente esféricos.

Poros pequenos (diâmetros  $\leq 0,400$  mm) quando em quantidade suficiente, também apresentam efeitos semelhantes aos poros de diâmetro maior a 0,400 mm, afetando à resistência à tração, o limite de escoamento e a ductilidade.

Shore e McCauley /12/ estudaram o efeito da porosidade na liga de alumínio 7039-T6151 soldada pelo processo MIG, com arame 5039. Esses autores deduziram que a diminuição da resistência à tração é proporcional à perda do metal de solda no plano de fratura (Fig.19), chegando à mesma conclusão que a obtida por Rudy e Rupert /13/.

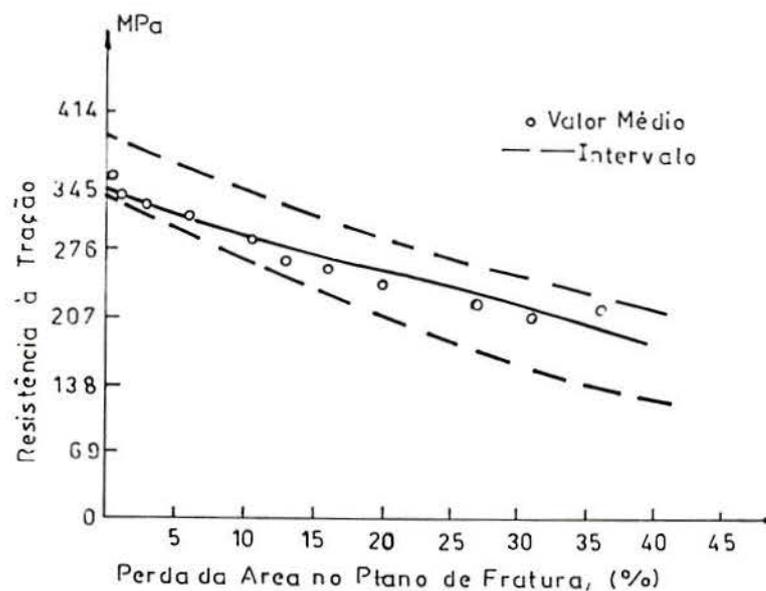


Fig. 19: Resistência à tração em função da porosidade 7039-T6151/5039 /12/.

O limite convencional de escoamento é obtido com a deformação específica de 0,2 % em função da perda da área na superfície de fratura (percentagem de porosidade) (Fig. 20). Praticamente, o limite de escoamento, não foi afetado pelos níveis de porosidade, e os resultados indicaram que a porosidade sobre o intervalo pesquisado teve pequeno efeito no comportamento elástico do material.

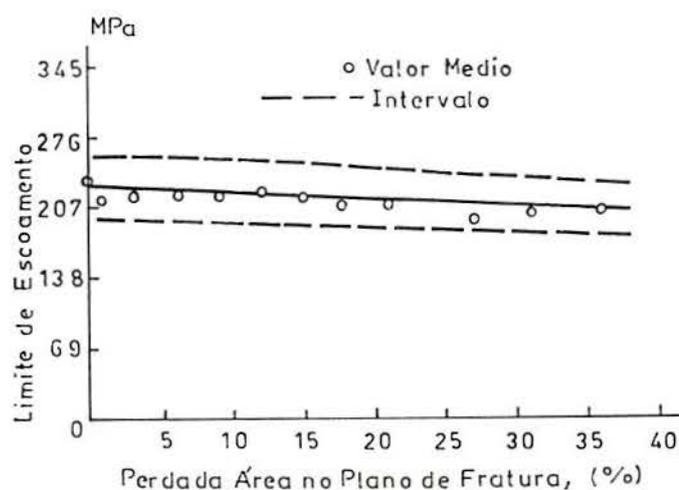


Fig. 20: Limite de escoamento em função da porosidade 7039-T6151/5038 /12/.

A perda da ductilidade com a porosidade foi determinada pelo alongamento, no comprimento de 50,8 mm (duas polegadas) (Fig. 21).

Os autores /12/ concluíram que os efeitos da porosidade podem ser quantificados a partir de resultados experimentais, mas o mecanismo da fratura não foi explicado detalhadamente. A porosidade não afeta significativamente as propriedades elásticas do metal,

porém afeta o comportamento plástico (por exemplo, resistência à tração e ductilidade).

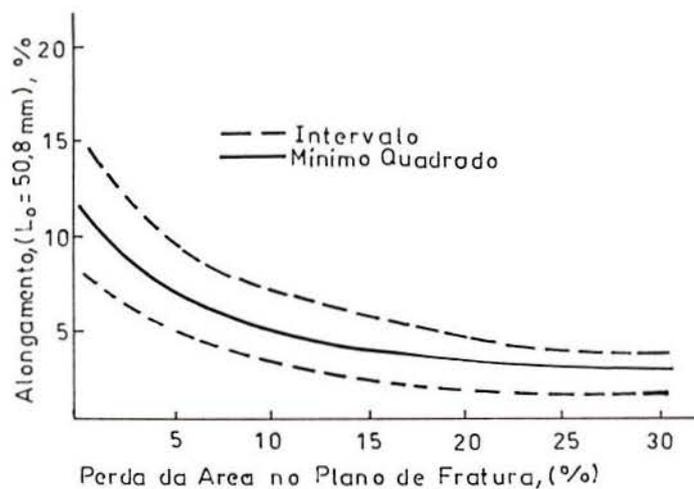


Fig. 21: Percentagem do alongamento em função da porosidade 7039-T6151/5039 /12/.

Nelson e Marshall /32/ estudaram o efeito da porosidade sobre a resistência à tração da junta soldada em diferentes tipos de liga de alumínio. Os cordões de solda das juntas soldadas das ligas não tratáveis termicamente toleraram maior nível de porosidade antes que seu valor de resistência à tração (da seção transversal da solda) diminua, sendo este inferior ao valor de qualificação. O grau de tolerância foi ainda menor nas ligas termicamente tratáveis e fundidas.

A tolerância no nível de porosidade nas ligas com maior resistência é menor, comparando com as ligas de baixa e média

resistência (ligas não tratáveis termicamente).

A porosidade apresenta o mesmo efeito no aço, sendo que nos aços de alta resistência o efeito da porosidade é mais crítico que nos aços de baixa resistência /30/.

Marteleé /33/ estudou os efeitos da porosidade sobre as propriedades mecânicas nas ligas Al99,5 e Al-Mg3, e concluiu que a influência nos níveis analisados devido aos poros, era ínfima sobre resistência à tração. Também o efeito do reforço no cordão de solda sobre a resistência à tração é desprezível.

Green et ali /29/ realizaram ensaios de tração, de impacto e de dobramento em aço soldado AISI 1020 (limite de escoamento = 240 MPa), para avaliar a influência do tamanho, forma, localização e distribuição dos poros no cordão de solda. Concluíram que quando a seção transversal do cordão de solda é diminuída em aproximadamente 7 % devido à porosidade, não apresentou mudanças substanciais nas propriedades mecânicas. A forma e distribuição da porosidade não causou maiores diferenças entre os corpos de prova testados.

Nas soldas feitas em aços de alta resistência (limite de escoamento = 690 MPa), a diminuição de até 5 % no tamanho da seção transversal no cordão de solda, pela presença de poros, não produziu mudanças nas propriedades mecânicas (estáticas); também os efeitos da forma, localização e distribuição dos poros foram desprezíveis nos ensaios de tração e impacto /30/.

Lawrence e Munse /34/ apresentaram um estudo bastante detalhado das propriedades mecânicas (resistência à tração, limite de escoamento e ductilidade) em função dos níveis de porosidade

obtidos no cordão de solda dos metais base 5083 e 6061. A contagem dos poros, para obter a área total da porosidade, foi feita tendo em consideração os macroporos (diâmetro > 0,254 mm) e os microporos (diâmetro entre 0,0254 e 0,254), visíveis na superfície da fratura dos corpos de prova testados. Na solda do metal base 5083 com metal de adição 5183, o incremento no nível de porosidade, produz diminuição gradativa na resistência à tração. Na Fig. 22, a linha cheia determina a redução da resistência à tração devido à redução da seção transversal (Critério da Seção Líquida), a qual é causada pela porosidade.

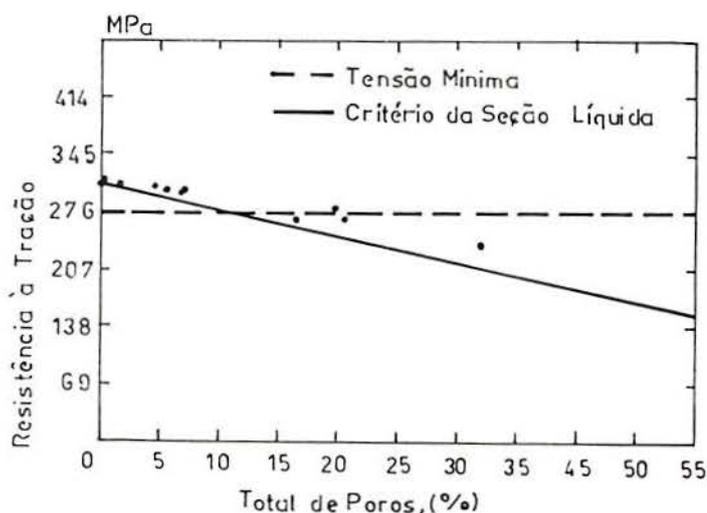


Fig. 22: Resistência à tração em função do percentual total de poros (5083/5183) /34/.

Poucos valores da resistência à tração, obtidos nos testes, foram inferiores ao determinado pelo "Critério de Seção Líquida",

porém a maioria dos dados foram superiores ou próximos. A influência do nível de porosidade no limite de escoamento (obtido com a deformação específica de 0,2 % em duas polegadas de comprimento) foi desprezível.

O alongamento diminui com o aumento do nível de porosidade (Fig. 23).

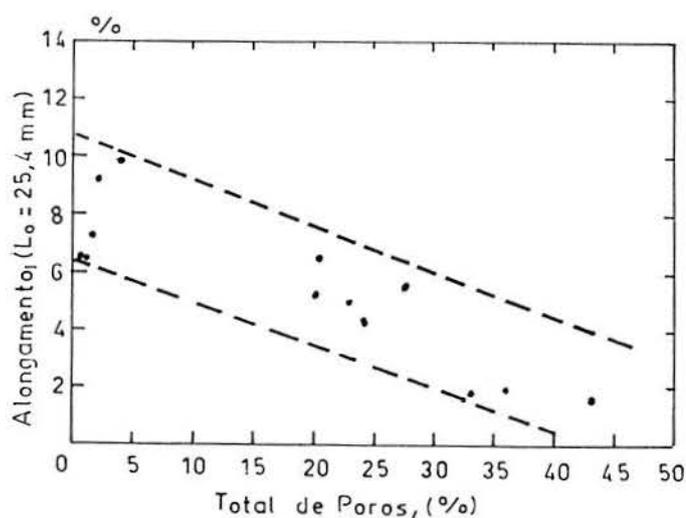


Fig. 23: Percentagem do alongamento (comprimento 25,4 mm) em função do percentual total de poros /34/.

Os autores em referências também frisaram a importância dos micro e macroporos na avaliação da resistência à tração da junta soldada. Na avaliação do efeito dos microporos, eles representaram a relação da resistência à tração da junta soldada contendo poros e com zero de poros em função do volume total de poros. Esse volume obtiveram da soma dos micro e macroporos, medidos na superfície da

fratura. Na Fig. 24 pode ser observado que a maioria dos valores de resistência à tração relativa foram superiores ou próximos a aqueles valores do Critério da Seção Líquida (linha cheia). Porém, quando não consideraram os microporos na avaliação do volume total de poros, os valores de resistência à tração relativa foram inferiores aos obtido pelo Critério da Seção Líquida (Fig. 25).

$S_u/[S_u]$  = Resistência à tração relativa da junta soldada.

$S_u$  = Resistência à tração da junta soldada contendo poros.

$[S_u]$  = Resistência à tração da junta soldada (zero de poros).

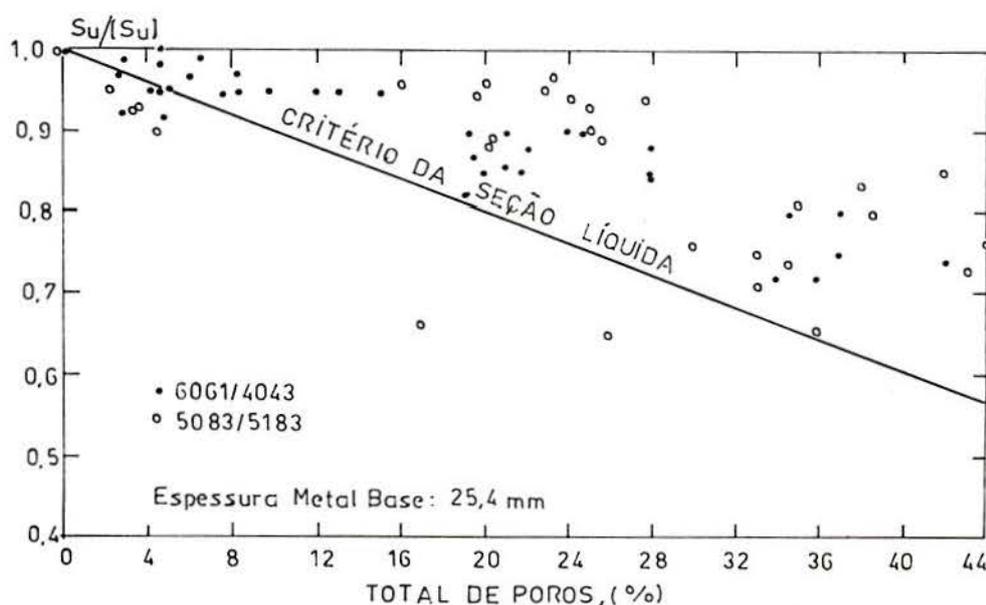


Fig. 24: Resistência à tração relativa da junta soldada em função do volume total de poros /34/.

A relação entre macro e microporosidade talvez seria influenciada pelo procedimento de soldagem e pela combinação do

metal base-adição /34/.

Com as quantidades dos macro e microporos medidos na superfície da fratura, determinou-se que o conteúdo dos microporos foi de 5 a 10 vezes maior que o conteúdo dos macroporos. Poros discretos visíveis nos filmes de radiografia são somente uma fração do total presente /34, 35/.

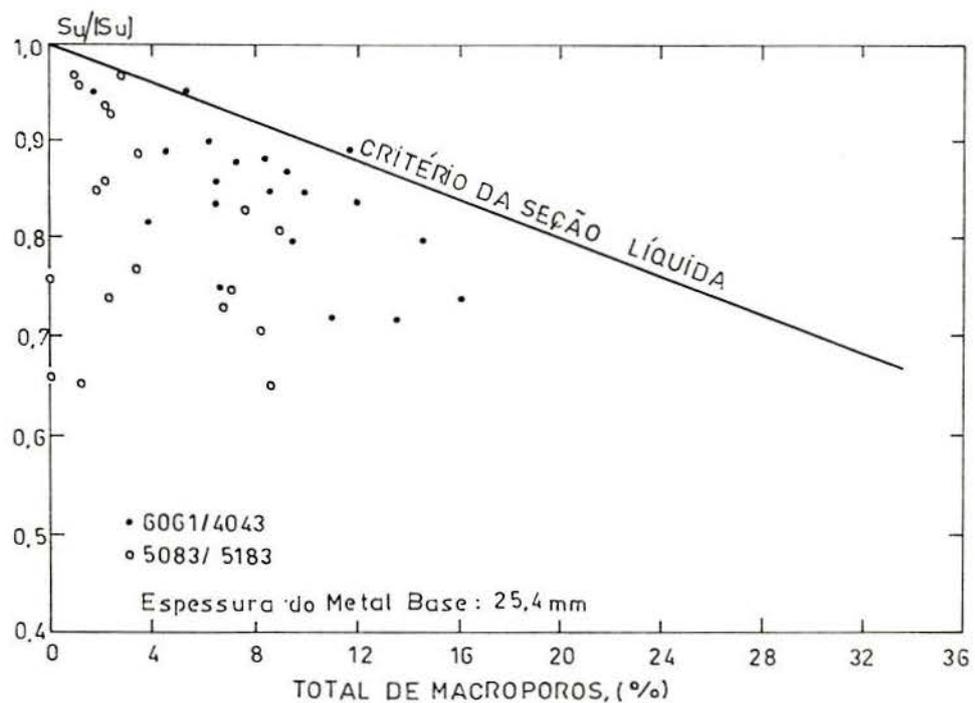


Fig. 25: Resistência à tração relativa da junta soldada em função da porcentagem dos macroporos /34/.

## 6. - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Como visto no item 5 as propriedades mecânicas da junta soldada dependem da presença de descontinuidades, tal como a porosidade, no cordão de solda. Os objetivos do presente trabalho são de verificar:

- O efeito da porosidade do metal de solda sobre a resistência à tração, o alongamento e o limite de escoamento da junta soldada.
- O efeito do ângulo do cordão de solda, medido em relação à direção perpendicular à aplicação da carga, sobre aquelas propriedades mecânicas.

### 6.1. - Metal Base e Metal de Adição

A liga de alumínio utilizada foi a ASTM B 209 Gr 5083 Recozido "O", Al-Mn-4,5Mg; a qual é recomendada para aplicações, como: embarcações, tanques criogênicos, vagões ferroviários, veículos militares, tanques e outras as quais exigem excelentes propriedades mecânicas /36/.

O metal de adição empregado para a realização das soldas por MIG foi o arame AWS ER-5183, a qual proporciona uma união satisfatória com o metal base na condição de recozido, obtendo-se uma junta com excelentes propriedades mecânicas e de fácil soldabilidade.

A composição química do metal base e do metal de adição são mostradas na Tab. 4.

Tab. 4: Composição química do metal base e do metal de adição.

Metal Base e Adição	Elementos - (%) em peso									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros	Al
5083-0 <sup>(a)</sup>	0.12	0.35	0.03	0.40	4.27	0.07	0.014	0.04	0.014	(A)
5183 <sup>(b)</sup>	0.40	0.40	0.1	0.50-0.10	4.3-5.2	0.05-0.25	0.25	0.15	0.015	(A)

(a) Valor médio da análise química fornecida pelo fabricante.

(b) Valores especificados pela "American Welding Society" (AWS 5.10-80) /37/.

(A) O teor de alumínio é a diferença entre 100 % e o somatório dos demais elementos metálicos, com teor superior a 0,010 %, expressa até a segunda casa decimal.

As propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração simples, e os valores mínimos especificados pelo Código ASME /38/ são mostrados na Tab. 5.

Tab. 5: Propriedades mecânicas do metal base e do metal de solda.

	Metal-Base (a)	Metal-Solda (b)	Junta soldada (ASME) (e)
Resistência à tração, MPa.	303,3	276,64	248,13
Limite de escoamento, MPa.	143,65(c)		96,5
Alongamento ( $L_0 = 60$ mm), %.	28,22	22,73(d)	16(f)

- (a) Valor médio de três corpos de prova retirados da chapa, na direção transversal à laminação.
- (b) Valor médio de três corpos de prova obtidos do cordão de solda.
- (c) Valor obtido com 0,2 % de deformação específica, comprimento 50,8 mm.
- (d) Alongamento determinado em um comprimento de 12,7 mm.
- (e) Valores mínimos especificados pelo Código ASME /38/.
- (f) Alongamento determinado em um comprimento de 50,8 mm.

## 6.2. - Dimensões das chapas

O corte da chapa (3.0x1.0 m) foi feito com Plasma. Devido aos diferentes ângulos do cordão de solda, as dimensões das chapas a serem soldadas foram diferentes, e a direção de laminação permaneceu perpendicular à carga que será aplicada no ensaio de tração simples (Fig. 26).

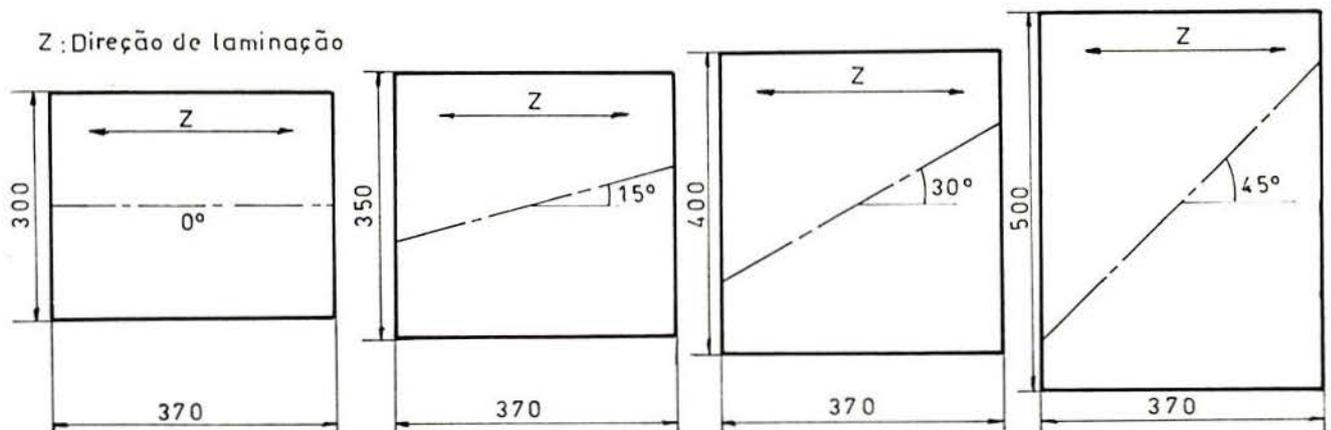


Fig. 26: Dimensões das chapas a serem soldadas.

### 6.3. - Geometria da Junta

Os chanfros das chapas a serem soldadas foram usinados com fresa, obtendo-se a junta de topo em V-60° com nariz. As dimensões da junta são mostradas na Fig. 27.

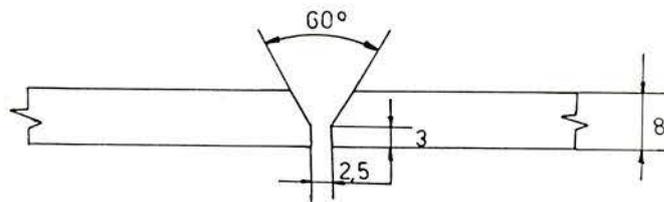


Fig. 27: Geometria da Junta Utilizada.

### 6.4. - Equipamentos Utilizados

Durante toda a parte de soldagem foram usados os seguintes equipamentos:

- FONTE VI - 600 White Martins

Corrente Máxima: 600 (A)

Voltagem Máxima: 50 (V)

Gás de Proteção: Argônio

Arame-Eletrodo: Classificação AWS ER-5183, Diâmetro: 1,2  
mm

A característica estática da máquina é do tipo Tensão

constante (Plana), como mostra a Fig. 28.

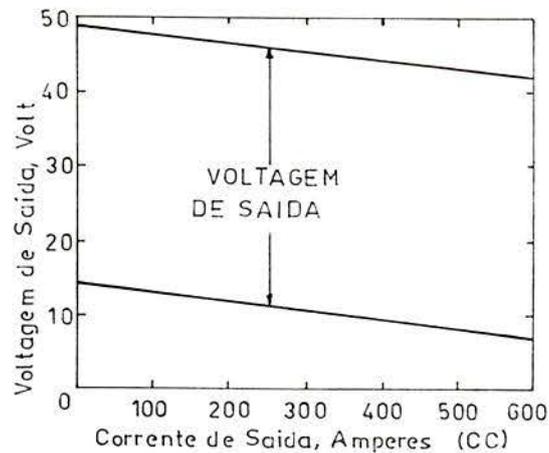


Fig. 28: Características Tensão-Corrente de Saída.

- Dispositivo Universal Automático de Soldagem.

Dispositivo projetado e construído no laboratório de soldagem para solda automática. Permite a variação da velocidade de soldagem entre 100 e 750 mm/min.

- Misturador Triplo de Gases da White Martins, utilizado para misturar Argônio e Hidrogênio e, medir a vazão de Argônio.

- Medição da vazão do Hidrogênio: Rotâmetro 0 - 100% (100% = 0,9904 l/min). Os Percentuais de Hidrogênio foram determinados por meio do Analisador de Gases da White Martins.

- Registrador ARCDATA LQ - 2

Unidade de monitoramento de dados de soldagem.

Fabricação Messer Griesheim.

### 6.5. - Execução das Soldas

Antes das chapas serem soldadas foram tomados os cuidados necessários para a obtenção de uma junta de boa qualidade.

O seguinte processo de limpeza foi executado imediatamente antes de realizar a solda:

- Lavagem com solvente hidrocarboneto: Acetona.
- Escovamento com escova rotativa de aço inox.
- Escovamento das áreas adjacentes ao chanfro, a uma distância mínima de 50 mm.

As chapas foram soldadas pelo processo MIG, empregando-se um dispositivo mecanizado para a condução da tocha. A escolha deste processo deve-se principalmente à sua versatilidade, que torna-o mais utilizado nas aplicações industriais, pois possibilita alta velocidade de produção e excelente qualidade da solda.

Misturou-se hidrogênio no argônio, para desta forma, obter poros ao longo do cordão de solda. A Tab. 6 mostra a composição dos gases e o código utilizado para a identificação das chapas. Para cada mistura de gases tem-se quatro ângulos do cordão de solda ( $0^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ) em relação à carga a ser aplicada (no ensaio de tração simples), obtendo-se um total de dezesseis chapas soldadas.

Tab. 6: Código empregado para a identificação das chapas.

CÓDIGO	MISTURA DE GASES
I (0, 15, 30, 45 )	100 % Ar
II (0, 15, 30, 45 )	99 % Ar + 1,0 % H <sub>2</sub>
III (0, 15, 30, 45 )	98 % Ar + 2,0 % H <sub>2</sub>
IV (0, 15, 30, 45 )	97 % Ar + 3,0 % H <sub>2</sub>

Para soldagem, foi adotada a posição plana, processo MIG com eletrodo positivo, mata junta de cobre (para garantir a penetração da solda) e 10 segundos de pré-fluxo no início de cada passe.

Os parâmetros de soldagem que apresentam-se na Tab. 7, foram cuidadosamente regulados, empregando-se uma fonte Transformador/Retificador do tipo tensão constante; esses parâmetros foram também controlados por instrumentos digitais de precisão, para aferir a Voltagem, a Corrente e a Velocidade de Soldagem.

Para o enchimento da junta foram feitos dois passes. Uma vez feito o primeiro passe, escovou-se o cordão de solda; para fazer o segundo passe, controlou-se a temperatura para que não ultrapasse os 65 °C. A AWS /39/ recomenda, para as ligas da série 5000 com mais de 3 % de Mg, que as chapas devem permanecer um tempo mínimo possível na temperatura entre 66 e 232 °C, para evitar a possibilidade de sensitização.

Tab. 7: Parâmetros de Soldagem

VOLTAGEM (V)	CORRENTE (A)	VELOCIDADE DA TOCHA mm/s	VAZÃO lts/min	ÂNGULO DA TOCHA Graus	PASSES
22,5-23,0	203-219	8,3	19,5	-10	PRIMEIRO
24,0-24,5	184-198	9,4	19,5	-10	SEGUNDO

Sabe-se que a energia de soldagem é função da voltagem, da corrente e da velocidade de soldagem. Assim, fixando-se esses parâmetros, têm-se a mesma energia de soldagem.

Neste caso, a diretriz fundamental no procedimento de soldagem foi a garantia de utilizar similar energia de soldagem para todos os corpos de prova. Devido ao requisito estabelecido para o desenvolvimento da solda, foi preciso alterar levemente a distância entre o bico de contato e a peça, com o incremento de hidrogênio no argônio (Tab. 8).

Tab. 8: Distância entre o bico de contato e a peça para as misturas de gases utilizadas.

DISTÂNCIA BICO DE CONTATO-PEÇA mm	MISTURA DE GASES
20	100 % Ar
20	99 % Ar + 1,0 % H <sub>2</sub>
17,5	98 % Ar + 2,0 % H <sub>2</sub>
17,5	97 % Ar + 3,0 % H <sub>2</sub>

## 6.6. - Determinação dos Níveis de Porosidade

Para os níveis percentuais de hidrogênio utilizado, os poros mantiveram-se distribuídos uniformemente ao longo do cordão de solda. Foram cortados três corpos de prova (transversal ao cordão de solda) de cada chapa soldada, obtendo-se assim um total de doze corpos de prova (para cada mistura de gases), dos quais escolheram-se três de forma aleatória.

A determinação do volume total de poros em percentagem foi realizada por metalografia quantitativa /40/:

(a) Os corpos de prova escolhidos foram polidos, atacados e fotografados, com x7 de aumento. Quando revelado o filme, foi superposta uma grade a qual foi usada para realizar a contagem dos pontos (não considerando-se a diferença nos tamanhos dos poros). Então, a percentagem do volume total de poros é dado pelo número de intersecções coincidentes com os poros, dividido pelo número total de intersecções do metal de solda, e multiplicado essa divisão por 100.

(b) Foram medidos os diâmetros dos poros na secção transversal do cordão de solda, com x20 de aumento (\*). Os corpos de prova analisados foram aqueles usados na determinação por contagem de pontos. Determinaram-se macroporos (diâmetro > 0,200 mm) e microporos (diâmetros de 0,025 a 0,200 mm) visíveis na secção transversal. O percentual do volume total de poros é a soma das áreas dos macro e microporos, dividido pela área total do metal de solda e

multiplicado por 100.

(\*) NOTA: PROJETOR DE PERFIL

Para as medições dos diâmetros dos poros na seção transversal do cordão de solda e da diluição, utilizou-se o "Projetor de Perfil (MITUTOYO) PJ-300 H; esse é um aparelho de medição muito versátil, e pode ser usado em grandes gama de ampliações (x10, x20, x50, x100). O aparelho possui Cabeçote Micrométrico Digital, e as medidas tornam-se bem mais fáceis e eficientes, pois o valor medido é indicado diretamente no digital, eliminando erro de leitura, e podendo ser zerado em qualquer posição através de um botão, indicando também a direção do valor medido em relação ao ponto zero.

### 6.7. - Corpos de Prova Para Ensaio de Tração

Três corpos de prova para o ensaio de tração foram retirados de cada chapa, na direção perpendicular à laminação. A Fig. 29, mostra as dimensões (em mm) do corpo de prova.

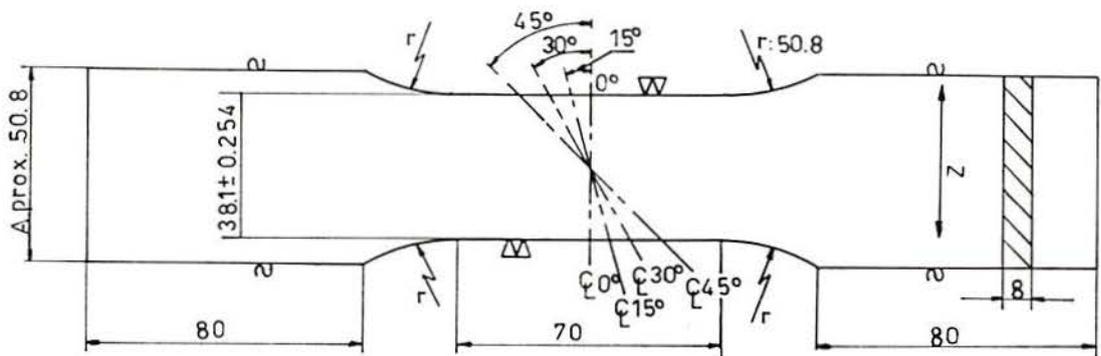


Fig. 29: Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração.

Para cada corpo de prova testado à tração obteve-se, do registrador da máquina, seu respectivo diagrama de Carga-Alongamento. Os seguintes dados foram obtidos de cada ensaio de

tração:

(a) Resistência à Tração - Carga máxima dividida pela seção transversal original do corpo de prova em questão.

(b) Limite de escoamento ou Limite Convencional de escoamento - É a carga necessária para produzir 0,2 % de Deformação Relativa; esta carga é dividida pela seção transversal original do corpo de prova testado.

(c) A Ductilidade, é determinada como a variação do comprimento inicial (devido à carga aplicada) dividido pelo comprimento inicial (de 60 mm). A variação do comprimento foi medida após a fratura (ruptura física) dos corpos de prova, juntando as superfícies de fratura o mais próximo possível.

#### 6.8. - Ensaio de Dureza

Realizaram-se ensaios de dureza sobre seções do metal base e do metal de solda. Em ambos os casos, trabalhou-se com um grau de acabamento superficial obtido com pasta de diamante de 3  $\mu$ .

Para a determinação da dureza, utilizou-se o método de microdureza Vickers, com cargas de 500 e 200 gr, seguindo as recomendações da norma ASTM E 384-86 "Standard Test Method for Microhardness of Materials /41/.

## 6.9. - Diluição

A composição química do metal de solda não é a mesma que a especificada para o metal de adição depositado, devido à participação do metal de base na constituição da zona fundida.

A diluição indica a participação do metal base na constituição da zona fundida (Fig. 30), sendo na seção transversal:

$$\% D = (\text{Área do metal base no metal de solda} / \text{Área total do metal de solda}) \times 100.$$

ou  $\% D = [A / (A+B)] \times 100.$

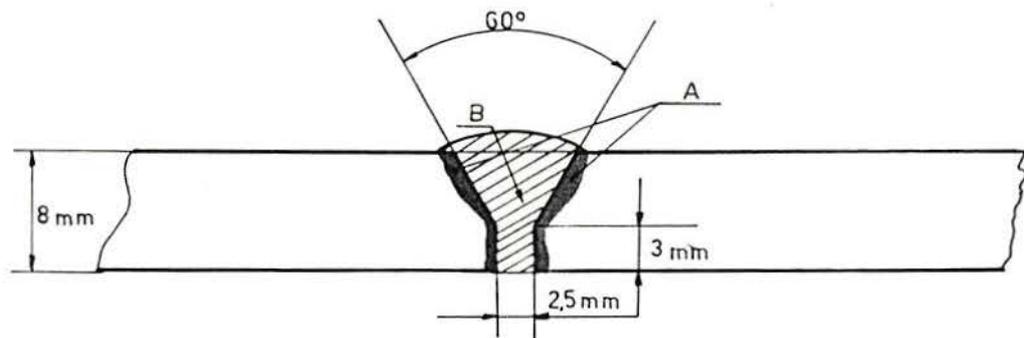


Fig. 30: Indicação esquemática para determinação da diluição.

## 7. - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 7.1. - Ensaios não Destrutivos

#### 7.1.1. -Exame Visual e Radiográfico

O primeiro passo na avaliação de uma solda é o exame visual; neste exame são medidas as alturas do reforço do cordão de solda e classificadas para cada mistura de gases empregado. Na Tab. 9, são apresentados os valores médios obtidos das alturas, bem como os resultados dos exames visual e radiográfico.

Tab. 9:Avaliação das soldas, exame visual e radiográfico.

MISTURA (DE GASES)	MÉDIA DA ALTURA DO REFORÇO, mm	EXAME VISUAL	EXAME RADIOGRÁFICO
I	2,43	APROVADA	APROVADA
II	1,90	APROVADA	APROVADA
III	2,97	REJEITADA	REJEITADA
IV	3,60	REJEITADA	REJEITADA

As únicas descontinuidades detectadas no exame visual foram rejeitadas porque tinham poros superficiais e aparência do cordão de solda irregular, como é mostrado nas Figs. 31 a 34.

As radiografias foram obtidas por incidência normal à superfície de laminação da chapa. Os parâmetros foram os seguintes:

Tensão : 90 Kv.

Corrente : 2 mA.

Tempo : 3,2 seg.

Filme Tipo : Classe 2 D-7 AGFA (Equivalente DuPont Not 70)

Distância Fonte - Filme : 740 mm.

As Figs. 35 a 38 mostram as radiografias do cordão de solda obtidas respectivamente com e sem reforço para as misturas (de gases) I e II.

As soldas foram rejeitadas no exame radiográfico, porque apresentaram altos níveis de poros alinhados. Não foi observado outro tipo de descontinuidades, além dos poros.

Nas Figs. 39 e 40, mostra-se a radiografias do cordão de solda obtidos com reforço para as misturas de gases III e IV, respectivamente.

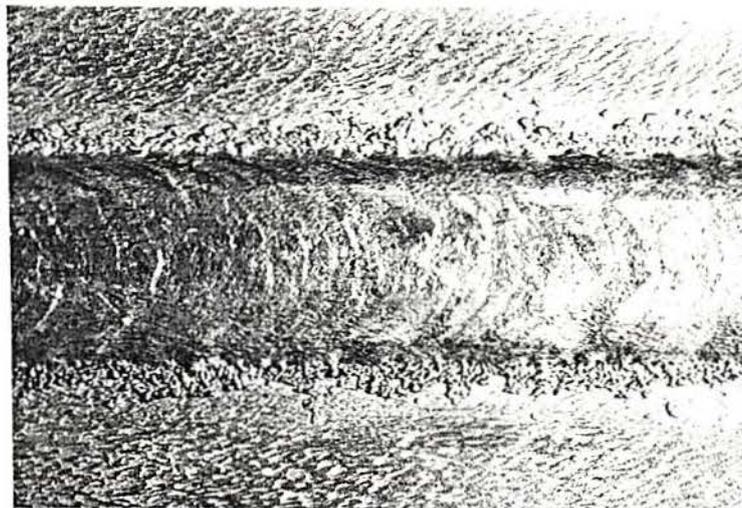


Fig. 31: Vista superior do cordão de solda obtido com a mistura (de gases) I. x2,5.



Fig. 32: Vista superior do cordão de solda obtido com a mistura (de gases) II. x2,5.

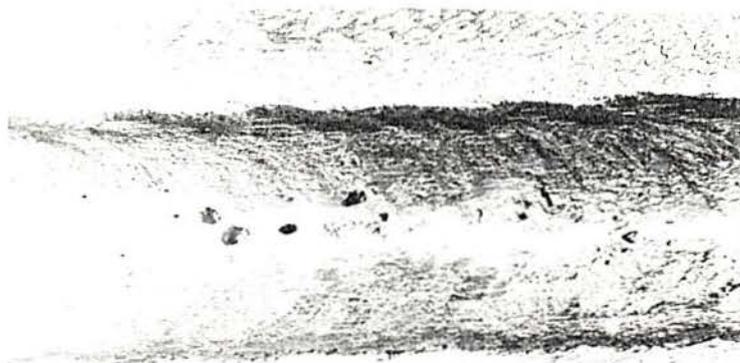


Fig. 33: Vista superior do cordão de solda obtido com a mistura (de gases) III. x2,5.

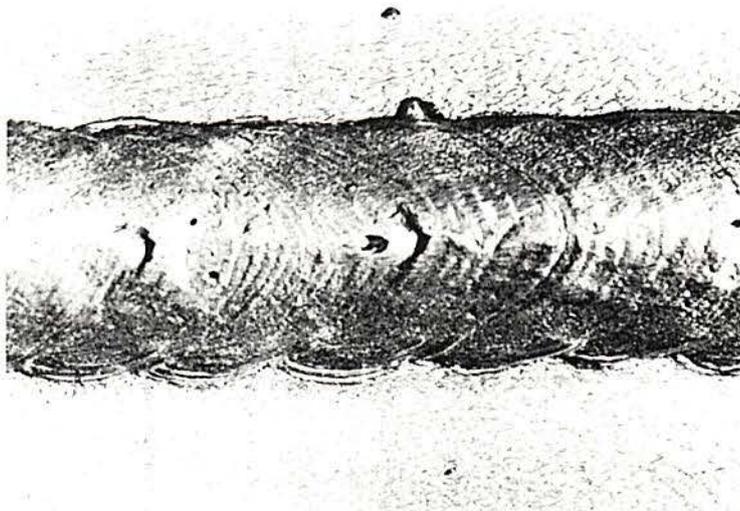


Fig. 34: Vista superior do cordão de solda obtido com a mistura (de gases) IV. x2,5.

**AL 5083 0**

**AL 5083 0**

Fig. 35: Radiografia da junta soldada 5083-0/5183. Cordão de solda com reforço, mistura (de gases) I.

**5083 0**

Fig. 36:Radiografia da junta soldada 5083-0/5183. Cordão de solda sem reforço, mistura (de gases) I.

**AL 5083 0**

**AT6**

Fig. 37:Radiografia da junta soldada 5083-0/5183. Cordão de solda com reforço, mistura (de gases) II.

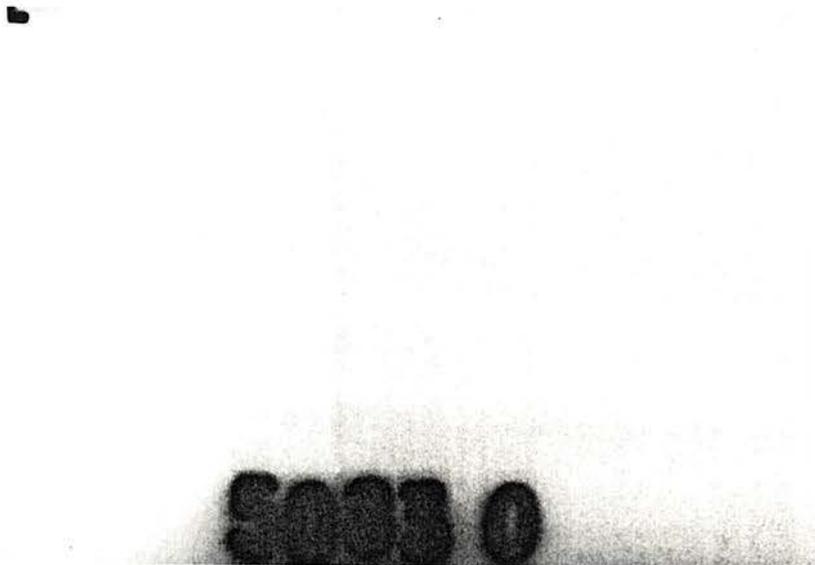


Fig. 38:Radiografia da junta soldada 5083-O/5183. Cordão de solda sem reforço, mistura (de gases) II.



Fig. 39:Radiografia da junta soldada 5083-O/5183. Cordão de solda com reforço, mistura (de gases) III.

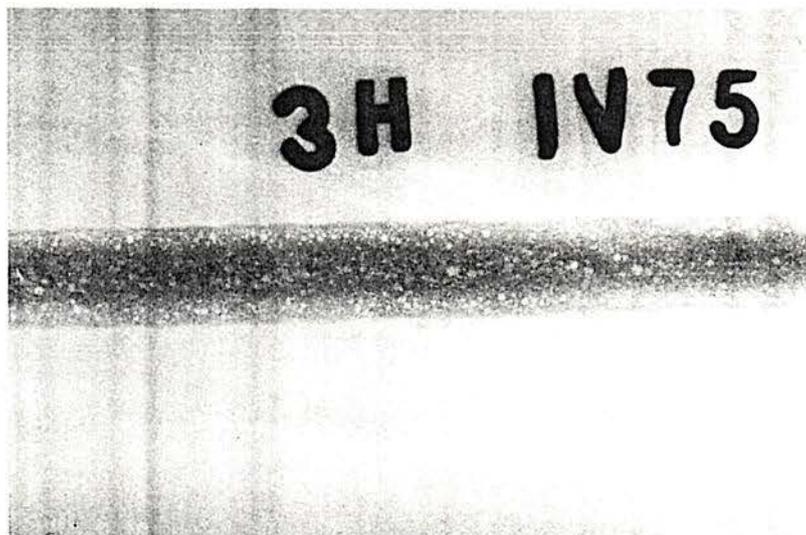


Fig. 40:Radiografia da junta soldada 5083-O/5183. Cordão de solda com reforço, mistura (de gases) IV.

## 7.2. - Medida da diluição

Foi medido a diluição nos corpos de prova utilizados para metalografia quantitativa. Os resultados obtidos, são mostrados na Tab. 10, e indicam que os valores de diluição encontram-se dentro o intervalo estabelecido na literatura, o qual situa-se entre 20 - 50 %.

O cálculo foi realizado projetando cada um dos perfis com x20 de aumento (total de três perfis) sobre uma área quadriculada com divisões em intervalos de 1 mm.

Tab. 10: Valores de diluição medidos.

CORPO DE PROVA	ÁREA METAL DE SOLDA, (A+B), mm <sup>2</sup>	ÁREA DO METAL DE ADIÇÃO, B, mm <sup>2</sup>	DILUIÇÃO D, %
1 (I)	77,845	57,883	25,64
2 (II)	75,594	52,823	30,12
3 (IV)	83,515	63,482	24

### 7.3. - Resultados do Ensaio de Dureza

Foram feitas medições de microdureza Vickers no metal base e no metal de solda, com uma carga de 500 gr e um tempo total de aplicação da carga de 15 seg /41/.

Os resultados do ensaio de dureza são mostrados na Tab. 11.

Tab. 11: Resultados de microdureza do metal base e solda.

METAL BASE		METAL DE SOLDA	
Diagonal da impressão, μm	HV <sub>500</sub>	Diagonal da impressão, μm	HV <sub>500</sub>
109	78,04	115	70,71
109	78,04	115,3	69,75
109,5	77,33	115,5	69,50
110,5	75,94	116,2	68,67
110,6	75,80	116,3	68,55

Também foi feito ensaio de microdureza na face do cordão de solda, com o objetivo de definir a resistência relativa ao longo do mesmo. A carga utilizada para realizar o ensaio foi de 200 gr (tempo: 15 seg). Os resultados são mostrados na Fig. 41.

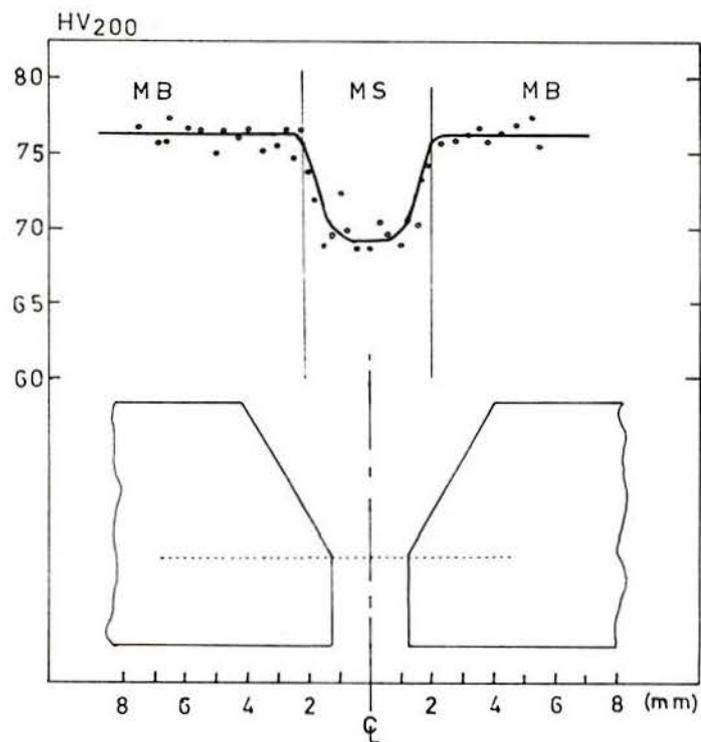


Fig. 41: Microdureza HV<sub>200</sub> na face da seção transversal da junta soldada.

Do ensaio de dureza, pode obter-se que o metal de solda apresenta menor valor de dureza que o metal base. Esses valores obtidos indicam de forma qualitativa que o metal de solda tem menor resistência que o metal base.

#### 7.4. - Percentual do Volume de Poros

Na Tab. 12 são mostrados os resultados do percentual do volume total de poros obtidos pelo método de contagem de pontos (Pp), as quais são comparados aos determinados por medições dos diâmetros dos poros (PT). Também foram determinados o volume percentual de microporos (Pn) e o volume percentual de macroporos (PN), sendo que a soma, dos mesmos determina o volume total de poros ( $PT = Pn + PN$ ), no método de medição de diâmetro dos poros.

Tab. 12: Percentual do volume dos poros obtidos das soldas com as misturas de gases.

MISTURAS (DE GASES)	PERCENTUAL DO VOLUME DE POROS, (%). METAL DE SOLDA SEM REFORÇO			
	Pn (a),(c)	PN (b),(c)	PT (c)	Pp (d)
I	0,613	0,029	0,64	0,72
II	3,21	0,31	3,52	3,72
III	5,07	1,85	5,34	5,41
IV	3,18	2,66	5,84	6,85

- (a) Volume percentual de microporos.
- (b) Volume percentual de macroporos.
- (c) Média dos valores obtidos na medição dos diâmetros dos poros na seção transversal ao cordão de solda.
- (d) Média dos valores do volume percentual total de poros determinados por contagem de pontos.

Obteve-se pequena diferenças na determinação do volume total de poros entre os (dois) métodos utilizados.

### 7.5. - Porosidade em Função da Mistura dos Gases

A percentagem do volume total de poros cresceu com o aumento do conteúdo de hidrogênio no argônio.

A média percentual do volume total de poros no reforço do metal de solda e no metal de solda sem reforço, para cada mistura de gases, é mostrada na Fig. 42.

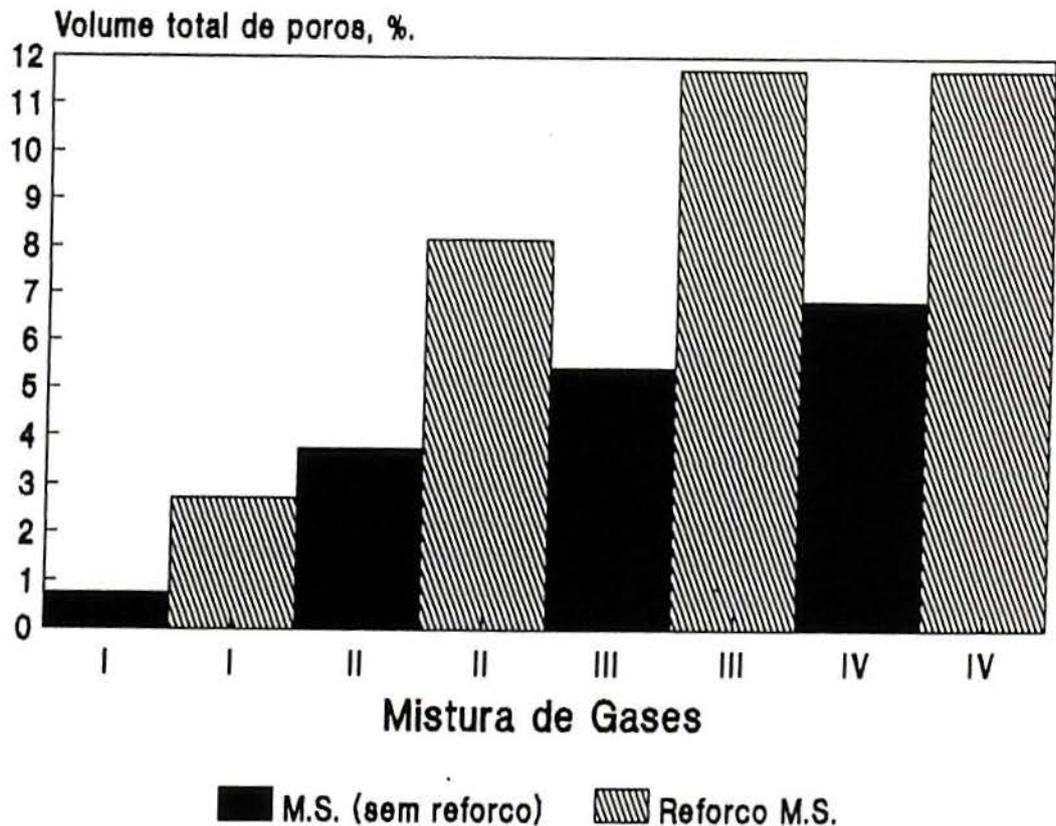


Fig. 42: Média do volume total de poros no reforço do metal de solda e no metal de solda sem reforço (na junta soldada).

O valor percentual do volume total de poros obtido no reforço do metal de solda, para alguma mistura de gases, foi três vezes maior que no metal de solda sem reforço. Isto pode ser consequência

direta da posição (plana) de soldagem adotada, neste caso, a bolha de gás tende a flutuar tentando chegar até a superfície do cordão de solda. Também pode acontecer que haja coalescência de poros, naqueles situados próximo à superfície.

Grande parte dos poros de maior diâmetro situaram-se no reforço; os números de micro (n) e macroporos (N) são apresentados na Tab. 13, e as macrografias da seção transversal do cordão de solda para as misturas (de gases) utilizadas, nas Figs. 43 a 46.

Tab. 13: Número de micro e macroporos no metal de solda para as misturas de gases utilizadas.

MISTURA (DE GASES)	REFORÇO (METAL DE SOLDA)		METAL DE SOLDA (SEM REFORÇO)	
	n	N	n	N
I	55	3	72	1
II	122	15	279	2
III	178	19	332	13
IV	206	20	326	15

É importante frisar que quando a percentagem de poros é baixa, há um grande predomínio dos microporos de diâmetro  $\leq 0,200$  mm. Quando o conteúdo de hidrogênio foi aumentado na mistura, o nível percentual de macroporos (diâmetro  $> 0,200$  mm) também cresceu. Na Tab. 14, dá-se o percentual médio de micro (Pn) e macroporos (PN) (metal de solda sem reforço) e a relação entre eles para as misturas de gases empregadas.

Tab. 14: Percentual dos micro e macroporos no metal de solda sem reforço para as misturas de gases utilizadas.

MISTURA (DE GASES)	METAL DE SOLDA (SEM REFORÇO)		
	Pn, %	PN, %	Pn/PN
I	0,613	0,029	20,7
II	3,21	0,305	10,53
III	3,507	1,851	1,89
IV	3,18	2,661	1,20

Devido a distribuição não uniforme dos poros na seção transversal do cordão de solda, as radiografias apresentaram diferenças nos exames, dependendo se foram tiradas com ou sem reforço no metal de solda. Com isto têm-se que os níveis de porosidade nas radiografias obtidas do metal de solda com reforço, foram maiores que os do metal de solda sem reforço.

Portanto, a imagem radiográfica obtida por incidência normal (na direção da chapa), não pode proporcionar informações corretas com respeito à localização do defeito.

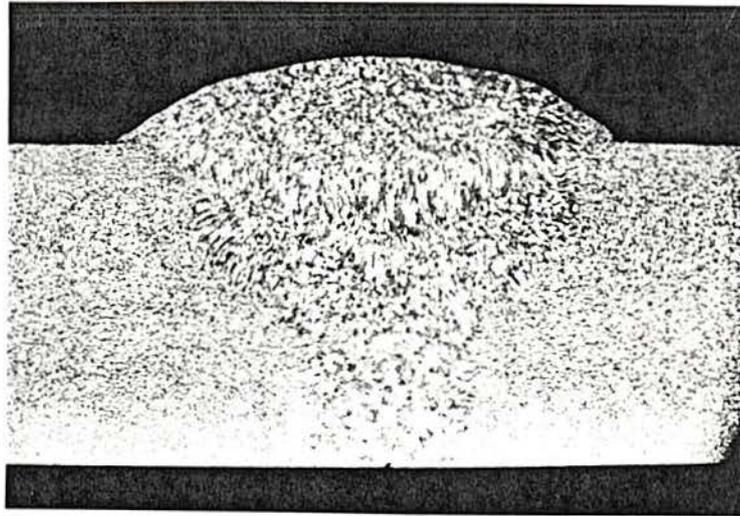


Fig. 43:Macro-estrutura do cordão de solda (5083-O/5183).  
Mistura (de gases) I. x5.

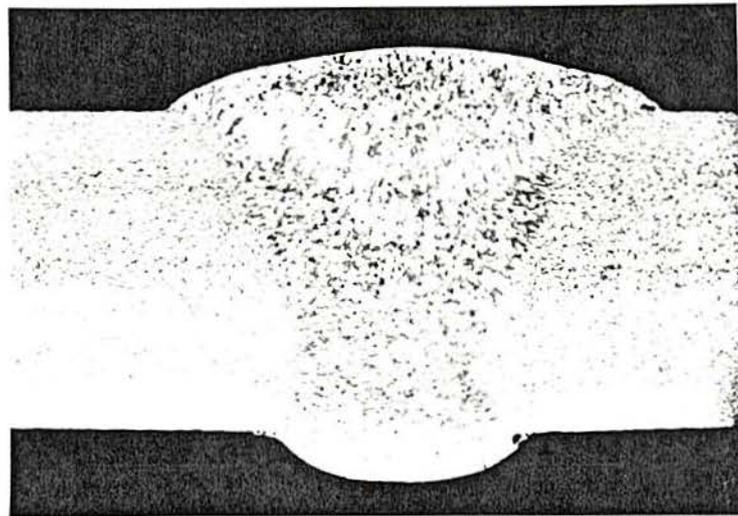


Fig. 44:Macro-estrutura do cordão de solda (5083-O/5183).  
Mistura (de gases) II. x5.

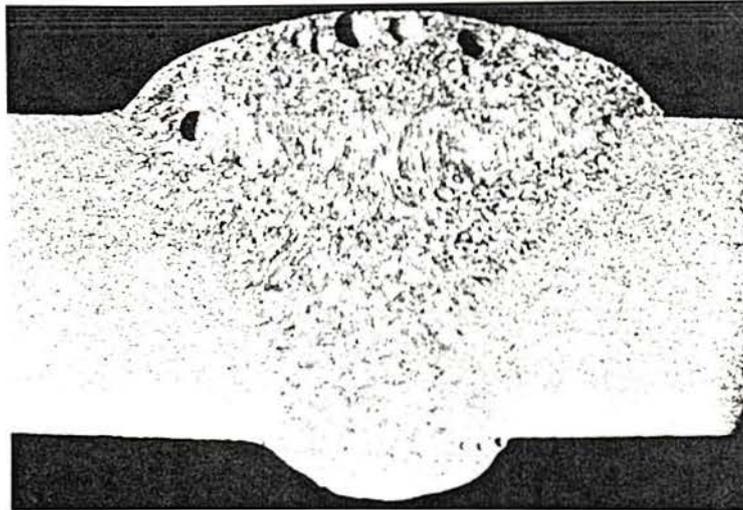


Fig. 45:Macro-estrutura do cordão de solda (5083-O/5183).  
Mistura (de gases) III.

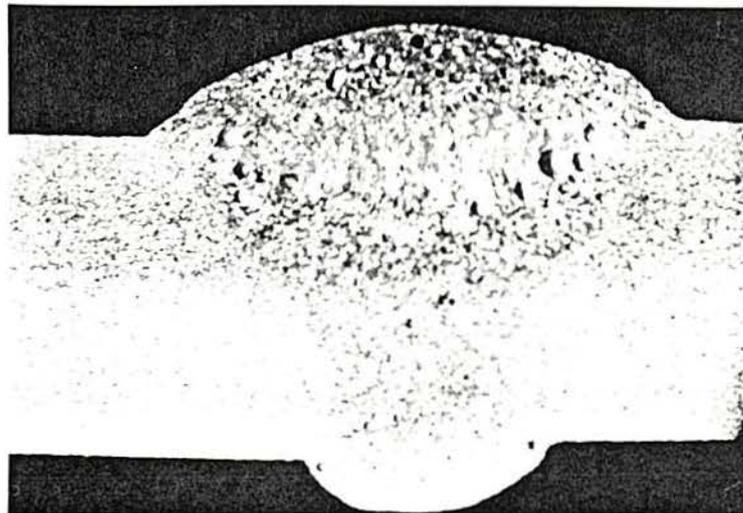


Fig. 46:Macro-estrutura do cordão de solda (5083-O/5183).  
Mistura (de gases) IV. x5.

## 7.6. - Ensaio de Tração

As curvas da Tensão-Deformação do metal base e da junta soldada (corpo de prova I 45), estão representadas nas Figs. 47 e 48, respectivamente. Estas curvas foram obtidas do registrador da máquina hidráulica universal, para ensaio de tração (Construção em dois espaços).

Nas Figs. 49 a 56, são mostrados os valores médios das curvas Tensão-Deformação. Esses valores médios foram determinados a partir de três curvas, por ensaios de tração em corpos de prova provenientes de uma mesma chapa soldada.

As curvas Tensão-Deformação dos corpos de prova de tração, que contém 3,72; 5,41 e 6,85 % de poros, apresentaram menor ductilidade que os obtidos com 0,72 % de poros. Os diagramas de Tensão-Deformação dos corpos de prova ensaiados mostraram um comportamento sem estrição - neste caso, o valor da Resistência à Tração coincide com o valor da Resistência à Fratura; os valores tornaram-se mais salientes com o aumento da porosidade.

## 7.7. - Análise Estatística dos Resultados Obtidos do Ensaio de Tração Simples.

A análise está baseada nas considerações estatísticas do apêndice 2. Em todos os casos foram aplicadas equações que correspondem a amostras pequenas.

Para cada mistura, têm-se quatro ângulos do cordão de solda

(0, 15, 30 e 45 graus), sendo que para cada ângulo foram retirados três corpos de prova.

Na Tab. 15 são apresentados:

- Os valores médios da resistência à tração,  $S_u$  (MPa);
- O intervalo da resistência à tração,  $\Delta S_u$  (MPa);
- O desvio padrão da resistência à tração,  $\sigma = \Delta S_u / d_2$ ;
- O coeficiente de variação da resistência à tração,  $CV = (\Delta/S_u).100$

Na Tab. 16 são apresentados:

- Os valores médios do alongamento,  $\epsilon$  (%);
- O intervalo do alongamento,  $\Delta\epsilon$  (%);
- O desvio padrão do alongamento,  $\sigma = \Delta\epsilon / d_2$ ;
- O coeficiente de variação do alongamento,  $CV = (\sigma / \epsilon).100$ .

Na Tab. 17 são apresentados:

- Os valores médios do limite de escoamento,  $S_y$  (MPa);
- O intervalo do limite de escoamento,  $\Delta S_y$  (MPa);
- O desvio padrão do limite de escoamento,  $\sigma = \Delta S_y / d_2$ ;
- O coeficiente de variação do limite de escoamento,  $CV = (\sigma/S_y).100$

Os valores da resistência à tração, do alongamento e do limite de escoamento foram obtidos nos ensaios de tração simples. Cada valor médio foi obtido de três corpos de prova, submetidos a esforços de tração.

Tab. 15: Dados estatísticos dos valores de Resistência à Tração.

CORPO DE PROVA	MÉDIA $S_{ij}$ MPa.	$\Delta S_U$ MPa	$\sigma = \Delta S_{ij}/d_2$	CV = $(\sigma/S_{ij}).100$
M B	303,3	0,99	0,585	0,2
M S	272,64	5,13	3,03	1,1
I 0	277,28	9,86	5,82	2,1
I 15	279,44	8,31	4,91	1,76
I 30	278,6	1,2	0,708	0,254
I 45	281,14	7,47	4,41	1,57
II 0	215,39	14,25	8,42	3,9
II 15	225,83	8,93	5,27	2,33
II 30	241,7	6,15	3,63	1,5
II 45	246,7	23,34	13,78	5,58
III 0	208,06	2,3	1,36	0,65
III 15	211,33	10,36	6,12	2,89
III 30	221,21	7,32	4,32	1,95
III 45	236,4	0,64	0,378	0,16
IV 0	201,66	4,15	2,45	1,22
IV 15	202	3,2	1,89	0,94
IV 30	217,65	11,31	6,68	3,07
IV 45	230,5	12,89	7,614	3,3

Tab. 16: Dados estatísticos dos valores de alongamento.

CORPO DE PROVA	MÉDIA $\epsilon$ %	$\Delta\epsilon$ %	$\sigma = \Delta\epsilon/d_2$	CV = $(\sigma/\epsilon).100$
M B	28,22	1,33	0,786	2,78
M S (a)	22,73	1,11	0,656	2,88
I 0	14,44	1,49	0,88	6,1
I 15	17,69	1,41	0,833	4,7
I 30	16,6	1,4	0,827	4,98
I 45	17,25	3,75	2,215	12,84
II 0	6,11	1,09	0,644	10,54
II 15	7,96	2,92	1,72	21,66
II 30	9,69	1,66	0,98	10,12
II 45	11,11	0,33	0,195	1,75
III 0	5,71	0,92	0,544	9,5
III 15	5,70	0,92	0,543	9,5
III 30	7,70	0,92	0,543	7,05
III 45	9,14	0,33	0,195	2,13
IV 0	5,28	1,25	0,738	13,4
IV 15	5,28	0,2	0,118	2,24
IV 30	6,81	1,59	0,939	13,8
IV 45	8,67	0,66	0,389	4,5

(a) Alongamento medido após a fratura: comprimento 12,7 mm.

Tab. 17: Dados estatísticos dos valores do limite de escoamento.

CORPO DE PROVA	MÉDIA $S_Y$ MPa	$\Delta S_Y$ MPa	$\sigma = \Delta S_Y/d_2$	CV = $(\sigma/S_Y)100$
M B	143,65	1,65	0,975	0,68
I 0	133,12	3,33	1,967	1,48
I 15	137,9	0,55	0,325	0,235
I 30	138,27	2,1	1,24	0,9
I 45	140,02	0,86	0,51	0,363
II 0	131,8	5,17	3,054	2,32
II 15	131,14	0,91	0,537	0,41
II 30	135,89	0,92	0,543	0,4
II 45	139,18	1,23	0,726	0,52
III 0	128,42	0,82	0,484	0,377
III 15	129,20	2,87	1,695	1,312
III 30	130,5	3,46	2,04	1,57
III 45	132,72	1,46	0,86	0,65
IV 0	127,75	8,6	5,08	3,976
IV 15	125,92	0,18	0,106	0,08
IV 30	129,01	0,81	0,478	0,37
IV 45	132,66	2,13	1,258	0,948

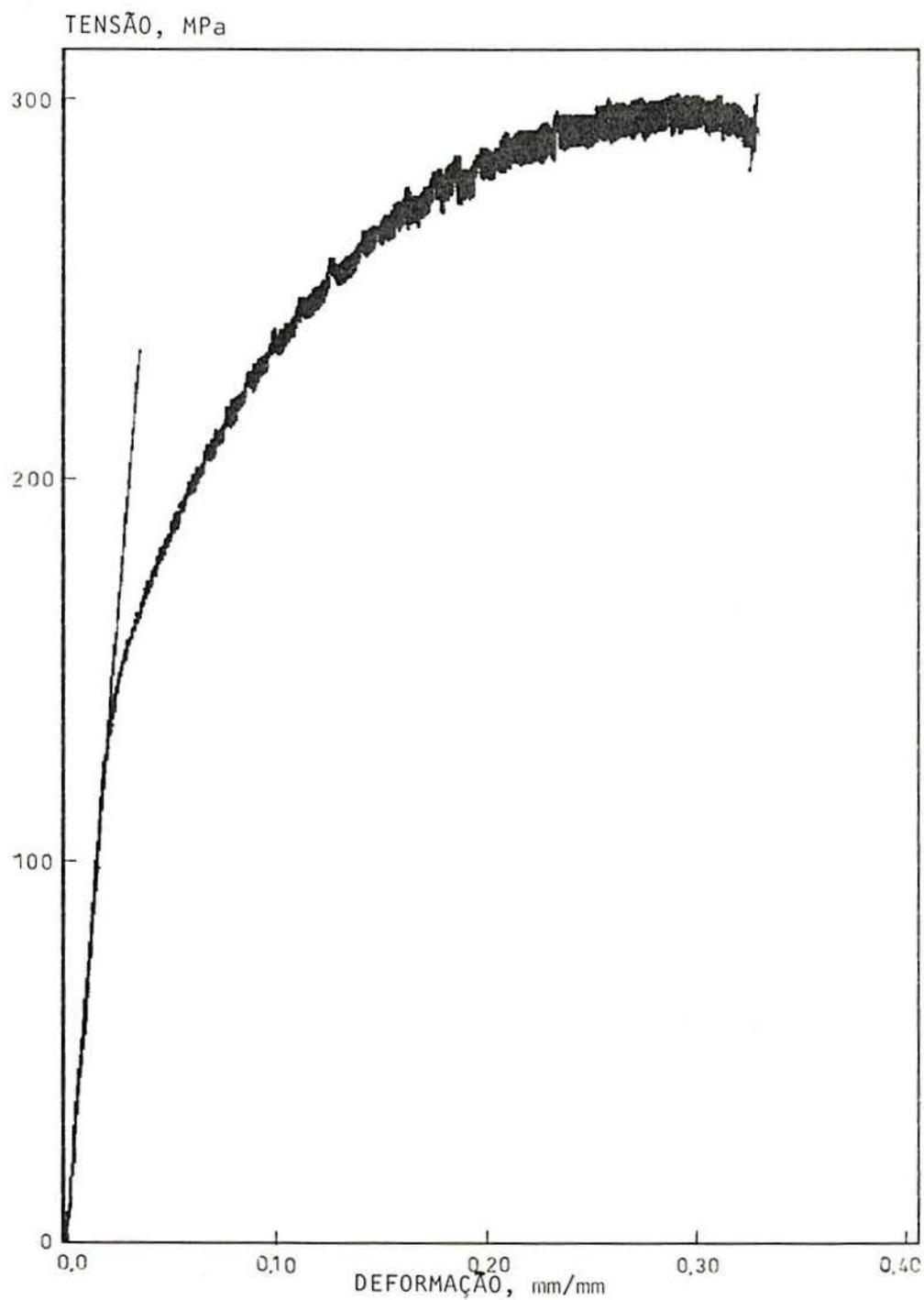


Fig. 47: Diagrama Tensão-Deformação do corpo de prova do metal base 5083-O.

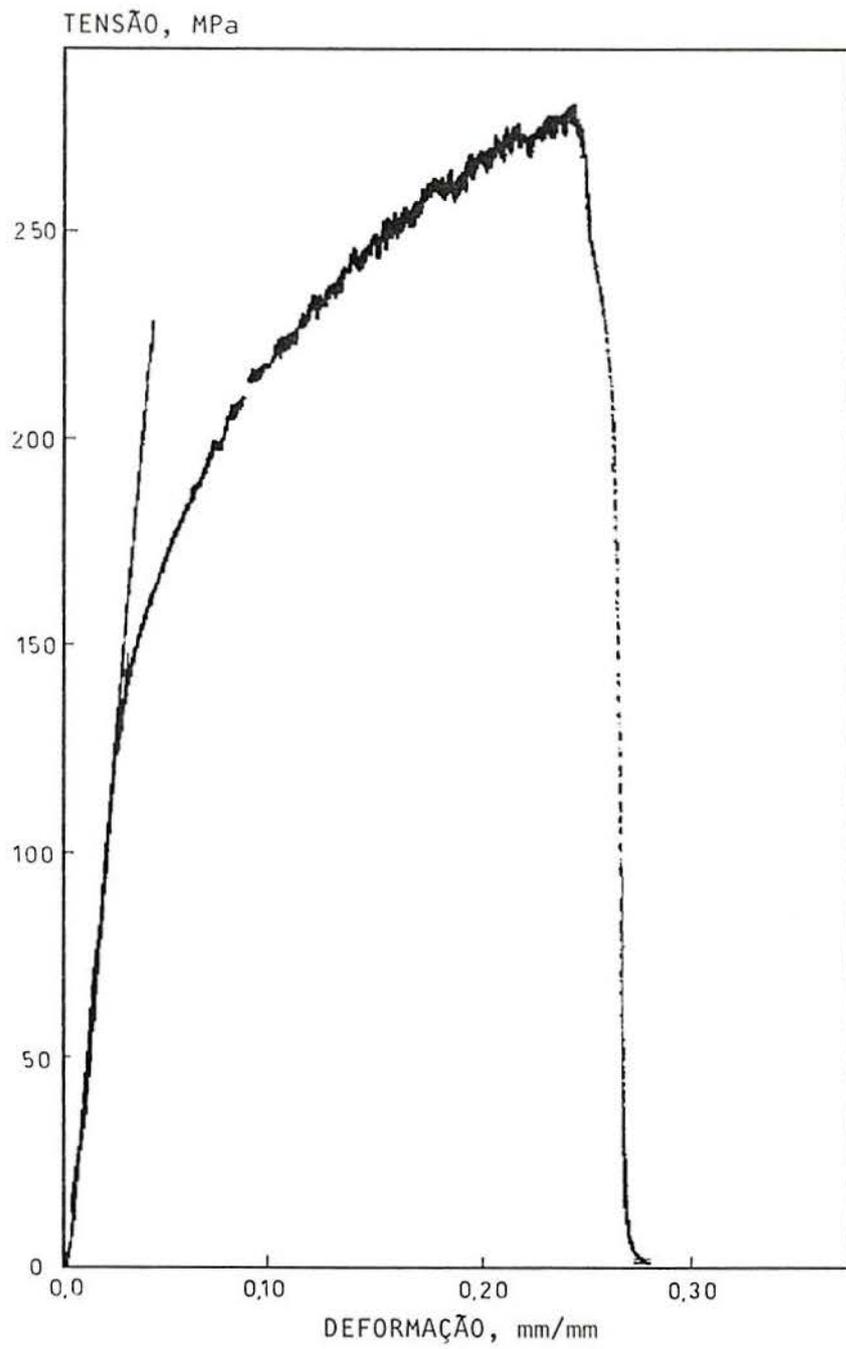


Fig. 48: Diagrama Tensão-Deformação do corpo de prova I 45 I.

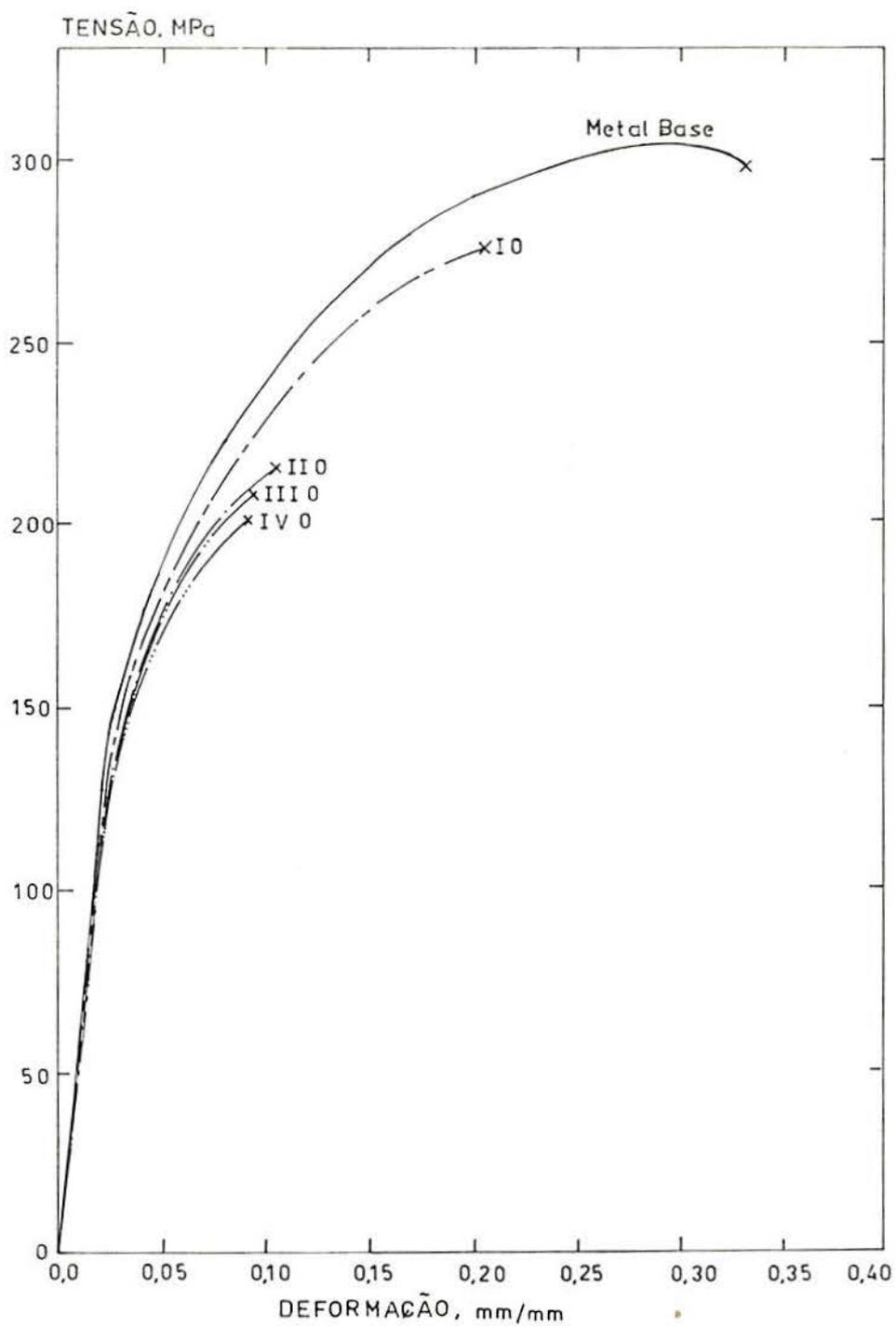


Fig. 49: Efeito das misturas de gases sobre as características das curvas médias da Tensão-Deformação (ângulo do cordão de solda  $0^{\circ}$ ).

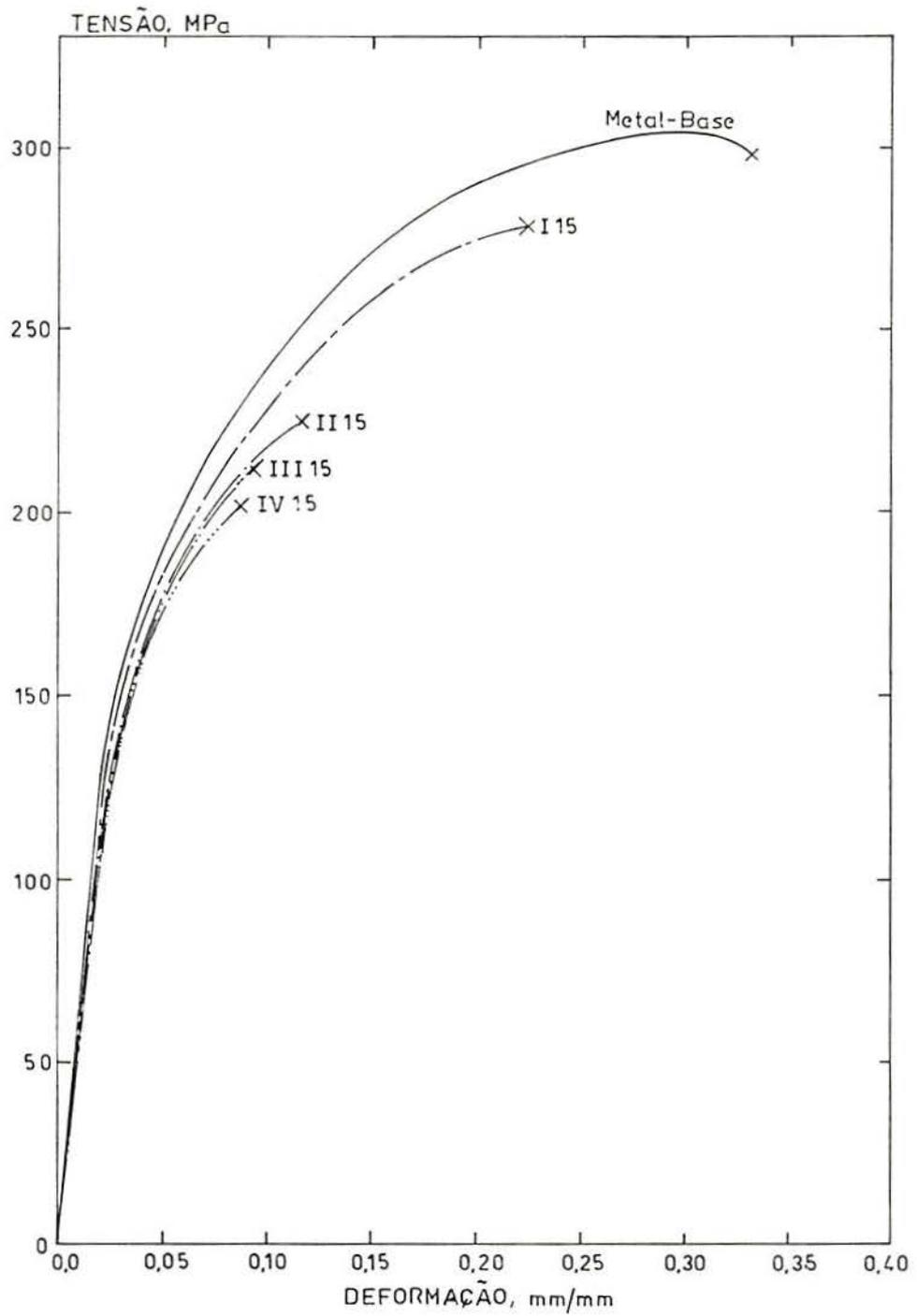


Fig. 50: Efeito das misturas de gases sobre as características das curvas médias da Tensão-Deformação (ângulo do cordão de solda  $15^{\circ}$ ).

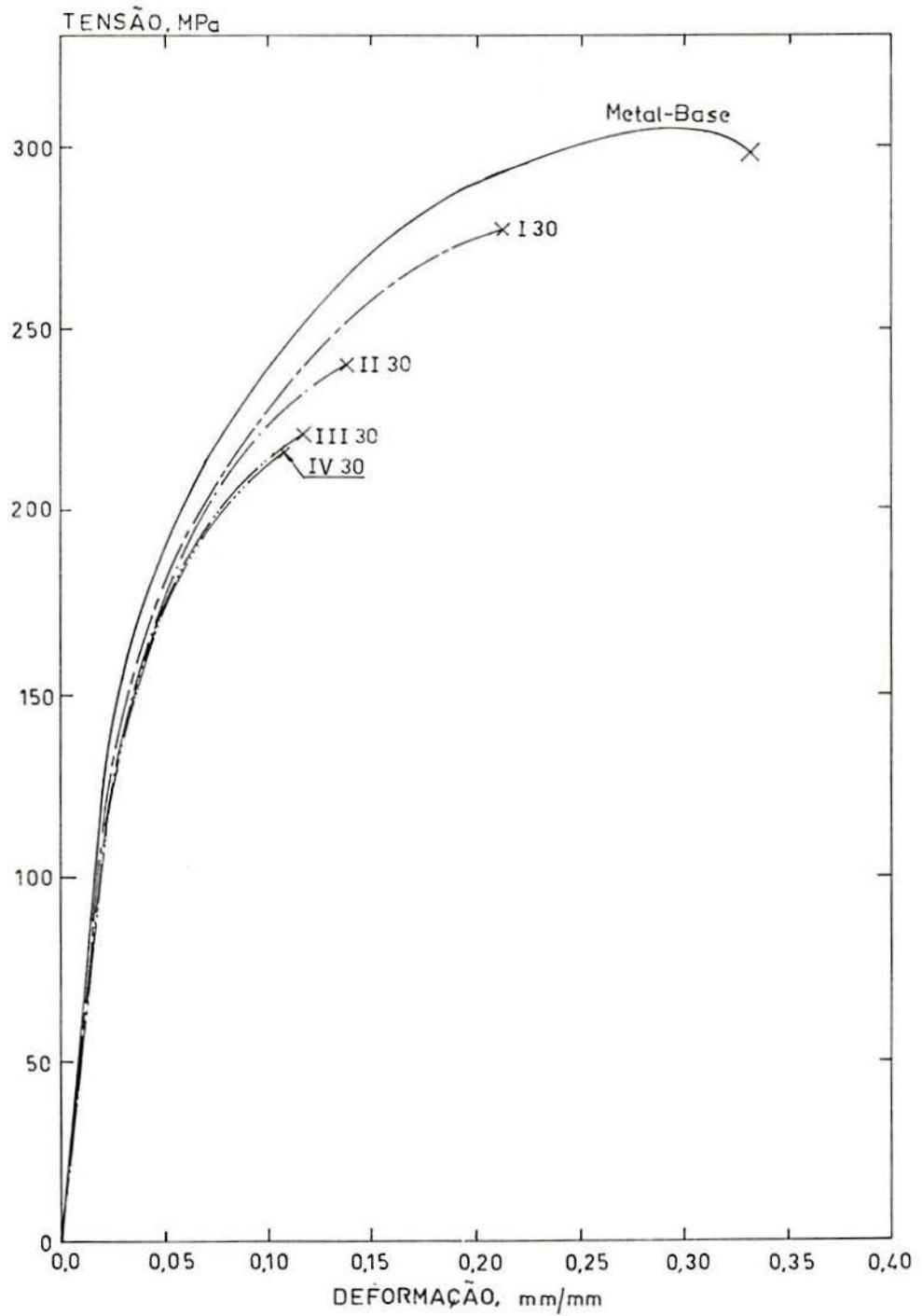


Fig. 51: Efeito das misturas de gases sobre as características das curvas médias da Tensão-Deformação (ângulo do cordão de solda  $30^{\circ}$ ).

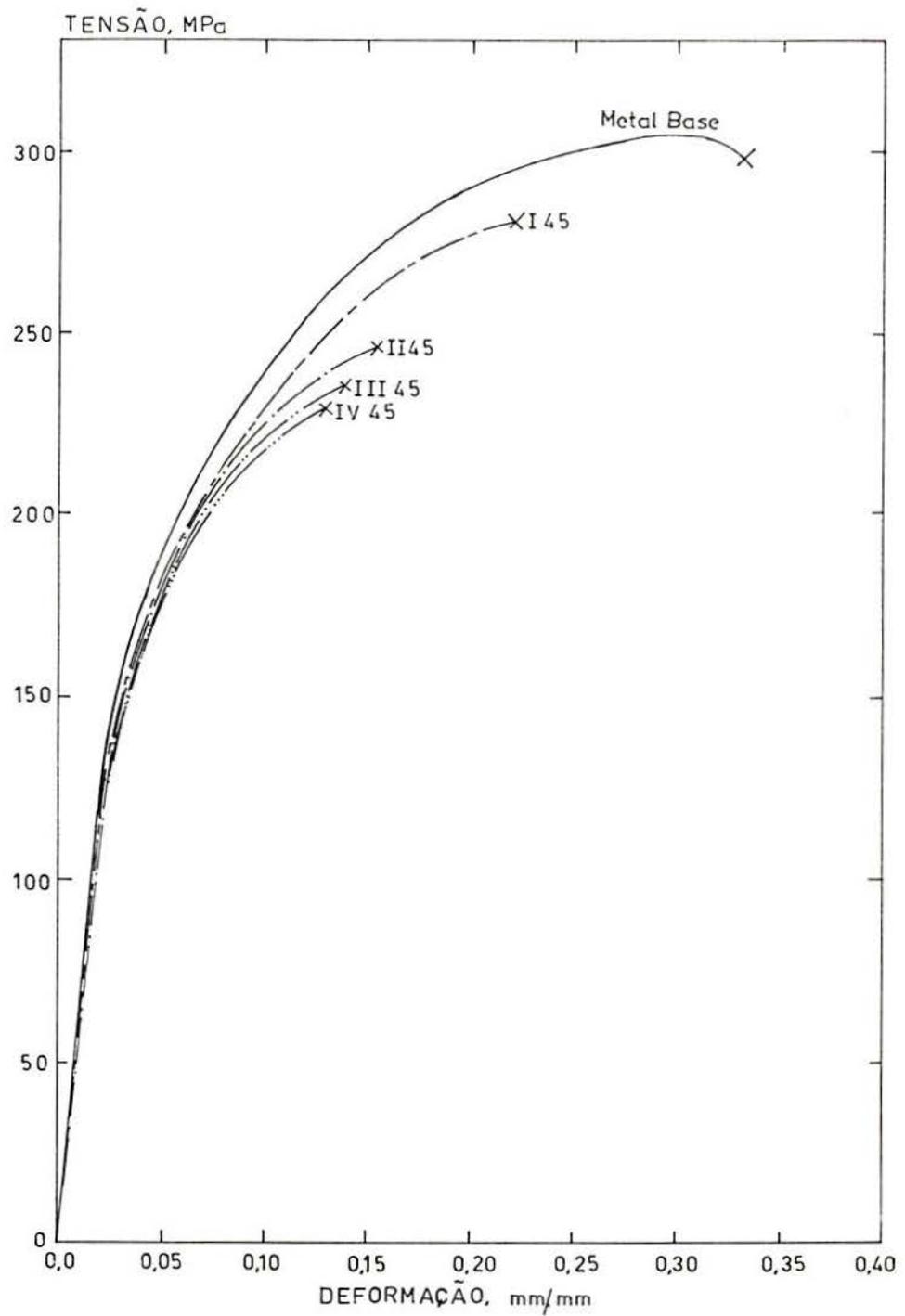


Fig. 52: Efeito das misturas de gases sobre as características das curvas médias da Tensão-Deformação (ângulo do cordão de solda  $45^{\circ}$ ).

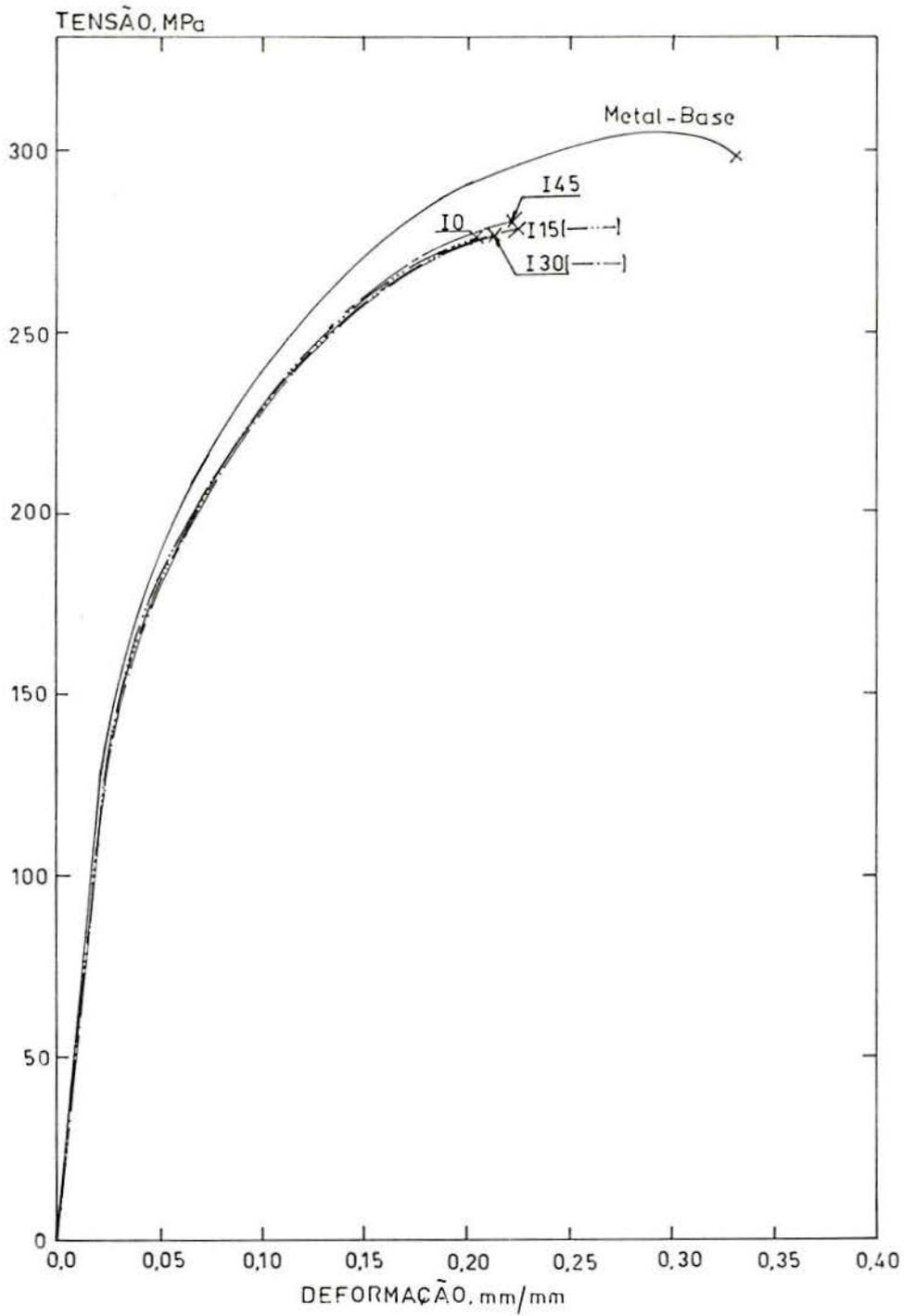


Fig. 53: Efeito dos ângulos do cordão de solda sobre as características das curvas médias da Tensão-Deformação. Misturas (de gases) I.

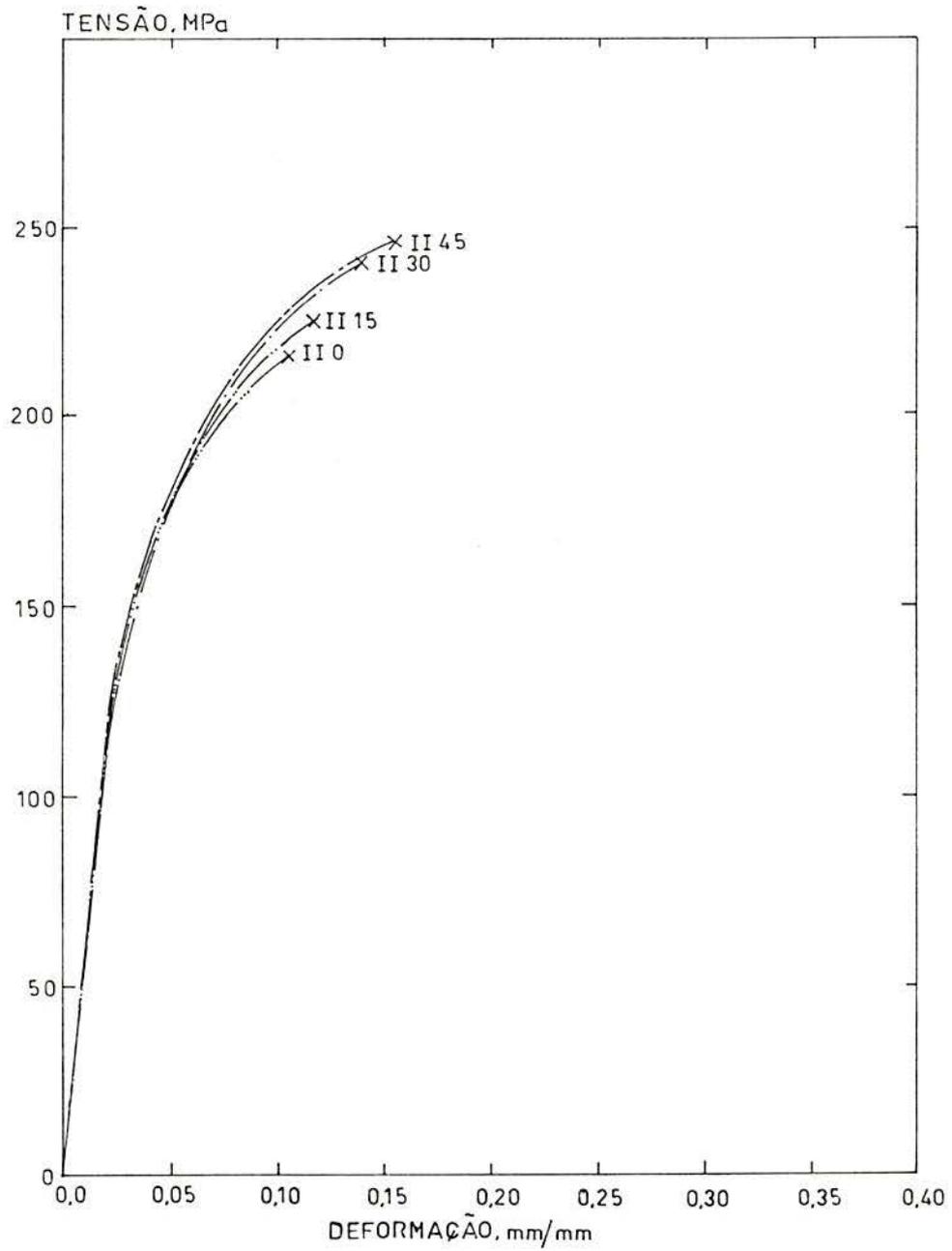


Fig. 54: Efeito dos ângulos do cordão de solda sobre as características das curvas médias da Tensão-Deformação. Mistura (de gases) II.

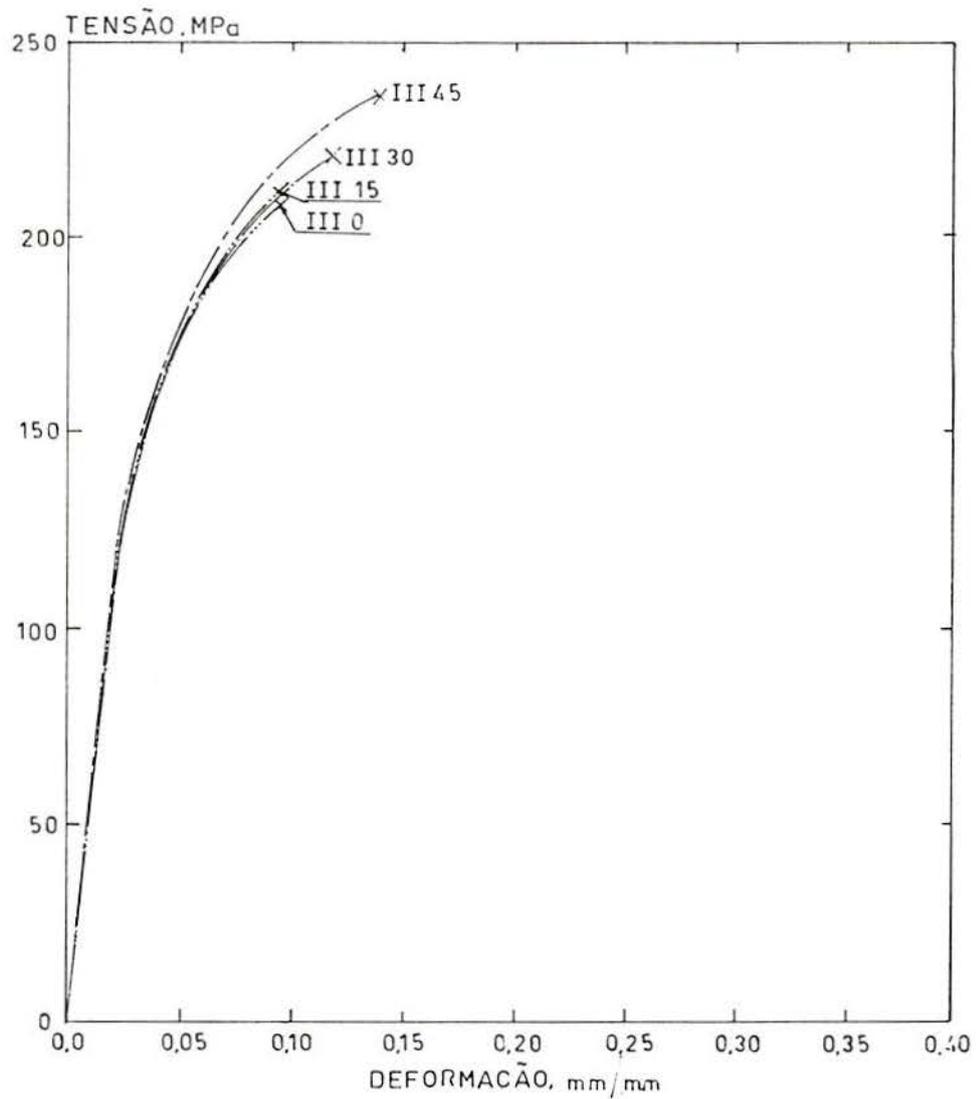


Fig. 55: Efeito dos ângulos do cordão de solda sobre as características das curvas médias da Tensão-Deformação. Mistura (de gases) III.

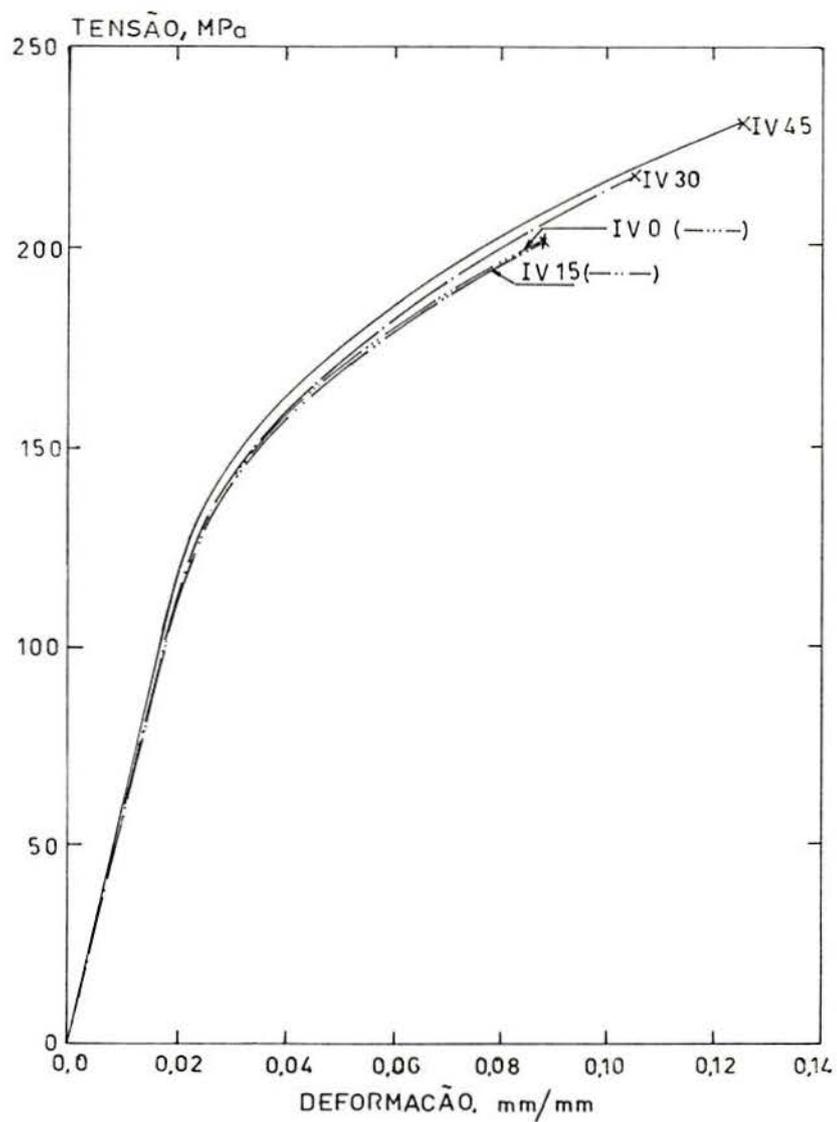


Fig. 56: Efeito dos ângulos do cordão de solda sobre as características das curvas médias da Tensão\_Deformação. Mistura (de gases) IV.

Para o mesmo ângulo do cordão de solda, a diminuição da resistência à tração com o aumento no nível de porosidade apresenta-se na Fig. 57.

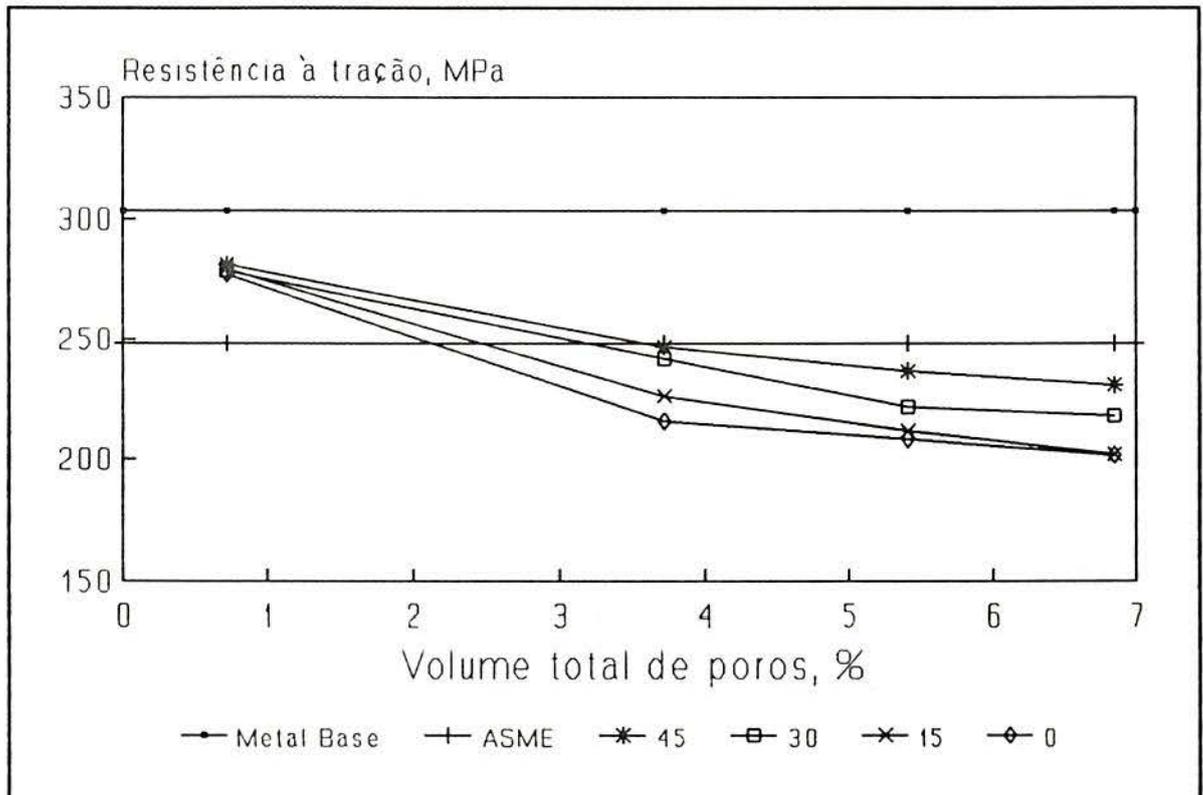


Fig. 57: Efeito da porosidade sobre a resistência à tração da junta soldada 5083-O/5183.

A variação na resistência à tração da junta soldada é afetada significativamente com o aumento no conteúdo de gás hidrogênio no argônio. Para uma mesma mistura de gases, a resistência à tração aumenta com o incremento do ângulo do cordão de solda (intervalo  $0^{\circ}$  -  $45^{\circ}$ ) (Fig. 58).

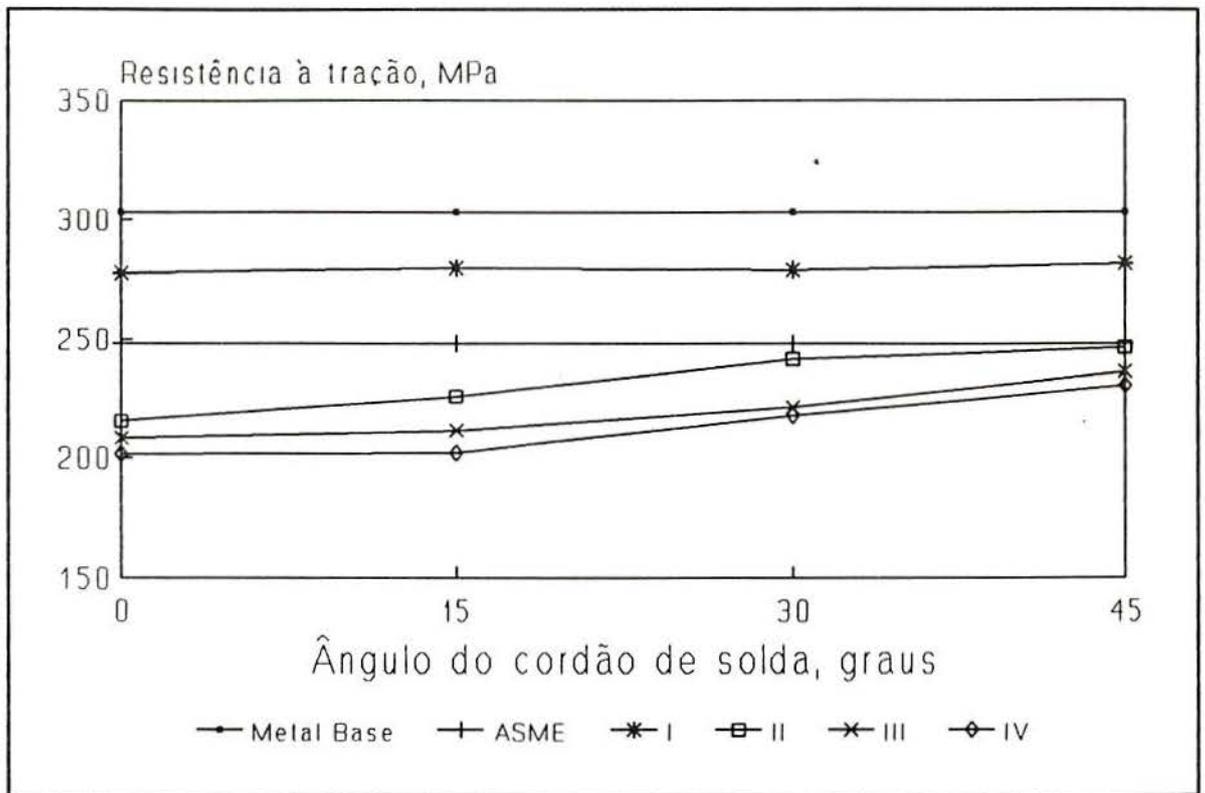


Fig. 58: Efeito do ângulo do cordão de solda sobre a resistência à tração da junta soldada 5083-O/5183.

A resistência à tração da junta soldada expresso como percentual da resistência à tração do metal base, para igual ângulo do cordão de solda pode ser vista na Fig. 59, e  $S_u$  representa o valor médio da junta soldada,  $S_u[MB]$  representa o valor médio do metal base e  $R$  é a relação entre  $S_u$  e  $S_u[MB]$  expresso em percento.

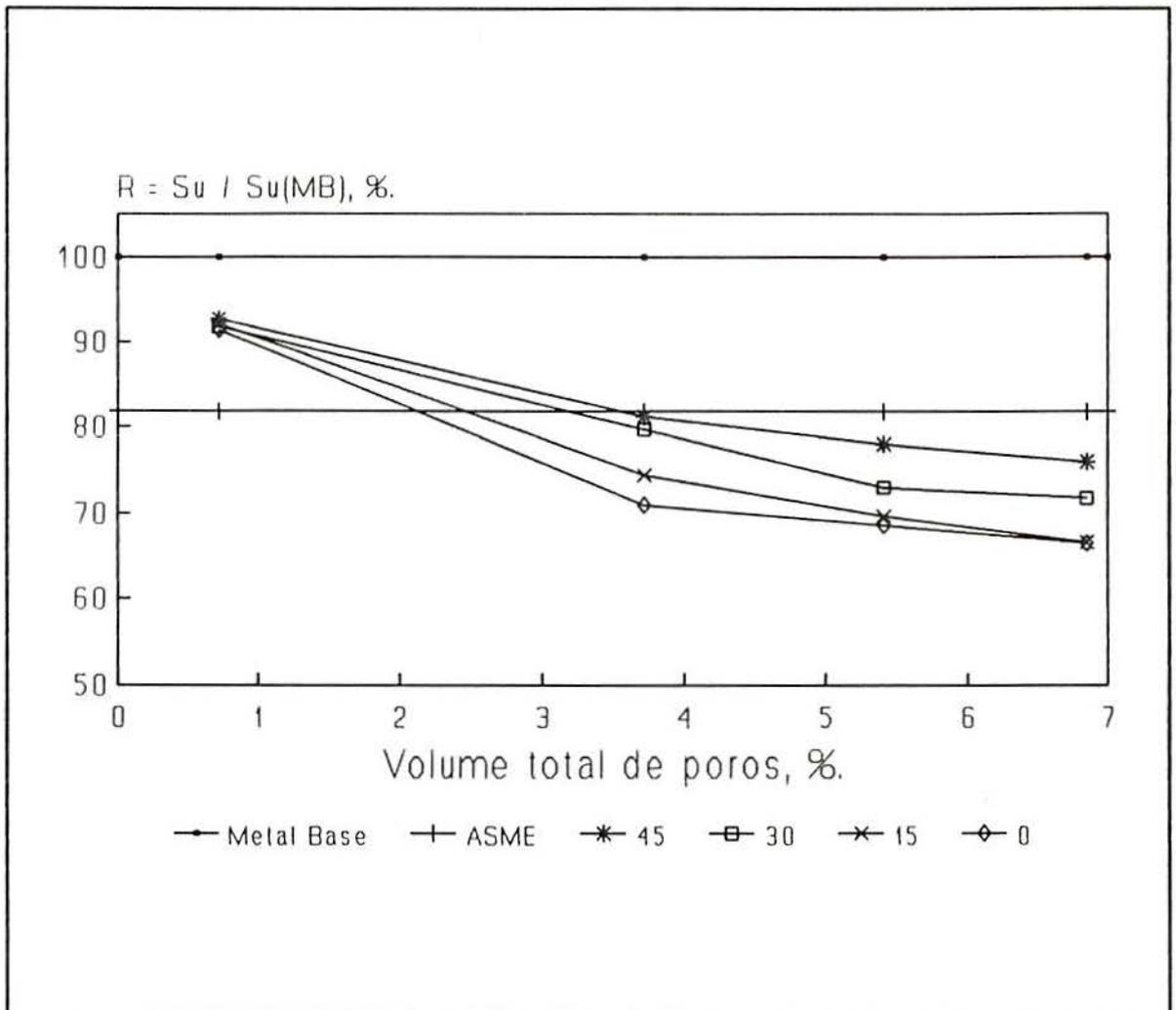


Fig. 59: Efeito da porosidade sobre a relação da resistência à tração da junta soldada (5083-O/5183) e do metal base.

O efeito da porosidade sobre o limite de escoamento da junta soldada, com mesmo ângulo do cordão de solda é apresentado na Fig. 60.

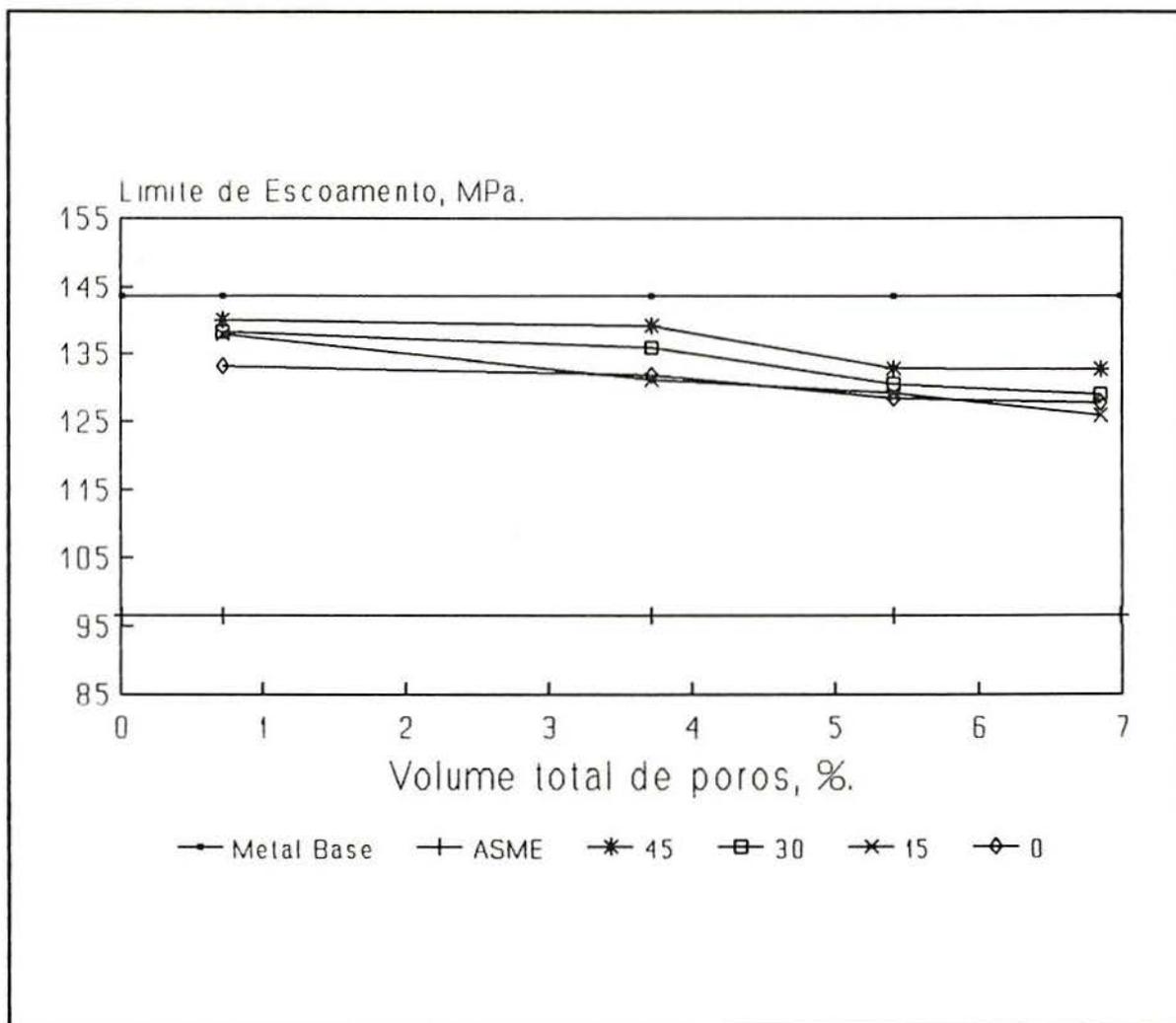


Fig. 60: Efeito da percentagem do volume total de poros sobre o limite de escoamento da junta soldada, 5083-O/5183.

Na Fig. 61 pode ser visto o limite de escoamento em função do ângulo do cordão de solda, para uma mesma mistura de gases.

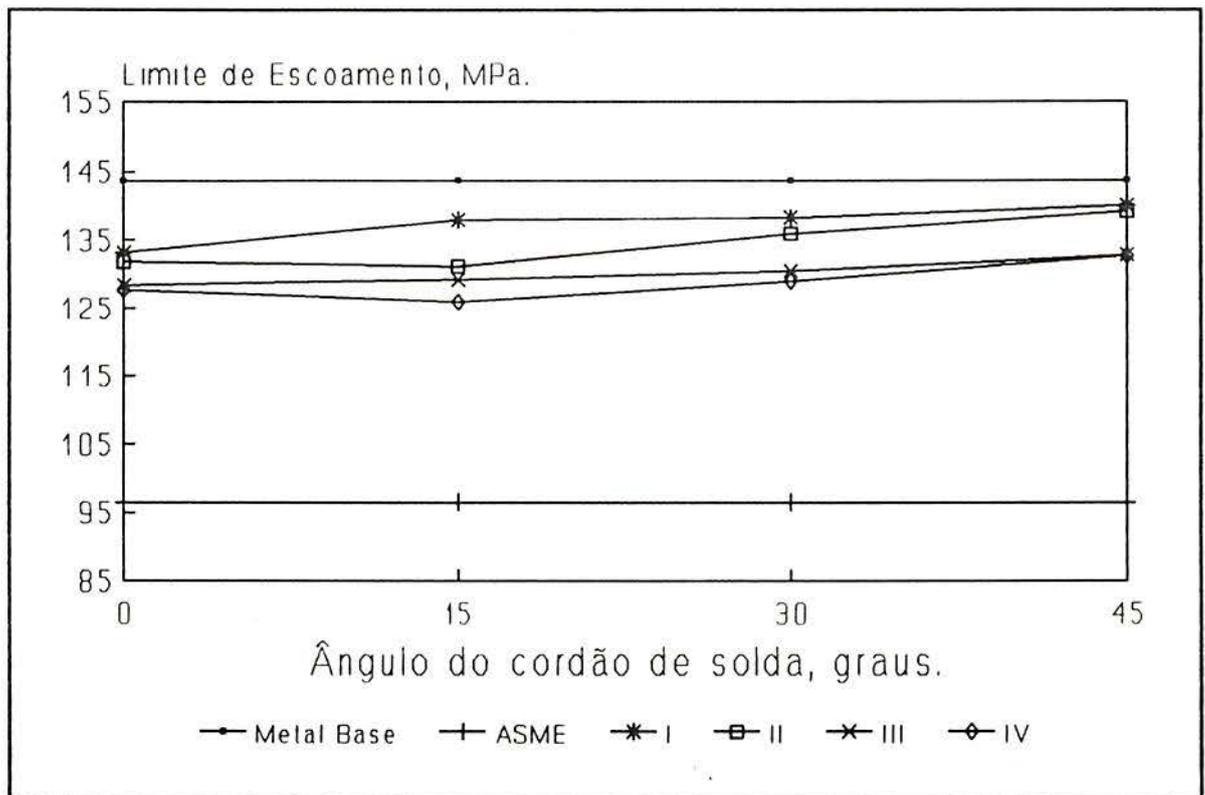


Fig. 61: Efeito do ângulo do cordão de solda sobre o limite de escoamento da junta soldada 5083-O/5183.

O limite de escoamento (determinado com 0,2 % de deformação específica) da junta soldada foi ligeiramente afetado pelo nível de porosidade e pelo ângulo do cordão de solda analisados neste trabalho.

A ductilidade diminuiu com o incremento nos níveis de poros, para mesmo ângulo do cordão de solda.

O efeito da percentagem do volume total de poros sobre a ductilidade da junta soldada foi determinado pela variação do comprimento de 60 mm (Fig. 62).

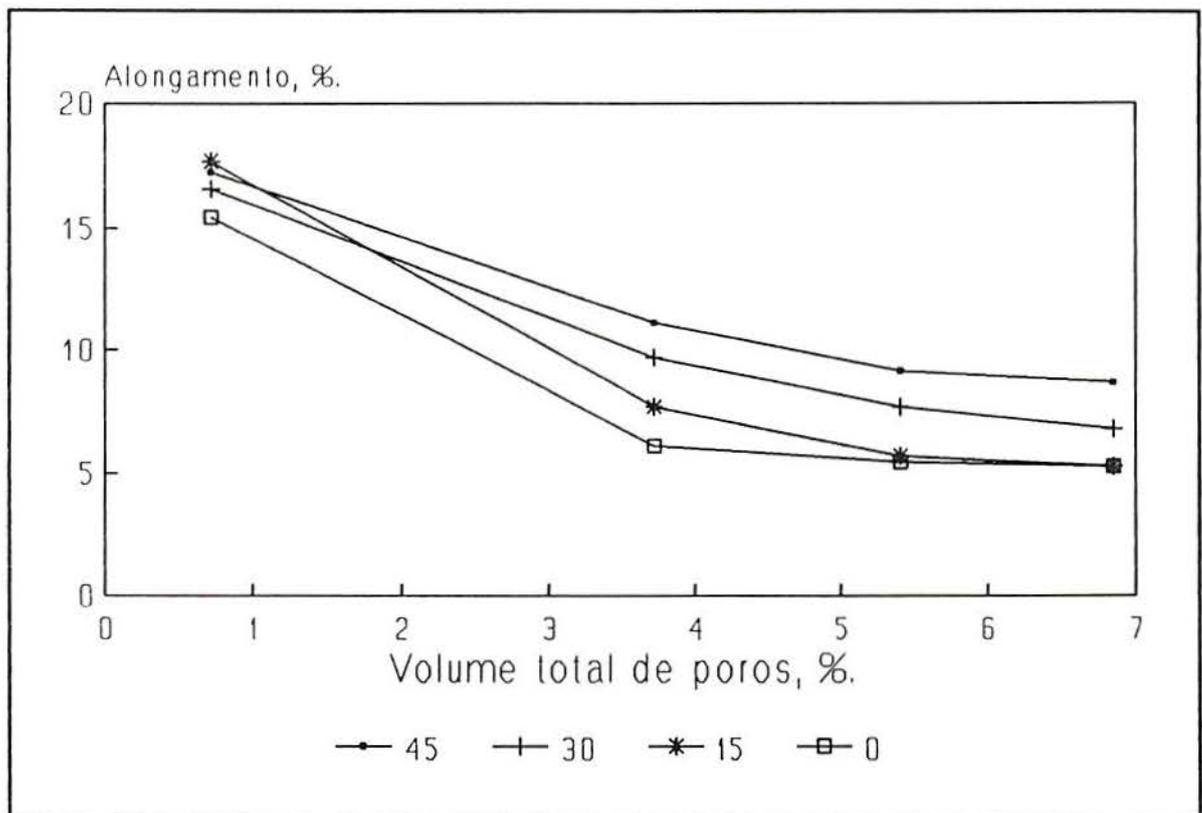


Fig. 62: Efeito da porcentagem do volume total de poros sobre o alongamento da junta soldada 5083-O/5183.

Dos resultados obtidos, foram quantificados os efeitos da porcentagem do volume total de poros e do ângulos do cordão de solda, mas não foi possível entender com precisão o mecanismo de fratura, devido a ambos os efeitos.

Os poros no cordão de solda e os ângulos do cordão de solda, não afetaram significativamente a propriedade elástica, mas afetaram as propriedades plásticas da junta soldada.

Nas Figs. 63 a 78, pode-se observar que nas juntas soldadas, as quais foram submetidas a ensaios de tração simples, todas as rupturas iniciaram-se no metal de solda. Isto deve-se ao fato de que a resistência à tração do metal de adição ER-5183 é inferior à do metal base 5083-0. Os cordões de solda obtidos com as misturas de gases III e IV, apresentaram poros alinhados visíveis ao longo da linha de fusão quando o metal de solda está sem reforço. Estes, reduzem a seção resistente à carga aplicada, oferecendo possibilidade de regiões mais fracas, as quais favorecem a passagem dos planos de fratura nas mesmas, como é mostrado nas figuras pertinentes.

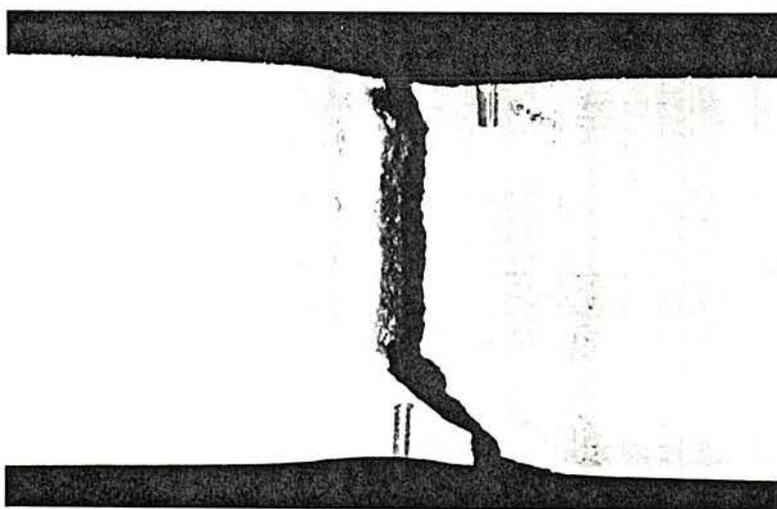


Fig. 63:Aspecto macrográfico da fratura do corpo de prova I 0.

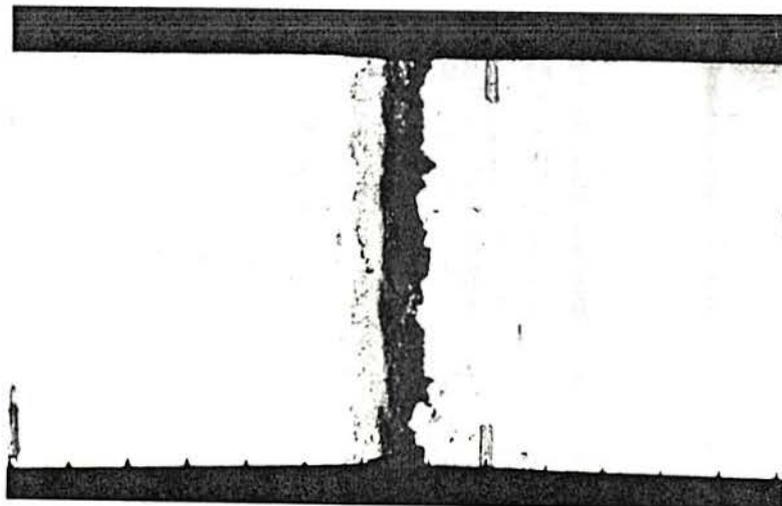


Fig. 64:Aspecto macrográfico da fratura do corpo de prova II 0.

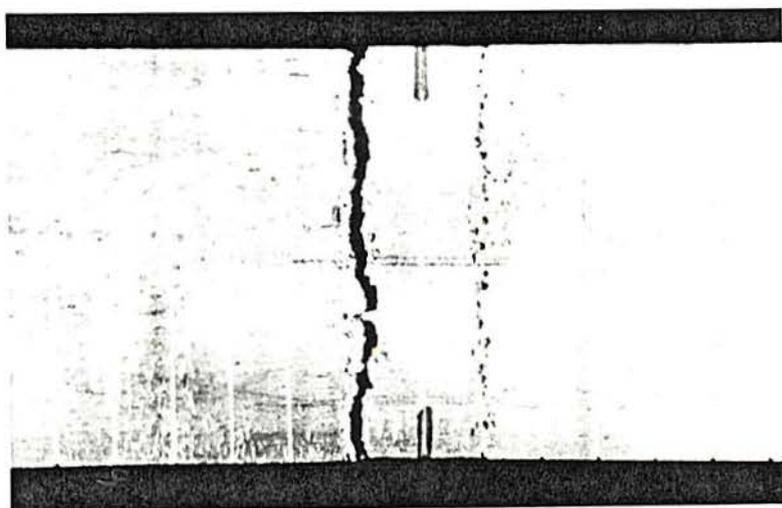


Fig. 65:Aspecto macrográfico da fratura do corpo de prova III 0.

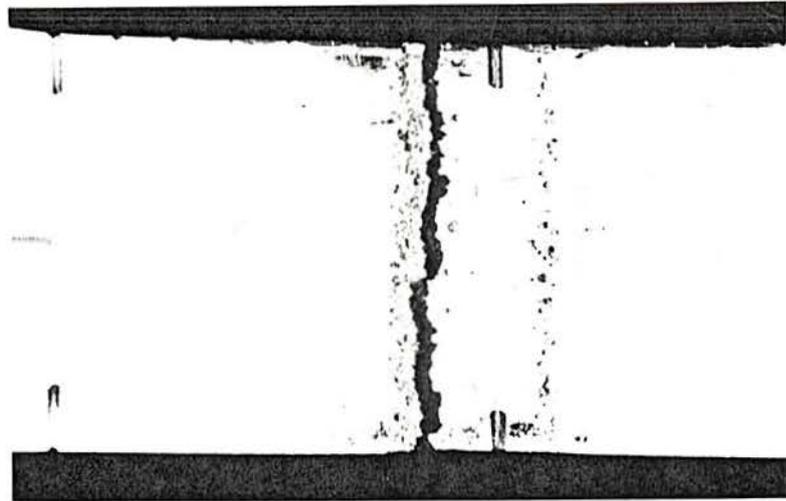


Fig. 66:Aspetto macrográfico da fratura do corpo de prova IV 0.

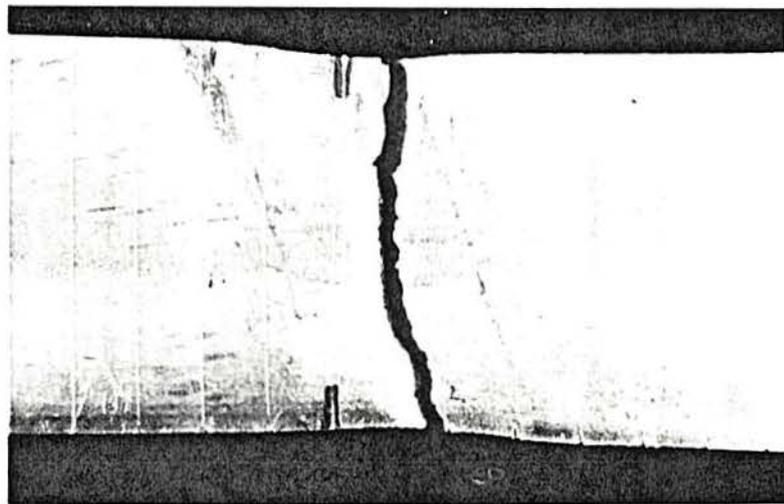


Fig. 67:Aspetto macrográfico da fratura do corpo de prova I 15.

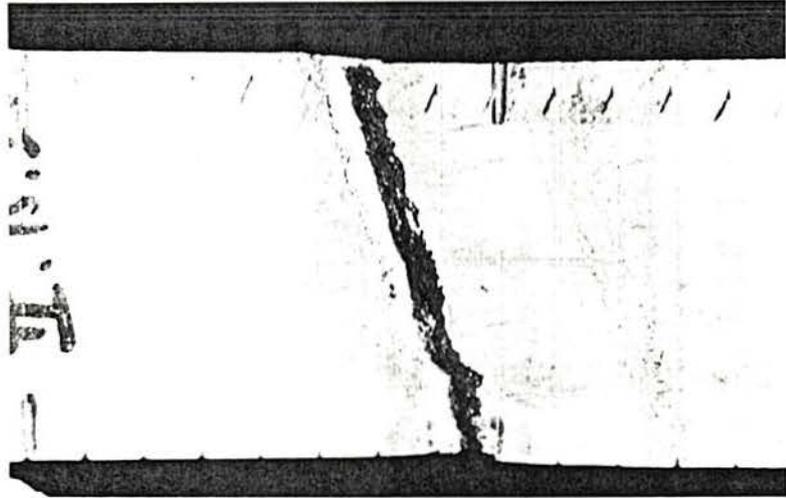


Fig. 68:Aspecto macrográfico da fratura do corpo de prova II 15.

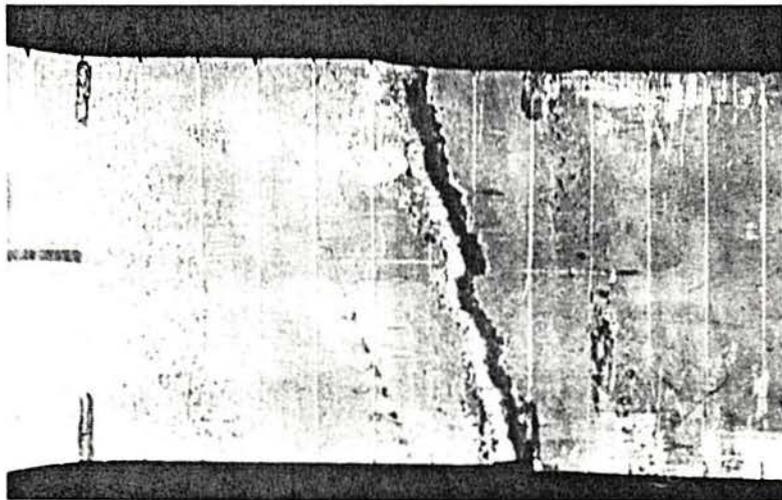


Fig. 69:Aspecto macrográfico da fratura do corpo de prova III 15.

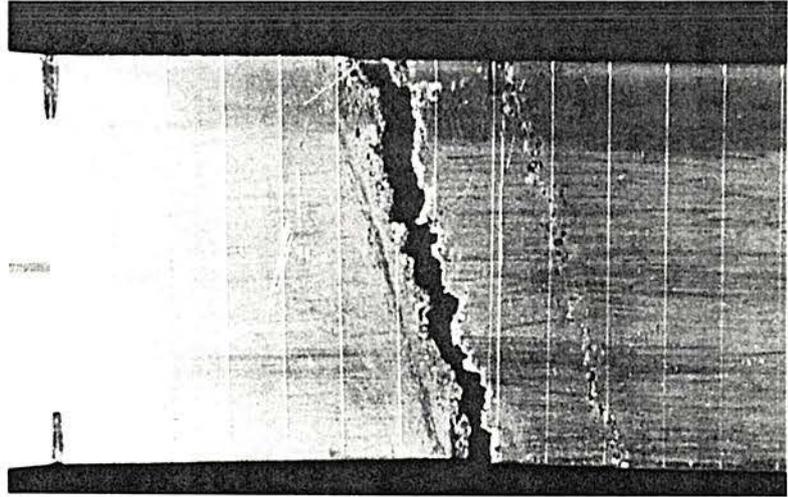


Fig. 70:Aspecto macrográfico da fratura do corpo de prova IV 15.

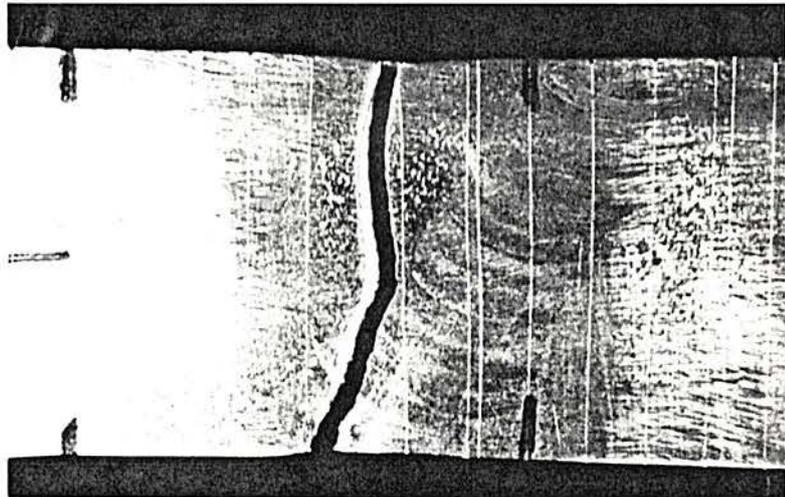


Fig. 71:Aspecto macrográfico da fratura do corpo de prova I 30.

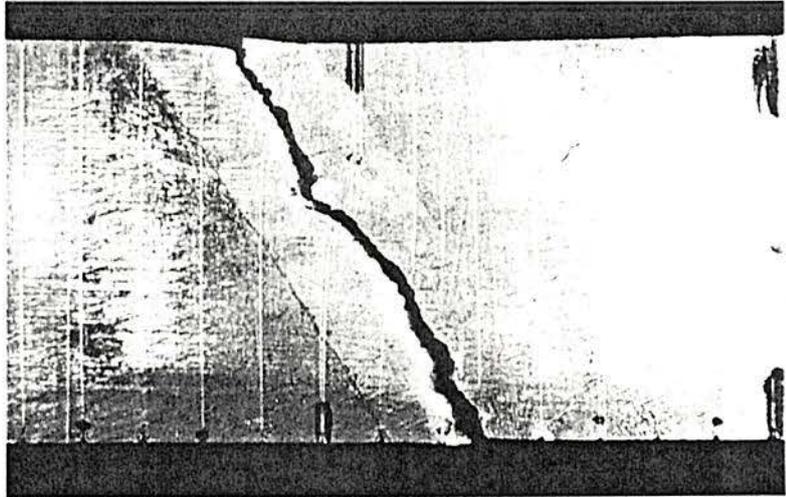


Fig. 72:Aspecto macrográfico da fratura do corpo de prova II 30.

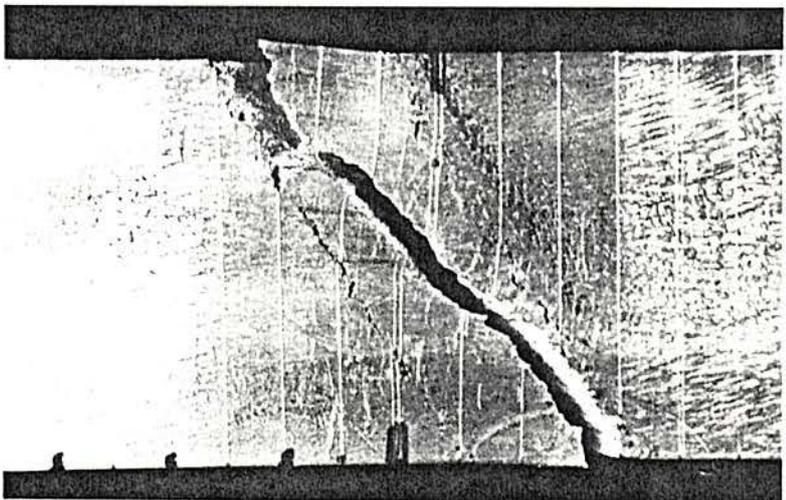


Fig. 73:Aspecto macrográfico da fratura do corpo de prova III 30.

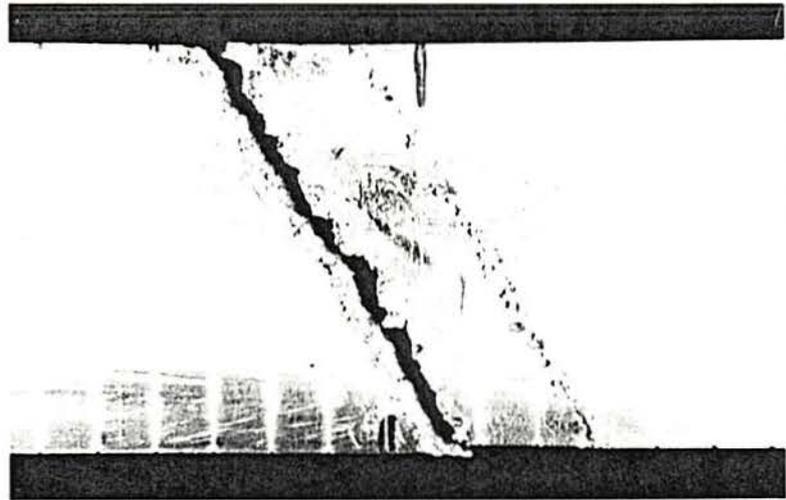


Fig. 74:Aspecto macrográfico da fratura do corpo de prova IV 30.

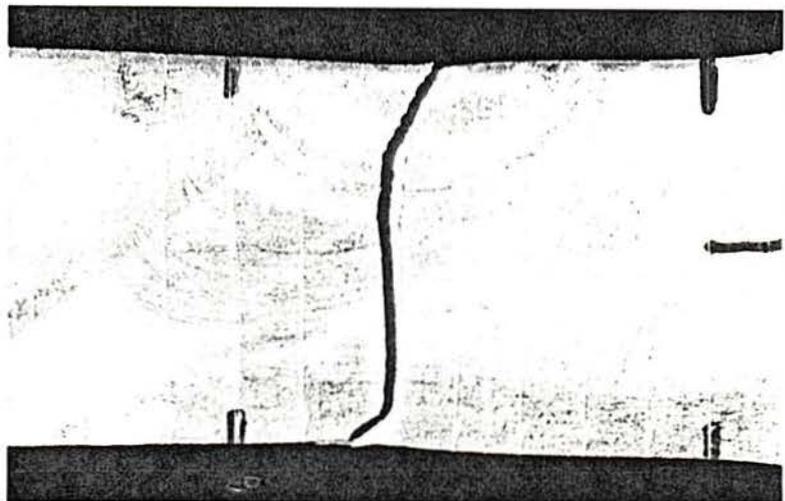


Fig. 75:Aspecto macrográfico da fratura do corpo de prova I 45.

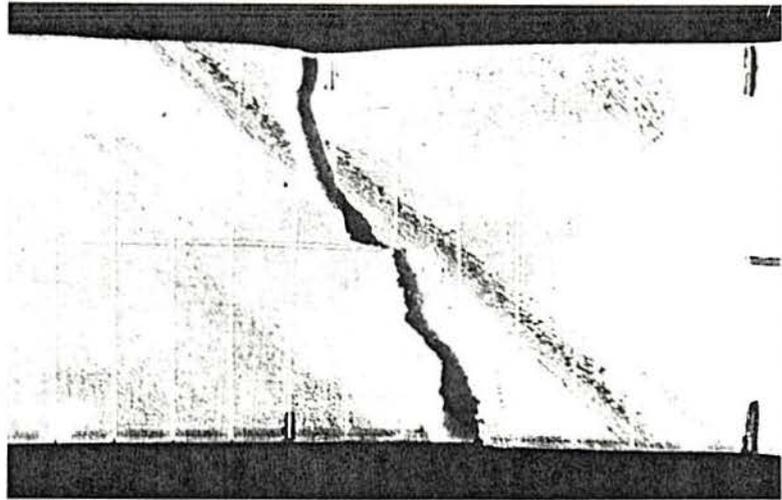


Fig. 76:Aspecto macrográfico da fratura do corpo de prova II 45.

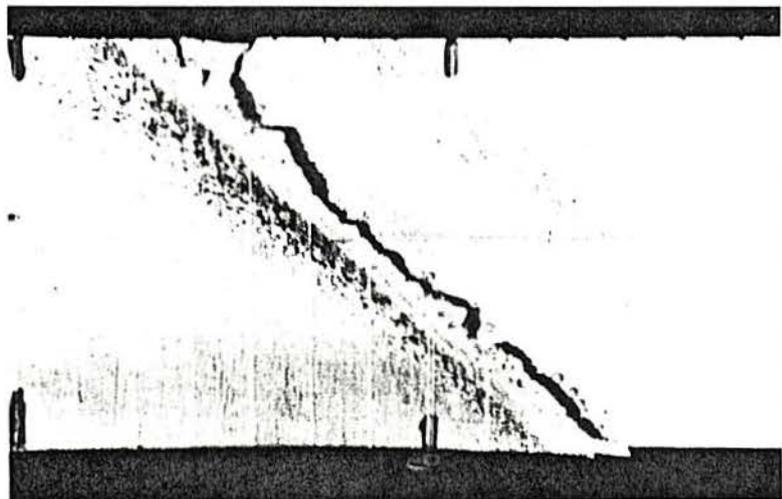


Fig. 77:Aspecto macrográfico da fratura do corpo de prova III 45.

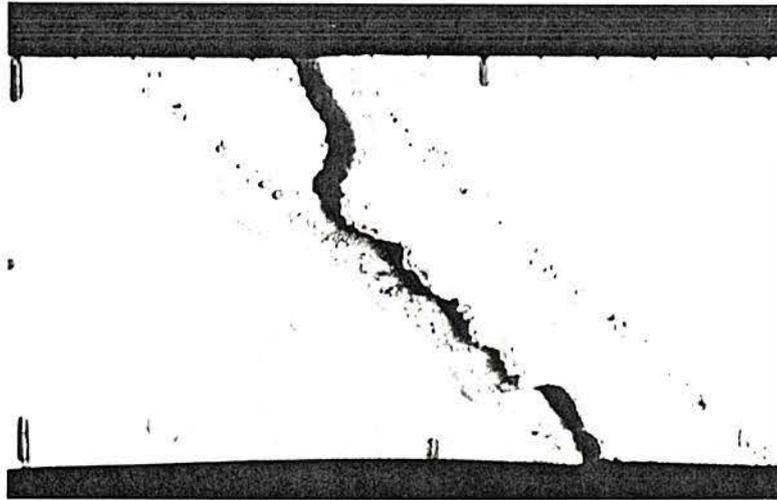


Fig. 78:Aspecto macrográfico da fratura do corpo de prova IV 45.

## 8. - CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos e discutidos, chega-se às seguintes conclusões, aplicáveis no âmbito deste trabalho:

8.1. -É possível realizar soldas de alumínio com MIG convencional e muito baixo nível de porosidade.

8.2. -O hidrogênio adicionado ao gás de proteção proporciona um meio adequado para a obtenção de poros. Foram obtidas grandes quantidades de pequenos poros (diâmetro  $\leq 0,200$  mm) com a adição de hidrogênio.

8.3. -Poros de diâmetro menor do que 0,200 mm na solda podem causar redução nas propriedades mecânicas da junta soldada e não ser detectados por exame radiográfico (Raio-X).

8.4. -No ensaio de dureza feito ao longo da face do cordão de solda, o metal de solda apresentou valores de dureza inferiores em relação ao metal base.

8.5. -A porosidade e o ângulo do cordão de solda afetam as propriedades mecânicas da junta soldada, nas seguintes formas:

(a) Resistência à tração maior do que especificado pela ASME mesmo com quase 4 % de poros (ângulo de  $45^{\circ}$ ) e com quase 2 % (ângulo de  $0^{\circ}$  e outros).

(b) Idem para o limite de escoamento, no qual as soldas foram maiores que o especificado pela ASME, nos níveis de poros estudados.

(c) A redução da resistência à tração nos ângulos de cordões de solda de 0, 15, 30 e 45 graus ( medido em relação à direção

perpendicular à aplicação da carga) é proporcional ao incremento da percentagem do volume total de poros.

(d) Para o ângulo de  $45^{\circ}$ , o efeito dos níveis de poros sobre a resistência à tração foi menor do que para o ângulo de  $0^{\circ}$ .

(e) A ductilidade da junta soldada (determinada pela percentagem do alongamento) é influenciada pelos poros presentes no cordão de solda. Quanto maior o nível de porosidade, menor é a ductilidade.

(f) Para o ângulo de  $45^{\circ}$ , o efeito dos níveis de poros sobre a ductilidade foi menor do que para o ângulo de  $0^{\circ}$ .

(g) As variações de porosidade e ângulos de cordão de solda não afetaram significativamente o limite de escoamento da junta soldada.

(h) No metal de solda sem poros visíveis pelo exame radiográfico, não foram observados diferenças substanciais no tocante às propriedades mecânicas, para quaisquer ângulos do cordão de solda ( $0^{\circ} - 45^{\circ}$ ).

## 9. - SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- 9.1. -Sugere-se comparar os níveis de porosidade obtidos da seção transversal do cordão de solda e o plano de fratura.
- 9.2. -Propõe-se realizar soldas para um mesmo material em diferentes posições de soldagem; mantendo constante a energia de soldagem.
- 9.3. -Ampliar o espectro dos ângulos dos cordões de solda em relação ao esforço, com o objetivo de estabelecer uma relação quantitativa entre propriedades mecânicas da junta soldada e o ângulo do cordão de solda.
- 9.4. -Propõe-se realizar testes para diferentes materiais e processos de soldagem.

## 10. - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ KAISER ALUMINUM & CHEMICAL SALES, Inc., Welding Kaiser Aluminum. 2<sup>a</sup>.ed., 1978.
- /2/ AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Properties and Selection of Metals. Metals Handbook. 8<sup>a</sup> ed., v.1, January 1975.
- /3/ AMERICAN WELDING SOCIETY. Metals and their Weldability. In:-. Welding Handbook. 7<sup>a</sup>.ed., Miami, v.4, 1982.
- /4/ ALCAN LYNEMOUTH Ltd. Metallurgy of Aluminum a Layman's Guide. Welding Technology Course. In:-.JORGE, J.C. & REBELLO, J.M.A. Soldabilidade das Ligas de Alumínio da classe 7000: Uma Revisão Bibliográfica. Soldagem e Materiais, v.2, n.4, Out./Dez.1990.
- /5/ SANDERS, W.W.,Jr & McDOWELL, K.A. Fatigue Behavior of 5000 Series Aluminum Alloy Weldments in Marine Environment. Welding Research Council. Bulletin 242. Oct.1978.
- /6/ DUDAS, J.H. & COLLINS, F.R. Preventing Weld Cracks in High-Strength Aluminum Alloys. Supplement to the Welding Journal,:241s - 249s, June 1966.
- /7/ DOWD, J.D. Weld Cracking of Aluminum Alloys. Welding Journal, v.31, n.10,:448s - 456s, 1952.
- /8/ BEWLETT, R.V. Técnicas Modernas para a Soldagem de Alumínio. Anais de VIII Encontro Nacional e Tecnologia da Soldagem, ABS,:81 - 134, 1982.
- /9/ Technical Guide for Gas Metal Arc Welding. Copyright Hobart Brothers Company, 1980.

- /10/ LUDIN, C.D. The Significance of Weld Discontinuities - A Review of Current Literature. Welding Research Council, Bulletin 222, Dec.1976.
- /11/ LUDIN, C.D. Review of WorldWide Weld Discontinuity Acceptance Standards. Welding Research Council, Bulletin 268, June 1981.
- /12/ SHORE, R.J. & McCAULEY, R.B. Effects of Porosity on High Strength Aluminum 7039, Welding Journal, :311s - 321s, July 1970.
- /13/ RUDY, J.F. & RUPERT, E.J. Effects of Porosity on Mechanical Properties of Aluminum Welds. Welding Journal, :322s - 336s, July 1970.
- /14/ D'ANNESSA, A.T. Microstructural Aspects of Weld Solidification. Welding Journal, Welding Research Supplement, :491s - 499s, Nov. 1967.
- /15/ HOWDEN, D.G. An Up-to-Date Look at Porosity Formation in Aluminum Weldments. Welding Journal, ;112 - 114, Feb. 1971.
- /16/ WOODS, R.A. Porosity and Hydrogen Absorption in Aluminum Welds. Welding Journal, :97s - 108s, March 1974.
- /17/ KAMMER, P.A.; RANDALL, M.O.; MONROE, R.E. & GROTH, W.G. The Relation of Filler Wire Hydrogen to Aluminum-Weld Porosity. Welding Journal, :433s - 441s, Oct. 1963.
- /18/ CHEEVER, D.L.; KAMMER, P.A.; MONROE, R.E. & MARTIN, D.C. Effect of Experimental 2219 and 2014 Aluminum Weld Composition Variations. Welding Journal, :348s - 358s, August 1969.

- /19/ SAPERSTEIN, Z.P.; PRESCOTT, G.R. & MONROE, E.W. Porosity in Aluminum Welds. Welding Research Supplement, :443s - 453s, Oct. 1964.
- /20/ ASHTON, R.F.; WESLEY, R.P. & DIXON, C.R. The effect of Porosity on 5086-H116 Aluminum Alloy Welds. Welding Research Supplement, :95s - 98s, March 1975.
- /21/ DEVLETIAN, J.H. & WOOD, W.E. Factors Affecting Porosity in Aluminum Welds -A review. Welding Research Council, Bulletin 290, Dec. 1983.
- /22/ GEDEON, S.A. & EAGAR, T.W. Thermochemical Analysis of Hydrogen Absorption in Welding. Welding Journal, :264s - 271s, July 1990.
- /23/ OBOTUROV, V.I. & EROKHIN, A.A. Eliminating Porosity in the Positional Welding of AMg6 Alloy. Svar. Proiz., n.1, 17 - 18, 1970. In:- DEVLETIAN, J.H. & WOOD, W.E. Factors Affecting in Porosity in Aluminum Weld - A review. WRC, Bulletin 290, Dec. 1983.
- /24/ COLLINS, F.R. Porosity in Aluminum-Alloy Welds. Welding Journal, :589 - 593, June 1958.
- /25/ BEER, F.P. & JOHNSTON, E.R., Jr. Resistência dos Materiais. 2<sup>a</sup>.ed. São Paulo, McGraw-Hill, 1989.
- /26/ LINDH, D.V. & PESHAK, G.M. The Influence of Weld Defects on Performance. Welding Journal, :45s - 56s, Feb. 1969.
- /27/ MASUBUCHI, K. Integration of NASA-Sponsored Studies on Aluminum Welding. Redstone Scientific Information Center, Sep. 1967. In:-.SHORE, R.J. & McCAULEY, R.B. Effect of

- Porosity on High Strength Aluminum 7039. Welding Journal, :311s - 321s, July 1970.
- /28/ PENSE, A.W. & STOUT, R.D. Influence of Weld Defects on the Mechanical Properties of Aluminum Alloy Weldments. W.R.C., Bulletin 152, July 1970.
- /29/ GREEN, W.L.; HAMAD, M.F. & McCAULEY, R.B. The Effects of Porosity on Mild-Steel Welds. Welding Journal, :206s - 209s, May 1958.
- /30/ BRADLEY, J.W. & McCAULEY, R.B. The effects of Porosity in Quenched and Tempered Steel. Welding Journal, :408s - 414s, Sep. 1964.
- /31/ BAYSINGER, F.R. Observation on Porosity in Aluminum Weldments. NASA Marshall Space Flight Center Welding Symposium, Huntsville, Ala. (July 7-9, 1964). In:-. PENSE, A.W. & STOUT, R.D. Influence of Weld Defects on the Mechanical Properties of Aluminum Alloy Weldments. WRC, Bulletin 152, July 1970.
- /32/ NELSON, F.G. & MARSHALL, H. Effect of Discontinuities on Weld Strength of Aluminum Alloys. Welding Journal. :427s - 433s, Oct. 1971.
- /33/ MARTELEÉ, J. Study of the Welding of Aluminum Alloy and Mechanical Characteristics of the Welded Joints. Welding in the World, v.7, n.2, :122 - 135, 1965.
- /34/ LAWRENCE, F.V. & MUNSE, W.H. Effects of Porosity on the Tensile Properties of 5083 and 6061 Aluminum Alloy Weldments. W.R.C., Bulletin 181, Feb. 1973.

- /35/ McCARTHY, W.A., Jr; LAMBA, H. & LAWRENCE, F.V., Jr. Effects of Porosity on the Fracture Toughness of 5083, 5456 and 6061 Aluminum Alloy Weldments. W.R.C., Bulletin 261, Sep. 1980.
- /36/ AMERICAN WELDING SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM B 209 - 86. Specification for Aluminum and Aluminum Alloy Sheet and Plate.
- /37/ AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS 5.10 - 80. Specification for Aluminum and Aluminum Alloy Bare Rods and Electrodes.
- /38/ ASME BOILER AND PRESSURE CODE AN AMERICAN NATIONAL STANDARD, SECTION VIII, Rules for Construction of Pressure Vessel. Division 1, July 1986.
- /39/ AMERICAN WELDING SOCIETY. Structural Welding Code Aluminum. Miami, 1983.
- /40/ DEHOFF T. Robert & RHINES N. Frederick. Quantitative Microscopy. McGraw-Hill Book Company. 1968.
- /41/ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Microhardness of Materials. Designation: E384 - 84. Philadelphia, ASTM, 1987.
- /42/ METALS HANDBOOK. Nondestructive Evaluation and Quality Control. 9<sup>th</sup> ed., v.17, 1989.
- /43/ AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Inspection. 2<sup>nd</sup> ed., 1980.
- /44/ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Recommended Practice for Choice of Sample Size to Estimate the Average Quality of a Lot or Process. Designation: E122 - 72 Philadelphia. ASTM, 1979.

/45/ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard  
Recommended Practice for Probability Sampling of Materials.  
Designation: E105 - 58 Philadelphia. ASTM, 1975.

## APÊNDICE 1

### INSPEÇÃO E ENSAIOS /42/, /43/.

#### DESCRIÇÃO SUCINTA DOS ENSAIOS E MÉTODOS DE EXAME UTILIZADOS

A inspeção e os ensaios das juntas soldadas são necessários, para obter e manter a qualidade requerida da junta na produção.

Os métodos de inspeção e de ensaio são classificados em dois grupos:

- (1) ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.
- (2) ENSAIOS DESTRUTIVOS.

(1) ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS: O ensaio não destrutivo se caracteriza por não ser necessário o corte ou a destruição da junta soldada ou do equipamento soldado. Os métodos normalmente empregados são: o exame visual e radiográfico, o exame por líquido penetrante e por exame de ultra-som.

#### -EXAME VISUAL

A inspeção visual é o primeiro passo na avaliação da qualidade de uma junta soldada. Todos os outros exames não destrutivos devem ser executados após um bom exame visual, que pode ser feito à vista desarmada ou com auxílio de lupa. O exame visual é utilizado antes e após a soldagem. Antes, para detectar defeito na geometria da junta (por exemplo, ângulo do bisel, ângulo do chanfro, nariz do bisel, aberturas das partes a serem soldadas) e descontinuidades no

metal base. Após operação de soldagem, o exame visual tem por finalidade detectar possíveis descontinuidades induzidas na soldagem, tais como: poros superficiais, aparências do cordão irregular, falta de penetração, trincas superficiais (longitudinais, transversais e de cratera), mordeduras e outras.

#### - EXAME RADIOGRÁFICO

O exame radiográfico é de grande aplicação industrial e requerido por todas as normas como um método de inspeção que determina a presença e a natureza de defeitos ou descontinuidades estruturais no interior das soldas.

A presença de defeitos em uma junta soldada não significa necessariamente a sua rejeição, a menos que sua resistência mecânica sofra redução significativa. Portanto, antes de se reaprovar uma junta soldada pela presença de defeitos, é prática usual comparar os tipos de defeitos, as suas dimensões e a freqüência que eles ocorrem, com os limites de aceitação pela norma em questão.

A confiabilidade do exame radiográfico pode ser aumentada através de radiografias tiradas de dois ou mais ângulos.

#### (2) ENSAIOS DESTRUTIVOS

No ensaio destrutivo, a solda ou o equipamento soldado tem que ser seccionado para fornecer o corpo de prova para teste. Todavia, nos casos onde o conjunto é de grande porte ou onde a perda do equipamento seria crítica, é prática usual fazer uma solda teste

em uma peça extra de material. O corpo de prova é preparado com os mesmos materiais e , em seguida, soldado do mesmo modo e posição, tal como na produção. Os ensaios destrutivos encontram sua vasta aplicação principalmente na qualificação de processos, procedimentos, soldadores e materiais, e uma menor utilização no ensaio de produtos acabados.

Os ensaios destrutivos englobam os testes de fratura, dobramento, tração, dureza e análise metalográfica.

#### -ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração é utilizado para determinar a resistência das juntas soldadas e brasadas. O exame visual da superfície do corpo de prova mostrará os mesmos defeitos, tal como no ensaio de fratura. Além disso, o ensaio de tração proporciona uma medida quantitativa da qualidade da solda. Apesar deste ensaio não ser empregado extensivamente na produção, ele é utilizado na qualificação de processos e procedimentos de soldagem. O corpo de prova deve ser preparado e testado de acordo com as determinações da norma que está sendo aplicada.

Os corpos de prova são tracionados até a ruptura em máquinas de ensaios apropriadas, e a resistência à tração , o limite de escoamento e o alongamento, são determinados.

#### - ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza não é normalmente considerado como uma ferramenta de controle de qualidade, mas pode ser utilizado para

determinar a extensão da zona afetada pelo calor em ambos os lados da solda. As máquinas de ensaio de dureza padronizadas tais como a Brinell, Rockwell ou Vickers podem ser empregadas. Verifica-se no caso do alumínio, que não existe relação direta entre a dureza e a resistência à tração, conforme acontece no aço.

#### - ANÁLISE METALGRÁFICA

A análise metalográfica é um método eficaz que proporciona determinar a estrutura e a qualidade das juntas soldadas e brasadas. Tal análise pode ser dividida convenientemente em Macroscópica e Microscópica.

Os corpos de prova referentes à seção transversal da junta soldada, devem ser adequadamente preparados e, também, seguir os procedimentos usuais de metalografia, tanto na análise macroscópica como microscópica.

A análise visual de uma macro-estrutura revela a geometria e a estrutura da junta soldada e, igualmente, defeitos significantes como: porosidade, falta de penetração, falta de fusão, trincas, mordeduras, perfil irregular e tamanho de solda inadequada.

## APÊNDICE 2

### EQUAÇÕES ESTATÍSTICAS APLICÁVEIS NOS ENSAIOS /44/, /45/.

#### 1. - Uso de Métodos Estatísticos

É desejável realizar um grande número de ensaios para determinar uma característica de um material, pois resulta assim um maior nível de confiança na avaliação dos resultados. Ocorre que em muitos casos não têm-se uma quantidade elevada de corpos de prova ou não é possível realizar várias séries de medidas. Não obstante, ainda com pequenos tamanhos de amostra pode-se calcular a variabilidade dos resultados, que é uma indicação geral da precisão do aparelho e do método de ensaio.

#### 2. - Definição de Parâmetros e Equações.

- Medidores de exatidão: o mais empregado de todos eles é a média aritmética ( $\bar{X}$ )

$$\bar{X} = \sum x_i / n.$$

Sendo:

$x_i$  = Valores de cada uma das observações.

$\bar{X}$  = Média das observações.

$n$  = Número de observações.

- Medidores de precisão: são vários os parâmetros medidores de dispersão, mas aqui só serão mencionados dois deles.

Define-se intervalo ( $F$ ), também conhecido como âmbito ou faixa, como a diferença entre o maior e o menor valor das observações.

Isto é:  $F = x_{\text{máx.}} - x_{\text{mín.}}$ . Sua principal aplicação, encontra-se para

tamanho pequeno de amostra.

O outro parâmetro empregado é o desvio padrão ( $\sigma$ ). Sua expressão está dado por:

$$\sigma = (\sum (x_i - X)^2 / (n - 1))^{1/2}$$

Alguns autores preferem definir o desvio padrão como:

$$\sigma^* = (\sum (x_i - X)^2 / n)^{1/2}$$

Neste caso, utiliza-se uma expressão aproximada deste parâmetro.

A continuação são mostradas as equações utilizadas para o cálculo do desvio padrão, e do coeficiente de variação:

- Desvio padrão:  $\sigma = F / d_2$  (Tamanho pequenos de amostras: 2 a 10 espécímenes).

-Coeficiente de variação:  $CV = (\sigma / X).100$

Sendo: CV = Variabilidade do procedimento de ensaio (%).

$d_2$  = Fator de desvio (varia com o tamanho de amostras, ver Tab. 1).

Tab. 1: Fatores para estimar o desvio padrão a partir do F, sobre a base do tamanho de amostra.

Tamanho de amostra (n)	$d_2$
2	1,128
3	1,693
4	2,059
5	2,326
6	2,534
7	2,704
8	2,847
9	2,970
10	3,078