

8 Material utilizado e procedimento experimental

Em estudos anteriores foram testados diferentes processos de soldagem circunferencial para tubos de aços API 5L X-80. Os tipos de processos de soldagem utilizados foram soldagem por eletrodos revestidos (SMAW), arame tubular com proteção gasosa (FCAW-G) e arco gás-metal com gás ativo (MAG).⁽⁸⁾

Foram realizadas juntas circunferenciais referentes a quatro especificações de procedimentos de soldagem (EPS). Nas EPS X80-1 e EPS X80-2 a soldagem circunferencial foi realizada utilizando eletrodo revestido celulósico, para o passe da raiz, e básicos para os demais. A soldagem da EPS X80-2 foi feita em uma junta dissimilar de aços X-80 e X-52, para simular uma soldagem de um tubo X-80 com um acessório do tubo.

Na EPS X80-3 a soldagem dos passes da raiz e a quente foram executados com eletrodo revestido celulósico e básico, respectivamente. Os demais passes foram realizados com o processo de arame tubular com proteção gasosa de Ar-CO₂ (80% - 20%).

Por fim, na EPS X80-4 foi utilizado o processo GMAW com proteção gasosa de CO₂ (100%) para o passe da raiz e arame tubular com proteção gasosa de Ar-CO₂ (80% - 20%) para os outros.

Foram realizados ensaios não destrutivos de radiografia e ultrassom em todas as EPS seguindo a norma API 1104. Ensaios mecânicos de tração, dobramento, Nick-break, também foram feitos seguindo a mesma norma e o Charpy seguindo a norma DVN-OS-F101. Todos os resultados estão na tabela 5.

Tabela 5: EPS, processos de soldagem, ensaios não destrutivos e mecânicos.

EPS	Processos	Raiz	Quente	Enchimento	Acabamento	Material	Radiografia e Ultrassom	Tração	Dobramento	Nick-break	Charpy-V (0°C)	Microdureza Vickers (<350HV p/ ARBL)
X80-1	SMAW	E 6010	E 8018-G	E 10018-G	E 10018-G	X80-X80	Reprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	-	Aprovado
X80-2	SMAW	E 6010	E 8018-G	E 10018-G	E 10018-G	X80-X52	Reprovado	Reprovado	Aprovado	Aprovado	-	Aprovado
X80-3	SMAW / FCAW-G	E 6010	E 8010	E 101 T1-GM H8	E 101 T1-GM H8	X80-X80	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
X80-4	GMAW / FCAW-G	ER 80S-G	E 101 T1-GM H8	E 101 T1-GM H8	E 101 T1-GM H8	X80-X80	2 CP's ap. e 4 CP's rep.	Aprovado	Reprovado	Aprovado	Reprovado	Aprovado

	Eletrodo celulósico
	Eletrodo básico
	MAG -> CO₂ (100%)
	FCAW-G -> Ar-CO₂ (80%-20%)

No entanto é de primordial importância se determinar a suscetibilidade a formação de trincas induzidas por hidrogênio neste aço. Sendo os testes de soldabilidade a ferramenta adequada.

Como mencionado anteriormente, este trabalho busca complementar estudos anteriores, avaliando a soldabilidade do aço X80. Deste modo, foram utilizados os mesmos consumíveis e as mesmas condições de soldagem usadas na EPS X80-3. Na tabela 6 estão descritos os parâmetros de soldagem da EPS X80-3 que foram usados como referência neste estudo.

Vale ressaltar que na EPS X80-3 foram realizadas soldas circunferenciais em quatro corpos de prova, sendo que o passe da raiz foi depositado com eletrodo revestido E6010, que não será avaliado neste trabalho. Para os passes a quente foi utilizado o eletrodo revestido E8010-G e para os demais passes (enchimento e acabamento) foi utilizado o arame E101T1-GM-H8, que serão aqui estudados.

Para as soldagens FCAW-G foi utilizado o gás de proteção 80% Ar - 20%CO₂ e a voltagem foi mantida, em média, em 23,5V, enquanto a velocidade do arame foi mantida, em média, em 300pol/min.

Tabela 6: Parâmetros de soldagem da EPS X80-3.

Corpo de prova	Tubo		Eletrodo revestido E8010-G				Arame tubular E101T1-GM-H8					
	Pré-aquecimento (°C)	Metade do perímetro do tubo (mm)	Passe	Tempo de soldagem (s)		Velocidade de soldagem (mm/s)		Passe	Tempo de soldagem (s)		Velocidade de soldagem (mm/s)	
				Esquerda	Direita	Esquerda	Direita		Esquerda	Direita	Esquerda	Direita
CP1	100,00	799,00	2,00	181,00	211,00	4,41	3,78	3,00	268,00	309,00	2,98	2,58
								4,00	400,00	312,00	2,00	2,56
								5,00	247,00	282,00	3,23	2,83
								6,00	245,00	264,00	3,26	3,02
								7,00	195,00	277,00	4,09	2,88
								8,00	261,00	249,00	3,06	3,21
CP2	100,00	798,00	2,00	182,00	193,00	4,39	4,14	9,00	203,00	180,00	3,93	4,43
								3,00	330,00	306,00	2,42	2,61
								4,00	404,00	398,00	1,98	2,01
								5,00	247,00	270,00	3,23	2,96
								6,00	347,00	310,00	2,30	2,58
								7,00	210,00	247,00	3,80	3,23
CP3	100,00	798,00	2,00	170,00	168,00	4,70	4,75	8,00	242,00	258,00	3,30	3,09
								9,00	174,00	199,00	4,59	4,01
								3,00	269,00	347,00	2,97	2,30
								4,00	368,00	395,00	2,17	2,02
								5,00	278,00	250,00	2,87	3,19
								6,00	270,00	297,00	2,96	2,69
CP4	100,00	798,00	2,00	271,00	165,00	2,95	4,84	7,00	224,00	234,00	3,56	3,41
								8,00	226,00	292,00	3,53	2,73
								9,00	199,00	195,00	4,01	4,09
								3,00	348,00	407,00	2,29	1,96
								4,00	425,00	383,00	1,88	2,08
								5,00	400,00	443,00	2,00	1,80
Média	100,00	798,25	2,00	201,00	184,25	4,11	4,38	7,00	233,00	315,00	3,43	2,53
								281,65	295,96	3,02	2,84	

8.1 Material utilizado

Foi utilizado como metal de base o aço alta resistência e baixa liga API 5L X80, tendo sido recebido na forma de três chapas com 19 mm de espessura, 500 mm de comprimento e 450 mm de largura. As chapas foram produzidas por laminação controlada sem resfriamento (TMCP – Thermomechanical Controlled Process). A análise química do metal de base está apresentada na tabela 7.

Tabela 7: Composição química do aço.

Composição química (%)	
Elemento % Peso	Corrida 522997
	Chapa 603136117
C	0,0560
Si	0,2230
Mn	1,7700
P	0,0150
S	0,0029
Cr	0,1340
Ni	0,0120
Mo	0,2560
Al	0,0340
Cu	0,0099
Ti	0,0180
Nb	0,0680
V	0,0200
B	0,0005
Ca	0,0027
N	0,0300

8.1.1 Metodologia

Os processos de soldagem utilizados foram o SMAW, com o consumível E8010-G, e o FCAW-G, com o consumível E101T1-GM-H8.

Os consumíveis e a máquina CV 400-I para a soldagem com arame tubular utilizados em ambos os processos foram cedidos pela Lincoln Electric. A máquina VR 4000 para a soldagem com eletrodo revestido foi fornecida pelo Senai-RJ.

As condições de soldagem recomendadas pelo fabricante, assim como as propriedades mecânicas e composições químicas dos consumíveis, segundo o fabricante estão nas tabelas 8-10.

Todas as soldas foram realizadas no Centro de Tecnologia de Solda do Senai-RJ.

Tabela 8: Condições de soldagem recomendadas pelo fabricante.

Parâmetros de soldagem		
	E8010-G	E101T1-GM-H8
Diâmetro (mm)	4	1,1
Polaridade	DC+	DC+
Tensão (V)	>70	27
Corrente (A)	90 - 185	290
Gás de proteção	-	75%Ar - 25%CO ₂
Temp. preaquecimento (°C)	-	150

Tabela 9: Composição química do metal de solda fornecida pelo fabricante.

Composição química do metal de solda									
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	S	P
E8010-G	0,12 - 0,18	0,60 - 0,90	0,12 - 0,28	0,70 - 0,90	0,02 - 0,04	0,23 - 0,50	<0,01	0,009 - 0,011	0,008 - 0,012
E101T1-GM-H8	0,04	1,75	0,4	1,01	0,11	0,26	0,02	0,01	0,02

Tabela 10: Propriedades mecânicas do metal de solda fornecidas pelo fabricante.

Propriedades mecânicas do metal de solda			
	Limite de escoamento (Mpa)	Limite de resistência (Mpa)	Alongamento (%)
E8010-G	460 - 572	550 - 648	19 - 26
E101T1-GM-H8	774	765	21

8.2 Procedimento experimental

8.2.1 Medição do hidrogênio difusível

A medição da quantidade de hidrogênio difusível depositado pelos metais de solda (E8010-G e E101T1-GM-H8) foi feita utilizando o processo de cromatografia gasosa no Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG.

Para cada consumível foram feitas três medições, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados. Os materiais utilizados estão listados abaixo:

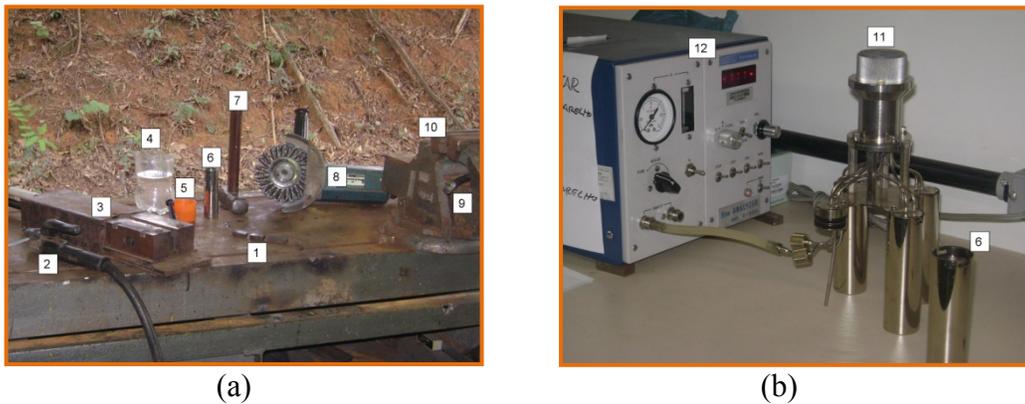


Figura 17: (a) materiais utilizados e (b) Cromatógrafo e Sample.

1- Corpos de prova: três peças, sendo que a medição do hidrogênio difusível é feita somente na peça do meio, que é pesada antes e depois do teste em balança de 4 (quatro) dígitos. As peças das extremidades são utilizadas apenas para abertura e fechamento do arco elétrico.

2- Porta eletrodo (no caso de SMAW) ou Tocha de Soldagem (no caso de GMAW).

3- Suporte das amostras: suporte de cobre, refrigerado a água para evitar o aquecimento excessivo das amostras, evitando o escape do hidrogênio.

4- Vasilha de água com gelo.

5- Vasilha com álcool.

6- Recipiente onde é colocada a amostra após o teste.

- 7- Marreta
- 8- Esmerilhadeira com escova de aço.
- 9- Mangueira de ar comprimido.
- 10- Morsa.
- 11- Sample: conjunto de 4 recipientes em que existe a condição de se passar gás nos recipientes separadamente.
- 12- Cromatógrafo: equipamento utilizada para se fazer a medição do hidrogênio.

As amostras foram pesadas e depois colocadas no suporte, já conectado à mangueira de água. Em seguida a solda foi iniciada. Após o término da soldagem, as amostras foram colocadas na vasilha com água e gelo até que estivessem totalmente resfriadas.

Em seguida, as amostras foram presas na morsa, a fim de se retirar toda a escória com a esmerilhadeira. As peças foram, então, separadas com a marreta, para se obter somente a amostra do meio, que será utilizada como corpo-de-prova.

O corpo de prova foi mergulhado no álcool e seco com ar comprimido, para ser colocado no recipiente, que é fixado ao Sample. A partir deste momento o recipiente permanece totalmente vedado, fazendo com que o único acesso ao seja feito restritamente através das válvulas do Sample.

É importante lembrar que depois de terminada a solda, todo o procedimento até a vedação do recipiente no Sample deve durar no máximo dois minutos.

Dentro do recipiente faz-se passar durante trinta segundos, um fluxo de argônio analítico, com 99,999% de pureza, referente a 1,8 bar de pressão. O Sample é levado ao forno a uma temperatura de 45°C por 72 horas. Após passadas as 72 horas, o Sample, ainda com as amostras no seu interior, é deixado resfriando até atingirem a temperatura ambiente.

Por fim, o cromatógrafo é calibrado e o hidrogênio difusível no metal de solda do corpo de prova é medido. O resultado do teste é dado em mililitros (ml) de hidrogênio. Os corpos de prova são pesados novamente na mesma balança e o resultado é dado por:

$$HD = \frac{Y \cdot 100}{\Delta P} \quad [\text{ml H}_2/100\text{g M.D.}] \quad (7)$$

Y = valor de hidrogênio obtido em ml;

ΔP = peso final – peso inicial das peças;

M.D. = material depositado;

HD = hidrogênio difusível.

8.2.2

Teste Tekken

8.2.2.1

Cortes e soldas

O teste de soldabilidade Tekken foi realizado utilizando quatro pares de chapas, cortadas com serra seguindo as dimensões sugeridas na norma JSA JIS Z 3158, de 1993, ⁽¹⁶⁾ onde um par de chapas foi cortado na direção paralela a laminação e o outro na direção transversal a direção de laminação da chapa. Os pares de chapas e as direções de corte estão na tabela 11.

Tabela 11: Processos de soldagem e direções de corte das chapas do teste Tekken.

Par de chapa	Processo de soldagem	Eletrodo	Direção de corte
T1	SMAW	E8010-G	Transversal a laminação
T2	SMAW	E8010-G	Paralela a laminação
T3	FCAW-G	E101T1-GM-H8	Transversal a laminação
T4	FCAW-G	E101T1-GM-H8	Paralela a laminação

As dimensões de cada par de chapas estão na tabela 12.

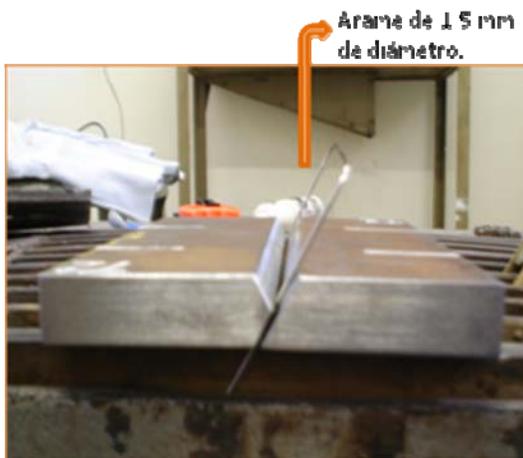
Tabela 12: Dimensões de cada chapa.

	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Ângulo do chanfro
T1	170	200	60°
T2	145	200	60°
T3	145	200	60°
T4	145	200	60°

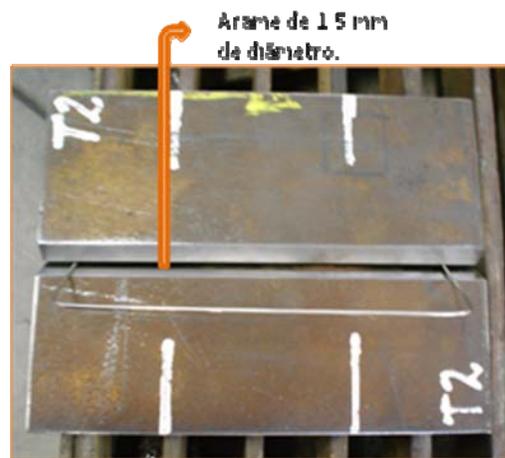
As chapas foram preaquecidas e um arame de 1,5 mm de diâmetro foi colocado no chanfro das chapas, fazendo com que a distância do Y atendessem a norma, conforme a figura 18.



(a)



(b)



(c)

Figura 18: (a) Chapa T2 antes da soldagem (b) e (c) e com arame de 1,5mm.

Em seguida, foram depositadas as soldas de ancoragem, com 60 mm cada uma. As soldas de ancoragem foram todas realizadas com dois passes de arame tubular, por ser um processo com melhor acabamento, mais rápido evitando respingos na área central das chapas, onde seriam depositadas as soldas de teste. Isso foi feito considerando que as soldas de ancoragem têm como função somente unir as

extremidades das chapas, facilitando a soldagem de teste e fazendo com que o chanfro apresente a abertura correta. As figuras 19 e 20 mostram as chapas T1, T2, T3 e T4, respectivamente, e suas soldas de ancoragem.

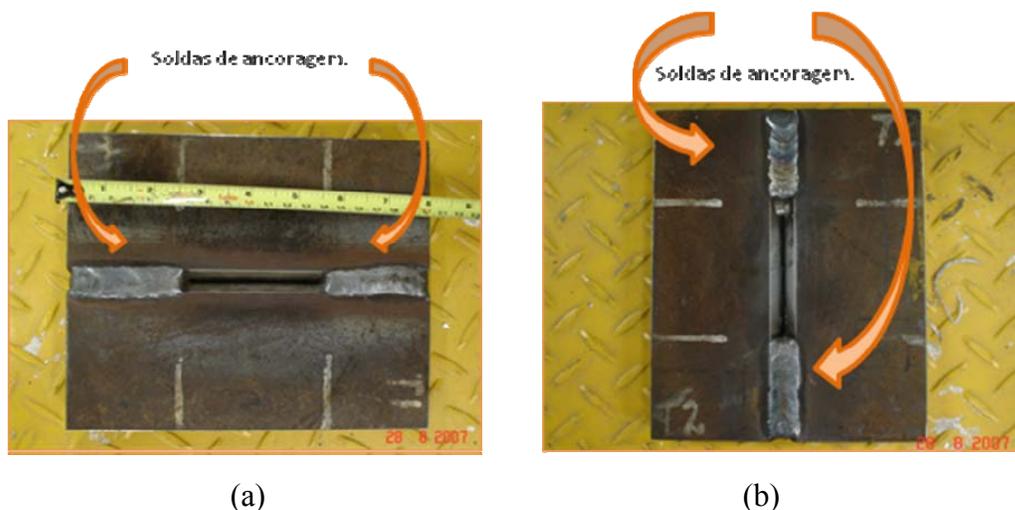


Figura 19: Chapas (a) T1 e (b) T2 com solda de ancoragem.

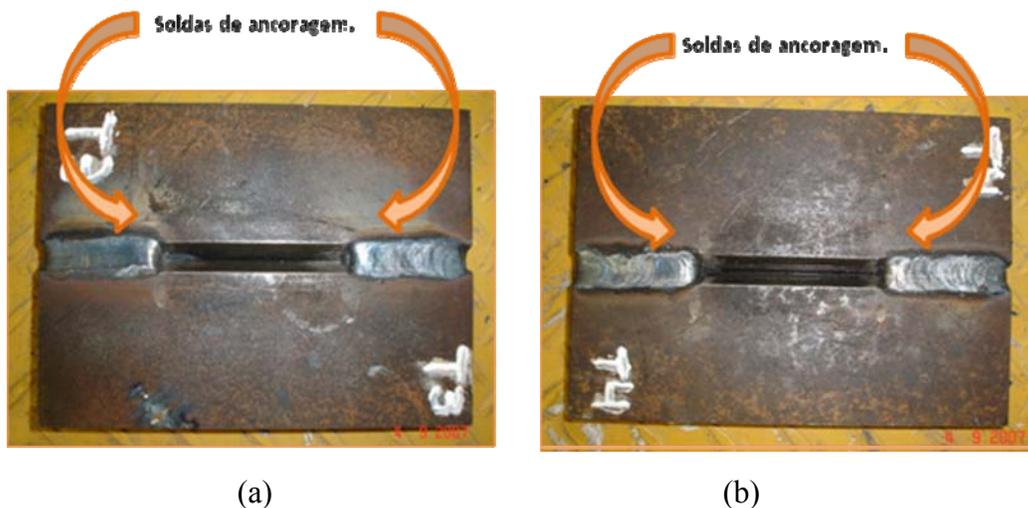


Figura 20: Chapas (a) T3 e (b) T4 com solda de ancoragem.

Após a deposição das soldas de ancoragem, as chapas foram deixadas resfriando ao ar até a temperatura ambiente.

No caso da soldagem pelo processo SMAW, depois de percorrido este tempo, e no dia da soldagem de teste, os eletrodos revestidos E8010-G foram retirados das embalagens e colocados em uma estufa por um período de exatamente

duas horas e a uma temperatura de 50°C, conforme as normas de utilização indicadas pelo fabricante. Já no caso da soldagem com o processo FCAW-G, depois de passadas as vinte e quatro horas que as chapas foram deixadas resfriando, o carretel de arame E101T1-GM-H8 foi retirado da embalagem e imediatamente utilizado.

Os parâmetros de soldagem foram dimensionados de modo a ser o mais próximo possível daqueles utilizados nas soldagens circunferenciais. Um único cordão de solda de teste foi depositado em cada uma das chapas T1, T2, T3 e T4, conforme a norma JIS Z 3158 ⁽¹⁶⁾.

A tabela 13 especifica as condições de soldagem das chapas T1, T2, T3 e T4 e correlaciona com os parâmetros utilizados nas soldagens circunferenciais.

Para o cálculo do aporte térmico (equação 8) foram considerados: ⁽³²⁾

η = eficiência do processo (igual a 0,8 para os processos SMAW e FCAW);

V = voltagem em V (medida durante o experimento);

A = amperagem em A (medida durante o experimento);

v = velocidade de soldagem em mm/s (calculada com o auxílio da fórmula $v=d/t$).

$$HI = \frac{(\eta \cdot V \cdot A)}{(v)} \quad (8)$$

Tabela 13: Parâmetros de soldagem.

Chapa	Processo de soldagem	Ponto	Amperagem (A)	Voltagem (V)	Aporte de calor (KJ/mm)	Comprimento do cordão de solda (mm)	Tempo de soldagem (s)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Pré-aquecimento da solda de teste (°C)	Pré-aquecimento da solda de ancoragem (°C)	Velocidade do arame (WFS)	Gás de proteção	Vazão do gás de proteção (l/min)	Stick-out (mm)
T1		1	160	24,7	1,21	118	45	2,62	105,1	80	-	-	-	-
		2	161	24,4	1,20									
		3	158	24,5	1,18									
		4	158	23,8	1,44									
T2	SMAW	1	158	26,4	1,14	120	41	2,93	110,2	81	-	-	-	-
		2	158	26,6	1,15									
		3	159	26,9	1,17									
		4	160	23,2	1,28									
T3		1	208	23,5	1,62	109,6	45,28	2,42	106,7	87	300	80%Ar - 20%CO ₂	18	15 - 20
		2	202	23,5	1,57									
		3	216	23,5	1,68									
		4	220	23,5	1,71									
T4	FCAW-G	1	210	23,5	1,52	104,6	40,38	2,59	100,5	85	300	80%Ar - 20%CO ₂	18	15 - 20
		2	206	23,5	1,50									
		3	208	23,5	1,51									
		4	210	23,5	1,52									

O tempo de soldagem das quatro soldas de teste foi cronometrado para permitir o cálculo da velocidade de soldagem e a amperagem e a voltagem foram medidas em quatro pontos marcados. As figuras 21 e 22 mostram as chapas T1, T2, T3 e T4 com as marcações dos pontos onde foram realizadas as medidas e as soldas já prontas.

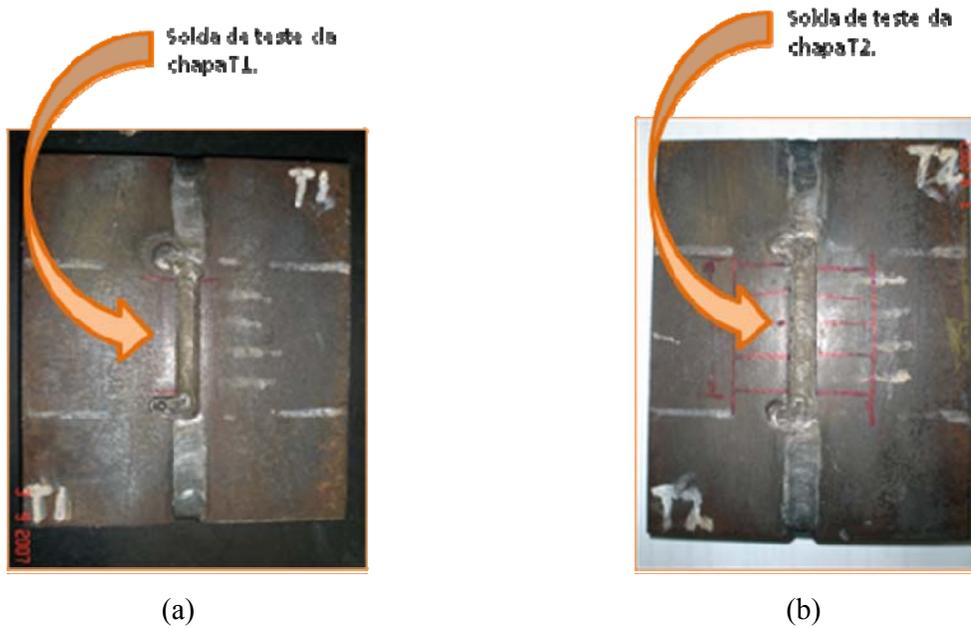


Figura 21: Chapas (a) T1 e (b) T2 com solda de teste.

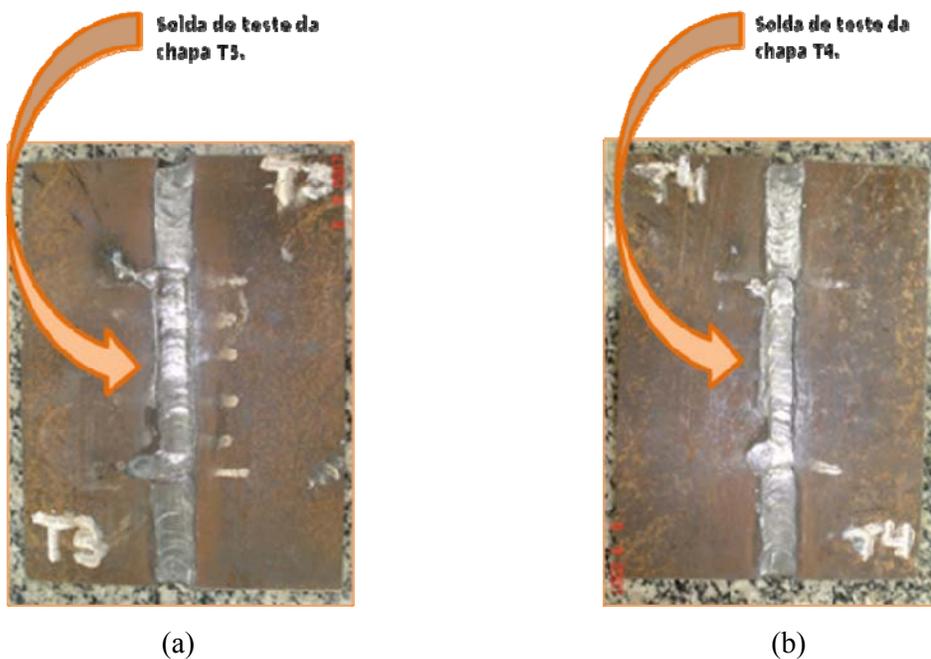


Figura 22: Chapas (a) T3 e (b) T4 com solda de teste.

Após o término da soldagem, as chapas foram deixadas resfriando ao ar durante um tempo maior que 72 horas, de modo que houvesse difusão completa do hidrogênio. As chapas foram cortadas transversalmente à solda, de forma a se obter quatro corpos de prova a partir da região da solda de teste, por chapa. Conforme exigência da norma, as regiões iniciais e finais das soldas foram descartadas, reduzindo a seção útil a 60 mm, conforme a figura 23.

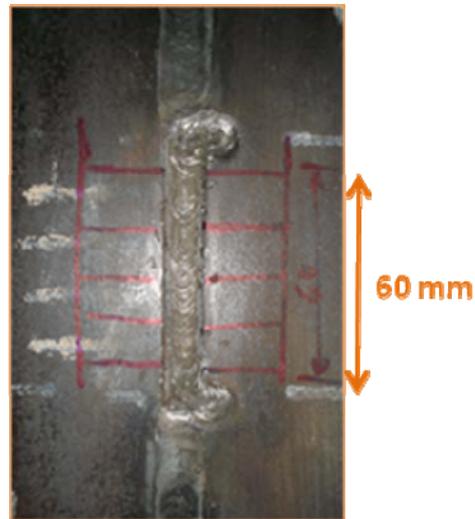
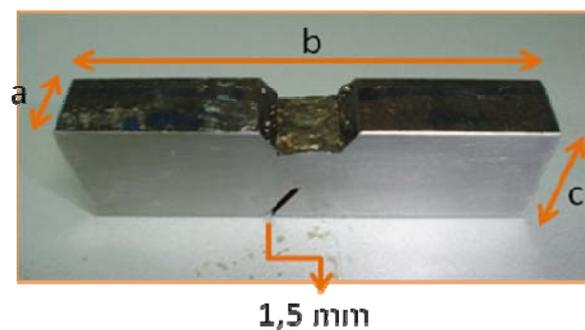


Figura 23: Chapa com marcações de corte.

Os corpos-de-prova, com dimensão média em mm de $a=12$, $b=61$ e $c=19$ depois de cortados, foram aplainados e retificados, conforme a figura 24.



(a)

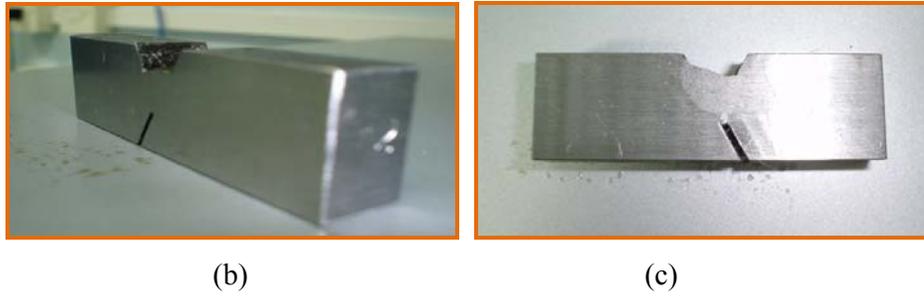


Figura 24: Corpos-de prova

8.2.2.2 Ensaio de líquidos penetrantes

Os entalhes dos corpos-de-prova foram preenchidos com resina para que não entrasse líquido penetrante nestas regiões, além disso, a escória e os respingos da soldagem foram retirados com uma escova rotativa e com uma lixa rotativa. Em seguida, as superfícies dos corpos de prova foram limpas com um pano embebido em solvente. O líquido penetrante vermelho foi pulverizado sobre todos os corpos de prova, figura 26, e após cinco minutos foi retirado com água. Quando as superfícies dos corpos de prova estavam bem secas, foi aplicado o revelador por vinte minutos, figura 27. Os corpos-de-prova foram expostos à luz comum para que alguma trinca fosse revelada a olho nú e em seguida com uma lupa marca Wild Heerbrugg com aumento de seis vezes.



Figura 25: Corpos-de-prova limpos.



Figura 26: Corpos-de-prova com líquido penetrante vermelho.



Figura 27: Corpos-de-prova com revelador.

8.2.2.3 Análise por microscopia ótica e eletrônica de varredura

Depois de realizado o ensaio de líquidos penetrantes, os corpos-de-prova foram preparados utilizando o procedimento tradicional de metalografia ótica. Inicialmente foram lixados na máquina polítrix Panambra DP10 com as lixas de forma seqüencial 150, a 1200 e depois polidos (também na polítrix Panambra DP10) com pasta de diamante de 3 μm a 1 μm .

Inicialmente a análise foi realizada nos corpos de prova apenas polidos. A princípio algumas amostras foram analisadas no MEV com aumento de até 5000 vezes. Entretanto, esta metodologia se mostrou inadequada, em função da região a ser analisada. Deste modo se optou por análises com aumento de 1000 vezes utilizando o MO.

De modo a mapear a amostra para visualização das regiões da ZTA e do MS no MEV, as amostras foram divididas em 3 regiões, conforme mostrado na figura 28, onde cada uma destas regiões se divide em quatro quadrados do lado

esquerdo da solda e quatro do lado direito, sempre nas proximidades do entalhe. Sendo estas regiões, onde pode ocorrer concentração de tensões, portanto apresentado maior suscetibilidade a formação de trincas induzidas por hidrogênio.

Os quadrados foram desenhados com uma caneta bem fina e com a ajuda de uma lupa milimetrada, conforme figura 28. Os quadrados, de 2 mm de lado cada um, foram varridos com aumento de 2000 e 5000 vezes no MEV.

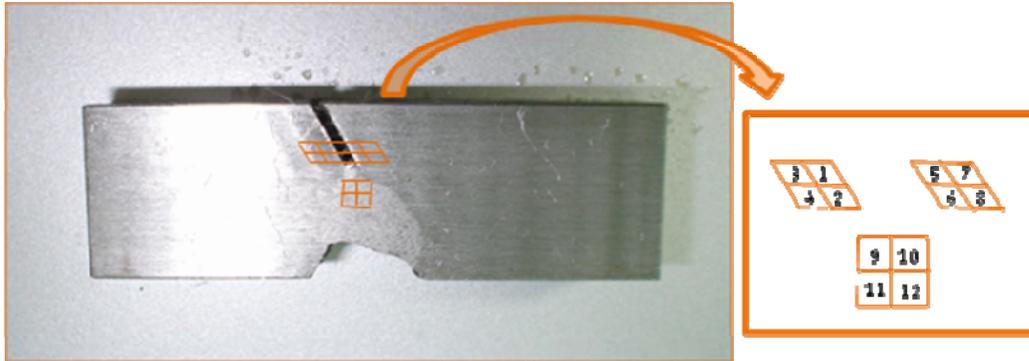


Figura 28: Corpo-de-prova com quadrados.

Para a visualização no MO, e a fim de reduzir a região de busca, foi considerada uma região de $1,5 \text{ mm}^2$ partindo do centro do entalhe seguindo em direção ao MB e ao MS. Assim, todas as regiões foram analisadas, sempre próximas ao entalhe, que é a área mais crítica para formação de trincas induzidas por hidrogênio. A distância de $1,5 \text{ mm}$ foi determinada a partir de um cálculo aproximado da distância que o hidrogênio pode difundir da solda para o MB. Esse cálculo foi feito utilizando a temperatura de 650°C , que é a temperatura média entre 800 e 500°C e o tempo médio de Δt_{8-5} , que foi de $13,325 \text{ s}$ para o processo FCAW-G e $15,113 \text{ s}$ para o processo SMAW. Esta temperatura foi escolhida, já que o Δt_{8-5} havia sido cronometrado durante o Teste de Implante e a altas temperaturas o hidrogênio difunde mais rapidamente do que a baixas temperaturas. Para o cálculo da difusividade do hidrogênio no aço foi utilizada a equação 3, que foi aplicada na fórmula de difusão 9, conforme abaixo: ⁽³³⁾

$$x = \sqrt{D \cdot t} \quad (9)$$

$$x_1 = 1,502 \text{ mm}^2 (\text{FCAW} - G)$$

$$x_2 = 1,599 \text{ mm}^2 (\text{SMAW})$$

Onde os valores de x_1 e x_2 são referentes às distâncias que o hidrogênio percorre.

Cada trinca encontrada foi medida com ajuda do programa Axio Vision 4.6. Posteriormente, as amostras foram atacadas com Nital 2% para identificar em qual região do MS ou da ZTA estavam as trincas, ou seja, se estava na região de grãos grosseiros ou não.

8.2.2.4 Ensaio de microdureza Vickers

No caso do Teste Tekken, foi realizado o ensaio de microdureza Vickers utilizando uma carga de 200 g. As medições foram feitas seguindo uma linha horizontal de 3 cm de comprimento, partindo do MB e passando pela ZTA e MS até chegar no MB novamente (conforme a figura 29). Foram selecionadas as amostras que apresentaram maiores e menores quantidades de trincas na ZTA e/ou no MS para este ensaio.

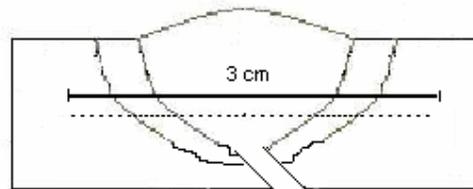


Figura 29: Pontos do ensaio de microdureza do Teste Tekken.

8.2.3 Teste de Implante

8.2.3.1 Cortes e soldas

O Teste de Implante utilizou dez corpos de prova (implantes), figura 30, retirados da metade da espessura da chapa recebida inicialmente, na direção paralela a direção de laminação. Segundo as normas, os entalhes dos implantes poderiam ser circulares ou helicoidais. Foi decidido utilizar entalhes helicoidais (roscas de sete fios) por ser mais fácil de posicioná-los na ZTA de cada solda.

Três chapas suportes do mesmo aço dos implantes foram inicialmente cortadas nas dimensões sugeridas pela norma AFNOR NF A89-100 ⁽²¹⁾, e pela recomendação do IIW, IIS/IIW-447-73 ⁽²⁰⁾.

Apesar de a norma aceitar que as chapas fossem de um aço diferente daquele dos corpos de prova, foi decidido utilizar o mesmo aço, uma vez que isso garantiria a mesma condutividade térmica do implante e da chapa.

Em duas chapas foram perfurados com uma broca de 6 mm quatro furos passantes de 6 mm de diâmetro cada um, e na terceira chapa foram perfurados dois furos passantes com as mesmas dimensões, conforme as figuras 31 e 32.



Figura 30: Implante.

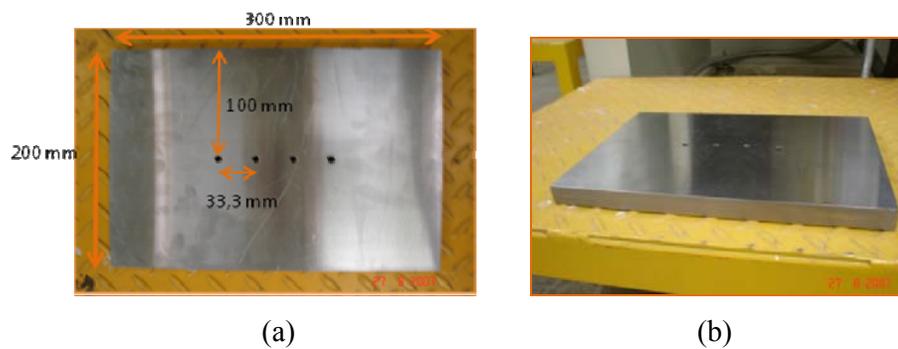


Figura 31: Chapa de suporte com 4 furos e dimensões.

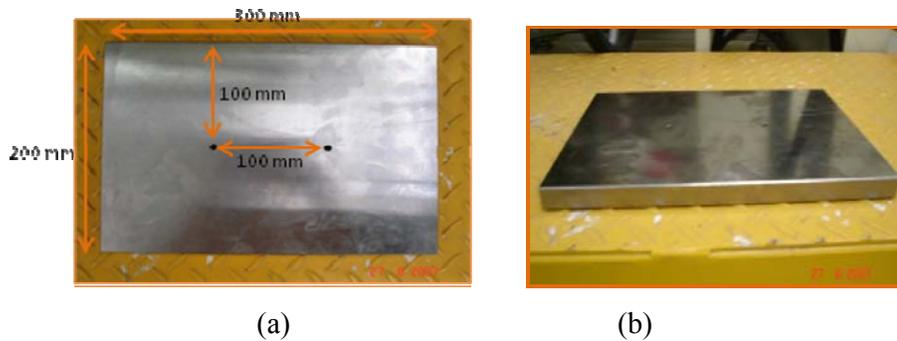


Figura 32: Chapa de suporte com 2 furos e dimensões.

Em seguida as chapas foram identificadas como I1, I2 e IT. Da mesma forma que no Teste Tekken, no Teste de Implante foram utilizados os consumíveis eletrodo revestido E8010-G e arame tubular E101T1-GM-H8.

As soldas depositadas na chapa I1 foram com arame tubular e aquelas depositadas na chapa I2 foram com eletrodo revestido.

A outra chapa, IT, foi utilizada como uma chapa de teste onde foram realizados dois ensaios iniciais a fim de adequar e determinar os procedimentos que seriam utilizados posteriormente. As duas soldas desta chapa de teste também foram depositadas com arame tubular.

Cada um dos furos das chapas foram numerados de 1 a 4. Assim, os corpos de prova foram denominados I1-1, I1-2, I1-3, I1-4, I2-1, I2-2, I2-3, I2-4, IT-1 e IT-2.

A fim de garantir que as dimensões dos implantes e dos entalhes estavam corretas, cada corpo de prova foi examinado e medido com o auxílio do projetor de perfil Mitutoyo Profile Projector tipo PJ300 e de um micrômetro. As dimensões exatas de cada implante estão na tabela 14.

Tabela 14: Dimensões dos implantes.

Implante	Comprimento do parafuso (mm)	Comprimento do filete (mm)	Raio na ponta do filete (mm)	Ângulo	Passe (mm)	Diâmetro parte sem rosca (mm)	Diâmetro mínimo (mm)
I1-1	69,920	0,451	0,102	45°34´	1,001	6,010	5,108
I1-2	70,070	0,473	0,102	45°22´	0,995	6,021	5,075
I1-3	70,000	0,484	0,121	44°57´	0,993	6,030	5,062
I1-4	70,000	0,508	0,102	45°08´	1,001	6,039	5,023
I2-1	69,990	0,427	0,127	45°29´	0,992	6,040	5,186
I2-2	70,500	0,520	0,102	44°24´	1,010	6,021	4,981
I2-3	70,100	0,471	0,102	44°48´	1,006	6,100	5,158
I2-4	70,000	0,523	0,076	46°14´	0,990	6,000	4,954
IT-1	70,000	-	-	-	-	6,000	-
IT-2	70,000	0,690	0,210	52°	-	6,000	4,620

Para a realização deste teste, foi necessária a utilização de uma máquina para a aplicação da carga, que foi emprestada pelo LRSS da UFMG, figura 33.

A máquina é composta de uma célula de carga, um equipamento de aquisição de dados da carga, um macaco hidráulico de 3 toneladas, um suporte para as anilhas, que eram responsáveis pela carga aplicada, 2 anilhas de 1 Kg, 2 anilhas de 2 kg, 4 anilhas de 4 Kg e 18 anilhas de 10 Kg (figura 32).

A célula de carga foi conectada a um computador (figura 33), o qual por meio do programa Catman gerou os gráficos. A carga era aplicada manualmente pela liberação do macaco hidráulico que sustentava as anilhas.



Figura 33: Máquina de implante.

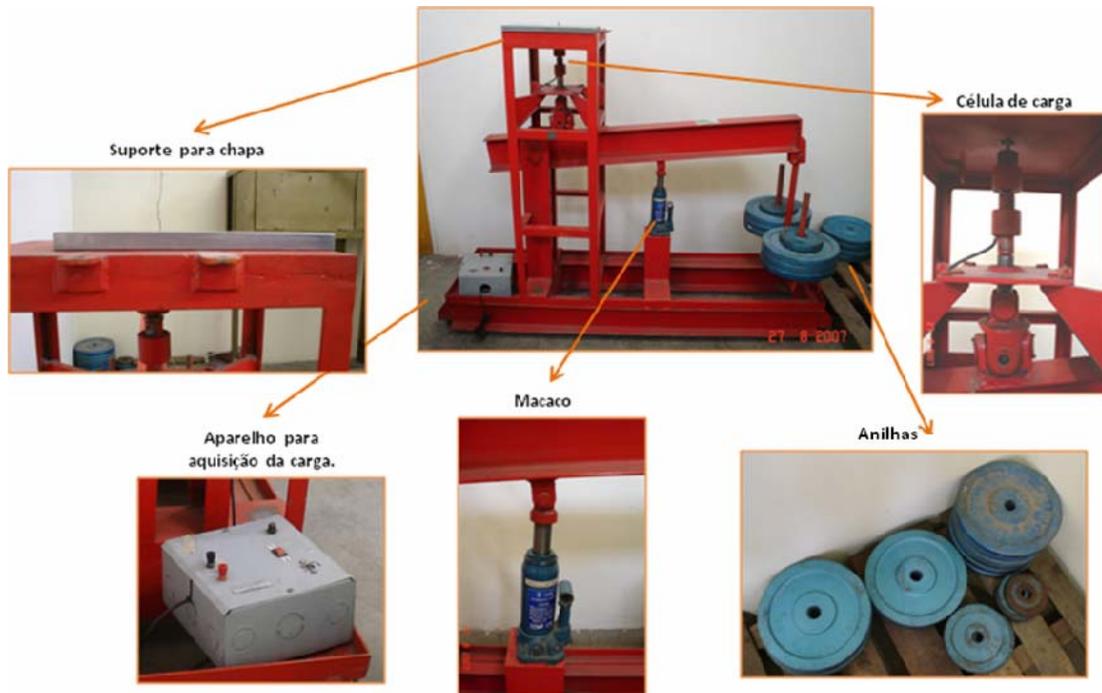


Figura 34: Máquina de implante.



Figura 35: Computador ligado ao equipamento de aquisição de dados.

O procedimento do Teste de Implante funcionou da seguinte forma: cada implante foi aparafusado em uma rosca presa à célula de carga (figura 36 a). Acima da célula de carga existia uma base onde a chapa a ser soldada no corpo de prova foi apoiada. Esta base possui apenas um furo central, conforme figura 36 b, onde o implante foi colocado até alcançar a superfície da chapa.



Figura 36: Implante aparafusado (a) vista inferior (b) vista superior.

Deste modo foi decidido cortar as chapas em tamanhos menores de 33 mm de largura a fim de permitir a realização do ensaio.

Depois que uma extremidade do implante estivesse aparafusada e a outra estivesse nivelada com a superfície da chapa, a solda era realizada. As chapas IT e II foram soldadas com arame tubular, enquanto a chapa I2 foi soldada com eletrodo revestido.

Da mesma forma que no Teste Tekken, o arame foi verificado para que não apresentasse oxidação e toda vez que uma solda fosse realizada, o carretel de arame era retirado da máquina e guardado adequadamente.

Para o teste de Implante uma nova embalagem de eletrodos revestidos foi aberta e os mesmos foram armazenados em uma estufa a 50°C. Esses cuidados foram tomados para que os consumíveis não fossem expostos à umidade do ar, o que aumentaria o risco de formação de trincas por hidrogênio no aço testado.

Cada chapa suporte foi marcada para que cada cordão de solda tivesse exatamente 150 mm de comprimento.

Assim como no Teste Tekken, em cada chapa foram feitas 4 marcações de 3 cm e cada vez que o soldador passava por esses pontos a voltagem e a amperagem eram anotadas, conforme figura 37. O tempo de soldagem de cada ensaio foi cronometrado para que a velocidade de soldagem pudesse ser calculada.

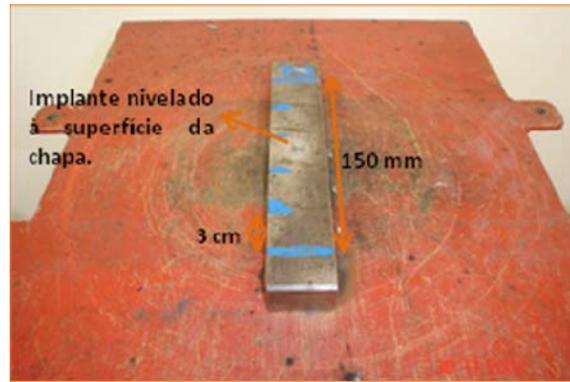


Figura 37: Implante e chapa antes da solda e marcações.

Simultaneamente à medição do tempo de soldagem, a temperatura foi medida durante a soldagem com um termômetro digital infravermelho marca ICEL TD-985. O termômetro utilizado possui capacidade de medir temperaturas variando entre -50°C e 1600°C com tempo de resposta de menos de 1 segundo e exatidão de aproximadamente 3,5% para temperaturas entre 538°C e 1300°C (exatidão especificada para uma emissividade de 0,95).

O termômetro foi fixado de forma que permanecesse estático e ligado durante todo o tempo necessário. Com isso o tempo de resfriamento da ZTA entre as temperaturas de 800°C e 500°C foi cronometrado. A temperatura ambiente, o preaquecimento e a temperatura exata em que a carga foi aplicada também foram medidos.



Figura 38: Termômetro digital infravermelho.

O termômetro foi colocado a uma distância de aproximadamente 80 cm da chapa com o implante. Para que o laser ficasse posicionado na ZTA da solda, foi feita uma marcação de 7 mm partindo do centro do implante. A emissividade do termômetro foi colocada em 0,6, para compensar a radiação emitida pelo arco

elétrico e a fumaça gerada pela solda. Este valor de emissividade foi determinado depois de várias tentativas de medir a temperatura.

No manual do termômetro infravermelho existe uma tabela com valores de emissividades utilizadas para determinados materiais. A maior parte (90% das aplicações típicas) dos materiais orgânicos e pintados ou superfícies oxidadas tem uma emissividade de 0,95. Já superfícies metálicas polidas ou brilhantes apresentam baixa emissividade.

A célula de carga foi ligada a um aparelho para aquisição de dados, que obtinha medições em volts, e foi conectado a um computador que armazenava as variações de voltagens e exibia os resultados em forma de gráfico de tempo versus voltagem.

Os valores de carga aplicados foram obtidos utilizando-se um sistema de aquisição de dados do tipo A/D (analógico / digital). A carga foi aplicada após a soldagem e quando a temperatura da solda atingiu 150°C, conforme a norma.

A tabela 15 mostra os parâmetros de soldagem para o Teste de Implante.

Tabela 15: Dados da soldagem dos implantes.

Corpo de prova	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	ΔT ₈₋₈ (°C)	Pré-aquecimento (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura de aplicação da carga (°C)	Tempo de soldagem (s)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Ponto	Voltagem (V)	Amperagem (A)	Aporte de calor (KJ/mm)
I1-1	801	502	13,37	110	31,5	154	48,22	3,11	1	23,5	162	0,98
									2	23,5	193	1,17
									3	23,5	189	1,14
									4	23,5	189	1,14
I1-2				106	28,5	154	55,36	2,71	1	23,5	202	1,40
									2	23,5	189	1,31
									3	23,5	198	1,37
									4	23,5	200	1,39
I1-3				105,8	33,2	155	44,15	3,4	1	23,5	191	1,06
									2	23,5	187	1,03
									3	23,5	181	1,00
									4	23,5	185	1,02
I1-4				93,9	25	152	43,69	3,43	1	23,5	177	0,97
									2	23,5	169	0,93
									3	23,5	173	0,95
									4	23,5	185	1,01
I2-1	849	501	11,97	109,5	34,7	154,3	40,4	3,71	1	28	157	0,95
									2	30,4	159	1,04
									3	27,5	160	0,95
									4	28,1	160	0,97
I2-2	830	498	11,34	94	30	154,5	34,84	4,3	1	35	159	1,04
									2	23	157	0,87
									3	26	160	0,77
									4	27	163	0,82
I2-3	844	500	22,03	100,1	31,3	152	49,73	3,02	1	23,3	163	1,01
									2	25,5	160	1,08
									3	22	163	0,95
									4	23,5	165	1,03
I2-4				94,8	32,5	155	33,9	4,4	1	23	159	0,86
									2	27	157	0,77
									3	22	161	0,84
									4	29	160	0,84
IT-1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
									2	-	-	-
									3	-	-	-
									4	-	-	-
IT-2	810	484	13,28	90,7	27	imediatamente após a soldagem	54,69	2,74	1	23,5	218	1,50
									2	23,5	206	1,41
									3	23,5	198	1,36
									4	23,5	181	1,24

Segundo a norma AFNOR NF A89-100 ⁽²¹⁾ e a recomendação do IIW, IIS/IIW-447-73 ⁽²⁰⁾ as cargas deveriam ser aplicadas durante no mínimo 16 horas. Assim, foi decidido aplicar a carga por exatamente 24 horas. O computador e o programa Catman permaneceram ligados durante todo o período da aplicação da carga, registrando cada variação que ocorresse.

O mesmo procedimento foi repetido para cada um dos implantes, cada um em um dia. Assim, foram necessários 10 dias para a realização de todo o teste. As soldas prontas estão apresentadas nas figuras 39-44.



(a)



(b)

Figura 39: Soldas com arame tubular (a) I1-1 e (b) I1-2.



(a)



(b)

Figura 40: Soldas com arame tubular (a) I1-3 e (b) I1-4.

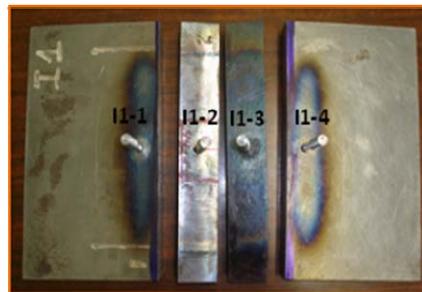


Figura 41: Parte de trás das soldas com arame tubular I1-1, I1-2 e I1-4.



(a)



(b)

Figura 42: Soldas com eletrodo revestido (a) I2-3 e (b) I2-4.

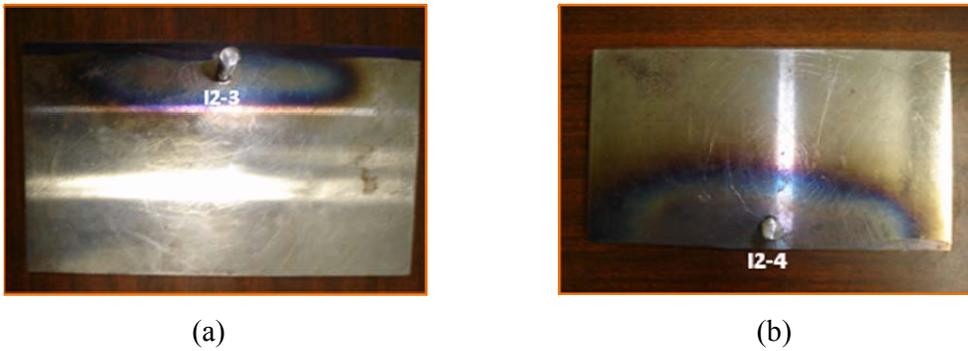


Figura 43: Parte de trás das soldas com eletrodo revestido (a) I2-3 e (b) I2-4.



Figura 44: Soldas com arame tubular (a) IT-1 e (b) IT-2.

Em seguida, as chapas foram cortadas em seções transversais a solda, de forma que o implante soldado ficasse posicionado no centro. Cada seção foi então cortada, novamente transversalmente a solda, no centro do implante com uma serra de 1,5 mm de espessura.

Foi escolhida uma serra com esta espessura para que o mínimo de material fosse perdido, já que cada implante possui diâmetro de 6 mm. Foram obtidas duas amostras para cada implante, sendo marcadas como lado A e B cada uma. Na figura 45 estão as imagens do corte do implante IT-2. As dimensões exatas de cada amostra estão na tabela 16:

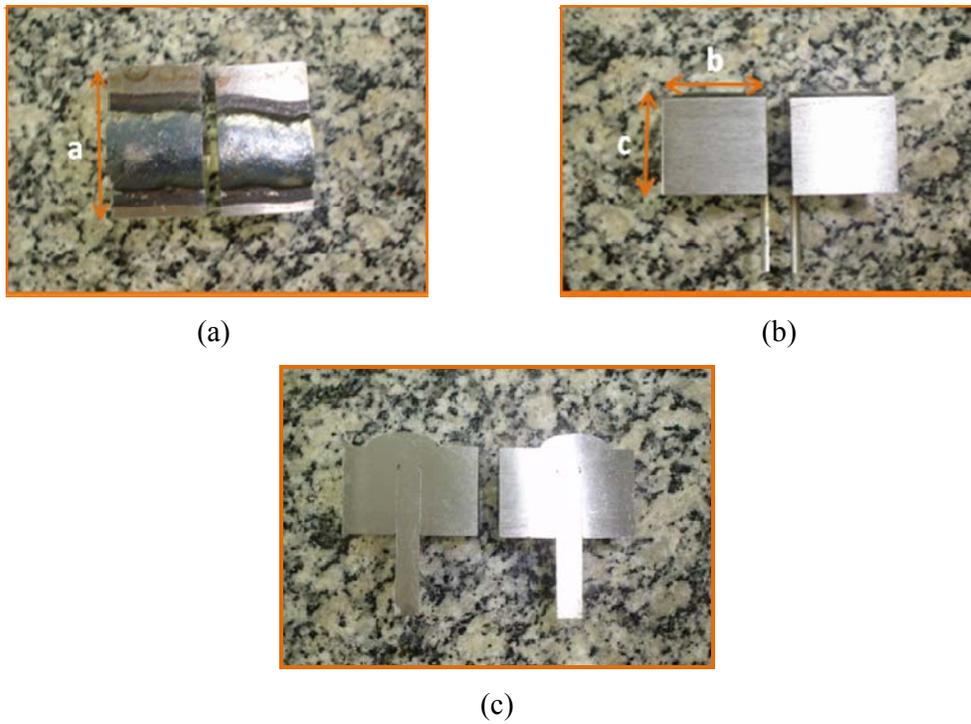


Figura 45: Cortes e dimensões.

Tabela 16: Dimensões das amostras.

Amostra	a (mm)	b (mm)	c (mm)
I1-1A	31,4	21,7	19
I1-1B	30,1	20,0	19
I1-2A	30,5	19,1	19
I1-2B	31,1	20,0	19
I1-3A	31,0	20,0	19
I1-3B	31,1	21,4	19
I1-4A	30,1	19,7	19
I1-4B	31,4	21,3	19
I2-1A	31,1	20,0	19
I2-1B	31,0	21,9	19
I2-2A	31,0	20,7	19
I2-2B	31,0	20,7	19
I2-3A	30,9	20,3	19
I2-3B	30,0	20,5	19
I2-4A	30,0	20,1	19
I2-4B	30,9	22,4	19
IT-1A	31,4	21,0	19
IT-1B	31,4	21,0	19
IT-2A	31,5	21,3	19
IT-2B	31,5	20,9	19

8.2.3.2 Cálculo da carga

Um procedimento importante foi o cálculo da carga aplicada para cada um dos implantes. A carga foi calculada com relação ao menor diâmetro do implante, ou seja, a parte da rosca menor (entalhe helicoidal), exceto para o caso IT-1. Essa dimensão foi medida no projetor de perfil, como já foi apresentado na tabela 13.

Foi decidido aplicar uma carga equivalente a $3/4\sigma_y$ do MB, exceto para o caso IT-1, onde foi usado σ_y . O valor do limite de escoamento, 541,5 MPa, já havia sido obtido em estudos anteriores.

Segundo a norma, a carga aplicada deve ser equivalente a um valor entre $\sigma_y/2$ até σ_y . O objetivo foi escolher um valor de carga bastante crítico, mas que não rompesse o implante. A carga de cada parafuso foi calculada utilizando as dimensões da figura 46.



Figura 46: Medições da máquina de implante.

$$F \cdot x = f \cdot X$$

$$F \cdot 10 = f \cdot 101$$

$$F = 10,1 \cdot f$$

$$\frac{F}{A_{\text{pino}}} = \frac{3}{4} \cdot \sigma_y$$

$$F = \left(\frac{3}{4} \cdot \sigma_y \right) \cdot A_{\text{pino}} = 10,1 \cdot f$$

$$F = \left(\frac{3}{4} \cdot \sigma_y \right) \cdot \left(\pi \left(\frac{d^2}{4} \right) \right) = 10,1 \cdot f$$

Onde:

F = carga no corpo de prova

x = distância do centro do pino até a célula de carga = 10 cm

f = peso das anilhas

X = distância do centro do pino até os alteres = 101 cm

d = diâmetro mínimo do implante

Assim, os valores de carga encontrados para cada implante foram os seguintes:

Tabela 17: Cálculo da carga e carga aplicada.

Implante	Carga calculada (Kg)	Carga aplicada (Kg)
I1-1	824,01	840,00
I1-2	813,39	830,00
I1-3	809,23	820,00
I1-4	796,81	810,00
I2-1	849,36	860,00
I2-2	783,54	800,00
I2-3	840,22	860,00
I2-4	775,07	790,00
IT-1	674,08	690,00
IT-2	1515,90	1560,00

8.2.3.3

Análise por microscopia ótica e eletrônica de varredura

No caso do Teste de Implante, não foi realizado o ensaio de líquidos penetrantes. Os corpos de prova depois de cortados seguiram o procedimento tradicional para microscopia. Foram lixados na máquina politrix Panambra DP10

com as lixas 150 a 1200 e depois polidos também na politrax Panambra DP10 com pasta de diamante de 3 μm a 1 μm .

Seguindo o mesmo procedimento utilizado no Teste Tekken, inicialmente não foi feito ataque nos corpos de prova, por ser mais fácil localizar trincas de dimensão pequena em uma região polida.

Os implantes soldados foram analisados no MO com aumento de 500 ou 1000 vezes, dependendo do tamanho da trinca encontrada e o programa Axio Vision 4.6 foi utilizado para a medição das trincas. Algumas amostras também foram analisadas no MEV com aumento de 5000 vezes.

Da mesma forma que no Teste Tekken, no Teste de Implante as regiões da ZTA e do MS foram delimitadas com uma caneta de ponta bastante fina. Também foi considerada a região de 1,5 mm^2 para reduzir a área de busca na amostra.

Por fim, as amostras foram atacadas com Nital 2%, depois foram levemente polidas e em seguida foram atacadas com Picral 4% para identificar a microestrutura da região do MS ou da ZTA onde estavam as trincas.

8.2.3.4 Ensaio de microdureza Vickers

Para o Teste de Implante foi realizado o ensaio de microdureza utilizando a mesma carga utilizada no Teste Tekken 200 g. Neste caso as medições foram realizadas seguindo uma linha vertical de 1 cm que passava pelo MB, pela ZTA e pelo MS. Foram selecionadas as amostras que apresentaram as maiores e a menor quantidade de trincas na ZTA para cada processo de soldagem.

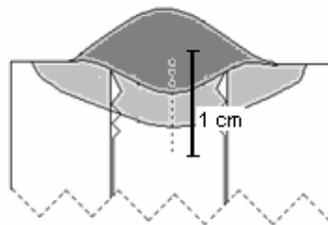


Figura 47: Pontos de microdureza do Teste de Implante.