

9 Resultados

9.1 Medição do hidrogênio difusível pela técnica de cromatografia gasosa

As análises realizadas pela UFMG para cada tipo de consumível resultaram nas seguintes quantidades de hidrogênio difusível depositado:

Tabela 18: Quantidade de hidrogênio difusível nos consumíveis.

Quantidade de hidrogênio difusível (ml/100g)		
	E8010-G	E101T1-GM-H8
Medição 1	71,514	7,046
Medição 2	78,359	8,673
Medição 3	67,692	9,775
Média	72,522	8,498

Segundo o IIW, o valor médio encontrado para o eletrodo E8010-G é um valor alto de hidrogênio, ou seja, é maior que 15 ml/100g de metal depositado, o que já era esperado, por se tratar de um eletrodo celulósico. Já para o arame E101T1-GM-H8, o teor de hidrogênio é baixo, pois está entre 5 e 10 ml/100g de metal depositado, conforme capítulo 4 deste trabalho.

9.2 Carbono equivalente

Utilizando as equações 5 e 6, ambas para aços com baixo teor de carbono, encontramos os seguintes resultados:

Tabela 19: P_{cm} , CE_q nos consumíveis e no metal de base.

	X-80	E8010-G	E101T1-GM-H8
P_{cm}	0,1809	0,2347	0,1825
CE_q	0,2089	0,2535	0,2210

A partir dos valores acima, fica evidente que o metal de base X-80 é menos temperável que os metais de solda E8010-G e E101T1-GM-H8, apresentando os menores valores para os dois índices, P_{cm} e CE_q .

O fato do metal de solda ser mais temperável que o metal de base, pode ser um fator facilitador para que o metal de solda seja mais suscetível à formação de trincas a frio do que o metal de base, e conseqüentemente a ZTA.

9.3 Teste Tekken

Utilizando a equação de Lancaster (equação 1), a intensidade da restrição, R_y , do Teste Tekken para uma chapa com 19 mm de espessura, é igual a 1330 Kg/mm².

A literatura geralmente reporta trincas por hidrogênio de dimensões visíveis a olho nu. No presente caso, não ocorreram fissuras visíveis, buscando-se, portanto técnicas que pudessem auxiliar na identificação destas trincas.

A nível microscópico ocorrem dificuldades como o desconhecimento prévio daquela superfície, além da escassez de exemplos da morfologia deste tipo de trinca, nesta classe de aço.

9.3.1 Líquidos penetrantes

A partir do ensaio de líquidos penetrantes não foi possível detectar nenhuma trinca. Os entalhes em Y das amostras prejudicaram o ensaio, já que o líquido penetrante entrou nestes orifícios causando uma mancha (figura 48).

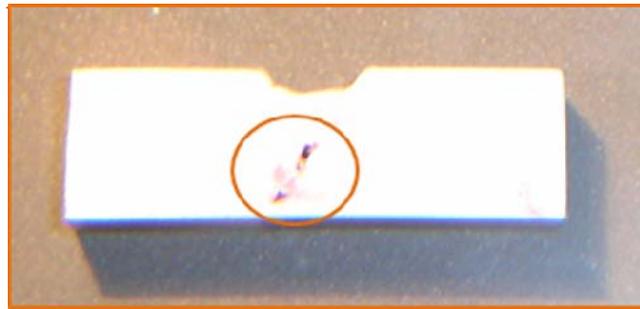
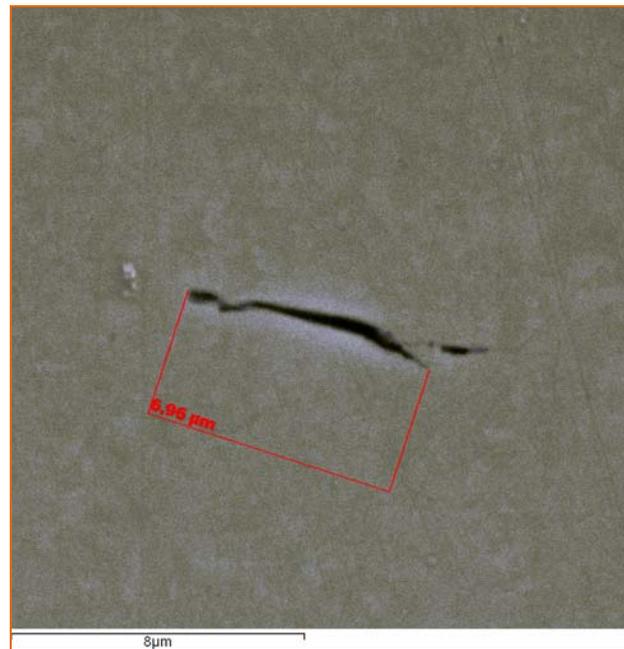


Figura 48: Líquido penetrante.

9.3.2 Análise por microscopia

9.3.2.1 Microscopia eletrônica de varredura

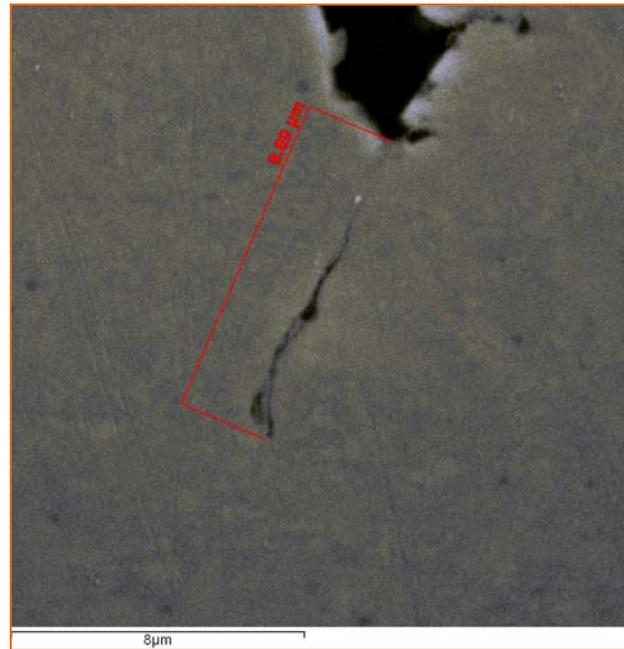
Para o Teste Tekken, algumas amostras sem ataque foram analisadas no MEV, com aumento de 5000 vezes. As amostras analisadas foram T1-1, T2-3, T3-3, T4-2, e foram escolhidas aleatoriamente. Abaixo estão apresentadas as trincas encontradas na ZTA das amostras T4-2.

T4-2 – ZTA (FCAW-G)

(a)



(b)



(c)

Figura 49: amostra T4-2, imagens (a), (b) e (c) do MEV.

No MEV, com aumento de 5000 vezes foi possível encontrar trincas muito pequenas, com tamanho de até 3,14 μm . Trincas tão pequenas não são prejudiciais ao material.

9.3.2.2 Microscopia ótica

Todas as amostras foram analisadas sem e com ataque no MO com aumento de 1000 vezes. Foram encontradas trincas na ZTA e no MS de todas as amostras, exceto no MS da amostra T1-1.

T1-1 (SMAW)

ZTA



Figura 50: Amostra T1-1: ZTA sem ataque.

T1-4 (SMAW)

ZTA – sem e com ataque



(a)



(b)

Figura 51: Amostra T1-4: imagens (a) e (b): ZTA sem e com ataque.

T1-3 (SMAW)

MS – sem e com ataque

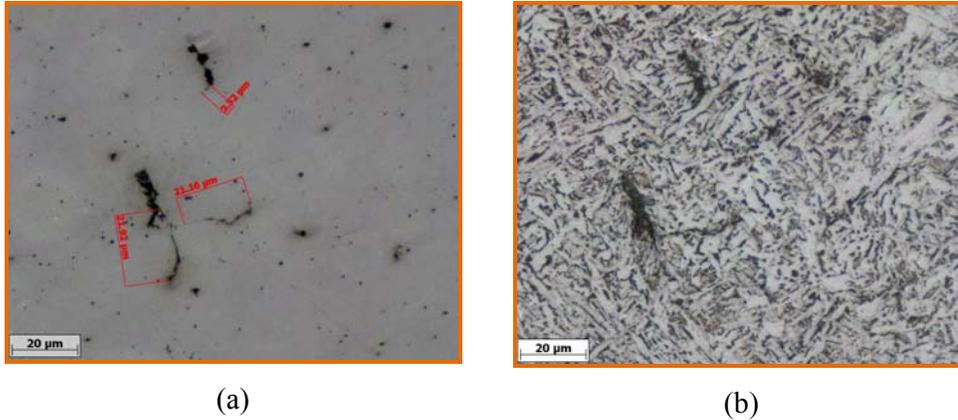


Figura 52: Amostra T1-3: imagens (a) e (b): MS sem e com ataque.

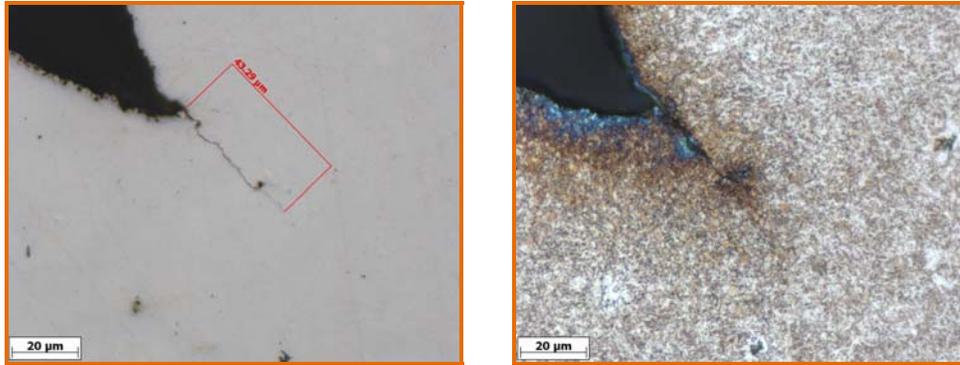
A ZTA das amostras T1-1 e T1-4, figuras 50 e 51, mostram pequenas trincas, com 2,18 e 3,14 μm de comprimento, que se originaram a partir de uma inclusão alongada. Isso é bastante comum para trincas induzidas por hidrogênio, já que as discontinuidades podem agir como zonas de concentração de hidrogênio, gerando microtrincas.

A presença de discontinuidades, tais como inclusões, precipitados e porosidades, característicos do MS, fazem com que esta região seja ainda mais suscetível a trincas de hidrogênio originadas a partir de discontinuidades do que a ZTA. Isto pode ser visto na amostra T1-3 (figura 52), onde uma discontinuidade originou duas trincas, com 21,92 e 21,16 μm de comprimento, enquanto outra gerou uma trinca menor de 3,52 μm de comprimento.

No caso da amostra T1-4, depois de realizado o ataque (figura 51 (b)), pode-se ver que a pequena trinca se localiza na região de grãos grosseiros da ZTA e é uma trinca transgranular.

T3-3 (FCAW-G)

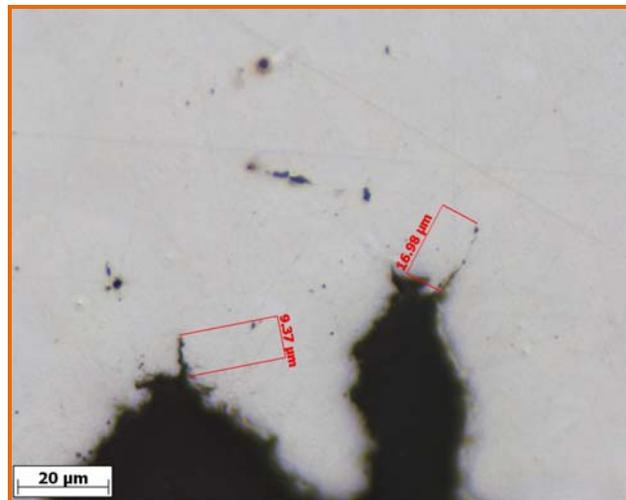
ZTA – sem e com ataque



(a)

(b)

ZTA – sem ataque



(c)

Figura 53: Amostra T3-3: imagens (a), (b) e (c): ZTA sem e com ataque.

T4-4 (FCAW-G)

ZTA/MS – sem e com ataque

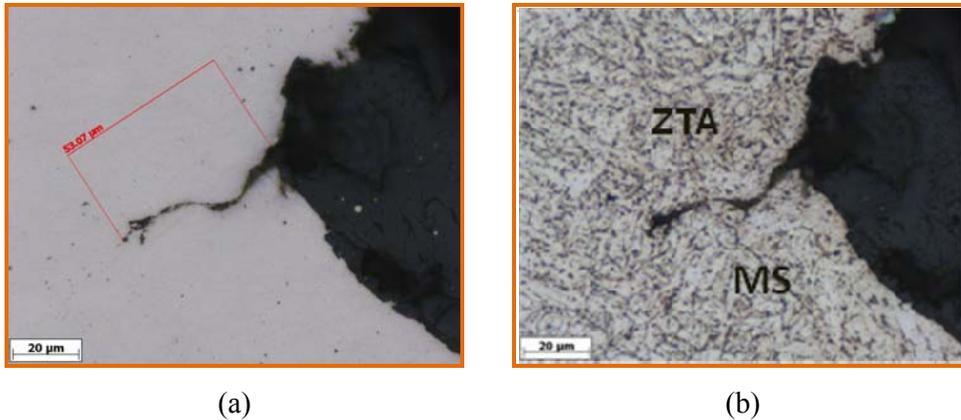


Figura 54: Amostra T4-4: imagens (a) e (b): região de ligação entre a ZTA e o MS sem e com ataque.

T4-1 (FCAW-G)

MS – sem e com ataque

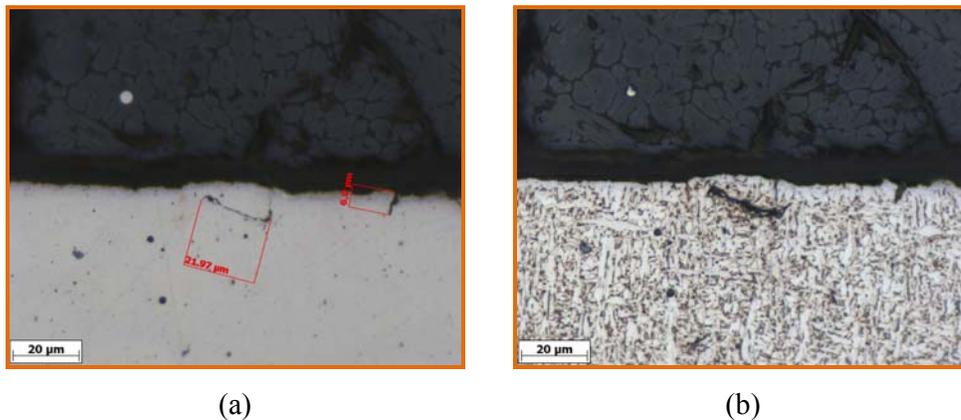


Figura 55: Amostra T4-1: imagens (a) e (b): MS sem e com ataque.

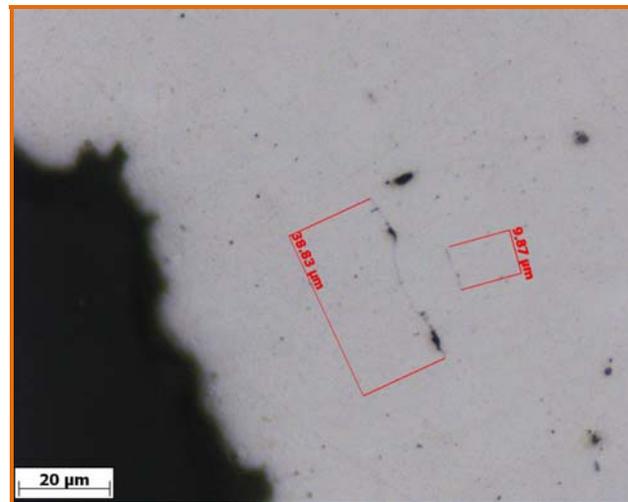
A ZTA da amostra T3-3 apresenta trincas originadas a partir do entalhe, onde existe maior concentração de tensões, facilitando a propagação das trincas.

Também na amostra T4-4 podem ser encontradas trincas originadas a partir do entalhe Y, como mostra a figura 54. Nesta imagem, a trinca está localizada na região de transição entre a ZTA (acima da trinca) e o MS (abaixo da trinca).

Na amostra T4-1 também foram encontradas trincas também originadas a partir do entalhe, porém, neste caso localizadas no MS (figuras 55 (a) e (b)).

T3-4 (FCAW-G)

ZTA – sem e com ataque



(a)



(b)



(c)

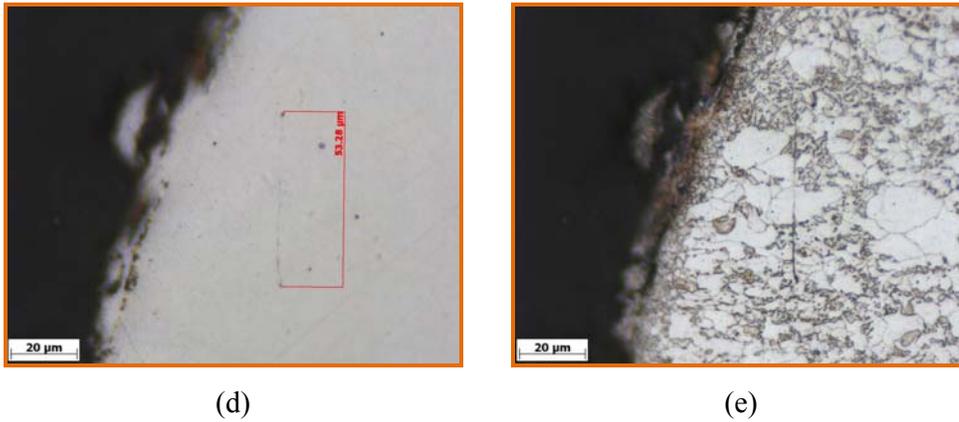


Figura 56: Amostra T3-4: imagens (a), (b), (c), (d) e (e): ZTA sem e com ataque.

Em algumas amostras foram encontradas trincas induzidas por hidrogênio próximas da região do entalhe, apesar de não terem sido originadas a partir do entalhe, isto também ocorre pela grande concentração de tensões nesta região. Na amostra T3-4, foram encontradas trincas transgranulares nas regiões de grãos finos e subcrítica da ZTA, figura 56 (c) e (e), respectivamente.

T1-3 (SMAW)

ZTA – sem e com ataque

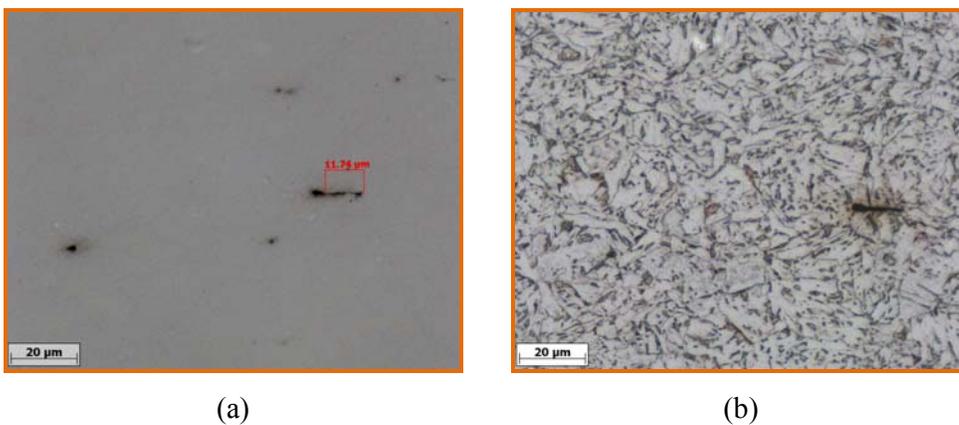
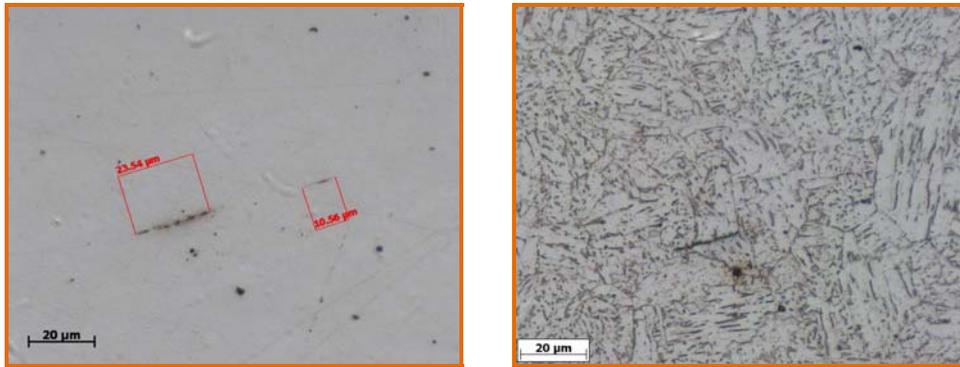


Figura 57: Amostra T1-3: imagens (a) e (b): ZTA sem e com ataque.

T4-3 (FCAW-G)

ZTA – sem e com ataque



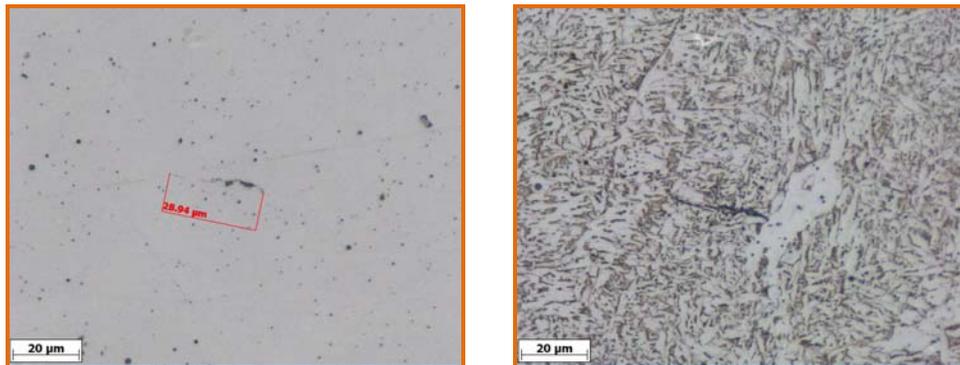
(a)

(b)

Figura 58: Amostra T4-3: imagens (a) e (b): ZTA sem e com ataque.

T2-1 (SMAW)

MS – sem e com ataque



(a)

(b)

Figura 59: Amostra T2-1: imagens (a) e (b): MS sem e com ataque.

T2-3 (SMAW)

MS – sem e com ataque

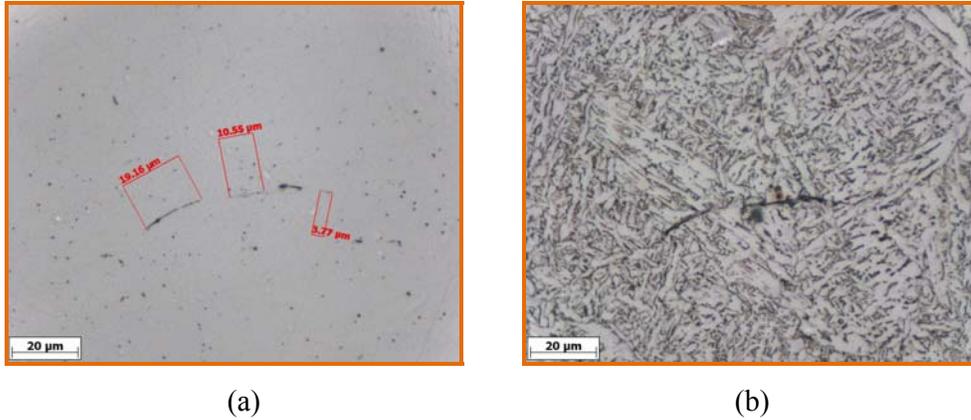


Figura 60: Amostra T2-3: imagens (a) e (b): MS sem e com ataque.

Mais trincas induzidas por hidrogênio estão apresentadas nas figuras 57 – 60. A figura 57 mostra uma trinca originada a partir de uma inclusão na região de grãos grosseiros da ZTA. Já a figura 58 ilustra uma trinca formada a partir de várias descontinuidades pequenas, também na região de grãos grosseiros da ZTA. Ambas são trincas que cortam os grãos (transgranulares).

As figuras 59 e 60 mostram trincas no MS das amostras T2-1 e T2-3.

9.3.3 Quantificação

9.3.3.1 Com relação à quantidade de trincas

Tabelas 20: (a): SMAW – Transversal, (b): SMAW – Paralela, (c): FCAW-G Transversal e (d): FCAW-G – Paralela.

Quantidade de trincas

SMAW - Transversal		
	MS	ZTA
T1-1	-	26,00
T1-2	39,00	141,00
T1-3	12,00	20,00
T1-4	2,00	13,00
MÉDIA	17,67	50,00

(a)

SMAW - Paralela		
	MS	ZTA
T2-1	17,00	35,00
T2-2	6,00	23,00
T2-3	40,00	68,00
T2-4	9,00	21,00
MÉDIA	18,00	36,75

(b)

FCAW-G - Transversal		
	MS	ZTA
T3-1	3,00	5,00
T3-2	2,00	16,00
T3-3	2,00	18,00
T3-4	4,00	12,00
MÉDIA	2,75	12,75

(c)

FCAW-G - Paralela		
	MS	ZTA
T4-1	25,00	49,00
T4-2	6,00	15,00
T4-3	4,00	11,00
T4-4	16,00	66,00
MÉDIA	12,75	35,25

(d)

Tabela 21: Quantidade média de trincas.

Médias			
	MS	ZTA	DIREÇÃO
T1 - SMAW	17,67	50,00	TRANSVERSAL
T2 - SMAW	18,00	36,75	PARALELA
T3 - FCAW-G	2,75	12,75	TRANSVERSAL
T4 - FCAW-G	12,75	35,25	PARALELA

O MS que apresentou maior número de trincas foi o da junta soldada T2-3, com 40 trincas (tabela 20 (b)). Já o que apresentou menor número de trincas no MS foi o da junta T1-1 (tabela 20 (a)). Tanto a junta T2-3, quanto a T1-1 foram soldadas pelo processo SMAW, sendo que a primeira tinha o chanfro cortado na

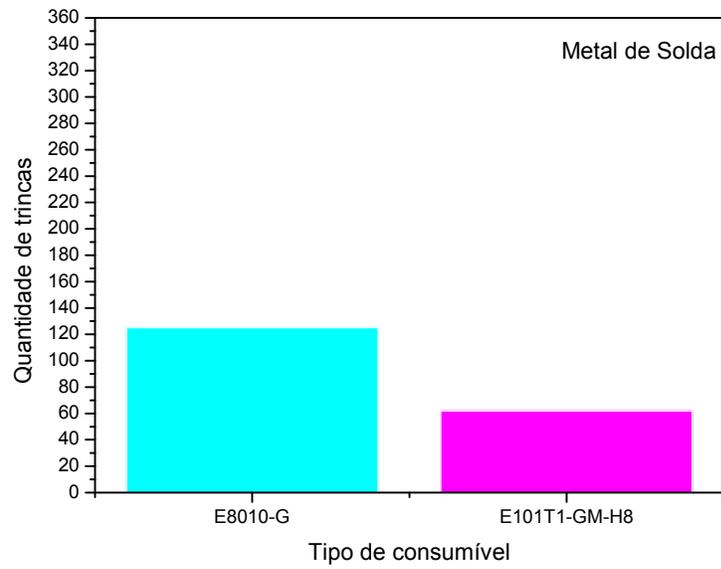
direção paralela à direção de laminação, enquanto a segunda tinha o chanfro cortado na direção transversal à direção de laminação do MB.

A ZTA que apresentou maior número de trincas foi a da junta T1-2, com 141 trincas (tabela 20 (a)), que foi soldada pelo processo SMAW e tinha o chanfro cortado na direção transversal à direção de laminação do MB. A menor quantidade de trincas na ZTA, 5 trincas, foi encontrada na junta T3-1 (tabela 20 (c)), que foi soldada pelo processo FCAW-G e tinha o chanfro cortado na direção transversal a direção de laminação do MB.

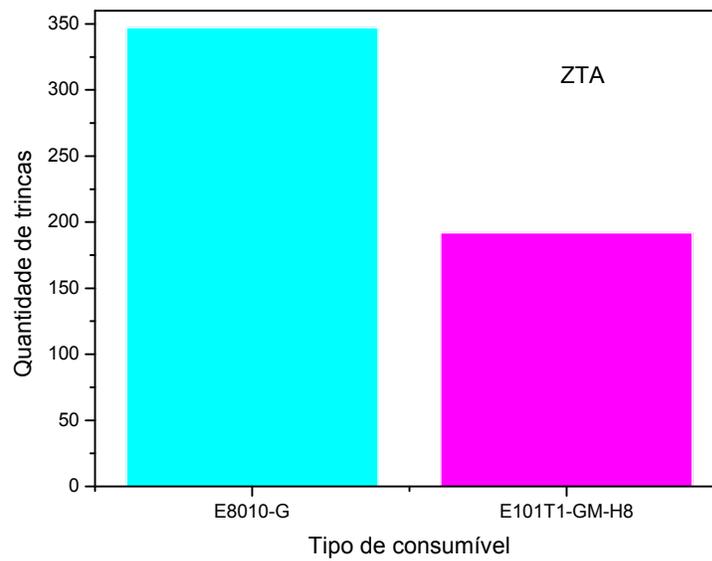
Pela tabela 21, que indica a quantidade média de trincas por chapa, o maior número médio de trincas no MS e na ZTA foi encontrado na chapa T1, que foi soldada pelo processo SMAW e tinha o chanfro cortado na direção transversal a direção de laminação do MB. Já a chapa T3 foi a que apresentou o menor número médio de trincas encontradas no MS e na ZTA. A chapa T3 foi soldada pelo processo FCAW-G e tinha o chanfro cortado na direção transversal à direção de laminação do MB.

9.3.3.2 Com relação ao tipo de consumível

Foram feitos gráficos da quantidade de trincas versus o tipo de consumível, para o MS e para a ZTA somando os grupos T1, T2, T3 e T4.

T1 + T2 + T3 + T4

(a)

T1 + T2 + T3 + T4

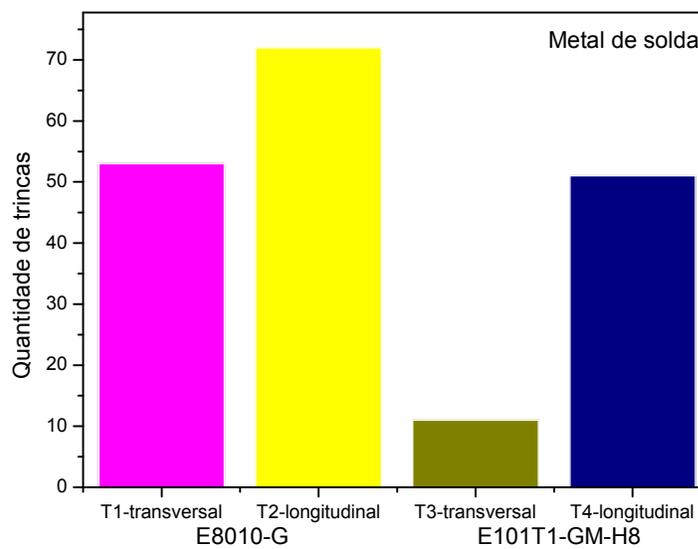
(b)

Figura 61: gráfico da quantidade de trincas x tipo de consumível (a) do MS, (b) da ZTA.

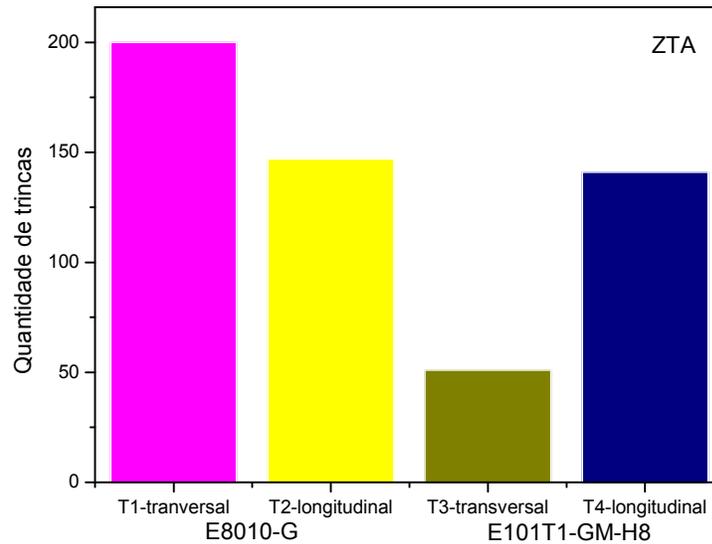
Os gráficos acima relacionam a soma de todas as trincas encontradas nas chapas soldadas, independente da direção de corte do chanfro, com o tipo de consumível. Fica claro que quando a soldagem foi realizada pelo processo SMAW, com o consumível E8010-G, um número maior de trincas foi obtido, tanto no MS, quanto na ZTA. Quando o processo FCAW-G foi utilizado, um menor número total de trincas foi encontrado.

9.3.3.3 Com relação à chapa

Foram feitos gráficos da quantidade de trincas versus a chapa, para o MS e para a ZTA para os grupos T1, T2, T3 e T4, sendo T1 e T2 tendo sido soldados com o consumível E8010-G e T3 e T4 tendo sido soldados com o consumível E101T1-GM-H8, conforme indicado nos gráficos.



(a)



(b)

Figura 62: gráfico da quantidade de trincas x chapa (a) do MS, (b) da ZTA.

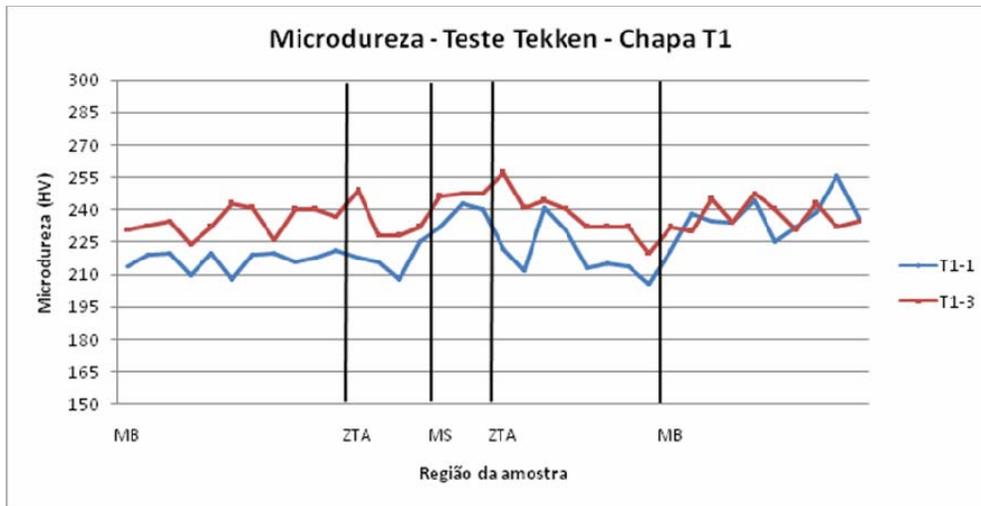
O gráfico 62 (a) indica que as chapas T1 e T2, ou seja, aquelas que foram soldadas com o consumível E8010-G, apresentaram maior quantidade de trincas no MS, sendo que a chapa T2 foi a que apresentou mais trincas que T1. O mesmo ocorreu para a ZTA, entretanto T1 apresentou mais trincas que T2, conforme gráfico 62 (b).

Para o MS quando os chanfros foram cortados na direção paralela a direção de laminação um maior número de trincas foi encontrado tanto para a soldagem com o processo SMAW quanto para o processo FCAW-G. O inverso ocorreu quando a direção de corte do chanfro foi transversal.

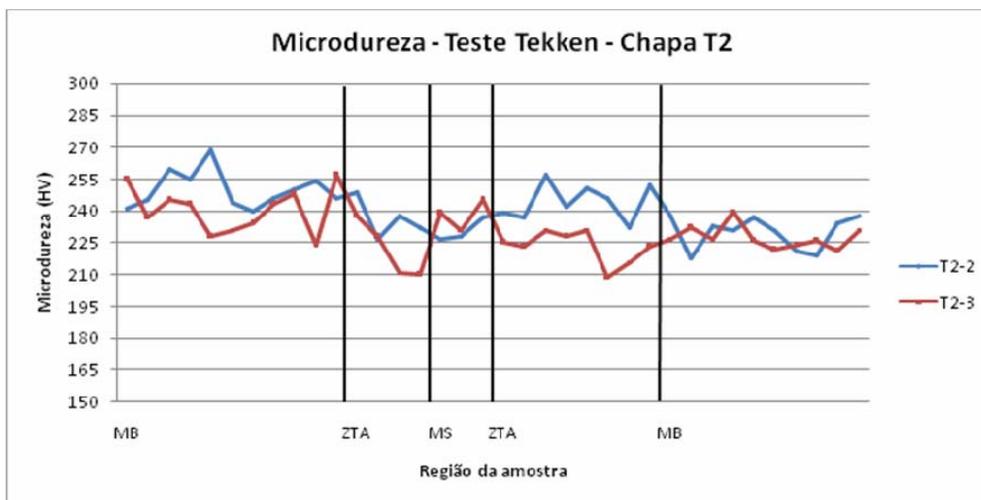
Para a ZTA, quando o processo SMAW foi utilizado e o chanfro foi cortado na direção transversal, mais trincas foram encontradas. Entretanto, quando o processo utilizado foi o FCAW-G, com o chanfro cortado também na direção transversal foi encontrado o menor número de trincas. Com o chanfro cortado na direção paralela a quantidade de trincas permaneceu quase a mesma para os dois processos de soldagem.

9.3.4 Ensaio de microdureza Vickers

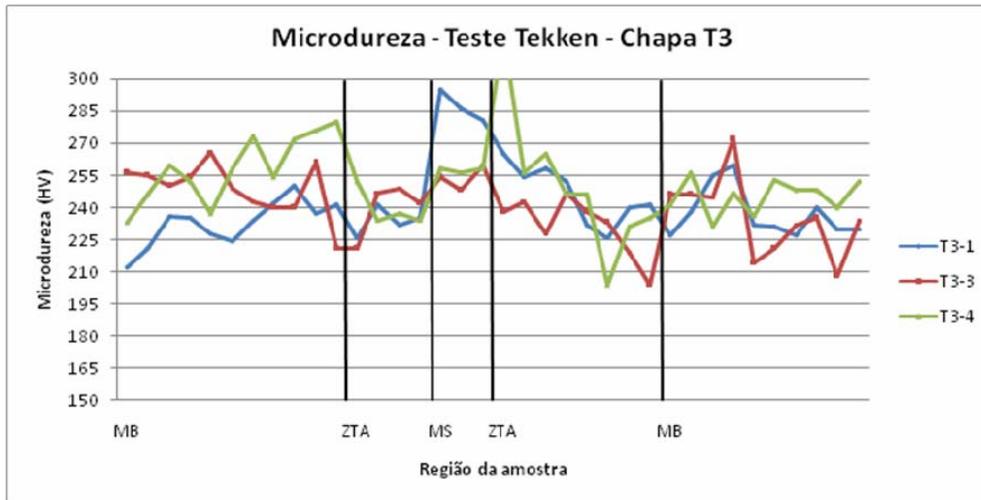
Os resultados de microdureza obtidos para o Teste Tekken estão apresentados nos quatro gráficos abaixo. Cada gráfico representa os valores de microdureza encontrados para cada par de chapas T1, T2, T3 e T4.



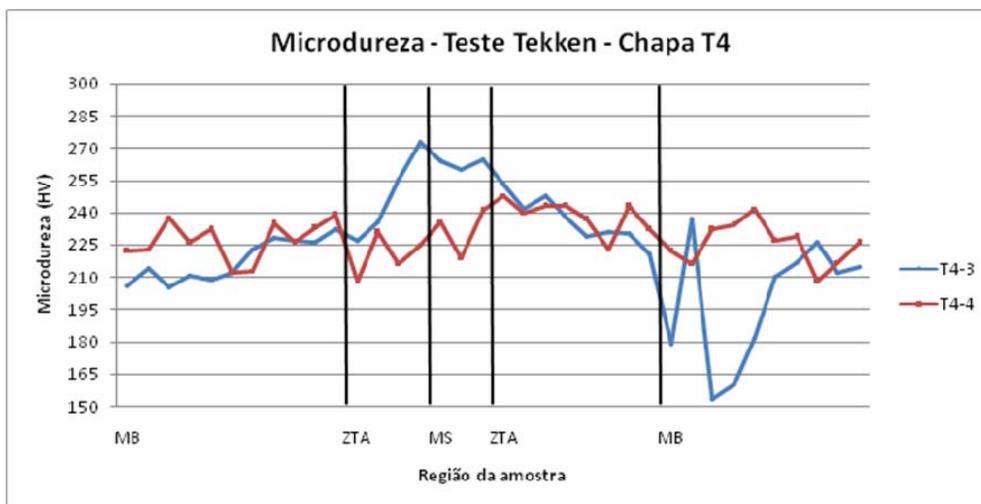
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 63 (a), (b), (c) e (d): gráficos das microdurezas.

A figura 63 (a) mostra que os valores da microdureza foram aproximadamente constantes para as regiões da ZTA e MS, com pequena elevação no MB da amostra T1-1. O mesmo ocorreu para as amostras da chapa T2, como mostra a figura 63 (b). Na figura 63 (c) os valores de microdureza foram maiores na região do MS, para as amostras T3-1 e T3-4, não havendo alteração nos valores da microdureza da amostra T3-3. Da mesma forma, a figura

63 (d) mostra que os valores de microdureza foram maiores na região do MS, para as amostras da chapa T4.

A partir dos gráficos observa-se que a região do MS teve um pequeno aumento nos valores de microdureza em algumas amostras do Teste Tekken analisadas. Porém, não parece haver influência considerável entre os valores da microdureza e a quantidade de trincas encontradas em cada amostra, já que tanto as amostras com menores quantidades de trincas como as com maiores quantidades de trincas apresentaram comportamentos que não parecem ser influenciados pela dureza do MS ou da ZTA.

9.4 Teste de Implante

9.4.1 Tempo de resfriamento

Foi realizada uma amostragem do tempo de resfriamento entre as temperaturas de 800°C e 500°C foi cronometrado para algumas soldas (tabela 22).

Tabela 22: Medidas da taxa de resfriamento Δt_{8-5} .

<i>Amostra</i>	<i>Processo de soldagem</i>	<i>Temperatura de início da medição (°C)</i>	<i>Temperatura de término da medição (°C)</i>	<i>Δt_{8-5} (s)</i>
I1-1	FCAW-G	801,00	502,00	13,37
I2-1	SMAW	849,00	501,00	11,97
I2-2	SMAW	830,00	498,00	11,34
I2-3	SMAW	844,00	500,00	22,03
IT-2	FCAW-G	810,00	484,00	13,28

O tempo de resfriamento foi similar para os processos estudados, no entanto, o processo manual apresentou as maiores e menores taxas de resfriamento, provavelmente devido a forma de execução.

9.4.2 Carga aplicada

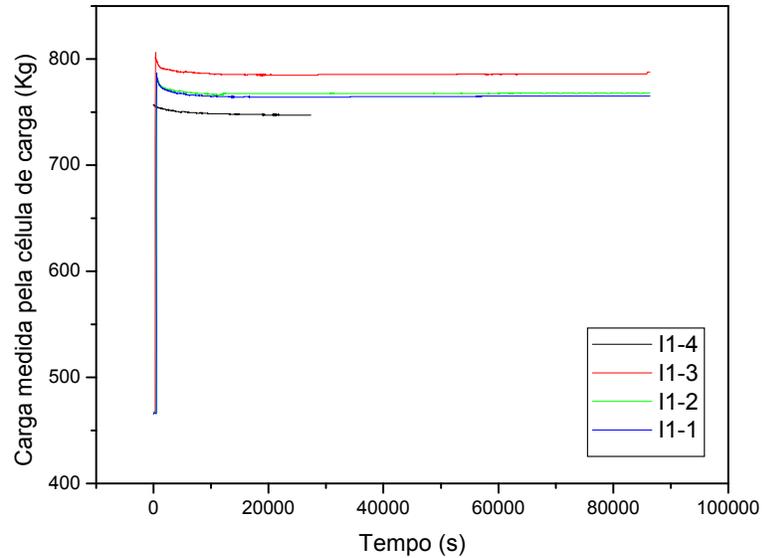
A carga aplicada permaneceu monitorada pela célula de carga durante todo o tempo do ensaio, registrando os resultados em voltagem por tempo, os quais foram posteriormente transformados em carga por tempo, utilizando a tabela de calibração (tabela 23).

Tabela 23: Calibração da célula de carga.

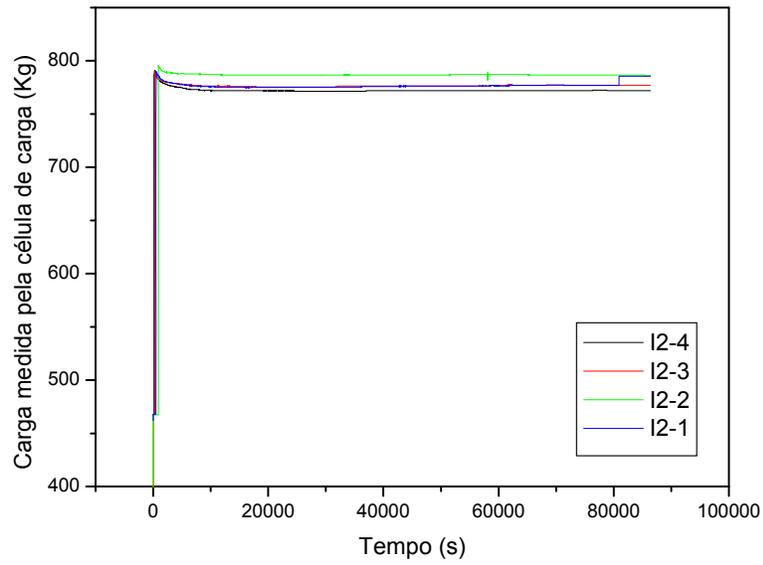
<i>Kgf</i>	<i>mV</i>	<i>mV/Kg</i>
0	800	0,00
500	1092	2,18
1000	1383	1,38
1500	1674	1,12
2000	1970	0,99
2500	2262	0,90

As cargas foram calculadas para cada corpo de prova e como todas as cargas aplicadas apresentaram valores de cerca de 700 Kg, foi feita a média entre os valores 2,18 mV/Kgf e 1,38 mV/Kgf, de onde foi obtido o valor 1,78 mV/Kgf, que foi utilizado para transformar a voltagem em carga.

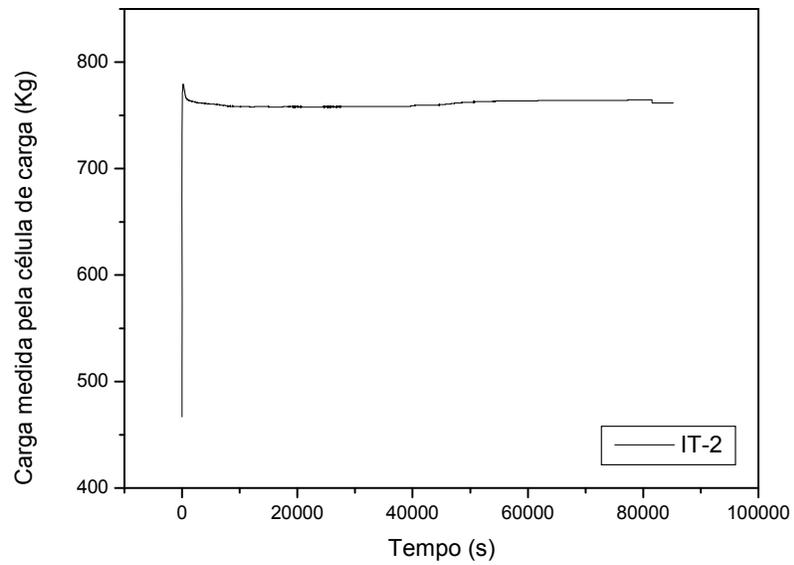
Os resultados obtidos estão apresentados nos gráfico abaixo:



(a)



(b)



(c)

Figura 64: Gráficos das cargas medidas pela célula de carga.

Os gráficos mostram que as cargas permaneceram constantes para todos os ensaios, não apresentando variação considerável. Além disso, nenhum dos implantes rompeu, conforme indicado pela figura 64 (a), (b) e (c), onde não pode ser observada nenhuma queda abrupta.

O único implante que apresentou ruptura foi o IT-1, que não teve sua carga monitorada pela célula. Este implante fraturou alguns minutos após a aplicação da carga e não foi pré-aquecido. A carga aplicada neste caso foi equivalente a σ_y , diferente dos outros casos, onde as cargas aplicadas eram equivalentes a $3/4 \sigma_y$. A fratura do implante IT-1 está na figura 65 (a) e (b), que mostra que a fratura deste implante é dúctil, caracterizada pela presença de dimples (microcavidades esféricas).

A célula de carga apresentou um erro médio de 8,32%, comparado com as cargas efetivamente aplicadas (tabela 24).

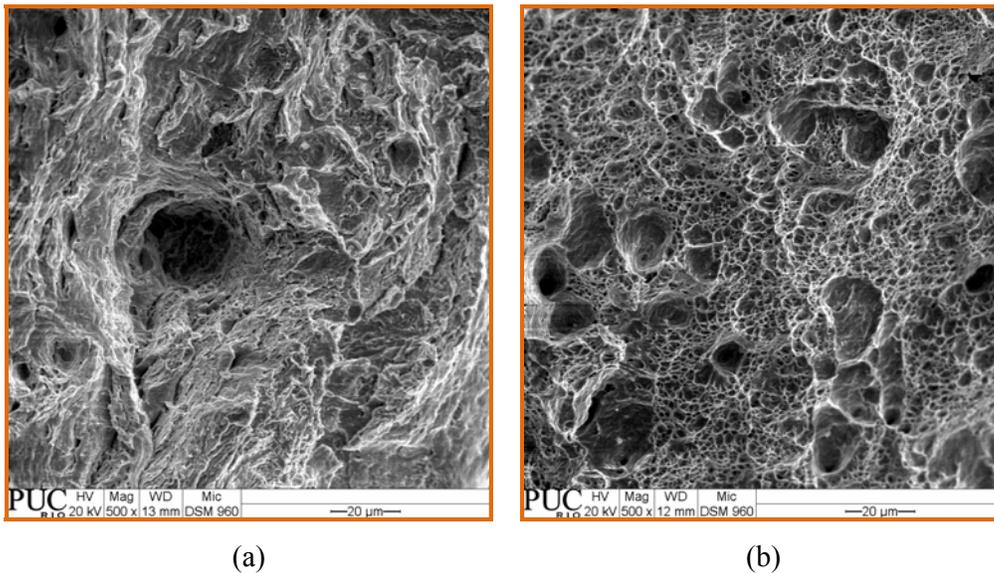


Figura 65 (a) e (b): Amostra IT-1: fratura.

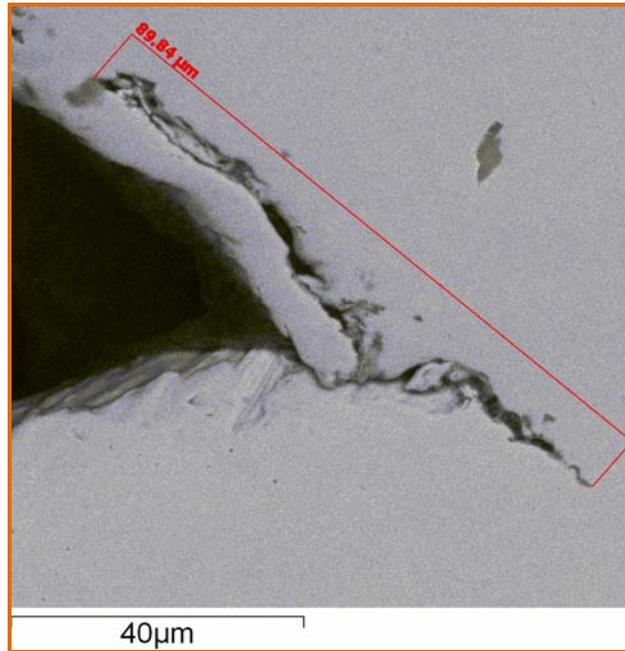
Tabela 24: Erro médio da célula de carga.

Implante	Carga média medida (Kg)	Carga aplicada (Kg)	erro (%)
I1-1	765,00	840,00	8,93
I1-2	767,00	830,00	8,69
I1-3	785,00	820,00	6,55
I1-4	747,00	810,00	11,07
I2-1	775,00	860,00	7,74
I2-2	786,00	800,00	6,43
I2-3	776,00	860,00	7,62
I2-4	771,00	790,00	8,21
IT-1	759,00	690,00	9,64
Média			8,32

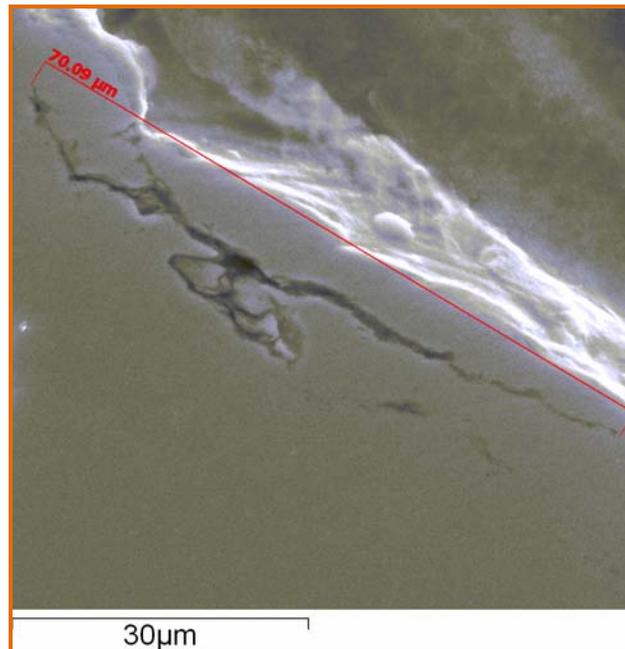
9.4.3 Análise por microscopia

9.4.3.1 Microscopia eletrônica de varredura

A amostra I1-1A foi analisada no MEV com aumento de 500 e 1000 vezes.

II-1A – ZTA (FCAW-G)

(a)



(b)

Figura 66: Amostra I1-1A: imagem (a) e (b): ZTA sem ataque (MEV).

Foram encontradas trincas originadas pelo entalhe e próximas a ele (figura 66 (a) e (b)), onde existe maior concentração de tensões.

9.4.3.2 Microscopia ótica

Da mesma forma que no Teste Tekken, foram feitas imagens sem e com ataque e com aumento de 500 ou 1000 vezes. No Teste de Implante não foram encontradas trincas no MS de nenhuma amostra, somente na ZTA.

I1-1A (FCAW-G)

ZTA – sem ataque

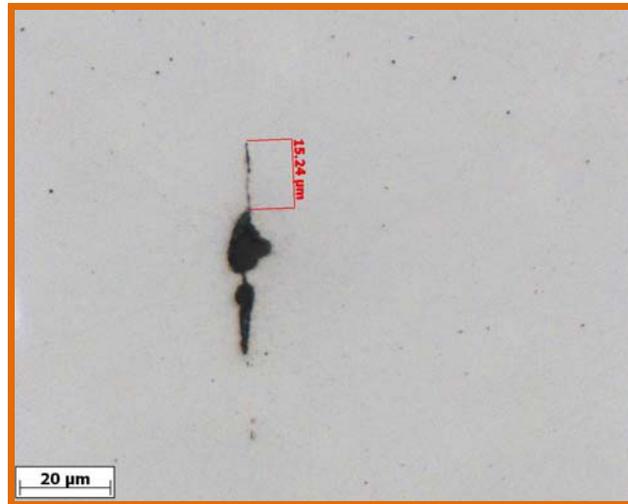
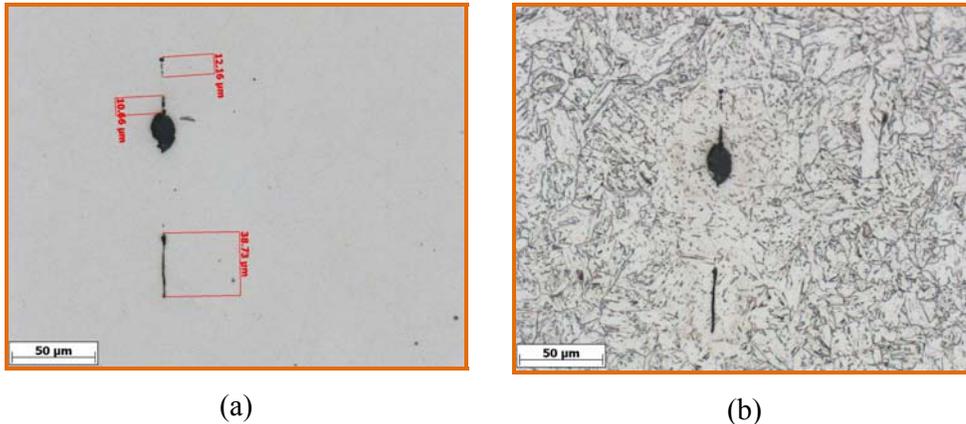


Figura 67: Amostra I1-1A: imagem ZTA sem ataque.

I1-2B (FCAW-G)

ZTA – sem e com ataque



(a)

(b)

Figura 68: Amostra I1-2B: imagens (a) e (b): ZTA sem e com ataque.

I1-4B (FCAW-G)

ZTA – sem ataque

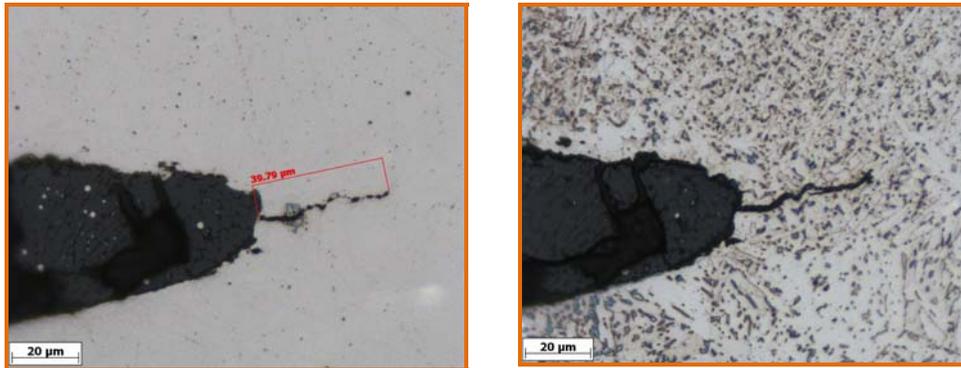


Figura 69: Amostra I1-4B: imagem: ZTA sem ataque.

Assim como no Teste Tekken, no Teste de Implante também foram encontradas trincas formadas a partir de inclusões ou descontinuidades na ZTA. As imagens 67 – 69 representam este caso. Tanto inclusões pequenas, como na figura 69, quanto inclusões maiores (figura 67) podem facilitar a formação de trincas induzidas por hidrogênio.

I1-3A (FCAW-G)

ZTA – sem e com ataque



(a)

(b)

Figura 70: Amostra I1-3A: imagens (a) e (b): ZTA sem e com ataque.

I2-1A (SMAW)

ZTA – sem ataque

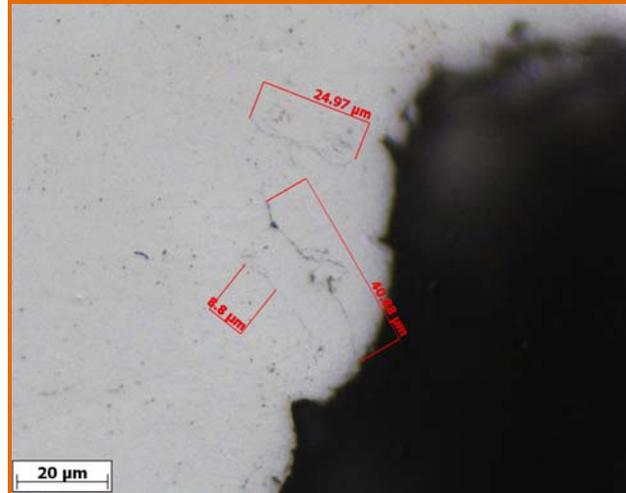


Figura 71: Amostra I2-1A: imagem: ZTA sem ataque.

I2-2A (SMAW)

ZTA – sem ataque

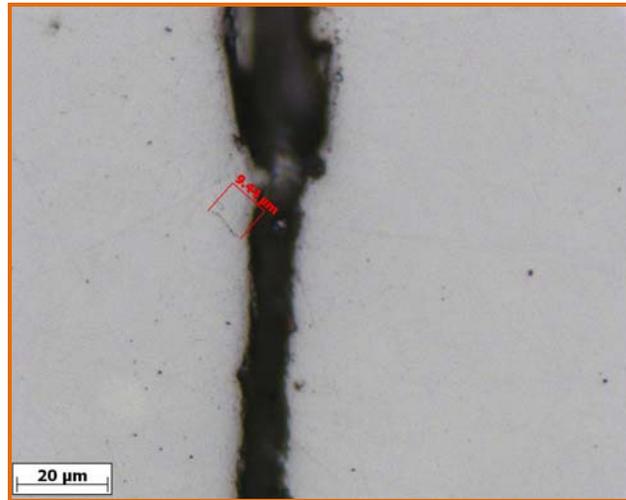


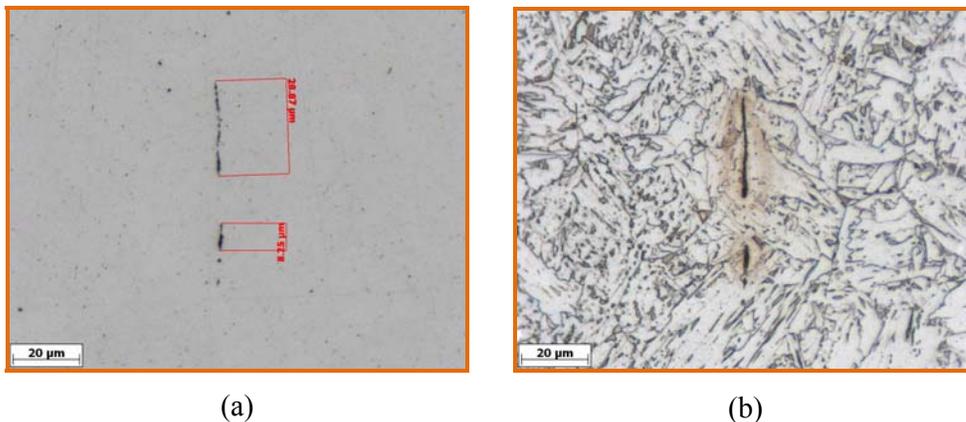
Figura 72: Amostra I2-2A: imagem: ZTA sem ataque.

A figura 70 mostra uma trinca de 39,79 μm originada a partir do entalhe do implante, na região de transição entre o MS (acima da trinca) e a ZTA (abaixo da trinca).

As figuras 71 e 72 mostram trincas bastante finas formadas próximas do entalhe do implante, cujo comprimento varia de 8,8 a 40,88 μm .

I1-2A (FCAW-G)

ZTA – sem e com ataque



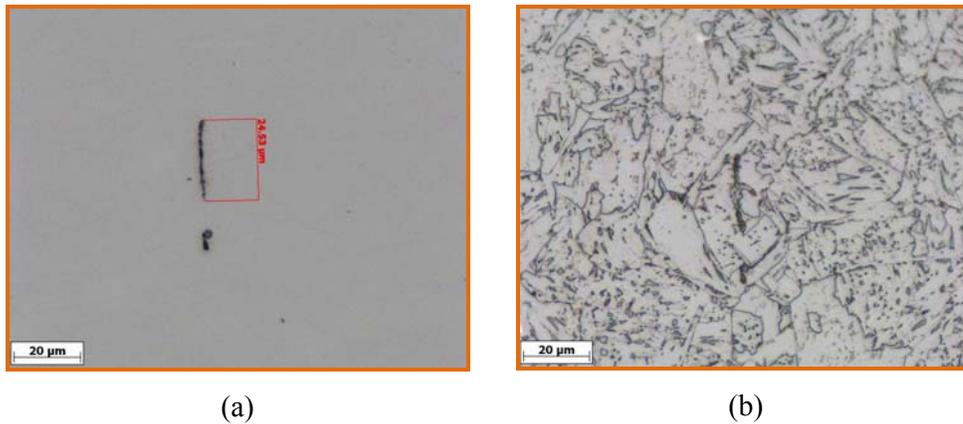
(a)

(b)

Figura 73: Amostra I1-2A: imagem: ZTA sem e com ataque.

I1-3B (FCAW-G)

ZTA – sem e com ataque



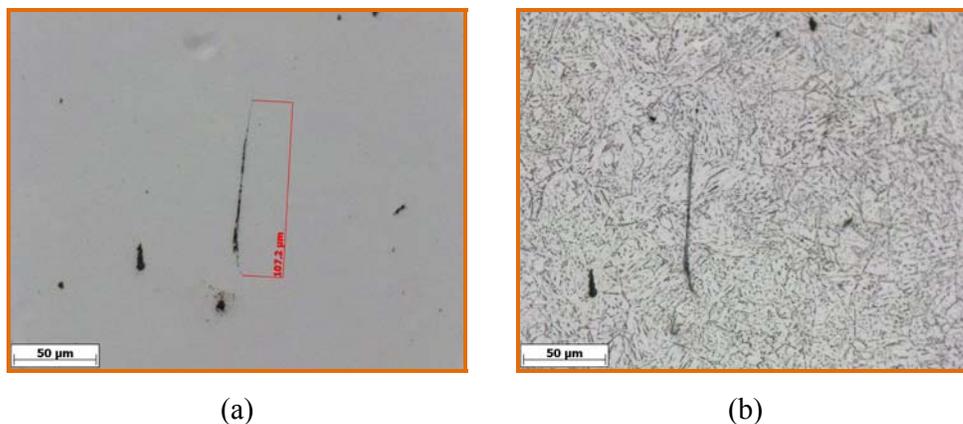
(a)

(b)

Figura 74: Amostra I1-3B: imagem: ZTA sem e com ataque.

I2-3B (SMAW)

ZTA – sem e com ataque



(a)

(b)

Figura 75: Amostra I2-3B: imagem: ZTA sem e com ataque.

I1-1B (FCAW-G)

ZTA – sem ataque



Figura 76: Amostra I1-1B: imagem: ZTA sem ataque.

IT-2A (FCAW-G)

ZTA – sem ataque

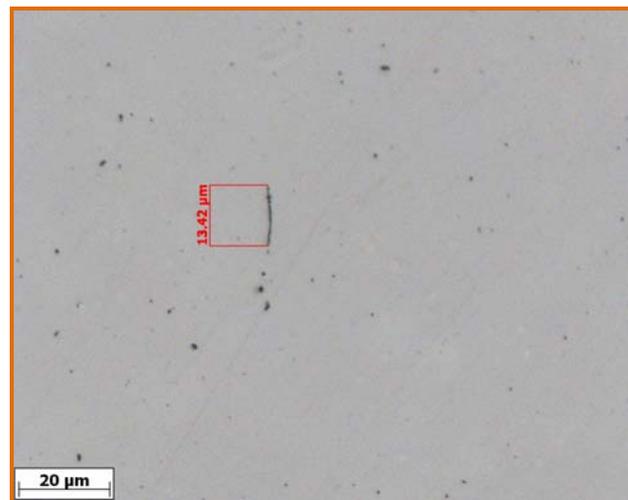


Figura 77: Amostra IT-2A: imagem: ZTA sem ataque.

As figuras 73 – 77 mostram outros exemplos de trinca encontradas na ZTA, que não foram originadas a partir do entalhe ou de descontinuidades. As

Pela tabela 26, que indica a quantidade média de trincas por chapa, o maior número médio de trincas na ZTA foi equivalente para as chapas I1 e I2, apesar de terem sido soldadas por processos distintos. Já a chapa IT apresentou uma quantidade um pouco maior de trincas, porém ainda bastante semelhante as quantidades encontradas nas outras duas chapas.

9.4.4.2 Com relação ao tipo de consumível

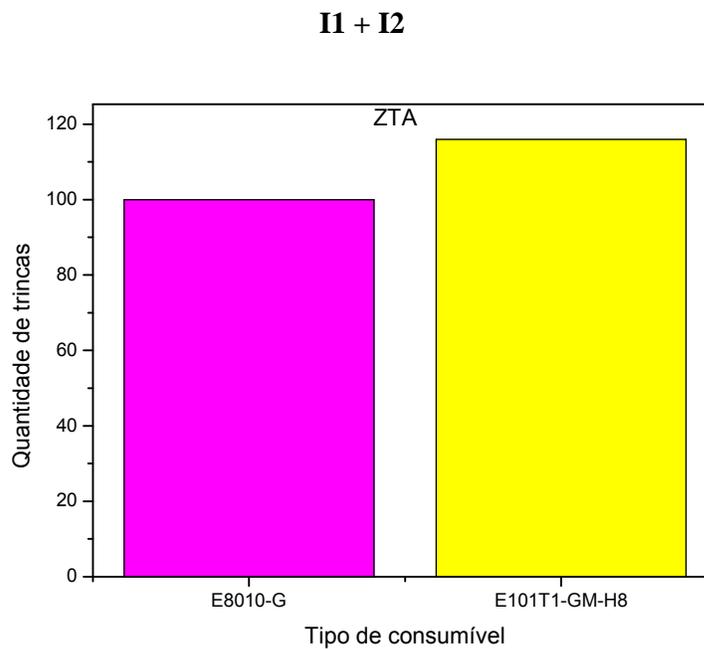


Figura 78: Gráfico: quantidade de trincas x tipo de consumível (ZTA).

Por fim, foi feito o gráfico da quantidade de trincas versus o tipo de consumível. Neste gráfico não foi considerada a chapa IT, já que a comparação ficaria desigual para a quantidade de implantes soldados com cada tipo de consumível.

Neste teste, diferentemente do Teste Tekken, os dois consumíveis apresentaram uma quantidade aproximadamente igual de trincas (gráfico 78).

9.4.5 Ensaio de Microdureza Vickers

Os resultados de microdureza obtidos para o Teste de Implante estão apresentados no gráfico abaixo, que representa os valores de microdureza encontrados nas amostras I1-1B, I1-3B e I2-3A.

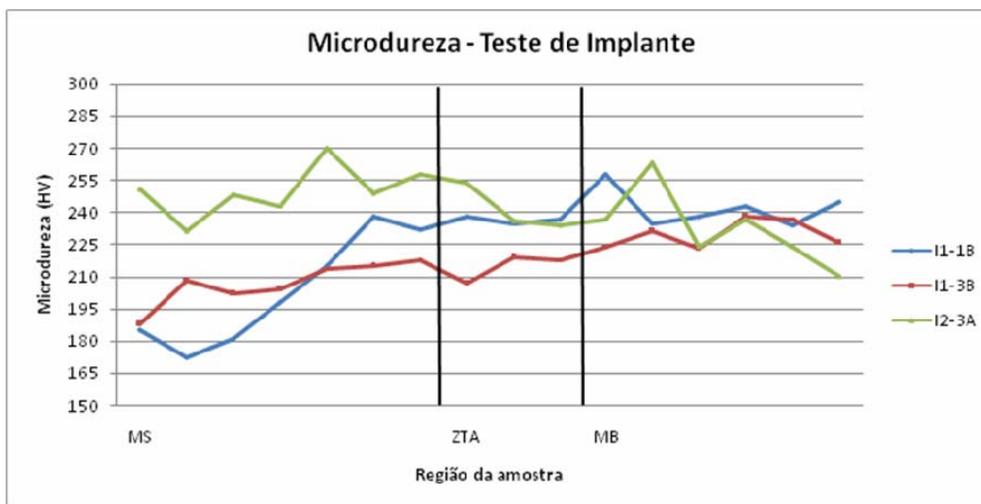


Figura 79: Gráfico de microdurezas.

A partir da figura 79 observa-se que a dureza das amostras I1-1B, I1-3B foi menor na região do MS, enquanto a da amostra I2-3A não mostrou alteração considerável. Da mesma forma que para o teste Tekken, o Teste de Implante não parece sofrer influência considerável dos valores da microdureza, já que tanto as amostras com menor quantidade de trincas como as com maiores quantidades de trincas apresentaram comportamentos que não parecem ser influenciados pela dureza do MS ou da ZTA.