

4 – Resultados

4.1. Perfil do cordão de solda

A figura 27 mostra quatro macrografias das amostras retiradas dos quatro quadrantes do perímetro como mostrado na tabela 8. Elas apresentam as distintas regiões da solda, é possível ver o preenchimento total do chanfro e deposição do metal de solda. Também pode se ver com clareza a ZTA, e a seqüência dos distintos passes empregados durante a soldagem.

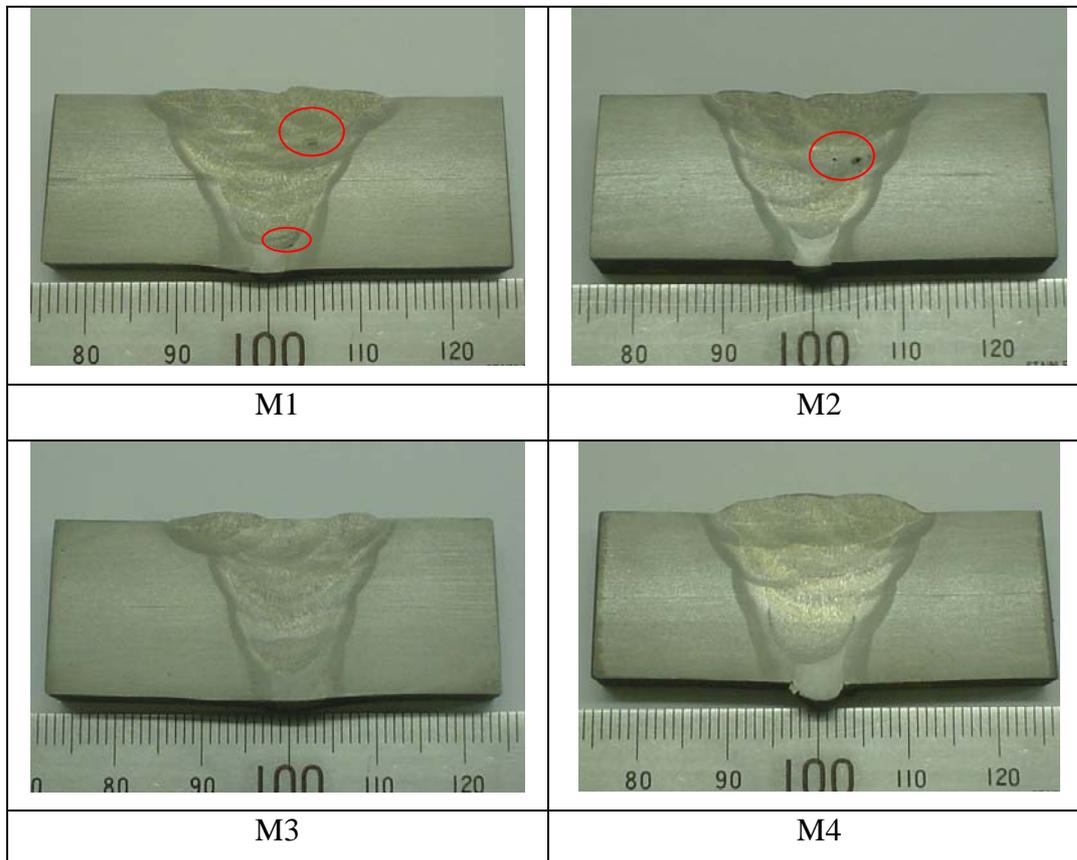


Figura 27 – Macrografia das juntas soldadas.

4.2.Efeito dos parâmetros empregados na soldagem

Durante a execução das soldagens se fez um mapeamento dos parâmetros empregados com a finalidade de relacioná-los principalmente com a ocorrência de defeitos. Também ocorreram variações de voltagem, amperagem e velocidade de soldagem. Na tabela 10 são apresentados os valores médios dos parâmetros de soldagem.

Tabela 10 – Parâmetros empregados na soldagem.

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS				
PASSE	1. RAIZ	2. QUENTE	3. ENCHIMENTO	4. ACABAMENTO
PROCESSO	SMAW	SMAW	FCAW-S	FCAW-S
POLARIDADE	CC-	CC+	CC-	CC-
CORRENTE (A)	157,4	169,4	243,6	232,4
VOLTAGEM (V)	28,3	26,4	20,9	20,1
V. DE DEPOSIÇÃO (mm/seg.)	5,4	5,5	3,05	4,12
APORTE DE CALOR (KJ/mm)	0,62	0,80	1,02	0,85
T. DE RESFRIAMENTO 800-500°C (s)	4,8	6,2	7,9	6,6

O processo em estudo é principalmente o processo de soldagem com arame tubular autoprotetido, o qual fornece 95 % do total do metal de solda da junta. A seguir serão apresentadas as médias dos parâmetros empregados durante a soldagem, e relacionados com os quadrantes do perímetro da junta para o processo FCAW-S:

4.2.1. Relação entre a corrente e a posição de soldagem

Os valores de corrente empregados no processo com arame tubular variam conforme a posição de soldagem. Observa-se que a posição plana **1G**, apresenta maiores intensidades de corrente, e as menores intensidades de corrente ocorrem na posição **4G** ou sobre-cabeça.

Na figura 28 se observa os valores médios de corrente, empregada nas regiões do perímetro do tubo.

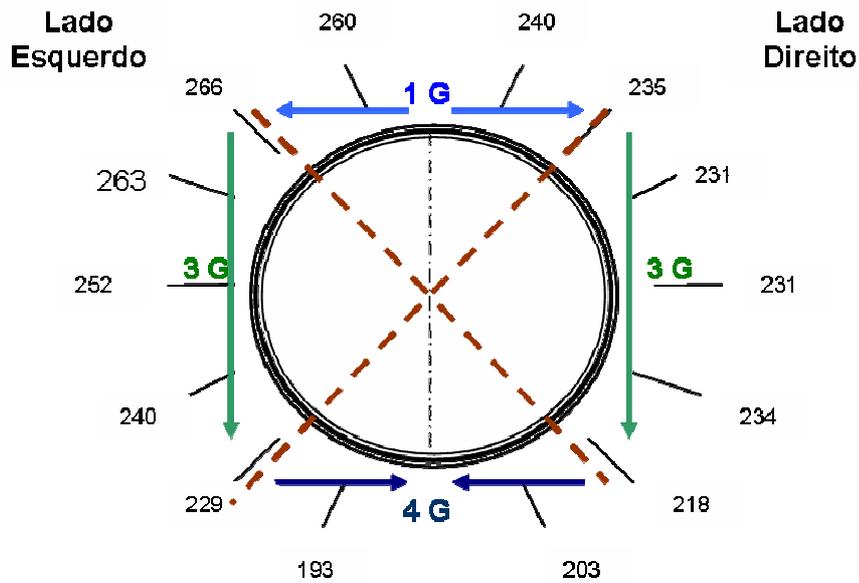


Figura 28 – Valores médios de corrente no perímetro da junta (passes de enchimento e acabamento).

4.2.2. Variação da corrente de soldagem empregada

No gráfico da figura 29 apresentam-se as médias dos valores de corrente referente ao quadrantes do perímetro da junta, medidos em amperes.

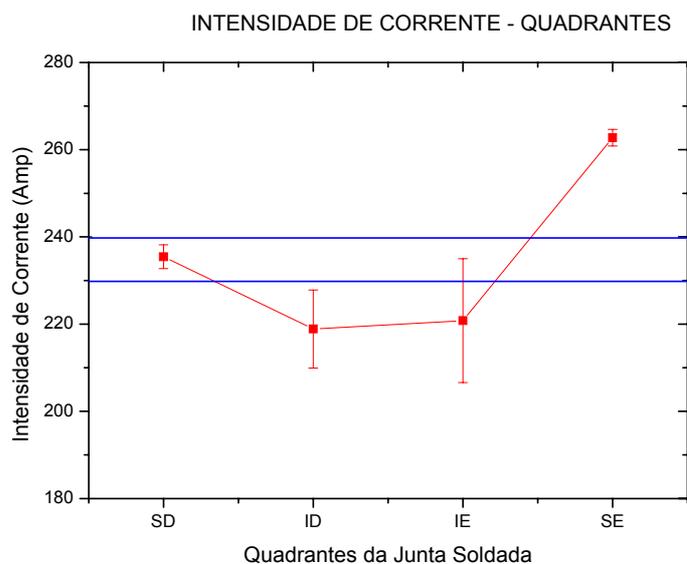


Figura 29 – Médias da corrente empregada por quadrantes.

4.2.3. Efeito do aporte de calor

Para realizar o cálculo do aporte de calor tomou-se como velocidade de soldagem a velocidade média para cada um dos soldadores de arame tubular pelo lado onde eles estavam trabalhando; assim o valor de velocidade empregado para os cálculos de aporte de calor dos quadrantes ID e SD foi de 3,4 mm/seg e para o lado esquerdo (SE e IE) foi de 4,6 mm/seg. Também se considerou como eficiência do processo de arame tubular o valor de 75% [13].

Os resultados dos tempos de resfriamento foram obtidos dos resultados impostos pelo aporte de calor do processo com arame tubular na soldagem da junta. Durante o processo de soldagem, os valores de temperatura de interpasse foram os mesmos utilizados para a temperatura de preaquecimento (120 °C).

Como se observa no gráfico da figura 31 os valores de Aporte de Calor e de tempos de resfriamento entre 800° C e 500° C referentes aos 4 quadrantes da junta são proporcionais.

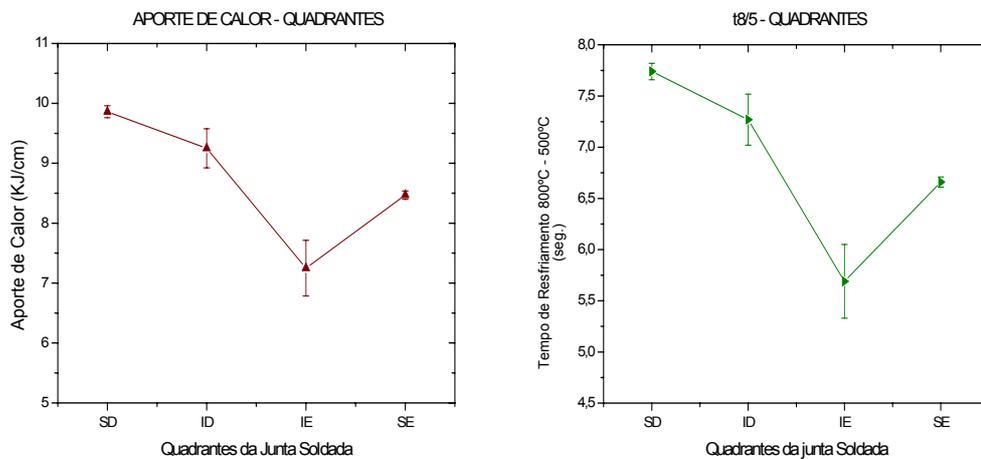


Figura 30 – Valores de Aporte de calor e $\Delta t_{8/5}$ empregados por quadrantes.

4.3. Análise química da junta soldada

O carbono equivalente e o Pcm são índices que permitem correlacionar a composição química do aço com sua tendência de apresentar estruturas frágeis quando é submetido a um processo de soldagem. Na tabela 11 se apresenta os resultados da análise química feita por emissão óptica, no metal de solda na raiz (MS-R) e no acabamento (MS-A).

Tabela 11 – Resultados da análise química do metal de base e metal de solda.

Região	Elementos (% em peso)											
	C	Si	Mn	Nb	Ti	Cr	Ni	Mo	P	S	CE	Pcm
MB	0,065	0,165	1,87	0,018	0,012	0,181	0,018	0,200	0,018	0,0041	0,459	0,194
MS-R	0,063	0,457	1,21	0,011	0,084	0,073	0,90	0,128	0,014	0,0049	0,531	0,220
MR-A	0,044	0,494	2,40	0,011	0,093	0,061	0,98	0,037	0,016	0,0051	0,531	0,207

4.4. Ensaio de tração

A tabela 12 mostra os resultados após a execução do ensaio de tração do corpo-de-prova referente aos quatro quadrantes da junta soldada:

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de tração.

C.P.	Dimensão	Seção	Limite de Resistência		Limite Mínimo Especificado	Local de Ruptura
	(mm)	(mm ²)	Kgf	Mpa	Mpa	
SD	24,85 x 19,15	475,88	34200	705	621	Fora da solda
ID	25,10 x 19,15	480,67	34200	698	621	Fora da solda
IE	24,5 x 19,20	470,04	33700	703	621	Fora da solda
SE	25,00 x 19,15	478,75	34100	698	621	Fora da solda

Dos resultados mostrados anteriormente, o corpo-de-prova SD pertencente ao primeiro quadrante é aquele que apresenta melhores propriedades de resistência mecânica em comparação com as demais regiões.

Dos gráficos da figura 32 podemos observar que o material não possui um escoamento bem definido, porém se procedeu a determinar o cálculo do limite de escoamento traçando a partir dos 5 % da deformação total.

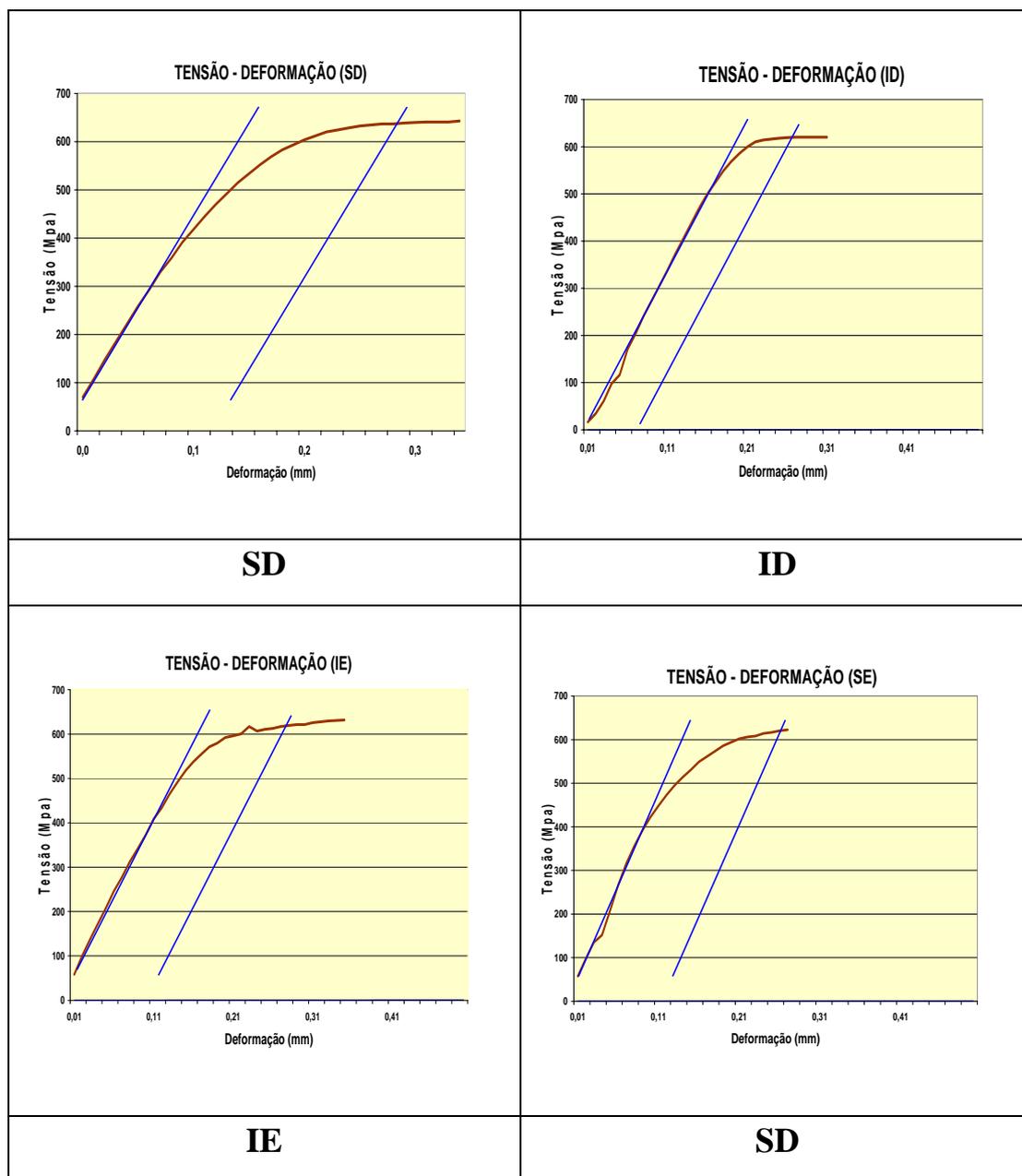


Figura 31 – Curvas Tensão – Deformação dos corpos-de-prova de tração.

A figura 33 mostra os corpos-de-prova de tração após o ensaio, onde pode ser observado que a ruptura ocorreu a diferentes distâncias e em todos os casos fora da junta soldada.

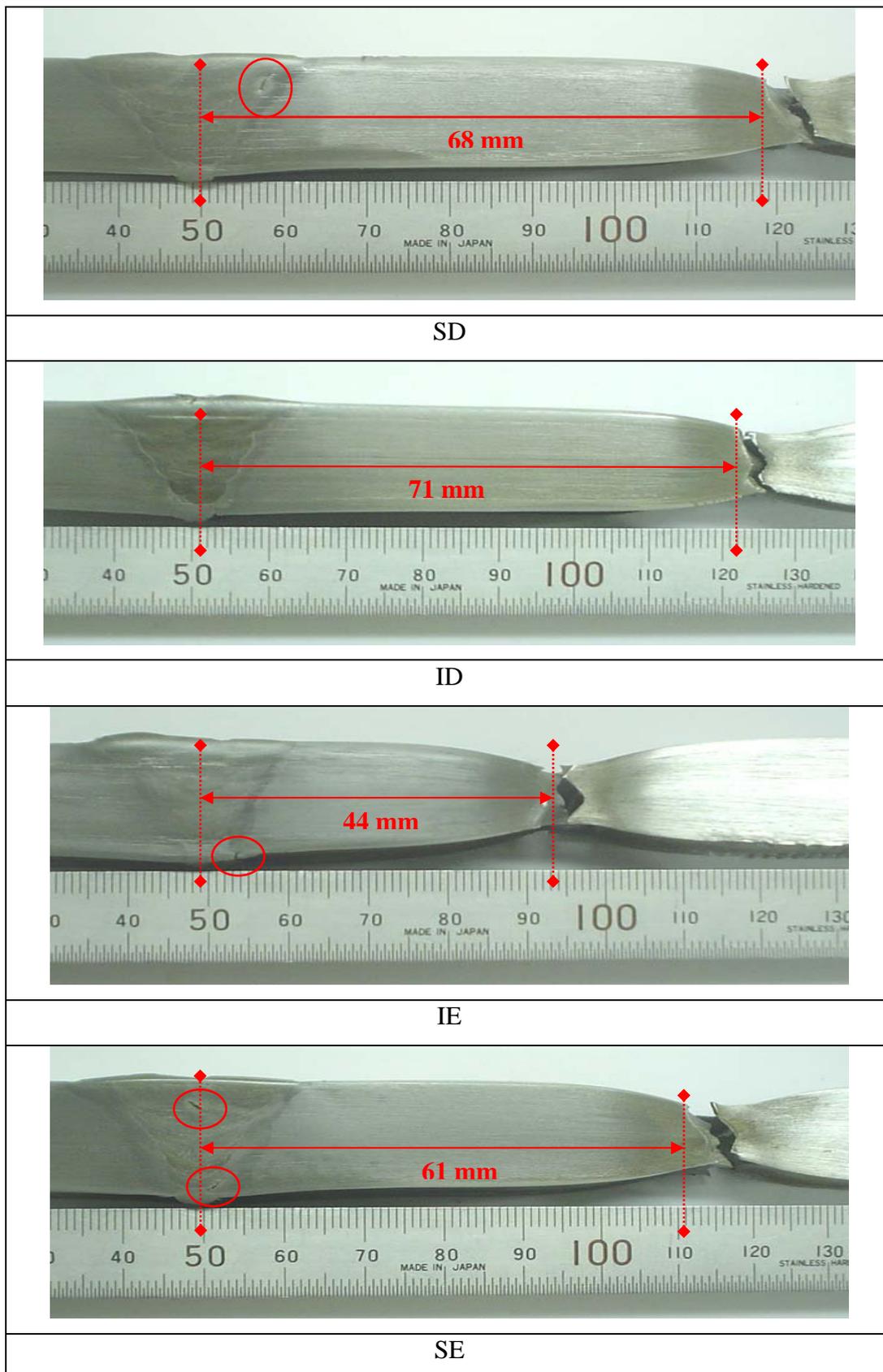


Figura 32 – Fraturas dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios de tração.

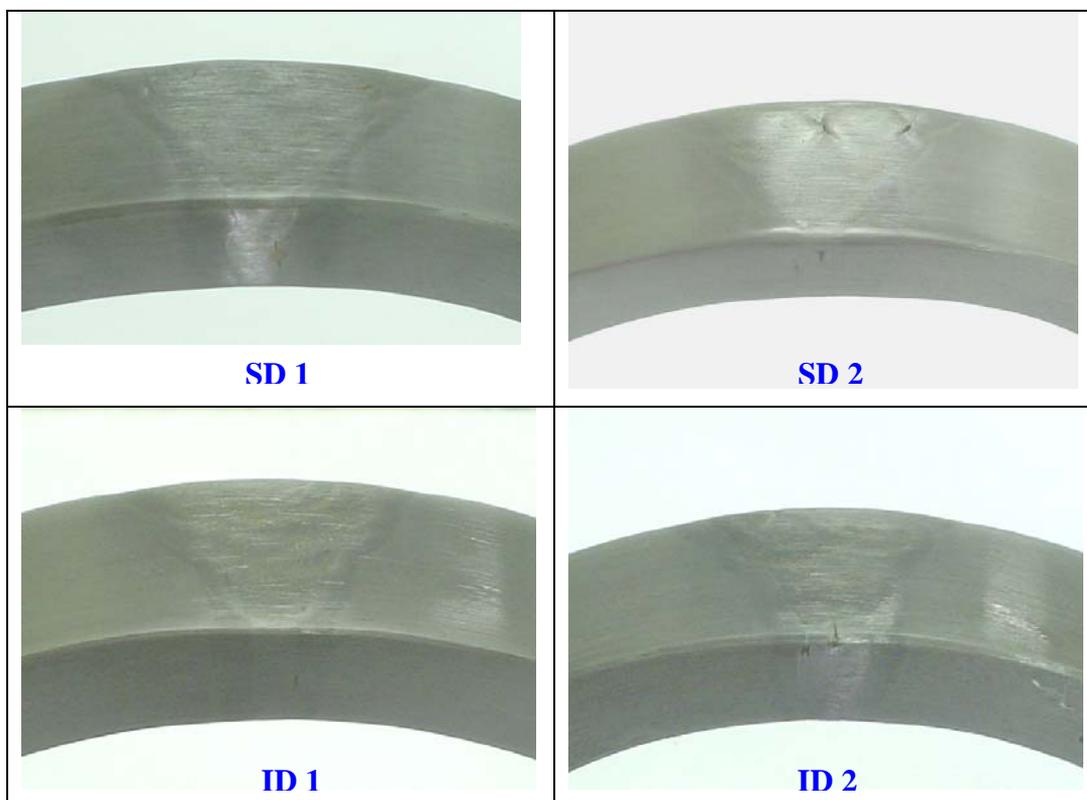
4.5. Ensaio de dobramento

Os resultados dos ensaios de dobramento estão apresentados na tabela 13.

Tabela 13 – Resultados do teste de dobramento.

C.P.	Dimensões (mm)	Ø Cutelo (mm)	Distância entre roletes (mm)	Ângulo de Dobramento (graus)	Resultados Obtidos
SD1	19,00 X 13,00	90,00	120,00	180°	Apresentou fissuras < 1/8 ”
SD2	19,00 X 13,00	90,00	120,00	180°	Apresentou fissuras < 1/8 ”
ID1	19,00 X 13,00	90,00	120,00	180°	Apresentou fissuras < 1/8 ”
ID2	19,00 X 13,00	90,00	120,00	180°	Apresentou fissuras < 1/8 ”
IE1	19,00 X 13,00	90,00	120,00	180°	Apresentou fissuras > 1/8 ”
IE2	19,00 X 13,00	90,00	120,00	180°	Apresentou fissuras < 1/8 ”
SE1	19,00 X 13,00	90,00	120,00	180°	Apresentou fissuras < 1/8 ”
SE2	19,00 X 13,00	90,00	120,00	180°	Apresentou fissuras > 1/8 ”

A figura 34 mostra corpos-de-prova após o ensaio. Os corpos de prova IE1 e SE2, apresentaram fissuras maiores a 3 mm (1/8”), as quais não são aceitas pela norma API 1104.



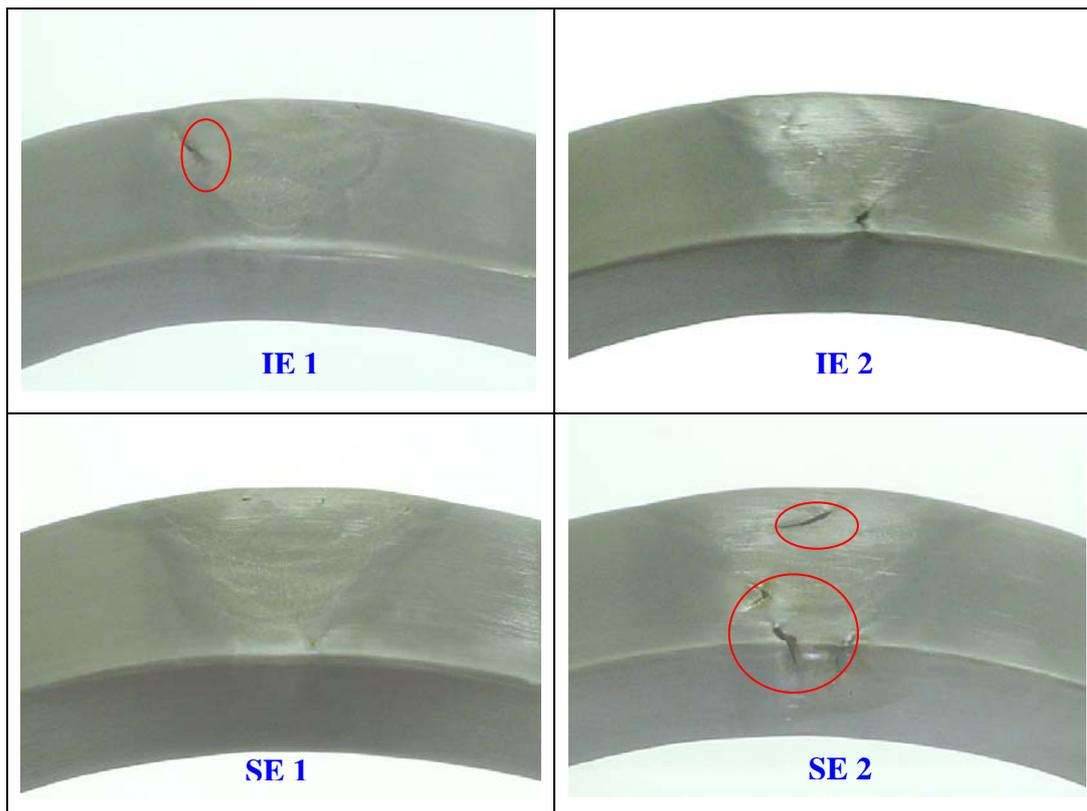


Figura 33 – Macrografias das superfícies dos cp's de dobramento.

4.6. Ensaio nick-break

Foram retiradas amostras dos quatro quadrantes da seção do tubo: superior direito (SD), inferior direito (ID), superior esquerdo (IE) e inferior esquerdo (SE). Na tabela 14 são apresentados os resultados dos ensaios de nick break de cada corpo-de-prova.

Tabela 14 – Resultados do teste nick-break.

C.P.	Aparência de Fratura
SD	Apresentou bolsa de gás com aprox. 3 mm. Próximo à face.
ID	Apresentou fragilidade e poros dispersos maiores que 1 mm.
IE	Apresentou fragilidade e falta de penetração na raiz.
SE	Apresentou falta de penetração, fragilidade e poros diversos.

A figura 35 mostra macrografias da superfície de fratura dos corpos de prova Nick-Break. Estes resultados indicaram a presença de poros maiores que 1,6 mm, e falta de penetração, porém isto é uma limitação para a aprovação do

procedimento estudado em função das imperfeições dentro da região do metal de solda que foi avaliada.

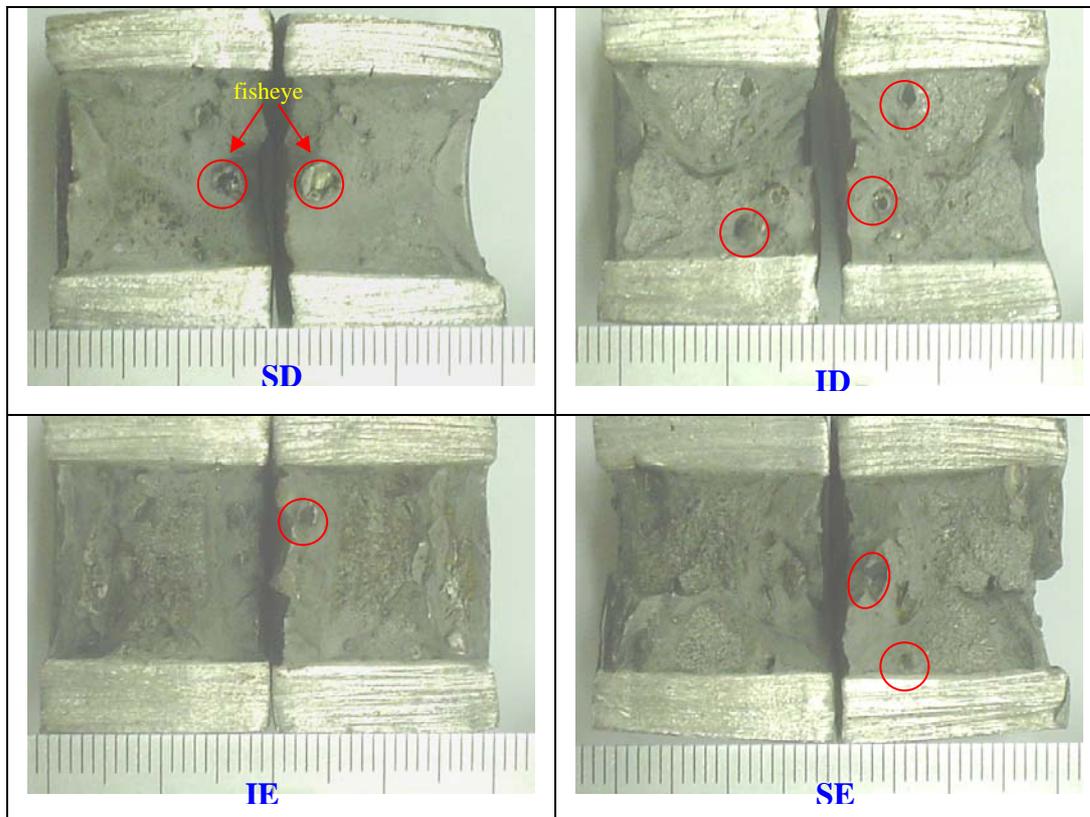


Figura 34 – Seções das fraturas dos cp's Nick Break.

4.6.1. Análise fratógráfrica

Para fazer a análise microestrutural das superfícies de fratura dos ensaios nick break, foi escolhido o corpo de prova pertencente ao quadrante inferior esquerdo (IE) como mostrado na figura 37. Pode-se perceber que se trata de regiões com superfícies dúcteis, embora se tenha a presença também de algumas regiões frágeis.

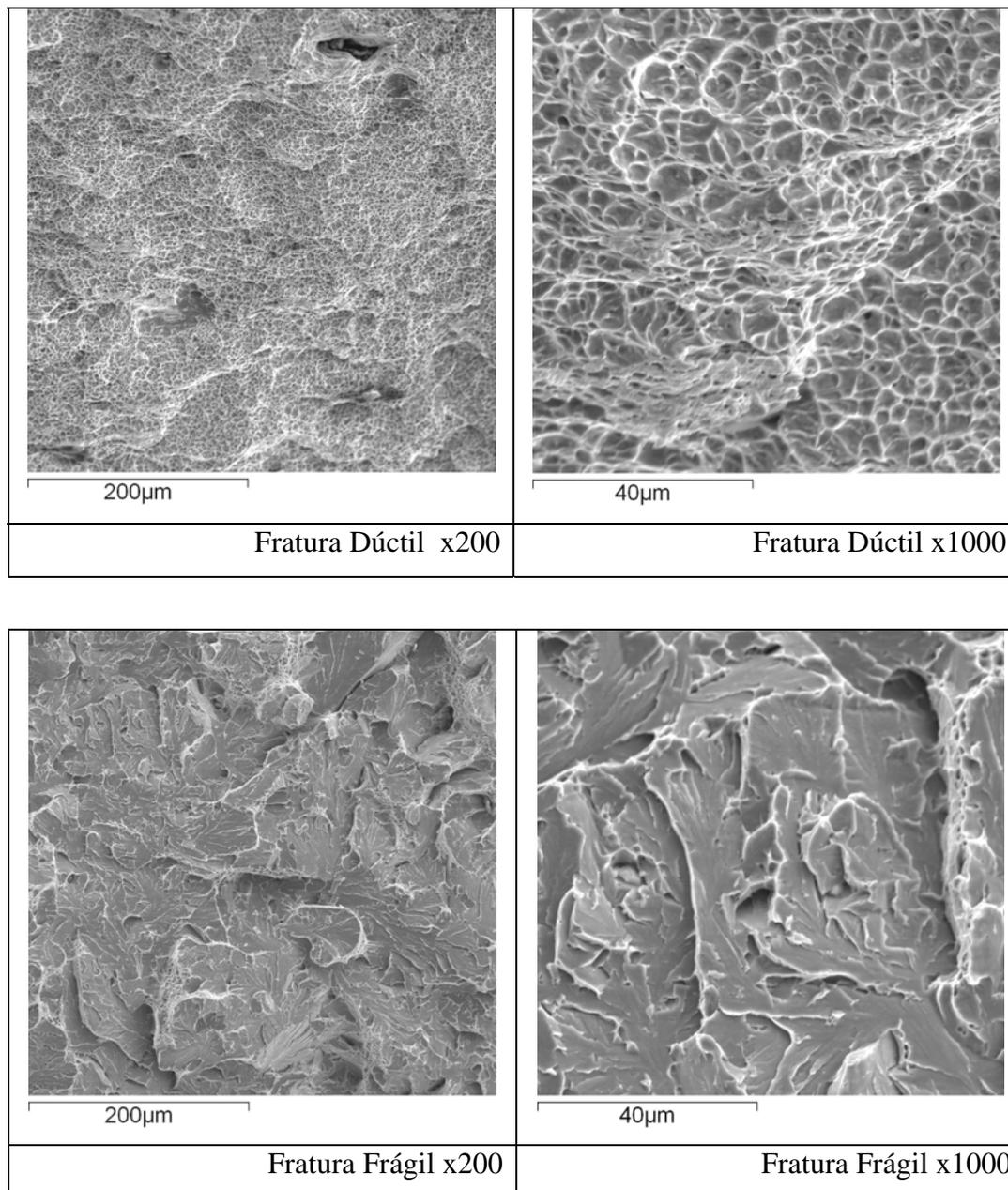


Figura 35 – Fractografias das superfícies de fratura do corpo de prova IE.

4.7. Ensaios de dureza

Os valores medidos estão representados na tabela 15. As impressões de medida da tabela que variam de 1 até 11 apresentam o eixo externo (eixo I) e as que variam de 1 até 9 apresentam ao eixo interno (eixo II).

Tabela 15 – Resultados do ensaio de dureza.

C.P.	Ponto de Medida	Impressões										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
M1	Eixo I	254	257	268	230	321	310	325	262	268	268	257
	Eixo II	-	257	254	249	251	257	257	257	254	257	-
M2	Eixo I	236	234	257	251	280	271	296	257	244	246	239
	Eixo II	-	249	247	227	221	232	299	223	233	251	-
M3	Eixo I	249	277	283	287	321	310	303	277	271	271	249
	Eixo II	-	254	260	257	260	280	239	239	236	246	-
M4	Eixo I	244	236	244	265	254	293	296	257	244	244	239
	Eixo II	-	249	201	210	208	192	206	216	232	265	-

A figura 37 mostra o perfil de dureza dos corpos-de-prova que foram retirados das 4 regiões do perímetro do tubo.

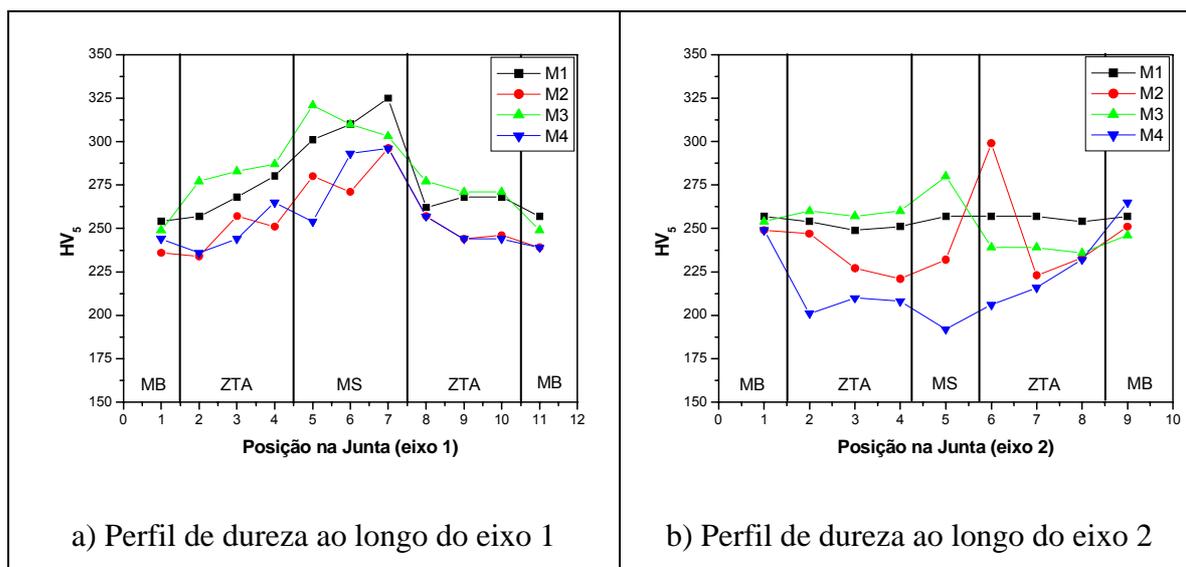


Figura 36 – Medição de dureza dos 2 eixos da junta.

A figura 38 mostra uma comparação entre as médias dos valores de dureza dos dois eixos.

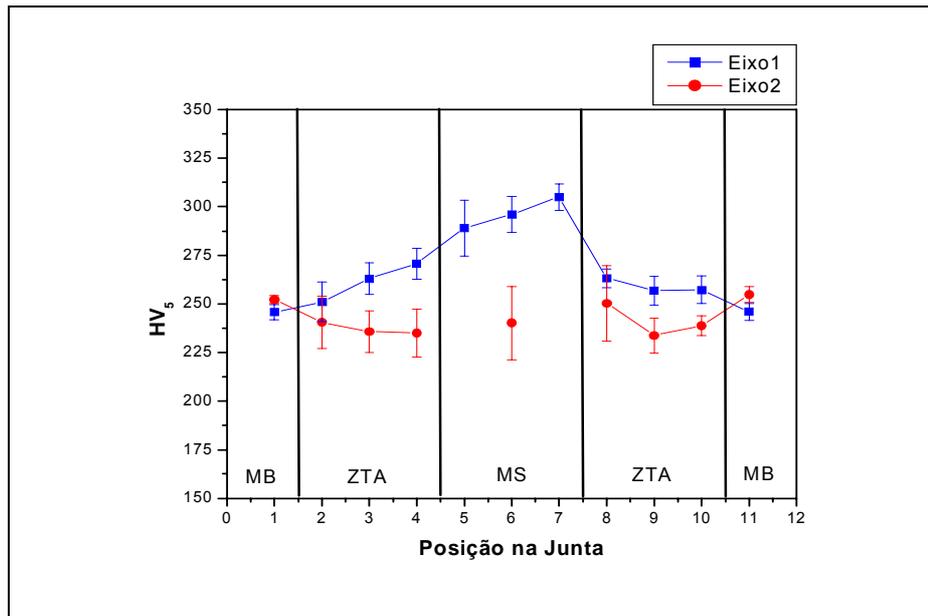


Figura 37 – Comparação das médias dos perfis de dureza nos 2 eixos.

4.8. Ensaios de impacto

Foram realizados ensaios de impacto Charpy-V conforme citado no item 4.3.6, cujos resultados são mostrados nos gráficos da figura 39.

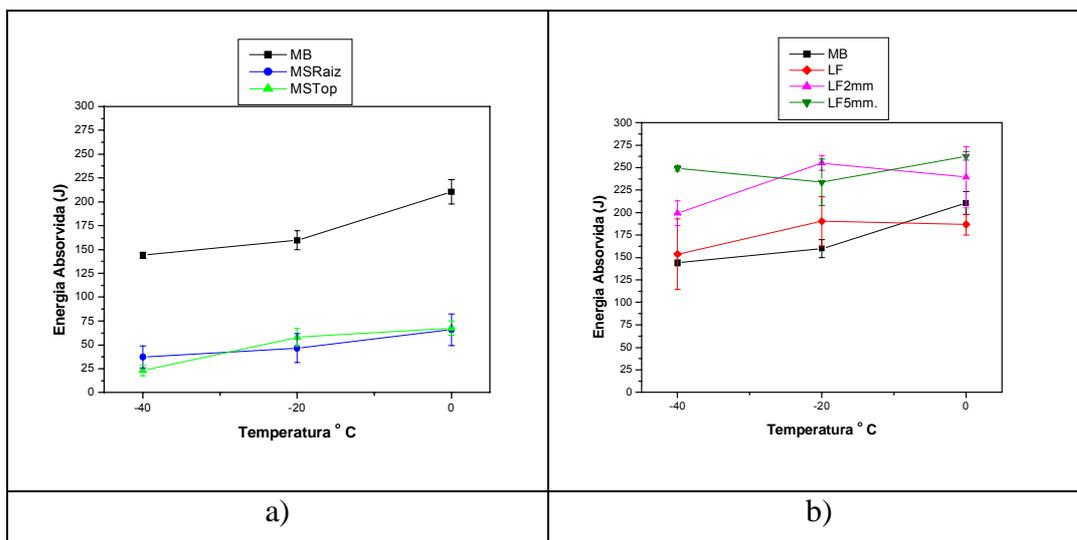


Figura 38 – Resultado dos ensaios de Impacto Charpy.

4.8.1. Análise fratógráica do ensaio Charpy-V

A continuação são mostrados os aspectos macros de fratura característicos de corpos de prova Charpy obtidas em Lupa com aumento de 6x, além de imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura com resolução de 1024 x 1024 e aumento de 2000x. A análise focaliza o centro de cada corpo de prova charpy e a região próxima ao entalhe. As figuras 40 a 43 mostram a morfologia das superfícies de fratura em acordo com diferentes regiões e temperaturas de ensaio.

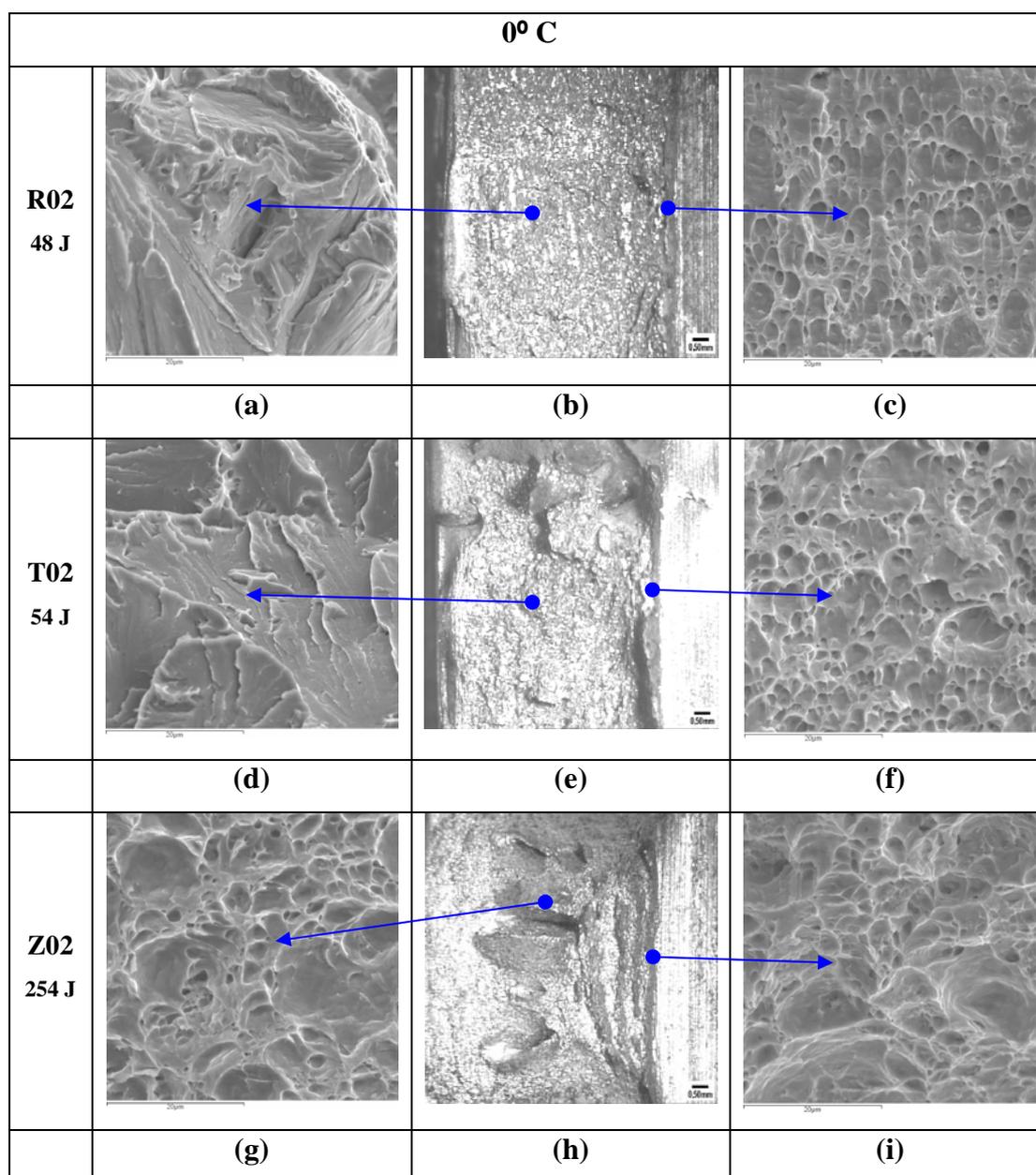


Figura 39 – Fratógráica dos cp's R02, T02, e Z02, ensaiados a 0 °C.

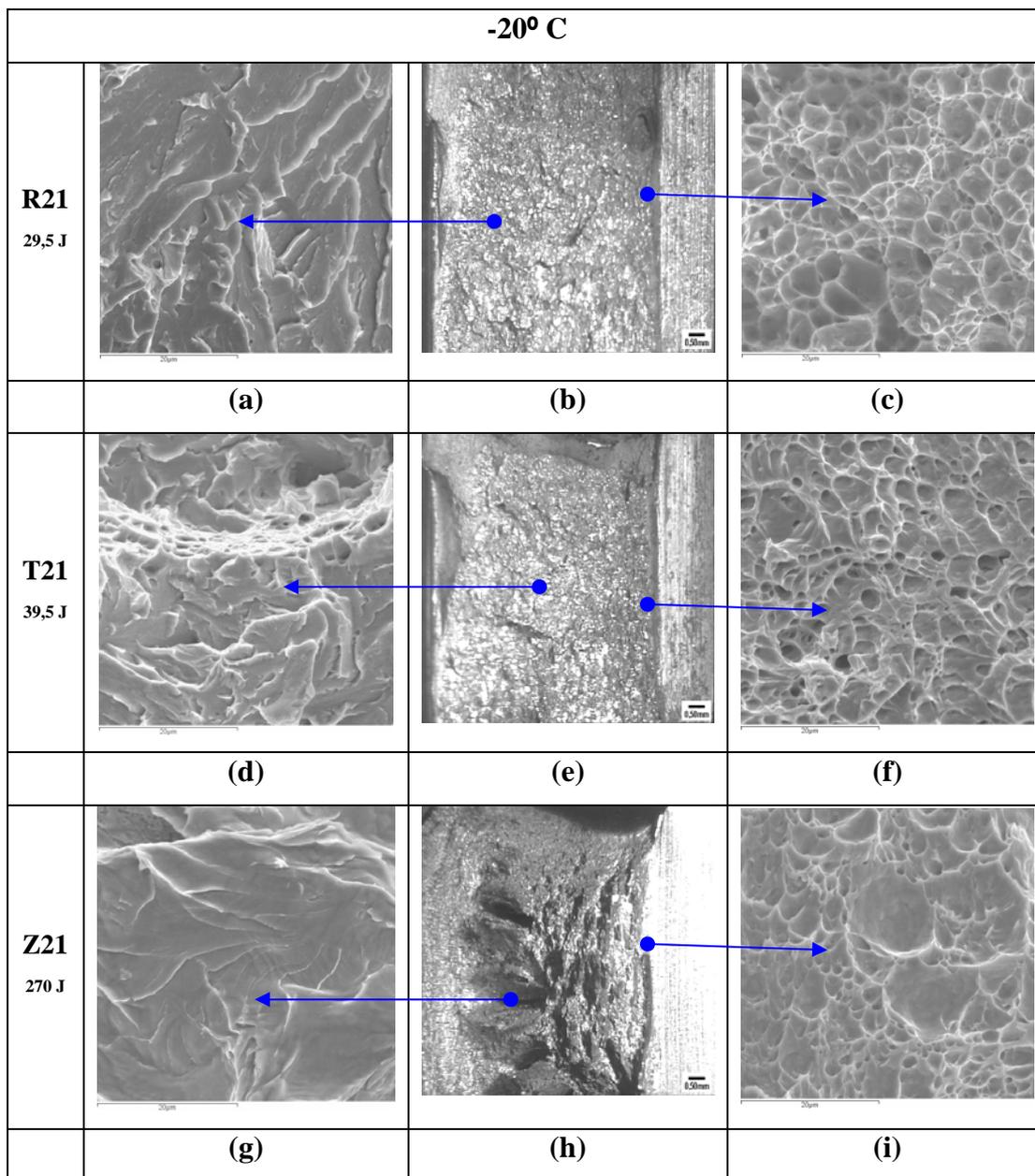


Figura 40 – Fratografia dos cp's R21, T21, e Z21 ensaiados a -20 °C.

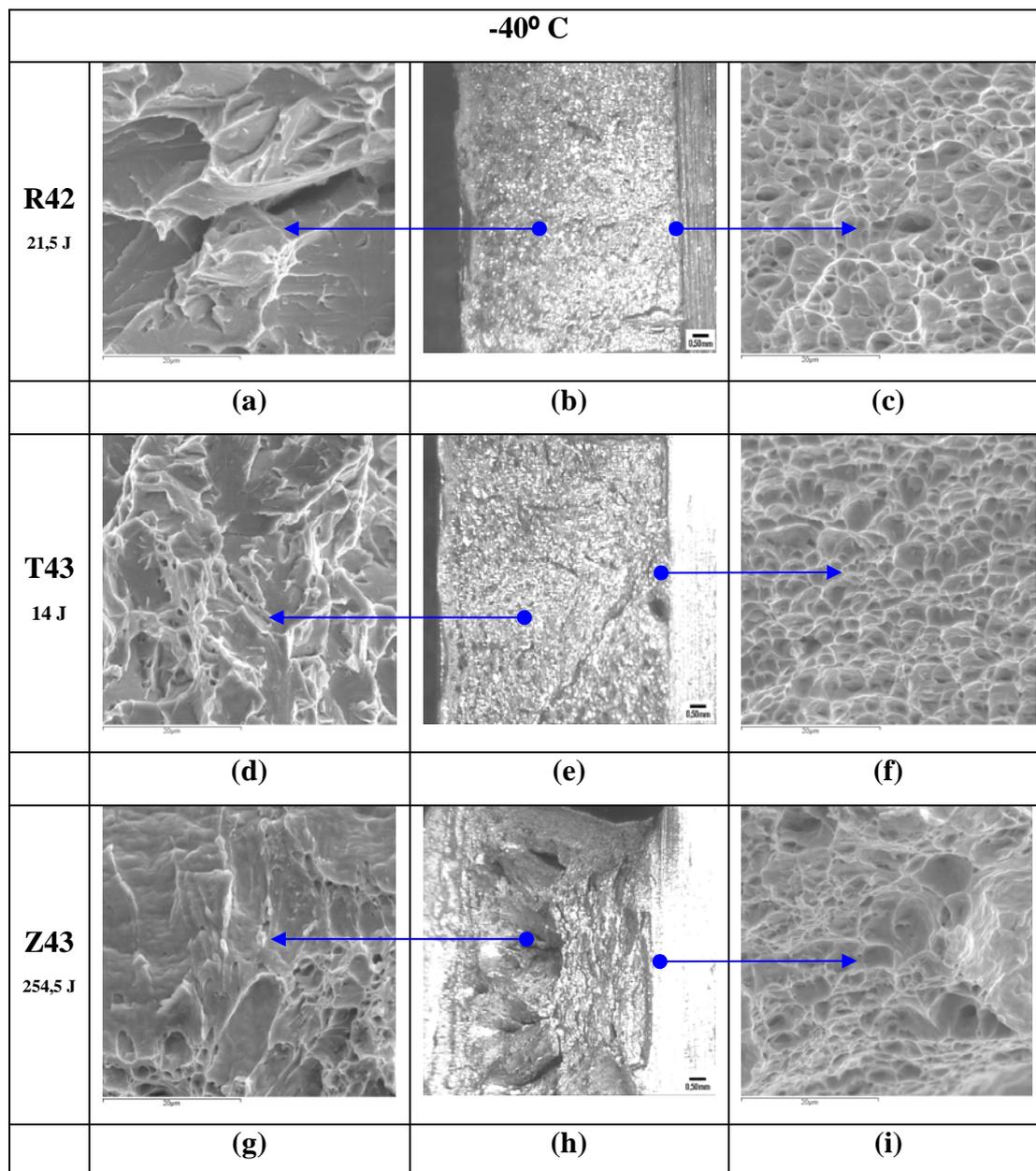


Figura 41 – Fratografia dos cp's R41, T43, e Z43, ensaiados a -40 °C.

O critério utilizado para escolha dos corpos de prova foi à observação da fratura daqueles que se romperam completamente. Entre os corpos-de-prova rompidos (separados por região e temperatura de ensaio) analisaram-se os de menor energia absorvida.

Da figura 40 podemos observar as imagens dos aspectos das fraturas dos cp's: R02, T02, e Z02, ensaiados a 0°C. Na figura 41, podemos observar os aspectos das fraturas dos cp's: R21, T21 e Z21, ensaiados a -20°C. Na figura 42, podemos observar os aspectos das fraturas dos cp's: R42, T43 e Z43, ensaiados a -

40°C. Para as três condições descritas anteriormente as imagens (b), (e) e (h) são aspectos macros de fratura. As imagens (a), (d), e (g) são imagens adquiridas no meio da região de fratura e as imagens (c), (f) e (i), são imagens adquiridas na região bem próxima do entalhe do cp Charpy, onde geralmente o comportamento é dúctil.

Observa-se também os corpos de prova pertencentes as regiões do metal de base (B03) e à região da linha de fusão + 2 mm. (X02), que fraturaram a 0°C e são mostrados na figura 43.

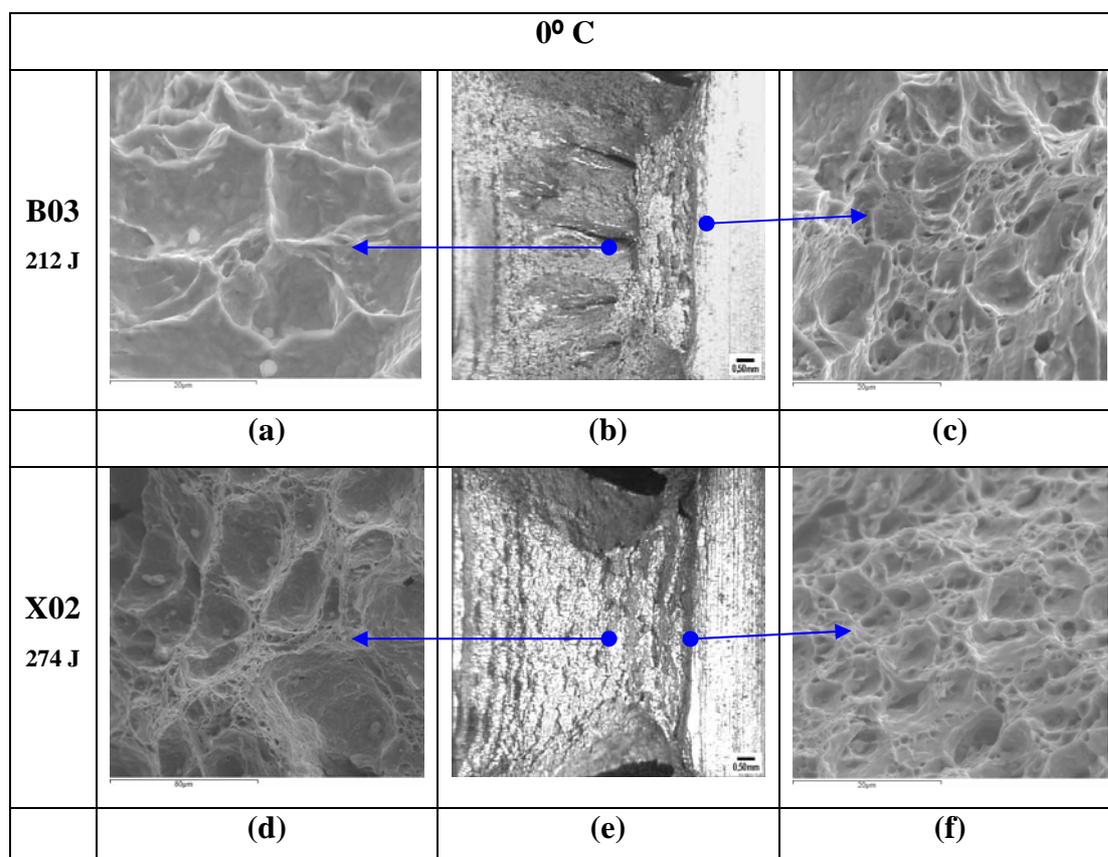


Figura 42 – Fratografia dos cp's B03 e X02 ensaiados a 0 °C.

Da figura 43 observamos que as imagens (b) e (e) são aspectos macros de fratura; as imagens (a) e (d) são imagens adquiridas no meio da região de fratura do corpo-de-prova Charpy-V. As imagens (c) e (f), são imagens adquiridas na região bem próxima ao entalhe, onde geralmente o comportamento é dúctil.

4.8.2. Quantificação das regiões colunares e reaquescidas na propagação da fratura

Também se realizou uma quantificação das zonas colunar e reaquescida na região do entalhe Charpy dos corpos de prova que apresentaram as maiores e menores energias absorvidas para cada condição de ensaio do metal de solda, dita quantificação é mostrada na tabela 16. Os comparativos dos corpos-de-prova que apresentaram os maiores valores de energia absorvida são mostrados na figura 44.

Tabela 16 – Quantificação das zonas colunar e reaquescida na região do entalhe Charpy.

	% de Grãos Recristalizados	% de Grãos Colunares	Energia Absorvida (J)	
			Individuais	Média
R02	36,36	63,64	48	66
R03	41,27	58,73	99	
R21	48,48	51,52	29,5	47
R23	36,36	63,64	77	
R42	56,67	43,33	21,5	37
R43	42,19	57,81	60	
T01	39,19	60,81	79	68
T02	42,86	57,14	54	
T21	47,89	52,11	39,5	58
T23	45,61	54,39	69	
T41	18,37	81,63	33	23
T43	38,33	61,67	14	

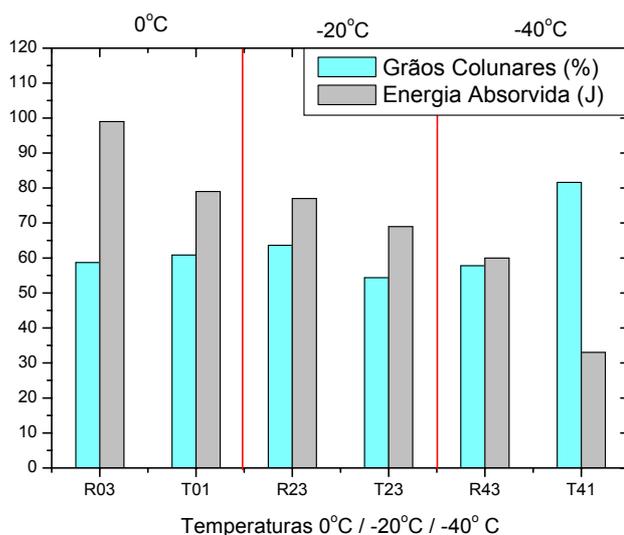


Figura 43 – Comparativos de Charpy-V que apresentaram melhor tenacidade no metal de solda.

4.9. Análise Microestrutural

4.9.1. Caracterização do microconstituente AM

As figuras 45 e 46 mostram diversas micrografias com a finalidade de revelar a presença do microconstituente AM nas distintas regiões da junta soldada. O aumento utilizado na captura foi de 3000x.

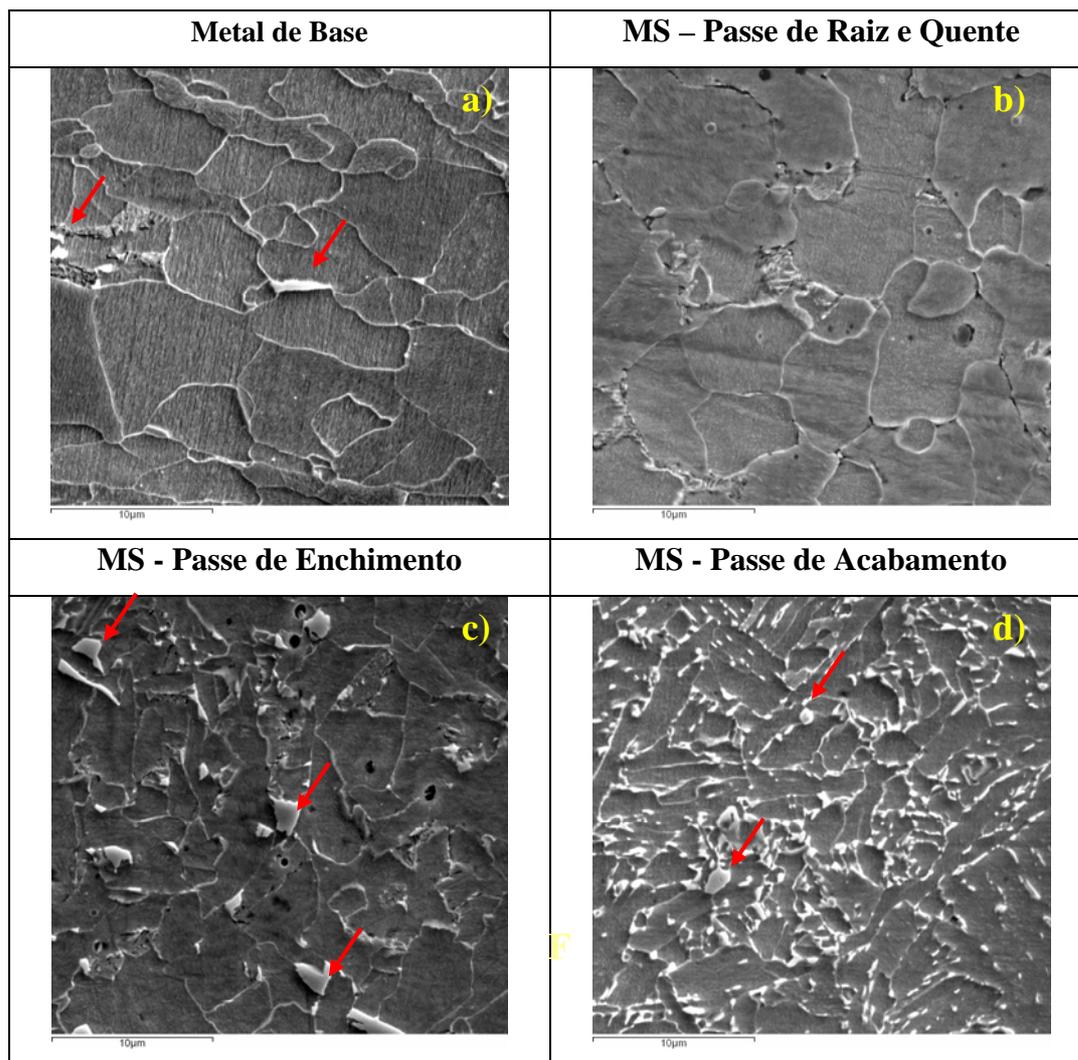


Figura 44 – Imagens do microconstituente AM no metal base e metal de solda.

A figura 45 mostra que o metal de base (imagem 45a) apresenta grãos equiaxiais ferríticos com tamanho aproximado de 10 μm e microconstituente AM. O mesmo ocorre para o passe de raiz e quente (imagem 45b), onde há indícios de perlita fina ou de decomposição do AM.

Na região do enchimento do metal de solda (imagem 45c), apresenta um tamanho de grão menor com maior fração de AM massivo.

O passe de acabamento do metal de solda (imagem 45d), apresenta ferrita com segunda fase e AM massivo e alongado.

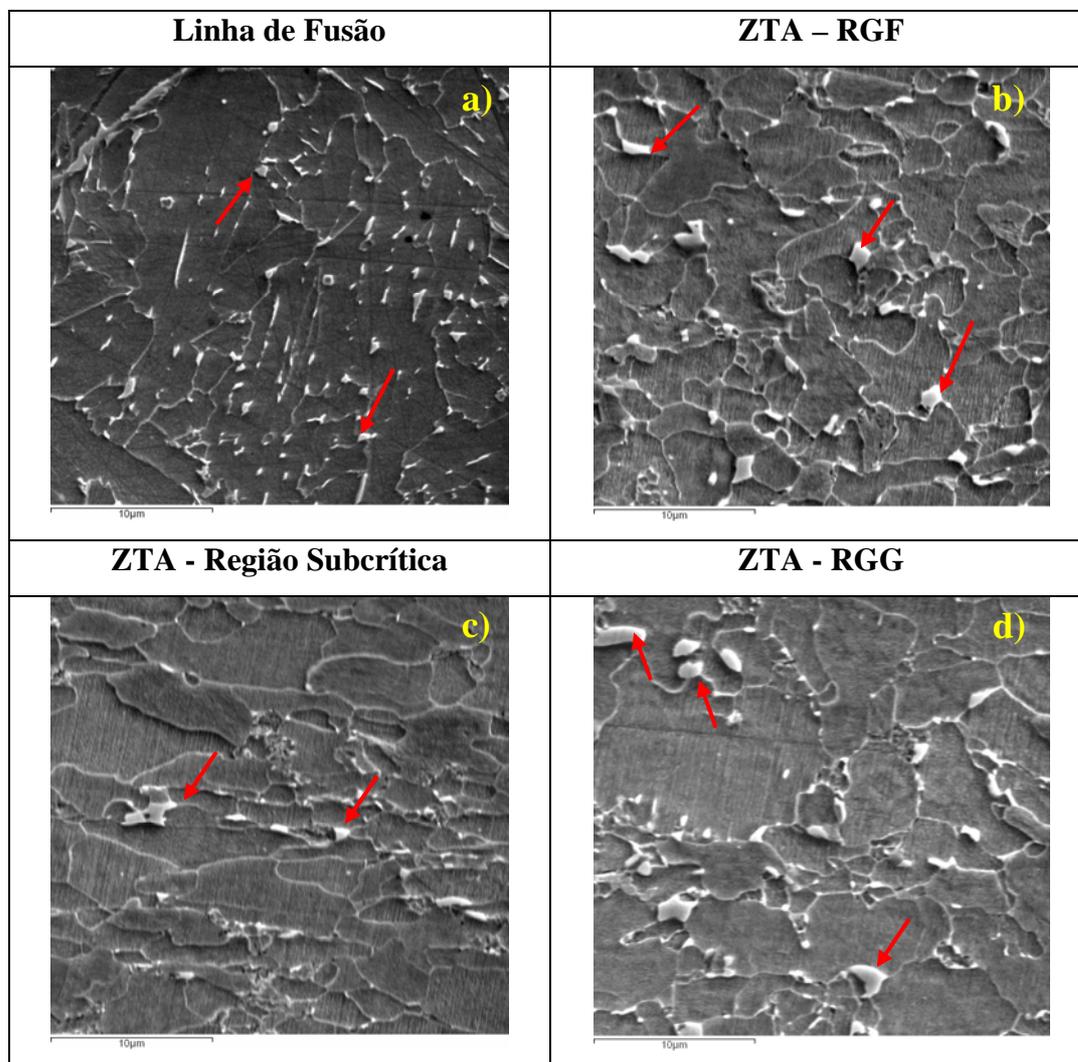


Figura 45 – Imagens do microconstituente AM na linha de fusão e ZTA.

Na imagem 46a observamos a imagem da linha de fusão com a presença de AM alongado e massivo com um tamanho aproximado de 2 μm menor em relação às outras regiões analisadas.

Da imagem 46b correspondente à região dos grãos finos da ZTA tem se a presença de AM massivo da mesma forma que a imagem 46d pertencente à região dos grãos grosseiros da ZTA. Já a região subcrítica da ZTA também tem a

presença de AM, mas com um tamanho nítidamente menor e mais disperso que as outras regiões da ZTA.

As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura correspondente aos 4 setores do perímetro do tubo foram digitalizadas e se realizou uma contagem manual do microconstituente AM. O resultado é mostrado na tabela 17

Tabela 17 – Quantificação do microconstituente Austenita-Martensita (AM).

Zona da Junta soldada	AM Total (%)
Metal de Base	1
Passes Raiz-Quente	0
Passes de Enchimento	3,5
Passes de Acabamento	3,0
Linha de Fusão	1,5
ZTA - RGG	2
ZTA – RGF	2,5
ZTA-Região Subcrítica	2

4.9.2. Micrografias

As figuras 47, 48 e 49 apresentam as microestruturas observadas por microscopia ótica e eletrônica de varredura formadas nas distintas regiões da junta soldada após do processo de soldagem.

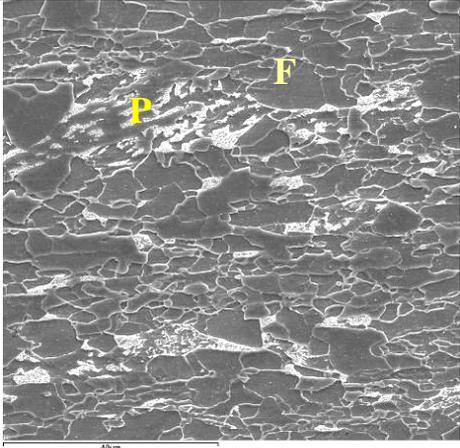
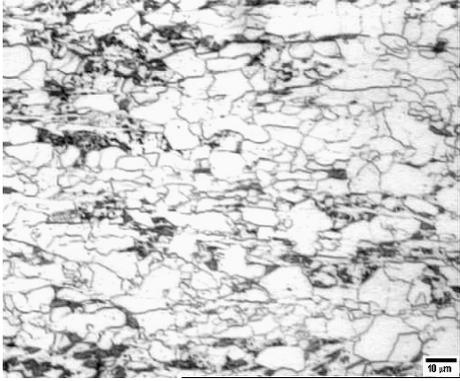
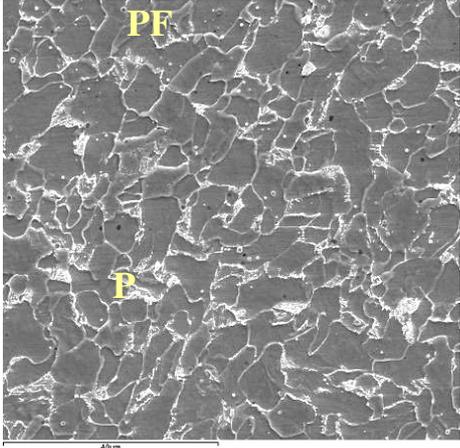
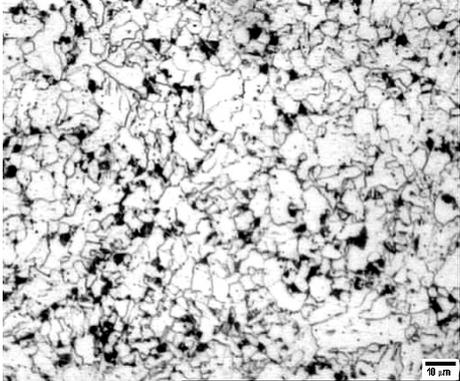
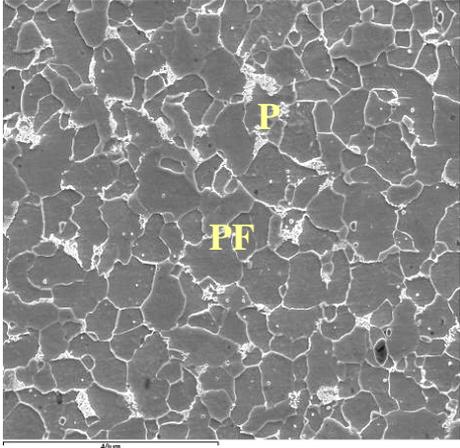
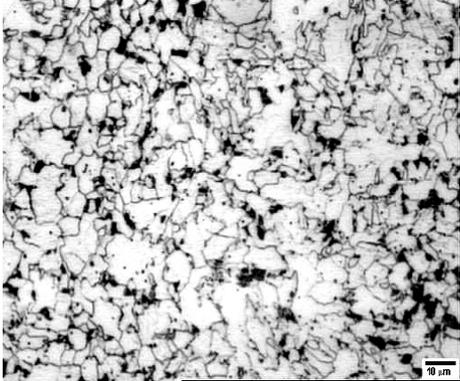
	MEV	M.O.
Metal de base		
	238 HV 1000x	238 HV 500x
Passe de Raiz		
	207 HV 1000 x	207 HV 500x
Passe Quente		
	221 HV 1000x	221 HV 500x

Figura 46 – Microestrutura do metal de base, passe de raiz e passe quente.

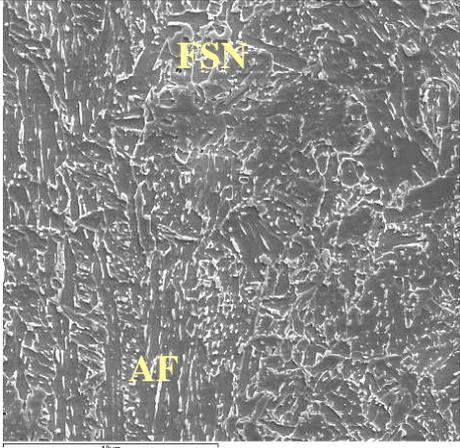
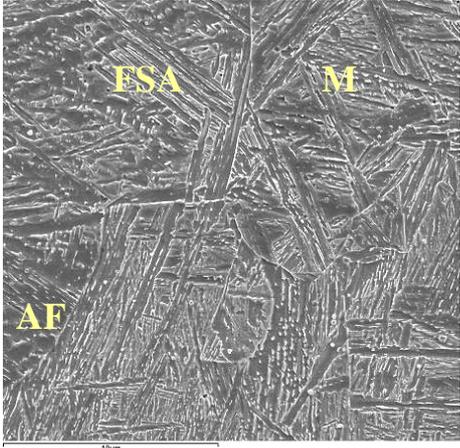
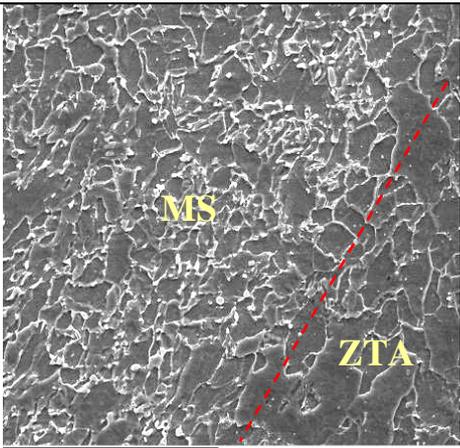
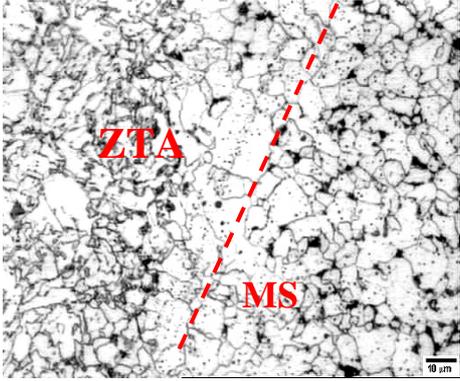
	MEV	M.O.
Passe de Enchimento		
	279 HV 1000x	279 HV 500x
Passe de Acabamento		
	309 HV 1000x	309 HV 500x
Linha de Fusão		
	1000x	x500

Figura 47 – Microestrutura dos passes de enchimento, acabamento e linha de fusão.

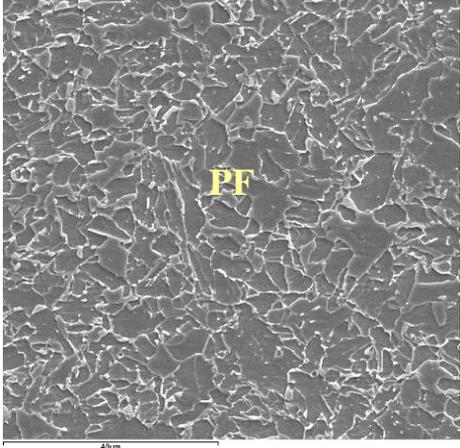
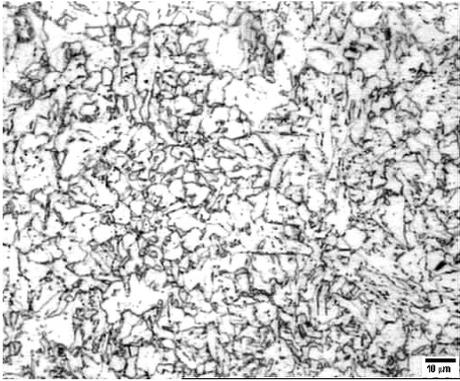
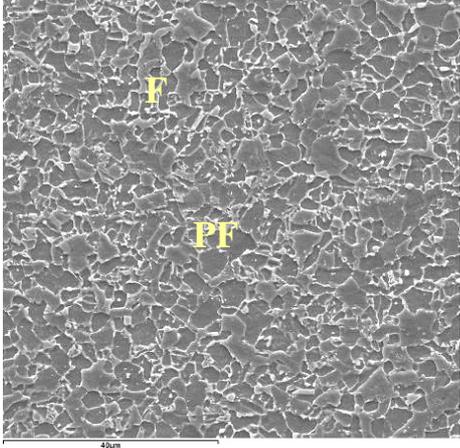
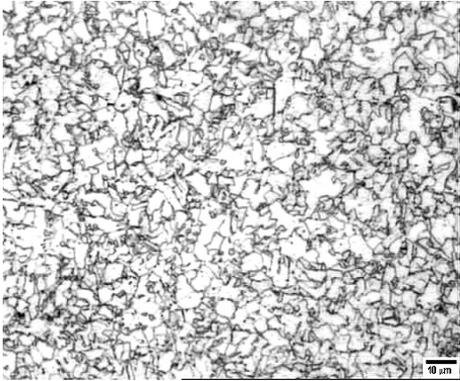
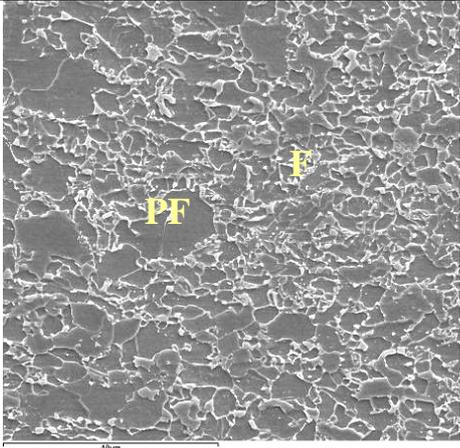
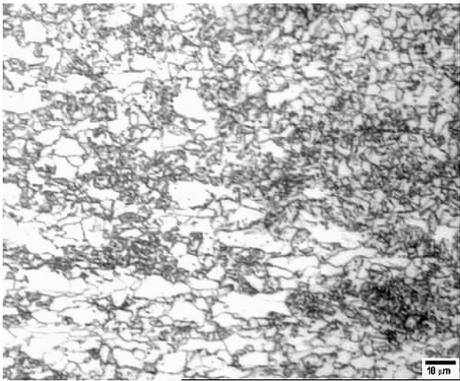
	MEV	M.O.
ZTA - RGG		
	230 HV 1000x	230 HV 500x
ZTA - RGF		
	224 HV 1000x	224 HV 500x
ZTA - Região Subcrítica		
	233 HV 1000x	233 HV 500x

Figura 48 – Microestrutura da ZTA na região de grãos grosseiros, grãos finos e subcrítica.

O ataque aplicado nas amostras foi Nital 2%. Observam-se também as médias das microdurezas Vickers com carga de 100gf e tempo de 30s. O aumento utilizado na captura das imagens de microscopia óptica foi de 500x e as feitas no MEV foram de 1000x.