

4. Resultados

4.1. Mapeamento de descontinuidades não aceitáveis.

Mediante a avaliação dos ensaios não destrutivos de radiografia e de ultrassom determinou-se que só duas de seis juntas soldadas atenderam as exigências de aceitabilidade da norma API 1104 [66], sendo estas juntas soldadas a JS-01 e a JS-06. As outras juntas soldadas foram desaprovadas por apresentar descontinuidades tais como porosidade e inclusão de escória, acima dos limites permissíveis. Estes resultados mostraram que a eficiência de repetibilidade, juntas aceitas, para este procedimento é baixa.

Para o presente estudo foram escolhidas as juntas JS-02, JS-04 e JS-06, sendo reservada a junta soldada JS-01 para posteriores ensaios de ser requeridos. A JS-02 e a JS-04 apresentaram menor número de descontinuidades não aceitáveis de entre as quatro juntas soldadas não aceitas. Com base na avaliação por o ensaio de radiografia foram definidas as regiões com descontinuidades ao longo da soldagem circunferencial. Cada junta soldada apresentou diferentes regiões de descontinuidades. Na Fig. 46 são apresentadas as regiões que foram indicadas com descontinuidades não aceitáveis para estas juntas.

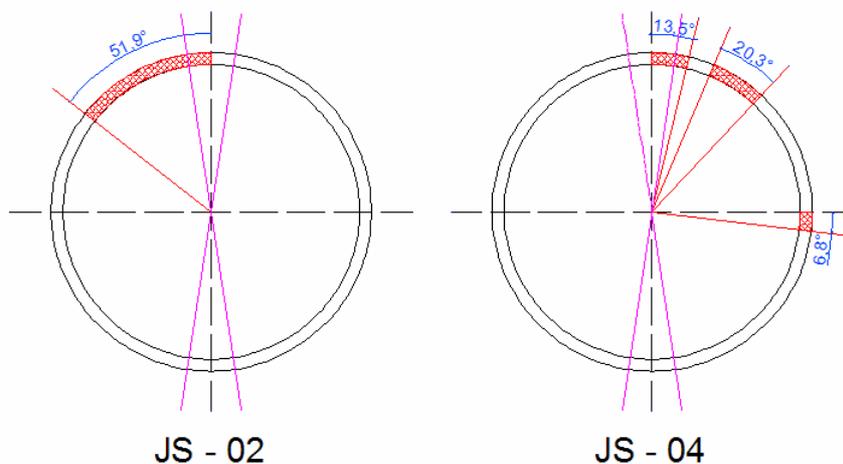


Figura 46. Distribuição das descontinuidades não aceitáveis para os corpos de prova JS-02 e JS-04, segundo a norma API 1104 [66].

A distribuição dos corpos de prova para cada um dos ensaios mencionado no capítulo três, foram da seguinte maneira: os corpos de prova para o ensaio de impacto Charpy V foram extraídos de forma integral das juntas soldadas JS-02 e JS-04, na JS-02 foram utilizados os quadrantes superior e inferior esquerdos para os corpos de prova do metal de soda da raiz, e os quadrantes superior e inferior direitos foram utilizados para os corpos de prova do metal de solda do topo. Na JS-04 foram utilizados os quadrantes superior e inferior esquerdos para os corpos de prova da LF e os quadrantes superior e inferior direitos foram utilizados para os corpos de prova da ZTA. Da JS-06 foram extraídos os corpos de prova exigidos pela norma API 1104 [66] ademais dos corpos de prova para o ensaio metalográfico e de microdureza. Esta distribuição de corpos de prova por ensaio em cada junta soldada, é apresentada em resumo na Tabela 13.

Tabela 13. Distribuição de ensaios por JS

<i>Ensaio</i>	<i>Junta Soldada</i>		
	<i>JS-02</i>	<i>JS-04</i>	<i>JS-06</i>
Charpy V Topo – Raiz	X		
Charpy V ZTA – LF		X	
Tração API 1104			X
Dobramento API 1104			X
Ruptura ao entalhe API 1104			X
Dureza			X
Metalografia			X

4.2.

Cálculos do Aporte de Calor e Tempo de resfriamento

Para os cálculos do aporte de calor foi utilizada a fórmula 2-4, considerando eficiências unitárias para os dois processos de soldagem utilizados. No processo MAG-CCC a corrente utilizada no cálculo do aporte de calor foi a corrente média obtida pela leitura direta nos cabos, por meio de um amperímetro. A corrente medida no lado esquerdo da junta soldada para as diferentes juntas soldadas teve uma variação ao longo da solda circunferencial entre 145 a 151 A e no lado direito da junta soldada esteve entre 148 a 154 A.

Esta maneira, adotada, para a medida da corrente média no processo MAG-CCC permite, de forma rápida, ter um controle em uma situação de soldagem de campo. Medidas mais conservadoras são realizadas fazendo uso

de formulas que relacionam o tipo de onda da corrente e os tempos em que estas são geradas [63, 70].

A Fig. 47 apresenta os gráficos que foram elaborados a partir do cálculo do aporte de calor para um dos passes, raiz (R), passe quente (Q) e cada um dos passes de enchimento (3P, 4P e 5P) e passes de acabamento (6P e 7P). Nos passes realizados com o processo FCAW-G (a partir do passe quente), onde a voltagem permaneceu constante, pode-se observar a influencia exercida pela mudança da posição da tocha durante a soldagem, o que é refletido na diminuição de aporte de calor na medida em que o arco elétrico vai ascendendo em cada quadrante durante o processo de soldagem FCAW-G. Este fato pode ser relacionado ao comprimento da distancia tubo de contacto à peça de trabalho, o que esta relacionado com a posição de apoio do soldador. A influencia da posição no aporte de calor é apresentada de maneira esquemática na Fig. 48, onde o eixo radial é o aporte de calor.

Os valores calculados dos aportes de calor médios dos passes para cada junta soldada são resumidos na Tabela 14, não se observa variação significativa nestes valores, sendo para o processo MAG-CCC, os valores médios máximo e mínimo 0,976 kJ/mm e 0,618 kJ/mm, respectivamente. E para o processo FCAW-G, os valores máximo e mínimo foram 1,926 kJ/mm e 1,184 kJ/mm, respectivamente.

O cálculo dos tempos de resfriamento médio dos passes para cada junta soldada foi segundo as relações do Dilthey [37], por se tratar de um aço de baixa liga o material utilizado no presente trabalho. Estes cálculos estão resumidos na Tabela 15. Para o passe de raiz se tem uma média de 2,6 s, para o passe quente uma média de 7,5 s, para os passes de enchimento de 9,6 s e para os passes de acabamento de 9,4 s. Por ser de interesse os aportes de calor para a JS-02. JS-04 e JS-06 são apresentados nas Tabelas 16, 17 e 18, respectivamente.

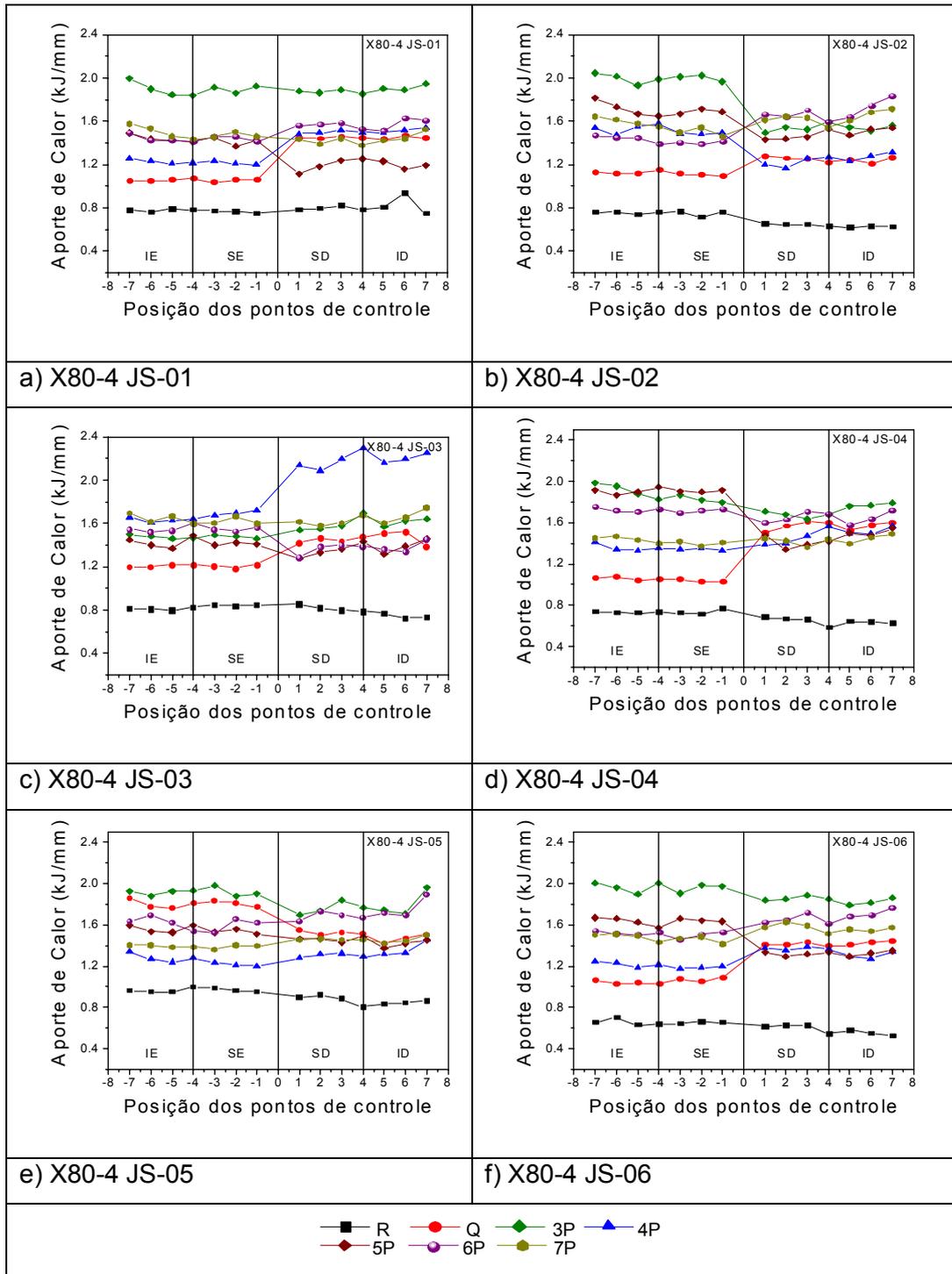


Figura 47. Gráficos de aporte de calor para cada das juntas soldadas.

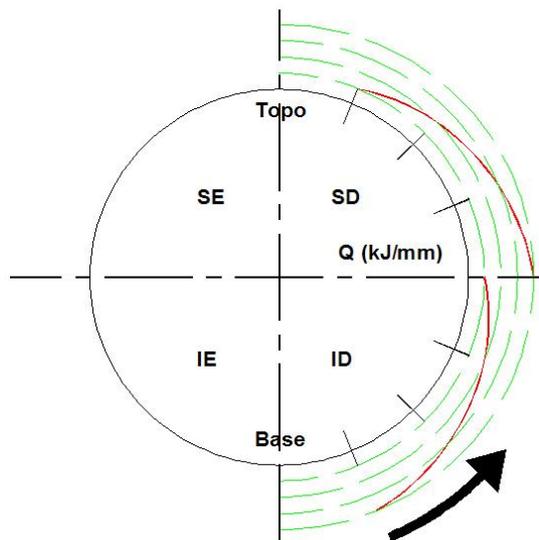


Figura 48. Influência da posição de soldagem no aporte de calor na soldagem em progressão ascendente. Onde a linha em vermelho indica a queda o aporte de calor na medida em que a tocha de soldagem vai mudando de posição.

Tabela 14. Aporte de Calor por junta soldada.

Passe	Aporte de Calor efetivo médio (kJ/mm)					
	JS-01	JS-02	JS-03	JS-04	JS-05	JS-06
Raiz	0,792	0,695	0,808	0,688	0,916	0,618
A quente	1,251	1,184	1,336	1,309	1,650	1,236
Passe 3	1,894	1,769	1,540	1,795	1,848	1,900
Passe 4	1,365	1,381	1,926	1,417	1,291	1,273
Passe 5	1,314	1,596	1,394	1,677	1,496	1,478
Passe 6	1,505	1,555	1,464	1,682	1,663	1,592
Passe 7	1,462	1,595	1,639	1,426	1,425	1,520

Tabela 15. Tempo de resfriamento por junta soldada.

Passe	Tempo de esfriamento $\Delta t_{8,5}$ (s)					
	JS-01	JS-02	JS-03	JS-04	JS-05	JS-06
Raiz	2,6	2,3	2,8	2,1	4,0	1,6
A quente	6,5	6,1	7,5	7,5	10,9	6,2
Passe 3	11,7	10,6	9,3	10,7	11,5	11,7
Passe 4	8,0	8,3	11,7	8,6	7,5	6,6
Passe 5	7,6	10,5	8,5	10,7	9,5	8,8
Passe 6	9,1	9,3	9,0	10,3	10,3	9,8
Passe 7	9,0	9,5	10,1	8,7	8,7	9,4

Tabela 16. Aportes de calor por ponto de controle ao longo da circunferência da JS-02.

Lado	Ponto	Passe (kJ/mm)						
		Raiz	Quente	3	4	5	6	7
Esquerdo	-7	0,760	1,134	2,046	1,537	1,817	1,467	1,644
	-6	0,764	1,114	2,015	1,473	1,733	1,450	1,617
	-5	0,741	1,121	1,933	1,556	1,670	1,442	1,580
	-4	0,760	1,148	1,990	1,579	1,651	1,385	1,553
	-3	0,769	1,114	2,012	1,490	1,670	1,402	1,498
	-2	0,717	1,107	2,023	1,481	1,716	1,385	1,544
	-1	0,760	1,094	1,967	1,498	1,688	1,412	1,462
Direito	1	0,656	1,280	1,497	1,201	1,430	1,663	1,613
	2	0,645	1,259	1,545	1,166	1,439	1,642	1,644
	3	0,649	1,257	1,526	1,256	1,457	1,701	1,634
	4	0,630	1,224	1,592	1,271	1,529	1,591	1,542
	5	0,623	1,247	1,545	1,231	1,475	1,642	1,606
	6	0,634	1,208	1,516	1,276	1,529	1,745	1,685
	7	0,627	1,263	1,564	1,314	1,538	1,835	1,715
Média Esquerda		0,753	1,119	1,998	1,516	1,706	1,420	1,557
Média Direita		0,638	1,248	1,541	1,245	1,485	1,689	1,634
Média total		0,695	1,184	1,769	1,381	1,596	1,555	1,595

Tabela 17. Aportes de calor por ponto de controle ao longo da circunferência da JS-04.

Lado	Ponto	Passe (kJ/mm)						
		Raiz	Quente	3	4	5	6	7
Esquerdo	-7	0,742	1,063	1,983	1,408	1,914	1,750	1,450
	-6	0,729	1,076	1,952	1,341	1,863	1,710	1,467
	-5	0,724	1,045	1,879	1,333	1,894	1,700	1,434
	-4	0,733	1,057	1,827	1,356	1,945	1,730	1,400
	-3	0,724	1,051	1,868	1,341	1,904	1,690	1,417
	-2	0,715	1,027	1,817	1,348	1,894	1,710	1,375
	-1	0,769	1,033	1,796	1,333	1,914	1,730	1,409
Direito	1	0,683	1,498	1,706	1,385	1,474	1,594	1,448
	2	0,668	1,568	1,675	1,403	1,342	1,626	1,423
	3	0,660	1,608	1,633	1,473	1,389	1,703	1,364
	4	0,584	1,598	1,675	1,561	1,421	1,683	1,438
	5	0,644	1,528	1,759	1,499	1,500	1,576	1,398
	6	0,636	1,578	1,769	1,491	1,474	1,633	1,456
	7	0,624	1,598	1,790	1,561	1,545	1,713	1,490
Média Esquerda		0,734	1,050	1,874	1,351	1,904	1,717	1,422
Média Direita		0,643	1,568	1,715	1,482	1,449	1,647	1,431
Média total		0,688	1,309	1,795	1,417	1,677	1,682	1,426

Tabela 18. Aportes de calor por ponto de controle ao longo da circunferência da JS-06.

Lado	Ponto	Passe (kJ/mm)						
		Raiz	Quente	3	4	5	6	7
Esquerdo	-7	0,659	1,061	2,003	1,243	1,667	1,539	1,502
	-6	0,703	1,031	1,961	1,230	1,659	1,512	1,510
	-5	0,629	1,037	1,897	1,184	1,624	1,503	1,494
	-4	0,637	1,031	2,001	1,217	1,571	1,521	1,431
	-3	0,646	1,074	1,905	1,177	1,659	1,451	1,470
	-2	0,664	1,049	1,982	1,184	1,641	1,503	1,486
	-1	0,655	1,092	1,971	1,197	1,633	1,530	1,415
Direito	1	0,617	1,413	1,837	1,376	1,332	1,623	1,573
	2	0,624	1,404	1,849	1,352	1,291	1,644	1,628
	3	0,624	1,432	1,883	1,384	1,316	1,717	1,591
	4	0,543	1,395	1,849	1,368	1,332	1,612	1,517
	5	0,580	1,404	1,791	1,295	1,291	1,675	1,556
	6	0,551	1,432	1,814	1,271	1,324	1,696	1,535
	7	0,525	1,442	1,860	1,343	1,349	1,759	1,573
Média Esquerda		0,656	1,054	1,960	1,204	1,636	1,508	1,473
Média Direita		0,581	1,417	1,840	1,341	1,319	1,675	1,568
Média total		0,618	1,236	1,900	1,273	1,478	1,592	1,520

4.3.

Macrografia da Junta Soldada

Foram medidas as dimensões da largura da ZTA obtidas com o processo MAG-CCC e o processo FCAW-G, Tabela 19, sendo a variação da ZTA associada ao processo MAG-CCC entre 3,8 a 4,6 mm e a variação associada ao processo FCAW-G entre 2,2 a 2,7 mm. Observou-se que a altura do passe de raiz apresenta uma variação com relação à posição de soldagem, sendo maior nas posições de 1 a 3, Fig. 24, quando comparadas com as posições 5 a 7; sendo a altura média medida na JS-06 de 3,9 mm.

Na Fig. 49 e Fig. 50, são apresentadas as imagens das macrografias com as descontinuidades encontradas durante a avaliação e são mostradas em detalhe. Segundo as considerações da norma API 1104 [] para a avaliação de placas radiográficas todas as indicações encontradas na seção transversal da junta soldada estão dentro dos limites de aceitação. Para que uma junta soldada seja aceitável por inspeção visual (superfície externa e interna da junta soldada), com a mesma norma deve de estar em acordo com as seguintes considerações: a) O desalinhamento máximo aceitável da junta soldada é de 3 mm, b) O excesso de penetração não deve ser maior a 6 mm, e dentro de um comprimento qualquer contínuo de 300 mm a somatória dos excessos de penetração máximos não deve exceder dos 13 mm, e c) O reforço da junta

soldada não deve estar abaixo do nível da superfície externa do tubo nem pode se elevar acima de 1,6 mm sobre o nível da superfície externa do tubo.

Tabela 19. Dimensões geométricas da JS-06, dimensões em milímetros.

CP	Reforço		Excesso de Penetração	ZTA em FCAW-G		ZTA em MAG-CCC		Altura do passe de raiz	Desalinhamento
	Mín.	Máx.		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.		
4M11	0,25	1,39	0,79	2,00	2,31	2,86	3,38	5,31	0,24
4M12	0,53	1,81	0,99	1,90	2,13	3,15	3,98	5,01	0,29
4M21	1,03	2,78	0,71	2,18	2,52	4,37	6,03	2,96	0,36
4M22	0,82	2,84	0,37	2,33	3,00	4,20	5,40	3,34	0,27
4M31	0,87	0,91	0,70	2,42	2,74	3,25	3,65	4,12	0,00
4M32	0,37	1,56	1,46	2,21	2,67	4,30	5,31	2,49	0,00
4M41	0,16	1,36	1,20	2,25	2,94	3,70	3,77	4,41	0,00
4M42	0,64	1,37	1,19	2,34	2,85	4,21	5,49	3,40	0,37
Médias	0,58	1,75	0,93	2,20	2,65	3,76	4,63	3,88	0,19

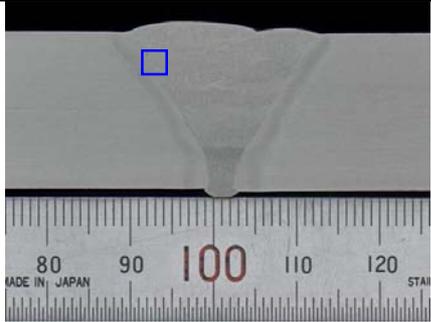
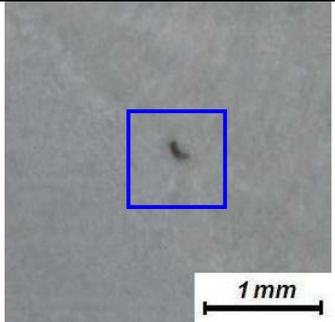
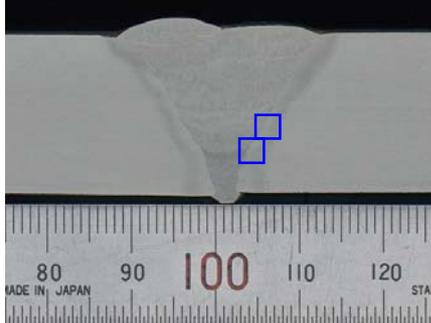
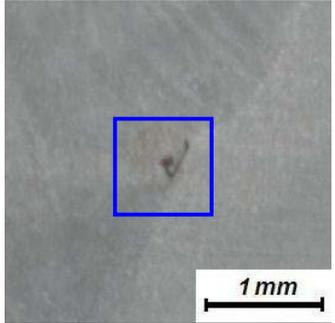
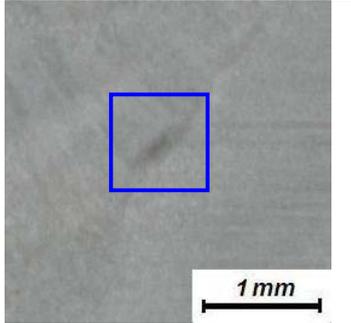
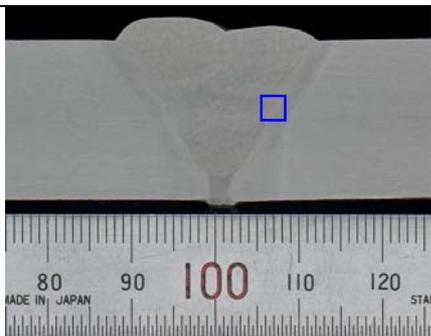
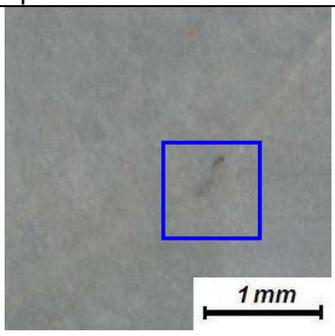
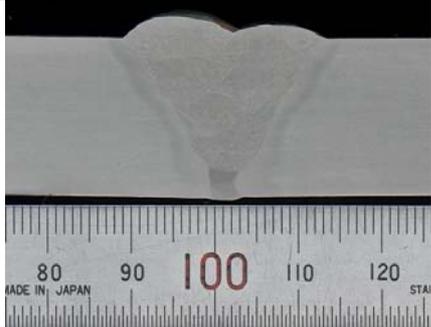
		Sem Imagem
CP: 4M11	Observação: Inclusão de escória entre os passes 5 e 7 em forma de floco.	
		
CP: 4M12	Observação: Possível F.F. no passe quente próximo ao passe de raiz. E I.E. de 0,08 mm de diâmetro aproximado.	Observação: I.E. entre os passes de 2 e 3 alongada,
		Sem Imagem
CP: 4M21	Observação: - I.E. entre os passes 3 e 4, de forma alongada	
	Sem Imagem	Sem Imagem
CP: 4M22	Observação: Sem indicações.	

Figura 49. Macrografias correspondentes às amostras obtidas do lado direito da JS-06.

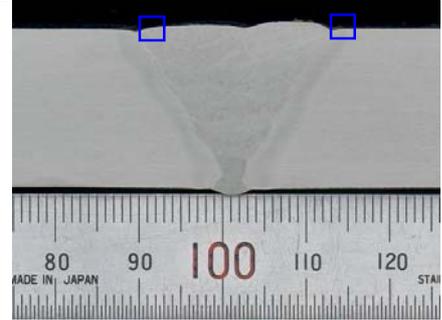
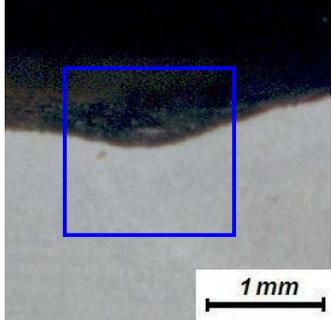
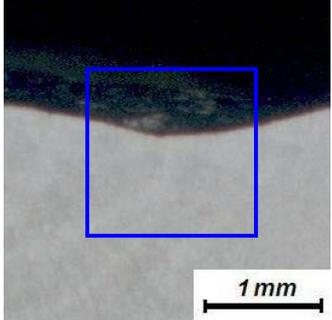
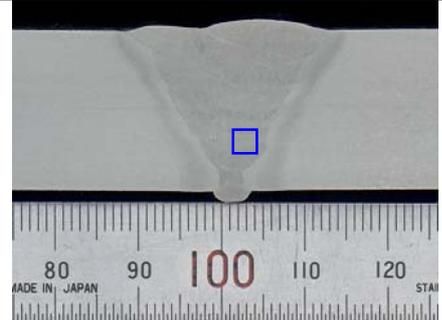
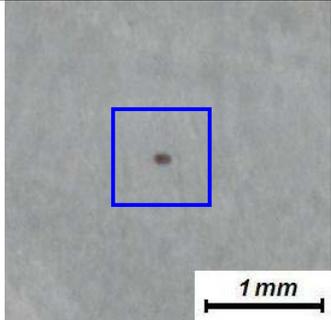
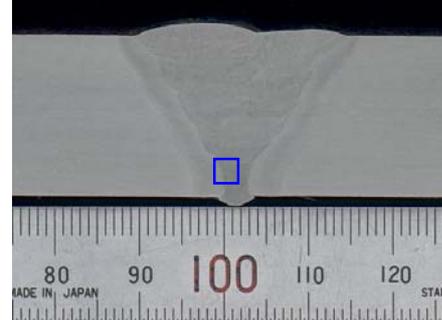
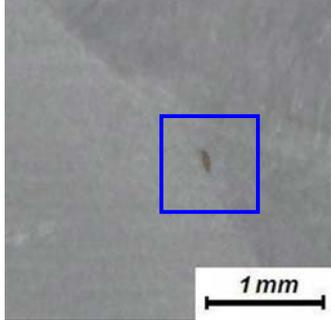
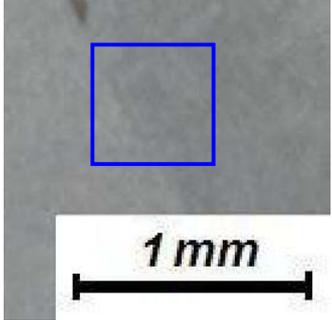
		
CP: 4M31	Observação:- Mordeduras no lado esquerdo e direito com profundidades de 0,29 mm e 0,40 mm respectivamente.	
		Sem Imagem
CP: 4M32	Observação: - Porosidade ou inclusão de escória no passe 2 de 0,12 mm de diâmetro.	
		
CP: 4M41	Observação: Porosidade ou F.F. passe de raiz, de forma elíptica de 0,06 mm e 0,02 mm de diâmetros.	Observação: Possível F.F. no passe de raiz de 0,31mm de comprimento
	Sem Imagem	Sem Imagem
CP: 4M42	Observação: Sem indicações.	

Figura 50. Macrografias correspondentes às amostras obtidas do lado esquerdo da JS-

Na Fig. 51 resumem-se de forma gráfica as dimensões do reforço e excesso de penetração para cada amostra. Na curva de penetração, linha em vermelho, realizado com o processo MAG-CCC com progressão descendente, ao se comparar as posições diametralmente simétricas entre cada soldador, se pode observar que a influencia esta em função da técnica de soldagem e não na posição de soldagem, já que não existe uma tendência na gráfica.

No mesmo gráfico, Fig. 51, são representadas as curvas de reforço mínimo e máximo, em cor azul. Em caso de que a curva de reforço mínimo se encontre abaixo da superfície externa do tubo, linha em verde, gera uma secção transversal ao cordão de solda de menor área que pode iniciar falhas mecânicas devido a uma concentração de tensões. Comparando novamente entre cada soldador e partindo da Fig. 47, gráfico X80-4 JS-06, se pode inferir que o passe 4P (1,204 kJ/mm, Tabela 18), no caso do soldador esquerdo foi executado com uma velocidade de soldagem maior, já que ao manter uma corrente e tensão quase constantes a única variável que pode abaixar o calor de aporte é a velocidade de soldagem, o que permitiu realizar um cordão mas fino e consequentemente menor altura de material de aporte, sendo o seu passe 5P com maior aporte de calor (1,636 kJ/mm, Tabela 18), que permitiu cobrir esta camada de enchimento. Esta técnica permite deixar uma altura adequada entre a superfície da camada de enchimento e a superfície externa do tubo onde será executado o passe de acabamento, garantindo que o reforço não atinja alturas que possam não ser aceitas pela norma API 1104 [66]. No caso do soldador direito, seus passes 4P e 5P (1,341 e 1,319 kJ/mm respectivamente, Tabela 18), possuem aportes de calor similares o que quer dizer cordões de enchimento com a mesma quantidade de aporte de material, deixando menos altura entre a superfície livre da camada de enchimento e a superfície externa do tubo. E ainda os passes 6P e 7P do soldador direito possuem maiores aportes de calor que os passes correspondentes do soldador esquerdo, o que se vê refletido na Fig. 51, que apresenta um reforço excessivo sobre tudo nas posições vertical, vertical-sobrecabeça e sobrecabeça, onde a força de gravidade age de forma não benéfica. Novamente a técnica de soldagem tem influencia significativa na geometria do cordão.

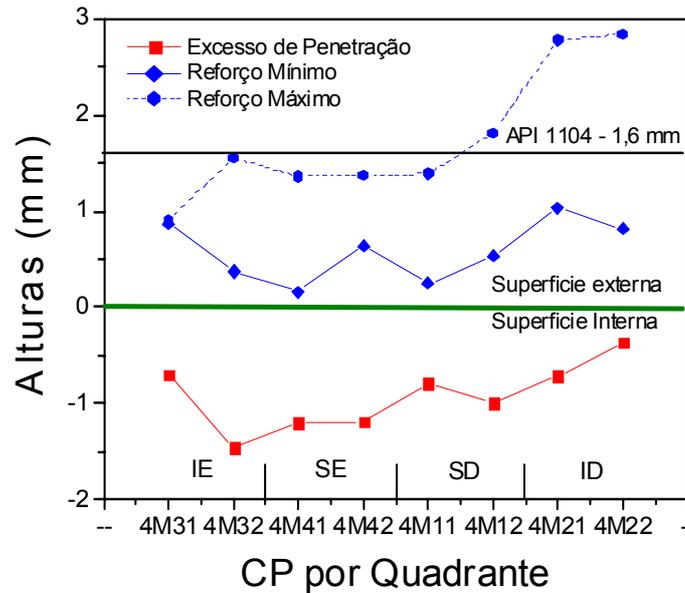


Figura 51. Alturas de reforço e excesso de penetração ao longo da junta soldada.

4.4. Análise química

Das amostras retiradas para as macrografias da JS-06 foram obtidos os valores da composição química dos elementos presentes nas regiões que compõem o metal de solda, tal como é apresentado na Tabela 20. Com base nestes resultados da análise química calculou-se que para o passe de raiz o $P_{CM} = 0,237$ e $CE_{IIV} = 0,462$, para os passes de enchimento o $P_{CM} = 0,233$ e $CE_{IIV} = 0,465$ e para os passes de acabamento o $P_{CM} = 0,236$ e $CE_{IIV} = 0,468$.

Tabela 20. Composição química do metal de solda.

Elementos (% em peso)	Região		
	P. Raiz	P. Enchimento	P. Acabamento
C	0,100	0,067	0,067
Mn	1,540	1,708	1,713
Si	0,394	0,355	0,361
Mo	0,378	0,276	0,268
Ni	0,118	0,625	0,690
Cr	0,055	0,052	0,048
Cu	0,147	0,036	0,036
Nb	0,005	0,012	0,012
V	0,006	0,019	0,020
Ti	0,012	0,044	0,043
Al	0,002	0,002	0,002
P	0,011	0,012	0,012
S	0,014	0,011	0,012
B	0,002	0,007	0,007

4.5. Ensaio Mecânico

4.5.1. Ensaio de tração

O valor médio dos resultados obtidos no ensaio de tração foi de 674 MPa, valor acima do valor mínimo no limite de ruptura definido pela norma API 5L [35] o qual é 621 MPa. Todos os corpos de prova fraturaram no material de base fora da junta soldada e não foi evidenciado trincamento no metal de solda. Na Fig. 52 são mostrados os corpos de prova após ensaio, onde pode ser observado que existiu um trincamento na região central da espessura do tubo, círculos em amarelo, como possível consequência da etapa de laminação da chapa da qual foi conformado o tubo. A propagação da trinca por este plano de falha lamelar possui um comprimento entre os 16 a 23 mm. Na Fig. 53, se mostra o detalhe o plano de formação do trincamento nos corpos de prova de tração após ensaio. Os valores de tração obtidos para cada quadrante são apresentados na Tabela 21 e Fig. 54.

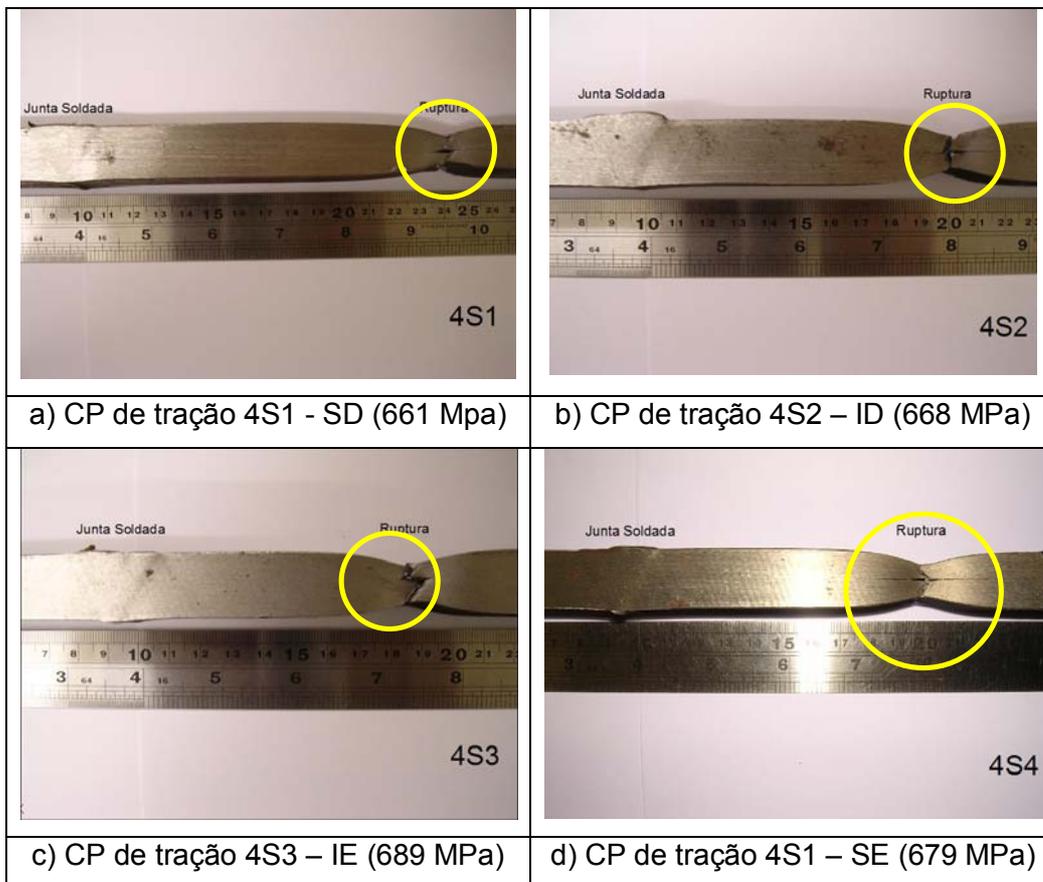


Figura 52. Resultado dos corpos de prova de tração após ensaio.

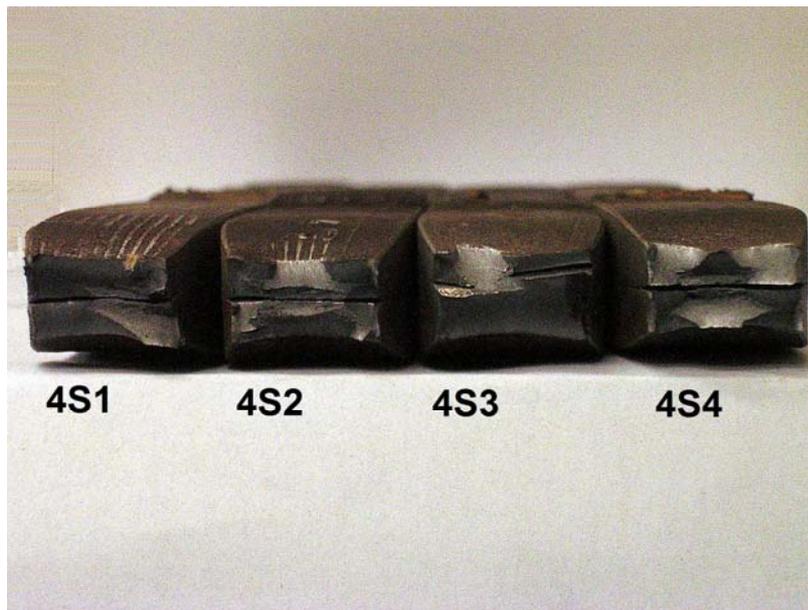


Figura 53. Superfície da área resultante do ensaio de tração.

Tabela 21. Resultados dos ensaios de tração.

CP	Quadrante	Limite de Resistência LR (MPa)
4S1	SD	661
4S2	ID	668
4S3	IE	689
4S4	SE	679
Média		674

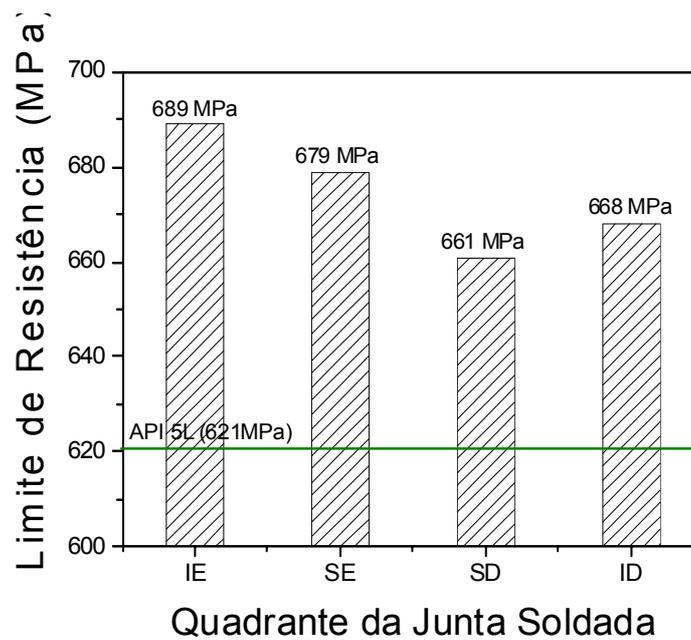


Figura 54. Gráfico dos resultados do ensaio de tração

4.5.2. Ensaio de dobramento

O resultado do ensaio de dobramento não foi satisfatório, segundo a norma API 1104 [66], porque o corpo-de-prova 4D41 apresentou uma descontinuidade maior que 3 mm por falta de fusão no passe de raiz. Nos outros corpos de prova que apresentaram alguma descontinuidade esta se originou, na sua maioria, no passe de raiz. Outros quatro corpos de prova também apresentaram descontinuidades, as quais estiveram dentro do critério de aceitabilidade da norma API 1104 [66]. Principalmente estas descontinuidades se apresentaram no passe de raiz. O resultado de todos os corpos de prova para este ensaio é apresentado na Tabela 22, e as imagens correspondentes na Fig. 55.

Tabela 22. Resultados do ensaio de dobramento.

<i>CP</i>	<i>Dimensões (mm)</i>	<i>Resultados</i>
4D11	19.35 x 13.27	Sem descontinuidade
4D12	19.38 x 13.30	Apresentou descontinuidade < 1/8"
4D21	19.40 x 13.26	Apresentou descontinuidade < 1/8"
4D22	19.39 x 13.31	Apresentou descontinuidade < 1/8"
4D31	19.38 x 13.30	Apresentou descontinuidade < 1/8"
4D32	19.37 x 13.28	Sem descontinuidade
4D41	19.39 x 13.27	Apresentou descontinuidade > 1/8"
4D42	19.41 x 13.30	Sem descontinuidade

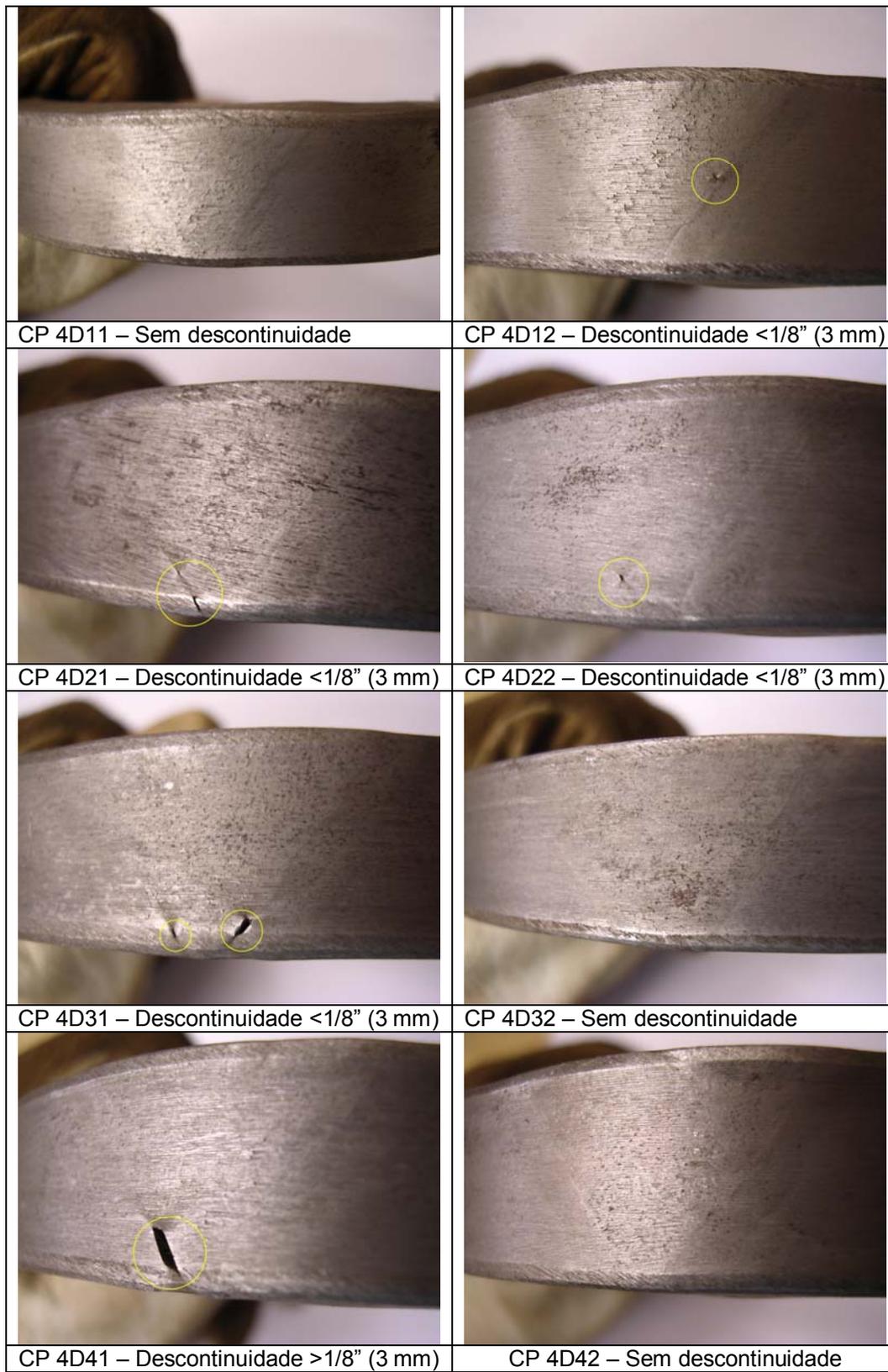


Figura 55. Imagens dos corpos de prova de dobramento após ensaio. Defeitos marcados em círculos amarelos

4.5.3. Ensaio de Nick- Break.

Os resultados deste ensaio foram satisfatórios, segundo a norma API 1104 [66], onde não foi observado sobre as superfícies indicações de falta de fusão, porosidade ou inclusão de escória. Todos os corpos de prova foram ensaiados em tração. Na Tabela 23, é resumido os resultados e na Fig. 56 são apresentadas as superfícies obtidas após ensaio.

Tabela 23. Resultados do ensaio de ruptura por entalhe.

<i>CP</i>	<i>Dimensões (mm)</i>	<i>Resultados</i>
4N1	25,17 x 19,39	Sem indicações
4N2	25,20 x 19,37	Sem indicações
4N3	25,16 x 19,38	Sem indicações
4N4	25,18 x 19,39	Sem indicações

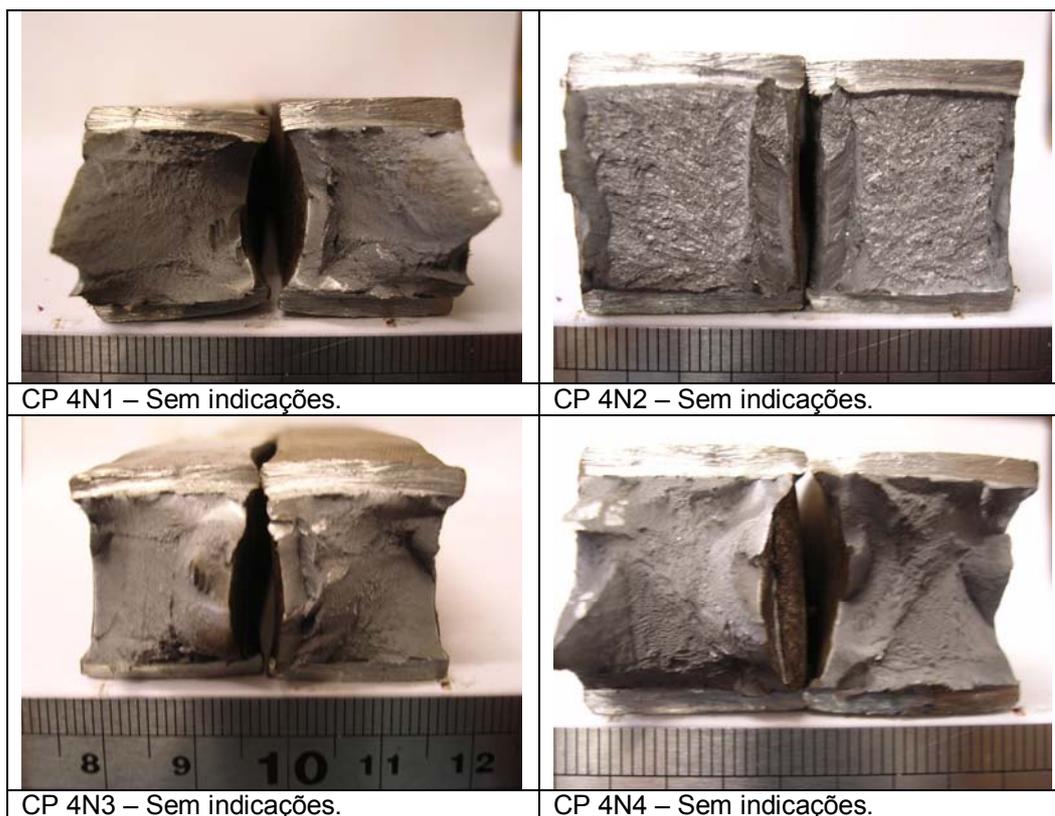


Figura 56 Corpos de prova de Nick-Break após ensaio. Escala em milímetros.

4.5.4. Ensaio de Microdureza Vickers.

As medições da microdureza Vickers nas quatro amostras obtidas do JS-06 para o eixo superior e eixo inferior, tal como indicado na Fig. 31, são apresentados na Tabela 24 e Tabela 25, respectivamente. A Fig. 57 apresenta o mapeamento dos valores de microdureza para ambos dos eixos.

No eixo superior, Fig. 57a, o valor médio máximo calculado na região da ZTA foi de 275 HV, sendo o valor máximo individual de 318 HV. Estes valores, assim como os valores máximos na ZTA, encontraram-se nos pontos próximos à LF (pontos -5 e 5, ver Fig. 32). Na região do metal de solda encontrou-se uma grande variação nos valores de microdureza, os quais se encontraram entre 216 a 322 HV, esta variação nos valores se pode dever à heterogeneidade microestrutural existente nesta região como consequência de regiões de grãos colunares e regiões reaquecidas.

No eixo inferior, Fig. 57b, o valor médio máximo calculado na região da ZTA foi de 241 HV localizado, também, na região próxima à LF. Os valores de microdureza na região do metal de solda se encontraram entre 218 a 238 HV, apresentando uma menor variação em comparação ao eixo superior. Esta variação pode ser devido a que o material de aporte utilizado foi diferente ao passes de enchimento.

Deve ser observado que em nenhum dos casos das medições de microdureza nas regiões próximas à ZTA, sejam de forma pontual ou na média os valores, ultrapassaram os valores de 366 HV e 250 HV [22], para a borda superior e borda inferior da junta soldada respectivamente, que garantem não ser susceptíveis a trincas.

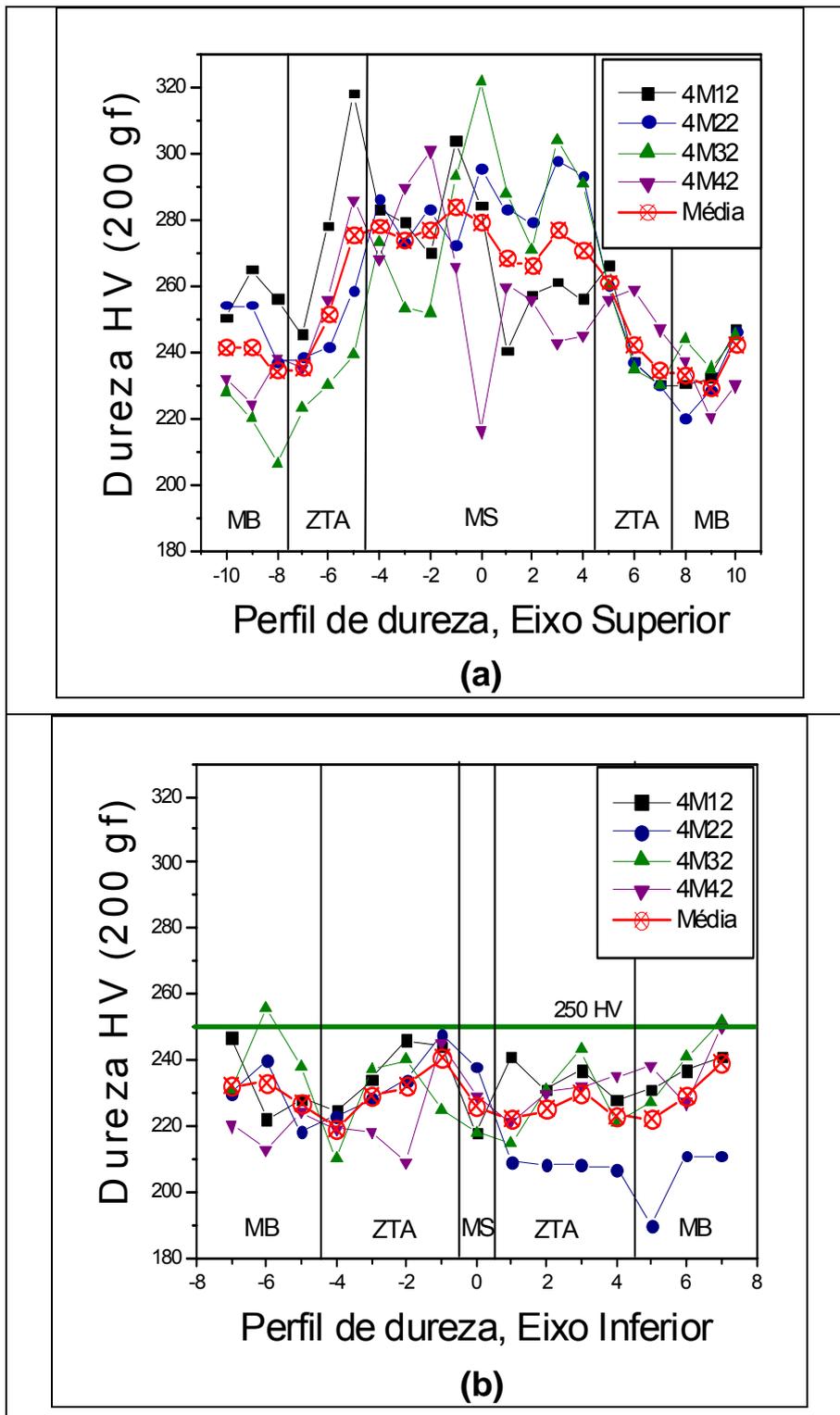


Figura 57. Resultados do ensaio de microdureza Vickers a) eixo superior da junta soldada, e b) eixo inferior da junta soldada.

4.5.5. Ensaio de Impacto Charpy V

Como antes mencionado a posição do entalhe nos corpos de prova Charpy permite que a propagação da fratura percorra zonas tais como a ZTA, MB e/ou MS, cada uma com diferentes capacidades de absorção ao impacto. Para possuir uma noção da zona dominante em cada região da avaliação de absorção de impacto da junta soldada, realizaram-se medições sobre todas as macrografias da JS-06, simulando a posição do entalhe para as diferentes regiões de avaliação. Este permitiu inferir a zona ou zonas dominantes, em porcentagem, para cada corpo-de-prova de impacto Charpy V por região de avaliação. Estas medições são apresentadas na Tabela 26 para o entalhe posicionado na LF e ZTA e na Tabela 27, para a raiz e topo.

Tabela 26. Zonas de propagação da fratura inferidas nas medições sobre as macrografias da JS-06. Regiões de LF e ZTA. Valores em fração.

CP	CVN – LF			CVN – ZTA		
	MB	ZTA	MS	MB	ZTA	MS
4M11	0,000	0,500	0,500	0,266	0,395	0,339
4M12	0,000	0,500	0,500	0,233	0,503	0,264
4M21	0,000	0,500	0,500	0,215	0,513	0,272
4M22	0,000	0,500	0,500	0,274	0,447	0,279
4M31	0,000	0,500	0,500	0,298	0,377	0,325
4M32	0,000	0,500	0,500	0,174	0,566	0,260
4M41	0,000	0,500	0,500	0,154	0,652	0,194
4M42	0,123	0,377	0,500	0,181	0,499	0,320
Média	0,015	0,485	0,500	0,224	0,494	0,282

Tabela 27. Zonas de propagação da fratura inferidas nas medições sobre as macrografias da JS-06. Regiões de Raiz e Topo. Valores em fração.

CP	CVN – Raiz			CVN – Topo			
	1 Passe	2 Passe	3 Passe	2 Passe	3 Passe	C/Enchim.	C/Acabam.
4M11	0,404	0,515	0,081	0,315	0,081	0,498	0,106
4M12	0,388	0,436	0,176	0,237	0,220	0,465	0,078
4M21	0,175	0,575	0,250	0,000	0,389	0,495	0,116
4M22	0,199	0,261	0,540	0,000	0,233	0,658	0,109
4M31	0,296	0,225	0,479	0,000	0,217	0,483	0,300
4M32	0,133	0,423	0,444	0,000	0,370	0,630	0,000
4M41	0,306	0,289	0,405	0,000	0,469	0,416	0,115
4M42	0,174	0,391	0,435	0,000	0,365	0,485	0,150
Média	0,259	0,389	0,351	0,069	0,293	0,516	0,122

Os valores resultantes do ensaio de impacto para as diferentes regiões são apresentados na Tabela 28 e os valores médios destes valores por região na

Tabela 29 e no gráfico da Fig. 58. Onde MBL refere-se ao material de base testado na posição longitudinal.

Na Fig. 58 observa-se que a energia de impacto absorvida na região da ZTA, curva em vermelho, é superior ao do MB, curva em azul escuro, na faixa de temperatura de -20 a 0 °C. Já abaixo da temperatura de -40 °C, esta superioridade não é evidenciada. Esta queda pode estar relacionada com a diminuição da capacidade de absorção de energia do metal de solda (o qual se trata na sua totalidade do E 101T1-GM-H8), para baixas temperaturas (46 J a -29 °C segundo fabricante, Tabela 7), já que como pode ser observado na Tabela 25, as medições realizadas para esta região de avaliação de impacto (ZTA), sugere que um 28% das zonas por onde se propaga a trinca esta composta de MS.

A avaliação da curva de absorção de impacto para a região da LF, em cor preta na Fig. 58, apresentou uma queda proporcional à diminuição da temperatura, originando uma curva suave a qual seguiu a tendência à curva da ZTA na faixa de temperatura de -40 a -80 °C. Esta tendência pode ter relação com os valores médios inferidos das zonas por onde a trinca pode ter propagado Tabela 26, os quais são 48,5 % de ZTA, 50 % de MS e 1,5 % de MB, esta alta porcentagem de MS, pode ser o fator que reduz a capacidade de absorção de energia, quando comparado com a região da ZTA. O metal de solda esta composto integralmente do E 101 T1-GM-H8, o qual como foi antes dito, possui uma absorção de energia relativamente baixa de 46 J a -29 °C segundo fabricante, Tabela 7.

A avaliação da energia de impacto para as regiões da raiz e topo da junta soldada pertencentes ao material de solda estão representadas na Fig. 58 pelas curvas em cores roxo e azul, respectivamente. A curva para a região da raiz quando comparada com a curva da região do topo apresenta melhores resultados para todas as temperaturas de avaliação no presente trabalho, a diferença é marcante entre as temperaturas de -20 a 0 °C. Esta diferença pode-se dever a que na região da raiz, esta composta do metal de aporte ER 80S-G (material utilizado no passe de raiz em um valor sugerido de 25,9 % segundo os cálculos inferidos e representados na Tabela 26), o qual possui segundo o fabricante para uma temperatura de -29 °C uma absorção de impacto de 148 J, Tabela 7, conferindo uma maior energia de impacto. Já para os valores compreendidos entre as temperaturas de -80 a -40 °C estes são muito similares descrevendo curvas com a mesma tendência lineal.

No caso dos corpos de prova pertencentes à região do topo outro fator que pode ter influenciado na obtenção de um valor médio de 43,2 para 0 °C abaixo do valor mínimo de aceitação (56 J), ademais de estar inteiramente composto pelo material de solda E 101 T1-GM-H8 o qual possui baixa absorção ao impacto quando comparado com o E 80S-G para -29 °C, é só ter realizado a camada de acabamento com dois passes. Resultados posteriores ao presente trabalho demonstraram que a camada de acabamento com três passes com o mesmo material de solda E 101 T1-GM-H8 permitiram atingir um valor médio de 77,5 J para 0 °C nesta região [71]. O incrementar o número de passes permite realizar um revenido entre estes passes.

Tabela 28. Valores médios dos ensaios de impacto Charpy V.

Região	Temperatura (°C)														
	0			-20			-40			-60			-80		
	CP	Energia (J)		CP	Energia (J)		CP	Energia (J)		CP	Energia (J)		CP	Energia (J)	
Linha de fusão	4L01	170.6		4L21	129.5		4L41	41.2		4L61	33.3		4L81	23.5	
	4L02	125.5		4L22	76.5		4L42	62.8		4L62	17.7		4L82	21.6	
	4L03	102.0		4L23	92.2		4L43	94.1		4L63	23.5		4L83	15.7	
	4L04	94.1		4L24	102.0		4L44	60.8		4L64	33.3		4L84	15.7	
	4L05	125.5		4L25	115.7		4L45	62.8		4L65	17.7		4L85	15.7	
	4L06	215.8		4L26	74.5		4L46	96.1		4L66	113.8		4L86	9.8	
ZTA	4Z01	227.5		4Z21	188.3		4Z41	72.6		4Z61	51.0		4Z81	31.4	
	4Z02	205.9		4Z22	223.6		4Z42	76.5		4Z62	66.7		4Z82	27.5	
	4Z03	111.8		4Z23	227.5		4Z43	88.3		4Z63	72.6		4Z83	31.4	
	4Z04	229.5		4Z24	217.7		4Z44	200.1		4Z64	47.1		4Z84	39.2	
	4Z05	229.5		4Z25	221.6		4Z45	66.7		4Z65	47.1		4Z85	15.7	
	4Z06	158.9		4Z26	155.0		4Z46	78.5		4Z66	54.9		4Z86	47.1	
Raiz	4R01	80.4		4R21	25.5		4R41	13.7		4R61	7.8		4R81	7.8	
	4R02	74.5		4R22	56.9		4R42	17.7		4R62	13.7		4R82	7.8	
	4R03	56.9		4R23	33.3		4R43	25.5		4R63	13.7		4R83	11.8	
	4R04	45.1		4R24	58.8		4R44	25.5		4R64	15.7		4R84	9.8	
	4R05	62.8		4R25	54.9		4R45	31.4		4R65	15.7		4R85	11.8	
	4R06	58.8		4R26	31.4		4R46	19.6		4R66	17.7		4R86	9.8	
Topo	4T01	58.8		4T21	17.7		4T41	21.6		4T61	11.8		4T81	11.8	
	4T02	37.3		4T22	31.4		4T42	25.5		4T62	11.8		4T82	5.9	
	4T03	43.2		4T23	35.3		4T43	15.7		4T63	9.8		4T83	7.8	
	4T04	45.1		4T24	17.7		4T44	27.5		4T64	13.7		4T84	9.8	
	4T05	35.3		4T25	13.7		4T45	15.7		4T65	7.8		4T85	7.8	
	4T06	43.2		4T26	25.5		4T46	13.7		4T66	11.8		4T86	7.8	
MBL	3B01	211.8		3B21	133.4		3B41	141.2		3B61	121.6		3B81	107.9	
	3B02	209.9		3B22	147.1		3B42	145.1		3B62	125.5		3B82	102.0	
	3B03	153.0		3B23	133.4		3B43	151.0		3B63	115.7		3B83	100.0	

Tabela 29. Valores médios resultantes do ensaio de impacto Charpy V.

Temperatura (°C)	Energia de impacto média por regiões (J)				
	LF	ZTA	Raiz	Topo	MB L
0	147,4	205,6	64,8	43,2	191,6
-20	97,6	202,4	41,7	23,8	138,0
-40	71,7	82,9	22,2	18,5	145,8
-60	43,5	57,0	14,2	10,7	121,0
-80	16,7	31,2	9,9	8,3	103,3

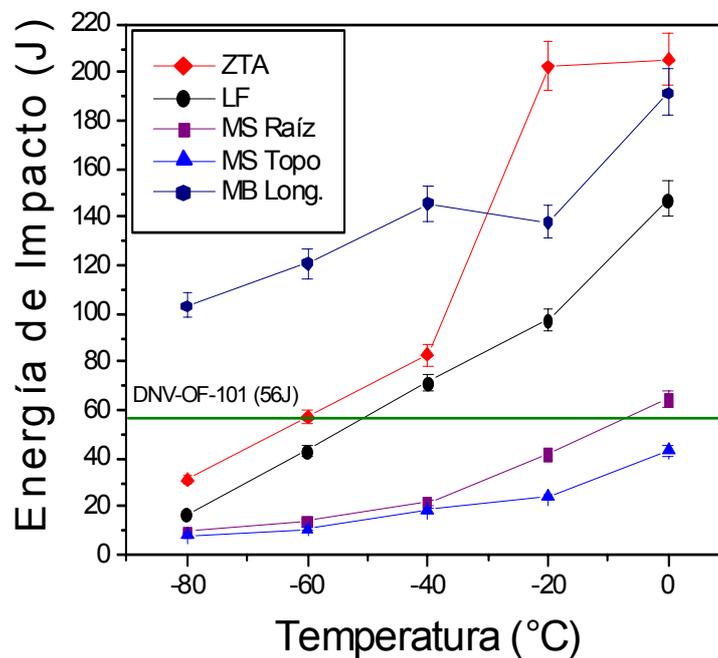


Figura 58. Valores médios resultantes do ensaio de impacto Charpy V.

Do anterior, as regiões da junta soldada para a temperatura de 0 °C, com exceção da região do metal de solda referente ao topo, cumprem com os critérios de aceitação especificados pela norma DNV-OS-F101 [67].

4.5.5.1. Influencia da posição de soldagem

Procurar uma relação entre o aporte de calor e a energia de impacto absorvida por cada corpo-de-prova do ensaio Charpy V, para a soldagem circunferencial, torna-se complexo devido à mudança de posição circunferencial da fonte de calor e por se tratar de uma soldagem multipasse, onde os aportes

de calor vão se somando fazendo uma mudança microestrutural da junta soldada complexa de prever. Esta mudança de posição, somado à técnica de soldagem, tem uma relação direta com a transferência metálica o que afeta a poça de fusão e, por conseguinte, à microestrutura da junta soldada.

Mesmo sendo complexa a análise em uma junta soldada circunferencial, pode-se tentar ter um conceito da influência da posição em relação à energia de impacto absorvida. No gráfico da Fig. 59 é representada a variação da energia de impacto com a variação da posição da tocha ao longo da soldagem circunferencial. Realizado para a temperatura de 0 °C se observa por meio das linhas descontinuas que indistintamente das regiões da junta soldada (ZTA, LF, raiz e topo), existe um tendência de queda da energia de impacto absorvida na posição vertical (V2 e V3), sendo este fato mais evidente nos valores médios resultantes para a região da LF. Esta tendência pode ter relação com o valor inferido de 50% do metal de solda nesta região, Tabela 26, no plano por onde propagou a fratura. Tendências similares podem ser observadas para as regiões do metal de solda da raiz e topo.

No caso da região da ZTA a energia de impacto apresenta uma alta dispersão, este fato pode ser atribuído à presença do metal de base na região por onde propagou a fratura. Cálculos inferidos da Tabela 26 sugerem que nesta região existe uma porcentagem de 22,4% de material de base. A influência do metal de base sobre os resultados de impacto é baseada na microestrutura deste devido ao processo de laminação da chapa e conformação do tubo, não sendo influenciado pela posição de soldagem.

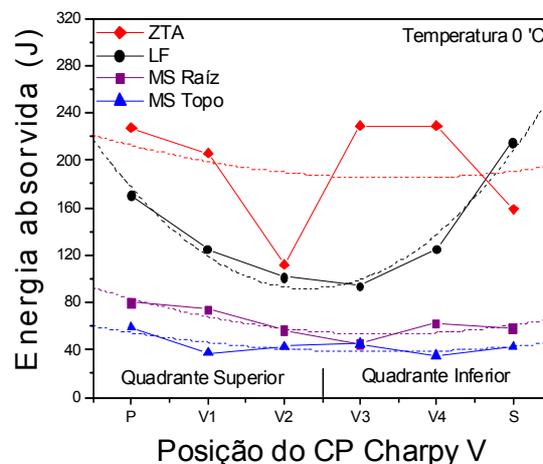


Figura 59. Gráfico da variação da energia de impacto para as diferentes regiões e posições de soldagem para a temperatura de 0 °C.

4.5.6. Fractrografia dos CPs de Impacto Charpy V após ensaio

Foi escolhido um CP fraturado por região e temperatura, do qual foram obtidas seis imagens de cada um, totalizando 120 imagens analisadas as quais são apresentadas, por temperaturas, desde a Fig. 60 até a Fig. 64, três imagens representativas para cada CP. Onde os pontos descritos para cada região se referem aquelas da Fig. 40, considerado no capítulo 3.

4.5.6.1. Temperatura de ensaio 0 °C

A superfície de ruptura do corpo-de-prova da ZTA apresentou uma superfície com presença de microcavidades dúcteis finas, Fig. 60a e Fig. 60c, e dúcteis grosseiras, Fig. 60b. No primeiro caso pode-se dever ao tratamento térmico ao qual foi exposta a ZTA devido aos ciclos térmicos da soldagem multipasse, no segundo caso pode-se dever a um tratamento térmico com resfriamento lento durante o qual as partículas de carbeto grosseiros precipitam. A superfície de ruptura do corpo-de-prova da LF apresentou uma mistura de regiões dúcteis e frágeis, Fig. 60d e Fig. 60f, com algumas áreas frágeis isoladas, Fig. 60e. Na Fig. 60f nota-se a presença de uma microcavidade dúctil grosseira isolada perto da superfície de fratura frágil por clivagem, esta microcavidade talvez esteja associada à presença de uma inclusão não metálica, própria do metal de solda. A superfície de ruptura do corpo-de-prova da raiz apresentou uma superfície com inícios de rupturas por clivagem, Fig. 60h, e regiões com microcavidades dúcteis finas isoladas, Fig. 60i. A superfície de ruptura do corpo-de-prova do topo apresentou uma transição rápida da superfície dúctil inicial perto da zona do entalhe a uma superfície frágil (fratura por clivagem), Fig. 60j. Na Fig. 60k e Fig. 60l nota-se superfícies de fratura típicas por clivagem com presença de microtrincas secundárias, Fig. 60k, e alvéolos, Fig. 60l, que podem ser consequência de inclusões não metálicas.

4.5.6.2. Temperatura de ensaio -20 °C

A superfície de ruptura do corpo-de-prova da ZTA apresentou uma região de microcavidades dúcteis grosseiras próximas à região do entalhe, Fig. 61a, mudando a uma mistura superficial de microcavidades dúcteis finas e inícios de fratura por clivagem, Fig. 61b, com presença de alguns alvéolos grosseiros, Fig.

61c. A superfície de ruptura do corpo-de-prova da LF apresenta uma superfície marcadamente de fratura por clivagem e trincas secundárias, Fig. 61e, com regiões isoladas de microcavidades dúcteis, Fig. 61f. A superfície de ruptura do corpo-de-prova da raiz apresentou fratura por clivagem, Fig. 61i com regiões dúcteis isoladas, Fig. 61h, talvez pela presença de partículas não metálicas. Na Fig. 61h nota-se a presença de microporosidades isoladas as quais podem ter aparecido como consequência próprias do processo de soldagem. A superfície de ruptura do corpo-de-prova do topo apresenta uma superfície de fratura por clivagem, Fig. 61l, com zonas dúcteis de microcavidades com deformação alongada, Fig. 61k.

4.5.6.3. Temperatura de ensaio -40 °C

A superfície de ruptura do corpo-de-prova da ZTA apresentou uma fratura por clivagem, Fig. 62b e Fig. 62c, com pouca presença de regiões dúcteis, Fig. 62c, o que sugere que a temperatura de transição se encontra acima dos -40 °C. A superfície de ruptura do corpo-de-prova da LF apresentou zonas de fratura por clivagem, Fig. 62e e Fig. 62f, com presença de microcavidades dúcteis. A superfície de ruptura do corpo-de-prova da raiz apresentou diferentes planos de clivagem, Fig. 62h, com presença de trincas secundárias, Fig. 62i. A superfície de ruptura do corpo-de-prova do topo apresentou uma transição rápida da região dúctil perto do entalhe a uma região de fratura por clivagem, Fig. 62j. As regiões da superfície foram frágeis (fratura por clivagem), Fig. 62k e Fig. 62l.

4.5.6.4. Temperatura de ensaio -60 °C

A superfície de ruptura do corpo-de-prova da ZTA apresentou fratura frágil por clivagem, não existe presença de regiões dúcteis. A superfície de ruptura do corpo-de-prova da LF apresentou fratura frágil por clivagem, Fig. 63e e Fig. 63f. A superfície de ruptura do corpo-de-prova da raiz apresentou fratura por clivagem na totalidade da sua superfície, Fig. 63h e Fig. 63i. A superfície de ruptura do corpo-de-prova do topo apresentou uma transição rápida da região dúctil perto do entalhe a uma região de fratura frágil por clivagem, Fig. 63j. A superfície apresentou ser fratura por clivagem, Fig. 63h e Fig. 63l.

4.5.6.5. Temperatura de ensaio -80 °C

A esta temperatura todas as superfícies de ruptura dos corpos de prova das diferentes regiões apresentam superfícies de fratura por clivagem. No caso das superfícies dos corpos de prova da LF e topo, Fig. 64f e Fig. 64l respectivamente, nota-se a presença de colônias isoladas de microcavidades dúcteis, possivelmente como consequência de regiões com precipitados não metálicos. Na Tabela 30, é apresentado o tipo de superfície de fratura por região para cada uma das temperaturas de avaliação.

Tabela 30. Superfície de fratura para cada CP do ensaio de impacto Charpy V.

<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Região</i>			
	<i>ZTA</i>	<i>Linha de fusão</i>	<i>Raiz</i>	<i>Topo</i>
0	Dúctil	Dúctil – Clivagem	Dúctil – Clivagem	Clivagem
-20	Dúctil	Dúctil – Clivagem	Dúctil – Clivagem	Clivagem
-40	Clivagem	Clivagem	Clivagem	Clivagem
-60	Clivagem	Clivagem	Clivagem	Clivagem
-80	Clivagem	Clivagem	Clivagem	Clivagem

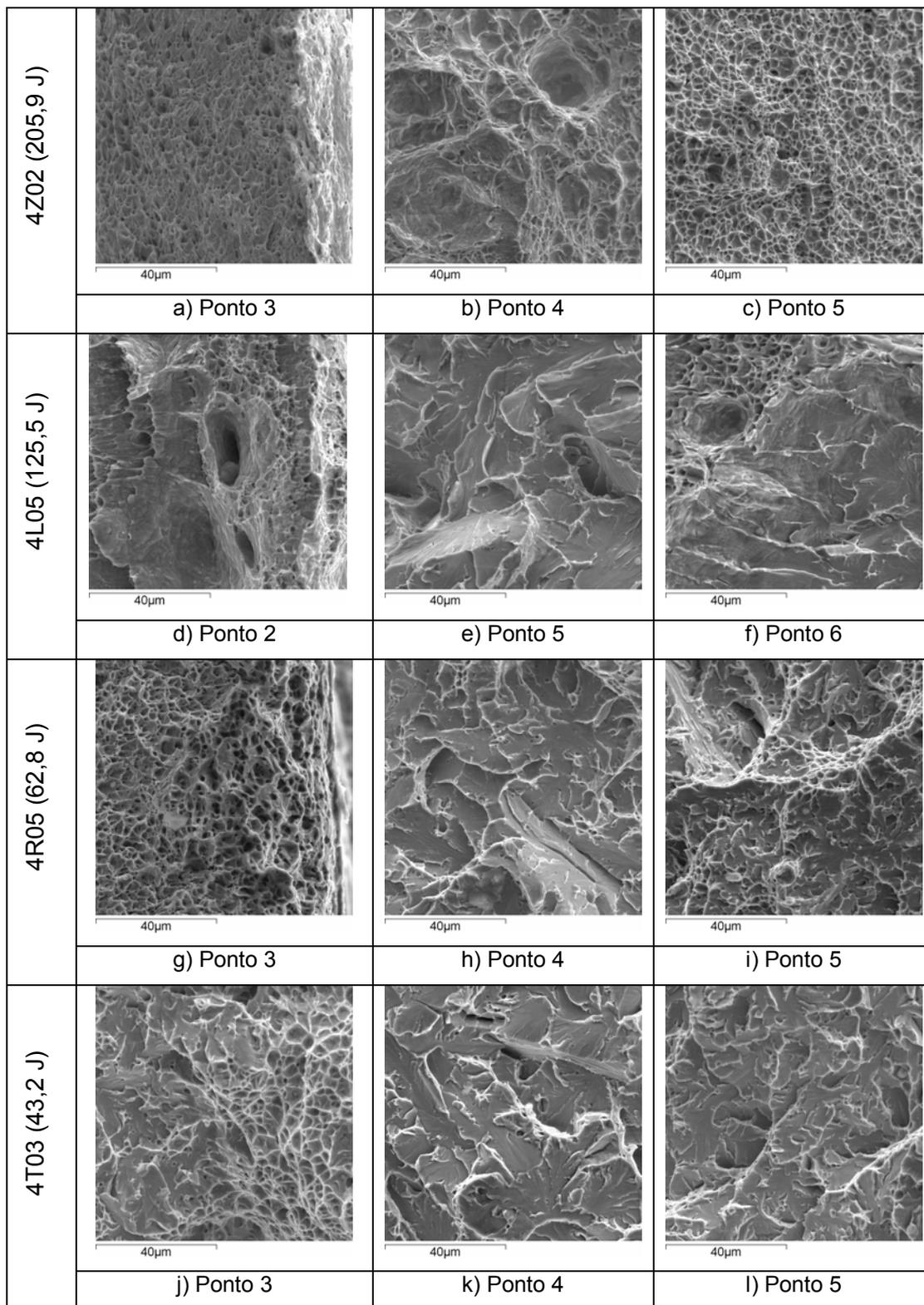


Figura 60. Imagens das superfícies de fraturas para as diferentes regiões a 0 °C com aumento de 1000x, obtidas por MEV.

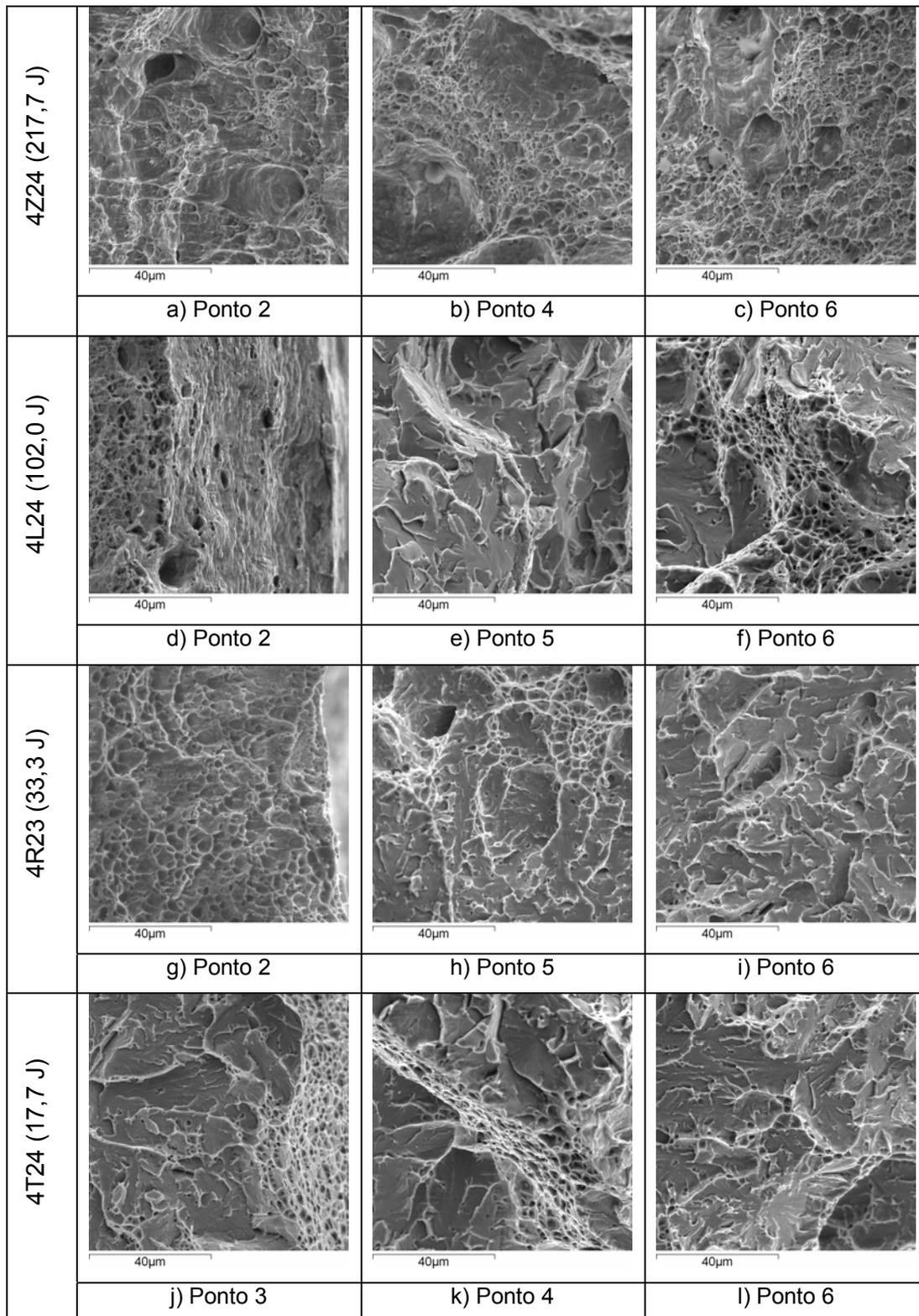


Figura 61. Imagens das superfícies de fraturas para as diferentes regiões a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ com aumento de 1000x, obtidas por MEV.

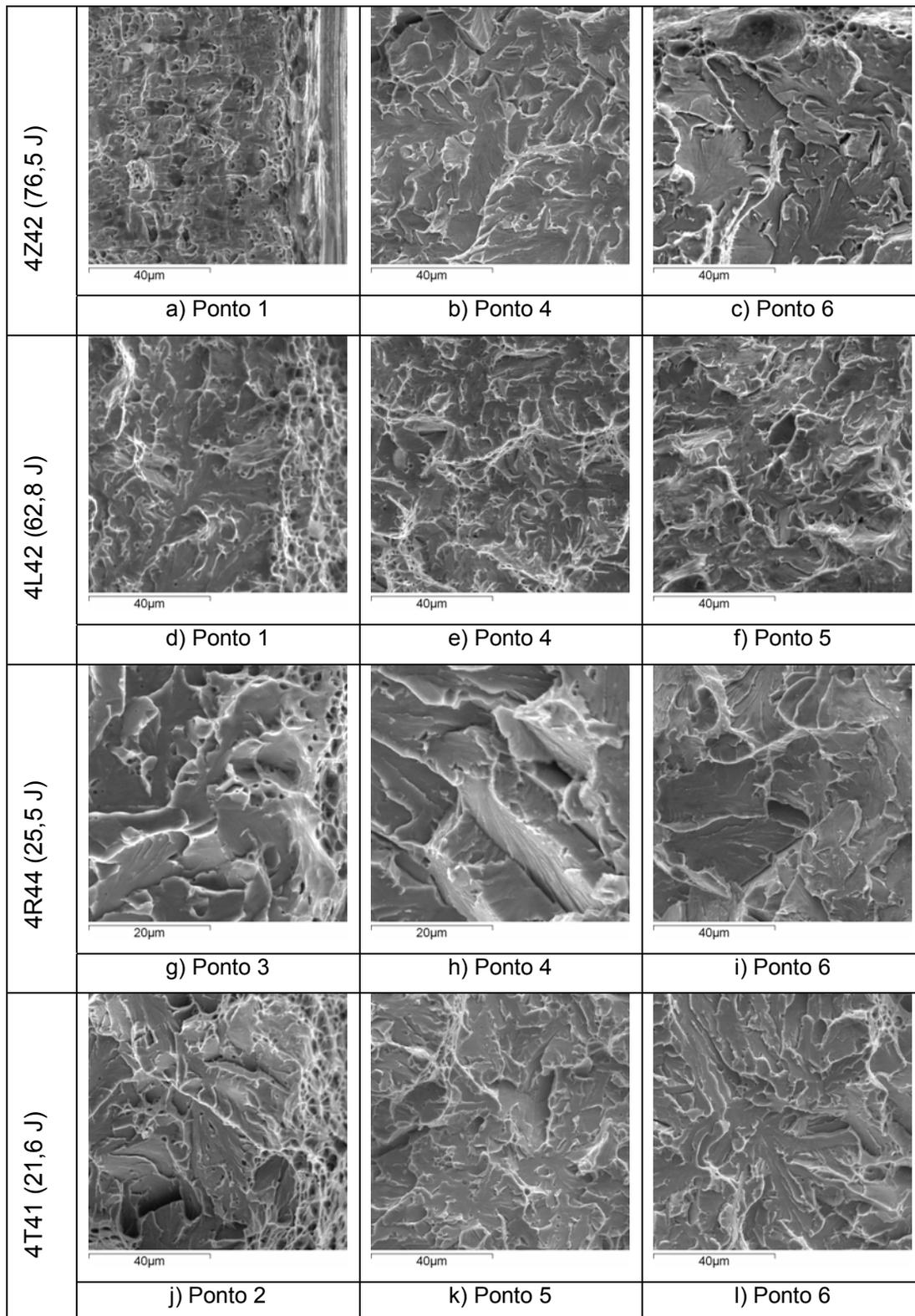


Figura 62. Imagens das superfícies de fraturas para as diferentes regiões a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ com aumento de 1000x e 2000X, obtidas por MEV.

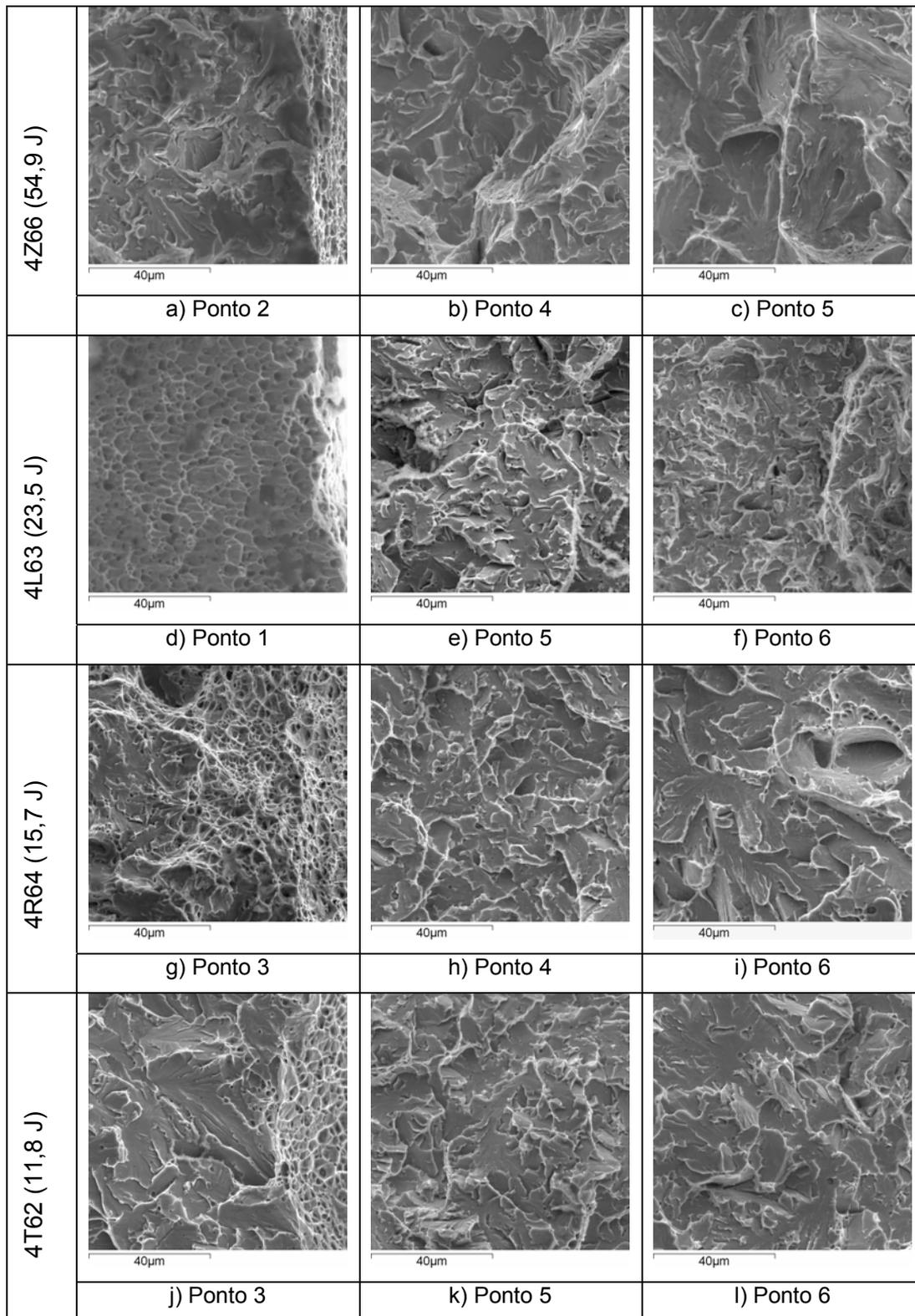


Figura 63. Imagens das superfícies de fraturas para as diferentes regiões a $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ com aumento de 1000x, obtidas por MEV.

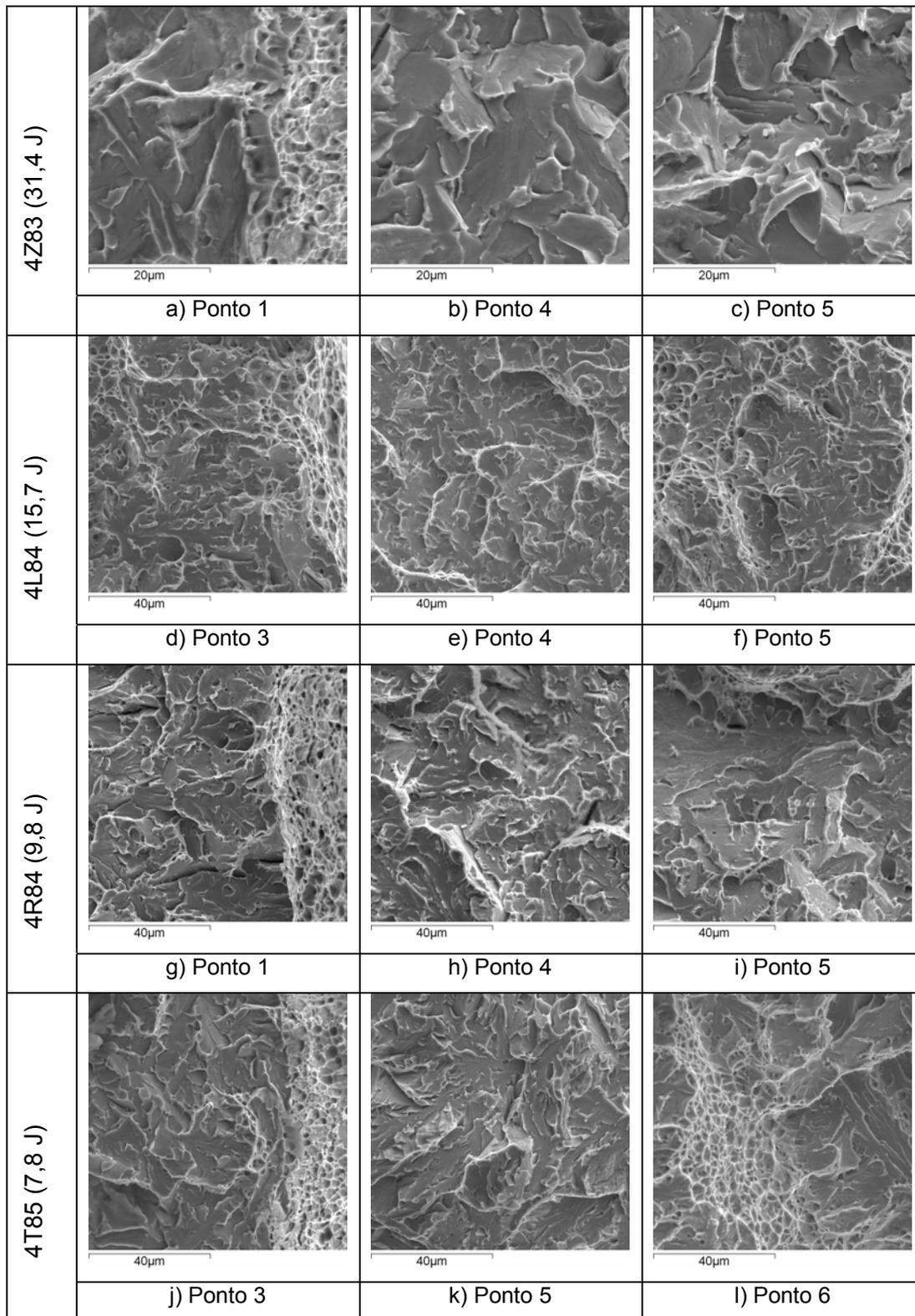


Figura 64. Imagens das superfícies de fraturas para as diferentes regiões a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ com aumento de 1000x e 2000x, obtidas por MEV.

4.6. Caracterização da Junta Soldada

As imagens obtidas pelo microscópio eletrônico foram da região ZTA-GG próxima à LF, ZTA-GG propriamente dita e ZTA-GF. Na obtenção das imagens pelo microscópio eletrônico de varredura foram mantidas na medida do possível as mesmas regiões que para o microscópio eletrônico.

4.6.1. Microestrutura da ZTA

A ZTA associada ao passe de raiz na região próxima à linha de fusão apresentou microestrutura ferrítica preferencialmente ferrita de limite de grão com alguns precipitados de carbeto esféricos com tamanho de grão heterogêneo, Fig. 65a. Observou-se também a possível presença de austenita retida, marcados em círculos de cor amarela, talvez como consequência do resfriamento ocorrido no passe de raiz devido ao material se encontrava relativamente frio (aproximadamente a 100 °C). Na região da ZTA-GG, Fig. 65c, apresentou uma microestrutura ferrítica com tamanho de grão menor quando comparado com a região próxima à LF, Fig. 65a. Na região da ZTA-GF, Fig. 65e, mesmo apresentando grão de tamanho bem menor que nas regiões anteriores, observaram-se grãos de tamanho relativamente maior quando comparados com outros grãos nesta região, marcados em círculos de cor amarela. Também se encontrou a presença de ferrita intragranular, marcada em círculo de cor vermelha.

A ZTA associada ao passe a quente próxima à linha de fusão, Fig. 65b, apresentou microestrutura ferrítica de maior tamanho de grão quando comparado à mesma região associada ao passe de raiz, Fig. 65a, com precipitados de carbeto os quais possuem morfologias esféricas e elípticas ligeiramente alongadas orientadas na largura dos grãos que os contêm. Na região da ZTA-GG, Fig. 65d, observou-se grãos ferríticos de crescimento intragranular, marcados em círculos de cor amarela, e de crescimento intergranular, marcados em círculos de cor vermelha. Observaram-se outras fases de forma intragranular em grãos ferríticos, marcados em círculos de cor azul, o que poderia ser microestruturas de alto teor de carbono. Na região da ZTA-GF, Fig. 65f, encontrou-se uma microestrutura ferrítica de tamanho de grão variado entre fino e médio.

A ZTA associada à camada de enchimento próxima à LF, Fig. 66a, apresentou um tamanho de grão relativamente bem maior em comparação com às mesmas regiões associadas ao passe de raiz e ao passe a quente, Fig. 65a e Fig. 65b, respectivamente. Este pode ser consequência ao aporte de calor (1,3 – 1,9 kJ/mm, Tabela 17), à qual foi submetida esta região devido aos passes de enchimento, sendo por conseguinte o tempo de resfriamento (Δt_{8-5}) relativamente alto permitindo o crescimento de grão. Os grãos apresentaram precipitados de carbonetos os quais não apresentaram orientações definidas, sendo estes alongados e esferoidais em outros casos. Assim mesmo encontraram-se partículas de segunda fase intragranular e precipitados de contorno de grão. As regiões da ZTA-GG, Fig. 66c, e região da ZTA-GF, Fig. 66e, apresentaram quase as mesmas características microestruturais da região vistas na região próxima à linha de fusão, só que o tamanho de grão foi diminuindo para cada região na ordem mencionada.

A ZTA associada à camada de acabamento na região próxima à linha de fusão apresentou uma microestrutura com tamanho de grãos maiores a 50 μm , Fig. 66b, com precipitados intragranulares de carbonetos alongados perpendiculares ao crescimento de ferrita na direção do centro dos grãos. A região da ZTA-GG, Fig. 66d, o tamanho de grão diminui a um tamanho inferior de 25 μm continuando com a presença de precipitados intragranulares de carbonetos alongados. A região da ZTA-GF, Fig. 66f, o tamanho de grão é inferior de 10 μm , aproximadamente. Os precipitados encontrados nesta região são, na sua maioria, carbonetos esferoidais.

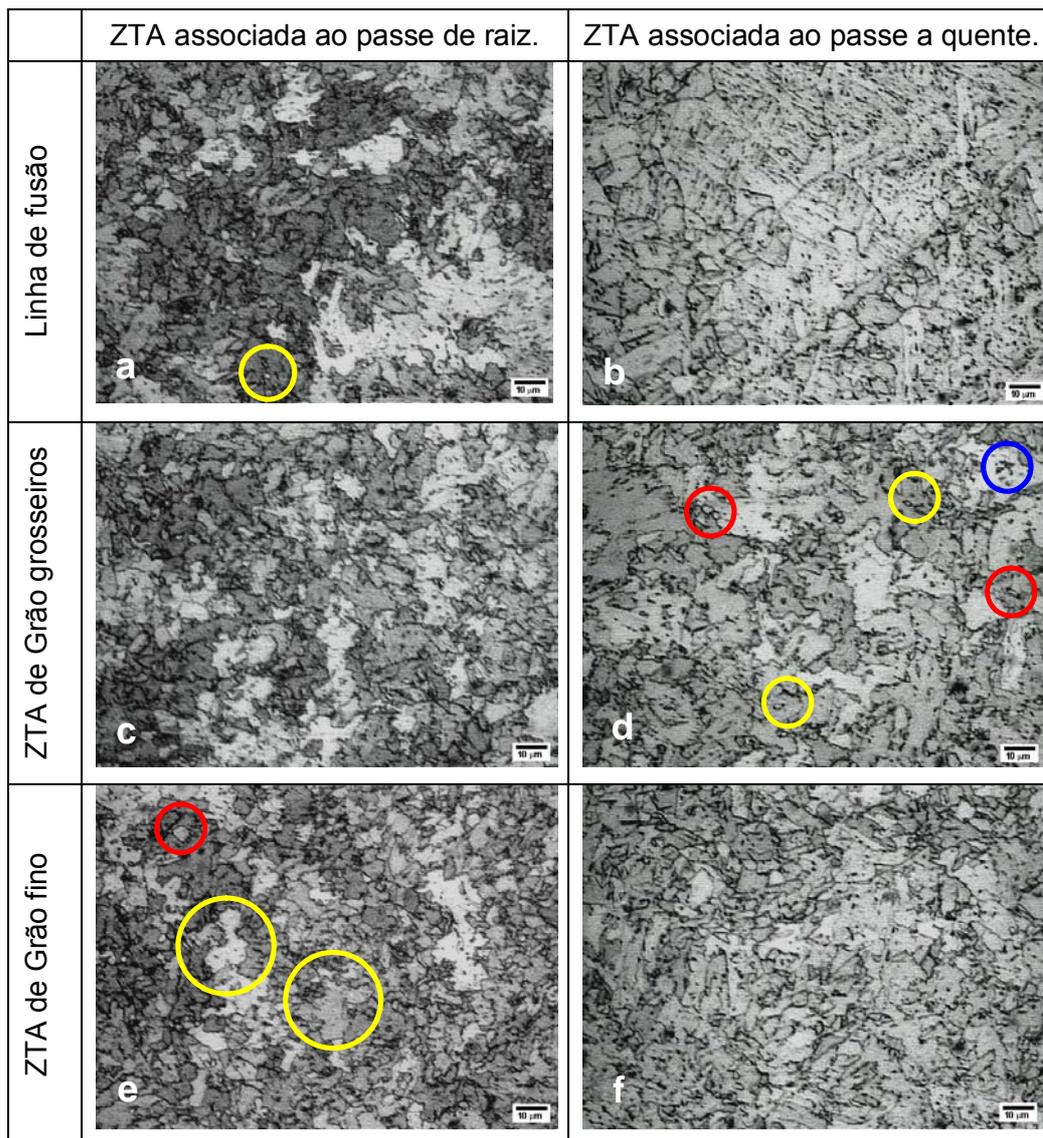


Figura 65. Microestrutura das ZTAs associadas ao passe de raiz (a,c,e) e ao passe quente (b,d,f). Todas as imagens foram obtidas com aumento de 500x.

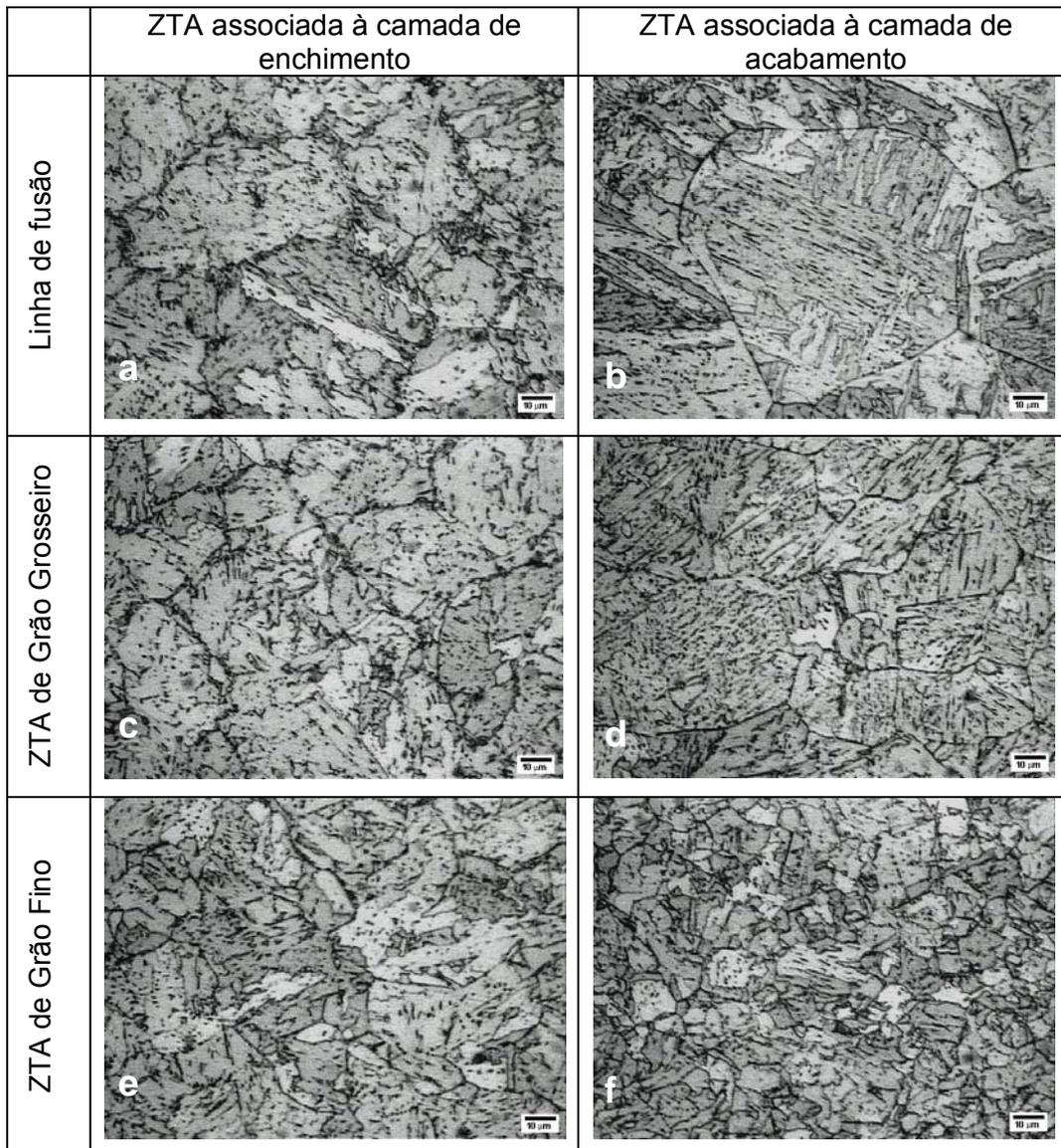


Figura 66. Microestrutura das ZTAs associadas à camada de enchimento (a, c, e) e à camada de acabamento (b,d,f). Todas as imagens foram obtidas com aumento de 500x.

4.6.2. Microestrutura do Metal de Solda

A Fig. 67 apresenta quatro imagens representativas associadas à microestrutura resultante do metal de solda. A microestrutura associada ao passe de raiz, Fig. 67a, apresentou na sua maioria uma microestrutura fina com presença de ferrítica acicular (AF) acompanhado de ferrita de contorno de grão (PF(G)) dispersa de forma aleatória e ferrita com partículas de segunda fase não alinhadas (FS(NA)).

A microestrutura associada ao passe a quente, Fig., 67b, apresentou uma maior presença de PF(G), com microestrutura AF espalhada aleatoriamente

além de FS(NA) e ferrita poligonal intragranular (PF(I)). O tamanho de grão é heterogêneo e fino, com presença de grãos relativamente grossos.

A microestrutura associada à camada de enchimento, Fig. 67c, apresentou uma marcada presença de PF(G) com presença de precipitados de carbeto esferoidais localizados nos limites de grão e intragranular. O tamanho do grão é relativamente maior quando é comparado com a microestrutura associada ao passe a quente, Fig. 67b, o que pode ter relação com o incremento do aporte de calor nesta camada o que permitiu um maior tempo de resfriamento e, por conseguinte, o crescimento do grão.

A microestrutura associada à camada de acabamento, Fig. 67d, apresentou a presença de precipitados de carbeto extremamente alongados e orientados em grupos pequenos em direções perpendiculares com respeito a outros grupos, típico de uma microestrutura martensita (M). Também observou-se a presença de microestrutura AF acompanhada de PF(I) e ferrita com partículas secundárias alinhadas (FS(A)).

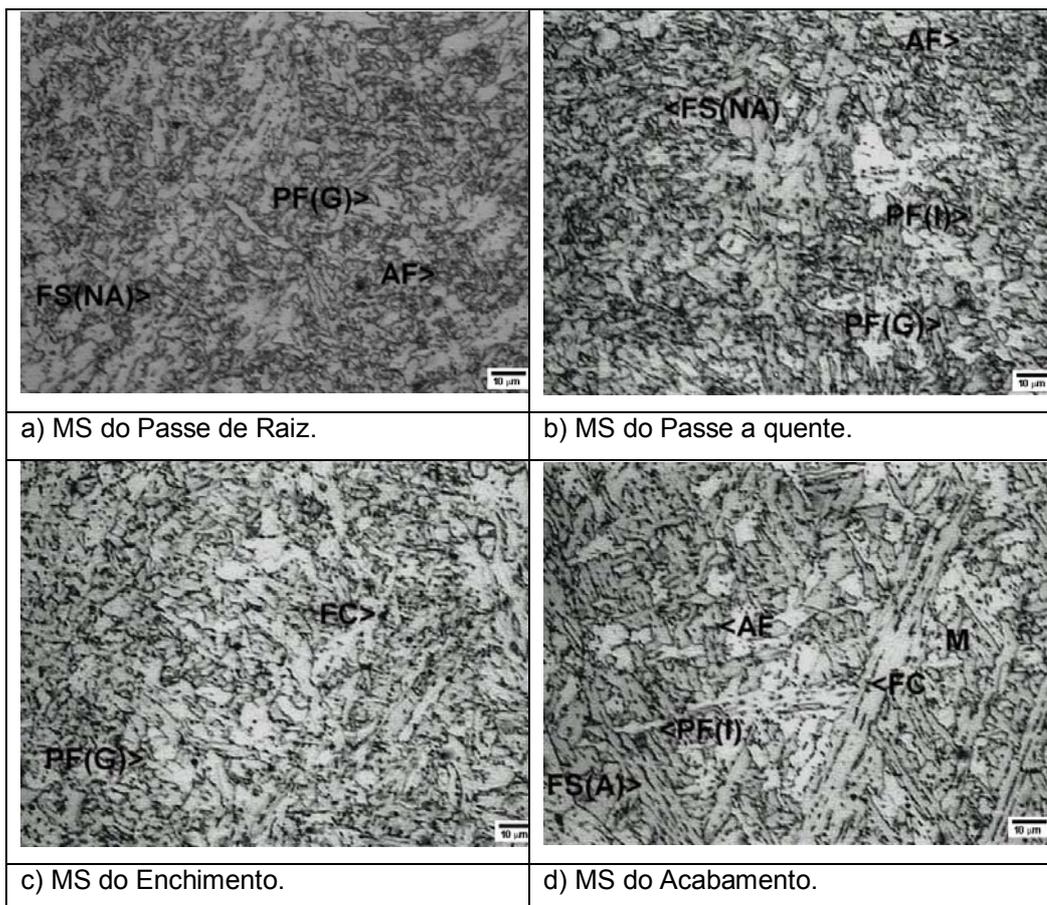


Figura 67. Mapa microestrutura do Metal de solda obtido por MO. Todas as imagens foram obtidas com aumento de 500x.

O material de base apresenta uma microestrutura basicamente ferrítica de grãos de tamanhos diversos e alongados, Fig. 68.

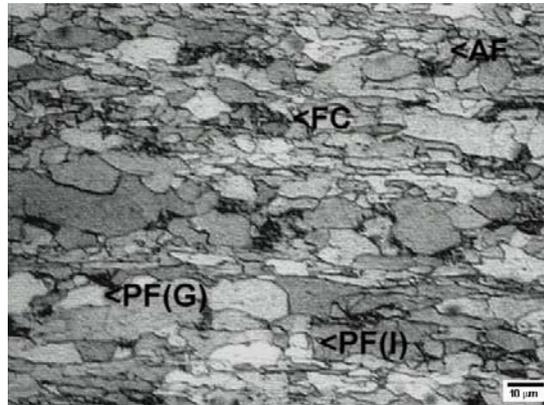


Figura 68. Microestrutura do material de base, obtido por MO, aumento de 500x.

4.6.3. Caracterização do microconstituente A-M

Foi determinada, com base nas imagens obtidas por MEV, a porcentagem de microconstituente A-M para cada região da ZTA e do MS, associados a cada passe de soldagem, por médio de uma seqüência de sentencias de comando de edição de imagens com o programa KS400 V3. Os resultados obtidos na quantificação da porcentagem superficial existente do microconstituente A-M de cada imagem são apresentados na Tabela 31. Com base nesta quantificação e nos dados de aporte de calor para a JS-06 apresentados na Tabela 18, além de considerar os pontos de extração para os corpos de prova de quantificação mencionados, realizou-se a Tabela 32 onde procura-se relacionar o aporte de calor com a porcentagem do microconstituente A-M quantificado, para a região da ZTA próxima à LF.

Tabela 31. Quantificação do constituinte A-M por regiões para a ZTA, MS e MB, em porcentagem.

CP	Passe	LF	ZTA		MS	MB
			GG	GF		
4M12	Raiz	1,78	2,32	2,43	3,44	0,321
	Quente	1,73	2,80	-	3,33	
	Enchimento	2,12	2,64	-	2,41	
	Acabamento	5,65	5,87	-	5,24	
4M22	Raiz	4,97	2,30	4,00	2,93	-
	Quente	4,44	4,08	5,31	6,17	
	Enchimento	2,12	4,72	5,06	-	
	Acabamento	5,03	-	-	-	
4M32	Raiz	2,37	1,62	6,27	2,37	-
	Quente	2,67	2,34	2,26	-	
	Enchimento	2,45	2,95	3,06	-	
	Acabamento	1,15	3,28	3,68	-	
4M42	Raiz	2,78	2,57	2,01	4,15	0,315
	Quente	2,92	1,25	2,63	3,90	
	Enchimento	2,35	1,56	3,11	7,51	
	Acabamento	1,25	2,73	3,51	5,62	
Média	Raiz	2,98	2,20	3,68	3,22	0,318
	Quente	2,94	2,62	3,40	4,46	
	Enchimento	2,26	2,97	3,74	4,96	
	Acabamento	3,27	3,96	3,59	5,43	

Tabela 32. Tabela de associação entre os aportes de calor para cada região e a porcentagem de constituinte A-M quantificado para a região da ZTA próxima à linha fusão associado a cada passe de soldagem.

CP	Aporte de Calor (kJ/mm)				Constituinte A-M (%)			
	Raiz	A quente	Ench. Média	Acab. Média	Raiz	A quente	Ench. Média	Acab. Média
4M12	0,624	1,432	1,528	1,654	1,78	1,73	2,12	5,65
4M22	0,525	1,442	1,517	1,666	4,97	4,44	2,12	5,03
4M32	0,629	1,037	1,568	1,499	2,37	2,67	2,45	1,15
4M42	0,655	1,092	1,600	1,473	2,78	2,92	2,35	1,25

Na Fig. 69 é apresentado o gráfico onde é relacionada ao aporte de calor e a porcentagem do microconstituente A-M na região da ZTA próxima à LF associado a cada passe de soldagem, Tabela 32. Tendo em consideração que todas as amostras para a avaliação da porcentagem do microconstituente A-M pertencem ao mesmo tubo, pode-se dizer que a composição química não apresenta variação.

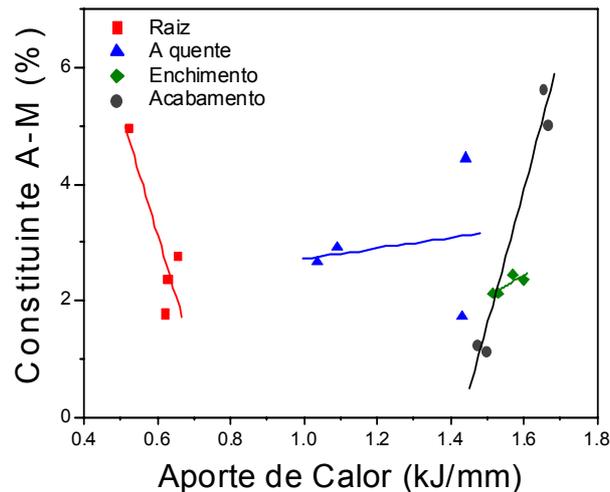


Figura 69. Gráfico de relação entre a fração percentual do constituinte A-M e o Aporte de calor na ZTA associada a cada passe de soldagem próximo à LF, para o aço API 5L X80.

Antes de descrever o gráfico da Fig. 69 é necessário destacar que as imagens para a quantificação do microconstituente A-M foram obtidas das regiões próximas à LF indicadas em pontos vermelhos, tal como é detalhado na Fig. 70.

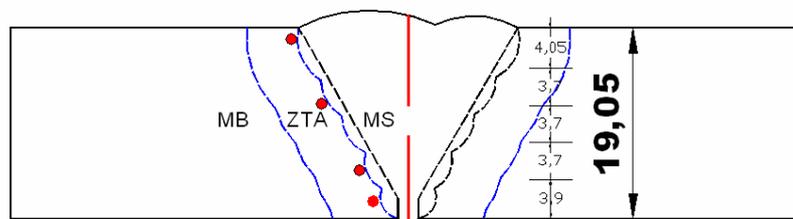


Figura 70. Localização das regiões da obtenção de imagens para a caracterização por médio do MEV.

A ZTA associada ao passe de raiz apresentou uma tendência de maior porcentagem de A-M quanto menor a quantidade do aporte de calor. Pode-se dizer que a formação do microconstituente A-M encontrado foi como consequência do ciclo térmico do passe de raiz e não pela influencia do ciclo térmico do passe a quente, este devido a que foi determinado na caracterização metalográfica, Tabela 19, que o passe de raiz teve uma altura média de 3,9 mm e a ZTA média máxima no processo FCAW-G foi de 2,6 mm e como na Fig. 70 é descrito que as imagens da região associada ao passe de raiz foram obtidas o

mais próximo à borda inferior da junta soldada e ademais que a borda mais afastada de uma ZTA é formada à temperatura crítica inferior ($721\text{ }^{\circ}\text{C}$), se reduz a possibilidade de qualquer transformação nesta região.

A ZTA associada aos passes seguintes apresentou que existe um incremento da porcentagem do microconstituente A-M na medida em que se incrementa o aporte de calor, sendo maior na camada de acabamento talvez pela falta de passes posteriores de revenido. A análise nestas regiões é algo complexa devido à influência dos passes posteriores, já que como pode ser observado na Fig. 70 as regiões de onde foram obtidas as imagens foram influenciadas pela ZTA dos passes posteriores. Considerando que a altura total da junta soldada é de 19 mm e a altura do passe de raiz teve como média 3,9 mm, restam 15,1 mm de altura para ser preenchido. Dividindo esta altura em quatro camadas (passe quente, terceiro passe, camada de enchimento e camada de acabamento, ver Fig. 17b), teremos por camada uma altura média de 3,7 mm e considerando que a ZTA do processo FCAW-G é de 2,7 mm de largura, Tabela 19, estas regiões serão afetadas pelo ciclo térmico dos passes posteriores.

A Fig. 71 apresenta uma agrupação das imagens obtidas por MEV que apresentam um mapa das regiões da ZTA associadas a cada passe de soldagem. Pode-se observar de maneira geral que a morfologia do microconstituente A-M apresenta uma mudança na medida em que os cordões de solda foram executados, sendo na raiz grãos finos com geometrias poligonais e na camada de acabamento grãos alongados localizados preferentemente nos limites de grão assim como grãos de alta concentração de carbono com geometrias em forma de agulhas.

A ZTA associada ao passe de raiz na região da L.F., Fig. 71a, apresentou o microconstituente A-M com dimensões inferiores a $2\text{ }\mu\text{m}$, distribuídos de forma isolada. Na região da ZTA-GG, Fig. 71b, e ZTA-GF, Fig. 71c, apareceram grãos com maior área superficial e tamanhos inferiores de $3\text{ }\mu\text{m}$.

A ZTA associada ao passe a quente na região da LF, Fig. 71d, apresentou o microconstituente A-M com tamanhos inferiores de $3\text{ }\mu\text{m}$ e agrupações de grãos com tamanhos inferiores de $2\text{ }\mu\text{m}$, indicado com o círculo. Na região da ZTA-GG, Fig. 71e, encontrou-se grãos inferiores a $1\text{ }\mu\text{m}$ e na região da ZTA-GF, Fig. 71f, apresentou uma maior presença de partículas do microconstituente A-M com tamanhos entre 2 a $3\text{ }\mu\text{m}$.

A ZTA associada à camada de enchimento na região da LF, Fig. 71g, encontrou-se o microconstituente A-M de tamanho inferior a $3\text{ }\mu\text{m}$, além de

precipitados de alta concentração de carbono, os quais as partículas pontuais brancas brilhantes. Na região da ZTA-GG, Fig. 71h, o microconstituente A-M encontrou-se também acompanhado de partículas de alta concentração de carbono as quais poderiam ser também microconstituente A-M. Na região da ZTA-GF, Fig. 71i, encontrou-se agrupamentos e partículas isoladas do microconstituente A-M.

A ZTA associada à camada de enchimento na região da LF, Fig. 71j, o microconstituente A-M encontrou-se preferentemente nos limites de grão e a presença de partículas de alto conteúdo de carbono em cor branca brilhante que apresentaram uma orientação preferencial na direção da largura dos grãos. Nas regiões da ZTA-GG e ZTA-GF, Fig. 71k e Fig. 71l respectivamente, não apresentaram diferença com o mencionado na região da ZTA na região da LF.

A Fig. 72 apresenta quatro imagens obtidas por MEV correspondentes às regiões do metal de solda. Em todas as regiões encontrou-se a presença do microconstituente A-M e partículas com alta concentração de carbono, localizados de forma intragranular e nos contornos de grão. A região pertencente ao passe de raiz, Fig. 72a, apresentou partículas do microconstituente A-M inferiores de 3 μm isoladas e localizadas preferentemente nos contornos de grão. Na região pertencente ao passe a quente, Fig. 72b, o microconstituente A-M apresentou um grão fino acompanhado de partículas com alta concentração de carbono. A presença de grão fino pode ser produto do reaquecimento do passe posterior. Na região pertencente à camada de enchimento, Fig. 72c, o microconstituente A-M encontrou-se de maneira massiva e com tamanhos de grãos heterogêneo. Não se observou uma tendência de orientação, mas preferentemente localizou-se nos contornos de grão. Na região pertencente à camada de acabamento, Fig. 72d, o microconstituente A-M apresenta uma geometria alongada localizada nos contornos de grão assim como de maneira intragranular, acompanhada de partículas de alto conteúdo de carbono que apresentam geometrias alongadas em forma de agulhas.

A Fig. 73 apresenta partículas de microconstituente A-M encontradas no material de base. A presença é de forma isolada e localizada nos contornos de grão. A quantificação do microconstituente A-M no metal de base por médio do programa realizado no KS-400 deu um resultado aproximado de 0,32%, Tabela 31, o que é refletido na imagem apresentada.

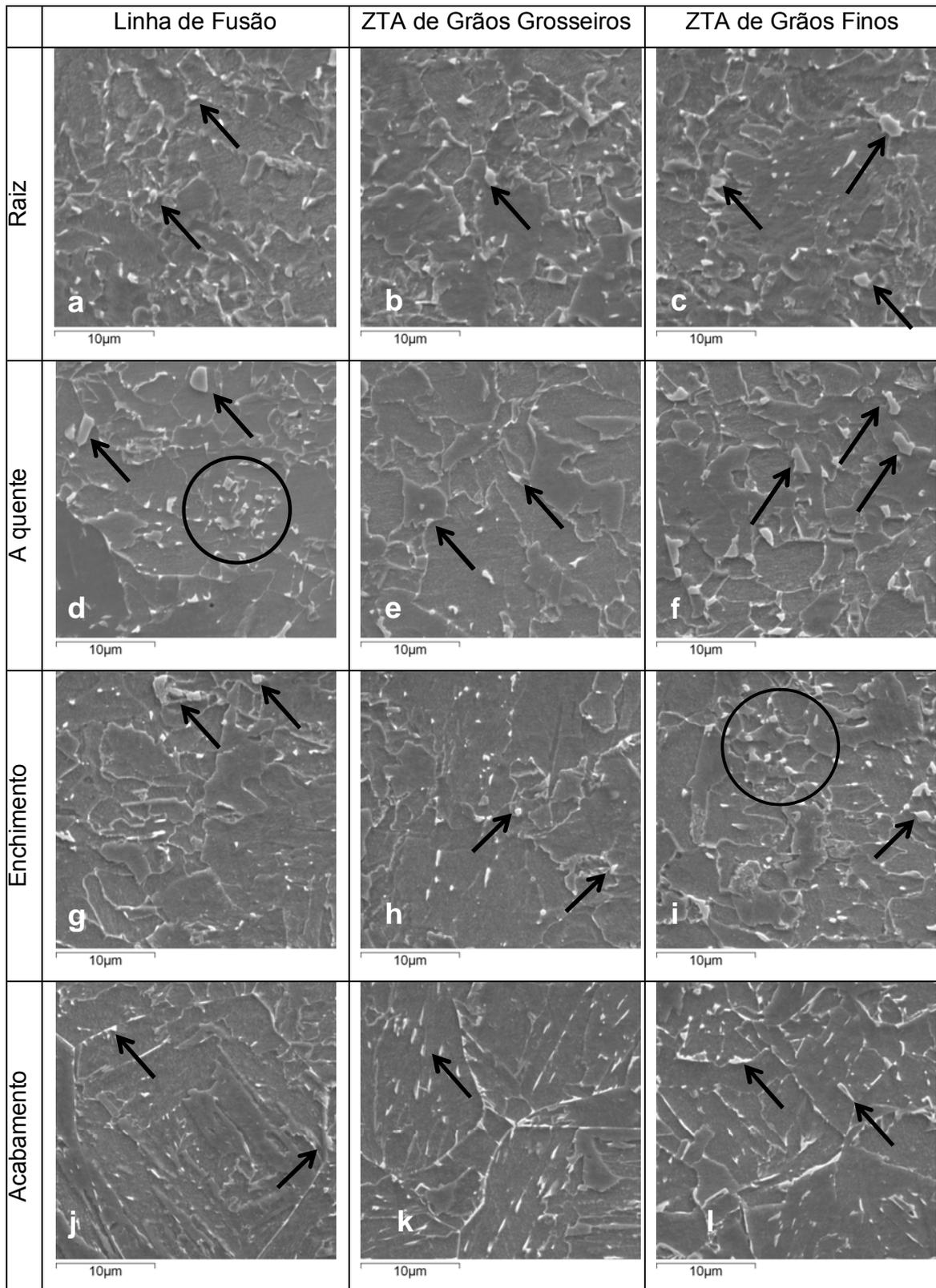


Figura 71. Mapa das regiões da ZTA associados ao passes de soldagem, mediante o uso do MEV, todas as imagens com aumento de 3000x.

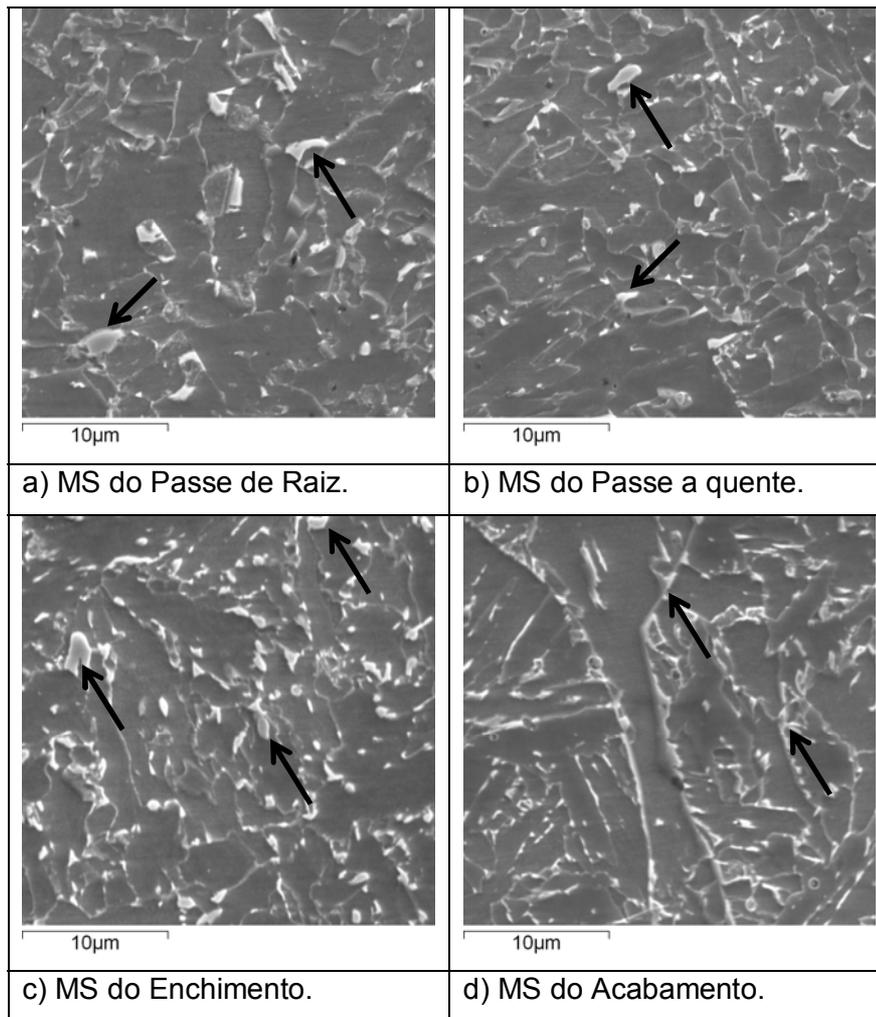


Figura 72. Mapa da microestrutura do material de solda, obtido mediante o MEV, todas as imagens com aumento de 3000x.

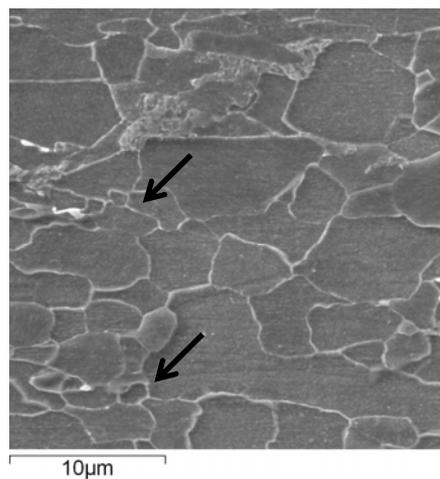


Figura 73. Microestrutura do material de base, obtido mediante o MEV, imagem com aumento de 3000x.