

4 Resultados

4.1. Análise Química

A composição química das amostras de metal solda, soldadas a 10 m de profundidade, está listada na Tabela 2.

Tabela 2: Composição química do metal de solda (porcentagem em peso)

Eletrodo	C	Si	P	S	Mn	Mo	Ni	Cu	O
A	0,052	0,009	0,025	0,008	0,05	0,003	2,08	0,035	0,268
B	0,027	0,014	0,027	0,011	0,05	0,099	1,98	0,077	*
C	0,031	0,009	0,028	0,011	0,05	0,125	2,17	0,080	*
D	0,027	0,015	0,030	0,012	0,05	0,250	2,00	0,076	*
E	0,051	0,017	0,032	0,008	0,07	0,396	2,10	0,038	*

A tabela da composição química do metal de solda molhada mostra que o teor de molibdênio é crescente. O teor de níquel manteve-se estável, em torno de 2% de área. Os teores de C, Mn, Si são baixos devido ao caráter oxidante do eletrodo. O teor de oxigênio no metal de solda foi analisado somente para o eletrodo A, pois se supõe que não houve mudança expressiva do teor deste elemento para os demais eletrodos testados.

4.2. Caracterização Microestrutural do Metal de Solda por Microscopia Ótica

4.2.1. Avaliação das Regiões do Metal de Solda

A nomenclatura e os resultados das avaliações das regiões do metal de solda estão apresentados na Tabela 3 e na Tabela 4, respectivamente.

Tabela 3: Nomenclatura das regiões

Código	Nomenclatura
RC	Região Colunar
RGG	Região Reaquecida de Grãos Grosseiros
RGF	Região Reaquecida de Grãos finos

Tabela 4: Fração de área das regiões (% em área)

Eletrodos	RC	RGG	RGF
A	4,0	20	76
B	7,7	17,3	75
C	6,0	12,7	81,3
D	13,3	8,0	78,7
E	9,0	15	76

O eletrodo C apresentou a maior fração de área com 81.3% da região de grãos finos. Os restantes dos eletrodos obtiveram valores percentuais pouco inferiores a este, com o menor valor de fração de área percentual para o eletrodo B (75%). Notou-se que a fração da região colunar (RC) de todos os eletrodos pesquisados apresenta-se bem restrita, com valores de fração de área que variam de 4 a 13% e a região de grãos grosseiros (RGG) apresentam valores de fração de área de 8 a 20% (Figura 35). A predominância da RGF na composição do metal de solda indica maior influência nas propriedades mecânicas do metal de solda.

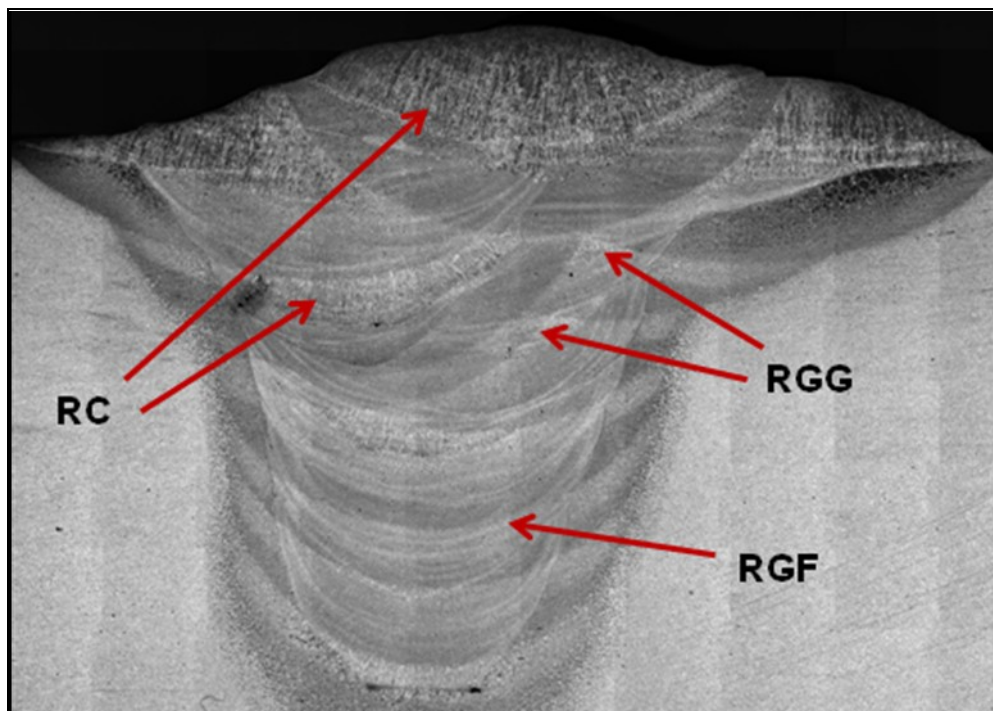


Figura 35: Mosaico (9x10) da amostra D. Aumento 50X

4.2.2. Tamanho Médio de Grão

Na região reaquescida de grãos finos (RGF) foi medido o tamanho médio de grão e calculado o desvio padrão destes valores como mostra a Tabela 5 e a Figura 36.

Tabela 5: Tamanho médio de grão e desvio padrão na RGF

Eletrodo	Tamanho médio de grão (μm)	Desvio padrão
A	3,94	0,7
B	295	0,3
C	3,05	0,4
D	3,09	0,4
E	3,13	0,4

A distribuição de tamanho médio de grão manteve-se razoavelmente homogênea para quatro dos cinco eletrodos analisados. Para os eletrodos B, C, D

e E (com adição de Mo) o tamanho de grão é praticamente constante, variando de 2.95 a 3.13 μm . Para o eletrodo A (sem adição de Mo) o valor médio de 3.94 μm , é bem superior aos demais caracterizando o poder de refino de grão do Mo, mesmo em baixos teores (Figura 36).

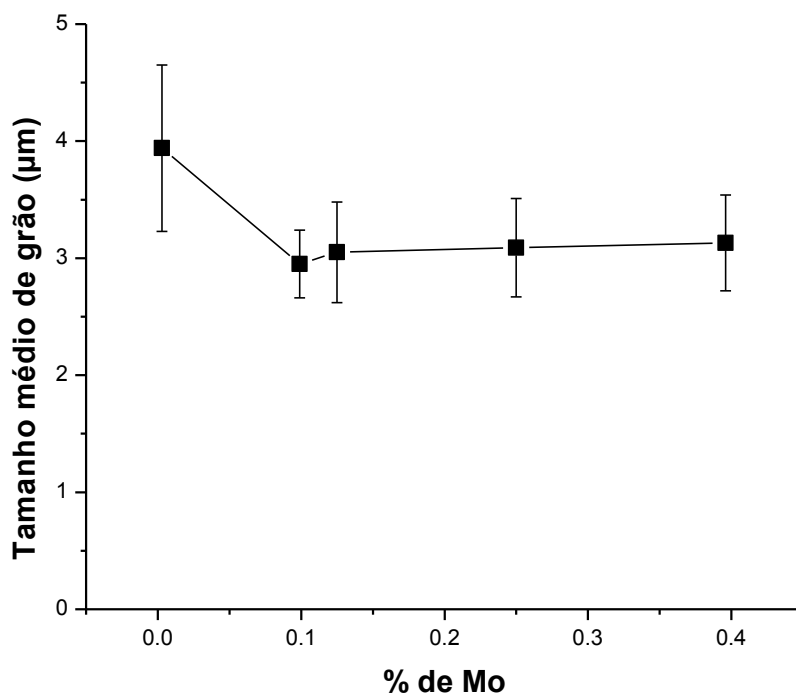


Figura 36: Tamanho médio de grão versus teor de Mo

4.2.3. Análise dos Micro-Constituintes

A Tabela 6 e a Tabela 7 apresentam a nomenclatura e resultados da fração de micro-constituintes presentes no metal de solda.

Tabela 6: Código e nomenclatura dos micro-constituintes

Código	Nomenclatura
FPE	Ferrita Pró-Eutetóide
FSF-A	Ferrita com Segunda Fase Alinhada
FSF-NA	Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada
FA	Ferrita Acicular
FP	Ferrita Poligonal
FA-R	Ferrita Acicular da Região Reaquecida
AFC	Agregados de Ferrita-Carbetos

Tabela 7: Fração de micro-constituintes do metal de solda (porcentagem em área)

Eletrodo	FPE	FSF-A	FSF-NA	FA	FP	FA-R	AFC
A	6,1	2,03	0,01	0,72	90,5	0,23	0,40
B	1,3	5,88	0,06	0,26	86,9	3,34	2,25
C	4,2	2,42	0,16	0,97	74,5	15,2	2,50
D	0,6	0,18	0,07	0,14	90,9	5,14	3,02
E	10	5,05	0,11	0,61	74,2	6,05	3,95

Todos os micro-constituintes estão presentes em todas as amostras analisadas. A FPE, FSF-A, FSF-NA, FA e AFC estão presentes nas regiões de grãos colunares e grosseiros. FP, FA-R e AFC estão presentes na região de grãos finos. A FP é o micro-constituente mais abundante no metal de solda. O percentual de AFC é crescente com o teor de Mo. O percentual de FA, FSF-A, FSF-NA e FPE são baixos em todas as amostras.

As tabelas com todas as análises microestruturais de cada amostra estão em anexo.

Da Figura 37 até a Figura 51 são apresentadas as microestruturas típicas do metal de solda em microscopia ótica.

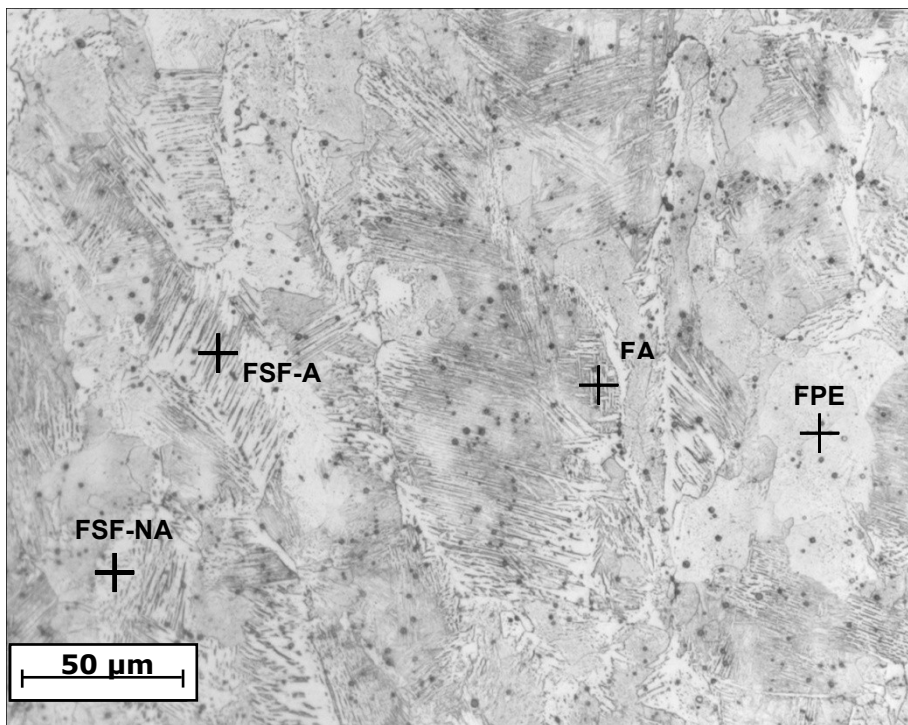


Figura 37: Imagem da região colunar do metal de solda (eletrodo A). Presença de FPE, FSF-A, FSF-NA e inclusões. Aumento 500X

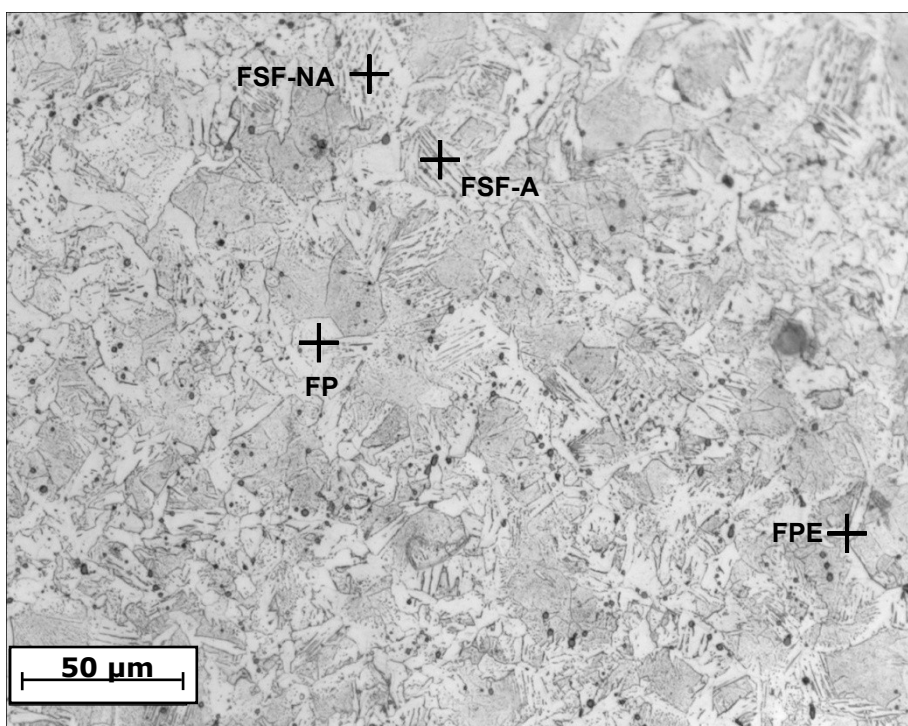


Figura 38: Imagem da região de grãos grosseiros do metal solda (eletrodo A). Presença de FPE, FSF-A, FSF-NA, FP e inclusões. Aumento 500X

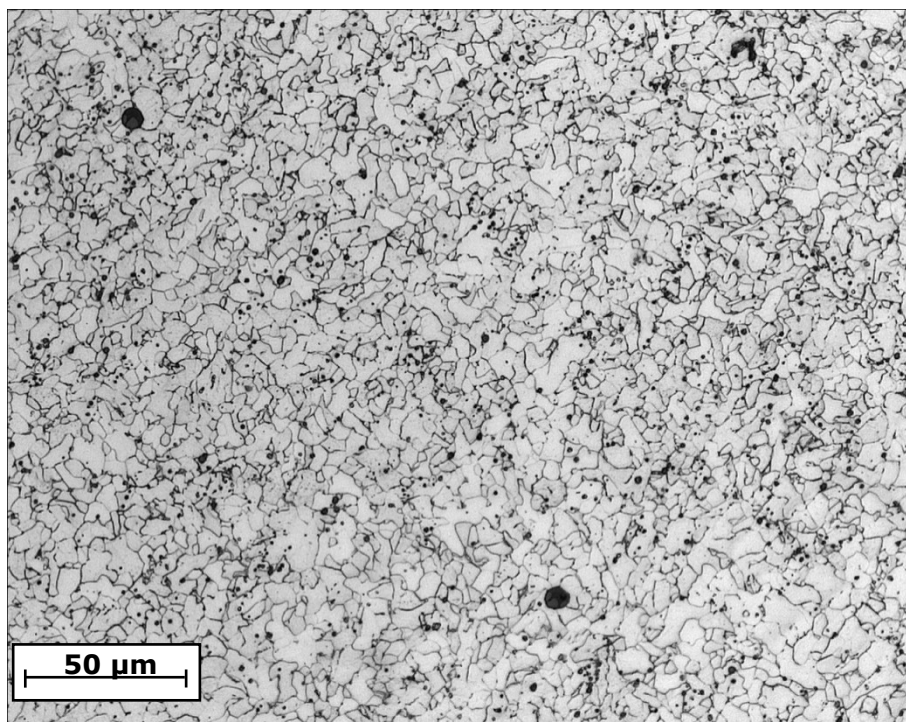


Figura 39: Imagem da região de grãos finos do metal solda (eletrodo A). Presença de FP e inclusões. Aumento 500X

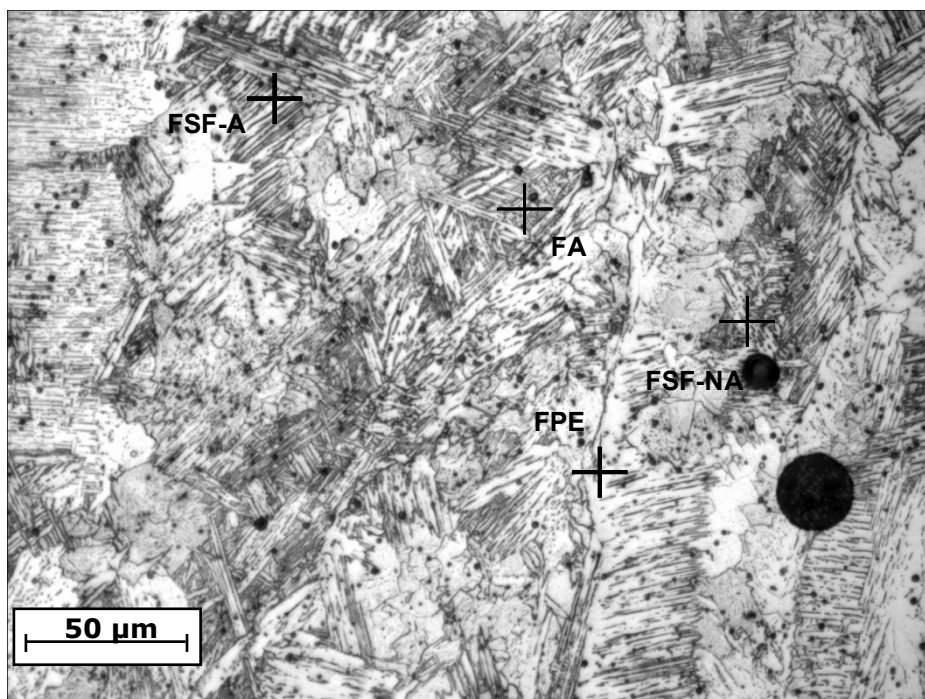


Figura 40: Imagem da região colunar do metal solda (eletrodo B). Presença de FPE, FSF-A, FSF-NA, FA e inclusões. Aumento 500X

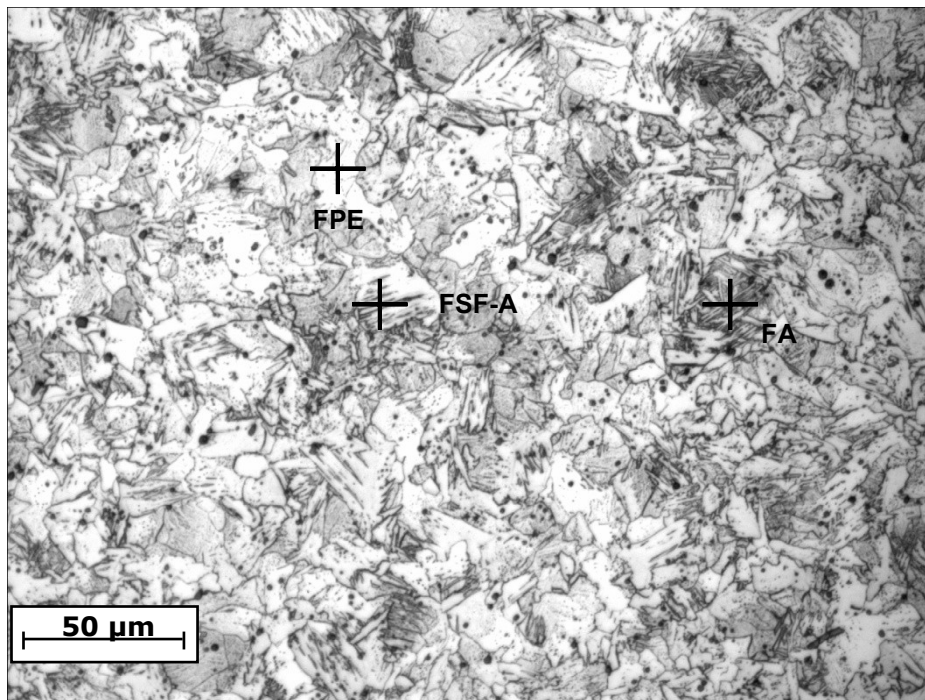


Figura 41: Imagem da região de grãos grosseiros do metal solda (eletrodo B). Presença de FPE, FSF-A, FA, e inclusões. Aumento 500X

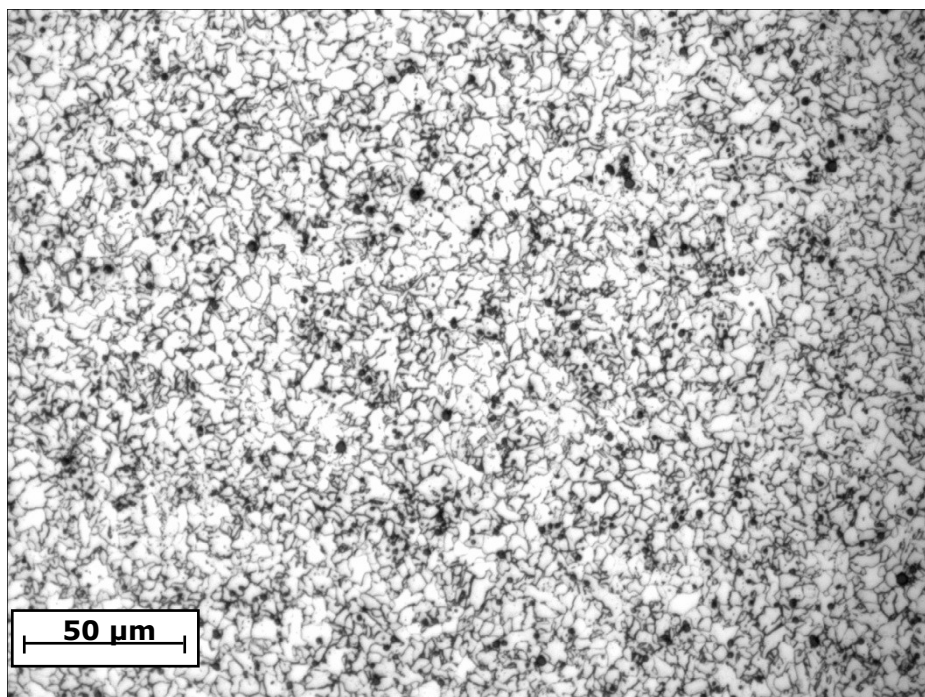


Figura 42: Imagem da região de grãos finos do metal solda (eletrodo B). Presença de FP e inclusões. Aumento 500X

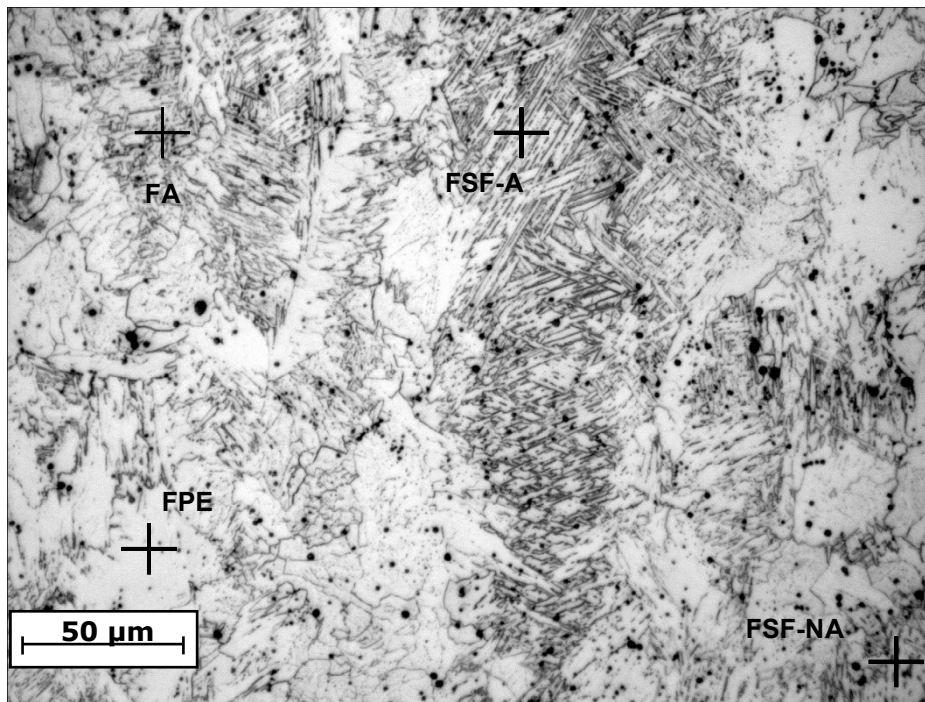


Figura 43: Imagem da região colunar do metal solda (eletrodo C). Presença de FPE, FSF-A, FSF-NA, FA e inclusões. Aumento 500X

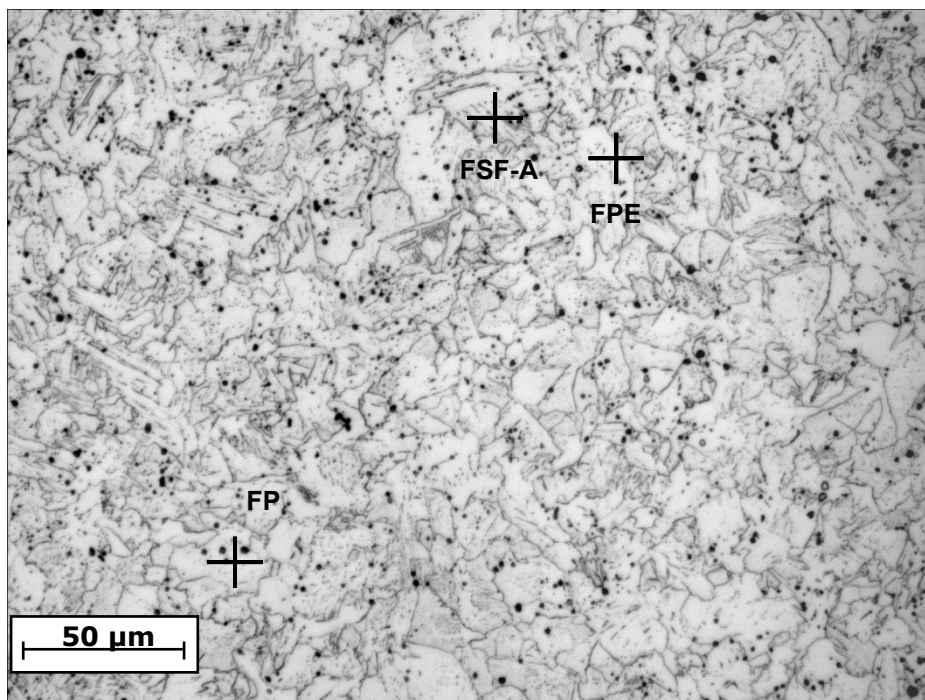


Figura 44: Imagem da região de grãos grosseiros do metal solda (eletrodo C). Presença de FP, FPE, FSF-A e inclusões. Aumento 500X

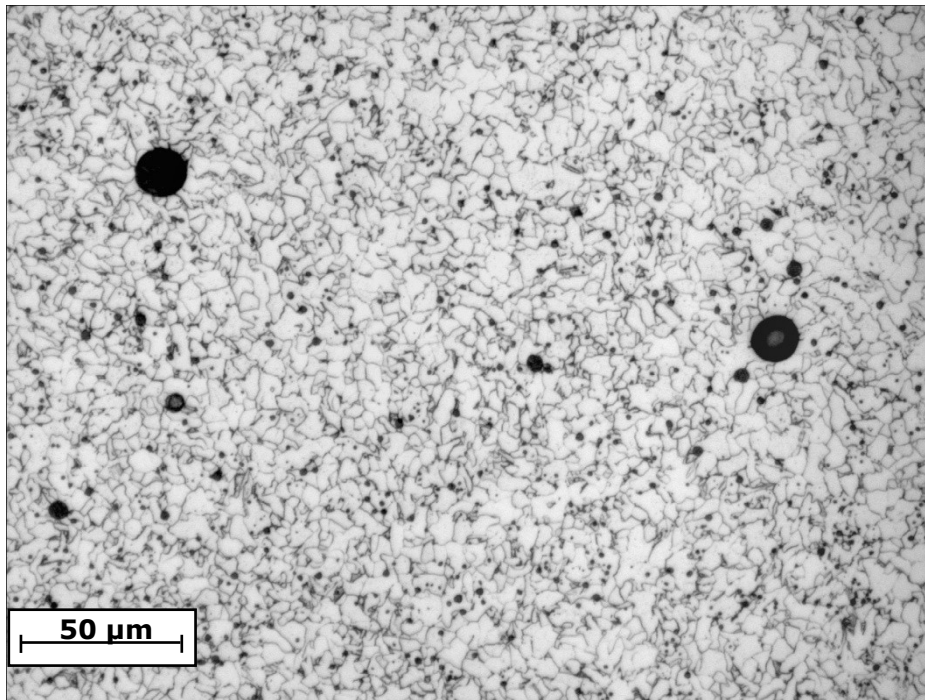


Figura 45: Imagem da região de grãos finos do metal solda (eletrodo C). Presença de FP e inclusões. Aumento de 500X

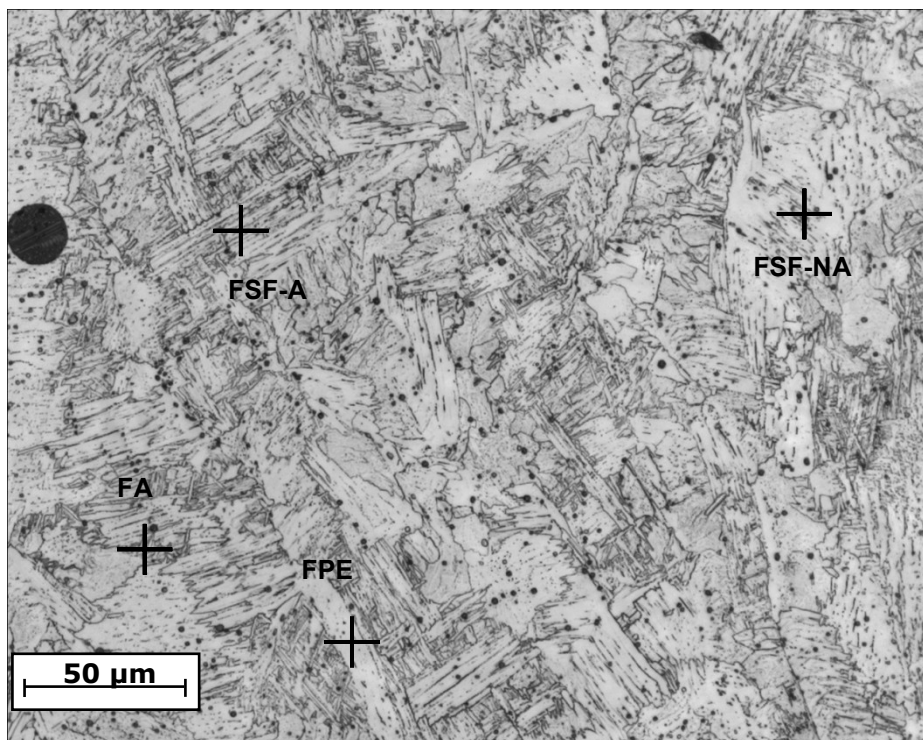


Figura 46: Imagem da região colunar do metal solda (eletrodo D). Presença de FA, FSF-A, FSF-NA, FPE e inclusões. Aumento 500X

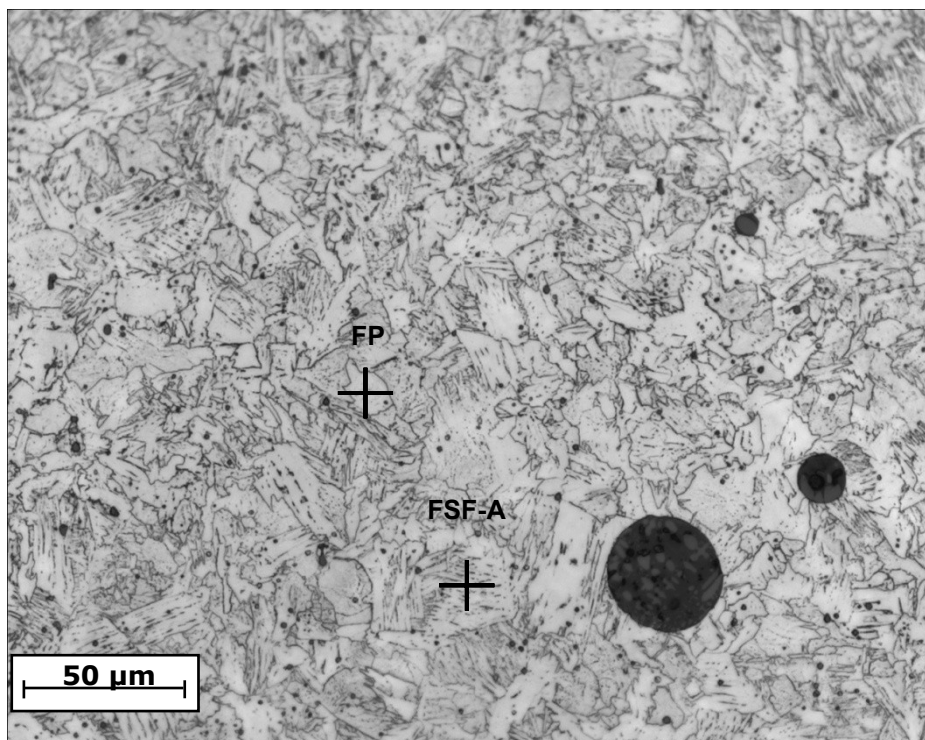


Figura 47: Imagem da região de grãos grosseiros do metal de solda (eletrodo D). Presença de FPE, FSF-A e inclusões. Aumento 500X

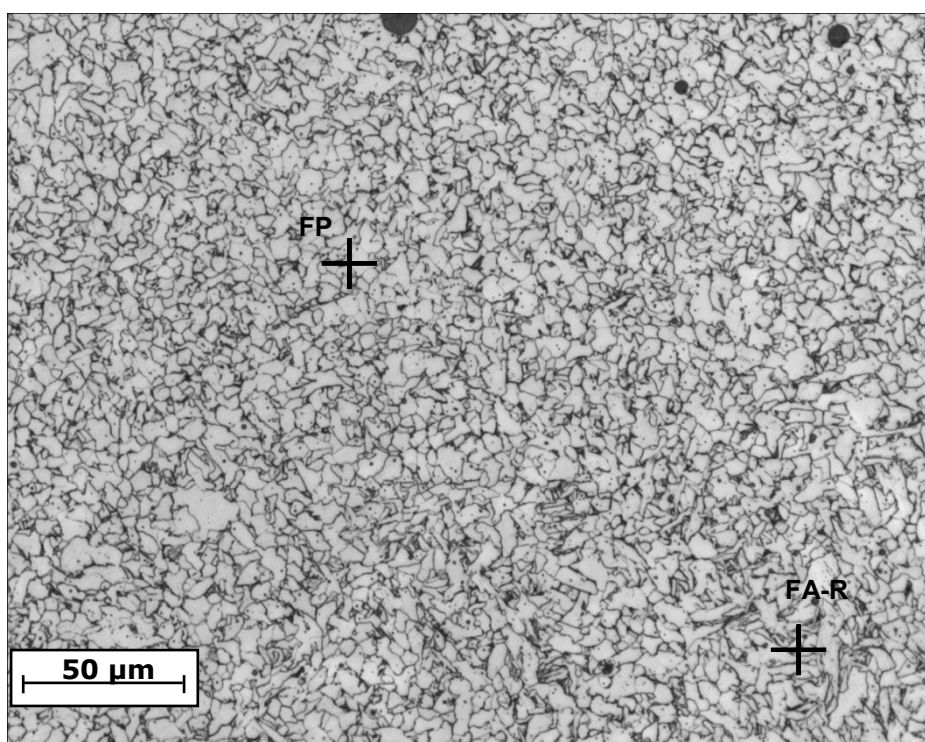


Figura 48: Imagem da região de grãos finos do metal de solda (eletrodo D). Presença de FA-R, FP, AFC e inclusões. Aumento 500X

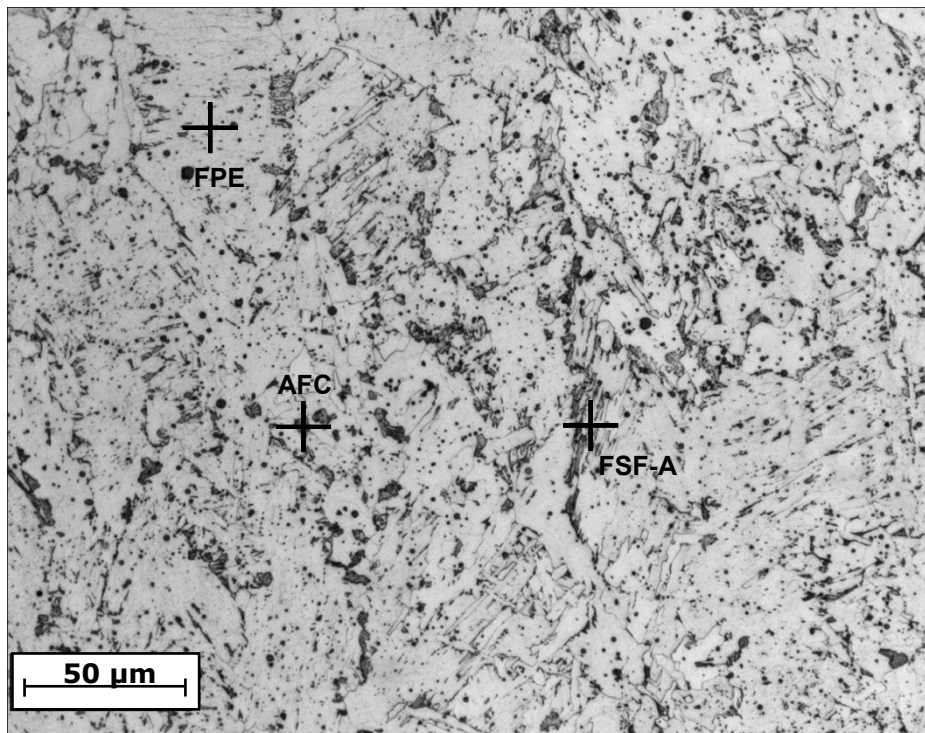


Figura 49: Imagem da região de grãos colunares do metal de solda (eletrodo E). Presença de FPE, FSF-A, AFC e inclusões. Aumento 500X

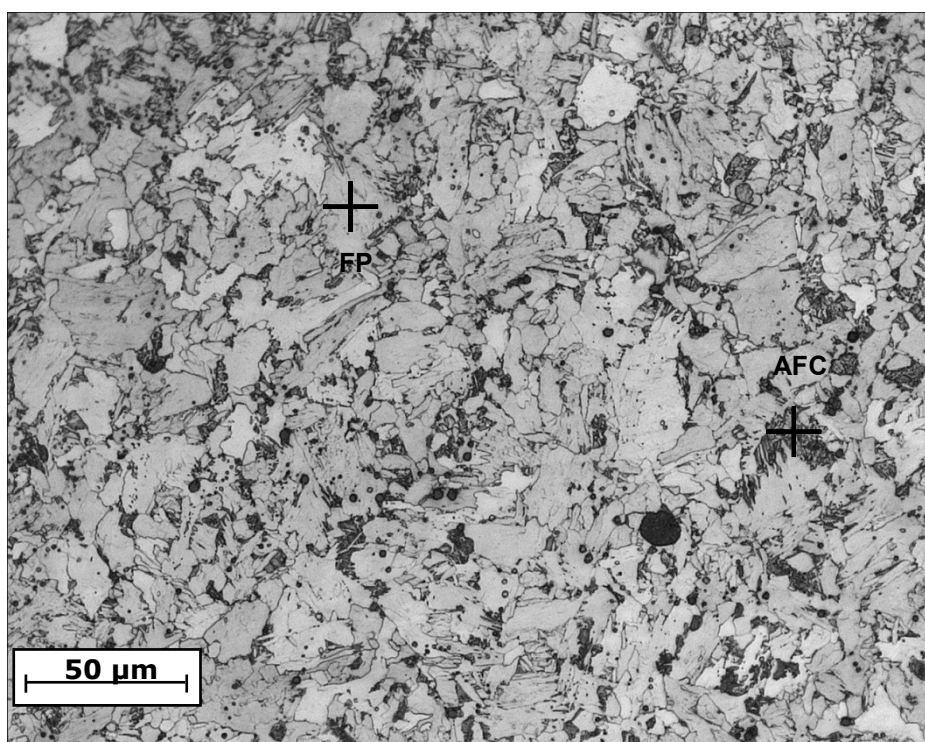


Figura 50: Imagem da região de grãos grosseiros do metal de solda (eletrodo E). Presença de FP, AFC e inclusões. Aumento 500X

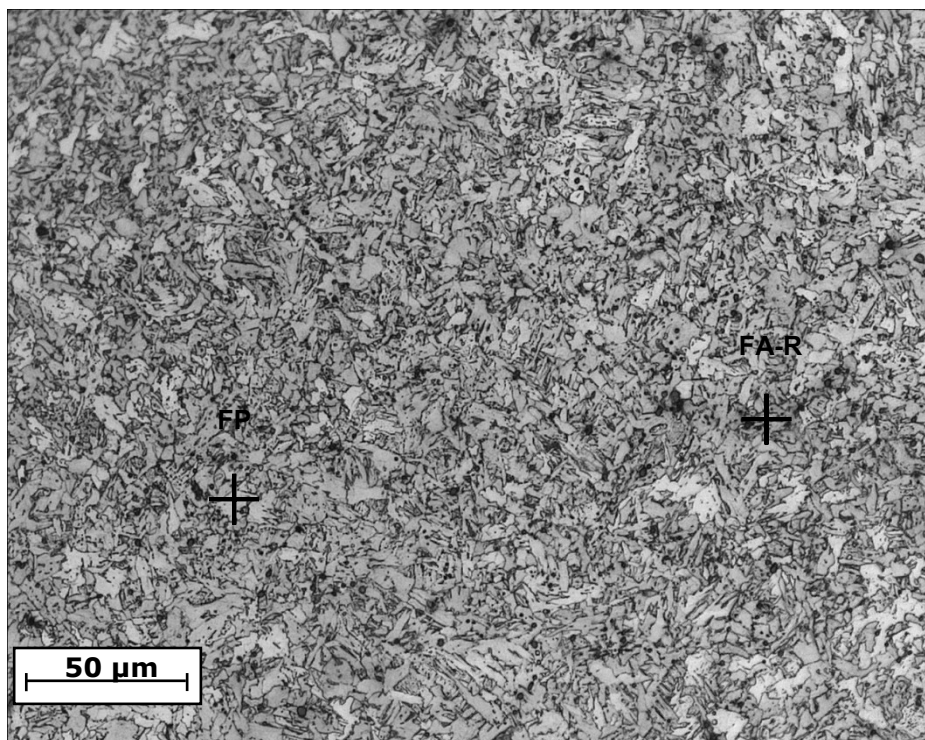


Figura 51: Imagem da região de finos do metal de solda (eletrodo E). Presença de FP, FA-R, AFC e inclusões. Aumento 500X

4.3. Caracterização Microestrutural do Metal de Solda por Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise do metal de solda do eletrodo E, no microscópio eletrônico de varredura (MEV), possibilitou investigar os agregados ferrita-carbeto e, também possibilitou a observação morfológica dos outros tipos de microestruturas presentes.

Imagens obtidas pelo MEV dos micro-constituintes característicos da região colunar e região de grãos grosseiros do metal de solda estão mostrados na Figura 52.

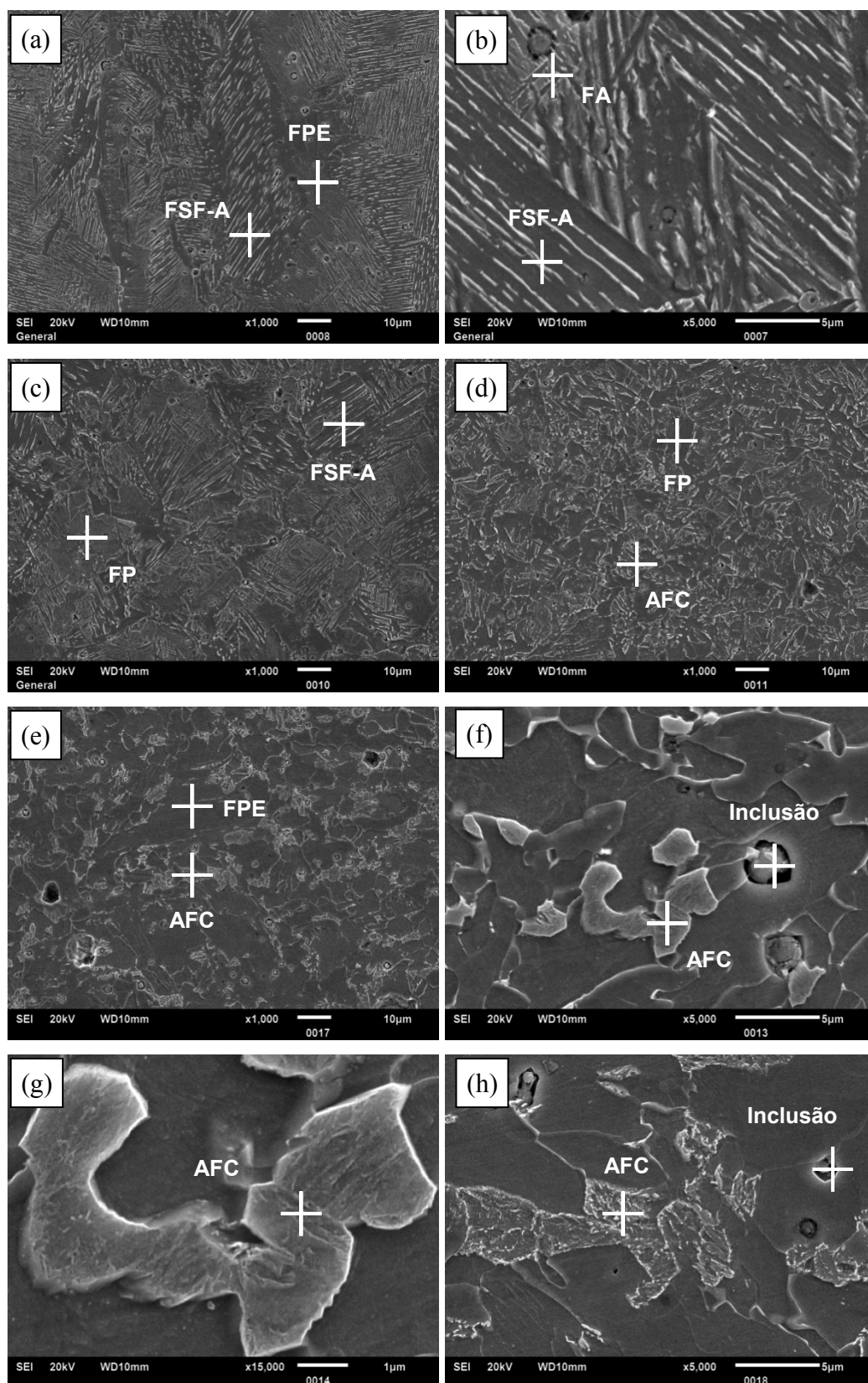


Figura 52: (a) RC, em destaque FSF-A e FPE. (b) RC com FSA-A e FA. (c) RGG com FP e FSF-A. (d) RGG com FP e AFC. (e) RC com FPE e AFC. (f) RC com AFC e inclusões. (g) AFC. (h) RC com AFC e inclusões

Foram feitas análises de EDS, através do MEV, nos agregados ferrita-carbeto e na matriz ferrítica. O resultado mostrou que a maior concentração de molibdênio está presente no agregado ferrita-carbeto. Não foi possível caracterizar adequadamente a microestrutura dos agregados ferrita-carbeto com as técnicas empregadas. Outras técnicas como a microscopia eletrônica de transmissão são recomendadas. A Figura 53 e a Figura 54 mostram a análise de EDS da matriz e do agregado ferrita-carbeto, seguidas de suas tabelas.

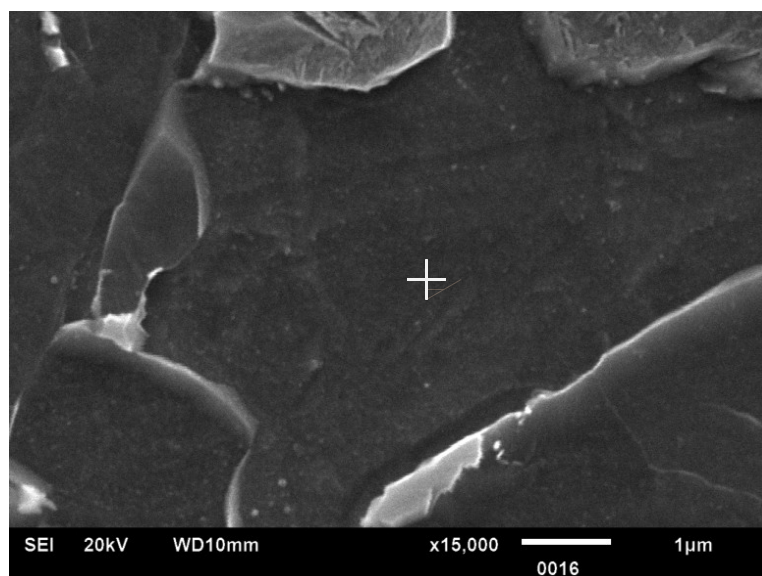


Figura 53: Matriz do metal de solda do eletrodo E. Aumento 15.000X

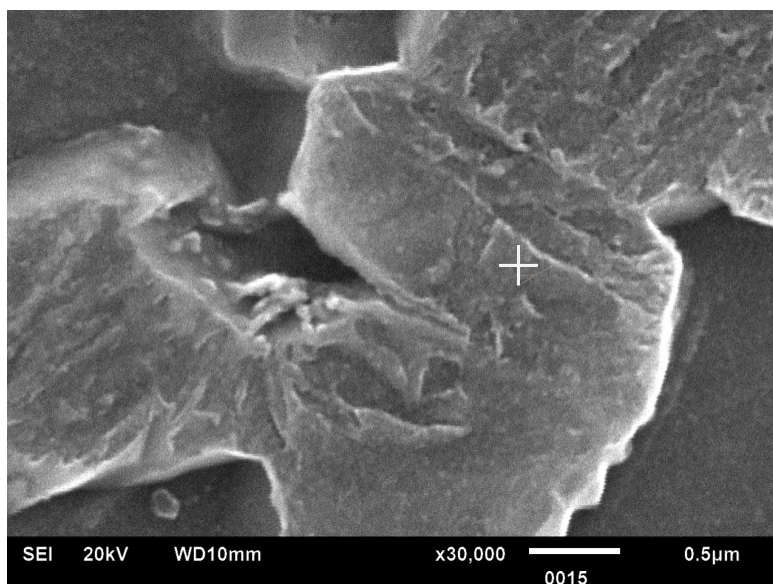


Figura 54: Agregado ferrita-carbeto do metal de solda do eletrodo E. Aumento de 30.000X

Tabela 8: Porcentagem em peso dos elementos na matriz ferrítica

Elementos	Fe	Ni	Mo
Porcentagem em peso	89.39	2.18	0.09

Tabela 9: Porcentagem em peso dos elementos no agregado ferrita-carbeto

Elementos	Fe	Ni	Mo
Porcentagem em peso	88.54	2.38	0.87

4.4. Propriedades Mecânicas do Metal de Solda

Os resultados obtidos através dos ensaios mecânicos são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Resultados dos Ensaios Mecânicos *

Eletrodo	Dureza (HV5)	L.E (MPa)	L.R (MPa)	Along. (%)	Estricção (%)	Charpy V 0°C (J)
A	172	398	462	19	28,8	50
B	187,4	410	483	27,2	42,2	50
C	193,4	423	493	15,6	29,4	54
D	194,4	434	496	10,2	11,6	51,3
E	234,2	*	*	*	*	40

*Dureza: média de 5 indentações, Charpy: média de 3 testes, L.E, L.R, Along, e estricção: resultados de um único ensaio.

Para o ensaio de microdureza foram utilizadas três amostras obtidas respectivamente das soldas com os eletrodos B, C e D. Os resultados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Resultado do ensaio de microdureza (média de 10 identações)

Eletrodo	Microdureza (HV1)
A	171.6
B	180.5
C	192.4
D	192.6
E	201.3

As Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15, Tabela 15 e Tabela 16 apresentam os valores de microdureza em relação às regiões do metal de solda e suas microestruturas.

Tabela 12: Resultados individuais de microdureza para o eletrodo A

Eletrodo A		
Identações	Microdureza (HV1)	Regiões e microestruturas
1	191	RGF (FP e AFC)
2	168	RGF (FP)
3	171	RGF (FP)
4	173	RGF (FP e AFC)
5	168	RGF (FP)
6	183	RGF (FP e AFC)
7	164	RGF (FP)
8	170	RGF (FP)
9	161	RGF (FP)
10	167	RGF (FP e FA-R)

Tabela 13: Resultados individuais de microdureza para o eletrodo B

Eletrodo B		
Identações	Microdureza (HV1)	Regiões e microestruturas
1	188	RGF (FP)
2	182	RGF (FA-R e FP)
3	195	RGF (FA-R)
4	191	RGF (FA-R) e RC (FPE)
5	193	RGF (FA-R e FP)
6	176	RGF (FP)
7	163	RGG (FP)
8	173	RGF e RGG (FP)
9	172	RGF (FP)
10	172	RGF (FP)

Tabela 14: Resultados individuais de microdureza para o eletrodo C

Eletrodo C		
Identações	Microdureza (HV1)	Regiões e microestruturas
1	205	RC (AFC e FPE)
2	186	RGF (FP e AFC)
3	190	RGF (FP e AFC)
4	213	RGF (AFC e FP)
5	186	RGF (FP)
6	189	RGF (FP)
7	184	RGF (FP e FA-R)
8	182	RGF (FP)
9	197	RGF (FA-R e FP)
10	192	RGF (FP)

Tabela 15: Resultados individuais de microdureza para o eletrodo D

Eletrodo D		
Identações	Microdureza (HV1)	Regiões e microestruturas
1	214	RGF (AFC e FA-R)
2	204	RGF (AFC e FP)
3	199	RC (FPE e FSF-A)
4	194	RGF (FA-R)
5	181	RGF (FP)
6	183	RGF (FP)
7	180	RC (FPE)
8	199	RGF (FA-R)
9	185	RGF (FP)
10	187	RGF (FA-R e FP)

Tabela 16: Resultados individuais de microdureza para o eletrodo E

Eletrodo E		
Identações	Microdureza (HV1)	Regiões e microestruturas
1	203	RGG (FSF-A, FSF-NA, FPE e AFC)
2	201	RC (FSF-A, FPE, FA, AFC)
3	219	RGG (FSF-A, FPE e FA)
4	213	RGF (FA-R)
5	214	RGF (FA-R)
6	206	RGF (FP, FA-R e AFC)
7	196	RGF (FP, FA-R e AFC)
8	193	RGF (FP e FA-R)
9	176	RGF (FP)
10	192	RGF (FA-R)

A dureza do metal de solda cresce com o aumento do teor de Mo, conforme mostrado na Tabela 10 e na Tabela 11. Para melhor visualização esta variação está mostrada graficamente na Figura 55.

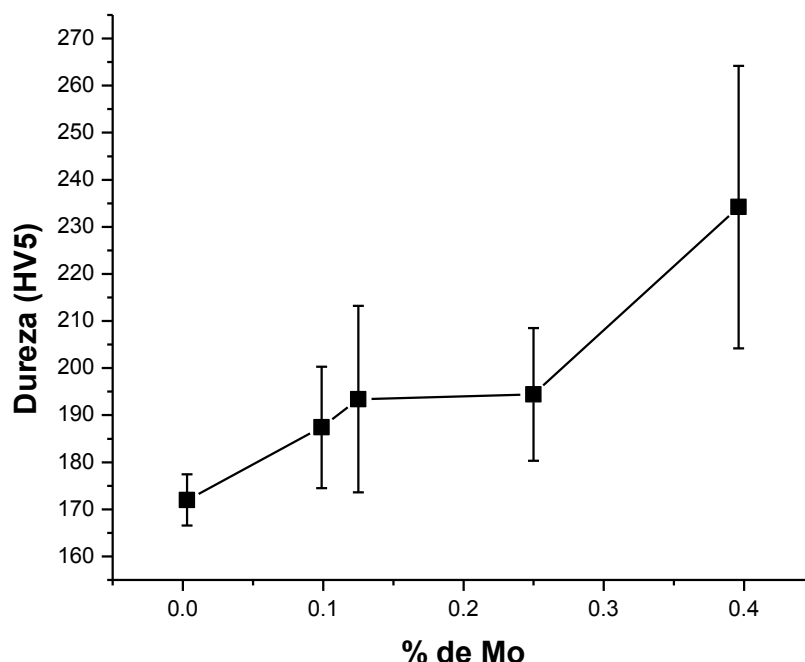


Figura 55: Valor médio de dureza em função do teor de Mo

Os resultados médios de energia absorvida no ensaio Charpy apresentados na Tabela 10 e na Figura 56. Os resultados mostram que para os eletrodos B, C e D não há influência significativa do teor de Mo. Os desvios padrão mostram que os valores de energia absorvida destes eletrodos pertencem a um único patamar, portanto não havendo variação significativa. Pode-se observar melhor este fato analisando os valores obtidos pelos eletrodos A (0,099% Mo) e B (0,0125% Mo), que apresentaram valores idênticos de energia charpy. O eletrodo D (0,396% Mo) experimentou o menor valor de energia absorvida, 40 J.

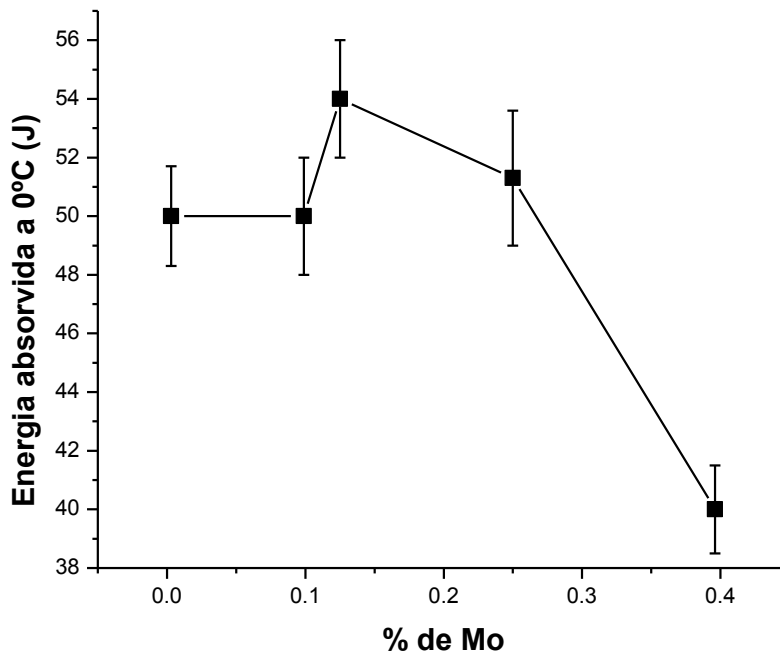


Figura 56: Teor de Mo versus energia charpy

Os maiores valores percentuais de alongamento (27%) e estrição (42.2%) foram obtidos pelo eletrodo B (0.099% Mo). O eletrodo D (0.25% Mo) apresentou os menores valores percentuais, com 10.2% de alongamento e 11.6% de estrição.

Os resultados de Limite de Escoamento (L.E) e de Limite de resistência a Tração (L.R) mostram que o molibdênio aumenta a resistência mecânica do metal de solda, sendo um elemento de liga eficaz neste propósito. Este fato pode ser observado nos eletrodos A e B onde o limite de escoamento do eletrodo A (com 398 MPa) que não possui Mo, aumentou 12 MPa em relação ao B que possui 0.099% de Mo (com 410 MPa). Para o limite de resistência a tração, o eletrodo A obteve o valor de 462 MPa enquanto o eletrodo B atingiu o valor de 483 MPa, aumentando em 21 MPa. Para o eletrodo C (com 0.125% de Mo), os valores de L.E e L.R continuaram subindo, com 423 e 493 MPa, respectivamente. O eletrodo D (0.250% de Mo) forneceu o maior resultado, com 434 MPa de L.E e 496 MPa de L.R.

A variação do limite de escoamento e do limite de resistência a tração em função do teor de Mo do metal de solda são apresentados na Figura 57.

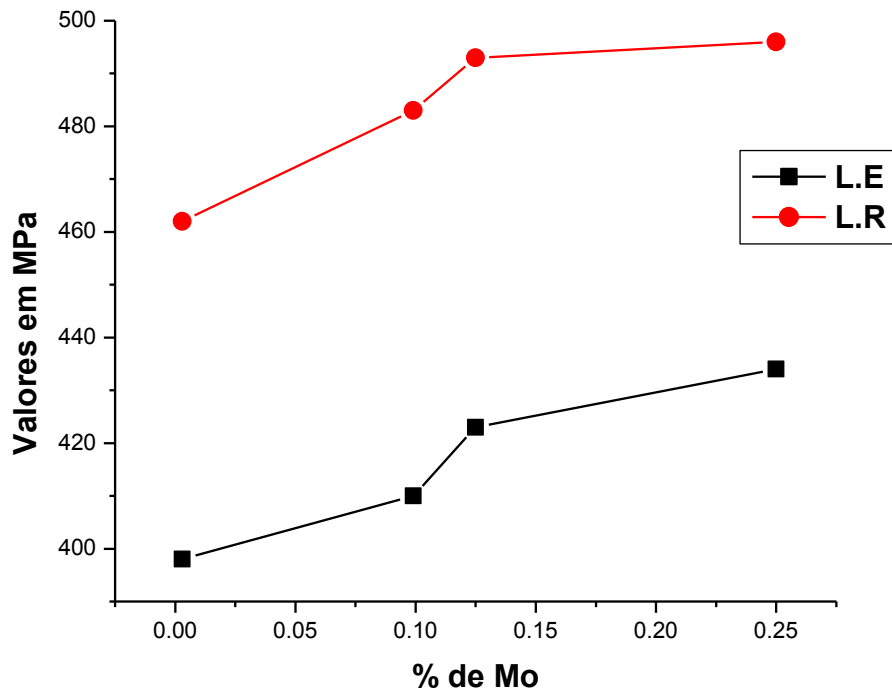


Figura 57: L.E e L.R versus teor de Mo

A avaliação das propriedades mecânicas (dureza, limite de escoamento e resistência mecânica) por Macroidentação Instrumentada mostrou valores coerentes e bem próximos daqueles encontrados pelos métodos tradicionais (obtidos por este trabalho), como podem ser visto na Figura 58, na Figura 59 e na Figura 60, podendo ser uma metodologia alternativa confiável para obtenção de uma estimativa indireta de valores de propriedades mecânicas trativas, já que os corpos de prova produzidos por SSM são de difícil obtenção. A média destes valores, do expoente de encruamento (n), do coeficiente de resistência (k) e os respectivos desvios padrão podem ser observados na Tabela 17. A Figura 61 mostra a curva tensão-deformação de todos os eletrodos analisados, construída a partir dos resultados obtidos por este experimento.

Tabela 17: Resultados das propriedades mecânicas obtidas por Macroidentação Instrumentada

Eletrodo	Dureza	Desvio	L.E	Desvio	L.R	Desvio	n	K
A	160.75	5,96	365	12.1	466	19.6	0.0908	634.7
B	164.2	3.59	369.7	8.01	481.2	11.2	0.0945	661.2
C	169.5	8.42	386	20.3	494.7	21.2	0.0915	674.7
D	174.2	4.57	395	9.55	506.7	13	0.0915	690.5
E	184.5	10.5	403	35.3	536.5	35.7	0.1010	747.7

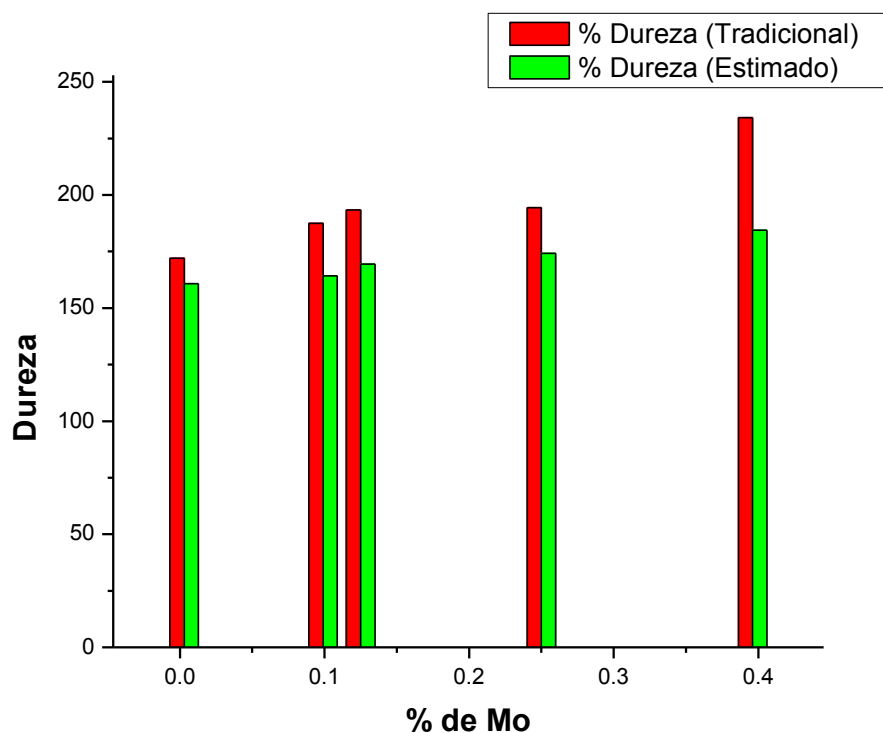


Figura 58: Resultados médios de dureza tradicional e estimado do metal de solda

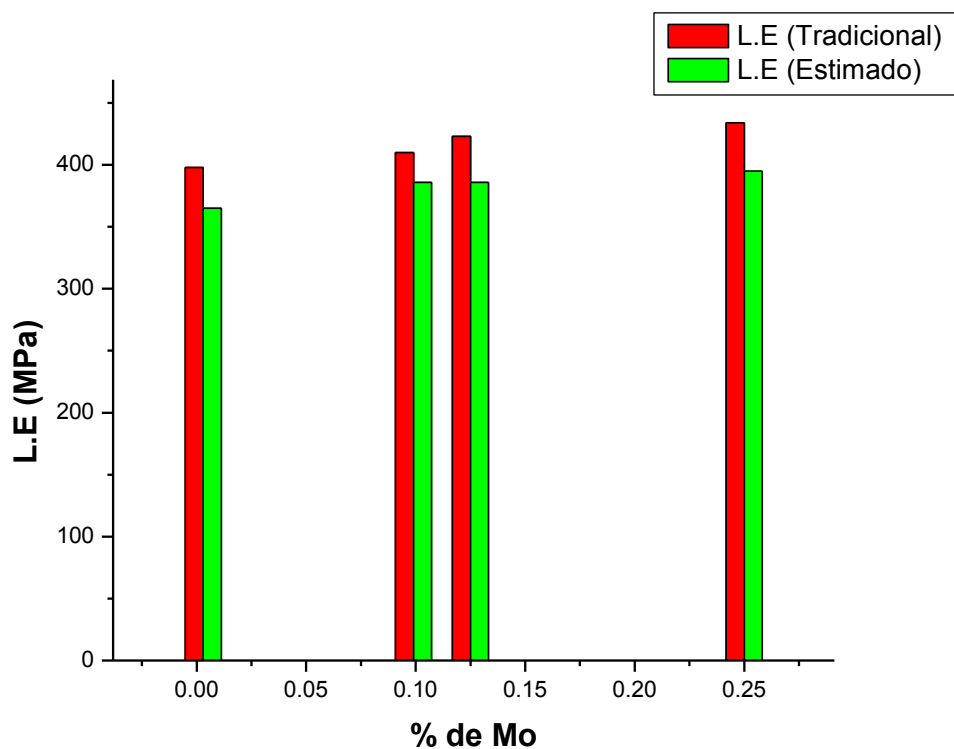


Figura 59: Resultados médios do L.E (MPa) tradicional e estimado do metal de solda

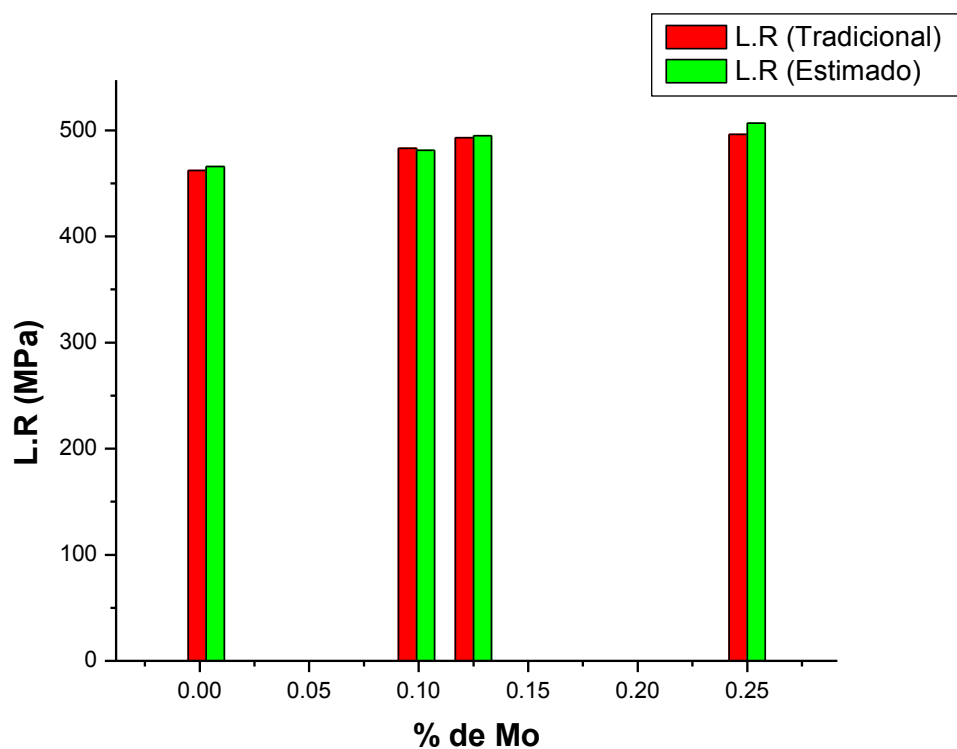


Figura 60: Resultados médios do L.R (MPa) tradicional e estimado do metal de solda

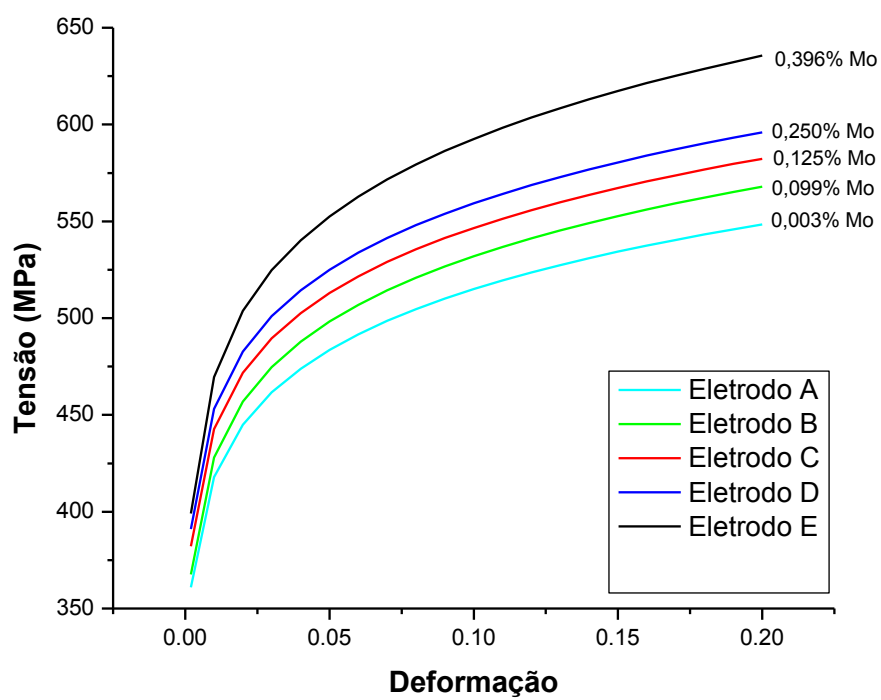


Figura 61: Curva tensão-deformação obtida através dos valores estimados do metal de solda por Macroidentação Instrumentada