

CAPÍTULO V

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E DE MICRODUREZA

Neste capítulo é apresentada uma caracterização microestrutural e de microdureza dos corpos de prova soldados com os parâmetros descritos nas Tabelas 4.2, 4.9 e 4.16, Capítulo IV. O objetivo é observar a influência do gás de proteção na microestrutura, tamanho de grão e microdureza dos corpos de prova soldados, lembrando que se buscaram condições de soldagem similares para todas variáveis estudadas. O Capítulo será dividido em dois itens relativos às análises realizadas na zona termicamente afetada e na zona fundida.

5.1. Caracterização microestrutural, tamanho de grão e microdureza da zona termicamente afetada

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam as microestruturas dos corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932 com, respectivamente, os pares metal de adição ER308LSi e gás de proteção Ar+2%O₂, metal de adição ER430Ti e gás de proteção Ar+8%CO₂ e, por último, o metal de adição ER430LNb e gás de proteção Ar+25%CO₂. Na letra "a" das Figuras utilizaram-se aumentos de 100 vezes, onde é possível observar parte do metal de base (MB), a zona termicamente afetada (ZTA) e parte da zona fundida (ZF), conforme está discriminado nas figuras. Na letra "b" utilizaram-se um aumento de 500 vezes, onde é possível observar as microestruturas da zona termicamente afetada.

Conforme esperado, independentemente do metal de adição ou gás de proteção utilizados não ocorreram variações significativas nas microestruturas obtidas da zona termicamente afetada, sendo compostas de uma matriz ferrítica com precipitados (provavelmente carbonetos de nióbio e de titânio) no interior do grão. Este fato é devido, conforme já mencionado, as soldas terem sido realizadas com calores impostos similares.

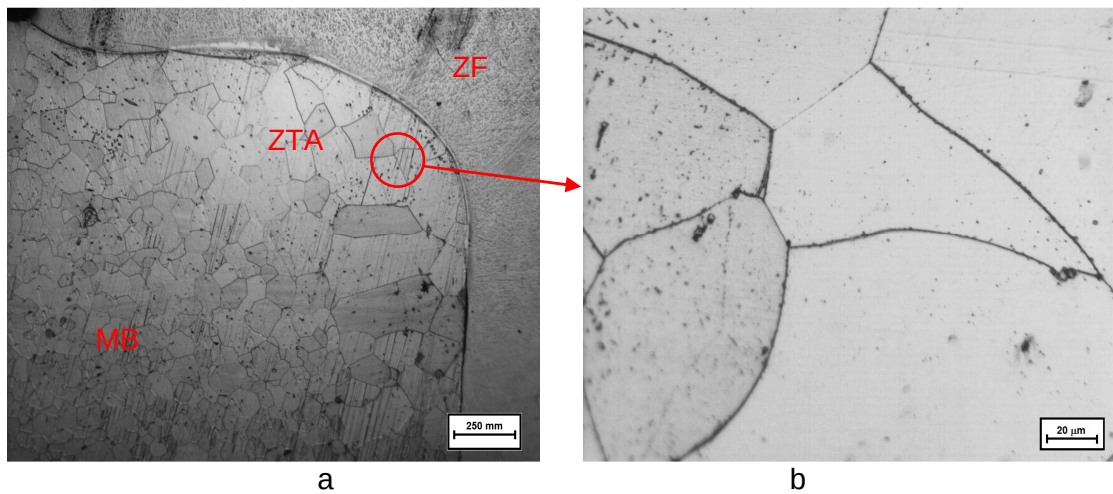


Figura 5.1. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base UNS43932 com o gás de proteção Ar+2%O₂ e metal de adição ER308LSi (a) 100 vezes de aumento; (a) 500 vezes de aumento

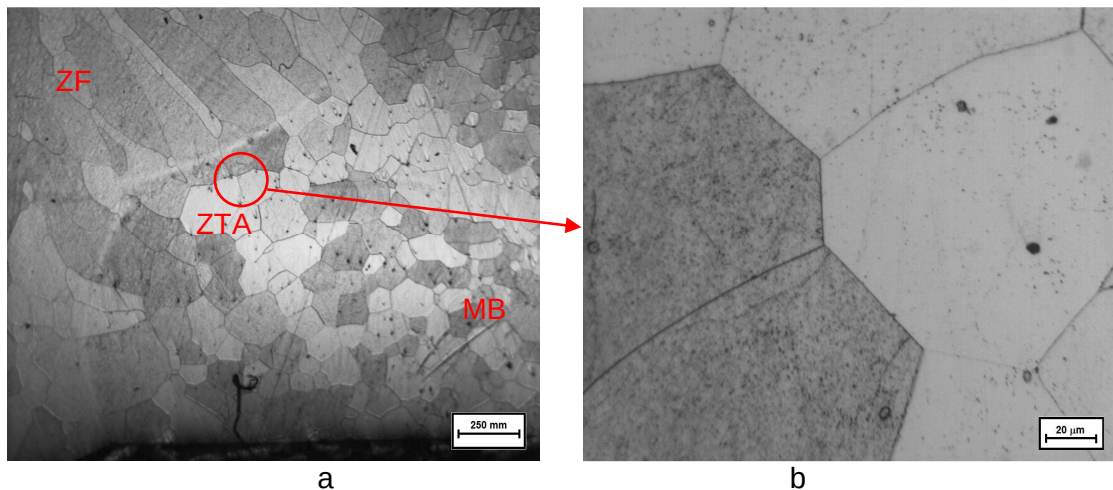


Figura 5.2. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base UNS43932 com o gás de proteção Ar+8%CO₂ e metal de adição ER430Ti (a) 100 vezes de aumento; (a) 500 vezes de aumento

As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam, de forma similar ao que foi apresentado para o metal de base UNS43932, as microestruturas dos cordões soldados no metal de base AISI 441 com, respectivamente, o metal de adição ER308LSi e gás de proteção Ar+2%O₂, o metal de adição ER430Ti e gás de proteção Ar+8%CO₂ e o metal de adição ER430LNb e gás de proteção Ar+25%CO₂.

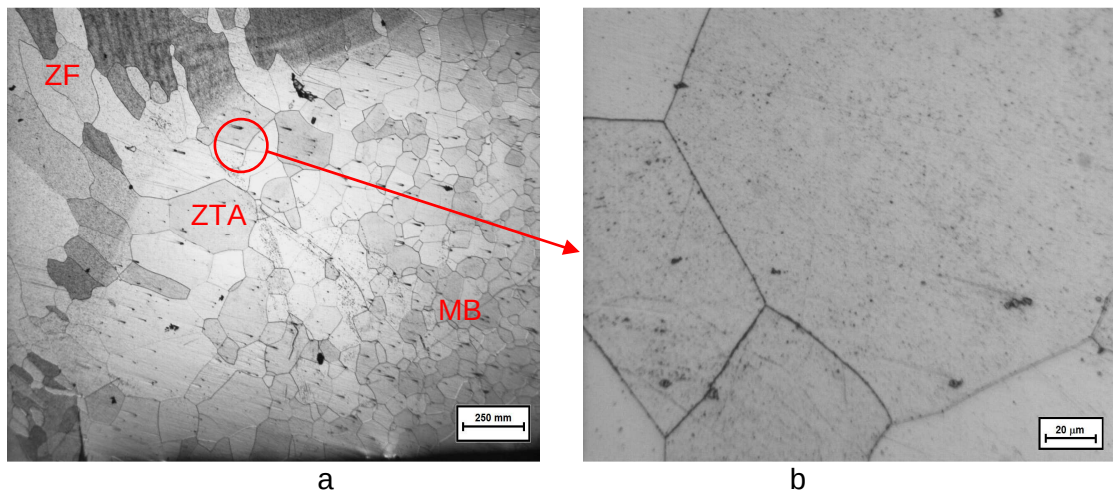


Figura 5.3. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base UNS43932 com o gás de proteção Ar+25%CO₂ e metal de adição ER430LNb (a) 100 vezes de aumento; (b) 500 vezes de aumento

Analisando as Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 nota-se que também para o metal de base AISI 441 não ocorreram variações significativas nas microestruturas obtidas. Comparando com as Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 é possível afirmar também que as zonas termicamente afetadas são muito similares as obtidas no metal de base UNS 43932, sendo compostas por uma matriz ferrítica e precipitados no interior dos grãos. Apesar de não medidos uma maior quantidade de precipitados no interior dos grãos pode ser identificado no material AISI 441. Este fato também foi observado por Madeira (2007). É importante colocar ainda, a necessidade de estudos mais aprofundados sobre a quantificação e influência dessa maior quantidade de precipitados na ZTA desses materiais.

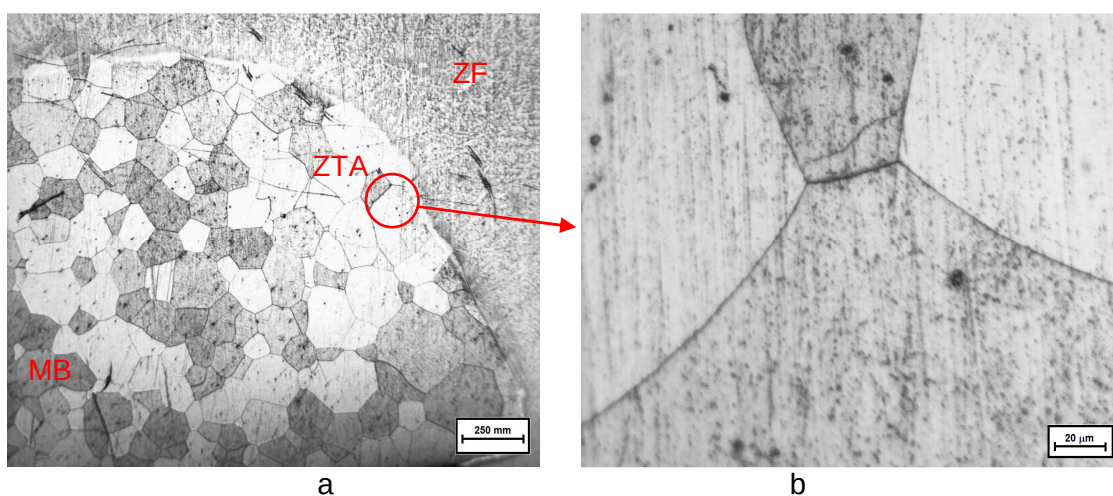


Figura 5.4. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base AISI 441 com o gás de proteção Ar+2%O₂ e metal de adição ER308LSi (a) 100 vezes de aumento; (b) 500 vezes de aumento

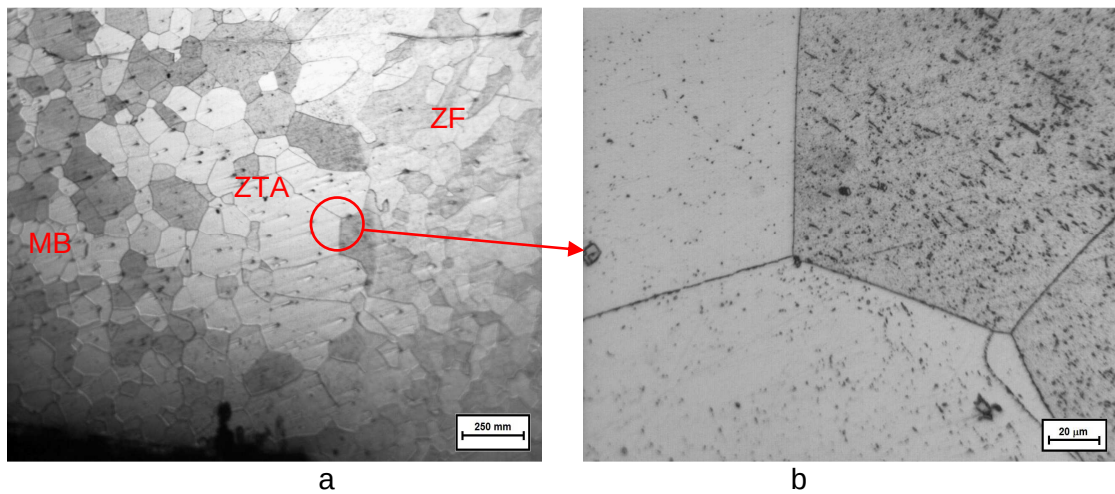


Figura 5.5. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base AISI 441 com o gás de proteção Ar+8%CO₂ e metal de adição ER430Ti (a) 100 vezes de aumento; (a) 500 vezes de aumento

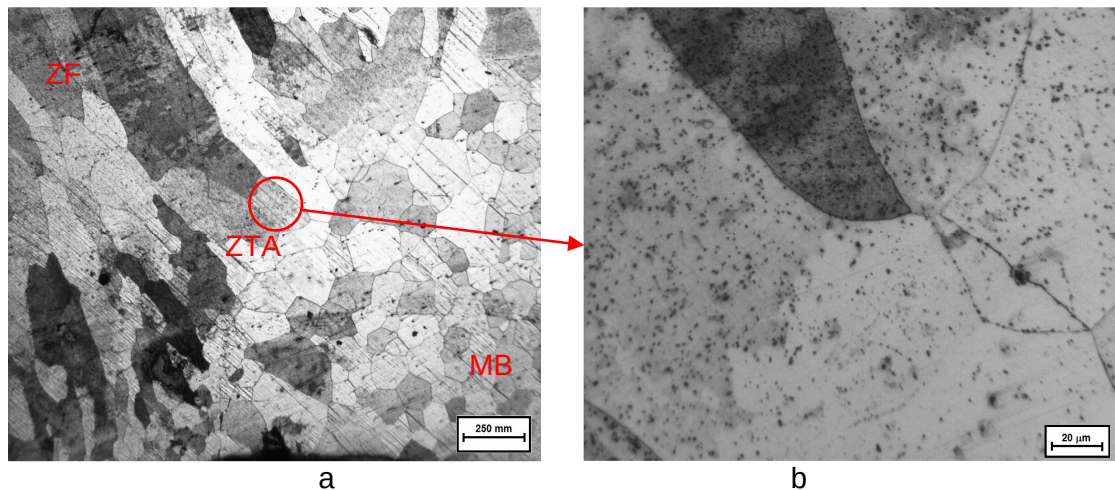


Figura 5.6. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base AISI 441 com o gás de proteção Ar+25%CO₂ e metal de adição ER430LNb (a) 100 vezes de aumento; (a) 500 vezes de aumento

Foram realizadas medidas de tamanho de grão da zona termicamente afetada (região de grãos grosseiros), apresentadas na Tabela 5.1, para todas as condições de soldagem, conforme procedimento apresentado no item 3.3.3.1, Capítulo III. Nota-se que não ocorreram variações significativas do tamanho de grão na zona termicamente afetada, independentemente do gás de proteção, metal de adição e metal de base utilizados. Fazendo-se uma média para cada material, desconsiderando o tipo de gás utilizado, tem-se um tamanho de grão de 158,5 μm , com desvio padrão de 6,9 μm para o material USN43932 e para o AISI 441, tem-se um tamanho de grão de 159,0 μm com desvio padrão de 6,4 μm , sendo os dois valores muito similares. Estes valores ficaram dentro da faixa (25 μm a 180 μm) encontrada por Lima (2007) em metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER308LSi e gás de proteção Ar+2%O₂, e potência de soldagem de 252 kJ (105 A e 20V),

condições muito similares as utilizadas neste trabalho. Observa-se ainda, que o tamanho de grão da ZTA é muito mais grosseiro que os encontrados para os metais de base, que possuem um tamanho de grão médio de aproximadamente 20 μm .

Tabela 5.1. Medidas de tamanho de grão realizadas na zona termicamente afetada de todas as condições de soldagem estudadas

Metal de base	Gás de Proteção	Tamanho de grão [μm]		
		ER308LSi	ER430Ti	ER430LNb
UNS 43932	Ar	154,3	169,4	160,2
	Ar+2%O ₂	158,2	156,2	148,9
	Ar+4%CO ₂	160,2	156,2	174,6
	Ar+8%CO ₂	152,4	167,0	148,9
	Ar+25%CO ₂	154,3	158,2	158,2
AISI 441	Ar	148,1	163,5	160,2
	Ar+2%O ₂	148,9	158,2	156,2
	Ar+4%CO ₂	154,3	156,2	158,2
	Ar+8%CO ₂	167,0	156,2	158,2
	Ar+25%CO ₂	169,4	160,2	169,4

A Tabela 5.2 apresenta as medidas de microdureza realizadas na matriz ferrítica dos metais de base UNS 43932 e AISI 441, sendo realizadas cinco medições para cada condição, descartados o menor e o maior valor encontrados para se ter uma maior confiabilidade nos resultados obtidos. Estes valores foram medidos com o objetivo de servir de comparação com as medições de microdureza da zona termicamente afetada e da zona fundida, que será apresentada posteriormente.

Tabela 5.2. Medidas de microdureza realizadas na matriz ferrítica para os metais de base UNS43932 e AISI441

Material	Microdureza (HV)						
	1	2	3	4	5	Média	Desvio
UNS43932	168	171	178	187	188	178,7	8,0
AISI441	168	178	176	187	189	180,3	5,9

A Tabela 5.3 apresenta as médias e desvios padrões da microdureza realizadas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada para os metais de base UNS 43932 e AISI 441, da mesma forma foram realizadas cinco medições e descartados o maior e o menor valor encontrados. Os valores com todas as medições de microdureza são apresentados nas Tabelas B.1 e B.2, anexo B.

Tabela 5.3. Medidas de Microdureza realizadas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada para os metais de base UNS 43932 e AISI 441

Metal de Adição	Gás de Proteção	Microdureza (HV)			
		UNS 43932		AISI 441	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
ER308LSi	Ar	153,0	10,4	171,3	2,3
	Ar+2%O ₂	155,0	4,4	169,7	1,2
	Ar+4%CO ₂	160,7	3,1	187,3	3,8
	Ar+8%CO ₂	156,3	7,5	211,7	4,0
	Ar+25%CO ₂	161,7	6,1	195,3	2,5
ER430Ti	Ar	164,7	2,3	175,7	2,5
	Ar+2%O ₂	154,7	2,3	180,7	6,4
	Ar+4%CO ₂	166,7	2,9	188,3	2,5
	Ar+8%CO ₂	175,3	2,5	179,0	3,6
	Ar+25%CO ₂	177,0	17,1	201,0	3,5
ER430LNb	Ar	157,0	2,6	180,0	7,2
	Ar+2%O ₂	180,0	1,0	182,7	2,1
	Ar+4%CO ₂	171,3	5,5	202,0	17,3
	Ar+8%CO ₂	182,3	1,2	182,7	2,5
	Ar+25%CO ₂	167,0	3,5	181,7	2,3

A Figura 5.7 apresenta os gráficos dos valores de microdureza medidos na zona termicamente afetada em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb no metal de base UNS 43932. Fazendo-se uma média geral de todas as medidas, desconsiderando o tipo de gás de proteção a microdureza foi de 165,5 HV com desvio padrão de 10,9 HV, ficando em valores médio abaixo do valor encontrado para o material 178,7 HV com desvio padrão de 8 HV (Tabela 5.2). Levando-se em consideração os desvios padrões obtidos pode-se afirmar que não houve variação significativa do valor de microdureza com o aumento de dióxido de carbono no gás de proteção.

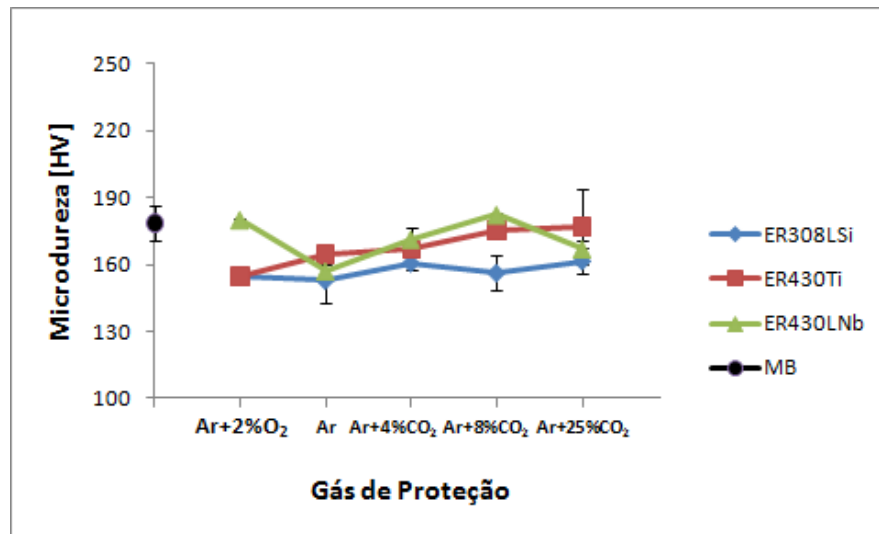


Figura 5.7. Microdurezas medidas na matriz ferrítica da ZTA em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb no metal de base UNS 43932

A Figura 5.8 apresenta os gráficos dos valores de microdureza medidos na zona termicamente afetada em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb no metal de base AISI 441. Observa-se que não houve variação significativa do valor de microdureza com o aumento de dióxido de carbono no gás de proteção. Fazendo uma análise similar à realizada para a ZTA do UNS 43932, calculando a média geral de todas as medidas, desconsiderando o tipo de gás de proteção a microdureza foi de 185,9 HV com desvio padrão de 12,5 HV, ficando em valores médio abaixo do valor encontrado para o material 180,3 HV (Tabela 5.2). Pode-se afirmar que os valores de microdureza ficaram na mesma faixa dos encontrados no metal de base, com valores maiores e mais próximos do encontrado para o metal de base. Este fato pode estar relacionado, provavelmente, a maior quantidade de precipitados que compensou o aumento do tamanho de grão.

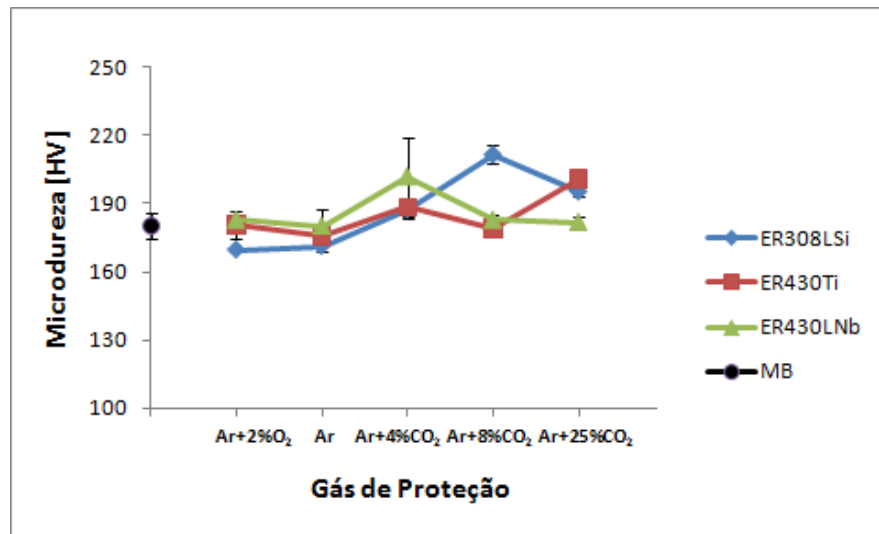


Figura 5.8. Gráfico dos valores de microdureza medidos na matriz ferrítica da ZTA em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb no metal de base AISI 441

De um modo geral os valores de microdureza medidos na ZTA no metal de base UNS 43932 tiveram valores menores que os observados no metal de base AISI 441, provavelmente relacionadas as maiores quantidades de precipitados observadas nas Figuras 5.4 a 5.6. Os valores encontrados de microdureza, de forma geral, ficaram muito próximos aos encontrados por Madeira (2007), que fez a medida de microdureza na ZTA do metal de base UNS43932, ficando entre 160 e 180 HV.

5.2. Análise microestrutural, tamanho de grão e microdureza da zona fundida

A análise microestrutural na zona fundida foi realizada em uma região próxima a raiz da solda, conforme se observa a região marcada na Figura 5.9, devido aos ensaios mecânicos terem sido realizados principalmente nesta região, uma vez que o reforço e cobre-junta foram retirados para a realização dos experimentos.

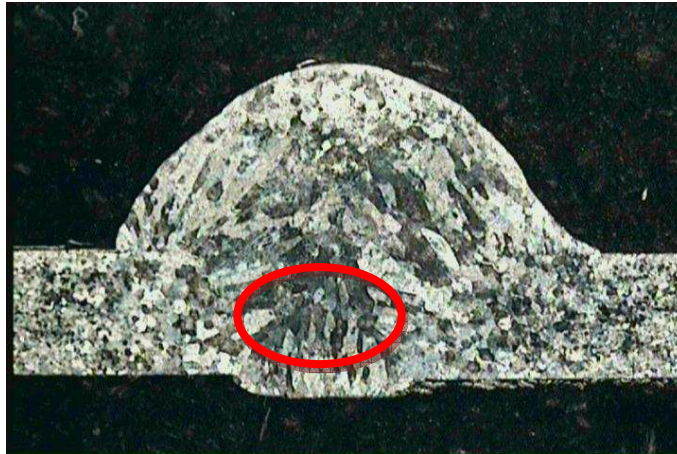


Figura 5.9. Região da zona fundida onde foram realizadas as análises microestruturais para todas as condições de soldagem estudadas

As Figuras 5.10 a 5.14 apresentam a microestrutura com aumento de 630 vezes dos corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER308LSi, respectivamente para os gases de proteção Ar, Ar+2%O₂, Ar+4%CO₂, Ar+8%CO₂ e Ar+25%CO₂. Serão apresentadas neste Capítulo somente as microestruturas dos cordões de solda realizados no metal de base UNS 43932, pois não ocorreram mudanças significativas das microestruturas com a alteração do metal de base para o AISI 441, que podem ser observadas nas Figuras B.1 a B5, Anexo B. Analisando-se as Figuras 5.10 a 5.14 observa-se uma matriz austenítica com veios de ferrita (ferrita em espinha ou vermicular) para todas as condições de soldagem, independentemente do gás de proteção e do metal de base utilizados.

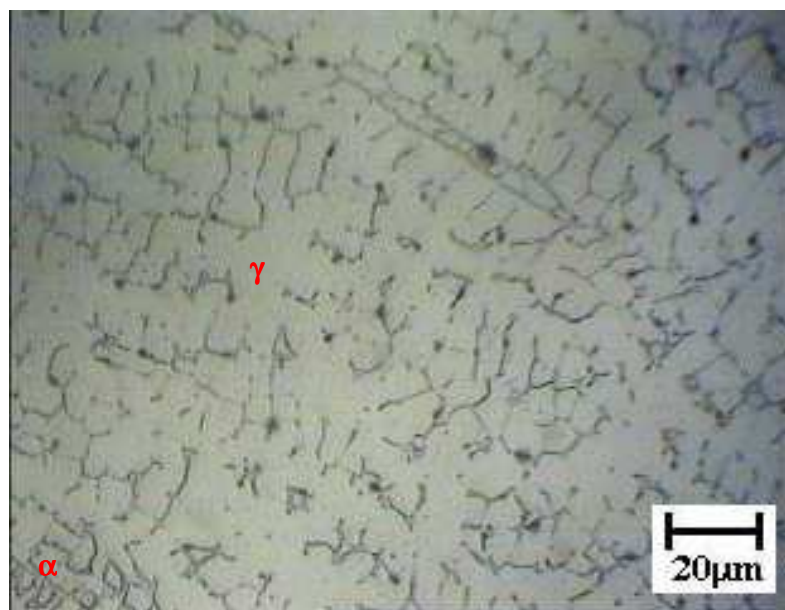


Figura 5.10. Zona fundida da placa de teste de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar (γ) matriz austenítica, (α) lamelas de ferrita

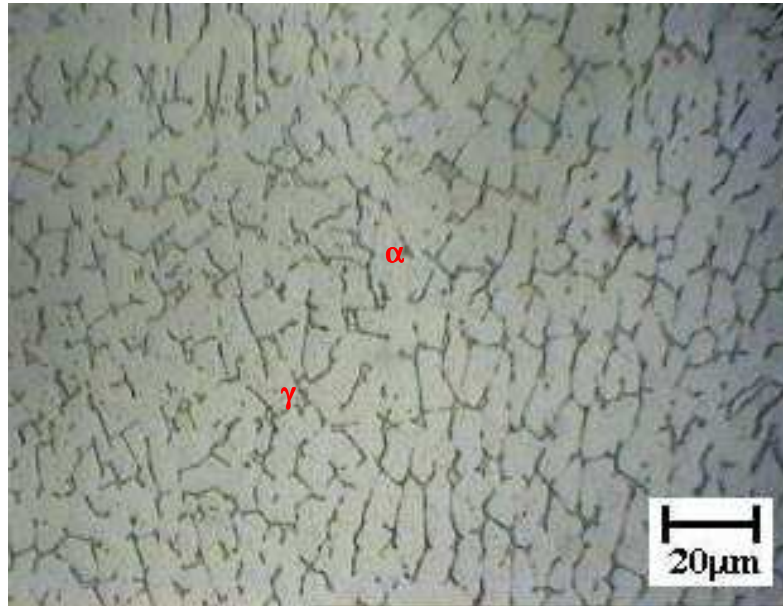


Figura 5.11. Zona fundida da placa de teste de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O₂ (γ) matriz austenítica, (α) lamelas de ferrita

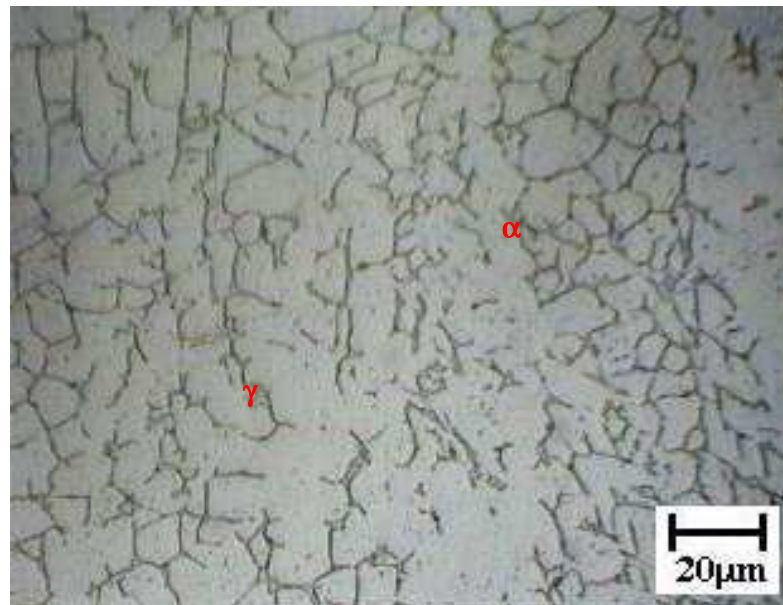


Figura 5.12. Zona fundida da placa de teste de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+4%CO₂ (γ) matriz austenítica, (α) lamelas de ferrita

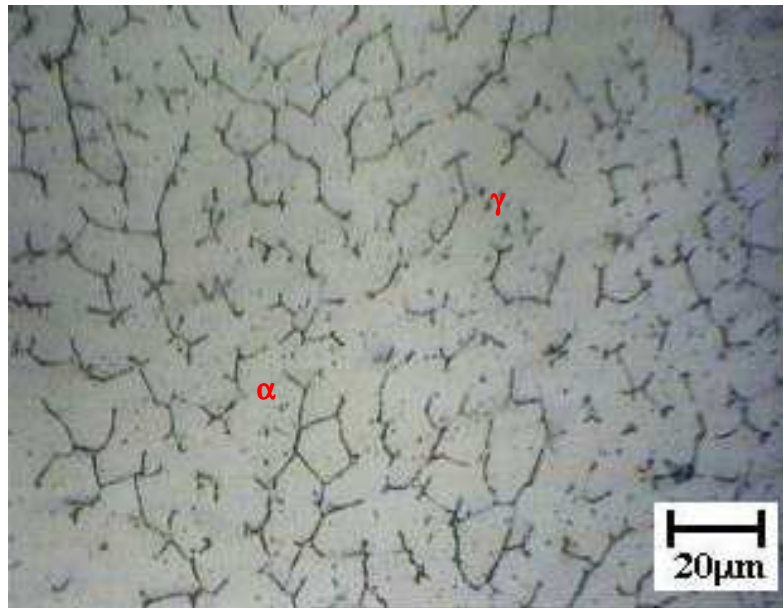


Figura 5.13. Zona fundida da placa de teste de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+8%CO₂ (γ) matriz austenítica, (α) lamelas de ferrita

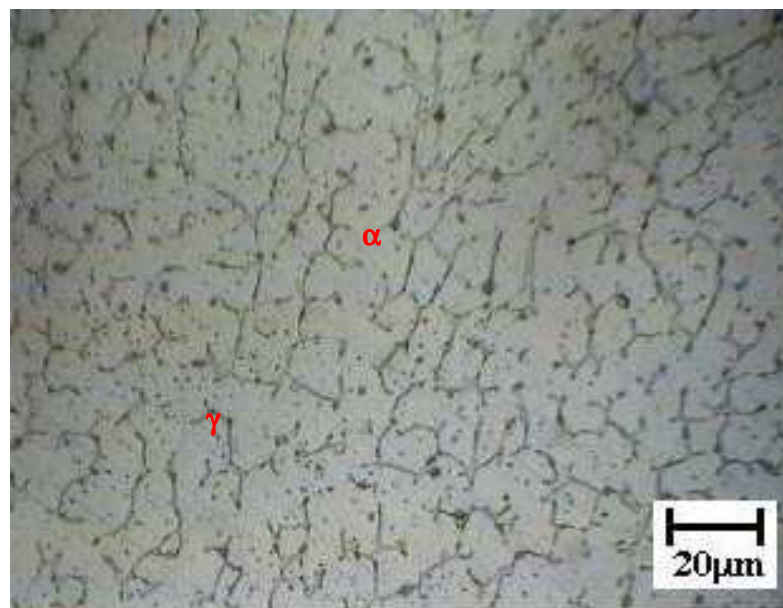


Figura 5.14. Zona fundida da placa de teste de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+25%CO₂ (γ) matriz austenítica, (α) lamelas de ferrita

Com base nas composições químicas do material de base (Tabela 3.1, Capítulo III) e do metal de adição (Tabela 3.2, Capítulo III), nos valores de diluição para cada par metal de base-metal de adição apresentados na Tabela 4.13, Capítulo IV e utilizando o programa Schaeffler baixado do site da ESAB (<http://www.esab.com/fi/fi/support/PC-ohjelmat.cfm>) em 05 de julho de 2009 realizaram-se as estimativas das microestruturas que seriam obtidas, assim como estimativa da composição química do metal de solda, para as soldas utilizando o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS 43932 e AISI 441, que podem ser

observadas, respectivamente, nas Figuras 5.15 e 5.16. É importante frisar que não é levado em consideração o gás de proteção utilizado no processo de soldagem para esta estimativa.

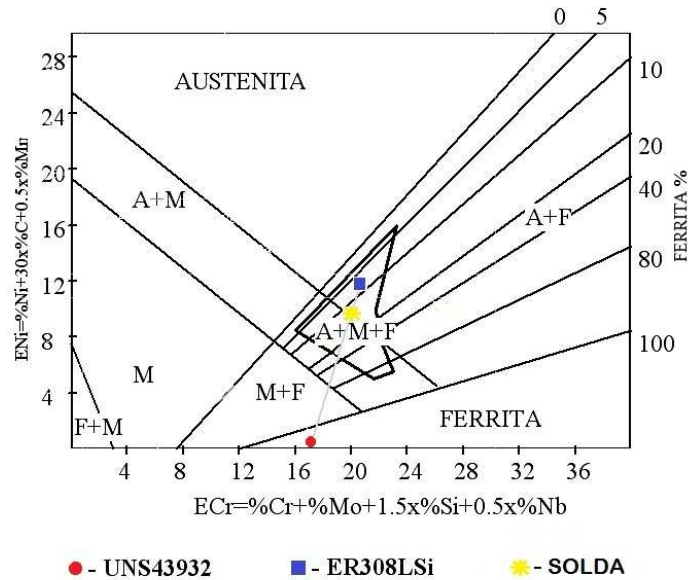


Figura 5.15. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi obtida pelo diagrama de Schaeffler

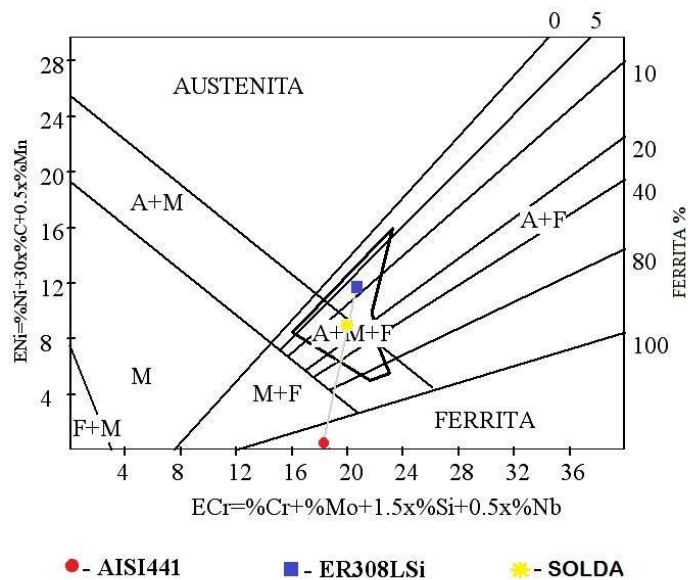


Figura 5.16. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER308LSi obtida pelo diagrama de Schaeffler

Nota-se nas Figuras 5.15 e 5.16 que o metal de adição encontra-se em uma região do diagrama de Schaeffler com presença de austenita e ferrita e os metais de base encontram-

se em uma região ferrítica. A solda para os dois metais de base encontram-se na mesma região do metal de adição, podendo haver, portanto, presença de austenita, ferrita e martensita. Considerando o diagrama, a composição da solda quando se utiliza o metal de base UNS 43932 é composta por 0,017% de carbono, 0,68% de silício, 1,58% de manganês, 19,11% de cromo, 8,27% de níquel e 0,04% de nióbio. Para o metal de base AISI 441 a composição da solda é composta por 0,017% de carbono, 0,66% de silício, 1,47% de manganês, 19,21% de cromo, 7,73% de níquel e 0,14% de nióbio. Observando-se quando comparado com a composição química da solda realizada no metal de base UNS 43932 uma queda na quantidade de níquel e um aumento de nióbio.

Realizando-se uma comparação entre as microestruturas obtidas e as estimativas realizadas pelo diagrama de Schaeffler verifica-se que não há presença de martensita, conforme foi indicado pelos diagramas. Este fato pode estar relacionado a não se ter levado em consideração na confecção dos diagramas os efeitos de titânio e nitrogênio, sendo que este último é um forte formador de austenita.

A Tabela 5.4 apresenta as medições da porcentagem de ferrita na matriz austenítica para os corpos de prova soldados nos metais de base UNS 43932 e AISI 441 com o metal de adição ER308LSi e os cinco gases de proteção estudados. Estas medições foram realizadas utilizando o Software Image J, calculando a porcentagem de ferrita (pela área) nos cordões de solda retirados da sessão transversal no início, meio e final dos cordões de solda.

Tabela 5.4. Medições da porcentagem de ferrita na matriz austenítica para as placas de teste soldadas nos metais de base UNS 43932 e AISI 441 com o metal de adição ER308LSi

Metal de Adição	Metal de Base	Gás de Proteção	Porcentagem de ferrita (%)				
			A	B	C	Media	Desvio
ER308LSi	UNS43932	Ar	16,6	18,6	13,0	16,1	2,9
		Ar+2%O ₂	17,2	15,3	15,7	16,0	1,0
		Ar+4%CO ₂	18,7	14,2	12,5	15,2	3,2
		Ar+8%CO ₂	11,0	16,8	12,5	13,5	3,0
		Ar+25%CO ₂	14,0	10,0	10,6	11,6	2,2
	AISI441	Ar	18,5	23,1	13,8	18,5	4,7
		Ar+2%O ₂	17,6	18,0	14,1	16,5	2,1
		Ar+4%CO ₂	12,5	14,9	14,2	13,9	1,3
		Ar+8%CO ₂	14,8	13,6	12,4	13,6	1,2
		Ar+25%CO ₂	10,8	13,2	10,7	11,6	1,4

A Figura 5.17 apresenta o gráfico da porcentagem de ferrita em função do gás de proteção. É possível afirmar que em valores médios tem-se uma queda da quantidade da fase ferrita em relação à austenita com o acréscimo de dióxido de carbono no gás de proteção, que provavelmente está relacionada ao aumento de carbono (elemento gamagênico) introduzido à zona fundida como citado anteriormente. Liao; Chen (1998) comentam que o aumento de dióxido de carbono em mistura com o gás de proteção acrescenta carbono na zona fundida.

Comparando com os valores encontrados no diagrama de Schaeffler, que ficou em torno de 13,6% de ferrita para o metal de base UNS 43932 e em torno de 16,4% de ferrita para o metal de base AISI 441, verifica-se que os valores são muito similares aos encontrados na Tabela 5.4.

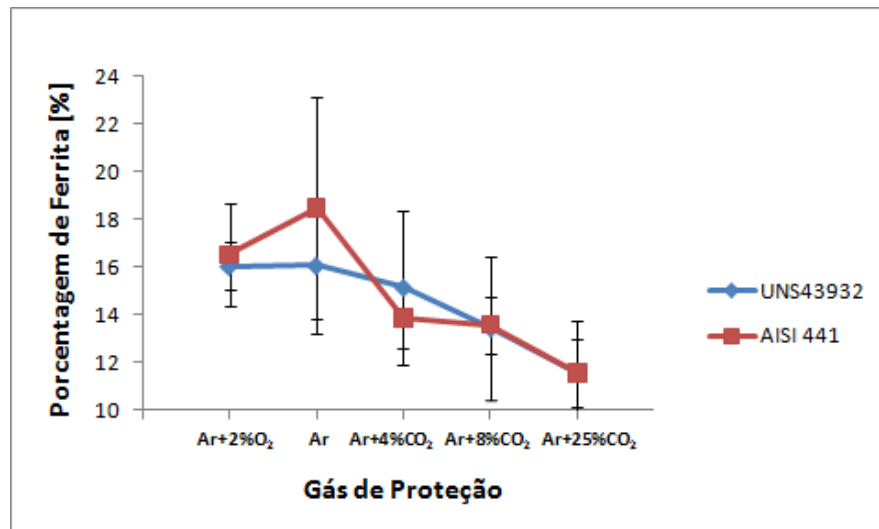


Figura 5.17. Porcentagem de ferrita nos corpos de prova soldados com os metais de adição ER308LSi em função do gás de proteção utilizado

As Figuras 5.18 a 5.22 apresentam a microestrutura com aumento de 630 vezes das placas de teste soldadas no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER430Ti, respectivamente para os gases de proteção Ar, Ar+2%O₂, Ar+4%CO₂, Ar+8%CO₂ e Ar+25%CO₂. Também serão apresentadas somente as microestruturas dos cordões de solda realizados no metal de base UNS 43932 por não ocorrerem mudanças significativas das microestruturas com a alteração do metal de base para o AISI 441, sendo estas microestruturas apresentadas nas Figuras B.6 a B.10, Anexo B.

Analisando-se as Figuras 5.18 a 5.21, observa-se uma matriz ferrítica com precipitados de titânio em todo o grão, conforme confirmado por microscópio eletrônico de varredura por Madeira (2007). Apesar de não ter sido medido, observa-se ainda um aumento da quantidade de precipitados em todo o grão, mas principalmente no contorno de grão, com o aumento da quantidade de dióxido de carbono no gás de proteção. Este

aumento é devido ao maior teor de carbono na zona fundida, ocasionada pelo maior teor de dióxido de carbono. É importante citar que a maior quantidade de carbono pode também formar carboneto de cromo, diminuindo a resistência a corrosão do cordão de solda.

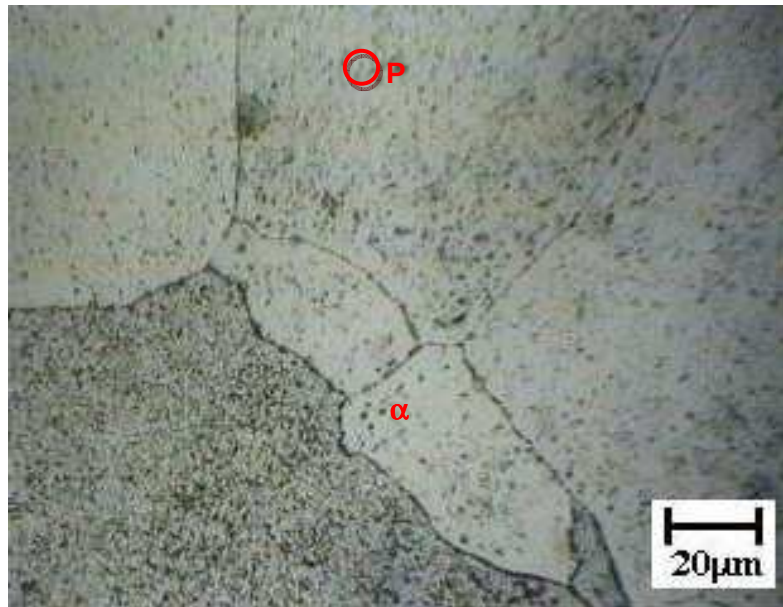


Figura 5.18. Zona fundida da placa de teste de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar (α) matriz ferrítica, (P) precipitados de titânio

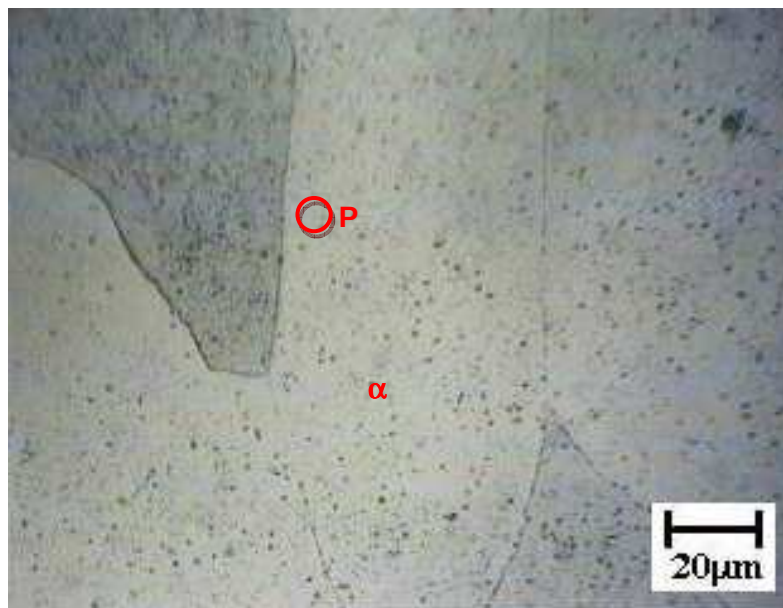


Figura 5.19. Zona fundida da placa de teste de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+2%O₂ (α) matriz ferrítica, (P) precipitados de titânio

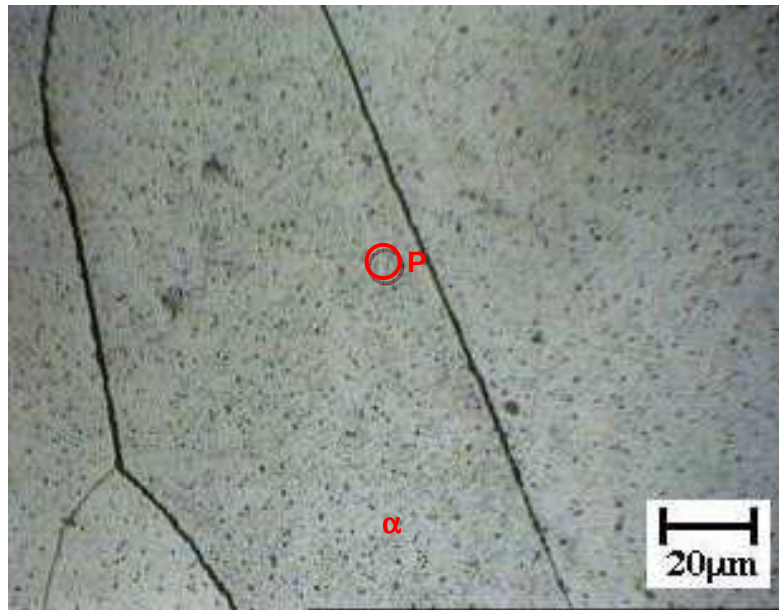


Figura 5.20. Zona fundida da placa de teste de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+4%CO₂ (α) matriz ferrítica, (P) precipitados de titânio

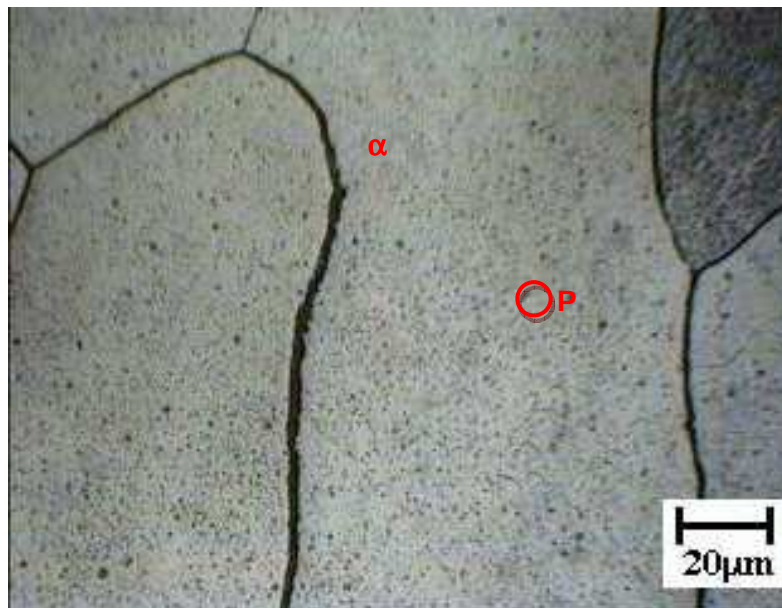


Figura 5.21. Zona fundida da placa de teste de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+8%CO₂ (α) matriz ferrítica, (P) precipitados de titânio

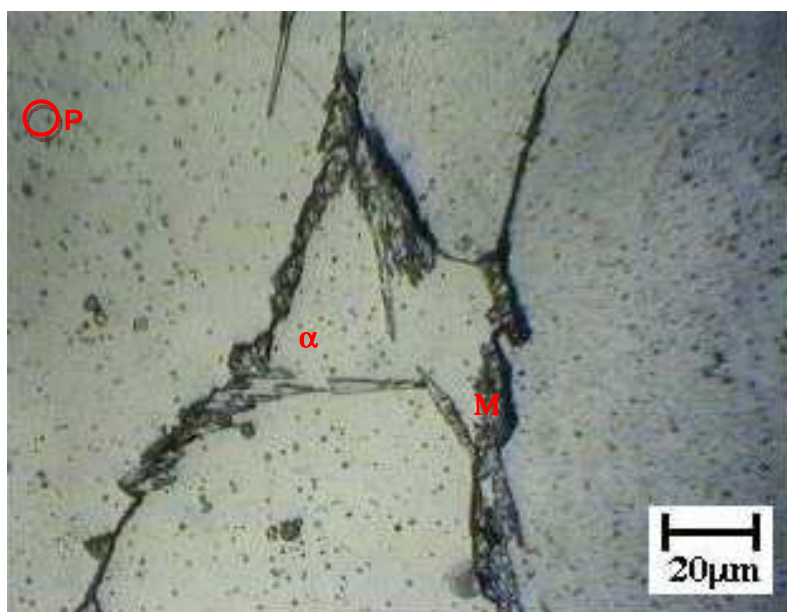


Figura 5.22. Zona fundida da placa de teste de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+25%CO₂ (α) matriz ferrítica, (P) precipitados de titânio e (M) martensita de contorno de grão

Analisando a Figura 5.22, quando se utilizou Ar+25%CO₂ como gás de proteção com o metal de adição ER430Ti, além da matriz ferrítica e dos precipitados há a presença de martensita de contorno de grão. Esta presença ocorreu provavelmente devido a estabilização inadequada do arame ER430Ti, deixando carbono livre no metal soldado, que a altas temperaturas contribui para a precipitação da austenita e ao resfriar transforma-se em martensita.

Novamente, utilizando as composições químicas do material de base (Tabela 3.1, Capítulo III) e do metal de adição (Tabela 3.2, Capítulo III) e os valores de diluição para cada par metal de base-metal de adição apresentados na Tabela 4.13, Capítulo IV, foram estimadas, por meio do diagrama de Schaeffler as microestruturas e composições químicas das zonas fundidas dos cordões de soldados com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS 43932 (Figura 5.23) e AISI 441 (Figura 5.24). As figuras mostram que o metal de adição encontra-se na região com presença de ferrita e martensita e o metal de base encontra-se na região ferrítica. A solda encontra-se na divisa entre a região ferrítica e a região onde há presença de ferrita e martensita, ou seja, adições de carbono poderão influenciar na formação de martensita na região soldada. Considerando o diagrama, a composição da solda, quando realizada no metal de base UNS43932, é composta por 0,070% de carbono, 0,79% de silício, 0,46% de manganês, 17,29% de cromo, 0,33% de níquel e 0,07% de nióbio. Quando se solda no metal de base AISI 441 a composição da zona fundida é formada por 0,072% de carbono, 0,80% de silício, 0,44% de manganês, 17,66% de cromo, 0,32% de níquel e 0,21% de nióbio. Havendo um aumento significativo

apenas do nióbio, quando comparado com a solda realizada no metal de base UNS 43932, provavelmente devido a maior quantidade deste elemento no metal de base AISI 441 (Tabela 3.1, Capítulo 3).

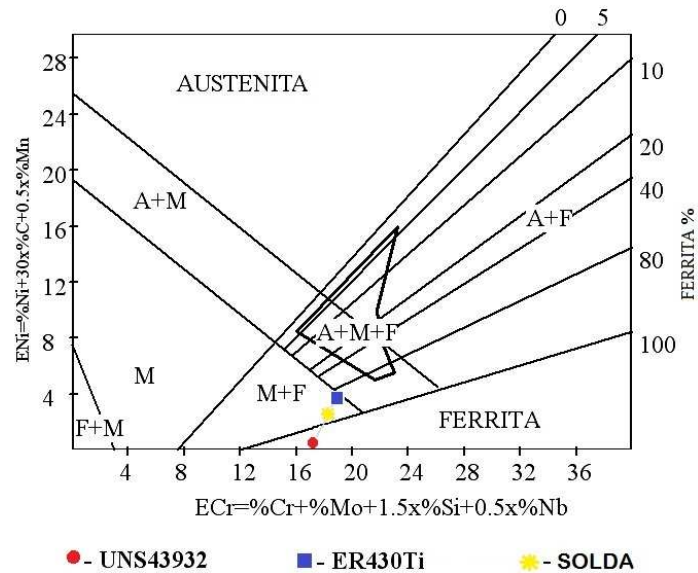


Figura 5.23. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti obtida pelo diagrama de Schaeffler

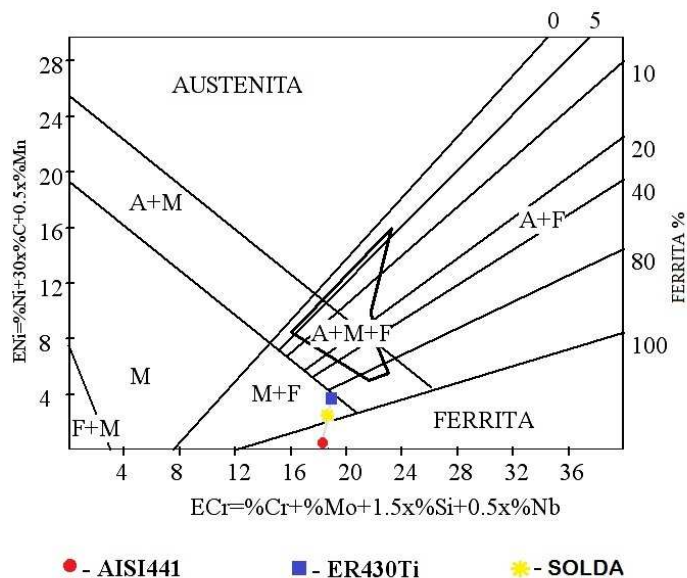


Figura 5.24. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430Ti obtida pelo diagrama de Schaeffler

Conforme já discutido, as estimativas realizadas usando o diagrama de Schaeffler, onde não se leva em consideração o titânio, apresentaram microestruturas compostas por

ferrita e martensita de contorno de grão. Entretanto, este fato não foi observado nas soldagens com gás de proteção até 8% de dióxido carbono, mostrando que o titânio, até esta quantidade de dióxido de carbono no gás de proteção, foi eficiente como elemento estabilizador. Quando se soldou com o gás de proteção com 25% de dióxido de carbono a quantidade de titânio não foi suficiente para estabilizar o carbono presente na zona fundida, obtendo-se então, uma microestrutura similar a que foi estimada pelo diagrama de Schaeffler.

As Figuras 5.25 a 5.29 apresentam a microestrutura com aumento de 630 vezes dos corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER430LNb, respectivamente para os gases de proteção Ar, Ar+2%O₂, Ar+4%CO₂, Ar+8%CO₂ e Ar+25%CO₂. Também serão apresentadas somente as microestruturas dos cordões de solda realizados no metal de base UNS 43932, as microestruturas com o metal de base para o AISI 441 são apresentadas nas Figuras B.11 a B.15, Anexo B. Analisando-se as figuras observa-se uma matriz ferrítica com precipitados, provavelmente de nióbio, em todo o grão. Apesar de não ter sido medido, observa-se ainda um aumento da quantidade destes precipitados, porém, em menor quantidade quando comparado com os cordões de solda realizados com o metal de adição ER430Ti. Este aumento da quantidade de precipitados, provavelmente está relacionado ao aumento de dióxido de carbono que, conforme já mencionado, aumenta a quantidade de carbono introduzido no metal soldado. Não houve presença de martensita com o gás de proteção Ar+25%CO₂, uma vez que o metal de adição utilizado possui uma adequada estabilização ao nióbio.

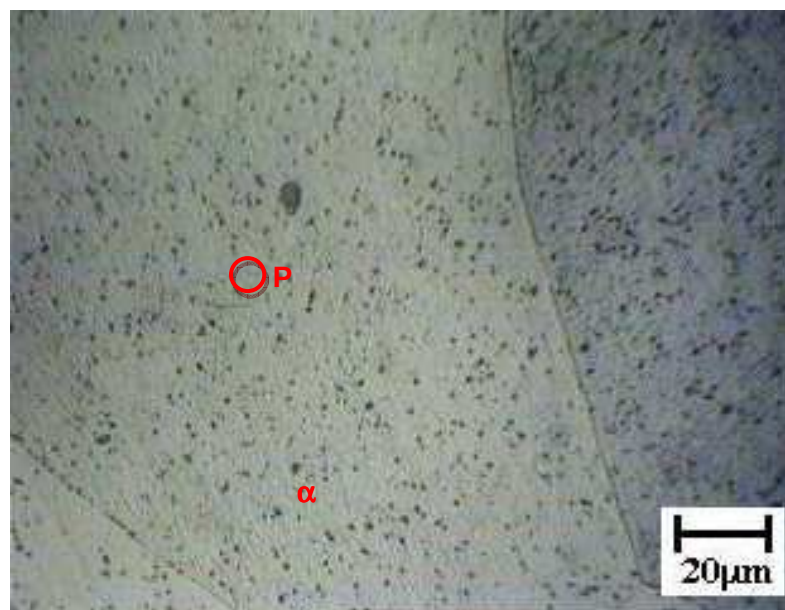


Figura 5.25. Zona fundida da placa de teste de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar (α) matriz ferrítica, (P) precipitados de nióbio



Figura 5.26. Zona fundida da placa de teste de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+2%O₂ (α) matriz ferrítica, (P) precipitados de nióbio

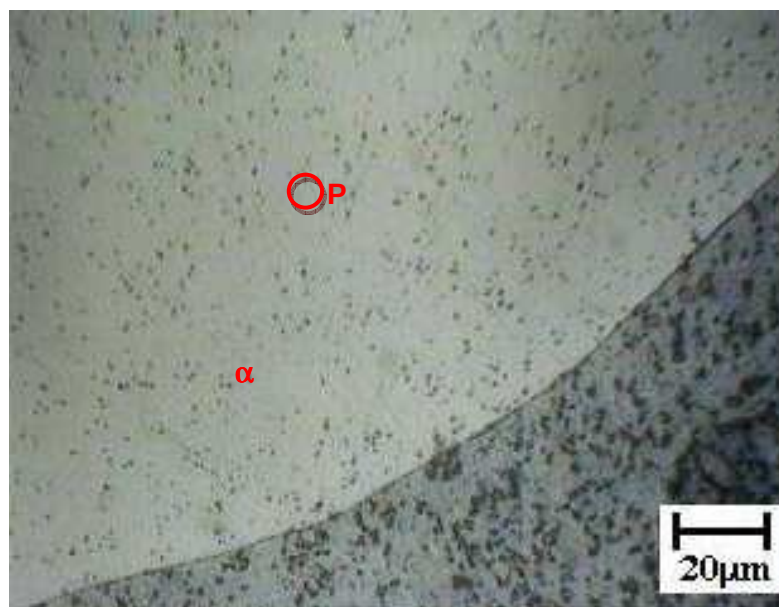


Figura 5.27. Zona fundida da placa de teste de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+4%CO₂ (α) matriz ferrítica, (P) precipitados de nióbio

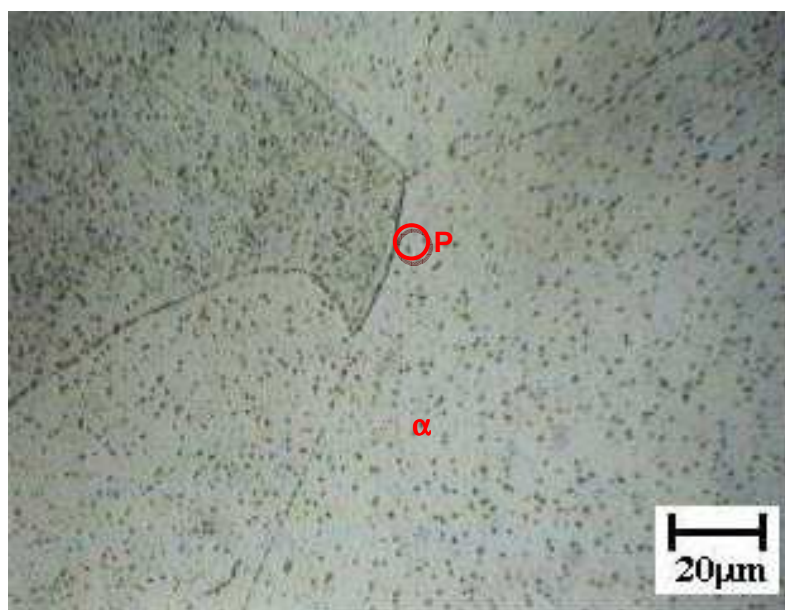


Figura 5.28. Zona fundida da placa de teste de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+8%CO₂ (α) matriz ferrítica, (P) precipitados de nióbio

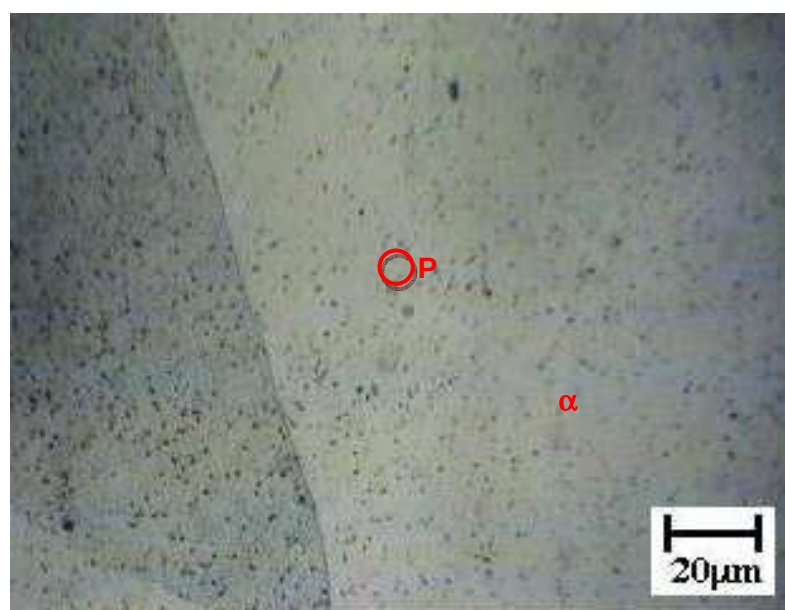


Figura 5.29. Zona fundida da placa de teste de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+25%CO₂ (α) matriz ferrítica, (P) precipitados de nióbio

Realizando-se estimativas por meio do diagrama de Schaeffler para os cordões soldados no metal de base UNS 43932 (Figura 5.30) e AISI 441 (Figura 5.31) esperava-se uma microestrutura composta somente por ferrita, confirmada pelas figuras 5.25 a 5.29. Considerando o diagrama, a composição da solda, quando realizada no metal de base UNS 43932, é composta por 0,023% de carbono, 0,12% de silício, 0,35% de manganês, 17,49% de cromo, 0,38% de níquel e 0,37% de nióbio. Quando realizada no metal de base AISI 441 será composta por 0,023% de carbono, 0,13% de silício, 0,33% de manganês, 17,77% de

cromo, 0,36% de níquel e 0,48% de nióbio. Havendo apenas um aumento de nióbio, quando comparado com a solda realizada no metal de base UNS 43932.

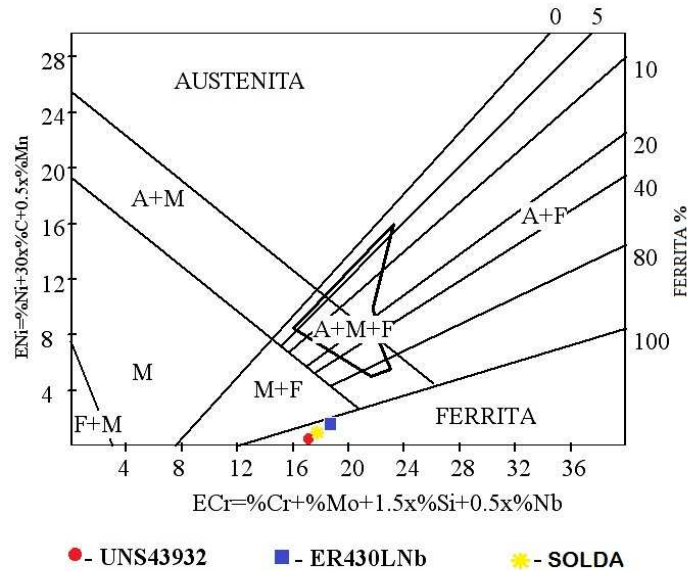


Figura 5.30. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb obtida pelo diagrama de Schaeffler

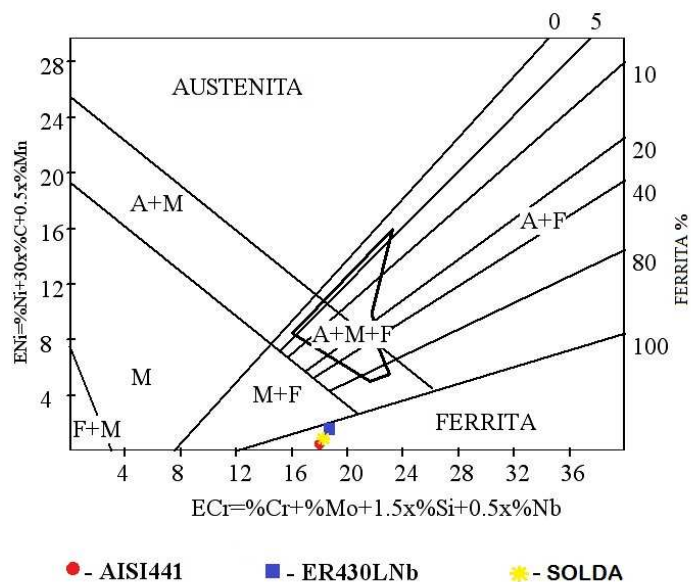


Figura 5.31. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430LNb obtida pelo diagrama de Schaeffler

A Tabela 5.5 apresenta as medições do tamanho de grão realizadas na zona fundida dos corpos de prova soldados com os metais de adição ER430Ti e ER430LNb nos metais

de base UNS43932 e AISI441. Todas as medições de tamanho de grão são apresentadas nas Tabelas B.3 e B.4, Anexo B.

Tabela 5.5. Tamanho de grão medido na zona fundida soldada com os metais de adição ER430Ti e ER430LNb

Metal de Adição	Gás de Proteção	Tamanho de Grão [μm]			
		UNS 43932		AISI 441	
		Média	Desvio	Média	Desvio
ER430Ti	Ar	31,6	6,7	34,1	10,3
	Ar+2%O ₂	75,8	5,9	70,9	8,7
	Ar+4%CO ₂	65,5	3,7	55,6	6,7
	Ar+8%CO ₂	62,7	11,0	71,2	6,5
	Ar+25%CO ₂	57,8	18,2	70,8	26,4
ER430LNb	Ar	61,5	5,9	72,0	13,3
	Ar+2%O ₂	68,4	3,7	68,6	27,3
	Ar+4%CO ₂	78,2	25,9	81,2	15,2
	Ar+8%CO ₂	78,1	14,5	67,3	12,9
	Ar+25%CO ₂	59,7	11,0	59,7	11,0

As Figuras 5.32 e 5.33 apresentam os gráficos do tamanho de grão em função do gás de proteção para os corpos de prova soldados. Observa-se para os dois materiais de base estudados que não houve uma variação significativa do tamanho de grão, com exceção do metal de adição ER430Ti soldado com argônio, que teve um tamanho menor que as demais condições estudadas.

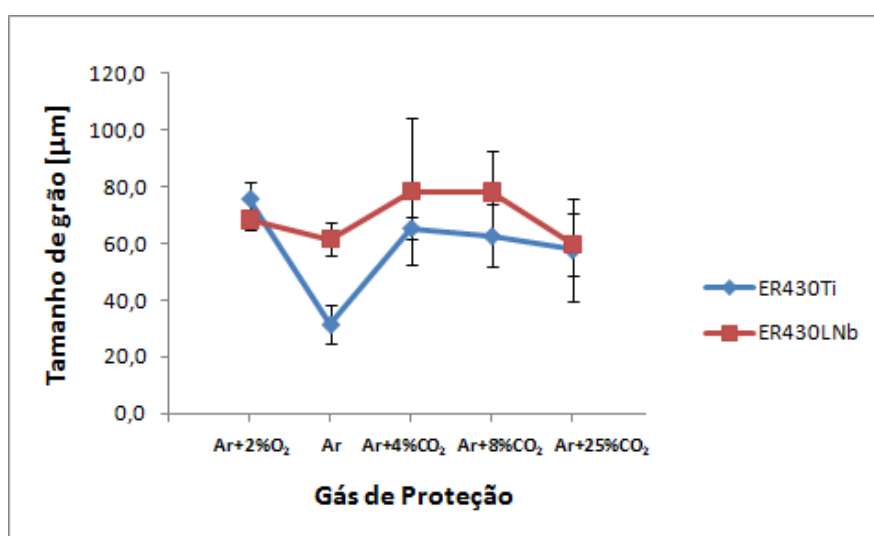


Figura 5.32. Tamanho de grão em função do gás de proteção para os cordões soldados com os metais de adição ER430Ti e ER430LNb no metal de base UNS 43932

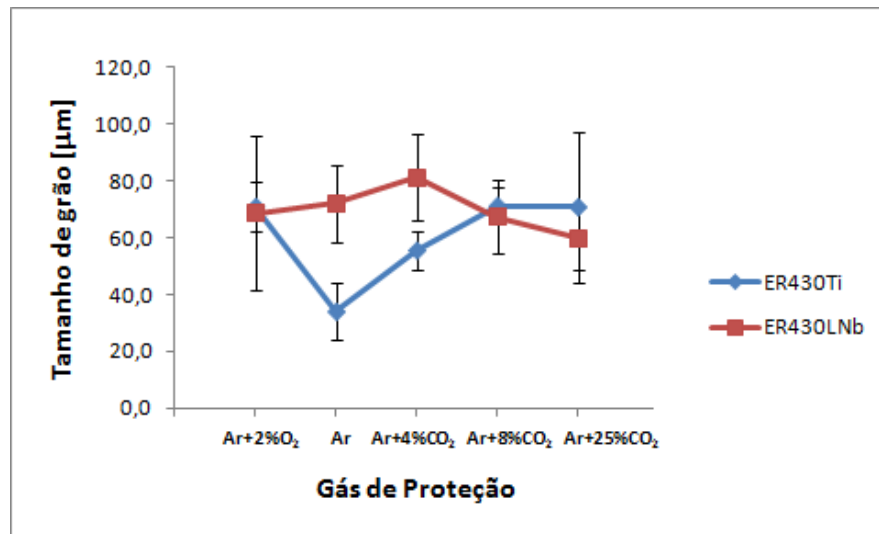


Figura 5.33. Tamanho de grão em função do gás de proteção para os cordões soldados com os metais de adição ER430Ti e ER430LNb no metal de base AISI 441

Madeira (2007), soldando com os metais de adição ER430Ti e ER430LNb e gases de proteção Ar+2%O₂ e Ar+2%N₂+3%CO₂ observou maiores tamanhos de grãos e maiores quantidades de precipitados para este último gás, principalmente para o metal de adição ER430Ti, similarmente ao que foi observado neste trabalho devido ao aumento de elementos intersticiais (carbono e nitrogênio).

A Tabela 5.6 apresenta as medidas de microdureza realizadas na martensita da zona fundida para os metais de base UNS 43932 e AISI 441 soldados com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+25%CO₂.

Tabela 5.6. Medidas de microdureza realizadas na martensita da zona fundida para os metais de base UNS43932 e AISI441

Metal de base	Metal de Adição	Gás de Proteção	Microdureza (HV _{2,5})						
			1	2	3	4	5	Média	Desvio
UNS43932	ER430Ti	Ar+25%CO ₂	245	269	304	304	364	292,3	20,2
AISI 441	ER430Ti	Ar+25%CO ₂	273	288	301	381	390	323,3	50,4

A Tabela 5.7 apresenta as medidas de microdureza realizadas na matriz austenítica (para o metal de adição ER308LSi) e ferrítica (para os metais de adição ER430Ti e ER430LNb) da zona fundida dos metais de base UNS 43932 e AISI 441.

Tabela 5.7. Medidas de Microdureza realizadas nas matrizes austenítica (para o metal de adição ER308LSi) e ferrítica (para os metais de adição ER430Ti e ER430LNb) da zona fundida para os metais de base UNS 43932 e AISI 441

Metal de Adição	Gás de Proteção	Microdureza (HV _{2,5})			
		UNS 43932		AISI 441	
		Média	Desvio	Média	Desvio
ER308LSi	Ar	156,0	8,2	186,0	9,6
	Ar+2%O ₂	192,0	28,2	186,7	17,5
	Ar+4%CO ₂	167,3	15,9	175,0	7,9
	Ar+8%CO ₂	171,7	7,1	217,7	4,7
	Ar+25%CO ₂	181,3	6,7	206,7	7,5
ER430Ti	Ar	180,3	1,5	182,7	2,1
	Ar+2%O ₂	172,0	10,6	200,3	4,0
	Ar+4%CO ₂	187,7	4,7	203,7	5,1
	Ar+8%CO ₂	208,0	4,6	191,3	9,6
	Ar+25%CO ₂	203,0	1,0	206,0	3,5
ER430LNb	Ar	163,0	2,6	178,7	2,3
	Ar+2%O ₂	173,0	1,0	170,7	1,2
	Ar+4%CO ₂	160,3	7,2	203,7	7,0
	Ar+8%CO ₂	182,0	3,6	206,0	14,8
	Ar+25%CO ₂	181,3	2,9	182,0	3,0

As Figuras 5.34, 5.35 e 5.36 apresentam os gráficos dos valores de microdureza medidos nas matrizes austenítica, ou ferrítica e martensita (quando presente) em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados respectivamente com os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb no metal de base UNS 43932.

Analisando as Figuras 5.34 e 5.36 observa-se que os valores de microdureza realizados na matriz ferrítica dos corpos de prova soldados com os metais de adição ER308LSi e ER430LNb ficaram muito próximos dos valores encontrados na matriz ferrítica do metal de base UNS 43932. Observa-se ainda, que não ocorreram variações significativas das medidas de microdureza com a alteração do gás de proteção.

Na Figura 5.35 observa-se que os valores de microdureza realizados na matriz ferrítica dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti e os gases de proteção Ar e Ar+2%O₂ ficaram muito próximos dos valores encontrados na matriz ferrítica do metal de base UNS 43932. Observa-se ainda que com o acréscimo de dióxido de carbono no gás de proteção há um aumento significativo das medidas de microdureza, que ocorreram provavelmente devido ao aumento da quantidade de precipitados de titânio, conforme se observou nas Figuras 5.18 a 5.22. Quando se utilizou o gás de proteção Ar+25%CO₂ observa-se a presença de martensita nos contornos de grão, que é evidenciada por um elevado valor de microdureza.

Cardoso (2003) observou para a soldagem do aço inoxidável uma dureza elevada quando soldado com $\text{Ar}+8\%\text{CO}_2$, próxima de 350HV, valor este que seria suficiente para reduzir a tenacidade do material. Estes valores são similares aos encontrados para a martensita quando se soldou com o metal de adição ER430Ti, esperando-se portanto, uma queda na tenacidade destas soldas.

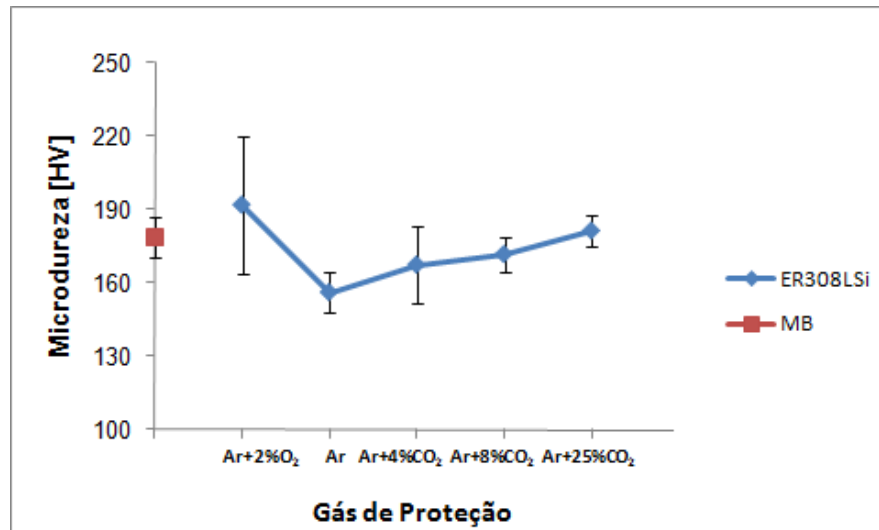


Figura 5.34. Microdurezas medidas na matriz austenítica em função do gás de proteção utilizado para os cordões soldados com o metal de adição ER308LSi no metal de base UNS 43932

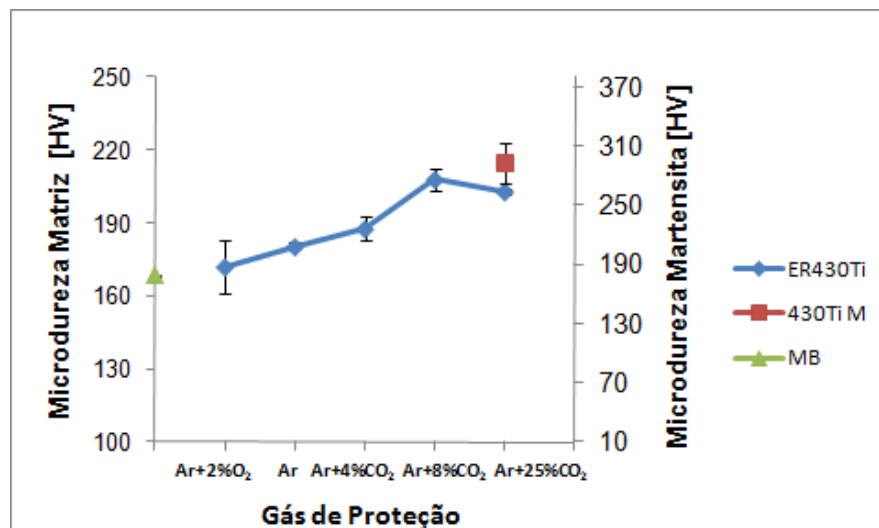


Figura 5.35. Microdurezas medidas na matriz ferrítica e na martensita em função do gás de proteção utilizado para os cordões soldados com o metal de adição ER430Ti no metal de base UNS 43932

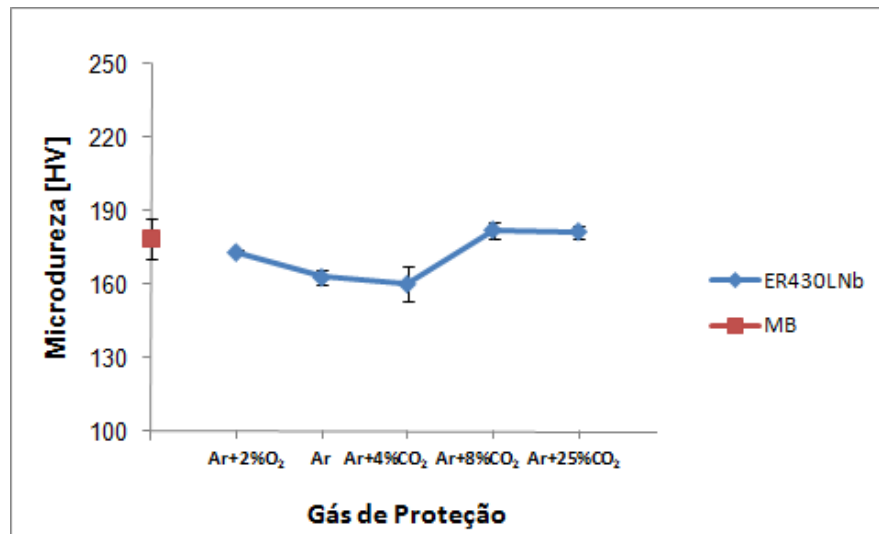


Figura 5.36. Microdurezas medidas na matriz ferrítica em função do gás de proteção utilizado para os cordões soldados com o metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932

As Figuras 5.37, 5.38 e 5.39 apresentam os gráficos dos valores de microdureza medidos na matriz austenítica, ou ferrítica e martensita (quando presente) em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados respectivamente com os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb no metal de base AISI 441.

Observa-se que os valores de microdureza realizados nas matrizes austenítica e ferrítica dos corpos de prova soldados com todos metais de adição estudados e os gases de proteção Ar e Ar+2%O₂ ficaram muito próximos dos valores encontrados na matriz ferrítica do metal de base AISI 441. Observa-se ainda que com o acréscimo de dióxido de carbono no gás de proteção há um aumento significativo das medidas de microdureza, que ocorreram provavelmente devido ao aumento da quantidade dos precipitados. Quando se utilizou o gás de proteção Ar+25%CO₂ com o metal de adição observa-se a presença de martensita, que evidenciada por um elevado valor de microdureza, com valores muito próximos aos encontrados quando se soldou o metal de base UNS 43932 e observados por Cardoso (2003), que pode contribuir para uma queda ductilidade da solda.

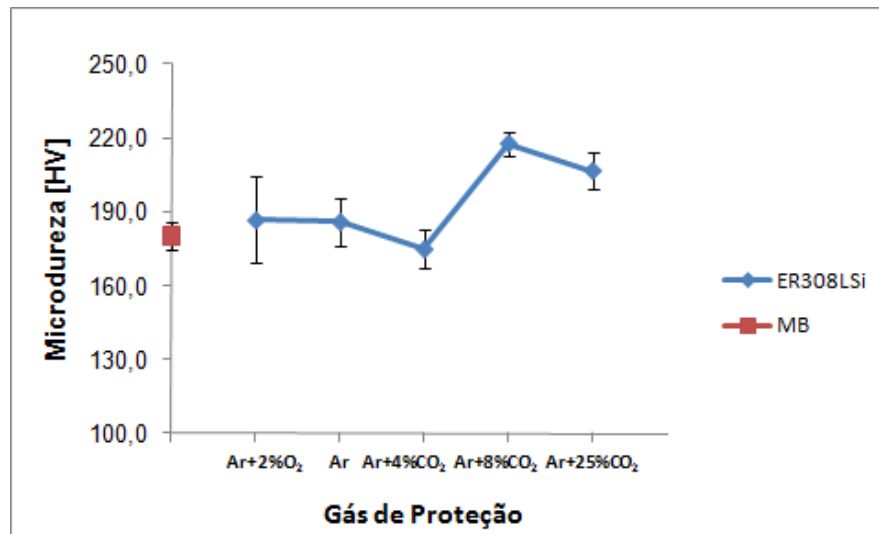


Figura 5.37. Microdurezas medidas na matriz austenítica em função do gás de proteção utilizado para os cordões soldados com o metal de adição ER308LSi no metal de base AISI 441

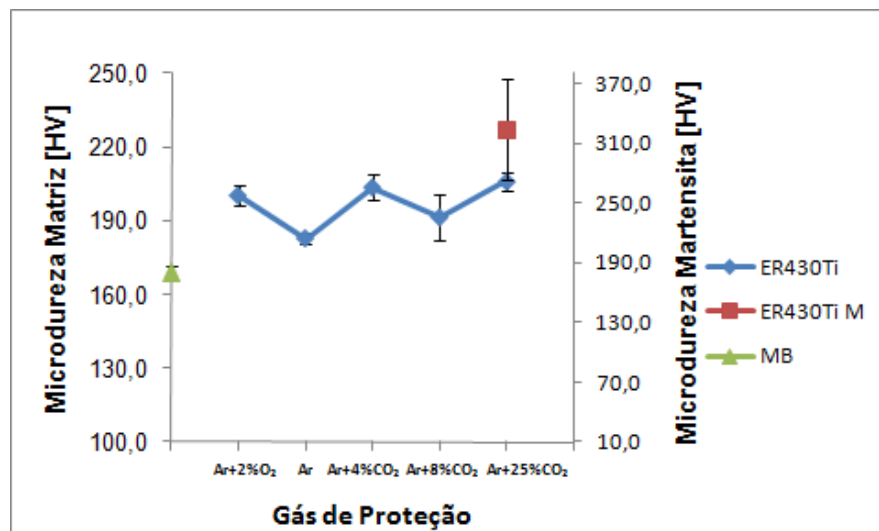


Figura 5.38. Microdurezas medidas na matriz ferrítica e na martensita em função do gás de proteção utilizado para os cordões soldados com o metal de adição ER430Ti no metal de base AISI 441

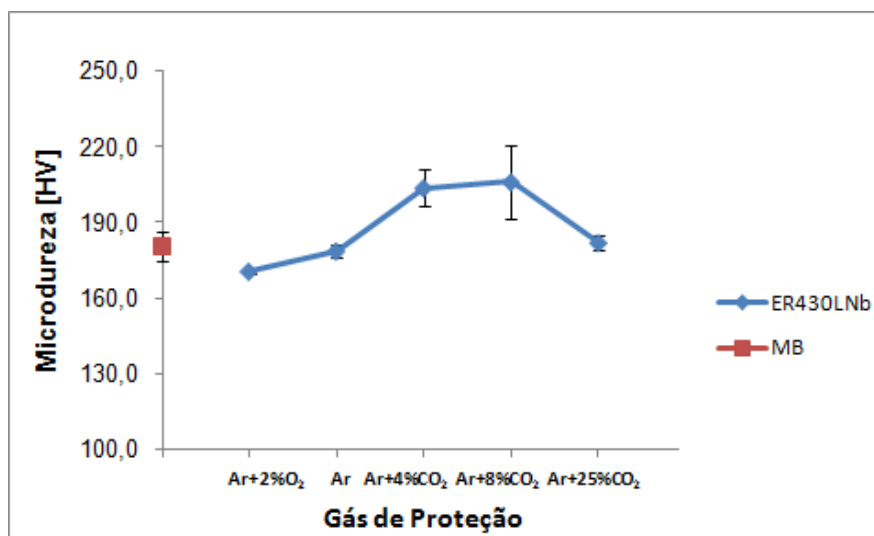


Figura 5.39. Microdurezas medidas na matriz ferrítica em função do gás de proteção utilizado para os cordões soldados com o metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441

5.3. Síntese dos resultados do Capítulo

Buscou-se neste capítulo realizar uma caracterização microestrutural da zona fundida e da zona afetada pelo calor dos materiais estudados nesta tese, com o objetivo de verificar possíveis influências do gás de proteção. Além disso, foi realizada também medidas de tamanho de grãos e de microdureza da região do cordão de solda. Desta análise podem-se fazer as seguintes considerações:

- Independentemente do gás de proteção e metal de adição utilizados não ocorreram variações significativas na zona termicamente afetada (para os dois metais de base estudados) em termos de microestrutura (matriz ferrítica com precipitados nos interiores dos grãos), tamanho de grão (aproximadamente 150 μm) e microdureza (aproximadamente 160 HV).

- A zona fundida do cordão soldado com o metal de adição ER308LSi foi composta por uma matriz austenítica, com veios de ferrita (em torno de 15%) e apresentou uma diminuição da porcentagem de ferrita com o acréscimo de dióxido de carbono no gás de proteção.

- O cordão soldado (ZF) com o ER430LNb foi composto por uma matriz ferrítica e precipitados no interior do grão, não ocorrendo modificações significativas em termos microestruturais independentemente do gás de proteção utilizado, comprovando que a estabilização para este metal de adição é adequada. Verificou-se um aumento de

microdureza com o acréscimo do teor de dióxido de carbono, que pode estar relacionado com um possível aumento da quantidade de precipitados.

- O metal de adição ER430Ti, quando soldado com gás de proteção até 8% de dióxido de carbono, apresentou uma zona fundida composta de uma matriz ferrítica com precipitados no interior do grão, que aumentaram com o aumento da quantidade de dióxido de carbono no gás de proteção. Foi observado também um aumento de microdureza com o acréscimo do teor de dióxido de carbono. Com 25% de dióxido de carbono na mistura a ZF apresentou formação de martensita de contorno de grão, com altos valores de microdureza (aproximadamente 350 HV). Esta formação de martensita mostra que a estabilização da ZF está inadequada, isto é, a quantidade de titânio presente na ZF não é suficiente para estabilizar a alta quantidade de carbono, principalmente pelo aumento deste elemento ao se trabalhar com o gás de proteção com 25% de dióxido de carbono.