

CAPÍTULO VI

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA JUNTA SOLDADA

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de tração, dobramento e embutimento realizados nos corpos de prova dos dois metais de base, soldados com os três metais de adição e os cinco tipos de gás de proteção, totalizando trinta condições de soldagem. Para a realização dos ensaios foram utilizadas as condições de soldagem estabelecidas nas Tabelas 4.2, 4.6 e 4.10.

6.1. Ensaios de Tração

O objetivo do ensaio de tração é verificar se a adição de dióxido de carbono ao gás de proteção gera fragilização na solda. Como já discutido anteriormente, este tipo de ensaio é utilizado em ensaios de qualificação de procedimentos de soldagem.

As Tabelas 6.1 e 6.2 apresentam a indicação do local onde a fratura ocorreu (metal de base ou zona termicamente afetada) para todas as condições de soldagem estudadas, respectivamente para os metais de base UNS43932 e para o AISI 441. A indicação “o” informa que a fratura ocorreu no metal de base e a indicação “x” informa que a fratura ocorreu na zona de ligação, mais especificamente na ZTA. Em nenhum ensaio ocorreu a fratura na zona fundida. Para cada condição foram realizadas três repetições para se aumentar a confiabilidade nos resultados obtidos, que podem ser identificadas pelas letras “A”, “B” e “C” na parte superior da tabela. É importante enfatizar que para os ensaios soldados com o metal de adição de aço inoxidável austenítico ER308LSi analisou-se somente os gases de proteção de argônio, Ar+2%O₂ e Ar+4%CO₂. Para os demais metais de adição todos os gases de proteção utilizados foram estudados.

Como se observa nas Tabelas 6.1 e 6.2 houve apenas alguns casos isolados onde ocorreram falhas na zona ligação, entre a ZF e o metal de base dos corpos de prova

ensaiados. Estas falhas ocorreram devido à falta de fusão na lateral do cordão de solda, conforme se observa na Figura 6.1, geradas por falhas de soldagem, apesar de se ter realizado testes preliminares com o intuito de garantir a qualidade do conjunto soldado. Logo, não se pode correlacionar a fratura na ZTA com a microestrutura obtida na soldagem, mas sim uma falta de fusão próxima à raiz da solda, que ocorreu em função de possíveis desalinhamentos da tocha de soldagem com o centro da junta soldada. Estes ensaios deveriam ter sido repetidos, mas não foram devido a falta de material.

Tabela 6.1. Localização da fratura para os ensaios de tração com os corpos de prova de juntas soldadas no metal de base UNS43932

Meta de Adição	Gás de Proteção	A	B	C
ER308LSi	Ar	0	0	0
	Ar+2%O ₂	x	0	0
	Ar+4%CO ₂	0	x	0
ER430Ti	Ar	0	0	0
	Ar+2%O ₂	0	0	0
	Ar+4%CO ₂	0	0	0
	Ar+8%CO ₂	0	0	0
	Ar+25%CO ₂	0	0	0
ER430LNb	Ar	0	0	0
	Ar+2%O ₂	0	0	0
	Ar+4%CO ₂	0	0	0
	Ar+8%CO ₂	0	0	x
	Ar+25%CO ₂	0	0	0

Onde: 0 representa que a ruptura ocorreu no metal de base e x representa que a ruptura ocorreu na zona de ligação.

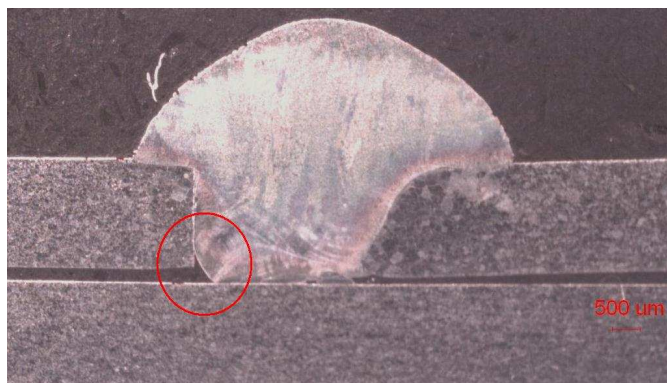


Figura 6.1. Falta de fusão na lateral do cordão soldado no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER308LSi e gás de proteção Ar+2%O₂

Tabela 6.2. Localização da fratura para os ensaios com os corpos de prova soldados no metal de base AISI441

Meta de Adição	Gás de Proteção	A	B	C
ER308LSi	Ar	0	0	0
	Ar+2%O ₂	0	0	0
	Ar+4%CO ₂	0	0	0
ER430Ti	Ar	0	0	0
	Ar+2%O ₂	0	0	0
	Ar+4%CO ₂	0	0	0
	Ar+8%CO ₂	0	0	0
	Ar+25%CO ₂	0	0	0
ER430LNb	Ar	0	0	0
	Ar+2%O ₂	0	0	0
	Ar+4%CO ₂	0	0	x
	Ar+8%CO ₂	x	0	0
	Ar+25%CO ₂	0	0	0

Onde: 0 representa que a ruptura ocorreu no metal de base e x representa que a ruptura ocorreu na zona de ligação

As Figura 6.2 e 6.3 mostram os corpos de prova do ensaio de tração A figura 6.2 mostra o corpo de prova fraturado no metal de base e a Figura 6.3 mostra a fratura na zona de ligação da junta soldada.



Figura 6.2. Ensaio de tração onde o rompimento ocorreu no MB



Figura 6.3. Ensaio de tração onde o rompimento ocorreu na zona de ligação

A Figura 6.4 apresenta os gráficos da tensão em função da deformação do corpo de prova soldado com o metal de adição ER308LSi e com o gás de proteção Ar+2%O₂ nos metais de base UNS43932 e AISI441. Este comportamento é típico do ensaio de tração (tensão em função da deformação) quando o rompimento ocorreu no metal de base. Nos testes que sofreram o rompimento na zona de ligação (Figura 6.5) suportaram uma tensão e deformação muito inferior aos ensaios que não sofreram a fratura na solda. Esta diminuição na resistência a tração foi estudada por Bom; Kalnin (2008) que determinaram que falhas na região soldada possuem uma relação direta com a diminuição da tensão de ruptura de corpos de provas com soldas transversais.

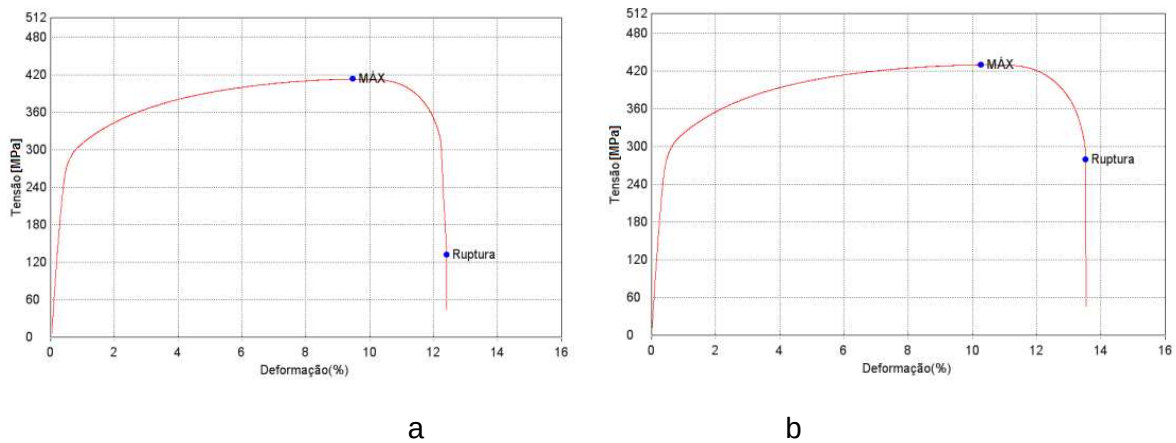


Figura 6.4. Gráfico da tensão em função da deformação para o ensaio de tração do metal de base (a) UNS 43932, (b) AISI441 soldado com o metal de adição ER308LSi e Ar+2%O₂ que teve fratura no metal de base

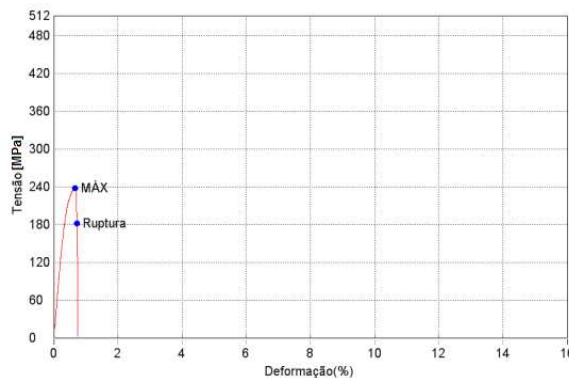


Figura 6.5. Gráfico da tensão em função da deformação para o ensaio de tração do metal de base UNS 43932, soldado com o metal de adição ER308LSi e Ar+2%O₂ que houve fratura na junta soldada (zona de ligação)

A Tabela 6.3 apresenta o limite de resistência alcançado nos ensaios de tração realizados nos metais de base (isto é, antes da soldagem) UNS43932 e AISI441, ficando um pouco abaixo aos fornecidos por catálogo destes materiais, que são de aproximadamente 450 MPa. A Tabela 6.4 apresenta os valores médios e desvio padrão do limite de resistência obtidos nos ensaios com corpos de prova soldados nos metais de base UNS43932 e AISI441. Os valores com todas as medições podem ser observados nas Tabelas C.1 e C.2, Anexo C, onde nota-se que foram retirados dos cálculos das médias e desvios padrões dos valores em que ocorreram rupturas na juntas soldas (zona de ligação), estes valores são os que estão em negrito nas Tabelas. Como esperado, observa-se que os valores de tensão máxima para os corpos de prova soldados tiveram valores próximos aos encontrados para o metal de base.

Tabela 6.3. Limite de Resistência dos metais de base UNS43932 e AISI441

Metal de Base	Limite de Resistência [MPa]				
	A	B	C	Media	Desvio
UNS43932	435	434	424	431	6
AISI441	436	416	420	424	11

Tabela 6.4. Limite de resistência dos corpos de prova soldados nos metais de base UNS 43932 e AISI 441

Metal de Adição	Gás de Proteção	Limite de Resistência [MPa]			
		UNS 43932		AISI 441	
		Média	Desvio	Média	Desvio
ER308LSi	Ar	415	13	409	11
	Ar+2%O ₂	417	10	429	8
	Ar+4%CO ₂	415	1	418	6
ER430Ti	Ar	419	16	414	4
	Ar+2%O ₂	413	13	415	5
	Ar+4%CO ₂	403	9	423	11
	Ar+8%CO ₂	414	6	417	5
	Ar+25%CO ₂	430	8	405	11
ER430LNb	Ar	436	19	401	6
	Ar+2%O ₂	432	4	407	8
	Ar+4%CO ₂	402	15	422	5
	Ar+8%CO ₂	418	6	421	4
	Ar+25%CO ₂	430	20	396	23

As Figuras 6.6 e 6.7 apresentam os gráfico da tensão máxima em função do gás de proteção para os três metais de adição (ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb) soldados respectivamente nos metais de base UNS43932 e AISI441.

Os valores médios das tensões máximas para os corpos de prova soldados tiveram valores muito próximos aos obtidos para os metais de base utilizados. Observa-se que para os ensaios realizados com os corpos de prova soldados, independentemente do metal de adição, gás de proteção e metal de base estudado, não houve uma variação significativa do valor da tensão máxima. Estes dois fatos já eram esperados, uma vez que as rupturas ocorreram no metal de base.

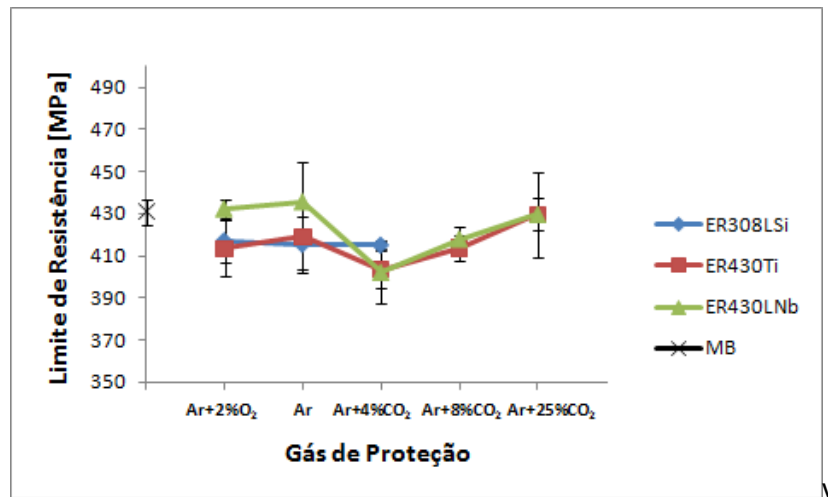


Figura 6.6. Tensão máxima em função do gás de proteção para os três metais de adição estudados soldados no metal de base UNS43932

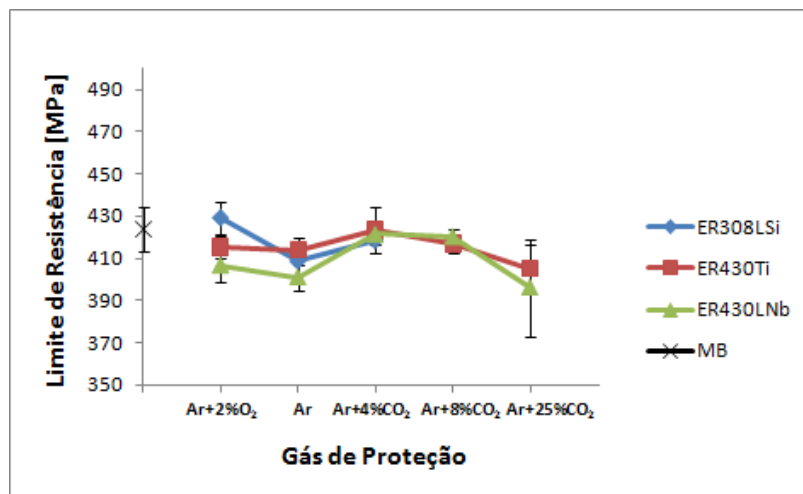


Figura 6.7. Tensão máxima em função do gás de proteção para os três metais de adição estudados soldados no metal de base AISI441

6.2 Ensaios de Dobramento

O critério de aceitação para o ensaio de dobramento é muito similar com o que ocorre no ensaio de tração. Para o ensaio ser considerado aceitável, não pode ocorrer uma trinca ou fissura no cordão de solda. Logo, o objetivo da realização do ensaio de dobramento é verificar se a adição de dióxido de carbono ao gás de proteção gera fragilização do cordão de solda a ponto de gerar uma fissuração neste local. Com o intuito de se realizar um estudo preliminar da ductilidade da junta soldada foram analisadas energia e força máxima para realização do dobramento, para obter dados quantitativos da influência do gás de proteção na região do dobramento (zona fundida, zona termicamente afetada e metal de base).

A Figura 6.8 apresenta as situações que ocorreram durante os ensaios de dobramento, sendo “I” uma situação onde não houve o rompimento no cordão de solda, “II” ocorreu uma fissuração no cordão de solda devido a um defeito de soldagem (falta de fusão) e “III” situação onde ocorreu uma fissuração na região do cordão de solda (ZTA ou ZF) devido a uma possível fragilização dessa região. As condições em que ocorreram fissurações devido a defeitos de soldagem deveriam ter sido repetidas, mas, devido a restrições de material, foram retiradas das análises.

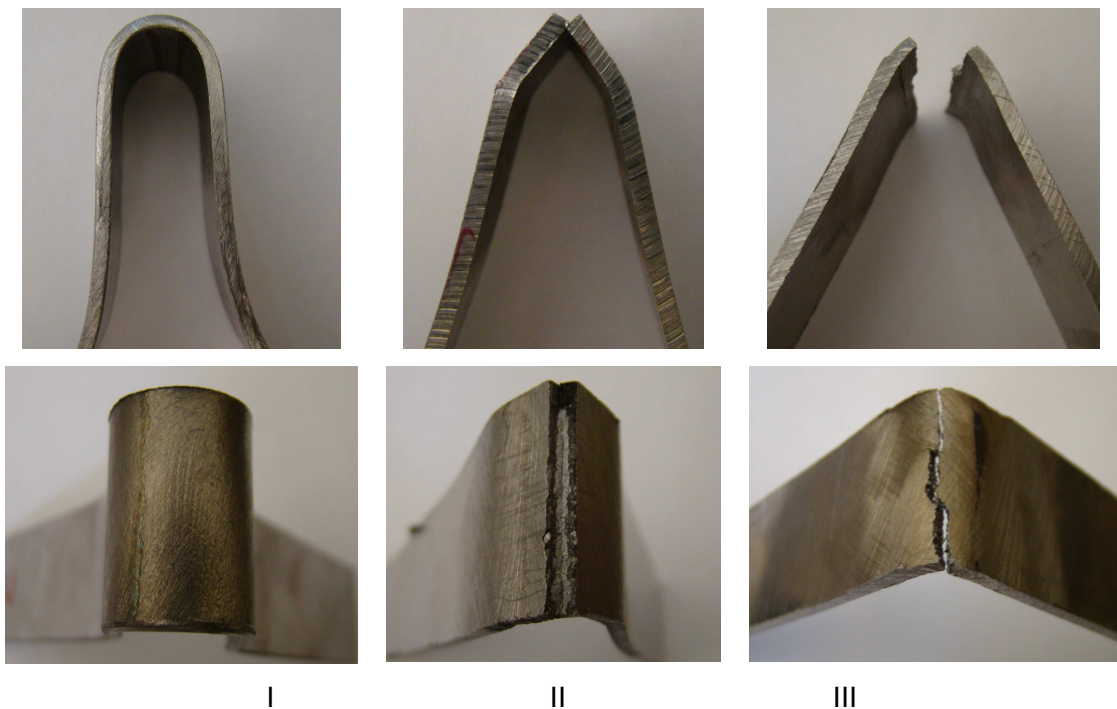


Figura 6.8. Corpo de prova onde (I) não ocorreu trinca ou rompimento no cordão de solda; (II) ocorreu rompimento devido à falha de soldagem (falta de fusão) no cordão de solda; (III) ocorreu rompimento devido à fragilidade do cordão de solda

A Figura 6.9 apresenta o comportamento típico da força em função do deslocamento do cutelo durante o ensaio de dobramento, referindo-se ao dobramento do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb e gás de proteção Ar+25%CO₂ no metal de base AISI 441. Observa-se que a fase inicial do processo de dobramento é composta por um crescimento da força até que a mesma alcança um valor máximo para o dobramento do corpo de prova soldado. Conforme representado na Figura 3.17 após o dobramento total da região soldada há uma redução da força seguida novamente por um crescimento que ocorre devido ao contato do corpo de prova na base do cutelo, o que acarreta no aumento da resistência exercida ao dobramento.

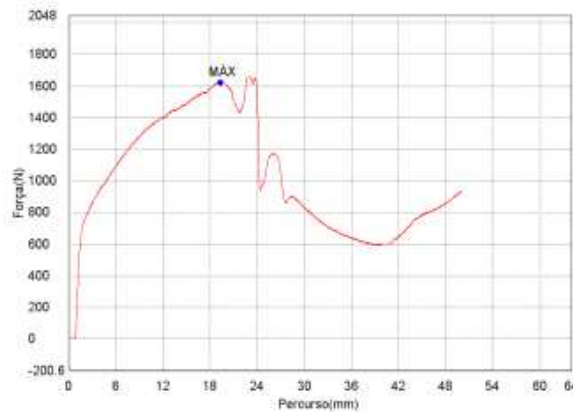


Figura 6.9. Gráfico da força em função do deslocamento do cutelo do ensaio de dobramento do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb e gás de proteção Ar+25%CO₂ no metal de base AISI 441

As Tabelas 6.5 e 6.6 apresentam os ensaios de dobramento realizados respectivamente para os corpos de prova com soldados nos metais de base UNS 43932 e AISI 441. Os corpos de prova foram ensaiados tanto na face, quanto na raiz da solda, sendo que foram realizadas três repetições para cada condição, que podem ser identificadas pelas letras “A”, “B” e “C” na parte superior das Tabelas. Os algarismos “I”, “II” e “III” apresentados nas Tabelas 6.5 e 6.6 representam as situações descritas na Figura 6.8.

Analisando os resultados apresentados nas Tabelas 6.5 e 6.6 nota-se uma maior incidência de fraturas na região da solda quando o ensaio de dobramento foi realizado na raiz da solda. Conforme discutido com o auxílio da Figura 6.3 e mencionado anteriormente, apesar dos cuidados tomados durante a determinação das condições de soldagem, em algumas situações ocorreram faltas de fusão lateral, localizadas próximas à raiz da solda. Este fato explica a ocorrência das fraturas na raiz da solda, uma vez que nesta situação há uma geração de forças de tração na mesma região da falta de fusão, atuando como um

concentrador de tensões que auxiliam na fratura do corpo de prova na região soldada. Quando o ensaio foi realizado na face não houve influência da falta de fusão lateral uma vez que são geradas forças de compressão na região da raiz da solda.

Tabela 6.5. Ensaio de dobramento realizados nos corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932

MB	Arame	Gás de Proteção	Lado	A	B	C
UNS43932	ER308LSi	Ar	Raiz	II	II	II
			Face	I	I	II
		Ar+2%O ₂	Raiz	II	II	II
			Face	I	I	I
		Ar+4%CO ₂	Raiz	II	II	II
			Face	I	I	I
		Ar+8%CO ₂	Raiz	II	II	II
			Face	I	I	I
		Ar+25%CO ₂	Raiz	II	II	II
			Face	I	I	I
UNS43932	ER430Ti	Ar	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+2%O ₂	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+4%CO ₂	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+8%CO ₂	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+25%CO ₂	Raiz	III	I	I
			Face	I	III	III
UNS43932	ER430LNb	Ar	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+2%O ₂	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+4%CO ₂	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+8%CO ₂	Raiz	II	II	II
			Face	I	I	I
		Ar+25%CO ₂	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I

Onde: “I” não houve o rompimento no cordão de solda, “II” fissuração no cordão de solda devido a uma falta de fusão na solda e “III” fissuração devido a uma fragilização da solda.

Observa-se ainda nas Tabelas 6.5 e 6.6 que ao realizar o ensaio de dobramento com o corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti e gás de proteção Ar+25%CO₂ ocorreram fraturas na região soldada (zona fundida) tanto na face, quanto na raiz da solda. Esta situação pode ser observada na Figura 6.8 “III”. Este fato está relacionado, provavelmente, a presença da martensita de contorno de grão, conforme observado na Figura 5.20, gerando altos valores de dureza e diminuindo a tenacidade, contribuindo para a fragilização do material e auxiliou no rompimento da junta soldada.

Tabela 6.6. Ensaio de dobramento realizados nos corpos de prova soldados no metal de base AISI441

MB	Arame	Gás de Proteção	Lado	A	B	C
AISI441	ER308LSi	Ar	Raiz	II	II	I
			Face	I	I	I
		Ar+2%O ₂	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+4%CO ₂	Raiz	I	I	II
			Face	I	I	I
		Ar+8%CO ₂	Raiz	II	II	II
			Face	I	I	I
		Ar+25%CO ₂	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
AISI441	ER430Ti	Ar	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+2%O ₂	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	II
		Ar+4%CO ₂	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+8%CO ₂	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	II
		Ar+25%CO ₂	Raiz	III	III	III
			Face	I	III	I
AISI441	ER430LNb	Ar	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+2%O ₂	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+4%CO ₂	Raiz	II	II	II
			Face	II	II	II
		Ar+8%CO ₂	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+25%CO ₂	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I

Para viabilizar uma análise comparativa com os ensaios de dobramento nas juntas soldadas realizaram-se medições, conforme se pode observar na Tabela 6.7, da força máxima e da energia necessária para o dobramento para os dois metais de base estudados (UNS 43932 e o AISI 441).

Tabela 6.7. Força máxima e energia necessárias para o dobramento dos metais de base UNS 43932 e AISI 441

Metal de Base	Força Máxima [kN]					Energia [J]				
	A	B	C	Média	Desvio	A	B	C	Média	Desvio
UNS 43932	1,77	1,71	1,74	1,74	0,03	23,26	21,54	22,95	22,58	0,92
AISI 441	1,71	1,69	1,72	1,71	0,01	22,47	22,53	22,52	22,51	0,03

Uma análise da força máxima e da energia para o dobramento será realizada a seguir, sendo dividida em três etapas, tomando como base o metal de adição utilizado (ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb). Os ensaios em que a fratura ocorreu devido a falta de fusão lateral do cordão de solda (situação II) foram retiradas da análise, uma vez que não representam a condição ideal e ocorreram somente devido a falha no processo de confecção do corpo de prova.

6.2.1. ER308LSi

A Tabela 6.8 apresenta os valores médios e o desvio padrão da força máxima e da energia consumida para a realização do ensaio de dobramento para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi no metal de base UNS 43932. Os valores completos podem ser observados nas Tabelas C.3 e C.4, Anexo C.

As Figuras 6.10 e 6.11 apresentam respectivamente os gráficos da força máxima e a energia consumida obtida do ensaio de dobramento para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi no metal de base UNS 43932 em função do gás de proteção utilizado. Observa-se que não houve uma variação significativa tanto na força, quanto na energia com o acréscimo do dióxido de carbono no gás de proteção. Este fato já era esperado, uma vez que, como se pode observar no Capítulo V, não ocorreram variações significativas na microestrutura, tamanho de grão (na ZTA) e na microdureza, tanto da zona fundida, quanto da zona termicamente afetada com a variação do gás de proteção para o metal de adição ER308LSi. Este fato justifica também o valor da força máxima e da energia obtida do ensaio no metal de base ficaram muito próximas dos encontrados nas juntas soldadas.

Tabela 6.8. Força máxima e energia obtidas no ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER308LSi no metal de base UNS 43932

Metal de Adição	Gás de Proteção	Lado	F _{MAX} [kN]		Energia [J]	
			Media	Desvio	Media	Desvio
ER308LSi	Ar	Face	1,79	0,16	24,72	3,61
	Ar+2%O ₂	Face	1,60	0,03	24,38	1,07
	Ar+4%CO ₂	Face	1,77	0,10	22,22	2,64
	Ar+8%CO ₂	Face	1,76	0,08	24,92	1,91
	Ar+25%CO ₂	Face	1,73	0,07	26,32	1,18

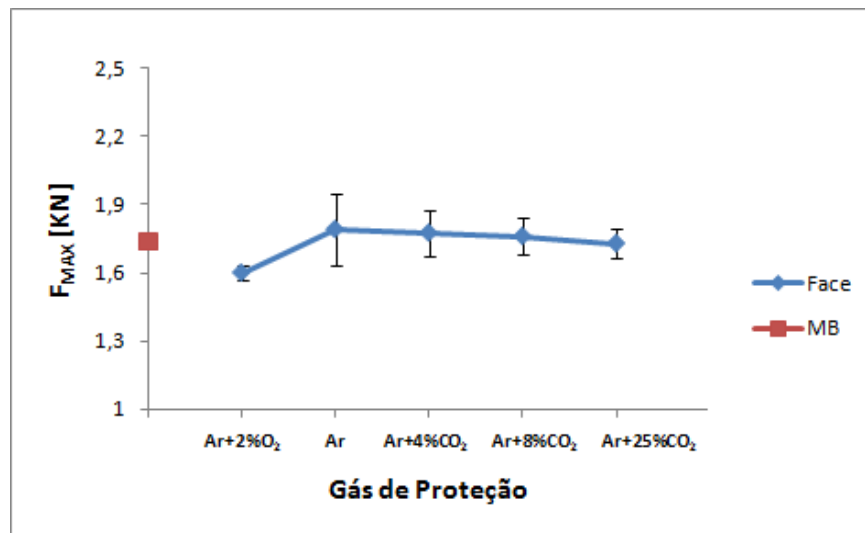


Figura 6.10. Força máxima para realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER308LSi no metal de base UNS43932

A Tabela 6.9 apresenta os valores médios e o desvio padrão da força máxima e da energia consumida no ensaio de dobramento para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi no metal de base AISI 441. Os valores completos podem ser observados nas Tabelas C.5 e C.6, Anexo C.

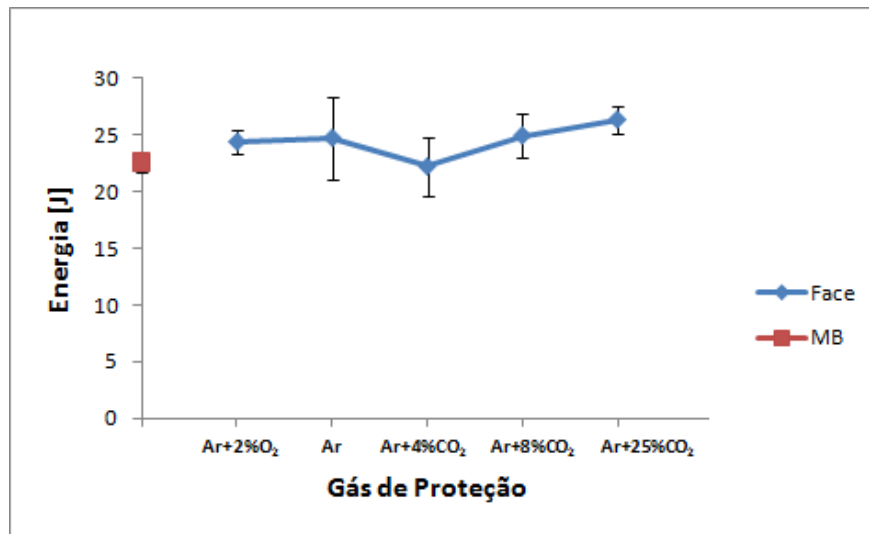


Figura 6.11. Energia total para a realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER308LSi no metal de base UNS43932

Tabela 6.9. Força máxima e energia obtidas no ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER308LSi e metal de base AISI 441

Metal de Adição	Gás de Proteção	Lado	F _{MAX} [KN]		Energia [J]	
			Media	Desvio	Media	Desvio
ER308LSi	Ar	Raiz	1,49	0	19,3	0
		Face	1,47	0,03	19,13	0,48
	Ar+2%O ₂	Raiz	1,84	0,09	23,57	3,4
		Face	1,88	0,02	23,27	2,49
	Ar+4%CO ₂	Raiz	1,7	0,31	22,51	1,32
		Face	1,74	0,08	20,03	3,98
	Ar+8%CO ₂	Raiz	-	-	-	-
		Face	1,64	0,04	20,85	3,02
	Ar+25%CO ₂	Raiz	1,43	0,04	20,07	0,69
		Face	1,44	0,12	20,54	1,44

As Figuras 6.12 e 6.13 apresentam respectivamente os gráficos da força máxima e a energia consumida para a realização do ensaio de dobramento para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi no metal de base AISI 441 em função do gás de proteção utilizado.

Observa-se que, assim como ocorreu com o metal de base UNS 43932, não houve (de forma geral) uma variação significativa tanto na força, quanto na energia com o acréscimo do dióxido de carbono no gás de proteção, uma vez que levando em consideração o desvio padrão pode-se afirmar que todos os resultados ficaram dentro de uma mesma faixa, bem próximos dos valores encontrados para o metal de base.

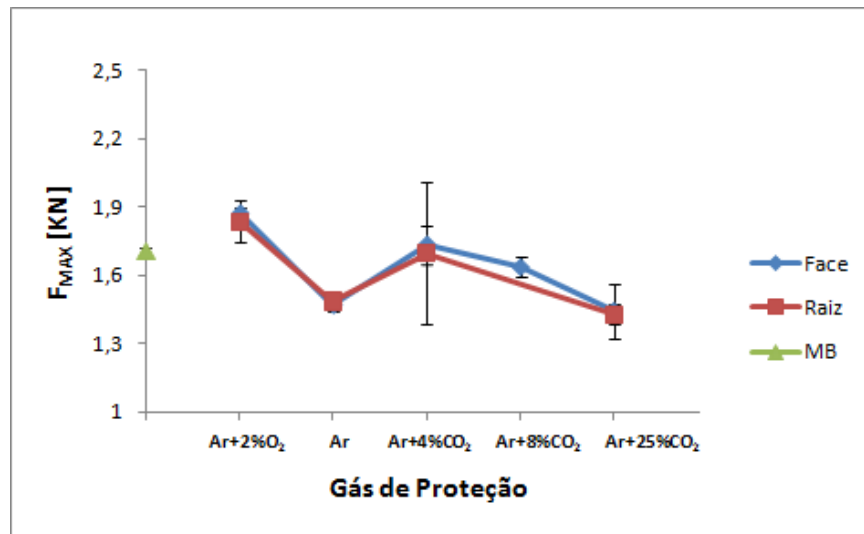


Figura 6.12. Força para realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER308LSi no metal de base AISI441

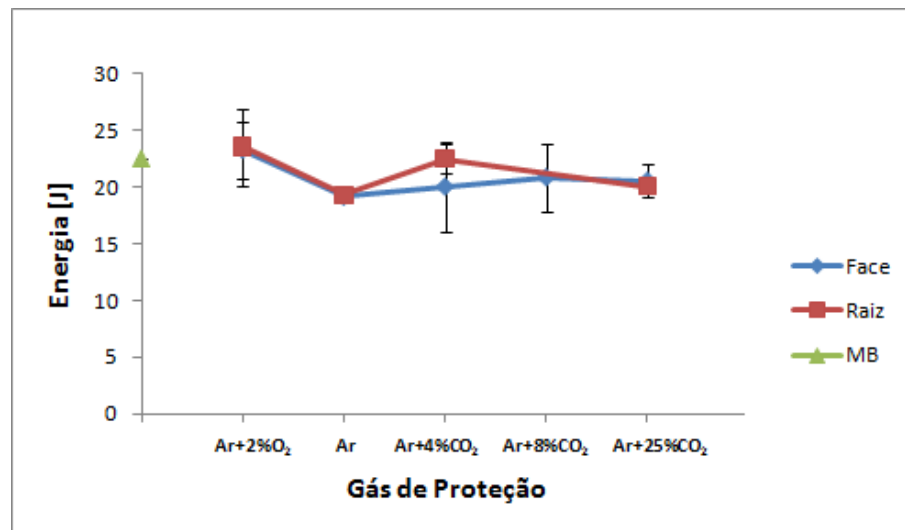


Figura 6.13. Energia total para a realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER308LSi no metal de base AISI441

6.2.2. ER430Ti

A Tabela 6.10 apresenta os valores médios e o desvio padrão da força máxima e da energia consumida para a realização do ensaio de dobramento para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti no metal de base UNS 43932. Os valores completos podem ser observados nas Tabelas C.7 e C.8, Anexo C.

Tabela 6.10. Força máxima e energia obtidas no ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER430Ti no metal de base UNS 43932

Metal de Adição	Gás de Proteção	Lado	F _{MAX} [kN]		Energia [J]	
			Media	Desvio	Media	Desvio
ER430Ti	Ar	Raiz	1,91	0,12	26,90	1,12
		Face	1,78	0,08	25,63	1,66
	Ar+2%O ₂	Raiz	1,76	0,03	23,75	0,47
		Face	1,80	0,04	23,22	1,61
	Ar+4%CO ₂	Raiz	1,72	0,11	23,49	0,83
		Face	1,60	0,04	22,10	1,08
	Ar+8%CO ₂	Raiz	1,90	0,21	25,94	2,36
		Face	2,06	0,11	28,24	0,86
	Ar+25%CO ₂	Raiz	1,52	0,08	20,91	4,43
		Face	1,39	0,39	12,27	9,80

As Figuras 6.14 e 6.15 apresentam respectivamente os gráficos da força máxima e a energia consumida para a realização do ensaio de dobramento para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti no metal de base UNS 43932 em função do gás de proteção utilizado.

Não houve variação significativa da energia para a realização do ensaio de dobramento quando se utilizou gás de proteção com até 8% de dióxido de carbono em mistura com argônio, além de estes valores terem ficado muito próximos dos valores obtidos para o metal de base. Observa-se uma queda do valor da energia quando se utilizou o gás de proteção com 25% de dióxido de carbono. Este fato provavelmente ocorreu devido a fragilização do material, presença de martensita, conforme pode-se observar na Figuras 5.20.

A Figura 6.16 apresenta os gráficos da força em função do percurso realizado pelo punção de dobramento para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti, sendo que na letra “a” utilizou-se o gás de proteção Ar+8%CO₂ e a letra “b” o gás de proteção Ar+25%CO₂. Analisando estas figuras é possível comprovar o menor valor da força máxima quando se utilizou o gás de proteção com 25% de dióxido de carbono, observando ainda que, este valor máximo ocorre também com um percurso inferior, devido a ruptura do corpo de prova.

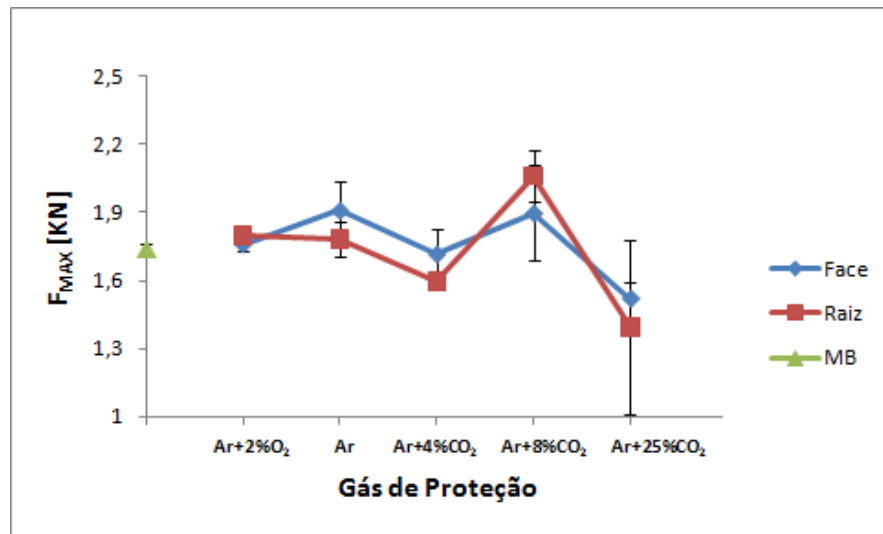


Figura 6.14. Força para realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER430Ti no metal de base UNS43932

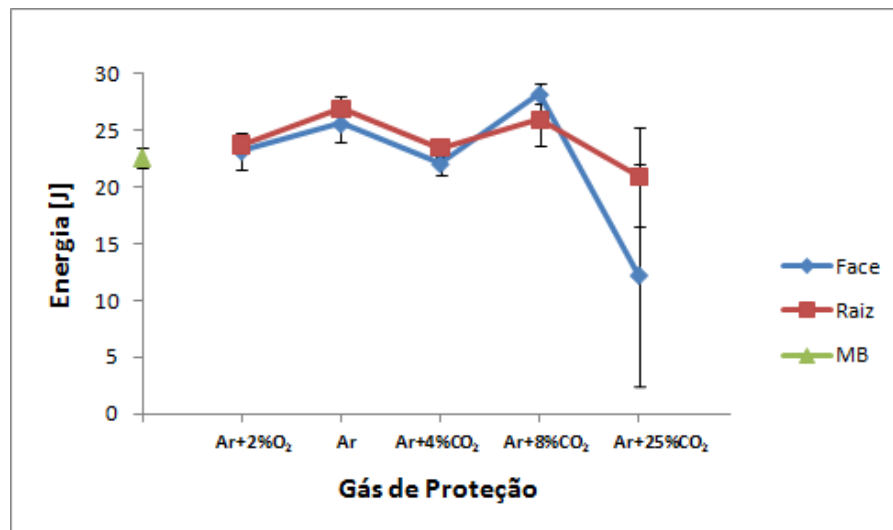


Figura 6.15. Energia total para a realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER430Ti no metal de base UNS43932

A Figura 6.17 apresenta a microestrutura do corpo de prova solado com Ar+25%CO₂ após a realização o ensaio de dobramento, enfatizando a região onde ocorreu a fratura. Observa-se que a fratura ocorreu na zona fundida, mostrando que provavelmente ela ocorreu devido à presença de martensita na zona fundida e justificando a queda da energia para a realização do ensaio de dobramento.

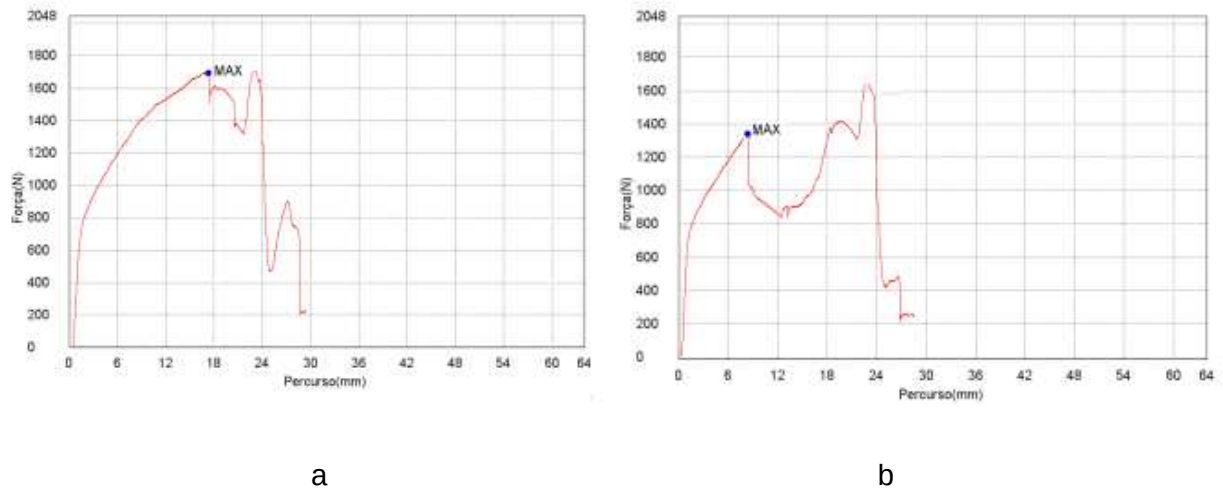


Figura 6.16. Gráfico da força máxima em função do percurso realizado pelo punção no ensaio de dobramento para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti (a) com o gás de proteção Ar+8%CO₂ e (b) com o gás de proteção Ar+25%CO₂

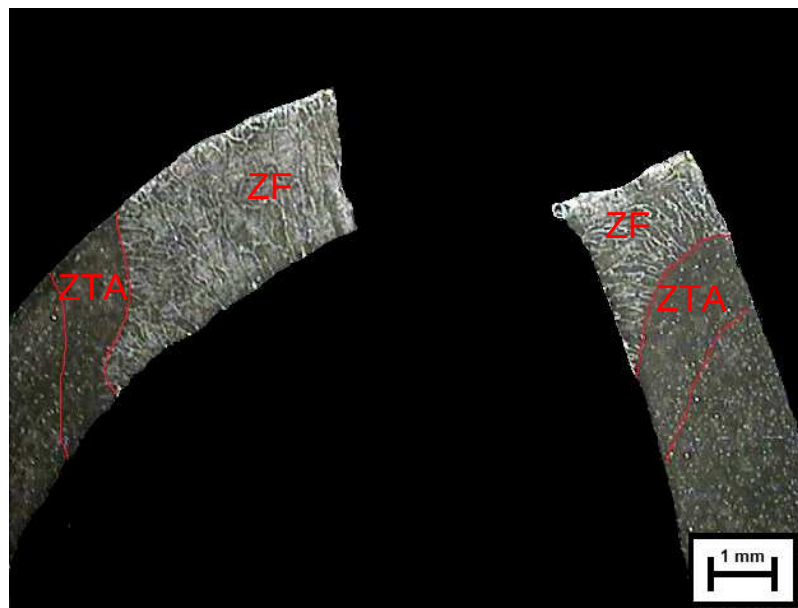


Figura 6.17. Macrografia do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti e gás de proteção Ar+25%CO₂ após a realização o ensaio de dobramento na raiz do cordão de solda, enfatizando a região onde ocorreu a fratura com aumento de 10 vezes

A Tabela 6.11 apresentam respectivamente a força máxima e a energia consumida para a realização do ensaio de dobramento para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti no metal de base AISI 441. Os valores completos podem ser observados nas Tabelas C.9 e C.10, Anexo C.

Tabela 6.11. Força máxima e energia obtida no ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER430Ti no metal de base AISI 441

Metal de Adição	Gás de Proteção	Lado	F _{MAX} [kN]		Energia [J]	
			Media	Desvio	Media	Desvio
ER430Ti	Ar	Raiz	1,55	0,10	22,3	1,74
		Face	1,63	0,08	21,97	2,70
	Ar+2%O ₂	Raiz	1,65	0,03	22,97	1,31
		Face	1,65	0,02	22,39	0,64
	Ar+4%CO ₂	Raiz	1,67	0,04	20,93	2,14
		Face	1,62	0,07	21,01	0,87
	Ar+8%CO ₂	Raiz	1,68	0,04	23,36	0,56
		Face	1,66	0,05	22,02	1,81
	Ar+25%CO ₂	Raiz	1,29	0,09	10,03	1,71
		Face	1,48	0,05	16,22	6,39

As Figuras 6.18 e 6.19 apresentam respectivamente os gráficos da força máxima e a energia consumida para a realização do ensaio de dobramento para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti no metal de base AISI 441 em função do gás de proteção utilizado.

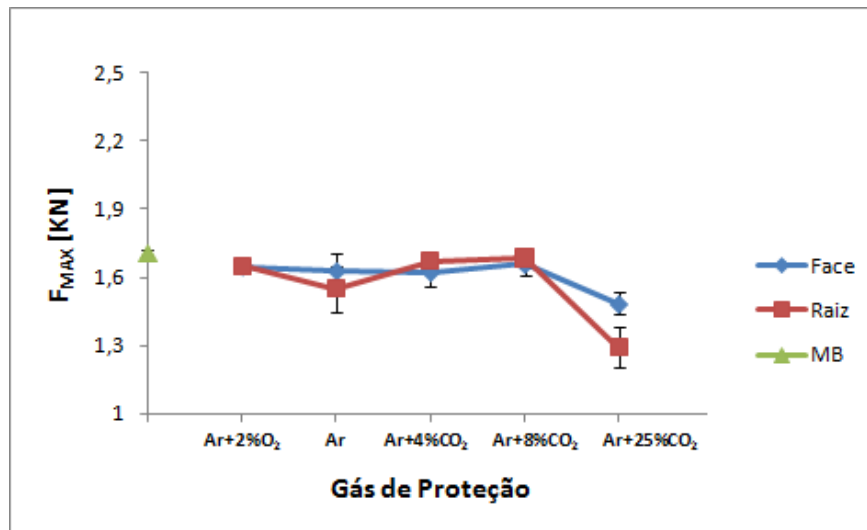


Figura 6.18. Força para realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER430Ti no metal de base AISI 441

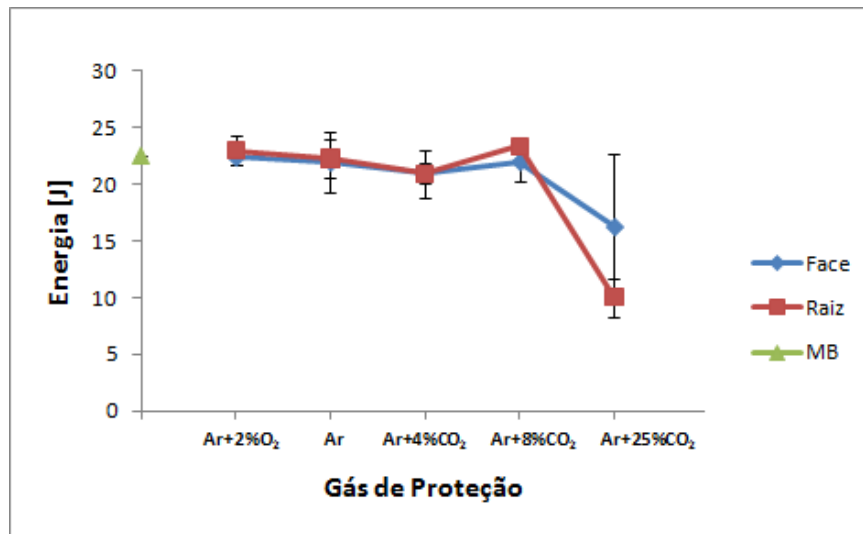


Figura 6.19. Energia total para a realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER430Ti no metal de base AISI 441

Similar ao que ocorreu com o metal de base UNS 43932 o valor da força máxima e da energia sofreu uma queda somente quando se utilizou o gás de proteção 25 % de dióxido de carbono, também devido à presença de martensita. Da mesma forma, os valores encontrados até 8 % de dióxido de carbono são similares aos encontrados para o metal de base. Desta forma, pode-se concluir que utilizando o metal de adição ER430Ti com o gás de proteção Ar+25%CO₂ para ambos metais de base ocorre uma perda de ductilidade devido a presença de martensita, conforme observado na Figura 5.22 do Capítulo V.

6.2.3. ER430LNb

A Tabela 6.12 apresenta os valores médios e o desvio padrão da força máxima e a energia consumida para a realização do ensaio de dobramento para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932. Os valores completos podem ser observados nas Tabelas C.11 e C.12, Anexo C.

As Figuras 6.20 e 6.21 apresentam respectivamente os gráficos da força máxima e a energia consumida para a realização do ensaio de dobramento para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932 em função do gás de proteção utilizado.

Não houve variação significativa da tanto da força máxima, quanto da energia para a realização do ensaio de dobramento independentemente do gás de proteção utilizado, com valores similares aos encontrados para o metal de base. Já era esperado que não houvesse variação desta energia com a variação do gás de proteção, uma vez que não houve variação da microestrutura e microdureza da solda, conforme se observa no Capítulo V.

Tabela 6.12. Força máxima e energia obtida no ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932

Metal de Adição	Gás de Proteção	Lado	F _{MAX} [kN]		Energia [J]	
			Media	Desvio	Media	Desvio
ER430LNb	Ar	Raiz	1,84	0,11	19,92	3,18
		Face	1,91	0,24	23,86	0,19
	Ar+2%O ₂	Raiz	1,59	0,05	21,11	0,34
		Face	1,64	0,03	21,33	0,07
	Ar+4%CO ₂	Raiz	1,71	0,09	20,81	4,24
		Face	1,69	0,02	20,49	1,12
	Ar+8%CO ₂	Raiz	-	-	-	-
		Face	1,61	0,02	21,31	1,53
	Ar+25%CO ₂	Raiz	1,67	0,08	22,10	1,50
		Face	1,68	0,02	24,87	1,69

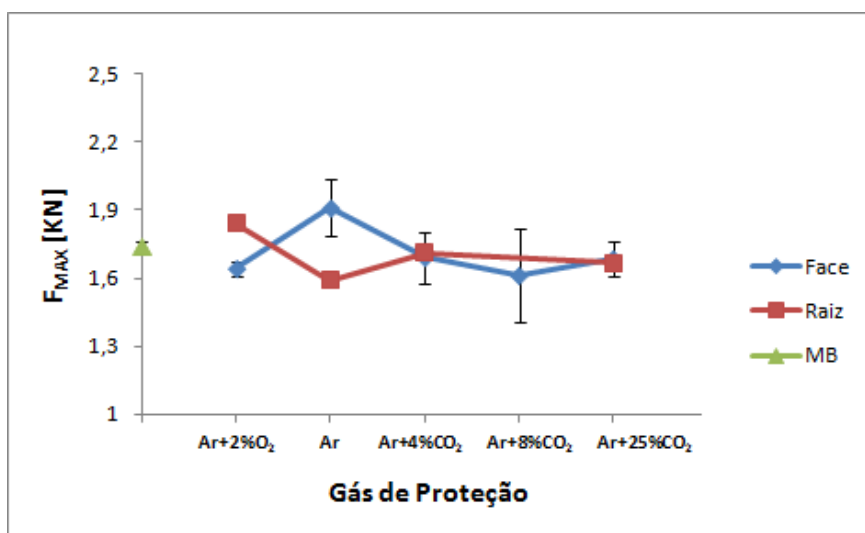


Figura 6.20. Força para realização de dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER430LNb e metal de base UNS43932

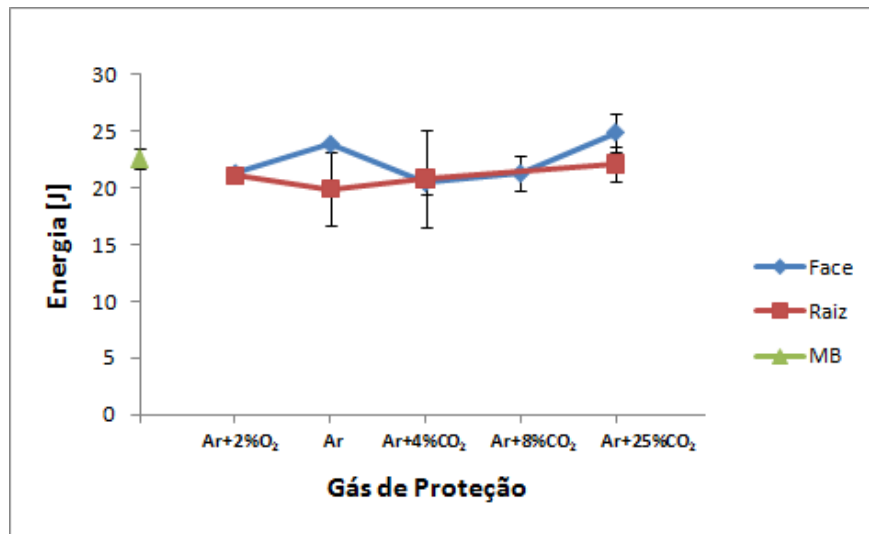


Figura 6.21. Energia total para a realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER430LNb no metal de base UNS43932

A Tabela 6.13 apresenta os valores médios e o desvio padrão da força máxima e da energia consumida para a realização do ensaio de dobramento para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441. Os valores completos podem ser observados nas Tabelas C.13 e C.14, Anexo C.

Tabela 6.13. Força máxima e energia obtidas no ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441

Metal de Adição	Gás de Proteção	Lado	F _{MAX} [kN]		Energia [J]	
			Media	Desvio	Media	Desvio
ER430LNb	Ar	Raiz	1,56	0,04	22,43	1,52
		Face	1,57	0,02	19,79	0,61
	Ar+2%O ₂	Raiz	1,58	0,11	21,75	0,88
		Face	1,72	0,05	21,93	0,69
	Ar+4%CO ₂	Raiz	-	-	-	-
		Face	-	-	-	-
	Ar+8%CO ₂	Raiz	1,61	0,1	21,1	2,31
		Face	1,66	0,04	23,11	1,83
	Ar+25%CO ₂	Raiz	1,61	0,08	22,13	2,62
		Face	1,74	0,06	23,67	0,44

As Figuras 6.22 e 6.23 apresentam respectivamente os gráficos da força máxima e a energia consumida para a realização do ensaio de dobramento para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441 em função do gás de proteção utilizado. Assim como ocorreu com os corpos de prova soldados no metal de base

UNS 43932, não houve variação significativa da força máxima e da energia para a realização do ensaio de dobramento independentemente do gás de proteção utilizado, ficando também com valores similares aos encontrados para o metal de base.

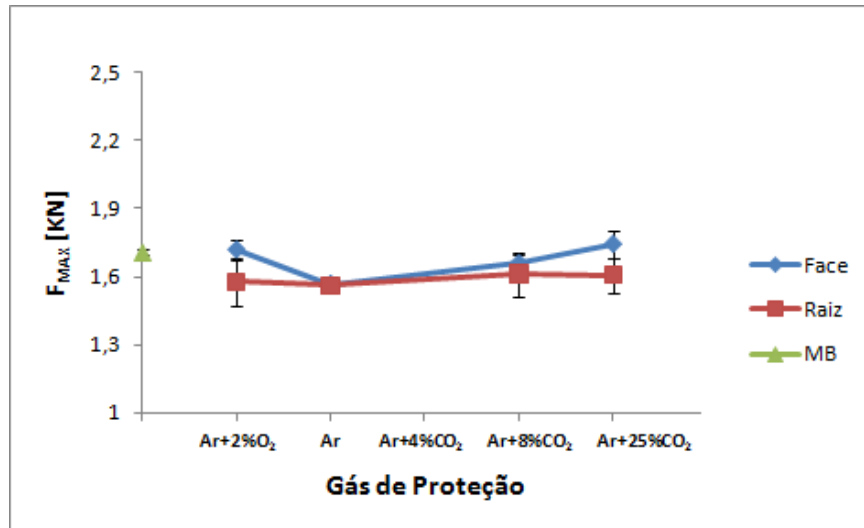


Figura 6.22. Força para realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441

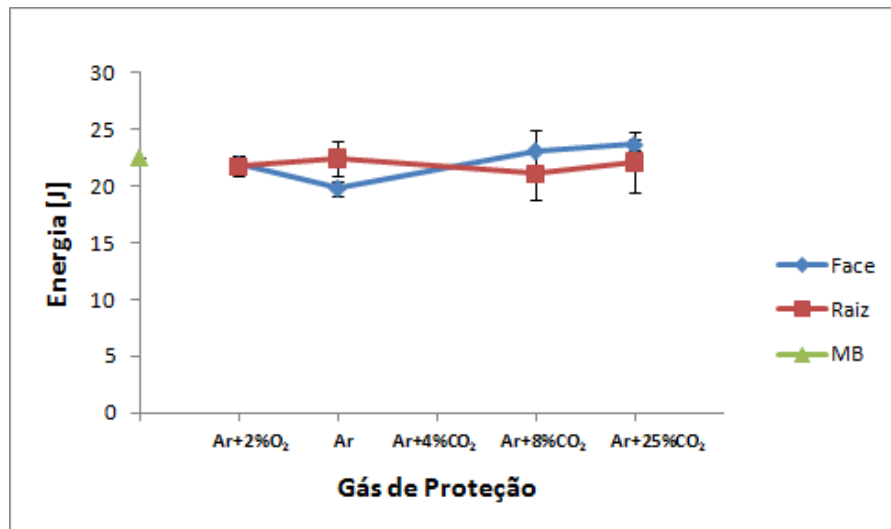


Figura 6.23. Energia total para a realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441

6.2.4. Comparação entre os metais de adição ER430Ti e ER430LNb

A título de comparação entre as forças máximas e a energia para a realização dos ensaios de dobramento serão retirados valores médios dos valores encontrados durante os ensaios de dobramento realizados na face dos corpos de prova soldados com os metais de

adição ER430Ti e ER430LNb. Não serão utilizados para o cálculo destas médias os valores encontrados quando se utilizou o gás de proteção Ar+25%CO₂ para o metal de adição ER430Ti, pois nesta situação ocorreram fraturas na junta soldada.

A Tabela 6.14 apresenta os cálculos dos valores médios e desvios padrões das forças máximas e energia obtidos no ensaio de dobramento para os corpos de prova soldados com os metais de adição ER430Ti e ER 430LNb nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.

Tabela 6.14. Valores médios e desvios padrões das forças máximas e energias obtidas nos ensaios de dobramento para os corpos de prova soldados com os metais de adição ER430Ti e ER 430LNb nos metais de base UNS 43932 e AISI 441

Metal de Base	Metal de Adição	F _{MAX} [kN]		Energia [J]	
		Media	Desvio	Media	Desvio
UNS 43932	ER430Ti	1,82	0,14	24,91	2,10
UNS 43932	ER430LNb	1,71	0,11	21,76	1,62
AISI 441	ER430Ti	1,64	0,04	22,12	0,85
AISI 441	ER430LNb	1,63	0,07	21,99	1,19

A Figuras 6.24 e 6.25 apresentam, respectivamente a força máxima para realizar o dobramento e a energia total para realizar o dobramento em juntas soldadas de metal de base UNS 43932 e AISI 441 em função do metal de adição utilizado. Nota-se que para o metal de base UNS43932 há uma diminuição da força e da Energia com a utilização do metal de adição ER430LNb. Este fato pode estar relacionado com o aumento da quantidade de nióbio presente no metal de adição ER430LNb em relação ao metal de adição ER430Ti (conforme pode-se observar na Tabela 3.2), sendo que Ferreira (2005), Guida (2006) e Hiramatsu (2001) afirmam que a presença deste elemento aumenta a conformabilidade de um aço inoxidável ferrítico, uma vez que os precipitados ancoram e impedirem o crescimento dos grãos, aumentando assim a ductilidade do material.

Para o metal de base AISI 441 observa-se que foram necessárias menores forças máximas e energia para a realização do dobramento, ficando os valores mais similares para os dois metais de adição estudados. Conforme apresentado na Tabela 3.1 o metal de base AISI 441 possui 0,56% de nióbio, valor superior ao presente no metal de adição ER430LNb (0,44%). Da mesma forma discutida anteriormente, o nióbio facilita o dobramento do corpo de prova soldado.

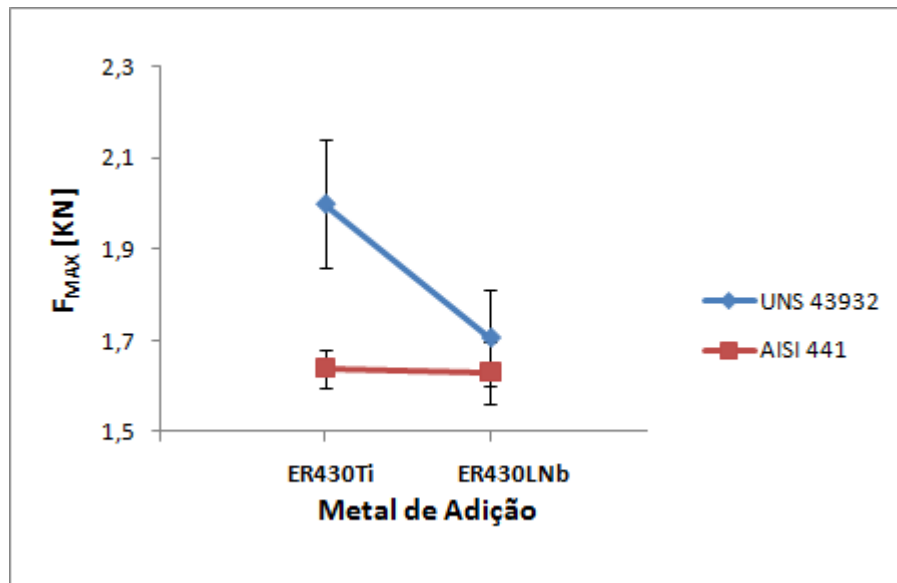


Figura 6.24. Força máxima para realizar o dobramento em juntas soldadas de metal de base UNS 43932 e AISI 441 em função do metal de adição utilizado

Da mesma forma que ocorreu com a força máxima, notou-se que para o metal de base UNS43932 houve uma diminuição da energia com a utilização do metal de adição ER430LNb. Com o metal de base AISI 441 não houve variação significativa com a modificação do metal de adição, ficando com valores próximos ao encontrado com a utilização do metal de adição ER430LNb, quando se soldou o metal de base UNS43932.

A provável razão dos valores de força máxima e energia total encontrados para o metal de base AISI 441 serem menores do que para o metal de base UNS 43932, como já discutido está relacionada com a maior estabilização ao nióbio, sendo, portanto, mais dúctil (menores efeitos dos precipitados). O mesmo raciocínio pode ser realizado para explicar a menor força e energia necessária para realizar o dobramento do metal soldado com o ER430Ti, quando comparado com o soldado com o ER430LNb no metal de base UNS 43932.

É interessante comparar ainda, que os valores apresentados na Tabela 6.14 para as médias da força e energia obtidas no dobramento dos corpos de prova soldados e comparando com as forças e energias obtidas para os metais de base (antes da soldagem), apresentados na Tabela 6.7, observa-se que os valores são mais similares ao metal de base quando o ensaio foi realizado utilizando o metal de adição ER430LNb. Um fator que pode gerar estas características similares entre os metais de base e o metal de adição ER430LNb é maior similaridade da composição química dos materiais, principalmente o baixo teor de carbono, conforme observa-se nas Tabelas 3.1 e 3.2, Capítulo III.

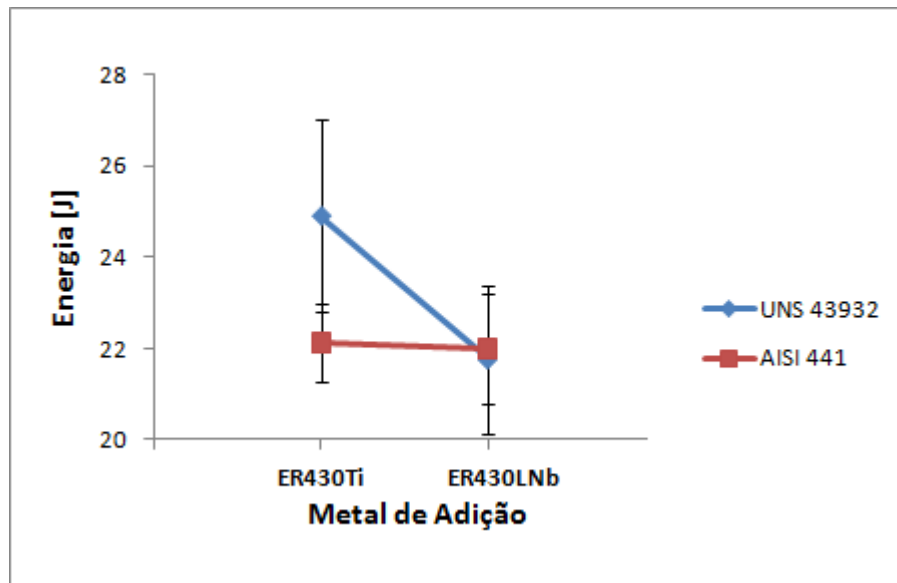


Figura 6.25. Energia total para realizar o dobramento em juntas soldadas de metal de base UNS 43932 e AISI 441 em função do metal de adição utilizado

6.3. Ensaio de Embutimento

O ensaio de embutimento foi realizado aplicando a carga com um punção no centro do corpo de prova soldado, pressionando a chapa com uma força de 9.807 N para não haver escorregamento. Utilizou-se vaselina como lubrificante entre o punção e a chapa. É importante frisar que o punção foi cuidadosamente posicionado de forma que ficasse alinhado com o centro da solda.

O critério de parada do ensaio foi que houvesse uma queda superior a 5% da carga máxima. Este critério foi determinado para não ocorrer o rasgamento da chapa, podendo-se então analisar de forma mais adequada onde ocorreu o início da fratura.

Foram analisadas a força máxima, o deslocamento máximo, energia total e o índice de rigidez para a realização do ensaio. O deslocamento máximo do punção é o fator determinante nos ensaios padronizados (Erichsen e Olsen), sendo intimamente ligado ao índice de embutimento do material, logo, a ductilidade da solda.

Primeiramente, para ter parâmetros de comparação, realizaram-se ensaios de embutimento nas chapas dos metais de base de aço inoxidável ferrítico (UNS43932 e AISI441). A Tabela 6.15 apresenta os valores médios e desvio padrão da força máxima (F_{MAX}), deslocamento do punção (Desl.) e energia total (E) para a realização do ensaio. As Tabelas completas com os valores de todos os ensaios de embutimento realizados são apresentadas nas Tabelas C.15 a C.28, Anexo C.

Tabela 6.15. Valores médios e desvio padrão das variáveis medidas nos ensaios de embutimento realizados nos metais de base UNS 43932 e AISI 441

MB	F_{MAX} [N]	D. F_{MAX}	Desl. 10-3 [m]	D. Desl.	E [J]	D. E
UNS 43932	49972,2	354,8	16,22	0,11	408,8	8,6
AISI441	51270,8	828,1	16,7	0,12	411,9	17,1

Onde: F_{MAX} representa a média da força máxima, Desl. o deslocamento do punção, E a energia e D. os desvios padrões.

Nota-se que a força máxima e o deslocamento do punção para o metal de base AISI 441 são um pouco superiores aos obtidos para o UNS 43932. Estas características possibilitam afirmar que a ductilidade daquele material é um pouco superior à do metal de base UNS43932 e provavelmente estão relacionadas ao efeito da composição química do material, uma vez que o AISI 441 possui uma estabilização com maiores quantidades de Nióbio. E, conforme já mencionado a adição de nióbio é uma das formas mais efetivas de melhorar o embutimento dos aços inoxidáveis ferríticos, principalmente devido à presença do carboneto de nióbio, que auxilia na restrição do crescimento de grãos.

A Figura 6.26 apresenta na letra “a” o gráfico da força em função do deslocamento de um ensaio de embutimento realizado no metal de base UNS 43932 e na “b” uma imagem do aspecto do corpo de prova após a realização do ensaio. O ensaio é caracterizado por um crescimento da força em função do deslocamento até o início da ruptura no material, onde a força começa a decrescer. Conforme comentado, o critério de parada do ensaio é que houvesse uma queda de 5 % em relação à força máxima. Observa-se ainda na Figura 6.26 “b” que o ensaio realizado no corpo de prova de metais de base a ruptura ocorreu na lateral da calota formada pelo punção.

Uma análise da força máxima, do deslocamento do punção e da energia total para a realização do ensaio de embutimento será realizada a seguir, sendo dividido em três etapas, tomando como ponto de referência o metal de adição utilizado (ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb). Os ensaios que ocorreram a fratura devido a falta de fusão lateral do cordão de solda, conforme apresentado na Figura 6.3, foram retiradas da análise. Conforme já discutido, os mesmos deveriam ter sido repetidos, mas não foram devido a restrições de materiais.

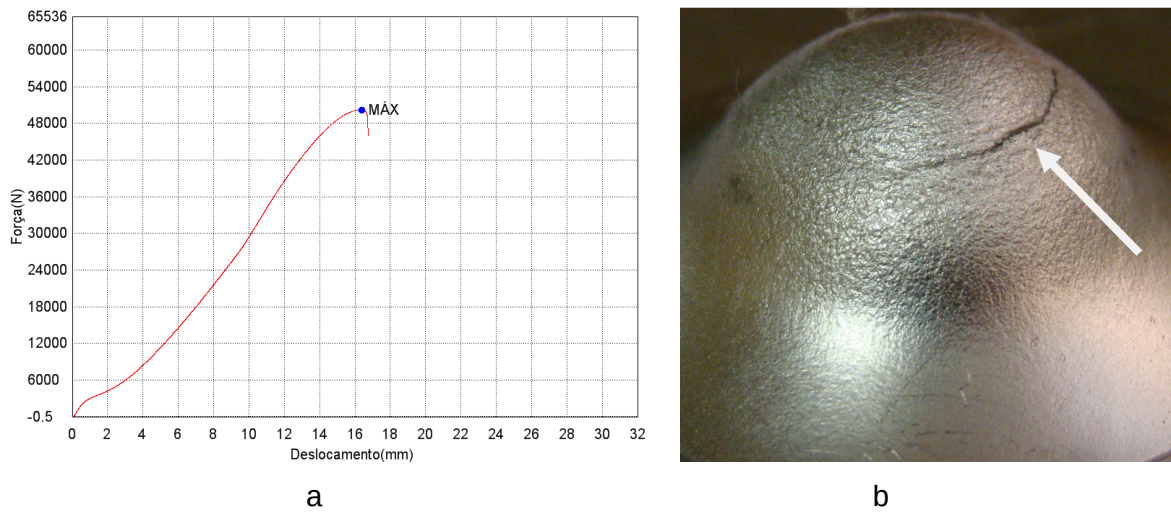


Figura 6.26. Ensaio de embutimento realizado no metal de base UNS 43932 (a) gráfico da força em função do deslocamento do punção e (b) aspecto do corpo de prova após o ensaio

6.3.1. ER308LSi

A Figura 6.27 apresenta na letra “a” o comportamento da força em função do deslocamento de um ensaio de embutimento realizado na junta soldada no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O₂ e na “b” uma imagem do aspecto do corpo de prova após a realização do ensaio de embutimento.

Nota-se que, assim como no ensaio de embutimento realizado no metal de base, a força cresce até alcançar a carga máxima, seguida de uma queda que representa o início do desenvolvimento de uma fissura, devendo então interromper o ensaio. O aspecto do corpo de prova ensaiado é composto por uma fratura na circunferência da calota formada pelo punção.

A Tabela 6.16 apresenta os valores médios e o desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção e energia total para a realização do ensaio de embutimento para os corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER308LSi na face e na raiz.

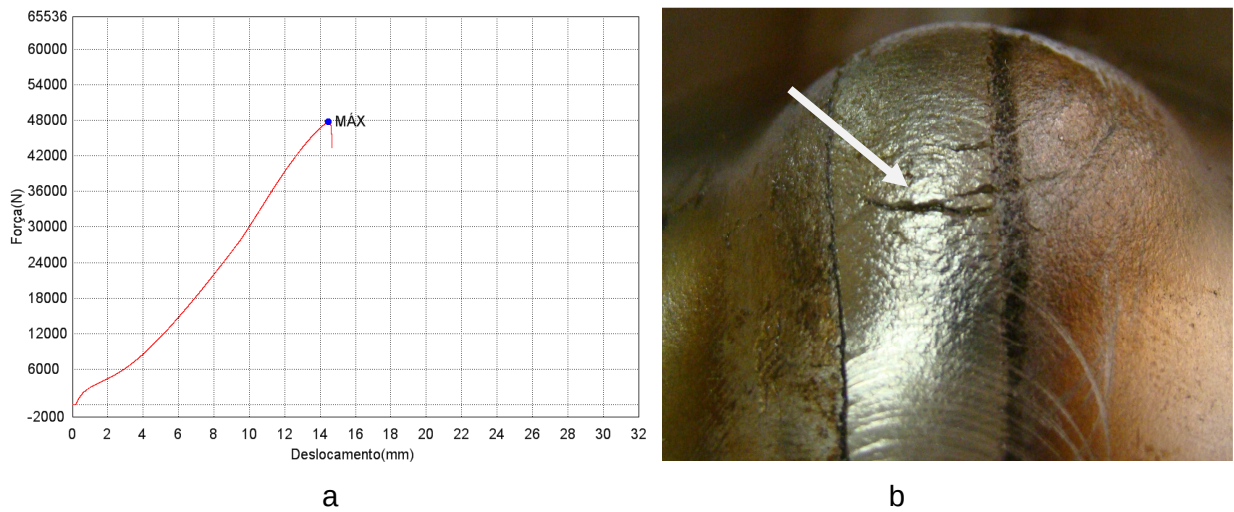


Figura 6.27. Ensaio de embutimento realizado na face do corpo de prova soldado no metal de base UNS 43932, com o metal de adição ER308LSi e com o gás de proteção Ar+2%O₂, (a) gráfico da força em função do deslocamento do punção e (b) aspecto do corpo de prova após o ensaio

Tabela 6.16. Valores médios e desvio padrão das variáveis medidas nos ensaios de embutimento realizados nos corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER308LSi

Gás de Proteção	Lado	F _{MAX} [N]	D. F _{MAX}	Desl. 10-3 [m]	D. Desl.	E [J]	D. E
Ar	Face	43369	0	13,6	0	263	0
Ar+2%O ₂	Face	36112	16412	11,9	3,6	210	152
Ar+8%CO ₂	Raiz	36090	11113	11,8	2,8	210	94
Ar+25%CO ₂	Face	40461	12187	12,8	2,9	287	63
Ar+25%CO ₂	Raiz	40076	4869	12,6	1,5	243	41

Onde: F_{MAX} representa a média da força máxima, Desl. o deslocamento do punção, E a energia e D. os desvios padrões.

As Figuras 6.28 a 6.30 apresentam respectivamente os gráficos dos parâmetros apresentados na Tabela 6.16. Observa-se que todos tiveram comportamentos similares, tanto para a face, quanto para a raiz. Houve um menor valor quando se realizou os ensaios nos corpos de prova soldados do que nos ensaios realizados no metal de base. Apesar de não discutir o motivo Hunter; Eagar (1980) também observaram esta redução quando os testes foram realizados nas chapas soldadas e, segundo o autor estes resultados também foram observados pelos autores Sawhill; Bond (1976) e Redmond (1977).

Para os ensaios realizados, verifica-se que não houve variações significativas dos parâmetros analisados com o aumento do elemento ativo no gás de proteção, apesar de se ter uma variação na porcentagem de ferrita no material, seguindo o mesmo comportamento observado no ensaio de dobramento. Da mesma forma já discutida anteriormente, este fato pode estar relacionado a não ocorrência variações significativas nas microdurezas, conforme apresentado nas Figuras 5.7 e 5.34 do Capítulo V, tanto da zona fundida, quanto da zona termicamente afetada com a variação do gás de proteção.

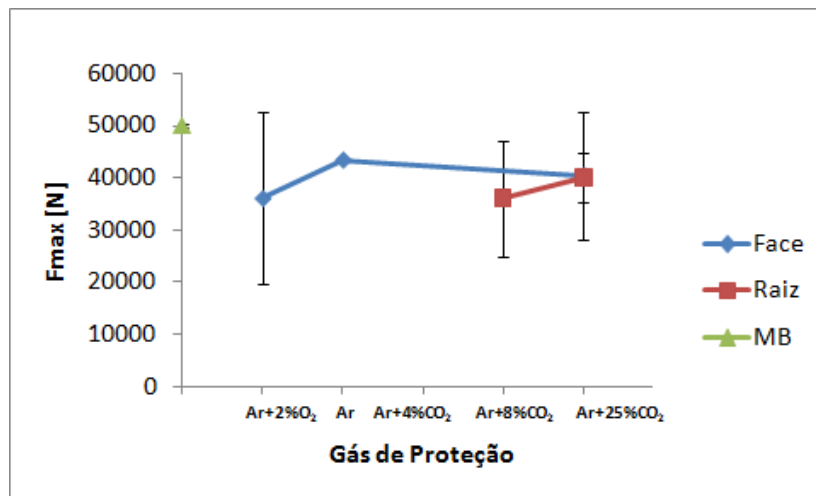


Figura 6.28. Força máxima exercida pelo punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base UNS 43932

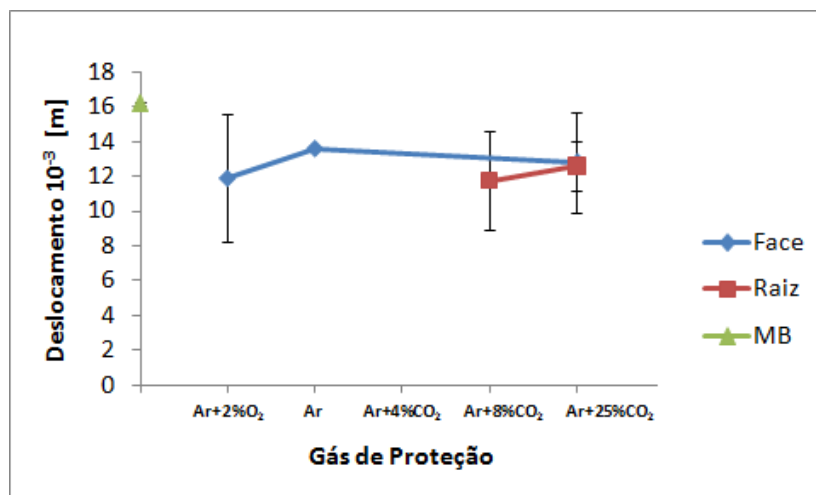


Figura 6.29. Deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base UNS 43932

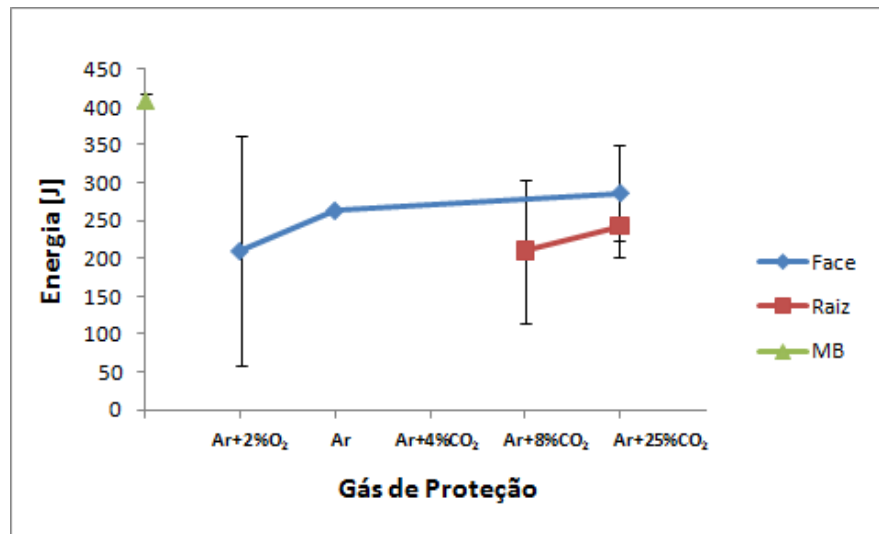


Figura 6.30. Energia total para realização do ensaio de embutimento em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base UNS 43932

A Tabela 6.17 apresenta os valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção e energia total para a realização do ensaio de embutimento e na face e na raiz dos corpos de prova soldados no metal de base AISI441 com o metal de adição ER308LSi.

Tabela 6.17. Valores médios e desvio padrão das variáveis medidas nos ensaios de embutimento realizados nos corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER308LSi

Gás de Proteção	Lado	F _{MAX} [N]	D. F _{MAX}	Desl. 10-3 [m]	D. Desl.	E [J]	D. E
Ar	Face	36237	21648	12	5,1	231	210
Ar	Raiz	20269	2257	10,8	4,2	130	73
Ar+2%O ₂	Face	33098	747	11,2	0,3	162	3
Ar+2%O ₂	Raiz	38919	18973	12,6	4,2	248	193
Ar+4%CO ₂	Raiz	20069	8563	7,8	2,1	79	51
Ar+8%CO ₂	Face	17085	2311	7,2	0,6	60	11
Ar+8%CO ₂	Raiz	19418	5618	7,9	1,5	76	30
Ar+25%CO ₂	Face	34687	11026	11,5	2,6	185	90
Ar+25%CO ₂	Raiz	49356	1217	15,2	0,6	343	32

Onde: F_{MAX} representa a média da força máxima, Desl. o deslocamento do punção, E a energia e D. os desvios padrões.

As Figuras 6.31 a 6.33 apresentam os gráficos dos parâmetros analisados na Tabela 6.17. Da mesma forma discutida para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi no metal de base UNS43932 observa-se que os parâmetros analisados tiveram

comportamentos similares, considerando os grandes desvios padrões, não possuindo assim, uma variação significativa com a adição de elementos ativos no gás de proteção, tanto para a face, quanto para a raiz e tendo os corpos de prova soldados valores inferiores aos do metal de base.

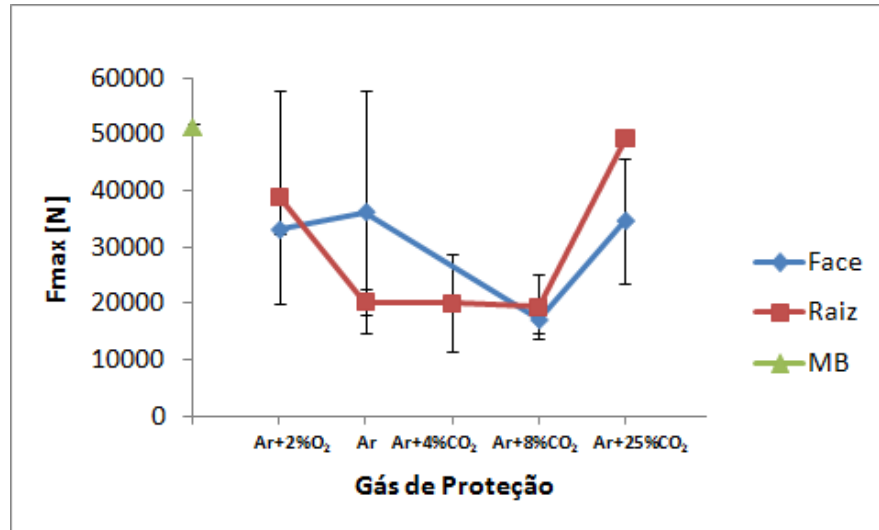


Figura 6.31. Força máxima exercida pelo punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base AISI 441

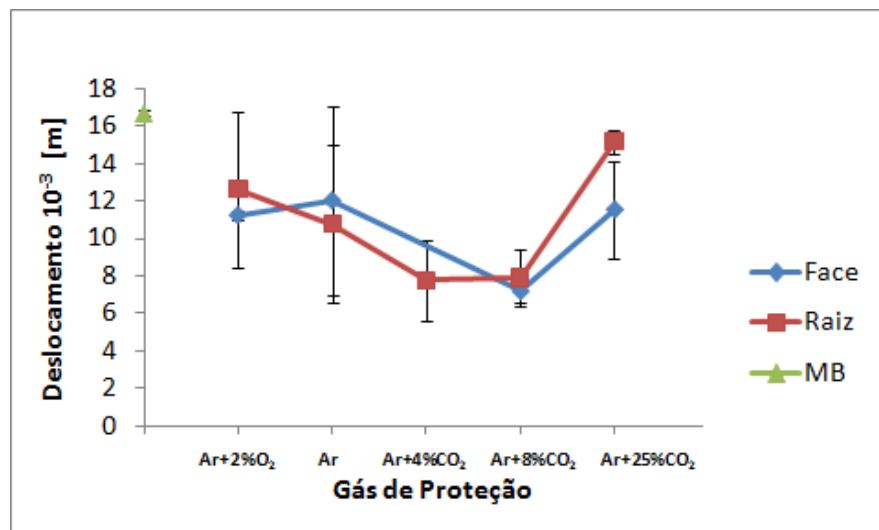


Figura 6.32. Deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base AISI 441

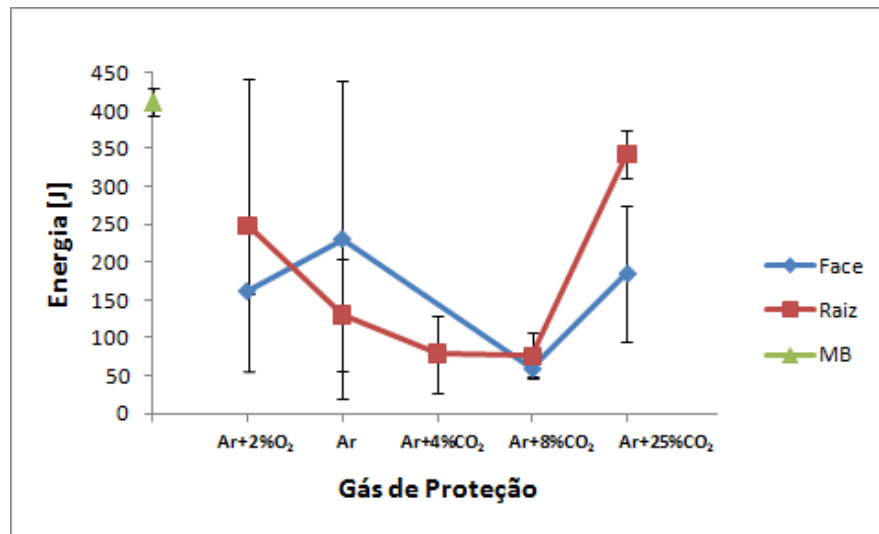


Figura 6.33. Energia total para realização do ensaio de embutimento em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base AISI 441

6.3.2. ER430Ti

As Figuras 6.34 e 6.35 apresentam na letra “a” os comportamentos das forças em função do deslocamento do ensaio de embutimento realizado na junta soldada no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER430Ti e, respectivamente, os gases de proteção Ar+2%O₂ e Ar+25%CO₂ na “b” uma imagem do respectivo aspecto do corpo de prova após a realização do ensaio de embutimento.

Verifica-se, como no ensaio de embutimento realizado no metal de base, que para o corpo de prova soldado com o gás de proteção Ar+2%O₂, após o ensaio, que ocorre uma fratura na circunferência da calota formada pelo punção, já para o corpo de prova soldado com o gás de proteção com 25% de dióxido de carbono a fratura ocorreu na transversal do cordão de solda. Madeira (2007) também observou as duas formas de fratura em seus ensaios de embutimento e cita que fraturas na transversal d cordão de solda auxiliam nas medidas de embutimento, uma vez que garantem que se está avaliando a ductilidade da região soldada.

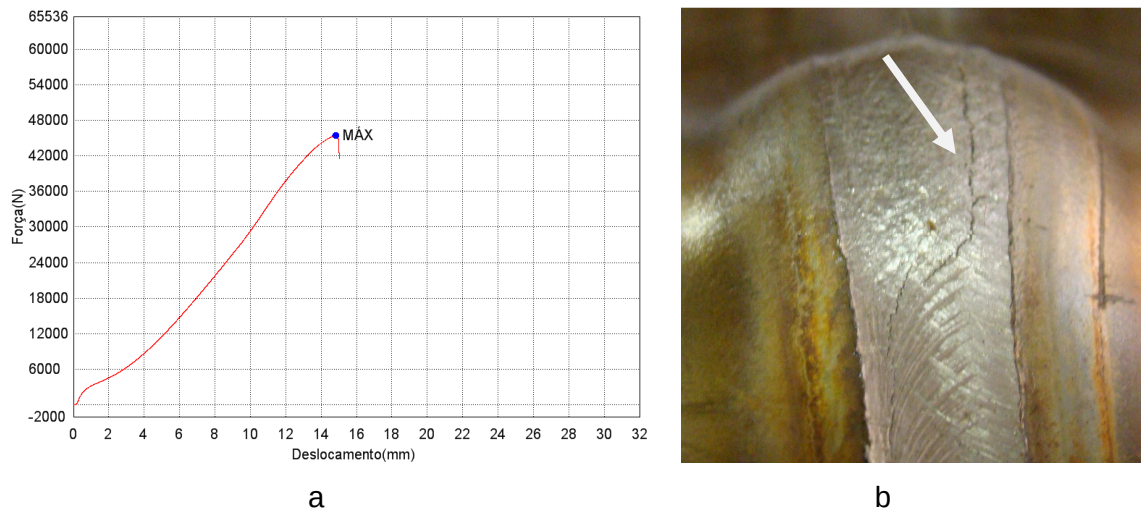


Figura 6.34. Ensaio de embutimento realizado na raiz do corpo de prova de metal de base UNS43932, soldado com o metal de adição ER430Ti e com o gás de proteção Ar (a) gráfico da força em função do deslocamento do punção e (b) aspecto visual do corpo de prova ensaiado

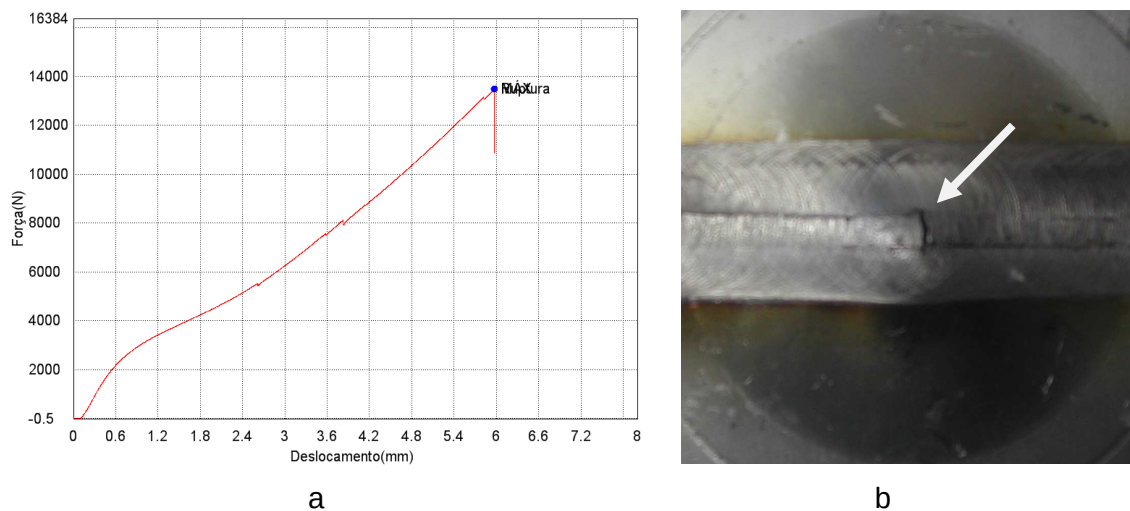


Figura 6.35. Ensaio de embutimento realizado na face do corpo de prova de metal de base UNS43932, soldado com o metal de adição ER430Ti e com o gás de proteção Ar+25%CO₂ (a) gráfico da força em função do deslocamento do punção e (b) aspecto visual do corpo de prova ensaiado

A Tabela 6.18 apresenta os valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção e energia total para a realização do ensaio de embutimento para os corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER430Ti na face e na raiz. As Figuras 6.36 a 6.38 apresentam os gráficos dos parâmetros estudados. Observa-se que os parâmetros analisados tiveram comportamentos similares, sendo que

para todos estes fatores os corpos de prova soldados tiveram valores inferiores aos encontrados para o metal de base, como já discutido, de forma similar ao encontrado por Hunter; Eagar (1980), Sawhill; Bond (1976) e Redmond (1977). Observa-se ainda uma diminuição dos fatores estudados com o aumento de dióxido de carbono no gás de proteção, ou seja, há uma diminuição da ductilidade do cordão de solda, sendo ainda mais evidente quando se utiliza o gás de proteção com 25% de dióxido de carbono.

Quando se tem um aumento da quantidade de dióxido de carbono no gás de proteção nos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti no metal de base UNS43932 verifica-se que há um aumento do valor da microdureza (Figura 5.33), uma diminuição do tamanho de grão (Figura 5.30) e por último observa-se pela microestrutura, de forma qualitativa, um aumento da quantidade de precipitados (Figuras 5.18 à 5.22), observando-se ainda a presença de martensita quando se solda com 25% de dióxido de carbono. Estes fatores justificam a diminuição dos valores dos fatores analisados, o que representa uma diminuição da ductilidade do cordão de solda observada nas Figuras 6.38 a 6.41.

Tabela 6.18. Valores médios e desvio padrão das variáveis medidas nos ensaios de embutimento realizados nos corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER430Ti

Gás de Proteção	Lado	F_{MAX} [N]	D. F_{MAX}	Desl. 10-3 [m]	D. Desl.	E [J]	D. E
Ar	Raiz	41636	5370	13,5	1,9	265	85
Ar+2%O ₂	Face	27883	13879	9,7	3,9	139	117
Ar+2%O ₂	Raiz	26070	2448	9,9	0,7	149	35
Ar+4%CO ₂	Face	22371	8412	8,1	2,3	98	42
Ar+4%CO ₂	Raiz	23538	2662	8,7	0,9	92	21
Ar+8%CO ₂	Face	18951	8370	7,2	2,2	66	44
Ar+8%CO ₂	Raiz	29584	0	10	0,0	131	0
Ar+25%CO ₂	Face	11326	3054	5,2	1,0	31	12
Ar+25%CO ₂	Raiz	4909	375	2,4	0,3	7	2

Onde: F_{MAX} representa a média da força máxima, Desl. o deslocamento do punção, E a energia e D. os desvios padrões.

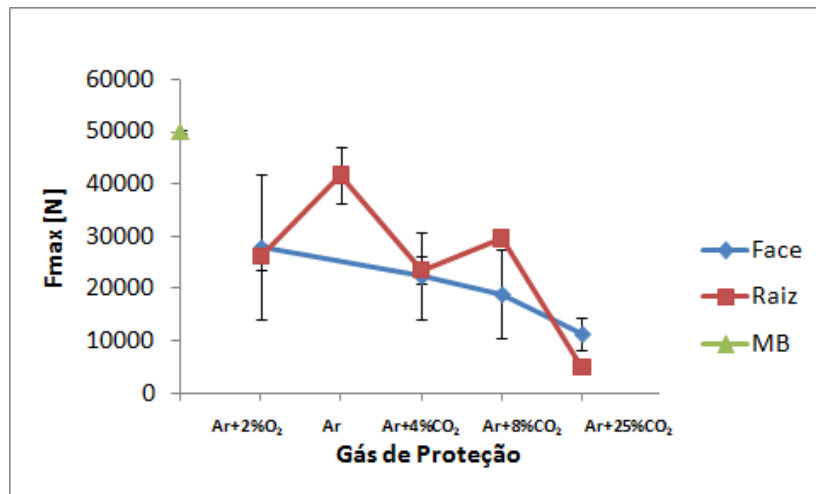


Figura 6.36. Força máxima exercida pelo punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base UNS 43932

Madeira, Modenesi (2010) também observaram a queda da ductilidade quando soldaram com o metal de adição ER430Ti e com um gás com alto potencial ativo e justificaram este fato devido aos teores de C, N e Ti presentes na ZF, que promovem precipitações no contorno de grão, que são responsáveis pela fragilização da junta soldada.

Os resultados encontrados são contrários aos de Washko; Grubb (1991), que afirmam que a presença de titânio em soldas minimiza a possibilidade de ocorrência de perda de ductilidade. Esta diferença, como se observa na Tabela 3.1, Capítulo III, possivelmente está relacionada ao metal de adição ER430Ti não possuir uma estabilização adequada, principalmente devido a presença mais elevada de carbono no material, além das grandes quantidades de carbono que entram na zona fundida devido as maiores adições de dióxido de carbono no gás de proteção.

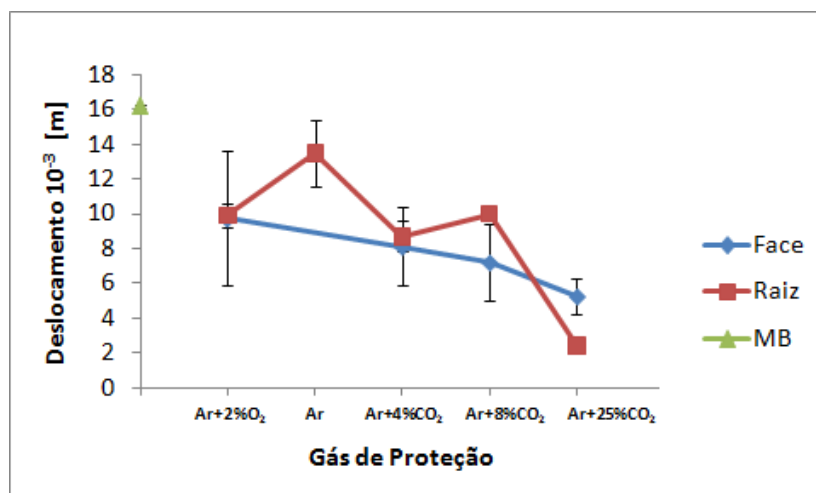


Figura 6.37. Deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base UNS 43932

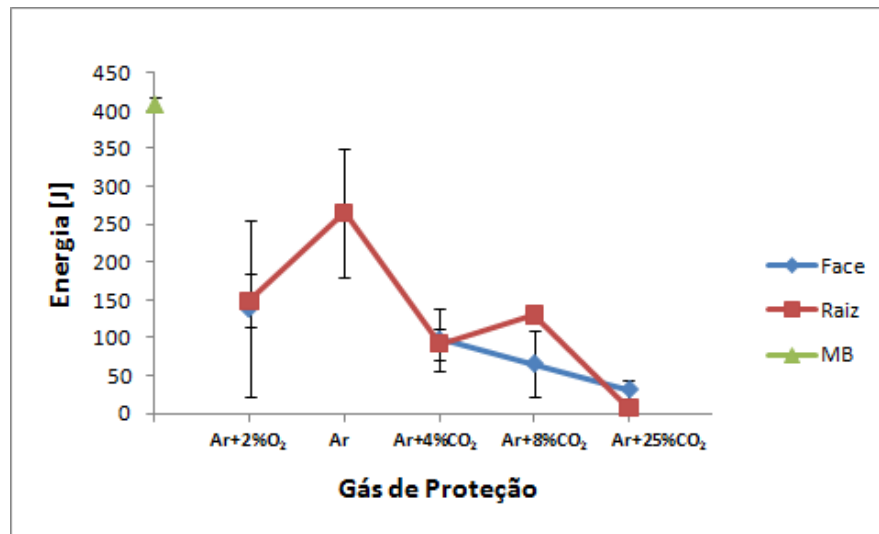


Figura 6.38. Energia total para realização do ensaio de embutimento em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base UNS 43932

A Tabela 6.19 apresenta os valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção e energia total para a realização do ensaio de embutimento para os corpos de prova soldados no metal de base AISI441. As Figuras 6.39 a 6.41 apresentam os gráficos dos parâmetros avaliados na Tabela 6.19, podendo-se afirmar que eles tiveram comportamentos similares. Pelas mesmas razões discutidas para os corpos de prova soldados com o metal de base UNS 43932, observam-se que para todos estes parâmetros durante a realização do ensaio de embutimento houve um menor valor quando se realizou os ensaios nos corpos de prova soldados do que nos ensaios realizados no metal de base.

Tabela 6.19. Valores médios e desvio padrão das variáveis medidas nos ensaios de embutimento realizados nos corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430Ti

Gás de Proteção	Lado	F _{MAX} [N]	D. F _{MAX}	Desl. 10-3 [m]	D. Desl.	E [J]	D. E
Ar	Face	48860	1764	15,6	0,6	371	44
Ar+4%CO ₂	Face	22019	1571	8,2	0,4	81	10
Ar+8%CO ₂	Face	6479	1909	3,5	0,8	12	5
Ar+25%CO ₂	Face	4676	1132	2,2	0,8	7	3

Onde: F_{MAX} representa a média da força máxima, Desl. o deslocamento do punção, E a energia e D. os desvios padrões.

Observa-se ainda, para os ensaios realizados na face, uma diminuição dos parâmetros estudados com o aumento do elemento ativo no gás de proteção, que conforme

já discutido se deve ao aumento da dureza, diminuição do tamanho de grão, quantidade de precipitados de titânio e presença de martensita (quando se soldou com 25% de dióxido de carbono) que deixaram a junta soldada menos dúctil.

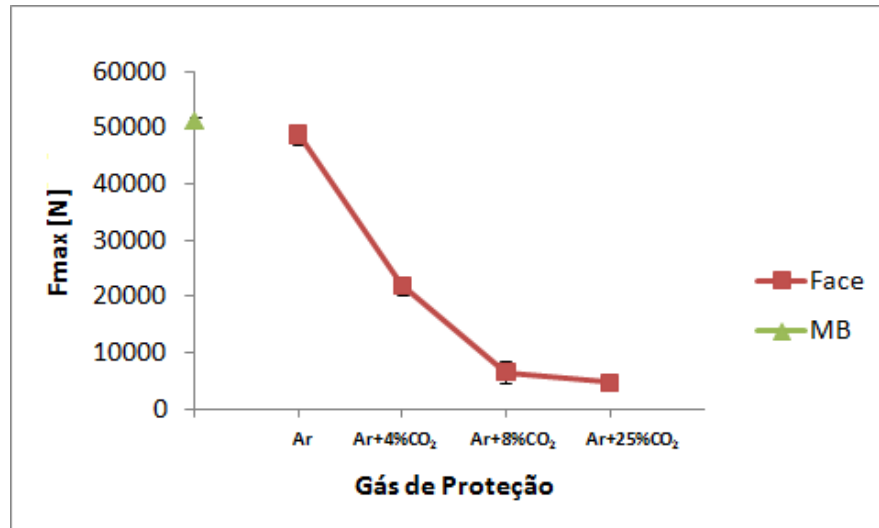


Figura 6.39. Força máxima exercida pelo punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base AISI 441

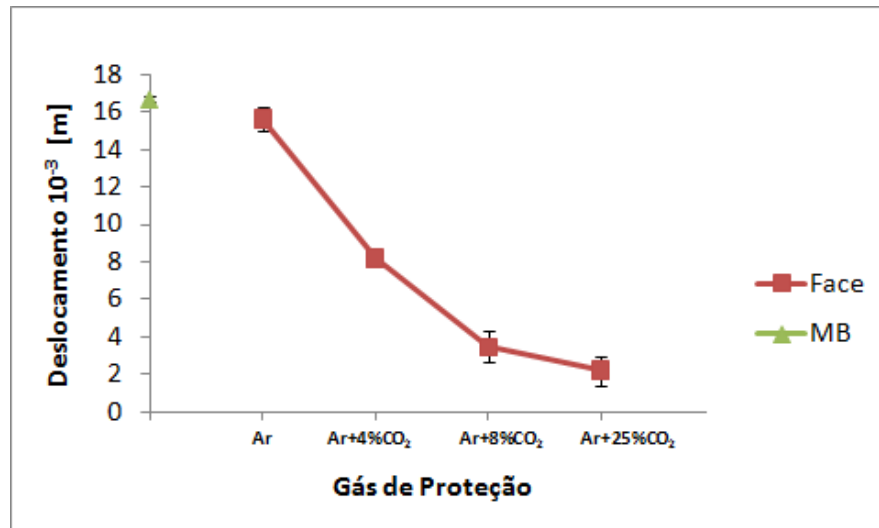


Figura 6.40. Deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base AISI441

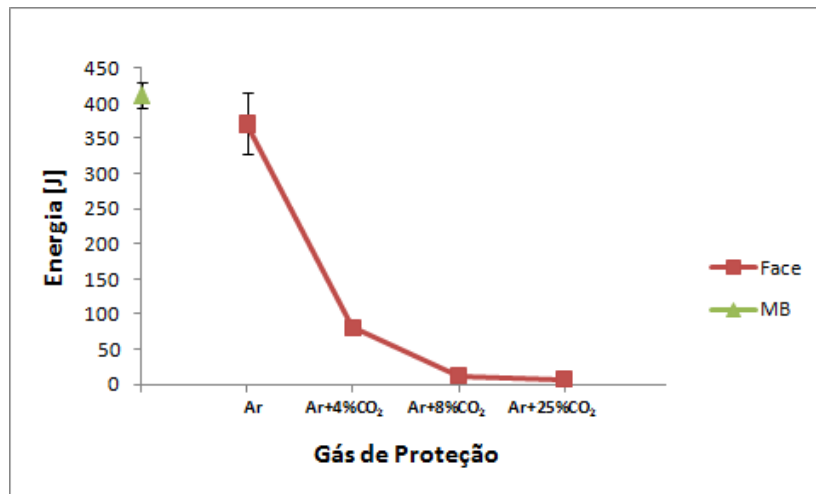
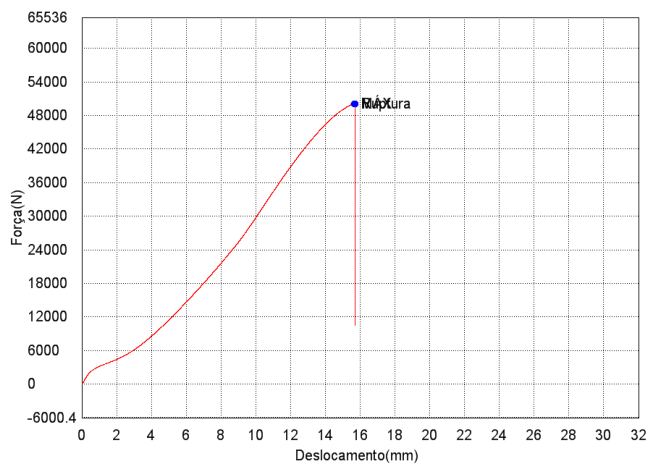


Figura 6.41. Energia total para realização do ensaio de embutimento em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base AISI 441

6.3.3. ER430LNb

A Figuras 6.42 apresenta na letra “a” o comportamento da força em função do deslocamento do ensaio de embutimento realizado na junta soldada no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER430LNb e gás de proteção Ar+2%O₂ e na “b” uma imagem do respectivo aspecto do corpo de prova após a realização do ensaio de embutimento. Nota-se que a fratura ocorreu na longitudinal do cordão de solda, enfatizando a potencialidade de medição da ductilidade na região soldada.



a



b

Figura 6.42. Ensaio de embutimento realizado na face do corpo de prova de metal de base AISI 441, soldado com o metal de adição ER430LNb e com o gás de proteção Ar+2%O₂ (a) gráfico da força em função do deslocamento do punção e (b) aspecto visual do corpo de prova ensaiado

A Tabela 6.20 apresenta os valores médios e o desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção e energia total para a realização do ensaio de embutimento para os corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER430LNb.

Tabela 6.20. Valores médios e desvio padrão das variáveis medidas nos ensaios de embutimento realizados nos corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER430LNb

Gás de Proteção	Lado	F_{MAX} [N]	D. F_{MAX}	Desl. 10 ⁻³ [m]	D. Desl.	E [J]	D. E
Ar	Face	40065	11277	13,1	3,1	261	131
Ar	Raiz	17381	1514	7,0	0,6	56	10
Ar+2%O ₂	Face	32792	10751	11,3	2,8	181	101
Ar+2%O ₂	Raiz	24101	10286	8,9	3,2	108	84
Ar+4%CO ₂	Face	36152	1413	11,7	0,6	184	18
Ar+4%CO ₂	Raiz	32158	20096	11,2	5,4	210	211
Ar+8%CO ₂	Raiz	21440	14611	8,8	3,0	102	85
Ar+25%CO ₂	Face	34068	0	11,2	0	236	0
Ar+25%CO ₂	Raiz	16845	8546	7,0	2,6	76	32

Onde: F_{MAX} representa a média da força máxima, Desl. o deslocamento do punção, E a energia e D. os desvios padrões.

As Figuras 6.43 a 6.45 apresentam os gráficos dos parâmetros estudados, onde não ocorreram variações significativas e apresentaram uma grande variância, que provavelmente ocorreu devido a possíveis fragilizações na solda que não tenham sido observadas nas análises visuais.

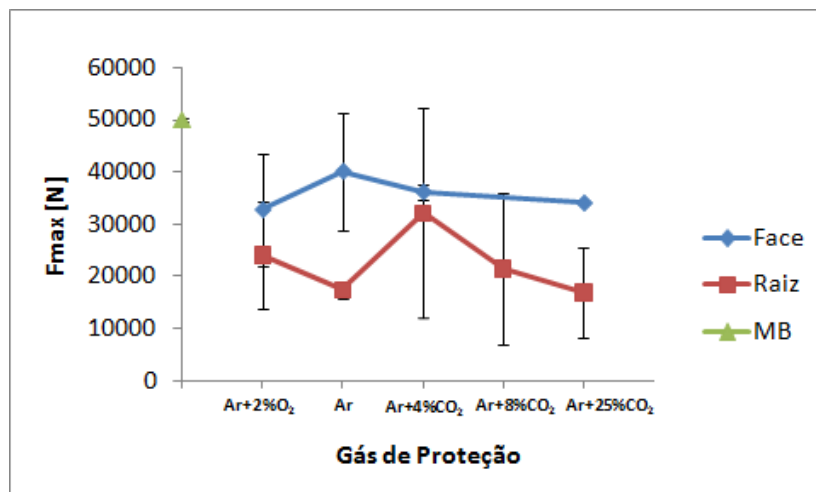


Figura 6.43. Força máxima exercida pelo punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932

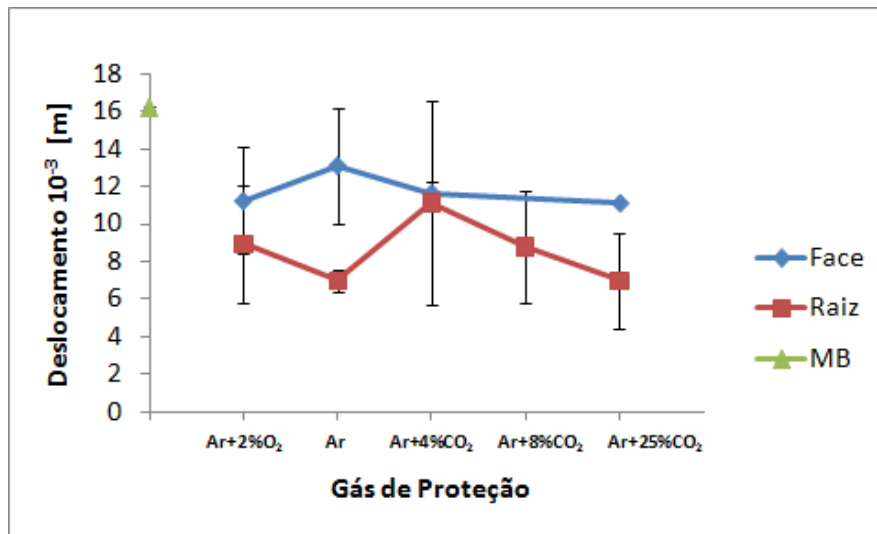


Figura 6.44. Deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932

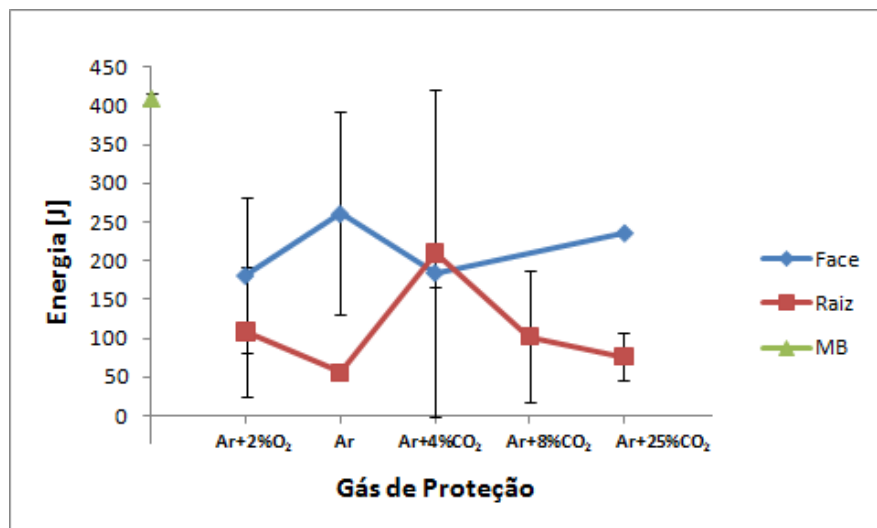


Figura 6.45. Energia total para realização do ensaio de embutimento em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932

A Tabela 6.21 apresenta os valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção e energia total para a realização do ensaio de embutimento para os corpos de prova soldados no metal de base AISI441 com o metal de adição ER430LNb. As Figuras 6.46 a 6.48 apresentam os gráficos dos parâmetros apresentados nas Tabelas 6.21 em função do gás de proteção utilizado. Observa-se que os parâmetros tiveram comportamentos similares, ocorrendo um menor valor quando se realizou os ensaios nos corpos de prova soldados do que nos ensaios realizados no metal de base.

Tabela 6.21. Valores médios e desvio padrão das variáveis medidas nos ensaios de embutimento realizados nos corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430LNb

Gás de Proteção	Lado	F_{MAX} [N]	D. F_{MAX}	Desl. 10-3 [m]	D. Desl.	E [J]	D. E
Ar	Face	36063	6121	11,7	1,5	181	55
Ar	Raiz	29688	6901	10,5	1,8	142	61
Ar+2%O ₂	Face	36771	13241	12,5	2,9	244	106
Ar+2%O ₂	Raiz	23507	23616	8,6	6,9	158	235
Ar+4%CO ₂	Face	30202	16777	10,6	4,1	203	125
Ar+4%CO ₂	Raiz	32537	13936	11,3	3,8	207	141
Ar+8%CO ₂	Face	20191	9038	10,2	0,3	101	33
Ar+8%CO ₂	Raiz	20822	0	7,9	0	99	0
Ar+25%CO ₂	Face	23390	2482	9,5	1,1	107	27
Ar+25%CO ₂	Raiz	28135	7969	10,3	1,5	130	54

Tanto para a face, quanto para a raiz não houve uma variação significativa com o aumento do elemento ativo no gás de proteção como era esperado, uma vez que não houve variações significativas na microestrutura e microdureza das soldas, conforme se observa na Figura 5.36 do Capítulo V.

Os resultados foram similares devido a menor variação nas microestruturas, microdureza e o não aparecimento de martensita, independentemente do gás de proteção utilizado. Isto ocorreu, conforme apresentado na Tabela 3.1, devido a estabilização adequada do metal de adição. Além disto, Ferreira (2005), Guida (2006) e Hiramatsu (2001) afirmam que a presença nióbio aumenta a conformabilidade de um aço inoxidável ferrítico, facilitando, portanto, a realização do dobramento do corpo de prova soldado.

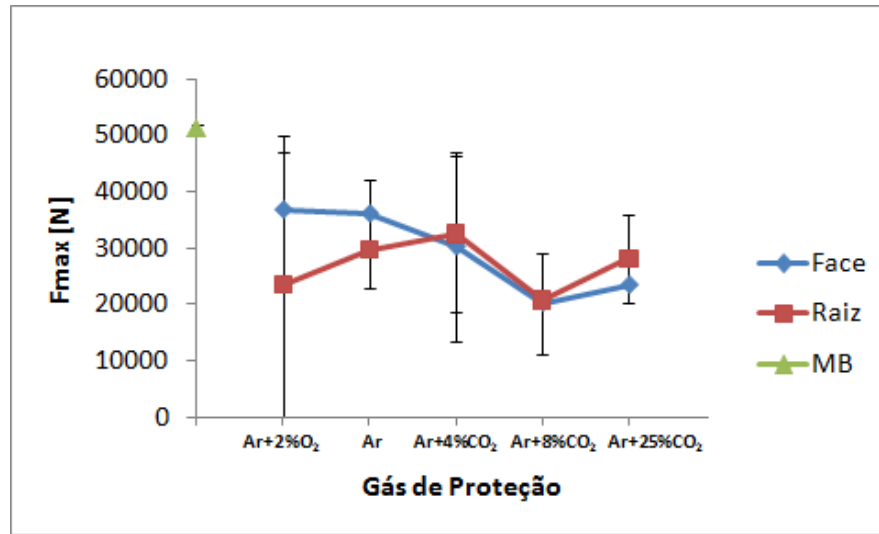


Figura 6.46. Força máxima exercida pelo punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441

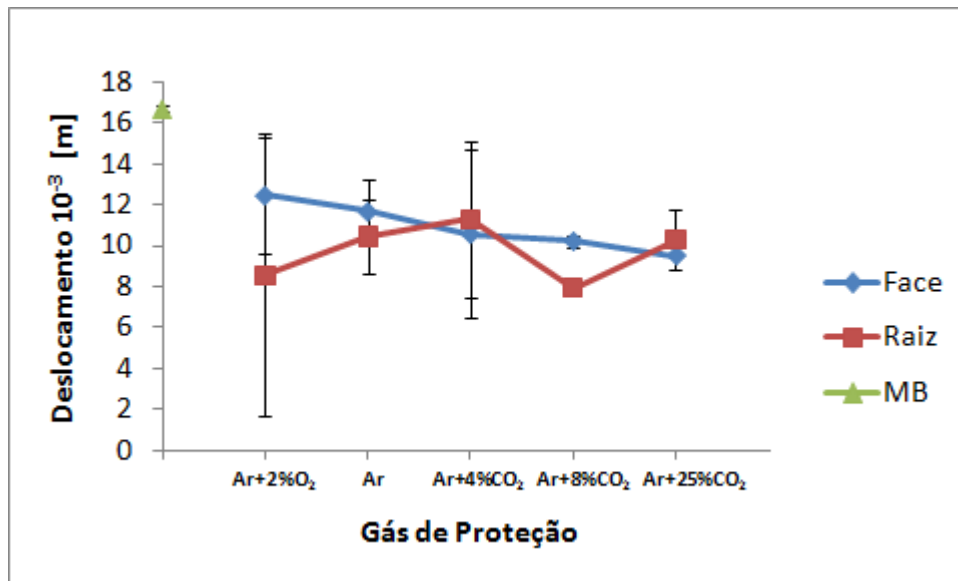


Figura 6.47. Deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441

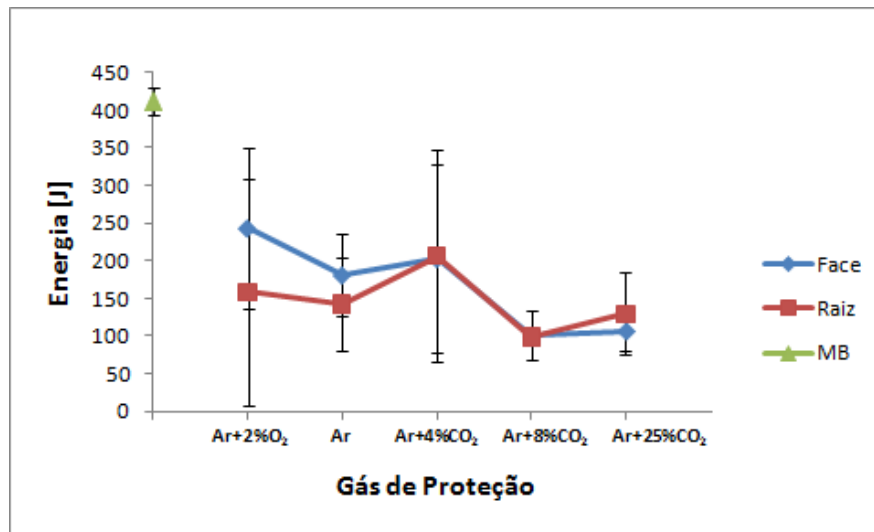


Figura 6.48. Energia total para realização do ensaio de embutimento em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441

6.3.4. Comparação entre os metais de adição

Conforme já discutido, o resultado mais significativo no ensaio de embutimento é o deslocamento do punção, que é proporcional ao índice de embutimento, ou seja, no caso de chapas soldadas fornecem a ductilidade da junta soldada. As análises realizadas exibem que para todos os gases de proteção e metais de adição ocorreram uma mesma tendência para as variáveis estudadas. Logo, para realizar uma comparação da ductilidade dos cordões de solda entre os metais de adição utilizados, será estudado somente o deslocamento do punção.

De uma forma geral, observou-se que o índice de embutimento dos metais de base UNS 43932 e AISI 441 (Tabela 6.15) não apresentou variação significativa. Portanto, para realizar uma análise com maior confiabilidade utilizaram-se, para uma mesma condição, a média dos valores do deslocamento do punção dos corpos de prova soldados ensaiados nos dois metais de base, totalizando-se seis réplicas por condição, determinando-se assim o gráfico apresentado na Figura 6.49.

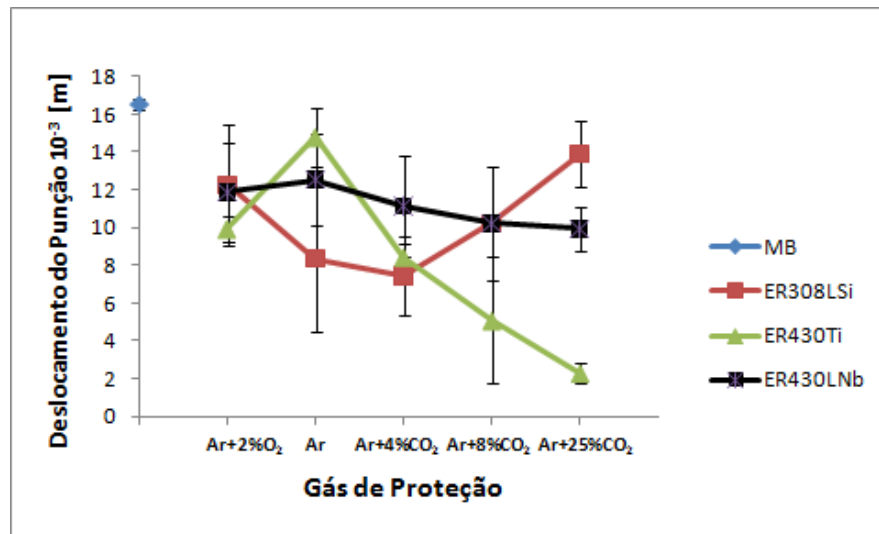


Figura 6.49. Análise comparativa do deslocamento máximo do punção para os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb

Nota-se pela Figura 6.49 que para todos os cordões soldados, independentemente do metal de adição e gás de proteção utilizados o valor máximo do deslocamento do punção foi inferior aos encontrados para os metais de base, que provavelmente está relacionado com o aumento da granulação da zona fundida e zona termicamente afetada em relação ao metal de base. Com o gás de proteção com até 2% de oxigênio, pode-se afirmar que para todos os metais de adição, levando em consideração os desvios padrões, ficaram na mesma faixa de valores. Com a utilização do dióxido de carbono os cordões soldados com os metais de adição ER308LSi e ER430LNb permaneceram na mesma faixa, mas os soldados com o metal de adição ER430Ti sofreu uma queda de seu valor, mostrando, conforme já discutido que o dióxido de carbono para este arame gera uma queda na ductilidade da solda.

6.3.5. Macrografia e Microdureza dos corpos de prova estampados

A Figura 6.50 apresenta uma macrografia do corpo de prova embutido na raiz do cordão soldado no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER308LSi e gás de proteção Ar+2%O₂ com aumento de 40 vezes. Esta Figura mostra que a fratura ocorreu na zona termicamente afetada (que estava na raiz, região que neste ensaio ocorriam tensões de tração) e se estendeu até a zona fundida na face.

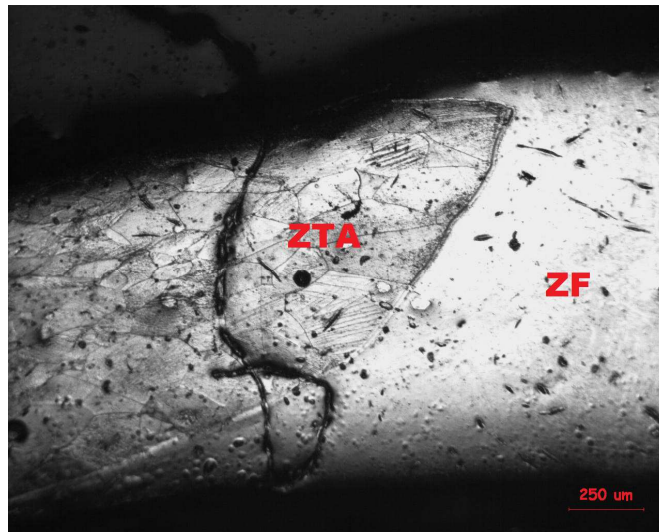


Figura 6.50. Fratura ocorrida durante ensaio de embutimento na raiz do cordão soldado com o metal de base UNS 43932, metal de adição ER308LSi e gás de proteção Ar+2%O₂ (40 x)

A Figura 6.51 apresenta a macrografia do corpo de prova estampado na face do cordão soldado com o metal de base UNS 43932, metal de adição ER430Ti e gás de proteção Ar+8%CO₂ com aumento de 40 vezes. Nota-se que a fratura ocorreu na zona fundida devido a fragilidade do metal soldado, sendo similar ao que Madeira; Modenesi (2010) observaram quando realizaram o embutimento de corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti com gases ativos.

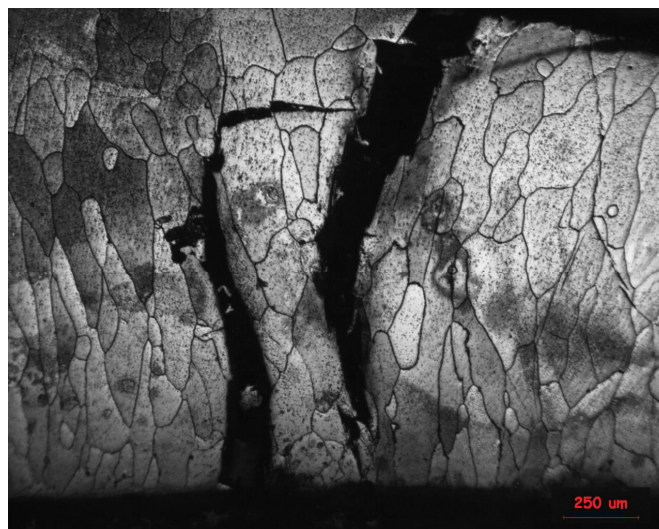


Figura 6.51. Fratura ocorrida durante ensaio de embutimento na face do cordão soldado no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER430Ti e gás de proteção Ar+8%CO₂ (40 x)

A Figura 6.52 apresenta a macrografia da zona fundida do corpo de prova soldado no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+4%CO₂ com aumento de 100 vezes. Observa-se que mesmo com menores teores de dióxido de carbono no gás de proteção a trinca ocorreu na zona fundida, provavelmente devido a presença de carbonetos de titânio, que diminuem a ductilidade do cordão de solda e principalmente aumentam a dureza da junta soldada.

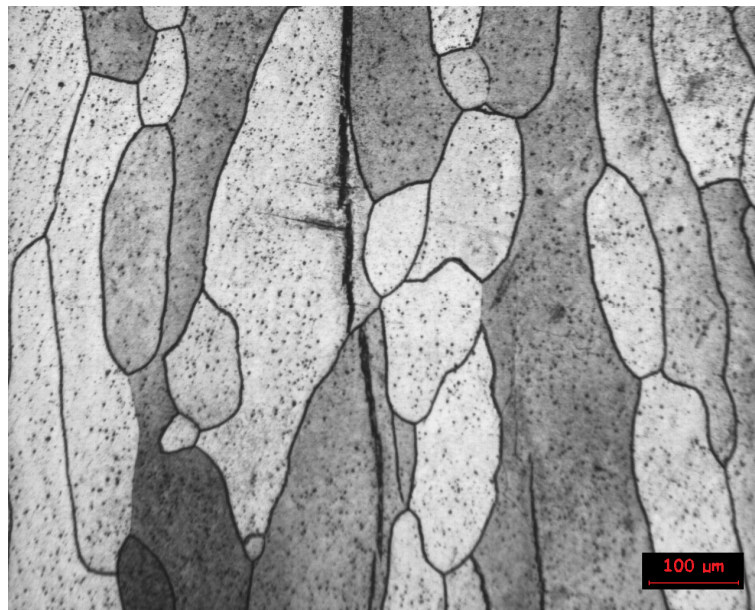


Figura 6.52. Fratura ocorrida durante ensaio de embutimento na face do cordão soldado no metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e gás Ar+4%CO₂ (100 x)

A Tabela 6.22 apresenta as medidas de microdureza realizadas na matriz ferrítica dos metais de base UNS 43932 e AISI 441 após o processo de embutimento, sendo que as numerações de um a cinco na tabela representam as réplicas realizadas para cada condição. O menor e o maior valor de cada condição foram retirados para se ter um aumento da confiabilidade. Comparando com as medidas de microdureza realizadas no metal de base antes do processo de embutimento (Tabela 5.2 do Capítulo V), que tiveram uma média de 180 HV, nota-se que houve um aumento destes valores, que ocorreram provavelmente devido ao encruamento que o material sofreu durante o processo.

A Tabela 6.23 apresenta as medidas de microdureza realizadas nas matrizes austenítica e ferrítica da zona fundida dos corpos de prova soldados nos metais de base UNS 43932 e AISI 441 após o processo de embutimento. Comparando com as medidas de microdureza realizadas na zona fundida dos corpos de prova soldados antes do processo de embutimento nota-se que houve um aumento destes valores, que também ocorreram, provavelmente, devido ao encruamento que o material sofreu durante o processo.

Tabela 6.22. Medidas de Microdureza realizadas na matriz ferrítica dos metais de base UNS43932 e AISI441 estampados

Material	Microdureza (HV)						
	1	2	3	4	5	Média	Desvio
UNS43932	215	221	223	227	235	223,7	3,1
AISI441	215	217	221	249	251	229,0	17,4

Tabela 6.23. 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 para os metais de base UNS 43932 e AISI 441 estampados

Gás de Proteção	Microdureza [HV]			
	UNS 43932		AISI 441	
	Média	Desvio	Média	Desvio
ER308LSi	188,3	3,1	319,0	10,4
ER430Ti	272,3	2,1	224,7	3,2
	281,3	3,5	250,7	12,7
	246,7	5,5	237,0	7,8
ER430LNb	260,7	10,2	290,3	12,4
	234,3	9,5	289,0	8,2
	234,0	9,2	254,3	3,1

A Tabela 6.24 apresenta as medidas de microdureza realizadas na martensita dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti com o gás de proteção Ar+25%CO₂ nos metais de base UNS 43932 e AISI 441 após o processo de embutimento.

Tabela 6.24. Medidas de Microdureza realizadas na martensita da zona fundida para os metais de base UNS43932 e AISI441 estampados

Metal de base	Metal de Adição	Gás de Proteção	Microdureza (HV)						
			1	2	3	4	5	Média	Desvio
UNS43932	ER430Ti	Ar+25%CO ₂	325	413	449	464	500	442,0	26,2
AISI 441	ER430Ti	Ar+25%CO ₂	439	494	497	520	702	503,7	14,2

As Figuras 6.53 e 6.54 apresentam os gráficos das medidas de microdureza realizadas nas matrizes austenítica para o ER308LSi e ferrítica para os demais na zona fundida dos corpos de prova soldados, respectivamente, no metal de base UNS 43932 e AISI 441 após o processo de embutimento. Nota-se que não ocorreram variações

significativas nos valores encontrados da microdureza com alterações no gás de proteção após o processo de embutimento, similar ao que ocorreu antes do embutimento (Figuras 5.28 a 5.33).

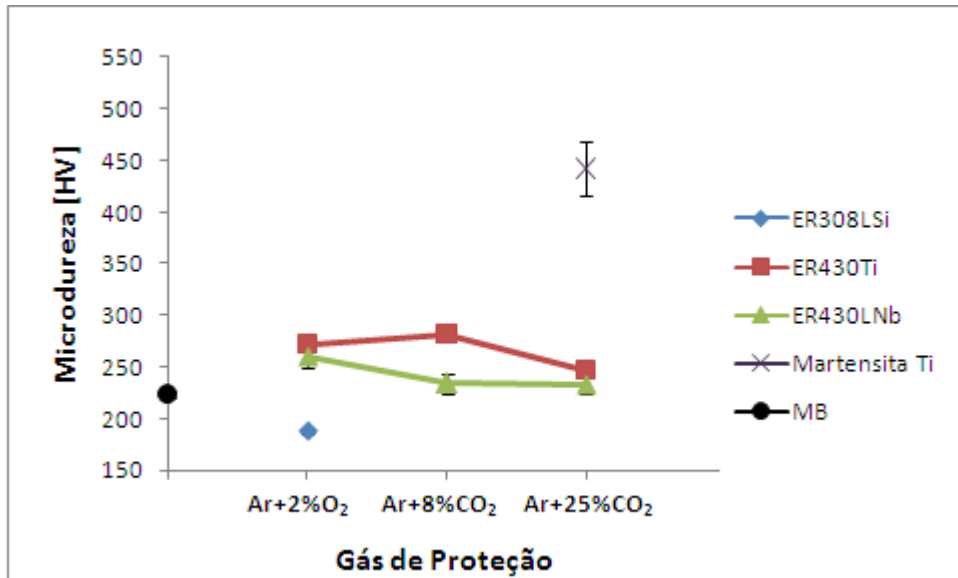


Figura 6.53. Microdurezas medidas nas matrizes austenítica ou ferrítica e martensita da zona fundida em função do gás de proteção utilizado, após o ensaio de embutimento dos corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932

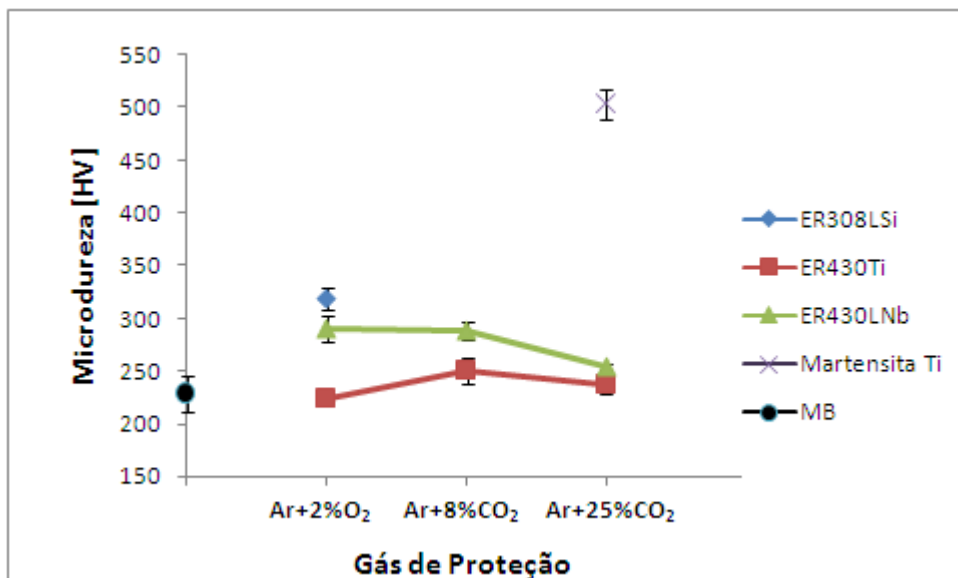


Figura 6.54. Microdureza medidas nas matrizes austenítica ou ferrítica e martensita da zona fundida em função do gás de proteção utilizado, após o ensaio de embutimento dos corpos de prova soldados no metal de base AISI 441

A Tabela 6.25 apresenta as medidas de microdureza realizadas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada, próximo a região de maior deformação, dos corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932 e AISI 441, após o processo de embutimento. Comparando com as medidas de microdureza realizadas na zona termicamente afetada dos corpos de prova soldados antes do processo de embutimento, nota-se que houve um aumento destes valores, que também ocorreram provavelmente devido ao encruamento que o material sofreu durante o processo.

Tabela 6.25. Medidas de Microdureza realizadas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada para o metal de base UNS43932 estampado

Gás de Proteção	Microdureza [HV]			
	UNS 43932		AISI 441	
	Média	Desvio	Média	Desvio
ER308LSi	325,0	36,3	264,7	22,7
ER430Ti	265,0	6,2	228,0	12,0
	247,3	5,8	234,7	2,1
	210,0	6,2	244,7	3,5
ER430LNb	262,7	21,5	257,7	2,5
	240,0	6,6	277,3	16,2
	231,7	5,5	334,7	10,8

As Figuras 6.55 e 6.56 apresentam os gráficos das medidas de microdureza realizadas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada dos corpos de prova soldados respectivamente no metal de base UNS 43932 e AISI 441 após o processo de embutimento. Nota-se que não ocorreram variações significativas nos valores encontrados da microdureza com alterações no gás de proteção após o processo de embutimento. Principalmente para o ER308LSi observa-se um maior valor de microdureza em relação aos demais metais de adição, que provavelmente está relacionado ao maior encruamento ocasionado pelos grandes deslocamentos do punção, gerando grandes deformações na zona termicamente afetada.

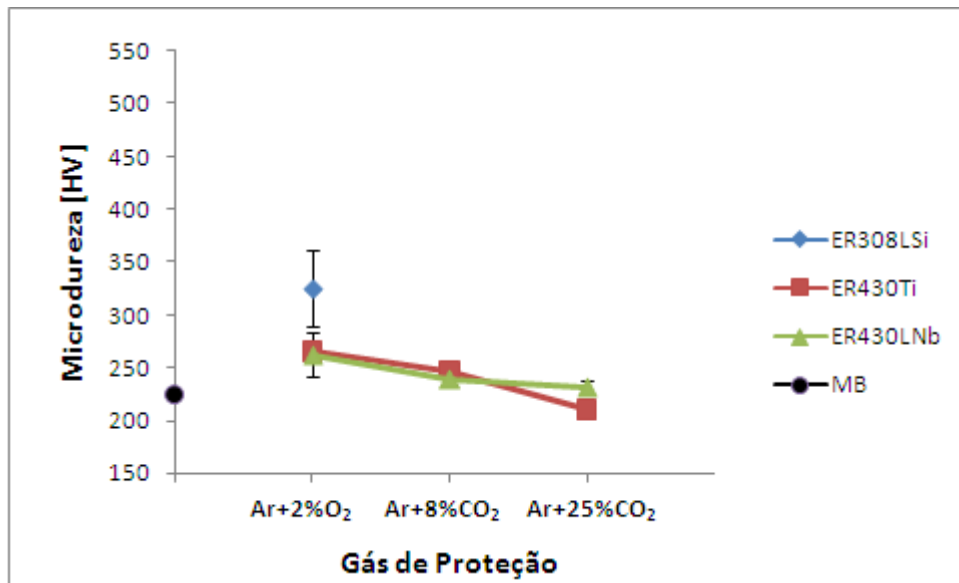


Figura 6.55. Microdurezas medidas nas matrizes austenítica ou ferrítica da zona termicamente afetada em função do gás de proteção utilizado, após o ensaio de embutimento dos corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932

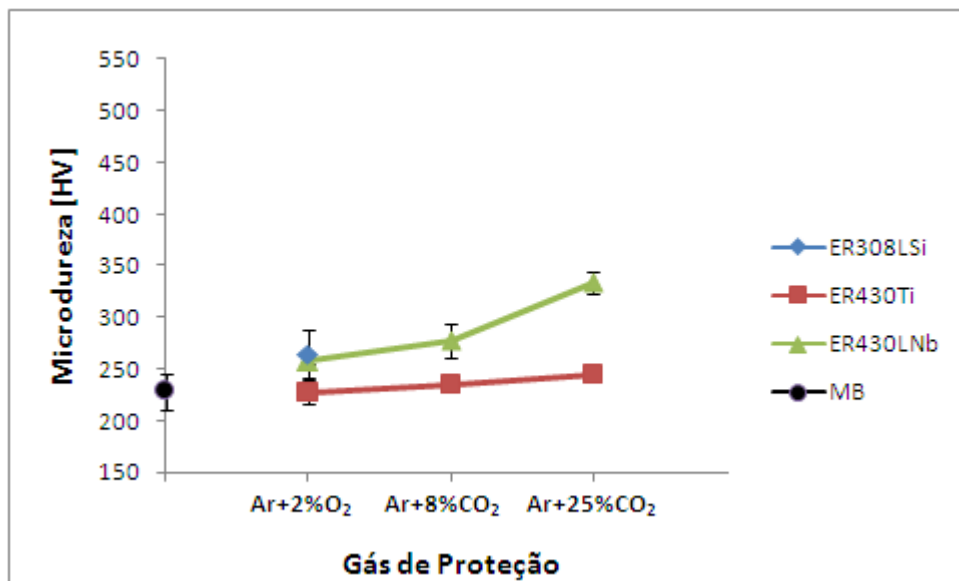


Figura 6.56. Microdurezas medidas nas matrizes ferrítica da zona termicamente afetada em função do gás de proteção utilizado, após o ensaio de embutimento dos corpos de prova soldados no metal de base AISI 441

Logo, retirando pequenos aumentos de microdureza, relacionados ao encruamento do material, não se observou variações significativas neste quesito com o acréscimo do dióxido de carbono no gás de proteção após o ensaio de embutimento.

6.4. Síntese dos resultados do Capítulo

Buscou-se neste capítulo realizar uma caracterização mecânica das juntas soldadas por meio de ensaios de tração, dobramento e embutimento realizados nos corpos de prova dos dois metais de base, soldados com os três metais de adição e os cinco tipos de gás de proteção. Os ensaios de tração possuíam o objetivo de avaliar se as soldadas haviam sido realizadas adequadamente (isentas de defeitos), os ensaios de dobramento e embutimento foram realizados com o objetivo de avaliar a ductilidade da junta soldada e avaliar a influência do gás de proteção neste quesito. Desta análise podem-se fazer as seguintes considerações:

- Não ocorreram variações significativas no limite de resistência dos corpos de prova soldados no ensaio de tração, independentemente do metal de base, metal de adição e gás de proteção utilizado, ficando os valores encontrados similares aos encontrados para os metais de base, aproximadamente 430 MPa.

- Não se observaram variações na força (que ficaram em aproximadamente 1,7 kN) e energia (em média de 22 J) para os ensaios de dobramento realizados com os metais de adição ER308LSi e ER430LNb, independentemente do gás de proteção utilizado. Para o metal de adição ER430Ti, até 8% de dióxido de carbono também não se observaram também variações na força e energia, ficando os valores encontrados próximos aos anteriores. Entretanto, observaram-se quedas na força (aproximadamente 1,3 kN) e energia (aproximadamente 10 J) para realizar o dobramento dos corpos de prova soldados com o metal de adição e ER430Ti com 25% de dióxido de carbono para os dois metais de base estudados, evidenciando-se uma fragilidade da solda com este gás de proteção, podendo-se relacioná-la com a formação de martensita na zona fundida evidenciada no Capítulo V.

- As ductilidades das juntas soldadas com os metais de adição ER308LSi e ER430LNb, avaliadas por meio do ensaio de embutimento, não apresentaram uma tendência com o acréscimo de dióxido de carbono em mistura no gás de proteção, ficando em média o deslocamento realizado pelo punção, que é o método mais utilizado para se medir o índice de embutimento, em 12 mm. Estes resultados condizem com o que se foi apresentado no Capítulo III, uma vez que não se observaram variações microestruturais e de microdureza significativas em função do gás de proteção para estes metais de adição. Porém, para as juntas soldadas com o metal de adição ER430Ti observou-se uma queda da ductilidade, evidenciada por uma diminuição linear do deslocamento do punção com o aumento de dióxido de carbono em mistura no gás de proteção, variando de aproximadamente 12 mm ao se soldar com argônio até 4 mm ao se soldar com 25% de

dióxido de carbono. Pode-se relacionar esta diminuição da ductilidade da junta soldada ao aumento da quantidade de precipitados, que provocaram um aumento da microdureza na zona fundida com o acréscimo do dióxido de carbono em mistura no gás de proteção e também a formação de martensita na soldagem com 25% de dióxido de carbono.

- As avaliações microestruturais e de microdureza realizadas nos corpos de prova após o ensaio de embutimento não apresentaram variações microestruturais, porém, apresentaram pequenos aumentos de microdureza que podem ser relacionados ao encruamento sofrido pelo material durante o embutimento.

CAPÍTULO VII

ENSAIO DE CORROSÃO INTERGRANULAR

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de corrosão intergranular realizados nos cordões (zona fundida) soldados com o metal de adição de aço inoxidável austenítico ER308LSi e gás de proteção Ar+2%O₂ e com os metais de adição de aço inoxidável ferrítico ER430Ti e ER430LNb e gases de proteção Ar+2%O₂, Ar+8%CO₂ e Ar+25%CO₂ nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.

Para avaliar a perda por passivação foi realizado o ataque eletroquímico, seguido de uma análise microestrutural. Esta análise foi utilizada para avaliar a resistência da zona fundida das juntas soldadas à corrosão intergranular. Contudo, como gera resultados qualitativos, tornou-se necessário então, a aplicação associada do ensaio DL-EPR (*Double Loop Electrochemical Potentionkinetic Reactivation*), para avaliar quantitativamente a suscetibilidade da junta soldada ao ataque intergranular.

As análises foram realizadas somente na zona fundida, pois esta é a região foco deste estudo, além da corrosão intergranular ser a principal forma de corrosão que ocorre tanto em regiões da zona termicamente afetada próximas a zona fundida e também nesta região. Uma forma de se minimizar esta corrosão é utilizando elementos estabilizantes (nióbio e titânio), logo a motivação deste ensaio é analisar a estabilização do metal de solda, quando diluído com o metal de base bi-estabilizado e, principalmente, analisar a influência da utilização de altos teores de dióxido de carbono na formação de carbonetos de cromo devido ao aumento do carbono (elemento intersticial) no metal soldado que ocorre devido a adição de dióxido de carbono no gás de proteção.

7.1. Procedimento para análise da corrosão intergranular

Inicialmente atacaram-se os corpos de prova em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %, com o objetivo de auxiliar na posterior classificação das microestruturas observadas como sendo “step” (limite de contornos de grãos não envoltos por carboneto de cromo), “dual” (alguns contornos com “ditches”, somado a “steps”, mas sem nenhum grão completamente contornado por “ditches”) ou “ditch” (um ou mais grãos completamente envoltos por carboneto de cromo).

Como estes ensaios são qualitativos, aplicou-se associadamente o ensaio DL-EPR, para avaliar quantitativamente a suscetibilidade da junta soldada ao ataque intergranular. Para este ensaio utilizou-se uma célula convencional eletroquímica de três eletrodos colocados dentro de uma solução eletrolítica 0,05 M H_2SO_4 (ácido sulfúrico) + 0,01 M KSCN (tiocianato de potássio), conforme procedimento apresentado no item 3.3.7 do Capítulo III. O eletrodo de trabalho foi construído com as amostras da zona fundida dos aços inoxidáveis austenítico e ferríticos estudados.

O método DL-EPR é baseado na estabilidade de um estado passivo que depende do cromo contido na solução sólida, detectando assim a principal causa da corrosão intergranular, ou seja, o empobrecimento de cromo na matriz, que ocorre através da precipitação de complexos carbonetos de cromo. O resultado deste ensaio é apresentado na forma de duas curvas levantadas em um gráfico. Uma curva é referente à polarização anódica e a outra à polarização reversa. Os picos de cada curva correspondem aos valores máximos de corrente (I) alcançados. A razão I_a/I_r determina o nível de sensibilização que ocorreu no material.

Conforme discutido na revisão bibliográfica, segundo Majidi; Streicher (1986), taxas de corrente (I_a/I_r) com valores menores que 0,001 correspondem à estrutura “step” isentas de precipitação. Taxas entre 0,001 e 0,05 indicam uma estrutura do tipo “dual”, na qual alguns precipitados são observados, mas não circundam completamente o grão. Taxas maiores que 0,05 correspondem a uma estrutura “ditches”, com os grãos completamente circundados por carbonetos de cromo. Contudo, esta relação aplica-se para materiais austeníticos com tamanho de grão ASTM em torno de 3,5 e, segundo Silva et al. (2005), estas relações para os aços inoxidáveis ferríticos geraram discrepâncias quando comparadas com as estruturas obtidas. Não foi encontrada na literatura uma padronização específica para os aços inoxidáveis ferríticos.

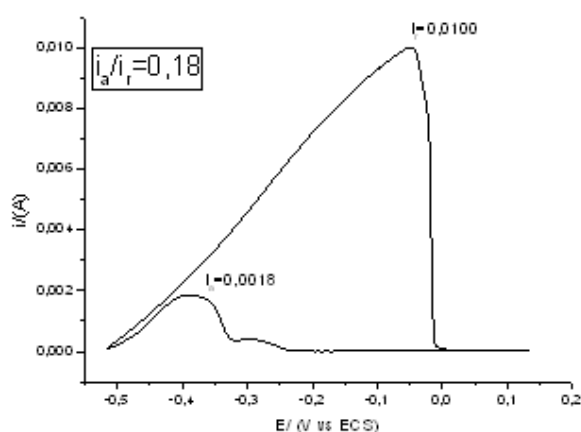
A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de corrosão intergranular realizados, seguidas de uma comparação dos resultados de DL-EPR obtidos.

7.2. Resultados dos ensaios de corrosão intergranular

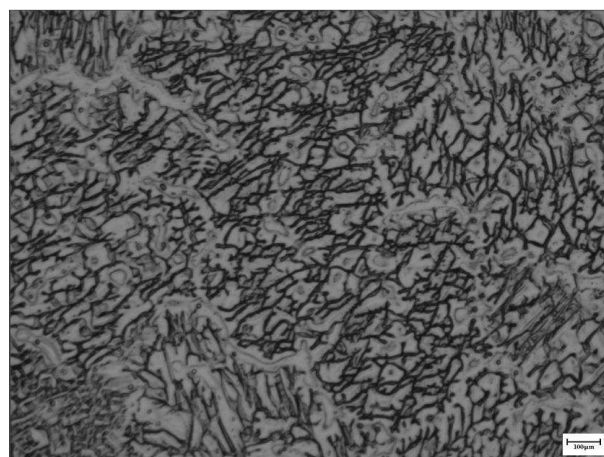
Os resultados apresentados abaixo foram divididos em três subitens, sendo os mesmos classificados conforme o metal de adição utilizado para a confecção do corpo de prova a ser ensaiado.

7.2.1. ER308LSi

A Figura 7.1 apresenta (a) o gráfico da curva referente à polarização anódica e à polarização reversa, com a razão I_a/I_r e (b) a microestrutura com 500 vezes de aumento do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %, para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O₂ no metais de base UNS 43932.



a



b

Figura 7.1. Amostra da junta soldada com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O₂ no metal de base UNS 43932 (a) gráfico da curva referente à polarização anódica e reversa, com a razão I_a/I_r e (b) a microestrutura do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %

Analisando a Figura 7.1 (b), observa-se, com base na composição química do material, ataque realizado e em literatura corrente (Madeira (2007) e Silva et al. (2005)), um ou mais grãos completamente envolvidos por carboneto de cromo, principalmente observado nos veios de ferrita, ou seja, é possível afirmar que se têm uma estrutura de "ditch". Como a relação das taxas de corrente (I_a/I_r) para esta situação é de um valor de 0,18 (Figura 7.1 (a)) e é superior a 0,05 correspondem a uma estrutura "ditch", com os grãos completamente circundados por carbonetos de cromo, concordando com o que foi observado na

microestrutura. A Figura 7.2 apresenta o mesmo ensaio realizado na Figura 7.1, mas com uma ampliação maior para auxiliar na detecção das fases.

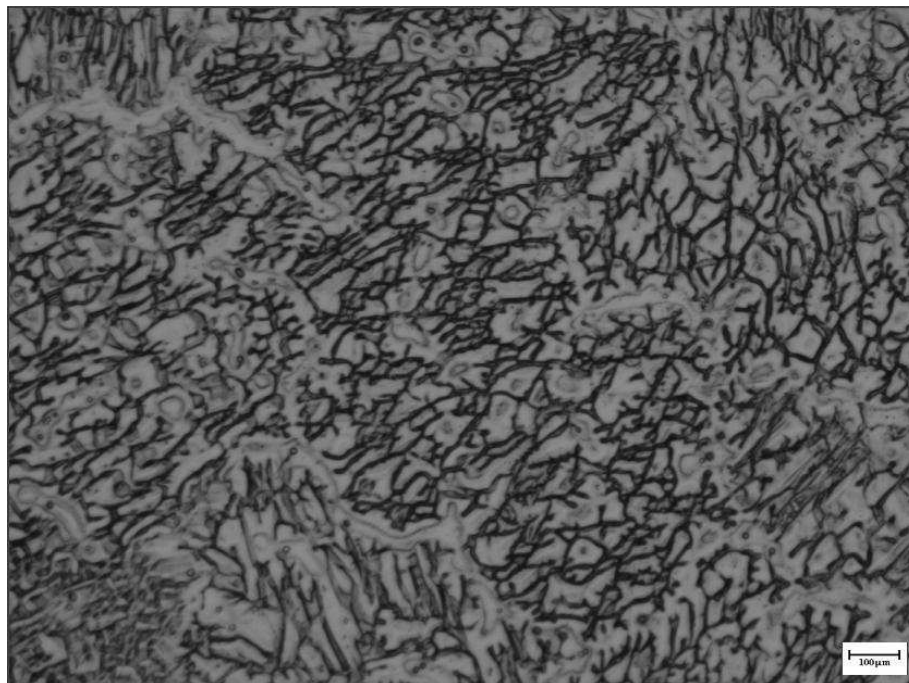


Figura 7.2. Amostra da junta soldada com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O₂ no metal de base UNS 43932 atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %

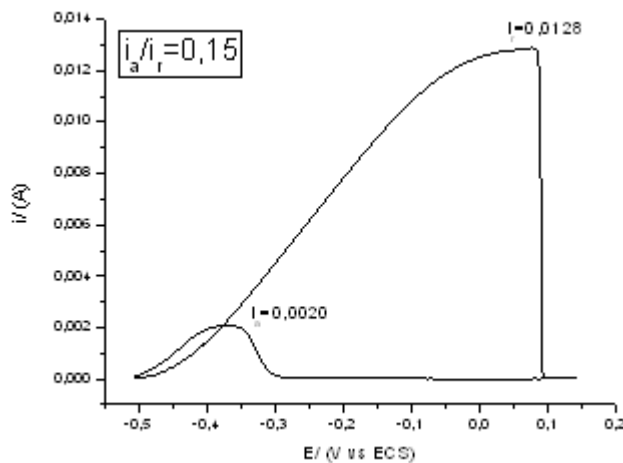
Realizando análise similar, quando se soldou com no metal de base AISI 441, conforme se observa na Figura D.1 (b) do Anexo D, também se verifica um ou mais grãos completamente envoltos por carboneto de cromo e uma taxa de corrente (I_a/I_r) para esta situação de 0,13, que também é superior a 0,05 correspondem, portanto, a uma estrutura “ditch”. Comparativamente, se observa que o nível de sensitização (I_a/I_r) para o material soldado no metal de base UNS 43932 foi superior ao soldado no metal de base AISI 441, isso se deve, provavelmente, a melhor estabilização deste último metal de base.

Segundo Modenesi (2001) a corrosão intergranular ocorre principalmente na zona termicamente afetada em regiões mais afastadas da zona fundida e em materiais com teores de carbono superiores a 0,03% e que não sejam estabilizados (que não contenham titânio e nióbio). Não existem na literatura muitos estudos sobre a corrosão intergranular na zona fundida dos aços inoxidáveis austeníticos. A justificativa para a ocorrência desta corrosão é que as quantidades de titânio e nióbio contidos no metal de base e metal de adição não foram suficientes para impedir a precipitação dos carbonetos de cromo, logo, provavelmente há um empobrecimento de cromo nas regiões próximas aos veios de ferrita.

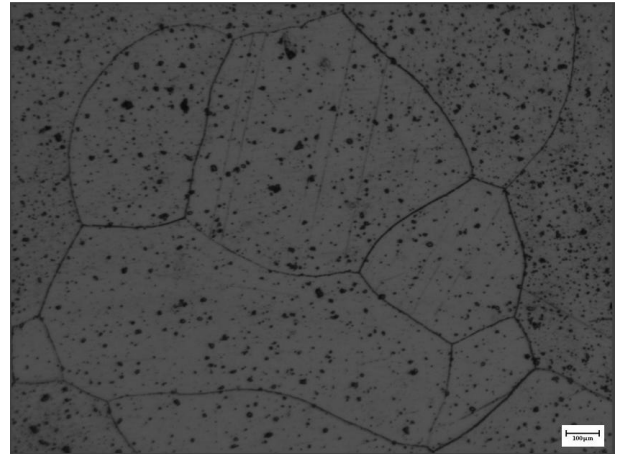
7.2.2. ER430Ti

As Figuras 7.3, 7.4 e 7.5 apresentam (a) o gráfico da curva referente à polarização anódica e à polarização reversa, com a razão i_a/i_r e (b) a microestrutura com 500 vezes de aumento do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %, para os corpos de prova soldados no metal de base UNS43932, com o metal de adição ER430Ti e, respectivamente, os gases de proteção Ar+2%O₂, Ar+8%CO₂ e Ar+25%CO₂.

Na Figura 7.3 (b) observam-se alguns contornos com “ditches”, somado a “steps”, mas sem nenhum grão completamente contornado por “ditches” caracterizando-se uma estrutura “dual”. A relação das taxas de corrente (i_a/i_r) teve um valor de 0,15 (Figura 7.3 (a)) e é superior a 0,05 correspondem a uma estrutura “ditch”, com os grãos completamente circundados por carbonetos de cromo, concordando com o que foi observado na microestrutura. Conforme observado por Silva et al. (2005) a padronização das taxas de corrente com a estrutura obtida é para materiais austeníticos com tamanho de grão ASTM em torno de 3,5, sendo que em seu trabalho também observaram discrepâncias entre as estruturas obtidas (observadas em sua microestrutura) e os valores encontrados pelo método DL-EPR no trabalho de Majidi; Streicher (1986).

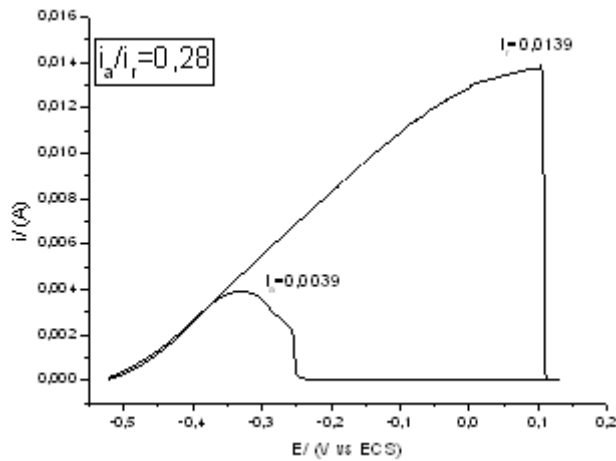


a

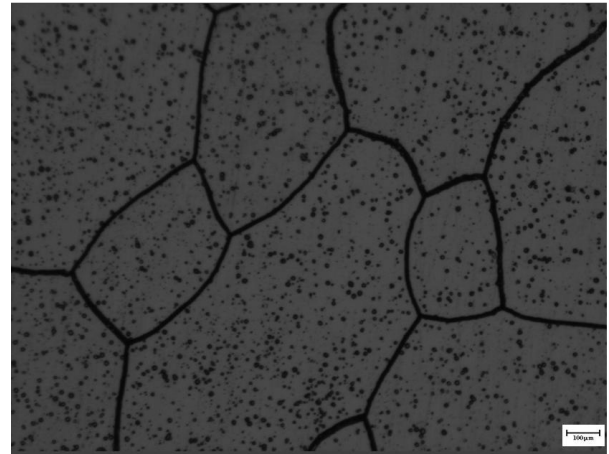


b

Figura 7.3. Amostra da junta soldada com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+2%O₂ no metal de base UNS 43932 (a) gráfico da curva referente à polarização anódica e reversa, com a razão i_a/i_r e (b) a microestrutura do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %

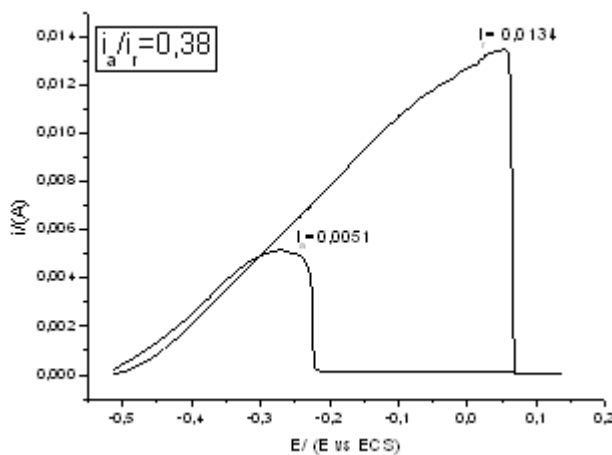


a

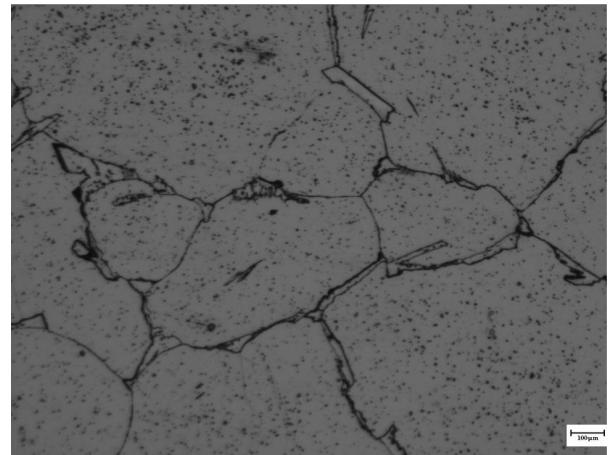


b

Figura 7.4. Amostra da junta soldada com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+8%CO₂ no metal de base UNS 43932 (a) gráfico da curva referente à polarização anódica e reversa, com a razão i_a/i_r e (b) a microestrutura do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %



a



b

Figura 7.5. Amostra da junta soldada com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+25%CO₂ no metal de base UNS 43932 (a) gráfico da curva referente à polarização anódica e reversa, com a razão i_a/i_r e (b) a microestrutura do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %

Moreira (2009) soldando o aço inoxidável ferrítico UNS43932 com arame tubular bi-estabilizado ao nióbio e titânio com o gás de proteção Ar+2%O₂ não observou corrosão intergranular. Provavelmente a discrepância dos valores encontrados pelo o autor quando comparados com os resultados obtidos neste trabalho deve estar relacionada à maior

estabilidade do metal de adição, principalmente ao nióbio, uma vez que Casteletti et. al. (2008) realizaram testes de corrosão em materiais de aço inoxidável ferrítico e observaram que o material que não possuiu uma estabilização adequada ao nióbio torna-se mais susceptível que os demais aços inoxidáveis estudados.

Para os gases de proteção Ar+8%CO₂ e Ar+25%CO₂ apresentados respectivamente nas Figuras 7.4 e 7.5 (b) observa-se um ou mais grãos completamente envoltos por carboneto de cromo, ou seja, é possível afirmar que se tem uma estrutura de “ditch”. As taxas de corrente (I_a/I_r) encontradas para Ar+8%CO₂ e Ar+25%CO₂ foram respectivamente de 0,28 (Figura 7.4 (a)) e 0,38 (Figura 7.5 (a)) e correspondentes a uma estrutura “ditch”.

Os ensaios realizados nos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti no metal de base AISI 441 são apresentados nas Figuras D.2, D.3 e D.4. Similarmente ao que foi observado para o metal de base UNS 43932 observaram-se um ou mais grãos completamente envoltos por carboneto de cromo, ou seja, é possível afirmar que se têm uma estrutura de “ditch”. As taxas de corrente (I_a/I_r) encontradas para Ar+2%O₂, Ar+8%CO₂ e Ar+25%CO₂ foram respectivamente de 0,18, 0,34 e 0,38.

A formação das estruturas “ditches” próximas aos contornos de grão se deve a precipitação dos carbonetos de cromo, que empobrecem o cromo nesta região. A ocorrência deste empobrecimento se deve aos elementos intersticiais que aumentam na região soldada, seja o nitrogênio devido à própria solda ou ao carbono introduzido com o acréscimo de dióxido de carbono. Além disso, conforme apresentado no item 3.1.2 do Capítulo III, há uma estabilização inadequada do metal de adição (quantidade insuficiente de titânio para prevenir o aumento dos elementos intersticiais), gerando assim maiores quantidades de carbonetos de cromo, diminuindo ainda mais a quantidade de cromo nos contornos do grão, deixando o material ainda mais susceptível à corrosão intergranular.

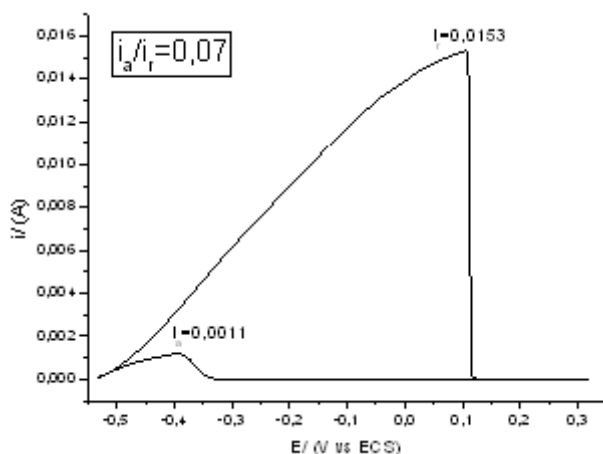
7.2.3. ER430LNb

As Figuras 7.6, 7.7 e 7.8 apresentam (a) o gráfico da curva referente à polarização anódica e à polarização reversa, com a razão I_a/I_r e (b) a microestrutura com 500 vezes de aumento do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %, para os corpos de prova soldados no metal de base UNS43932, com o metal de adição ER430LNb e respectivamente os gases de proteção Ar+2%O₂, Ar+8%CO₂ e Ar+25%CO₂.

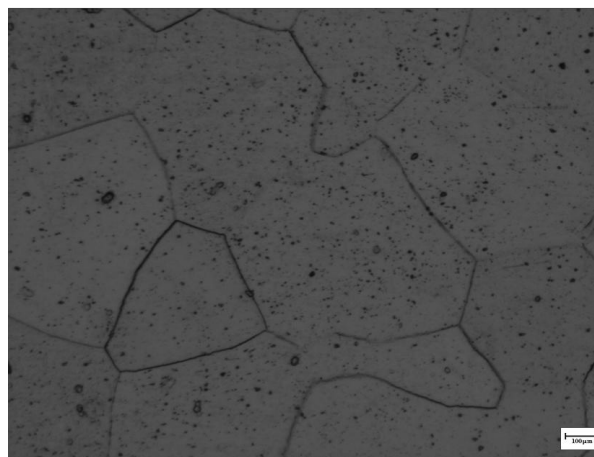
Nas Figuras 7.6 (Ar+2%O₂) e 7.7 (b) (Ar+8%CO₂) observam-se alguns contornos com “ditches”, somado a “steps”, mas sem nenhum grão completamente contornado por “ditches” caracterizando-se uma estrutura “dual”. Para a relação das taxas de corrente (I_a/I_r) encontrou-se valores de 0,07 e 0,12 que são superiores a 0,05 correspondem a uma

estrutura “ditch”, com os grãos completamente circundados por carbonetos de cromo, concordando com o que foi observado na microestrutura.

Para o gás de proteção Ar+25%CO₂ apresentado na Figura 7.8 (b) observa-se um ou mais grãos completamente envoltos por carboneto de cromo, ou seja, é possível afirmar que se têm uma estrutura de “ditch”. A taxa de corrente (i_a/i_r) encontrada foi de 0,18 (Figura 7.8 (a)) e correspondente a uma estrutura “ditch”. Apesar de Moreira (2009), conforme já discutido, não ter observado corrosão intergranular dos cordões de solda do aço inoxidável ferrítico UNS43932 e Casteletti et. al. (2008) terem observado maiores resistências a este tipo de corrosão de materiais com uma estabilização adequada ao nióbio esta corrosão ocorreu devido às grandes quantidades de carbono introduzidas na junta soldada pelo gás de proteção Ar+25%CO₂, conforme discutido por Liao; Chen (1998).

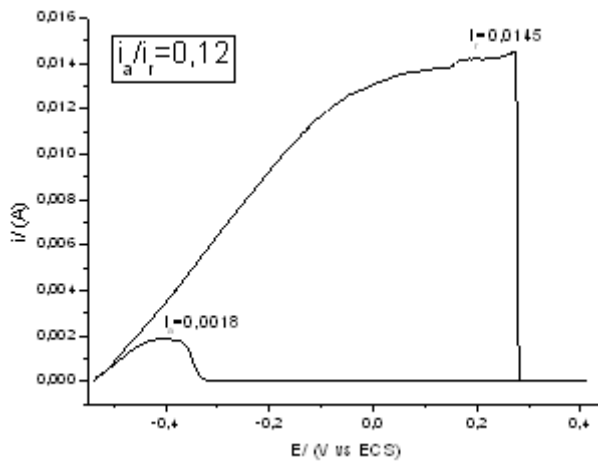


a

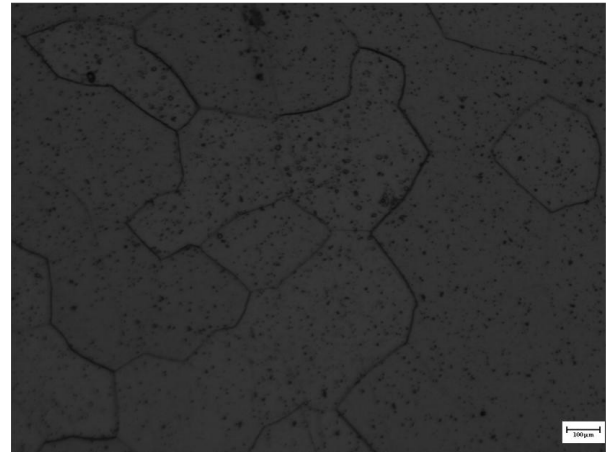


b

Figura 7.6. Amostra da junta soldada com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+2%O₂ no metal de base UNS 43932 (a) gráfico da curva referente à polarização anódica e reversa, com a razão i_a/i_r e (b) a microestrutura do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %

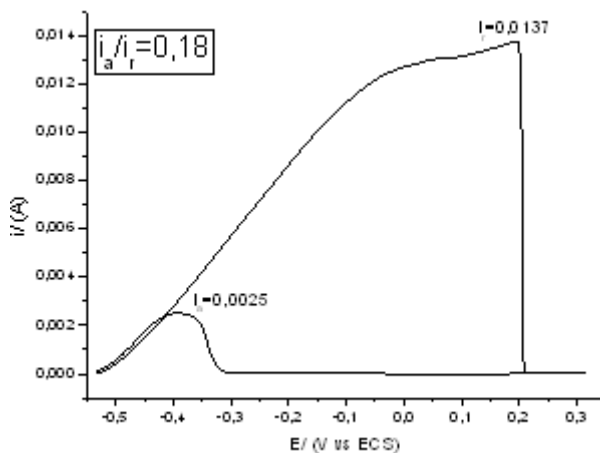


a

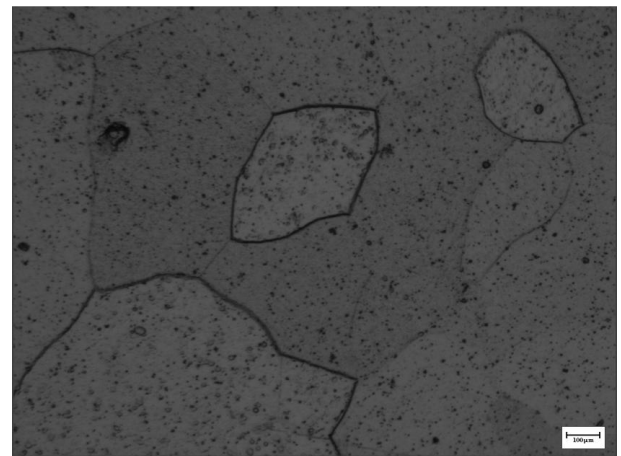


b

Figura 7.7. Amostra da junta soldada com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+8%CO₂ no metal de base UNS 43932 (a) gráfico da curva referente à polarização anódica e reversa, com a razão i_a/i_r e (b) a microestrutura do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %



a



b

Figura 7.8. Amostra da junta soldada com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+25%CO₂ no metal de base UNS 43932 (a) gráfico da curva referente à polarização anódica e reversa, com a razão i_a/i_r e (b) a microestrutura do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %

Uma análise similar pode ser realizada para as amostras soldadas no metal de base AISI 441 apresentadas nas Figuras D.5 (Ar+2%O₂), D.6 (Ar+8%CO₂) e D.7 (b) (Ar+25%CO₂) do Anexo D, onde para as duas primeiras situações observam-se alguns contornos com

“ditches”, somado a “steps”, mas sem nenhum grão completamente contornado por “ditches” caracterizando-se uma estrutura “dual” e para a última situação observa-se um ou mais grãos completamente envoltos por carboneto de cromo, ou seja, é possível afirmar que se têm uma estrutura de “ditch”. A formação da estrutura “ditch” próxima aos contornos de grão se deve ao carbono introduzido com o acréscimo de dióxido de carbono.

7.3. Análise comparativa dos ensaios de DL-EPR

Para os ensaios realizados com o metal de adição de aço inoxidável austenítico ER308LSi as relações entre as taxas de corrente (I_a/I_r) e as estruturas propostas por Majidi e Streicher (1986) foram semelhantes ao encontrado nesse trabalho. Para os demais metais de adição os valores das relações de taxas de corrente e nível de corrosão observado pela microestrutura não condiziam com o que foi proposto por Majidi e Streicher (1986).

Para os ensaios realizados com os metais de adição de aço inoxidável ferrítico ER430Ti e ER430LNb, observou-se uma estrutura de “ditch” somente quando as relações entre as taxas de corrente (I_a/I_r) foram superiores a 0,18, ficando diferente do que foi proposto por Majidi e Streicher (1986), que afirmavam que a estrutura de “ditch” ocorria para valores superiores a 0,05.

A Tabela 7.1 apresenta os resultados da relação I_a/I_r dos testes DL-EPR realizados em todas as condições estudadas, mostrando como o gás de proteção influenciou no nível de sensibilização da zona fundida.

As Figuras 7.9 e 7.10 apresentam as relações I_a/I_r em função do gás de proteção para respectivamente os corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932 e AISI 441. Para os dois metais de base soldados observa-se maiores valores de nível de sensibilização para o metal de adição ER430Ti em relação ao metal de adição ER430LNb, independentemente do gás de proteção utilizado. Isto ocorreu provavelmente devido a estabilização incorreta do metal de adição ER430Ti. Bond; Lislovz (1969) verificaram a resistência à corrosão intergranular aceitável para amostras soldadas contendo 0,61% ou mais de nióbio foram altamente resistentes à corrosão. Para um teor de nióbio de 0,93%, este material apresentou uma discreta suscetibilidade à corrosão intergranular. Casteletti et. al. (2008) realizaram testes de corrosão em materiais fabricados pelos próprios autores e observaram que o material que não possuiu uma estabilização adequada ao nióbio tornou-se mais susceptível.

Tabela 7.1. Valores das relações I_a/I_r para o teste DL-EPR realizados nas zonas fundidas dos corpos de prova soldados com os ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb nos metais de base UNS43932 e AISI 441

MB	Metal de Adição	Gás de Proteção	I_a/I_r
UNS 43932	ER308LSi	Ar+2%O ₂	0,18
		Ar+2%O ₂	0,15
	ER430Ti	Ar+8%CO ₂	0,28
		Ar+25%CO ₂	0,38
	ER430LNb	Ar+2%O ₂	0,07
		Ar+8%CO ₂	0,12
		Ar+25%CO ₂	0,18
AISI 441	ER308LSi	Ar+2%O ₂	0,13
		Ar+2%O ₂	0,18
	ER430Ti	Ar+8%CO ₂	0,34
		Ar+25%CO ₂	0,38
	ER430LNb	Ar+2%O ₂	0,11
		Ar+8%CO ₂	0,15
		Ar+25%CO ₂	0,18

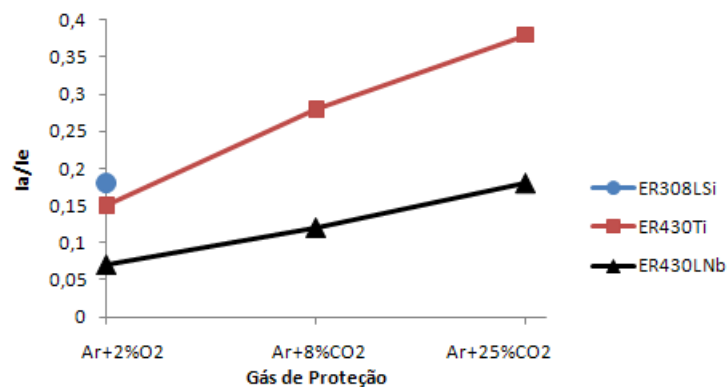


Figura 7.9. Nível de sensitação em função do gás de proteção para cordões soldados com os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb no metal de base UNS 43932

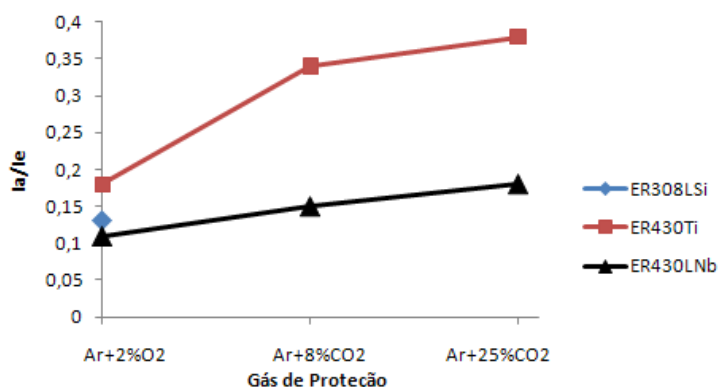


Figura 7.10. Nível de sensitização em função do gás de proteção para cordões soldados com os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb no metal de base AISI 441

Para os dois metais de base estudados (nas condições de soldagem deste trabalho) houve um aumento do valor da relação I_a/I_e com o aumento do dióxido de carbono contido no gás de proteção utilizado para os dois metais de adição de aço inoxidável ferrítico (ER430Ti e ER430LNb), mostrando que há um aumento da corrosão intergranular devido ao aumento da presença de carbono no metal soldado. Este aumento da quantidade de carbono na zona fundida, provavelmente gera maiores quantidades de carboneto de cromo, diminuindo assim a quantidade de cromo nos contornos de grão, deixando o material mais susceptível a corrosão intergranular.

Nota-se ainda que o aumento do nível de sensitização é muito maior com o acréscimo de dióxido de carbono para o metal de adição ER430Ti. Este fato está relacionado à estabilização inadequada do metal de adição (quantidade insuficiente de titânio para estabilizá-lo), gerando assim maiores quantidades de carbonetos de cromo, diminuindo ainda mais a quantidade de cromo nos contornos do grão, deixando o material ainda mais susceptível à corrosão intergranular. Utilizando-se as estimativas dos elementos químicos presentes no cordão de solda (ZF) realizados pelo diagrama de Schaeffler e apresentados no Capítulo V e por meio da Equação 2.3, Capítulo II, realizaram-se os cálculos estequiométricos (não utilizando o nitrogênio) para os cordões de soldados com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS 43932 e AISI 441, que apresentaram um ΔTi de respectivamente 0,012 e -0,021, verificando-se que a estabilização não é adequada. Os mesmos cálculos foram realizados com os cordões soldados com o metal de adição ER430LNb e observaram-se ΔNb de 0,192 e 0,302 para os mesmos metais de base, mostrando que realmente há uma melhor estabilização com este metal de adição.

Bond; Lislovz (1969) analisaram o efeito da adição de Ti através de teste de Strauss. Verificaram que adições de titânio maiores que 0,47% preveniram completamente a

corrosão intergranular após tratamento térmico. Para ligas contendo mais que 1,2% Ti, estes aços apresentaram-se frágeis depois de tratamento a 800°C. Verificaram que esta fragilização pode ter ocorrido pela formação de fase sigma ou uma outra segunda fase frágil.

Madeira (2007) ao realizar ensaios para avaliar a sensitização na zona fundida de corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti por meio de um ataque eletrolítico com ácido oxálico, seguido de uma análise microestrutural observou corrosão quando utilizaram-se gases ativos para a soldagem do material, condizendo com os resultados que foram obtidos neste trabalho.

6.4. Síntese dos resultados do Capítulo

Buscou-se neste capítulo realizar uma análise de corrosão intergranular na zona fundida soldada com o metal de adição de aço inoxidável austenítico ER308LSi e gás de proteção Ar+2%O₂ e com os metais de adição de aço inoxidável ferrítico ER430Ti e ER430LNb e gases de proteção Ar+2%O₂, Ar+8%CO₂ e Ar+25%CO₂. Foram realizadas caracterizações microestruturais da corrosão intergranular de amostras atacadas pela solução de cristais de ácido oxálico a 10 %, além de mensurar o nível de sensitização pelo método DL-EPR. Desta análise podem-se fazer as seguintes considerações:

- As zonas fundidas soldadas com o metal de adição ER308LSi apresentaram uma corrosão intergranular envolvendo de forma completa um ou mais grãos e ficando o nível de sensitização em aproximadamente 0,18.

- Observou-se aumento significativo do nível de sensitização da zona fundida soldada com o metal de adição ER430Ti com o acréscimo de dióxido de carbono, ficando este nível de sensitização entre 0,15 e 0,38. As microestruturas apresentaram contornos de grão completamente envolvidos por corrosão intergranular. Estes fatos podem ser correlacionados à estabilização inadequada do metal de adição, conforme apresentado no Capítulo III e verificado na caracterização microestrutural (Capítulo V), sendo a quantidade de titânio insuficiente para impedir a formação de carbonetos de cromo e consequente empobrecimento de cromo nos contornos de grão. O aumento da sensitização com o acréscimo de dióxido de carbono em mistura no gás de proteção está relacionado com a maior introdução de carbono na junta soldada, propiciando aumento da quantidade de carbonetos de cromo formados.

- Não ocorreram corrosões intergranulares envolvendo completamente os contornos de grão da zona fundida ao se soldar com o metal de adição ER430LNb. Houve um ligeiro aumento do nível de sensitização com o aumento da quantidade de dióxido de carbono no

gás de proteção, mas os valores ficaram abaixo (entre 0,07 e 0,18) dos encontrados para a ZF soldada com o ER308LSi. Este menor nível de sensitização pode ser relacionado à estabilização adequada do metal de adição, inibindo de forma mais eficaz a formação dos carbonetos de cromo.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nesta tese foi possível chegar as seguintes conclusões:

- Não ocorreram variações no tamanho de grão e na microdureza da zona termicamente afetada independentemente do metal de adição e gás de proteção utilizados. Houve um pequeno aumento da microdureza na matriz ferrítica da zona termicamente afetada do metal de base AISI 441 quando comparado com o UNS 43932.
- A microestrutura da zona fundida dos dois metais de base soldado com o metal de adição ER 430LNb foi composta de uma matriz ferrítica e precipitados no interior do grão independente do gás de proteção utilizado. Observou-se apenas um aumento da quantidade de precipitados com o aumento de dióxido de carbono.
- Ao se soldar com o metal de adição ER430Ti e gás de proteção com 25 % de dióxido de carbono ocorreu formação de martensita nos contornos de grãos da ferrita. Para as demais combinações de metal de adição e gás de proteção não observou-se a formação de martensita.

- Não ocorreram variações significativas no limite de resistência dos corpos de prova soldados, independentemente do metal de base, metal de adição e gás de proteção utilizados.
- Nos ensaios de dobramento dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti e gás de proteção Ar+25%CO₂ (ambos metais de base) ocorreram trincas na zona fundida, provavelmente devido a presença de martensita. Para as demais condições este fato não ocorreu.
- Os cordões soldados com o metal de adição ER430Ti apresentaram uma queda da ductilidade, medida pelo ensaio de embutimento, com o acréscimo de dióxido de carbono no gás de proteção. Os cordões soldados com os metais de adição ER308LSi e ER430LNb não apresentaram variações significativas da ductilidade independentemente do gás de proteção e metal de base utilizados.
- Nos ensaios de corrosão intergranular da zona fundida para o metal de adição ER430Ti foi constatado um elevado nível de sensitização com o acréscimo de dióxido de carbono no gás de proteção. Para o metal de adição ER430LNb este fato foi menos acentuado.

CAPÍTULO IX

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de complementar as informações obtidas neste trabalho são realizadas a seguir sugestões para aprimorar o estudo do efeito do gás de proteção na soldagem de aços inoxidáveis ferríticos:

1. Realizar análises similares às deste trabalho para os metais de adição 409 e 430 tubulares, pois eles já são empregados na indústria de exaustores automotivos (parte quente) brasileira, mas somente com o gás de proteção $\text{Ar}+2\%\text{O}_2$, necessitando, portanto de estudos da viabilidade da aplicação de gases de proteção com maiores teores de gases ativos.
2. Realizar um estudo não somente na zona fundida, mas também na zona termicamente afetada, realizando simulações de como a estrutura comportará durante os ensaios mecânicos e a variação da sensitização desta região.
3. Determinar a quantidade de nitrogênio presente no cordão de solda para uma análise detalhada da influência dos elementos intersticiais no cordão de solda com a variação do gás de proteção.
4. Estudar os motivos do aumento da diluição com a utilização do metal de adição ER430Ti, mesmo se utilizando uma mesma energia de soldagem.

5. Para o ensaio de dobramento analisar os efeitos da dureza, precipitados e tamanho de grão com a variação do gás de proteção para saber quem é mais influente.
6. Mapear os elementos presentes próximos à região que sofreu sensitização para quantificar a perda de cromo com o aumento de dióxido de carbono no gás de proteção, utilizando EDS e/ou outros métodos mais específicos para tal.
7. Realizar ensaios de corrosão nos cordões de solda pelos métodos “Hot Salt Test” (parte quente) e “Dip-Dry” (parte fria) para complementar as análises da influência do gás de proteção na corrosão dos cordões de solda de sistemas de exaustão automotivos obtidos neste trabalho.
8. Avaliar a influência do gás de proteção na junta soldada em termos de fadiga térmica, que é a segunda forma mais efetiva que leva os exaustores automotivos ao final de vida.
9. Para os aços utilizados inoxidáveis ferríticos simular ciclos de aquecimento em juntas soldadas e verificar formações da fase Laves, onde ela ocorrerá preferencialmente (ZF, ZTA ou MB) e estudar sua consequência nas propriedades mecânicas da junta soldada com a variação do gás de proteção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL, Barreira a ser quebrada, **Boletim Eletrônico do Centro de Informações Automotivo e de Transportes da ABAL**, São Paulo, v.14, n.10, 2006. Disponível em: < <http://www.abal.org.br/aluauto/ed10/entrevista.asp>>. Acesso em: 04 Out. 2010.

AKSOY, M.; KUZUCU, V.; KORKUT, M. H.; YILDIRIM, M. M. The effect of niobium and homogenization on the wear resistance and some mechanical properties of ferritic stainless steel containing 17-18wt.% chromium. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 91, p. 172-177, jun.1999.

ALVES, H.J.B.; CARVALHO, J.N.; AQUINO, M.V.; MANTEL, M.J, Development of ferritic stainless steels for automotive exhaust systems. In: 4th Stainless Steel Science and Market Congress, 4, June 2002, Paris, France. **Anais 4th Stainless Steel Science and Market Congress**, p.10-13.

ANDRADE, T. F. **Precipitação de fase de laves no aço inoxidável superferrítico 28%Cr-4%Ni-2%Mo-Nb**. 2006. 71 f. Dissertação de mestrado - Universidade de São Paulo. São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5902: **Determinação do índice de embutimento em chapas de aço pelo método Erichsen modificado**, Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6152: **Determinação das propriedades mecânicas à tração**, Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6153: **Dobramento em barras de aço com diâmetro até 20,00mm**, Rio de Janeiro, 1988.

AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook, Welding Processes**, 4, 8ª ed. USA, 1991.v. 1, 2, 955p.

BAIXO, C. E. I.; DUTRA, J. C. **Efeito do gás de proteção e modo de transferência na aplicação da liga 625 em aço carbono, Soldagem & Inspeção**. São Paulo, 2009. v. 14, n. 4, p. 313-319.

BENNETT, B. **Effects of Shielding Gas in Pulsed MIG Welding, Joining & Materials**, 1989. p. 38-40.

BOM, R.P.I.; KALNIN, A.F. Determinação da redução da resistência à tração em corpos de prova com Weld Line. **Revista Matéria**, v. 13, n. 2, p. 267 – 274, 2008

BOND, A. P.; LISLOVZ, E. A. Intergranular corrosion of Ferritic Stainless Steels. **Journal Electrochem Society**. v. 116, n. 9, p. 1305-1310, Set. 1969.

BUCHER, L.; **Etude de l'endommagement en fatigue thermique des aciers inoxydables F17TNb et R20-12 pour application automobile**. 2004. 147 f. Tese de Doutorado – CDM/École des Mines de Paris, Paris.

CAMPBELL, R. D. Ferritic Stainless Steel Welding Metalurgy: **Key Engeneering Materials**, Switzerland, v.69, v. 70, p.167-216. 1992.

CARDOSO, R. L.; PRADO, E. M.; OKIMOTO, P. C.; PAREDES, R. S. C., PROCOPIAK, L. A. Avaliação da Influência de Gases Proteção Contendo Diferentes Teores de CO₂ nas Características dos Revestimentos Soldados Visando o Reparo de Turbinas Erodidas por Cavitação. **Soldagem & Inspeção**, Ano 8, n. 2, Jun. 2003.

CASTELETTI, L. C.; FERNANDES, F. A. P.; LOMBARDI NETO, A.; PICON, C. A.; TREMILOSI FILHO, G. Avaliação da resistência a corrosão de aços inoxidáveis com Nb endurecíveis por precipitação. In: IX Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável, 9, 2008, São Paulo. **Anais IX Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável**. p. 144-148.

CAVAZOS, J. L. Characterization of Precipitates Formed in Ferritic Stainless Steel Stabilized With Zr and Ti Additions. **Materials Characterization**, n. 56, p.96-101, 2006.

CEDRÉ, E. D.; MORALES, F. R.; RICO, M. T.; CRESPO, A. C.; PÉREZ, M. R.; MÉNDEZ, T. M. O.; MOREJÓN, J. A. P. Disminución del Nivel de Salpicadura en las Soldadura GMAW con la Utilización de Mezclas de CO₂+O₂ como Gas de Protección. **Soldagem Inspeção**, v. 11, n. 1, p. 34-38, Jan/Mar 2006.

CHUNG, B.G.; RHEE, S.; LEE, C.H.; The effect of shielding gas types on CO₂ laser tailored blank weldability of low carbon automotive galvanized steel. **Materials Science and Engineerin**, n. A272, p.357-362, 1999.

CUNTO, J. C. **Estudo da resistência à corrosão de aços inoxidáveis para uso na parte fria dos sistemas de exaustão de veículos**. 2005, 105 f. Dissertação de mestrado - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, São Paulo.

DAVIS, J.R.; Stainless Steels (ASM Specialty Handbook). **ASM International**, p.366 1994.

FARIA, R. A. **Efeito dos elementos Ti e Nb no comportamento em fadiga em aços inoxidáveis ferríticos utilizados nos sistemas de exaustão de veículos automotores**, 2006. 245 f. Tese de doutorado – REDEMAT, Ouro Preto.

FERRANTE, M. **Seleção de Materiais**. 2.ed. São Carlos: UFSCAR, 2002.

FERREIRA FILHO, D. **Influência do Gás de Proteção na Soldagem MIG/MAG do Aço Inoxidável Ferrítico com Arames Ferríticos**. 2007. 108 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

FERREIRA, J. S. **Efeito da fração volumétrica de martensita, formada no resfriamento após recozimento intercrítico, no grau de estriamento, propriedades mecânicas e estampabilidade de um aço tipo AISI 430**. 2005, 118 f. Dissertação de mestrado – UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte.

FUJIMURA, H.; TSUGE, S.; Effect of C, Ti, Nb on Recrystallization Behavior after Hot Deformation in 16% Cr Ferritic Stainless Steel. In: The fourth International Conference on Recrystallization and Related Phenomena, The Japan Institute of Metals, 4, 1999. **Anais The fourth International Conference on Recrystallization and Related Phenomena**. p.763 - 768.

FUJITA, N., KIKUCHI, M., OHMURA, K., Expressions for solubility products of $\text{Fe}_3\text{Nb}_3\text{C}$ carbide and Fe_2Nb Laves phase in niobium alloyed ferritic stainless steels. **ISI International**, v. 43, n. 12, p. 1999-2006, 2003

GANDRA, A., Agência Brasil, Consumo brasileiro de aço inoxidável retoma nível anterior à crise internacional. **Revista Exame**. Disponível em: <<http://portalexame.abril.com.br/economia/brasil/noticias/consumo-brasileiro-aco-inoxidavel-retoma-nivel-anterior-crise-internacional-597891.html>>. Acesso em: 04 Out. 2010.

GORDON, W.; BENNEKOM, A. Review of Stabilisation of Ferritic Stainless Steels. **Materials Science and Technology**. v. 12, p.126-131. 1996

GREEFF, M. L., TOIT, M., Looking at the Sensitization of 11–12% Chromium em 1.4003 Stainless Steels during Welding. **Weld Journal**, n. 11, p. 243-s-251-s. 2006.

GUIDA, R. B. **Comparação da estampabilidade de chapas de aço inoxidável ferrítico estabilizado ao nióbio obtidas através de duas rotas de fabricação**. 2006. 183 f. Dissertação de mestrado – UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte.

HILTON, D. E.; NORRISH, J. Shielding Gases for Arc Welding, **Welding & Metal Fabrication**, p.189-196, may/june, 1988.

HIRAMATSU, N., Niobium in ferritic and martensitic stainless steels. In: Proceedings of the International Symposium Niobium, Orlando, Florida, USA, 2001. **Anais Proceedings of the International Symposium Niobium** <disponível em: <http://www.cbmm.com.br/english/sources/science techno/tablecontent/sub5/images/pdfs/start.pdf>>. Acesso em: 13 de junho de 2006.

HUNTER, G. B., EAGAR, T. W., Ductility of stabilized ferritic stainless steel welds. **Metallurgical Transactions A**, v. 11 A, p. 213-218, Feb 1980.

INOUE, O., KIKUCHI, M., Present and Future Trends of Stainless Steel for Automotive Exhaust System. **NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT**. n. 88, p. 62–69, Jul 2003.

INUI, K.; NODA, T.; SHIMIZU, T.; Development of the Ferritic Stainless Steel Welding Wire Providing Fine Grain Microstructure Weld Metal for the Components of Automotive Exhaust System. In: SAE International, Wold Congress and Exhibition, 2003 Detroit USA. **Anais Wold Congress and Exhibition.**

JÖNSSON, P. G.; MURPHY, A. B. and SZEKELY, J. Oxygen Additions on Argon-Shielded Gas Metal Arc Welding Processes, Welding Research Supplement - **Welding Journal**, v. 74, n. 2, p. 48-s 58-s, fev. 1995.

KARLSSON, L., Aços Inoxidáveis Passado, Presente e Futuro. **Revista Solução**, p. 45-51, Abril, 2005.

KEOWN, S. R.; PICKERING, F. B. (1982), Niobium in stainless steels. In: Niobium International Symposium, S. Francisco. **Proceedings, The Metallurgical Society of AIME**, S. Francisco, p. 1137-1141, 1982.

KIM, J. K.; KIM, Y. H.; UHM, S. H.; LEE, J. S.; KIM, K. Y. Intergranular corrosion of Ti-stabilized 11 wt% Cr ferritic stainless steel for automotive exhaust systems. **Corrosion Science**, v. 51, Pages 2716-2723, Nov. 2009.

KOU, S. **Welding Metallurgy**, Wiley-Blackwell, 2.ed. 2003;

KUZUCU, V.; AKSOY, M.; KORKUT, M. H.; YILDIRIM, M. M. The effect of niobium on the microstructure of ferritic stainless steel. **Materials Science and Engineerinf A320**, p. 75-80, 1997.

LACOMBE, P.; BAROUX, B.;BERANGER, G., Corrosion sous contrainte et fatigue-corrosion, Les aciers inoxydables. **LesEditions de Physique**, v. 01, p. 394-405, 1990.

LEE, Y. D.; KIM, H., AHN, S. K., Effects of microalloying elements on corrosion resistant and toughness of 26%Cr ferritic stainless steels, In: Stainless Steel'99, AIM, 1999, Italia. **Anais Effects of microalloying elements on corrosion resistant and toughness of 26%Cr ferritic stainless steels.** p. 3-11.

LIAO, M. T.; CHEN, W. J., The effect of shielding-gas compositions on the microstructure and mechanical properties of stainless steel weldments. **Materials Chemistry and Physics**, 55, p. 145-155, 1998.

LIMA, L. I. L. **Metodologia para avaliação da corrosão da zona termicamente afetada de aço inoxidável ferrítico AISI 439 soldado**. 2007. 93 f. Dissertação de mestrado – UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels Wiley**, 2005.

LLEWELLYN, D. T.; HUDD, R. C., Steels. **Metallurgy and Applications**: Butterworth-Heinemann Ltd, 1994 p. 295-297.

LUCAS, W. Choosing a Shielding Gas - Part 2. **Welding & Metal Fabrication**, p 269 – 276, jul 1992.

LULA, R. A.: Stainless steel. **American Society for Metals**, Ohio, USA, 1989.

LUNDQVIST, B., Aspects of Gas-Metal Arc Welding of Stainless Steels, in Swedish. **Sandvik AB**, Sandviken, Sweden, 1980.

LYTTLE, K. A.; STAPON, F. G. Select the Best Shielding Gas Blend for the Application, **Welding Journal**, p 21 – 28, nov. 1990.

MADEIRA, R. P. **Influência do Uso de Arames Inoxidáveis Ferríticos nas Características da Zona Fundida de um Aço Inoxidável Ferrítico com 17% de Cromo Bi-estabilizado**, 2007. 151 f. Dissertação de mestrado – UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte.

MADEIRA, R. P., MODENESI, P. J., Estudo dos arames ferríticos 430Ti e 430LNb para a aplicação na parte fria de sistemas de exaustão automotivos. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 13, n. 4, p. 276-285, Out/Dez 2008.

MADEIRA, R. P., MODENESI, P. J., Utilização do Ensaio Erichsen para a Avaliação do Desempenho de Juntas Soldadas, **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 15, n. 1, p. 022-030, Jan/Mar 2010.

MAJIDI, A. P., STREICHER, M. A., Four Nondestructive Electrochemical tests for detecting sensitization in type 304 and 304L Stainless Steels. **Nuclear Technology**, v. 75, 1986.

MEYER, A. M., TOIT, M., The possibility of introducing austenite stabilizers into the HAZ to restrict grain growth is investigated. **Welding Journal**, v. 80, n.12, Dez. 2001.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**, v. 1. Osasco: SENAI, 2001.

MOHANDAS, T.; REDDY, G. M.; NAVEED, M. A comparative evaluation of gas tungsten and shielded metal arc welds of a ferrítico stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 94, p. 133-140, 1999.

MOREIRA, E. B. **Soldagem de Estruturas Pesadas de Aço Inoxidável Ferrítico**, 2009. 94 f. Dissertação de mestrado – UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte.

NAKATA, M.; NISHIMURA, T.; YANAI, K.; ONO, N.; KAKIHARA, T.; TAKAHATA, S. Development of Ferritic Stainless Steel YUS 220M with High Corrosion Resistance for Architectural Use. **Nippon Steel Technical Report**, New Jersey: Wiley-Interscience, n.. 71, p. 31–35. 2005. 357p, Oct. 1996,

NORRISH, J. Advanced Welding Process. **IOP Publishing Ltd.**, Londres, 1992, 325p.

NÚCLEO INOX, 2010, Disponível em: <http://www.nucleoinox.org.br/estatisticas-anuais-consumo-brasileiro.php>, Acesso em: 04 Out. 2010.

OLIVEIRA, T.R. **Effet du niobium et du titane sur la déformation à chaud d'aciers inoxydables ferritiques stabilisés**. 2003. 222 f. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais – CDM/École des Mines de Paris, Paris .

PEREIRA, W. A. **Estudo da Formação Irregular do Cordão em Soldagem GMAW Pulsada com Chanfro Estreito**. 2000, 178 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PIERRE, E. R.. Shielding Gases for Welding. **Welding Design & Fabrication**, p 63-65, mar. 1987.

REDDY, G. M.; MOHANDAS, T. Explorative studies on grain refinement of ferrítico stainless steel welds. **Journal of Materials Science Letters**. v. 20, p 721-723, 2001.

REDMOND, J. D. Climax Molybdenum Co. **Report RP**. p. 33-76 Sept. 1977.

RENAUDOT, N.; SANTACREU, P.O; RANGOT, J; MOIRON, J.L.; COZAR, R.; PÉDARRÉ, P.et al. 430LNb – A new ferritic wire for automotive exhaust applications. **SAE Technical Paper Series**. 8f, 2000.

RESENDE, A. **Mapeamento paramétrico da soldagem GMAW com arames de aço inoxidável ferrítico e austenítico**. 2007. 126 f. Dissertação de mestrado - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte.

SATO, E.; TANOUE, T. Present and future trends of materials for automotive exhaust system. **Nippon Steel Technical Report**, n. 64, p.13-19, 1995.

SAWHILL, J. M.; BOND, A. P. **Welding Journal**. v. 55, n. 2, p.33s. 1976

SCHMITT, J. H., CHASSAGNE, F., MITHIEUX, J. D., Some recent trends in niobium ferritic stainless steels, In: Recent advances of niobium containing materials in Europe, Dusseldorf, Alemanha: Verlag Stahleisen GmbH, p. 134-148, 2005. **Anais Recent advances of niobium containing materials in Europe**

SCHMITT, J. H., Some examples of stainless steel use in the automotive industry. **Key Engineering Materials**, v. 230-323, p. 17-22, 2002.

SCOTTI, A. **Process Modelling to Establish Control Algorithms for Automated GMAW**, 1991. 273 f. PhD Thesis - Cranfield Institute of Technology, UK.

SEDRIKS, A. J. **Corrosion of stainless steels, The electrochemical society**, 2º ed, New York, Wiley-interscience publication, p. 231-260, 1996.

SEKITA, T.; KANETO, S.; HASUNO, S.; SATO, A.; OGAWA, T.; OGURA, K. Materials and Technologies for Automotive Use. **JFE GIHO**. n. 2, p. 1–16, nov. 2004.

SILVA, C. C., MACHADO, J. P. S. E., SANT'ANA, H. B., FARIAS, J. P., Estudo da sensitização causada pelo ciclo térmico de soldagem no aço inoxidável superferrítico AISI 444. In: 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 3, 2005, **Anais 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás**.

SIM, G. M.; AHN, J. C.; HONG, S. C.; LEE K. J.; LEE, K. S. Effect of Nb precipitate coarsening on the high temperature strength in Nb containing ferritic stainless steels, **Materials Science and Engineering A**, v. 369A, p 159-165, 2005.

SOUZA, D. **Levantamento de Mapas Operacionais de Transferência Metálica para Soldagem MIG/MAG de Aço ao Carbono na Posição Plana**. 2010. 269 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SOUZA, R. L., EMCON TECHNOLOGIES Brazil reduces cycle time for welding catalytic converters with ESAB Arcaloy 409Ti metal-cored wire, **Svetsaren** n. 1 2009.

STENBACKA, N., PERSSON, K, Shielding gases for gas-metal arc welding of stainless steels, **AGA AB Inovation**, Suécia, 1992.

STENBACKA, N.; PERSSON, K. A. Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**. v. 68, n 11, p. 41-47, Nov. 1989.

STRASSBURG F. W., Schweissen nichtrostender Stahle, DVS Band 67, DCS GmbH, Dusseldorf, FRG, 1976.

SUBAN, M; TUSEK, J. Dependence of the melting rate in MIG/MAG welding on the type of the shielding gas used. **Journal of Materials Processing Technology**. p. 185-192, 2001.

TOJO, M.; PREMIARC MX-A430M is an Unsurpassed FCW for Cr Stainless Steel Welding - 20-Year Track Records for Welding Automotive Exhaust Systems, **Kobelco Welding Today**, 3. ed. p. 13, 2010.

URMSTON, S. Quality - All Things to All Welders?, **Welding & Metal Fabrication**, p. 150-152, abr. 1996.

VAIDYA, V. V. Shielding Gas Mixtures for Semiautomatic Welds. **Welding Journal**, v. 81 n. 9, Set. 2002.

VLACK, L. H. V., **Elements of Materials Science and Engineering**, 6. ed. USA: Addison Wesley Publishing Company, 1990.

WASHKO, S. D.; GRUBB, J. F.; The Effect of Niobium and Titanium Dual Stabilization on the Weldability of 11% Chromium Ferritic Stainless Steels. In; Proceedings of International Conference on Stainless Steels, 1991. **Anais Proceedings of International Conference on Stainless Steels**, p.1061-1068.

YAMAMOTO, K.; KIMURA, Y, MISHIMA, Y. Effect of matrix substructures on precipitation of the Laves phase in Fe-Cr-Nb-Ni system. **ISIJ International (Tokyo)**, v.43, p. 1253-1259, 2003.

YASUDA, K.; JIMMA, T.; ONZAWA, T.,; Formability of butt welded Stainless Steel Thin Sheet. **Quarterly Journal of the Japan Welding Society**, v.2, n.3, p. 161-166, 1984.

ZEZULOVA, M., PROTIVA, K., Ferritic stainless steels with improved corrosion resistance, **Metal Science and Heat Treatment**, v. 18, n. 11, November 1976.