

**DEMOSTENES FERREIRA FILHO**

**INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO NA  
SOLDABILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO  
APLICADO A SISTEMAS DE EXAUSTORES  
AUTOMOTIVOS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
2010

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**DEMOSTENES FERREIRA FILHO**

**INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO NA SOLDABILIDADE DO AÇO  
INOXIDÁVEL FERRÍTICO APLICADO A SISTEMAS DE EXAUTORES  
AUTOMOTIVOS**

**Tese** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Valtair Antônio Ferraresi

UBERLÂNDIA - MG  
2010

Dedico esta tese à minha família.

## AGRADECIMENTOS

- Ao meu orientador, o Professor Dr. Valtair Antonio Ferraresi, pelas orientações de estudo e de vida, dedicação e amizade.
- À minha esposa e meu filho pelo apoio, dedicação e incentivo.
- À minha família pelo incentivo e esforços para a realização de meus estudos.
- Aos Professores Doutores Américo Scotti e Louriel Oliveira Vilarinho, pelo incentivo, amizade, ensinamentos e apoio dado durante o trabalho.
- À todos amigos do Laprosolda, em especial ao André, Daniel, Diandro, Luiz e Maxwell que contribuíram diretamente na realização deste trabalho.
- Aos amigos da FURG, em especial ao Casanova, Cleiton, Joaquim, Luciano, Paulo e Ruham pela amizade, incentivo e auxílio na realização da tese.
- Ao aluno de iniciação científica Regis Merino da FURG pelo auxílio na realização dos ensaios.
- Aos membros da Oficina Mecânica da UFU, em especial ao Reginaldo e Passarinho, pelo auxílio na confecção dos corpos de prova e pela amizade.
- Ao laboratório LCMM-DEFIS/UFMA e ao IFET-MA por viabilizar a realização dos ensaios de corrosão.
- A ACELORMITTAL pelo fornecimento dos consumíveis utilizados.
- À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica, pela oportunidade de realizar o curso.
- Ao CNPq pelo apoio financeiro, por meio da bolsa de estudos fornecida.

FERREIRA FILHO, D. **Influência do Gás de Proteção na Soldabilidade do Aço Inoxidável Ferrítico Aplicado a Sistemas de Exaustores Automotivos**. 2010. 246 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

### Resumo

A indústria de exaustores automotivos passou por diversas evoluções ao longo dos últimos 20 anos com o intuito de atender a demanda por controles mais severos de emissões de gases poluentes, devido à necessidade de maior durabilidade, de aumento da eficiência do motor e de reduções de peso e custo. Com este intuito, os aços inoxidáveis ferríticos vêm sendo cada vez mais empregados em exaustores, sendo estes até pouco tempo soldados exclusivamente com arames austeníticos para garantir uma boa qualidade à solda. Recentemente, metais de adição ferríticos têm sido desenvolvidos para conferir uma boa qualidade às soldas, além de significativa redução custo. Porém, ainda existe a necessidade da realização de estudos do comportamento destes metais de adição, principalmente com relação à influência do gás de proteção nas mudanças das propriedades das juntas soldadas. Assim, o objetivo deste trabalho é estudar a influência do gás de proteção na soldabilidade do aço inoxidável ferrítico, avaliando a microestrutura, as propriedades mecânicas e a susceptibilidade à sensitização das juntas. Foram utilizados dois metais de base ferríticos (UNS 43932 e AISI 441) que são atualmente empregados em exaustores automotivos, cinco gases de proteção (Ar puro, Ar+2%O<sub>2</sub>, Ar+4%CO<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>) e três metais de adição maciços (ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb). Os parâmetros de soldagem foram determinados em juntas de topo com uma fresta de três milímetros, avaliando a corrente de soldagem e a tensão de arco para garantir a mesma energia gerada pela fonte desconsiderando o rendimento térmico para todas as condições estudadas. Concluiu-se, para os gases de proteção estudados, que ocorrem variações significativas na soldabilidade apenas para o metal de adição ER430Ti. Neste caso, ocorreu diminuição da ductilidade da solda, inclusive com formação de martensita quando se soldou com 25% de dióxido de carbono e aumento da suscetibilidade a corrosão intergranular. Para os outros dois metais de adição (ER308LSi e ER430LNb), verificou-se a viabilidade da soldagem com todos os gases utilizados, não se observando variações significativas na dutibilidade da solda e baixa corrosão intergranular. Logo, levando em consideração a qualidade da solda e baixo custo do metal de adição com 25% de dióxido de carbono torna-se mais viável a utilização do metal de adição ER430LNb.

---

Palavras-chave: Aço Inoxidável Ferrítico, Gás de Proteção, MIG/MAG, Curto-Circuito.

FERREIRA FILHO, D. **The Shielding Gas Influence on the Weldability of Ferritic Stainless Steel Utilized in Automotive Exhaust Systems.** 2010. 246 p. PhD Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG, Brazil.

### Abstract

The automotive exhaust industry has gone through several evolutions over the last 20 years in order to comply with the stringent gas emission control policies and due to longer durability, increased engine efficiency and weight and cost reduction requirements. With that in mind, ferritic stainless steels have been progressively more used in exhaust systems, being traditionally and exclusively welded with austenitic wires to ensure good weld quality. Recently, ferritic wires have also been developed to provide good weld quality as well as significant cost reduction. However, it is necessary to conduct studies on these wires behavior, particularly regarding the shielding gas influence. Thus, the aim of this work is to assess the shielding gas influence on the ferritic stainless steel weldability, evaluating the joint microstructure, mechanical properties and susceptibility to sensitization. Two ferritic base metals (UNS 43932 and AISI 441), both used in automotive exhaust systems, five shielding gases (pure Ar, Ar+2%O<sub>2</sub>, Ar+4%CO<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> and Ar+25%CO<sub>2</sub>) and three solid wires (ER308LSi, ER430Ti and ER430LNb) were utilized. The welding parameters were determined for butt joints with a three-millimeter gap, taking the welding current and arc voltage into account to ensure the same heat input for all conditions tested. It was concluded, for the shielding gases studied, that significant variations in the weldability only took place for the ER430Ti wire. In this case, weld ductility reduction, including martensite formation when it was welded with 25%-carbon-dioxide shielding gas and intergranular corrosion susceptibility increase occurred. For the other two wires (ER308LSi and ER430LNb), welding feasibility was verified with all the shielding gases studied, because it was not observed weld ductility variation and little intergranular corrosion. Then, because of the weld quality and the cost it is better to use ER430LNb wire using 25%-carbon-dioxide shielding gas.

---

Key-words: Ferritic Stainless Steel, Shielding Gas, MIG/MAG, Short-Circuit.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Consumo aparente de aço inoxidável no Brasil.....	01
Figura 2.1. Diagrama binário Fe-Cr enfatizando a região dos aços inoxidáveis ferríticos.....	06
Figura 2.2. Partes constituintes de um sistema de exaustão de um veículo automotivo.....	08
Figura 2.3. Temperatura de solvus para compostos estabilizadores.....	09
Figura 2.4. Nitretos de titânio (a) após dissolução do metal base e (b) precipitado na matriz do aço UNS 43932.....	11
Figura 2.5. Sequência de formação de precipitados em aços estabilizados ao <i>Ti</i> .....	11
Figura 2.6. Influências dos elementos de liga no limite de escoamento a alta temperatura dos aços inoxidáveis ferríticos.....	14
Figura 2.7. Seqüência de formação de precipitados para um aço bi-estabilizado ao <i>Ti</i> e <i>Nb</i> .....	15
Figura 2.8. Dissolução e reprecipitação dos carbonitretos de titânio e cromo em uma liga com 17% de cromo e semi-estabilizada ao titânio.....	18
Figura 2.9. Comparação entre zonas fundidas com gás de proteção Ar+2%O <sub>2</sub> .....	19
Figura 2.10. Representação esquemática do contorno de grão sensitizado de um aço inoxidável.....	25
Figura 2.11. Comparação das temperaturas de sensitização para os dois principais tipos de aços inoxidáveis.....	26
Figura 2.12. Representação esquemática destas estruturas (a) step, (b) dual e (c) ditch que podem ocorrer com o ataque eletrolítico em solução de cristais de ácido oxálico a 10 %, onde as partes escuras próximas aos grãos representam as regiões que sofreram corrosão intergranular.....	27
Figura 2.13. Representação gráfica do ensaio DL-EPR formado pelas curvas de polarização anódica (I <sub>a</sub> ) e de polarização reversa (I <sub>r</sub> ), apresentando o nível de sensitização que ocorreu no material (I <sub>a</sub> /I <sub>r</sub> ).....	28



Figura 2.14. Zona fundida do 430Ti, ataque oxálico : (a) e (b) 430Ti e Ar2%O <sub>2</sub> ; (c) e (d) 430Ti e Ar2%N <sub>2</sub> 3%CO <sub>2</sub> .....	31
Figura 2.15. Configuração do ensaio Erichsen (a) corte transversal da prensa e (b) altura “h” e força “F”, as saídas do ensaio.....	33
Figura 2.16. Valores Erichsen para o aço austenítico SUS 304 com lubrificação com polietileno e graxa de grafite.....	34
Figura 2.17. Comparativo entre o deslocamento do punção no ensaio Erichsen para quatro energias de soldagem utilizando graxa e polietileno.....	35
Figura 2.18. Deslocamento do punção em função da condição de soldagem utilizada.....	36
Figura 2.19. Gráfico do coeficiente de anisotropia médio (r-value) e a quantidade de nióbio contida em um aço inoxidável ferrítico.....	37
Figura 3.1. Fonte de soldagem IMC Digitec 300.....	41
Figura 3.2. Sistema utilizado para a movimentação da tocha.....	42
Figura 3.3. Microscópio óptico.....	43
Figura 3.4. Microdurômetro Digimess HSV-1000.....	43
Figura 3.5. Máquina de ensaios estática servo-elétrica.....	44
Figura 3.6. Garras utilizadas no ensaio de tração na máquina de ensaios estática servo-elétrica.....	44
Figura 3.7. Cutelo e guias utilizados no ensaio de dobramento na máquina de ensaios estática servo-elétrica.....	45
Figura 3.8. Penetrador e matriz prensa chapas utilizados para o ensaio de embutimento na máquina de ensaios estática servo-elétrica.....	45
Figura 3.9. Equipamento para ataque eletroquímico: (a) Fonte CG Son Dual Tracking Dc Power Supply; (b) Becker e corpo de prova.....	46
Figura 3.10. Conjunto aparelhos para obtenção das imagens microestruturais: (a) Microscópio Óptico OLYMPUS BX51 TRF; (b) Câmera Digital OLYMPUS PM C35DX; (c) Microcomputador.....	47
Figura 3.11. Célula eletroquímica composta por três eletrodos: (a) eletrodo de trabalho corpo de prova confeccionado a partir de aço ferrítico; (b) Eletrodo de referência de calomelano saturado ECS; (c) capilar de lugging; (d) eletrodo auxiliar de platina.....	47
Figura 3.12. Conjunto aparelhos para obtenção das Curvas DL-EPR: (a) Potenciostato/Galvanostatato modelo PAR 263A; (b) célula eletroquímica; (c) Computador.....	48
Figura 3.13. Configuração das soldas realizadas na placa de teste.....	49
Figura 3.14. Esquema da metodologia utilizada pelo método planimétrico de Jefferies para determinação do tamanho de grão.....	50

Figura 3.15. Dimensões do corpo de prova de tração, baseado na norma NBR 6152.....	52
Figura 3.16. Gráfico da tensão em função da deformação para o ensaio de tração, indicando a tensão máxima (MAX) avaliada para cada ensaio.....	52
Figura 3.17. Representação esquemática das principais medidas do acessório de dobramento.....	53
Figura 3.18. Gráfico da força em função do percurso para o ensaio de dobramento enfatizando a energia (E) necessária para a realização do ensaio, o ponto de força máxima e um segundo pico da força desenvolvido pelo encontro da chapa com os cantos arredondados do punção de dobramento.....	54
Figura 3.19. Figura esquemática do corte transversal da prensa.....	55
Figura 3.20. Torquímetro utilizado para padronizar a pressão aplicada na chapa pelo prensa chapas do ensaio de embutimento.....	55
Figura 3.21. Gráficos da força em função do deslocamento para o ensaio de embutimento e os parâmetros força máxima (MAX), deslocamento máximo ( $D_{MAX}$ ), energia pela área (A) e inclinação da curva de força em relação ao deslocamento do punção ( $\alpha$ ).....	56
Figura 3.22. Região analisada pelo ensaio DL-EPR.....	57
Figura 4.1. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O <sub>2</sub> .....	62
Figura 4.2. Aspectos dos cordões de solda do metal de base UNS 43932 e metal de adição ER308LSi, e gás de proteção: (a) Ar, (b) Ar+2%O <sub>2</sub> , (c) Ar+4%CO <sub>2</sub> , (d) Ar+8%CO <sub>2</sub> e (e) Ar+25%CO <sub>2</sub> .....	63
Figura 4.3. Medições da largura (L), penetração (P) e reforço (R) realizadas na sessão transversal do corpo de prova soldado com o metal de adição ER308LSi e gás de proteção Ar+25%CO <sub>2</sub> no metal de base AISI 441.....	64
Figura 4.4. Gráfico da largura em função do gás de proteção medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	65
Figura 4.5. Gráfico penetração em função do gás de proteção medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	65
Figura 4.6. Gráfico do reforço em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	66

Figura 4.7. Representação esquemática (a) da junta soldada; (b) da área fundida ( $A_F$ ) e (c) da área total ( $A_T$ ) a serem medidas nas sessões transversais dos corpos de prova soldados.....	66
Figura 4.8. Gráfico da diluição em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	67
Figura 4.9. Gráfico da variação da largura em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	71
Figura 4.10. Gráfico da variação da penetração em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	71
Figura 4.11. Gráfico da variação do reforço em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	72
Figura 4.12. Gráfico da diluição em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	73
Figura 4.13. Gráfico da variação da largura em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932.....	76
Figura 4.14. Gráfico da variação da diluição em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932.....	76
Figura 4.15. Gráfico da variação do reforço em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932.....	77
Figura 4.16. Gráfico da variação da diluição em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb no metal de base UNS43932.....	78
Figura 4.17. Diluição em função do metal de adição para o metal de base UNS 43932.....	79
Figura 4.18. Diluição em função do metal de adição para o metal de base AISI 441.....	79
Figura 4.19. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi obtida pelo diagrama de Schaeffler.....	81
Figura 4.20. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti obtida pelo diagrama de Schaeffler.....	81

Figura 4.21. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb obtida pelo diagrama de Schaeffler.....	82
Figura 4.22. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER308LSi obtida pelo diagrama de Schaeffler.....	83
Figura 4.23. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430Ti obtida pelo diagrama de Schaeffler.....	83
Figura 4.24. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430LNb obtida pelo diagrama de Schaeffle.....	84
Figura 5.1. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base UNS43932 com o gás de proteção Ar+2%O <sub>2</sub> e metal de adição ER308LSi (a) 100 vezes da aumento; (a) 500 vezes da aumento.....	86
Figura 5.2. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base UNS43932 com o gás de proteção Ar+8%CO <sub>2</sub> e metal de adição ER430Ti (a) 100 vezes da aumento; (a) 500 vezes da aumento.....	86
Figura 5.3. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base UNS43932 com o gás de proteção Ar+25%CO <sub>2</sub> e metal de adição ER430LNb (a) 100 vezes da aumento; (a) 500 vezes da aumento.....	87
Figura 5.4. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base AISI 441 com o gás de proteção Ar+2%O <sub>2</sub> e metal de adição ER308LSi (a) 100 vezes da aumento; (a) 500 vezes da aumento.....	87
Figura 5.5. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base AISI 441 com o gás de proteção Ar+8%CO <sub>2</sub> e metal de adição ER430Ti (a) 100 vezes da aumento; (a) 500 vezes da aumento.....	88
Figura 5.6. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base AISI 441 com o gás de proteção Ar+25%CO <sub>2</sub> e metal de adição ER430LNb (a) 100 vezes da aumento; (a) 500 vezes da aumento.....	88
Figura 5.7. Gráfico dos valores de microdureza medidos na matriz ferrítica em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb no metal de base UNS 43932.....	91
Figura 5.8. Gráfico dos valores de microdureza medidos na matriz ferrítica em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb no metal de base AISI 441.....	92
Figura 5.9. Região da zona fundida onde foram realizadas as análises microestruturais para todas as condições de soldagem estudadas.....	93

Figura 5.10. Matriz austenítica ( $\gamma$ ) com lamelas de ferrita ( $\alpha$ ) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar.....	94
Figura 5.11. Matriz austenítica ( $\gamma$ ) com lamelas de ferrita ( $\alpha$ ) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O <sub>2</sub> .....	94
Figura 5.12. Matriz austenítica ( $\gamma$ ) com lamelas de ferrita ( $\alpha$ ) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+4%CO <sub>2</sub> .....	95
Figura 5.13. Matriz austenítica ( $\gamma$ ) com lamelas de ferrita ( $\alpha$ ) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+8%CO <sub>2</sub> .....	95
Figura 5.14. Matriz austenítica ( $\gamma$ ) com lamelas de ferrita ( $\alpha$ ) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+25%CO <sub>2</sub> .....	96
Figura 5.15. Gráfico da porcentagem de ferrita nos corpos de prova soldados com os metais de adição ER308LSi em função do gás de proteção utilizado.....	97
Figura 5.16. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de titânio (P) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar.....	98
Figura 5.17. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de titânio (P) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+2%O <sub>2</sub> .....	99
Figura 5.18. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de titânio (P) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+4%CO <sub>2</sub> .....	99
Figura 5.19. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de titânio (P) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+8%CO <sub>2</sub> .....	100
Figura 5.20. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de titânio (P) e martensita de contorno de grão (M) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+25%CO <sub>2</sub> .....	100
Figura 5.21. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de nióbio (P) zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar.....	101

Figura 5.22. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de nióbio (P) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+2%O <sub>2</sub> .....	102
Figura 5.23. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de nióbio (P) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+4%CO <sub>2</sub> .....	102
Figura 5.24. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de nióbio (P) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+8%CO <sub>2</sub> .....	103
Figura 5.25. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de nióbio (P) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+25%CO <sub>2</sub> .....	103
Figura 5.26. Gráfico do tamanho de grão em função do gás de proteção para os corpos de prova soldados com os metais de adição ER430Ti e ER430LNb no metal de base UNS 43932.....	104
Figura 5.27. Gráfico do tamanho de grão em função do gás de proteção para os corpos de prova soldados com os metais de adição ER430Ti e ER430LNb no metal de base AISI 441.....	105
Figura 5.28. Gráfico dos valores de microdureza medidos na matriz austenítica em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi no metal de base UNS 43932.....	107
Figura 5.29. Gráfico dos valores de microdureza medidos na matriz ferrítica e na martensita em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti no metal de base UNS 43932.....	107
Figura 5.30. Gráfico dos valores de microdureza medidos na matriz austenítica em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932.....	108
Figura 5.31. Gráfico dos valores de microdureza medidos na matriz austenítica em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi no metal de base AISI 441.....	109
Figura 5.32. Gráfico dos valores de microdureza medidos na matriz ferrítica e na martensita em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti no metal de base AISI 441.....	109
Figura 5.33. Gráfico dos valores de microdureza medidos na matriz ferrítica em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441.....	110

Figura 6.1. Falta de fusão lateral no corpo de prova de metal de base UNS 43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e gás de proteção Ar+2%O <sub>2</sub> .....	112
Figura 6.2. Ensaio de tração onde o rompimento ocorreu no MB.....	113
Figura 6.3. Ensaio de tração onde o rompimento ocorreu na junta soldada (zona de ligação).....	113
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%O <sub>2</sub> que teve fratura no metal de base.....	114
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%O <sub>2</sub> que houve fratura na junta soldada (zona de ligação).....	114
Figura 6.6. Gráfico da tensão máxima em função do gás de proteção para os três metais de adição estudados soldados no metal de base UNS43932.....	116
Figura 6.7. Gráfico da tensão máxima em função do gás de proteção para os três metais de adição estudados soldados no metal de base AISI441.....	116
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.....	117
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%CO <sub>2</sub> no metal de base AISI 441.....	118
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.....	122
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.....	123
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.....	124
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.....	124
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.....	126

- 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.....126
- 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%CO<sub>2</sub> e (b) com o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> .....127
- Figura 6.17. Microestrutura do corpo de prova solado com o metal de adição ER430Ti e gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> 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.....127
- 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.....128
- 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.....129
- 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.....130
- 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.....131
- 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.....132
- 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.....132
- Figura 6.24. Gráfico da 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.....134
- Figura 6.25. Gráfico da 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.....135
- 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.....137
- 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%O<sub>2</sub>, (a) gráfico da força em função do deslocamento do punção e (b) aspecto do corpo de prova após o ensaio.....138



Figura 6.28. Gráfico da 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.....	139
Figura 6.29. Gráfico do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base UNS 43932.....	140
Figura 6.30. Gráfico da 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.....	140
Figura 6.31. Gráfico da inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base UNS 43932.....	141
Figura 6.32. Gráfico da 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.....	142
Figura 6.33. Gráfico do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base AISI 441.....	142
Figura 6.34. Gráfico da 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.....	143
Figura 6.35. Gráfico da inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base AISI 441.....	143
Figura 6.36. 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.....	144
Figura 6.37. 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%CO <sub>2</sub> (a) gráfico da força em função do deslocamento do punção e (b) aspecto visual do corpo de prova ensaiado.....	145
Figura 6.38. Gráfico da 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.....	146
Figura 6.39. Gráfico do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base UNS 43932.....	147
Figura 6.40. Gráfico da 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.....	147

Figura 6.41. Gráfico da inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base UNS 43932.....	148
Figura 6.42. Gráfico da 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.....	149
Figura 6.43. Gráfico do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base AISI441.....	149
Figura 6.44. Gráfico da 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.....	150
Figura 6.45. Gráfico da inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base AISI 441.....	150
Figura 6.46. 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%O <sub>2</sub> (a) gráfico da força em função do deslocamento do punção e (b) aspecto visual do corpo de prova ensaiado.....	151
Figura 6.47. Gráfico da 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.....	152
Figura 6.48. Gráfico do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932.....	153
Figura 6.49. Gráfico da 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.....	153
Figura 6.50. Gráfico da inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932.....	154
Figura 6.51. Gráfico da 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.....	155
Figura 6.52. Gráfico do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441.....	156
Figura 6.53. Gráfico da 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.....	156

Figura 6.54. Gráfico da inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção da Força em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932.....	157
Figura 6.55. Análise comparativa do deslocamento máximo do punção para os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb.....	158
Figura 6.56. Macro do corpo de prova com embutimento na raiz do metal de base UNS 43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e gás de proteção Ar+2%O <sub>2</sub> com aumento de 40 vezes.....	159
Figura 6.57. Microestrutura do corpo de prova estampado na face do metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e gás de proteção Ar+8%CO <sub>2</sub> ....	159
Figura 6.58. Microestrutura do corpo de prova estampado na face do metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e gás de proteção Ar+4%CO <sub>2</sub> .....	160
Figura 6.59. Microdureza medidas na matriz austenítica ou ferrítica e martensita da zona fundida em função do gás de proteção utilizados após o ensaio de embutimento dos corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932.....	162
Figura 6.60. Microdureza medidas na matriz austenítica ou ferrítica e martensita da zona fundida em função do gás de proteção utilizados após o ensaio de embutimento dos corpos de prova soldados no metal de base AISI 441.....	162
Figura 6.61. Microdureza medidas na matriz austenítica ou ferrítica da zona termicamente afetada em função do gás de proteção utilizados após o ensaio de embutimento dos corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932.....	163
Figura 6.62. Microdureza medidas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada em função do gás de proteção utilizados após o ensaio de embutimento dos corpos de prova soldados no metal de base AISI 441.....	164
Figura 7.1. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O <sub>2</sub> 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 %.....	168
Figura 7.2. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O <sub>2</sub> no metal de base UNS 43932 atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %.....	169
Figura 7.3. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O <sub>2</sub> no metal de base AISI 441 (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 %.....	169

- Figura 7.4. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> no metal de base UNS 43932 (a) gráfico da curva referente à polarização anódica e reversa, com a razão Ia/Ir e (b) a microestrutura do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %.....171
- Figura 7.5. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub> no metal de base UNS 43932 (a) gráfico da curva referente à polarização anódica e reversa, com a razão Ia/Ir e (b) a microestrutura do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %.....171
- Figura 7.6. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> no metal de base UNS 43932 (a) gráfico da curva referente à polarização anódica e reversa, com a razão Ia/Ir e (b) a microestrutura do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %.....172
- Figura 7.7. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> no metal de base AISI 441 (a) gráfico da curva referente à polarização anódica e reversa, com a razão Ia/Ir e (b) a microestrutura do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %.....173
- Figura 7.8. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub> no metal de base AISI 441 (a) gráfico da curva referente à polarização anódica e reversa, com a razão Ia/Ir e (b) a microestrutura do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %.....173
- Figura 7.9. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> no metal de base AISI 441 (a) gráfico da curva referente à polarização anódica e reversa, com a razão Ia/Ir e (b) a microestrutura do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %.....174
- Figura 7.10. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> no metal de base UNS 43932 (a) gráfico da curva referente à polarização anódica e reversa, com a razão Ia/Ir e (b) a microestrutura do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %.....175
- Figura 7.11. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub> no metal de base UNS 43932 (a) gráfico da curva referente à polarização anódica e reversa, com a razão Ia/Ir e (b) a microestrutura do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %.....176
- Figura 7.12. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> no metal de base UNS 43932 (a) gráfico da curva referente à polarização anódica e reversa, com a razão Ia/Ir e (b) a microestrutura do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %.....176

- Figura 7.13. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> no metal de base AISI 441 (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 %.....177
- Figura 7.14. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub> no metal de base AISI 441 (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 %.....178
- Figura 7.15. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> no metal de base AISI 441 (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 %.....178
- Figura 7.16. 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 UNS 43932.....180
- Figura 7.17. 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.....181
- Figura A.1. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Argônio.....197
- Figura A.2. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>.....198
- Figura A.3. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+4%CO<sub>2</sub>.....198
- Figura A.4. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub>.....199
- Figura A.5. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub>.....199
- Figura A.6. Aspectos dos cordões de solda quando soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER308LSi, e gás de proteção: (a) Ar, (b) Ar+2%O<sub>2</sub>, (c) Ar+4%CO<sub>2</sub>, (d) Ar+8%CO<sub>2</sub> e (e) Ar+25%CO<sub>2</sub>.....200
- Figura A.7. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção argônio.....203
- Figura A.8. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>.....203

Figura A.9. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+4%CO <sub>2</sub> .....	204
Figura A.10. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+8%CO <sub>2</sub> .....	204
Figura A.11. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+25%CO <sub>2</sub> .....	204
Figura A.12. Aspectos dos cordões de solda quando soldados no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER430Ti e gás de proteção: (a) Ar, (b) Ar+2%O <sub>2</sub> , (c) Ar+4%CO <sub>2</sub> , (d) Ar+8%CO <sub>2</sub> e (e) Ar+25%CO <sub>2</sub> .....	205
Figura A.13. Aspectos dos cordões de solda quando soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430Ti e gás de proteção: (a) Ar, (b) Ar+2%O <sub>2</sub> , (c) Ar+4%CO <sub>2</sub> , (d) Ar+8%CO <sub>2</sub> e (e) Ar+25%CO <sub>2</sub> .....	206
Figura A.14. Gráfico da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção argônio.....	209
Figura A.15. Gráfico da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+2%O <sub>2</sub> .....	209
Figura A.16. Gráfico da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+4%CO <sub>2</sub> .....	209
Figura A.17. Gráfico da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+8%CO <sub>2</sub> .....	210
Figura A.18. Gráfico da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+25%CO <sub>2</sub> .....	210
Figura A.19. Aspectos dos cordões de solda quando soldados no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER430LNb e gás de proteção: (a) Ar, (b) Ar+2%O <sub>2</sub> , (c) Ar+4%CO <sub>2</sub> , (d) Ar+8%CO <sub>2</sub> e (e) Ar+25%CO <sub>2</sub> .....	211
Figura A.20. Aspectos dos cordões de solda quando soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430LNb e gás de proteção: (a) Ar, (b) Ar+2%O <sub>2</sub> , (c) Ar+4%CO <sub>2</sub> , (d) Ar+8%CO <sub>2</sub> e (e) Ar+25%CO <sub>2</sub> .....	212
Figura B.1. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base Al Si441 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar.....	216
Figura B.2. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O <sub>2</sub> .....	217
Figura B.3. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+4%CO <sub>2</sub> .....	217
Figura B.4. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+8%CO <sub>2</sub> .....	218

Figura B.5. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+25%CO <sub>2</sub> .....	218
Figura B.6. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar.....	219
Figura B.7. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+2%O <sub>2</sub> .....	219
Figura B.8. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+4%CO <sub>2</sub> .....	220
Figura B.9. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+8%CO <sub>2</sub> .....	220
Figura B.10. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+25%CO <sub>2</sub> .....	221
Figura B.11. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar.....	221
Figura B.12. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+2%O <sub>2</sub> .....	222
Figura B.13. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+4%CO <sub>2</sub> .....	222
Figura B.14. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+8%CO <sub>2</sub> .....	223
Figura B.15. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+25%CO <sub>2</sub> .....	223

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química dos materiais de base utilizados, fornecido pela ArcelorMittal.....	39
Tabela 3.2. Composição química dos arames eletrodos utilizados, fornecido pela ArcelorMittal.....	39
Tabela 4.1. Testes preliminares realizados com o metal de adição ER308LSi e o metal de base UNS 43932.....	60
Tabela 4.2. Condições de soldagem para o metal de adição ER308LSi.....	61
Tabela 4.3. Médias e desvios padrões dos perfis (largura, penetração e reforço) dos cordões de soldados com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	64
Tabela 4.4. Medições de diluição calculadas para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS43932 e AISI 441.....	67
Tabela 4.5. Testes preliminares realizados com o metal de adição ER430Ti e o metal de base UNS 43932.....	68
Tabela 4.6. Condições de soldagem para o metal de adição ER430Ti.....	69
Tabela 4.7. Médias e desvios padrões dos perfis (largura, penetração e reforço) dos cordões de soldados com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	70
Tabela 4.8. Medições de diluição realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS43932 e AISI 441.....	72
Tabela 4.9. Testes preliminares realizados com o metal de adição ER430LNb e o metal de base UNS 43932.....	74
Tabela 4.10. Condições de soldagem para o metal de base ER430LNb.....	74
Tabela 4.11. Médias e desvios padrões dos perfis (largura, penetração e reforço) dos cordões de soldados com o metal de adição ER430LNb nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	75



Tabela 4.12. Medições da diluição realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb nos metais de base UNS43932 e AISI 441.....	77
Tabela 4.13. Diluição Média e Desvio Padrão para cada par Metal de Base e Metal de Adição.....	78
Tabela 5.1. Medidas de tamanho de grão realizadas na zona termicamente afetada de todas as condições de soldagem estudadas.....	89
Tabela 5.2. Medidas de microdureza realizadas na matriz ferrítica para os metais de base UNS43932 e AISI441.....	89
Tabela 5.3. Medidas de Microdureza realizadas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada para os metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	90
Tabela 5.4. Medições da porcentagem de ferrita na matriz austenítica para os corpos de prova soldados nos metais de base UNS 43932 e AISI 441 com o metal de adição ER308LSi.....	96
Tabela 5.5. Tamanho de grão medido za zona fundida soldada com os metais de adição ER430Ti e ER430LNb.....	104
Tabela 5.6. 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.....	105
Tabela 5.7. Medidas de Microdureza realizadas na martensita da zona fundida para os metais de base UNS43932 e AISI441.....	106
Tabela 6.1. Localização da fratura para os ensaios com os corpos de prova soldados no metal de base UNS43932.....	112
Tabela 6.2. Localização da fratura para os ensaios com os corpos de prova soldados no metal de base AISI441.....	113
Tabela 6.3. Limite de Resistência dos ensaios de tração realizados nos metais de base UNS43932 e AISI441.....	115
Tabela 6.4. Limite de resistência dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova soldados nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	115
Tabela 6.5. Ensaios de dobramento realizados nos corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932.....	119
Tabela 6.6. Ensaios de dobramento realizados nos corpos de prova soldados no metal de base AISI441.....	120
Tabela 6.7. Força máxima e energia necessária para o dobramento dos metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	121

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.....	122
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.....	123
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.....	125
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.....	128
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.....	130
Tabela 6.13. Força máxima e energia obtidos no ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441.....	131
Tabela 6.14. Valores médios e desvios padrões das forças máximas e energia obtidos 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.....	133
Tabela 6.15. Valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento máximo do punção, energia total para a realização do ensaio de embutimento e a inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os ensaios de embutimento realizados nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	136
Tabela 6.16. Valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção, energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER308LSi.....	138
Tabela 6.17. Valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção, energia total para a realização do ensaio de embutimento e a inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER308LSi.....	141
Tabela 6.18. Valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção, energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER430Ti.....	146
Tabela 6.19. Força máxima, deslocamento do punção, energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430Ti.....	148

Tabela 6.20. Valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção, energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER430LNb.....	152
Tabela 6.21. Valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430LNb.....	154
Tabela 6.22. Medidas de Microdureza realizadas na matriz ferrítica para os metais de base UNS43932 e AISI441 estampados.....	160
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.....	161
Tabela 6.24. Medidas de Microdureza realizadas na martensita da zona fundida para os metais de base UNS43932 e AISI441 estampados.....	161
Tabela 6.25. Medidas de Microdureza realizadas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada para o metal de base UNS43932 estampado.....	163
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.....	180
Tabela A.1. Medições de largura realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS43932 e AISI 441.....	201
Tabela A.2. Medições de penetração realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS43932 e AISI 441.....	201
Tabela A.3. Medições de reforço realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS43932 e AISI 441.....	202
Tabela A.4. Medições de área total e área fundida realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS43932 e AISI 441.....	202
Tabela A.5. Medições de largura realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS43932 e AISI 441..	207
Tabela A.6. Medições de penetração realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS43932 e AISI 441..	207

Tabela A.7. Medições de reforço realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS43932 e AISI 441..	208
Tabela A.8. Medições de área total e área fundida realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS43932 e AISI 441.....	208
Tabela A.9. Medições da largura realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb nos metais de base UNS43932 e AISI 441.....	213
Tabela A.10. Medições da penetração realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb nos metais de base UNS43932 e AISI 441.....	213
Tabela A.11. Medições do reforço realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	214
Tabela A.12. Medições de área total e área fundida realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb nos metais de base UNS43932 e AISI 441.....	214
Tabela B.1. Medidas de Microdureza realizadas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada para o metal de base UNS43932.....	215
Tabela B.2. Medidas de Microdureza realizadas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada para o metal de base AISI441.....	216
Tabela B.3. Tamanho de grão medido za zona fundida com metal de base UNS 43932 com os metais de adição ER430Ti e ER430LNb.....	224
Tabela B.4. Medições de tamanho de grão da zona fundida dos corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com os metais de adição ER430Ti e ER430LNb.....	224
Tabela B.5. 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 o metal de base UNS43932.....	225
Tabela B.6. 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 o metal de base AISI441.....	226
Tabela C.1. Limite de resistência dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932.....	227
Tabela C.2. Limite de Resistência dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova soldados no metal de base AISI441.....	228

Tabela C.3. Força máxima obtida do ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER308LSi no metal de base UNS 43932.....	228
Tabela C.4. Energia consumida obtida do ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER308LSi e metal de base UNS 43932.....	228
Tabela C.5. Força máxima no ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER308LSi e metal de base AISI 441.....	229
Tabela C.6. Energia consumida no ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER308LSi e metal de base AISI 441.....	229
Tabela C.7. Força máxima obtida no ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER430Ti no metal de base UNS 43932.....	230
Tabela C.8. Energia consumida para a realização do ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER430Ti e metal de base UNS43932.....	230
Tabela C.9. Força máxima obtida no ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER430Ti no metal de base AISI 441.....	231
Tabela C.10. Energia consumida para a realização do ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER430Ti e metal de base AISI 441.....	231
Tabela C.11. Força máxima obtida no ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932.....	232
Tabela C.12. Energia consumida para a realização do ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER430LNb e metal de base UNS 43932.....	232
Tabela C.13. Força máxima obtida no ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441.....	233
Tabela C.14. Energia consumida para a realização do ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER430LNb e metal de base AISI 441.....	233
Tabela C.15. Valores de força máxima e deslocamento máximo do punção para os ensaios de embutimento realizados nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	233
Tabela C.16. Valores de energia total para a realização do ensaio de embutimento e a inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os ensaios de embutimento realizados nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.....	234
Tabela C.17. Força máxima e o deslocamento do punção para a realização do ensaio de embutimento nos corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER308LSi.....	234
Tabela C.18. Energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER308LSi.....	235

Tabela C.19. Força máxima e o deslocamento do punção para a realização do ensaio de embutimento nos corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER308LSi.....	236
Tabela C.20. energia total para a realização do ensaio de embutimento e a inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER308LSi.....	237
Tabela C.21. Força máxima e o deslocamento do punção para a realização do ensaio de embutimento nos corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER430Ti.....	238
Tabela C.22. Energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER430Ti.....	239
Tabela C.23. Força máxima e o deslocamento do punção para a realização do ensaio de embutimento nos corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430Ti.....	240
Tabela C.24. Energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430Ti.....	240
Tabela C.25. Força máxima e o deslocamento do punção para a realização do ensaio de embutimento nos corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER430LNb.....	241
Tabela C.26. Energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER430LNb.....	242
Tabela C.27. Força máxima e o deslocamento do punção para a realização do ensaio de embutimento nos corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430LNb.....	243
Tabela C.28. Energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430LNb.....	244
Tabela C.29. 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 o metal de base UNS43932 estampado.....	245
Tabela C.30. 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 o metal de base AISI441 estampado.....	245

Tabela C.31. Medidas de Microdureza realizadas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada para o metal de base UNS43932 estampado.....	246
Tabela C.32. Medidas de Microdureza realizadas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada para o metal de base AISI441 estampado.....	246

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\eta$	Rendimento térmico da solda;
$\bar{l}$	Diâmetro médio dos grãos;
(r)	Coefficiente de anisotropia normal médio;
( $\alpha$ )	Inclinação da curva de força em relação ao deslocamento do punção do ensaio de embutimento;
A	Área que representa a energia necessária para a realização do embutimento.
$A_F$	Área fundida do metal base;
$A_T$	Área total do cordão de solda;
d	Diâmetro interno da matriz para realizar o ensaio de embutimento;
D	Diâmetro onde a carga é realizada na matriz de embutimento;
DBCP	Distância de bico de contato peça;
$d_i$	Diâmetro do punção do ensaio de embutimento;
DL-EPR	<i>Double Loop Electrochemical Potentionkinetic Reactivation</i> ;
$D_{MAX}$	Deslocamento máximo realizado pelo punção no ensaio de embutimento;
E	Energia necessária para realizar o dobramento;
$E_S$	Energia gerada na tocha de soldagem, desprezando o rendimento térmico;
F	Carga realizada durante o ensaio de embutimento;
h	Deslocamento realizado pelo punção no ensaio de embutimento;
HV	Microdureza vickers;
la/lr	Nível de sensitização que ocorreu no material;
$I_M$	Corrente média medida na saída da fonte de soldagem
$K_D$	Indutância de descida;
$K_S$	Indutância de subida;



L	Largura;
LE	Limite de escoamento;
M	Martensita
MAG	Metal Active Gas;
MAX	Tensão máxima ensaio de tração ou força máxima no dobramento;
MB	Metal de base;
MIG	Metal Inert Gas;
$n_A$	Número de grãos por unidade de área
$n_C$	Número de grãos inteiros no círculo;
$n_{eq}$	Número de grãos equivalentes;
$n_i$	Número de grãos interceptados pela circunferência;
$n_L$	Número de grãos por unidade de comprimento;
P	Precipitados;
Pe	Penetração;
Re	Reforço;
SCE	Eletrodo de calomelano saturado;
U	Tensão regulada na fonte de soldagem;
$U_M$	Tensão média, medida na saída da fonte de soldagem;
$V_{ALIM}$	Velocidade de alimentação regulada no alimentador;
$V_{SOLD}$	Velocidade de soldagem;
X	Representação de ruptura que ocorreu na junta soldada;
ZF	Zona fundida;
ZF	Zona Fundida;
ZTA	Zona termicamente afetada.
$\alpha$	Ferrita;
$\gamma$	Austenita;

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>CAPÍTULO II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>05</b>
2.1. Aços Inoxidáveis Ferríticos.....	05
2.2. Estabilização dos aços inoxidáveis ferríticos.....	09
2.2.1. Estabilização com titânio.....	10
2.2.2. Estabilização com nióbio.....	12
2.2.3. Dupla estabilização com titânio e nióbio.....	14
2.3. Soldagem dos Aços Inoxidáveis Ferríticos.....	16
2.3.1. Soldabilidade.....	16
2.3.2. Metal de Adição.....	20
2.3.3. Gás de proteção.....	21
2.4. Corrosão intergranular dos aços inoxidáveis ferríticos soldados e seus métodos de detecção.....	25
2.5 Ensaios Mecânicos aplicados à estruturas soldadas.....	25
2.5.1. Ensaios de Embutimento.....	32
<b>CAPÍTULO III MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>38</b>
3.1 Consumíveis.....	38
3.1.1 Material de Base.....	38
3.1.2 Material de Adição.....	39
3.1.3. Gás de Proteção.....	40
3.2. Equipamentos.....	41
3.2.1. Fonte de Soldagem.....	41
3.2.2. Mesa de Coordenadas.....	41
3.2.3. Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados.....	42
3.2.4. Microscópio Óptico.....	42

3.2.5. Equipamento para Medição de Microdureza.....	43
3.2.6. Máquina de Ensaios Mecânicos.....	43
3.2.7. Equipamento para realização do Ensaio de Sensitização.....	46
3.3. Metodologia de ensaio.....	48
3.3.1. Determinação dos parâmetros de soldagem.....	49
3.3.2. Soldagem da placa de teste.....	49
3.3.3. Análise Microestrutural.....	50
3.3.3.1. Medida de tamanho de grão.....	50
3.3.3.2. Análise de Microdureza.....	51
3.3.4. Ensaio de Tração.....	52
3.3.5. Ensaio de Dobramento.....	52
3.3.6. Ensaio de Embutimento.....	54
3.3.7. Ensaio de sensitização.....	56
<b>CAPÍTULO IV DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....</b>	<b>58</b>
4.1. Introdução.....	58
4.2. Obtenção das condições de soldagem para o metal de adição ER308LSi.....	58
4.3. Obtenção das condições de soldagem para o metal de adição ER430Ti.....	68
4.4. Obtenção das condições de soldagem para o metal de adição ER430LNb.....	73
4.5. Comparativos entre os metais de adição.....	78
4.6. Conclusão parcial do Capítulo.....	84
<b>CAPÍTULO V ANÁLISE MICROESTRUTURAL E DE MICRODUREZA.....</b>	<b>85</b>
5.1. Análise microestrutural, tamanho de grão e microdureza da zona termicamente afetada.....	85
5.2. Análise microestrutural, tamanho de grão e microdureza da zona fundida.....	92
5.3. Conclusão parcial do Capítulo.....	110
<b>CAPÍTULO VI ENSAIOS MECÂNICOS.....</b>	<b>111</b>
6.1. Ensaios de Tração.....	111
6.2. Ensaios de Dobramento.....	117
6.2.1. ER308LSi.....	121
6.2.2. ER430Ti.....	124
6.2.3. ER430LNb.....	129
6.2.4. Comparação entre os metais de adição ER430Ti e ER430LNb.....	132
6.3. Ensaios de Embutimento.....	135

6.3.1. ER308LSi.....	137
6.3.2. ER430Ti.....	144
6.3.3. ER430LNb.....	150
6.3.4. Comparação entre os metais de adição.....	157
6.3.5. Microestrutura e Microdureza dos corpos de prova estampados.....	158
6.4. Conclusões Parciais.....	164
<b>CAPÍTULO VII ENSAIO DE CORROSÃO INTERGRANULAR.....</b>	<b>166</b>
7.1. Procedimento para Análise da Corrosão Intergranular.....	167
7.1.1. ER308LSi.....	168
7.1.2. ER430Ti.....	170
7.1.3. ER430LNb.....	174
7.2. Análise comparativa dos ensaios de DL-EPR.....	179
<b>CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES.....</b>	<b>182</b>
<b>CAPÍTULO IX - PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>185</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>187</b>
<b>ANEXO A - RESULTADOS COMPLEMENTARES DO CAPÍTULO IV.....</b>	<b>197</b>
<b>ANEXO B - RESULTADOS COMPLEMENTARES DO CAPÍTULO V.....</b>	<b>215</b>
<b>ANEXO C - RESULTADOS COMPLEMENTARES DO CAPÍTULO VI.....</b>	<b>227</b>

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis vêm sendo cada vez mais utilizados devido à sua grande versatilidade e características. A Figura 1.1 apresenta o consumo aparente deste material no Brasil segundo o Núcleo Inox (2010). Nota-se que de 2000 a 2005 houve um crescimento no consumo de 3,6% ao ano. Já de 2005 a 2008 o consumo aumentou significativamente passando o consumo total no Brasil em 2000 de 193,9 kt/ano para 367,5 kt/ano.

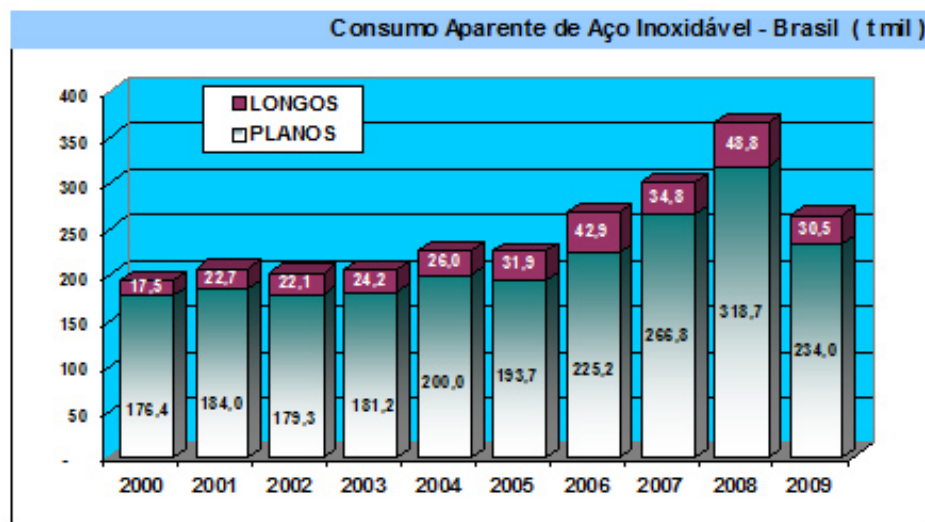


Figura 1.1. Consumo aparente de aço inoxidável no Brasil (NÚCLEO INOX, 2010)

Nota-se ainda pela Figura 1.1 que o consumo de aço inoxidável em 2009 sofreu uma queda significativa. Segundo Gangra (2010), em entrevista com o vice-presidente do Núcleo Inox Celso Barbosa, esta queda no consumo de aço inoxidável no Brasil em 2009 foi devido aos reflexos da crise internacional, sendo os setores que mais sentiram foram o industrial,

seguido pelos segmentos de eletrodomésticos e bens de consumo. No setor de óleo e gás houve um crescimento do consumo, apesar da crise.

O Brasil foi um dos países que mais rapidamente reagiram aos efeitos da crise. A previsão do Núcleo Inox, segundo Gangra (2010) é de que o Brasil experimentará um crescimento de consumo de aço inox da ordem de 12% ao ano até 2015, o que levará o consumo nacional a 550 kt/ano. Isso ampliará o consumo per capita, atualmente de 2 quilos por habitante/ano, para 2,5 quilos per capita/ano, que ainda é um número muito baixo se comparado com os países desenvolvidos, que possuem consumos superiores aos 20 quilos per capita/ano, ficando ainda abaixo da média mundial que é de 10 a 12 quilos por habitante/ano. Os fatores que impedem o aumento do consumo no Brasil não estão ligados à oferta do produto, mas ao estágio de desenvolvimento do país.

Karlsson (2005), Modenesi (2001), entre outros autores, classificam os aços inoxidáveis nos cinco grandes grupos, ferríticos, martensíticos, austeníticos, endurecíveis por precipitação e os duplex (austeníticos-ferríticos). Dentre eles, destacam-se em termos de aplicações os tipos austeníticos e ferríticos, tendo os austeníticos uma maior utilização, apesar de possuírem um maior custo, pois em geral, contêm, no mínimo, 8% de níquel, que é um material de alto valor agregado.

Em geral os aços inoxidáveis ferríticos quando comparados com os aços inoxidáveis austeníticos apresentam um maior limite de escoamento, menores alongamento, capacidade de encruamento, tenacidade, ductilidade, resistência à corrosão generalizada, além de menor custo de produção (LULA, 1986).

Segundo Davis (1994) os aços inoxidáveis ferríticos podem ser utilizados na fabricação de utensílios domésticos, em aplicações em meios mais agressivos, como por exemplo, ambientes marinhos e por último na indústria automobilística, sendo a principal aplicação neste último caso em componentes do sistema de exaustão.

Em entrevista a ABAL (2010) Jamiro Wiest, presidente da Wiest S.A. afirma que os materiais mais utilizados como matéria-prima para a fabricação de sistemas de exaustão é aço inox, sendo que no Brasil o mercado de sistemas automotivos é dividido nos segmentos de sistemas para reposição e o fornecimento para montadoras. Para o primeiro as empresas produzem uma média de 500 mil peças por mês, tendo este segmento uma queda ao longo dos últimos cinco anos, devido a chegada de materiais mais resistentes, como o aço inoxidável que torna o ciclo de renovação desses sistemas mais lento (chegando a 10 anos). Já para as montadoras o valor é um pouco menor, 120 mil peças por mês, número que varia de acordo com o volume de produção de veículos. Afirma ainda que mais de 95% das peças que estão no mercado são produzidas no Brasil. Há inclusive exportações brasileiras para

outros países, que totalizam cerca de 5% da produção, que são desenvolvidos por encomenda, utilizando materiais mais nobres.

Faria (2006) afirma que o sistema de exaustão automotivo é um componente que passou por diversas evoluções ao longo dos últimos 20 anos, com o intuito de atender aos controles mais severos de emissões de gases poluentes, a necessidade de maior durabilidade, aumento da eficiência do motor e reduções de peso e custo. Os danos mais comumente observados no sistema de exaustão, segundo Llewellyn (1994) são atribuídos 80% à corrosão e os 20% restantes à fadiga, sendo, portanto pontos importantes a serem investigados em exaustores fabricados com aço inoxidável ferrítico.

De um modo geral, os constituintes do sistema de exaustão encontram-se na forma de tubos circulares e de “blanks” (chapas estampadas), sendo que praticamente todos possuem regiões soldadas. Há até poucos anos, os aços inoxidáveis ferríticos eram soldados apenas com arames austeníticos, tais como AWS ER 308LSi e 307Si, para garantir uma boa qualidade à solda. Arames inoxidáveis ferríticos estabilizados (por exemplo, os tipos 430Ti, 430LNb e 409Nb), que podem conferir uma boa qualidade às soldas destes aços, além de terem um menor custo, foram desenvolvidos (RENAUDOT, 2000). Esses arames têm sido usados de forma crescente na indústria, principalmente na automotiva (sistemas de exaustores). Na Ásia eles são utilizados com gases de proteção com alta concentração de dióxido de carbono (25%) sem estudos prévios.

Levando em consideração o que foi discutido, verifica-se a necessidade de novos estudos relacionados à soldagem dos aços inoxidáveis ferríticos, que nos levam ao objetivo desta tese, que é verificar a influência de vários tipos de gás de proteção na soldagem de dois tipos de aço inoxidável ferrítico bi-estabilizado ao titânio e nióbio com metais de adição também de aço inoxidável ferrítico. Para isto, tornou-se necessário, primeiramente, encontrar condições de soldagem que proporcionem uma mesma energia fornecida pela fonte de soldagem, desconsiderando o rendimento térmico, para todos os gases de proteção utilizados. Foram realizadas então, análises microestruturais, de microdureza, de resistência a corrosão intergranular (sensitização da zona fundida) e das propriedades mecânicas.

Com o intuito de documentar os resultados deste estudo, a apresentação desta tese se divide em dez capítulos.

No Capítulo I (este capítulo), procura-se mostrar a motivação deste trabalho, percorrendo sobre a aplicação do aço inoxidável no Brasil e em específico o aço inoxidável ferrítico, apresentando sua aplicação na indústria, com ênfase em sistemas de exaustores automotivos, bem como a necessidade de estudo da relação gás de proteção e arame eletrodo que é o objetivo deste trabalho.

No Capítulo II detalha os fundamentos básicos necessários para o desenvolvimento do trabalho, de acordo com a literatura disponível. Neste se faz uma abordagem sobre os aços inoxidáveis ferríticos, estabilização (ao titânio, ao nióbio e dupla estabilização com titânio e nióbio), soldagem dos aços inoxidáveis ferríticos (soldabilidade, metal de adição e gás de proteção), corrosão intergranular e seus métodos de detecção e ensaios mecânicos aplicados a estruturas soldadas (ensaio de embutimento).

No Capítulo III é apresentada uma descrição dos consumíveis e dos equipamentos utilizados, além de descrever a metodologia utilizada para as etapas que foram realizadas durante o trabalho.

No Capítulo IV é descrita a metodologia utilizada para encontrar energias de soldagem e taxas de deposição ao longo do cordão, similares para todas as condições de soldagem (dois metais de base, três metais de adição e cinco tipos de gás de proteção) empregadas neste trabalho. Apresenta ainda os aspectos dos cordões e as correntes e tensões obtidas durante a transferência metálica. Além de medições dos perfis dos cordões de solda, que foram realizados com o intuito de comprovar a aplicação do mesmo nível de energia gerada no arco em todas as condições de soldagem, assim como as estimativas das microestruturas das juntas soldadas com o auxílio do diagrama de Schaeffler.

No Capítulo V é apresentada uma análise microestrutural e de microdureza dos corpos de prova soldados com o objetivo de observar a influência do gás de proteção na microestrutura dos mesmos, sendo que se tentou eliminar a influência dos demais parâmetros que poderiam gerar diferenças nas microestruturas, uma vez que, para todas as condições de soldagem utilizou-se uma mesma energia imposta pelo processo de soldagem.

No Capítulo VI são apresentados os resultados dos ensaios de tração, dobramento e embutimento realizados nos corpos de prova para todas as condições de soldagem estudadas neste trabalho.

No Capítulo VII são apresentados os ensaios de corrosão intergranular (sensitização) realizados na zona fundida dos corpos de prova soldados por meio da perda por passivação realizada por ataque eletroquímico, seguido de uma análise microestrutural. Esta análise foi utilizada para a aceitação do material, contudo, ele 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.

No Capítulo VIII dedica-se às conclusões do trabalho, o Capítulo IX às propostas para trabalhos futuros, enquanto o Capítulo X arrola as referências bibliográficas. E os Anexos A, B e C apresentam os resultados complementares respectivamente dos Capítulos IV, V e VI.



## **CAPÍTULO II**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Um levantamento bibliográfico relacionado aos principais pontos desta tese se faz necessário para se constituir uma correlação entre o que se tem documentado e o que se pode inferir a partir do material posto em estudo. Os tópicos aços inoxidáveis ferríticos, estabilização dos aços inoxidáveis ferríticos (estabilização com titânio, estabilização com nióbio e dupla estabilização com titânio e nióbio), soldagem dos aços inoxidáveis ferríticos (soldabilidade, metal de adição e gás de proteção), corrosão intergranular dos aços inoxidáveis ferríticos e seus métodos de detecção e ensaios mecânicos aplicados a estruturas soldadas (ensaio de embutimento) são os temas abordados neste levantamento bibliográfico.

#### **2.1. Aços Inoxidáveis Ferríticos**

Os inoxidáveis ferríticos são basicamente ligas de ferro e cromo, contendo pelo menos 10,5% de cromo para garantir a resistência à oxidação. Segundo Modenesi (2001) a temperatura ambiente (conforme se observa no diagrama da Figura 2.1) eles são formados por uma matriz ferrítica (alfa), isto é, uma solução sólida de cromo e outros elementos de liga, que possui uma baixa solubilidade aos elementos intersticiais (carbono e nitrogênio), ficando estes principalmente na forma de precipitados nos materiais (principalmente nitretos e carbonetos de cromo).

Um ponto de partida para o entendimento dos aços inoxidáveis ferríticos é o diagrama binário Fe-Cr (Figura 2.1), onde nota-se que para teores de cromo abaixo de 12% a ferrita transforma-se totalmente em austenita quando o material é aquecido a temperatura acima de aproximadamente 900°C. O campo destacado (entre aproximadamente 12 e 18% de cromo) mostra a região onde a maioria dos aços inoxidáveis ferríticos (médio cromo) encontra-se. Verifica-se que esses aços inoxidáveis ferríticos, levando em consideração somente a relação ferro-cromo da Figura 2.1, não formam austenita durante todo o processo de resfriamento, ou seja, a ferrita se forma a partir da solidificação.

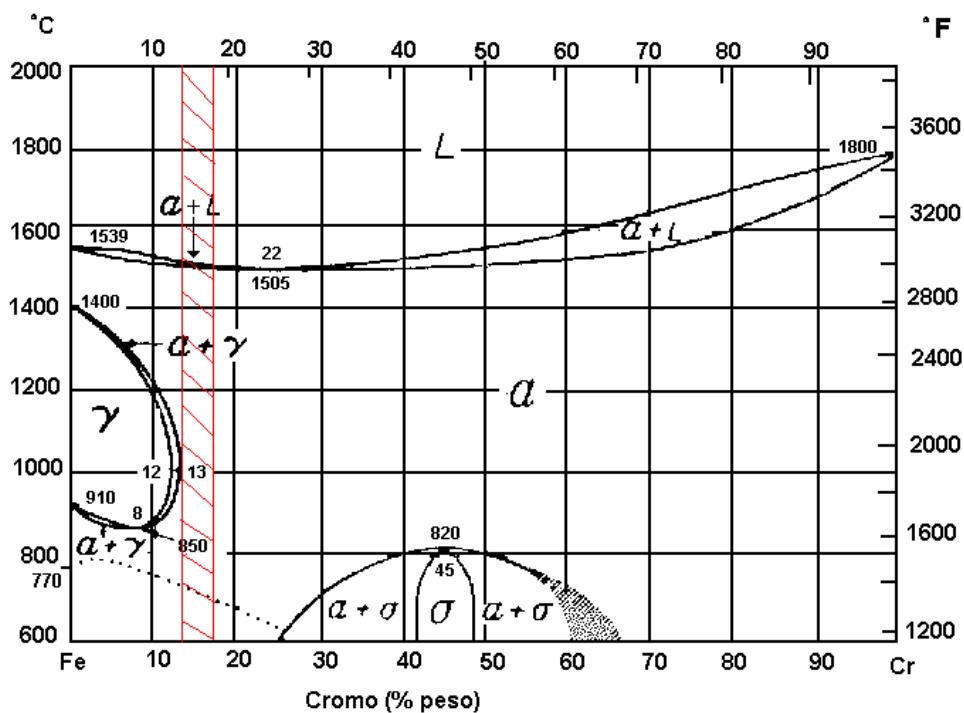


Figura 2.1. Diagrama binário Fe-Cr enfatizando a região dos aços inoxidáveis ferríticos (OLIVEIRA, 2003)

Para melhorar as propriedades dos aços inoxidáveis ferríticos são adicionados elementos de liga que o diagrama ferro-cromo não leva em consideração. Alguns deles, como o nitrogênio, o carbono, o titânio, o nióbio, entre outros, podem alterar a região de formação de austenita a alta temperatura. Campbell (1992) verificou ao aumentar os teores de carbono e nitrogênio, respectivamente de 0,004% para 0,05% e de 0,002% para 0,25%, que a fronteira do campo austeníticos salta de 11,5% para 28% de cromo, devido ao potencial gamagênio (formador de austenita) destes elementos. A austenita apresenta uma alta temperabilidade em situações de resfriamento rápido, transformando em martensita, causando uma forte perda de tenacidade e ductilidade do material.

Uma estrutura completamente não transformável (ausência de austenita) é obtida para maiores teores de cromo, menores teores de elementos intersticiais (carbono e nitrogênio) e pela presença de elementos com alta afinidade pelos elementos intersticiais, como o nióbio e o titânio (LIPPOLD; KOTECKI, 2005).

Modenesi (2001) cita que em aços que contêm adições de nióbio e/ou titânio (aços estabilizados), os carbonetos e nitretos de cromo são parcial ou completamente substituídos por carbonitretos de nióbio, Nb(C,N), ou de titânio Ti(C,N). Esses precipitados são mais estáveis que os de cromo, e só dissolvem na matriz ferrítica a temperatura bem mais elevada que os de cromo (acima de 1200°C). Com isso, a adição de Ti e/ou Nb reduz o efeito austenitizante do carbono e nitrogênio. Desta forma, aços adequadamente estabilizados tendem a manter uma estrutura completamente ferrítica a qualquer temperatura até a sua fusão. Inibe-se, também, a formação de carbonetos e nitretos de cromo, os quais podem causar problemas de corrosão intergranular no material após sua exposição a uma temperatura elevada.

Campbell (1992) classifica os aços inoxidáveis ferríticos em três gerações. A **primeira** contém apenas cromo como elemento estabilizador da ferrita. O principal representante deste grupo é o aço AISI 430 que contém entre 16 e 18% de cromo e teor de carbono máximo de 0,12%. A **segunda** tem teor de cromo bem menor, no entanto, têm em sua composição, outros elementos estabilizadores da ferrita. O principal representante desta geração é o AISI 409 que tem teor de cromo entre 10,5% e 11,7% e teor de carbono máximo de 0,08%, enquanto a adição de titânio pode ser de até 0,75%. A **terceira** foi obtida com o melhoramento das técnicas de fabricação e a capacidade das usinas em reduzir os teores de carbono e nitrogênio. Um representante deste grupo é o AISI 444 que tem teor de carbono entre 0,01 e 0,03%, além da adição de elementos tais como titânio, nióbio e molibdênio, que são estabilizantes e ao mesmo tempo contribuem com a melhora na resistência a corrosão da liga. Outro aço que se encaixa nesta terceira geração é o AISI 439 que tem teor muito baixo de elementos intersticiais e é estabilizado ao titânio e nióbio.

Em termos de propriedades Gordon; Bennekorn (1996) afirmam que os aços inoxidáveis ferríticos não são tão tenazes, nem tão resistentes como os aços inoxidáveis austeníticos, mas apresentam boa conformabilidade devido ao baixo encruamento, além de apresentarem boa resistência à oxidação e corrosão, fatores que são importantes nas aplicações destinadas a estes tipos de aços.

Segundo Davis (1994) os aços inoxidáveis ferríticos podem ser utilizados na fabricação de utensílios domésticos, em aplicações em meios mais agressivos, como por exemplo, ambientes marinhos e por último na indústria automobilística, sendo a principal aplicação neste último caso em componentes do sistema de exaustão. Esse sistema pode

ser dividido em duas partes, a quente, que trabalha com temperaturas superiores a 650°C, englobando desde o coletor até o catalisador e a fria, que trabalha com temperaturas inferiores a 650°C, que vai desde o abafador até o tubo de saída. A Figura 2.2 apresenta as partes componentes de um sistema de exaustão automotivo.

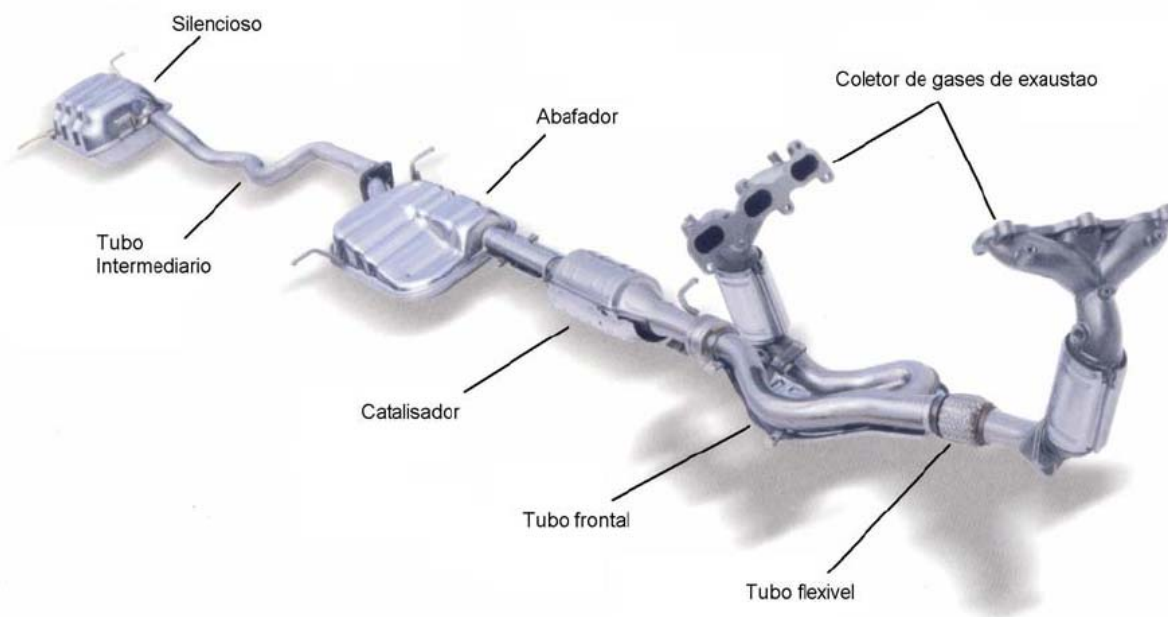


Figura 2.2. Partes constituintes de um sistema de exaustão de um veículo automotivo

De um modo geral, os constituintes do sistema de exaustão encontram-se na forma de tubos circulares e de “blanks” (chapas estampadas), sendo que praticamente todos possuem regiões soldadas e de uma forma geral os aços inoxidáveis ferríticos podem ser utilizados ao longo de todo o sistema de exaustão. Segundo Alves et al. (2002) os principais aços inoxidáveis ferríticos utilizados na parte quente do sistema de exaustão automotivo são os aços AISI 409 e 441 e na parte fria são os aços AISI 409, 439 e 436.

Faria (2006) afirma que o sistema de exaustão automotivo é um componente que passou por diversas evoluções ao longo dos últimos 20 anos, com o intuito de atender aos controles mais severos de emissões de gases poluentes, a necessidade de maior durabilidade, aumento da eficiência do motor e reduções de peso e custo.

Os aços inoxidáveis utilizados nas partes quentes, segundo Sekita et al. (2004), devem ser refratários e possuir adições de nióbio, maiores quantidades de molibdênio e otimização da quantidade de silício. Outro fator importante citado pelo autor é a necessidade destes materiais possuírem uma boa conformabilidade. Inque; Kikuchi (2003) afirmam que esta região do sistema de exaustão necessita possuir também altas resistências a

temperatura e a corrosão, devido às altas temperaturas e o ambiente altamente corrosivo que o material é exposto.

Por ultimo, Llewellyn; Hudd (1994), afirma que, de uma forma geral, os danos mais comumente observados no sistema de exaustão de veículos automotores de aço inoxidável, 80% são atribuídos à corrosão e os 20% restantes à fadiga.

## 2.2. Estabilização dos aços inoxidáveis ferríticos

A estabilização dos aços inoxidáveis ferríticos tem como objetivo, além de minimizar a presença de martensita durante o resfriamento de uma soldagem, evitar a formação dos precipitados do tipo  $Cr_{23}C_6$  pela introdução de elementos de liga (por exemplo, o titânio e/ou nióbio) que tenham maior afinidade com o carbono e o nitrogênio a alta temperatura do que o cromo, promovendo a formação de outros tipos de precipitados mais estáveis e que não contêm cromo. Outros elementos como zircônio, vanádio e tântalo, podem ser utilizados, mas são menos comuns.

A Figura 2.3 apresenta valores de temperaturas de solvus dos carbonetos e nitretos de alguns elementos estabilizantes da ferrita. Pode-se observar que a dissociação dos nitreto e carbonetos desses elementos ocorrem a temperaturas bem mais elevadas que os carbonetos e nitretos de cromo, onde geralmente ocorrem a temperaturas abaixo de  $900^{\circ}C$  (GORDON; BENNEKOM, 1996).

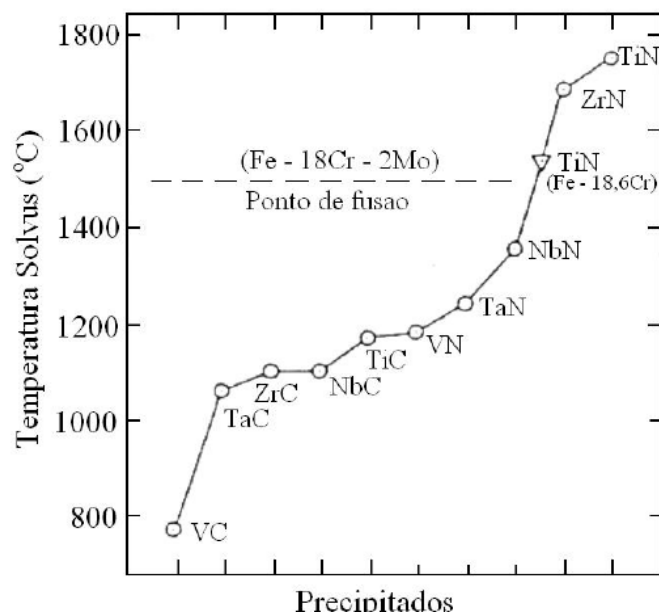


Figura 2.3. Temperatura de solvus para compostos estabilizadores (GORDON; BENNEKOM, 1996)

A utilização dos elementos alfa-gênios aumenta o campo de estabilização da fase ferrita, que permite a manutenção de uma estrutura ferrítica desde a temperatura de fusão até a temperatura ambiente. Ou seja, não há transformação de fase ferrita-austenita no aquecimento e/ou austenita-martensita no resfriamento, principalmente em juntas soldadas (SCHMITT, 2002).

Outra contribuição da utilização dos elementos alfa-gênios está relacionada com a melhoria da resistência à corrosão intergranular. Modenesi (2001) cita que nos aços inoxidáveis não estabilizados podem ocorrer precipitações de carbonetos de cromo nos contornos de grãos da matriz quando o material é exposto a uma dada faixa de temperatura por um tempo suficientemente longo, causando o empobrecimento de cromo nas regiões adjacentes aos contornos de grãos, aumentando a sensibilidade à corrosão intergranular quando exposto a um meio agressivo.

A seguir é apresentado de forma simplificada uma discussão sobre a estabilização dos aços inoxidáveis ferríticos com a utilização de titânio, nióbio e dupla estabilização titânio nióbio.

#### 2.2.1. Estabilização com titânio

Nos aços estabilizados somente ao titânio, os primeiros precipitados a serem formados quando o aço ainda está líquido, são os óxidos  $TiO_2$ , em seguida, ocorre a formação dos nitretos  $TiN$  em temperaturas ainda superiores à de fusão do aço inoxidável. Estes nitretos têm formato de paralelepípedo e, segundo Cavazos (2006), formam-se, muitas vezes, em torno dos óxidos utilizando estes como pontos de nucleação. A Figura 2.4 mostra precipitados do tipo  $TiN$ . Segundo Madeira (2007) estes óxidos e nitretos, a menos que o aço seja levado a temperaturas muito elevadas, não mais irão se solubilizar seja durante o processo de fabricação do aço ou em processamentos posteriores. Na soldagem, as altas temperaturas atingidas na poça de fusão poderão causar a dissolução desses precipitados.

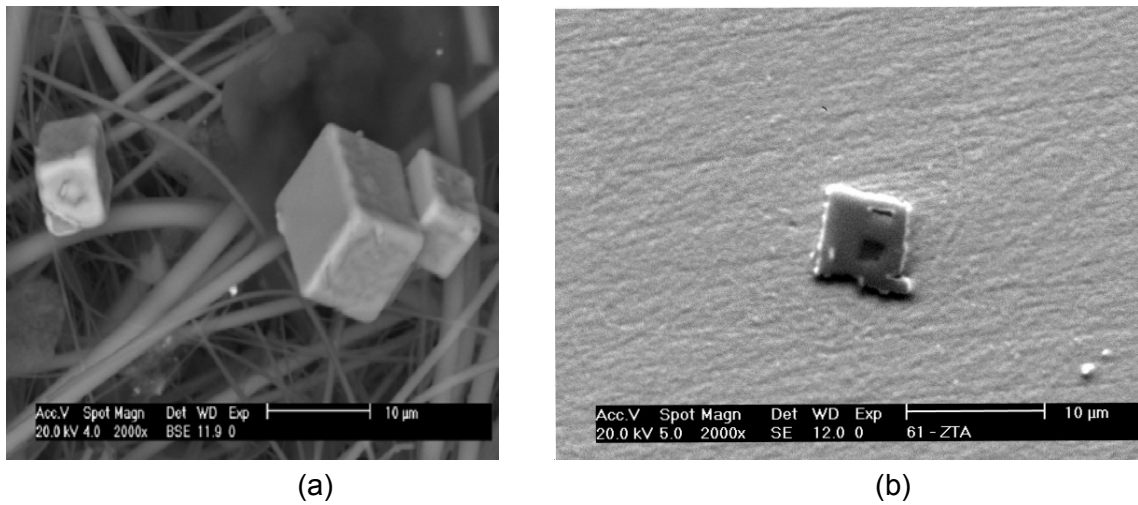


Figura 2.4. Nitretos de titânio (a) após dissolução do metal base e (b) precipitado na matriz do aço UNS 43932 (MADEIRA, 2007)

Madeira (2007) comenta que após a formação dos óxidos e nitretos de titânio, ocorrerá a formação de sulfetos e carbosulfetos ( $Ti_{1-x}S$  e  $Ti_4C_2S_2$ ), posteriormente, estes sulfetos poderão se decompor dando origem a carbonetos ( $TiC$ ) e sulfetos ( $MnS$ ). A formação destes precipitados está relacionada com os parâmetros (tempo, temperatura e deformação) do processo de fabricação do aço e de processos e aplicações posteriores que o aço pode ser submetido. Se após a formação de  $MnS$  e  $TiC$  ainda houver titânio disponível, pode ocorrer a formação de  $FeTiP$ . A Figura 2.5 mostra a seqüência de precipitação dos precipitados em um aço estabilizado ao titânio.

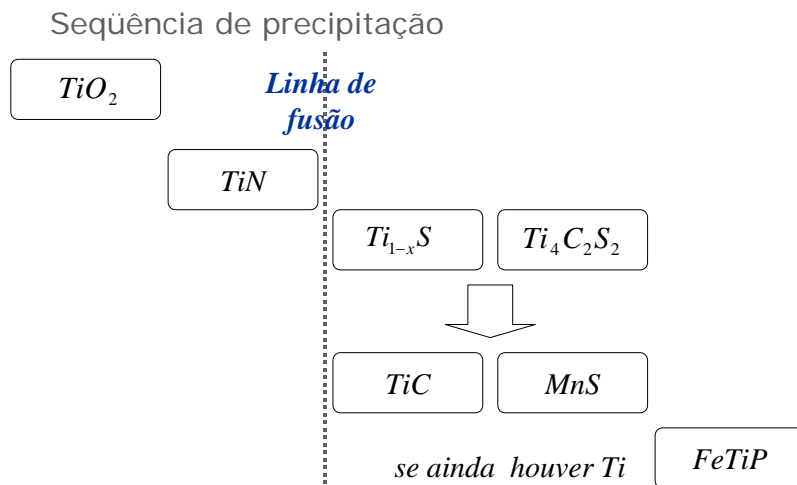


Figura 2.5. Sequência de formação de precipitados em aços estabilizados ao  $Ti$  (MADEIRA, 2007)

Gordon; Bennekom (1996) comentam que os aços estabilizados ao titânio quando aquecidos a alta temperatura e em seguida resfriados rapidamente podem apresentar sensitização a corrosão intergranular. Uma explicação para este fenômeno é que os precipitados do tipo  $TiC$  se dissolvem no aquecimento e durante o resfriamento rápido não há tempo suficiente para que o carbono seja reincorporado aos precipitados. Este carbono poderá formar carbonetos de cromo do tipo  $Cr_{23}C_6$ , levando à sensitização. Este fenômeno poderá ocorrer no resfriamento pós-soldagem devido às altas taxas de resfriamento impostas.

Em condições práticas para a mono-estabilização com titânio e negligenciando-se o efeito da temperatura, trabalha-se com um teor de titânio superior ao valor calculado estequiometricamente de modo a ter-se uma quantidade deste elemento em solução sólida ( $\Delta Ti$ ), conforme mostra a Equação 2.1 (SATO; TANOUE, 1995):

$$\Delta Ti = [Ti] - 4[C] - 3,43[N] \quad \text{Equação 2.1}$$

A maior ductilidade é obtida quando titânio livre em solução sólida ( $\Delta Ti$ ) é igual a zero. Titânio em excesso aumenta a resistência mecânica por endurecimento por solução sólida, causando uma diminuição na ductilidade e um aumento na temperatura de transição dúctil-frágil. Além disto, devido ao maior tamanho de seus precipitados, aços estabilizados ao titânio podem ter uma menor tenacidade ao impacto. Do ponto de vista superficial, aços ao titânio apresentam um pior acabamento superficial e são fortemente atacadas quando em meios altamente oxidantes (como soluções de ácido nítrico) (SCHMITT et al., 2005). Sim et al. (2005) observou a formação de carbonetos de fase secundária no metal de base em aços inoxidáveis ferríticos com 15% de Cr e estabilizados ao titânio.

### 2.2.2. Estabilização com nióbio

Os primeiros precipitados a serem formados na presença de Nb são os carbonitretos do tipo  $Nb(C,N)$ . Estes carbonitretos têm morfologia tipo bastonete e, como se formam em temperaturas abaixo da linha de fusão, onde a taxa de difusão é menor, são mais finos que os de titânio. Assim, em geral, os aços estabilizados ao nióbio têm tenacidade melhor que os estabilizados ao titânio. Se após a formação dos  $Nb(C,N)$  ainda houver nióbio em solução, pode ocorrer a formação de uma fase intermetálica conhecida como fase de Laves  $Fe_2Nb$ , que pode também conter cromo e silício, desde que haja tempo suficiente para tal (BUCHER, 2004).

Fujita (2003) afirma que em manutenção em elevadas temperaturas (acima de  $650^\circ C$ ), o nióbio em solução sólida ( $\Delta Nb$ ) precipita na forma de partículas intermetálicas



(Fe<sub>x</sub>Nb<sub>y</sub>), também chamada de fase Laves, inibindo o crescimento de grão. Segundo Andrade (2006) esta fase é prejudicial, pois os aços inoxidáveis ferríticos são menos tolerantes a qualquer fase secundária devido à baixa tenacidade da estrutura ferrítica e sua baixa solubilidade para elementos intersticiais. Além disso, Gordon; Bennekom (1996) afirmam ainda que esta fase pode contribuir na formação da trinca a quente em soldas. Fugita et al. (2003) e Yamamoto et al. (2003) observaram a formação da fase Laves no metal de base estabilizado ao nióbio.

O nióbio é menos reativo e forma carbonetos e nitretos do tipo Nb(C,N) menos estáveis que o titânio, mas o suficiente para prevenir efeitos de sensitização. Normalmente estes precipitados estão na forma de bastão ou placas com tamanho em torno de 10 µm, sendo que os mesmos não diminuem significativamente a tenacidade dos aços. (BUCHER, 2004).

Em condições práticas para a mono-estabilização com nióbio e negligenciando-se o efeito da temperatura, trabalha-se com um teor de nióbio superior ao valor calculado estequiometricamente de modo a ter-se uma quantidade deste elemento em solução sólida ( $\Delta\text{Nb}$ ), conforme mostrado na Equação 2.2 (SATO; TANOUE, 1995):

$$\Delta\text{Nb} = [\text{Nb}] - 7,74([\text{C}] + [\text{N}]) \quad \text{Equação 2.2}$$

O nióbio tem menor solubilidade na ferrita em relação ao titânio, o que significa que ele não será tomado em solução sólida em grandes quantidades, o que permite uma melhor correlação da equação acima com os resultados práticos (GORDON; BENNEKOM, 1996).

Aksoy et al. (1998) observaram que aços inoxidáveis estabilizados ao nióbio apresentam precipitados do tipo NbC ou Nb<sub>2</sub>C para as ligas com teor acima 3,0% Nb. Além disto, foi observado o aumento em quantidade e tamanho das partículas de NbC com o aumento de  $\Delta\text{Nb}$ . Segundo eles, o precipitado Nb<sub>2</sub>C apresenta-se maior e mais arredondado e é dissolvido durante aquecimento a 1100°C. Juntamente com Kuzucu et al. (1997), estes pesquisadores verificaram melhores propriedades de resistência ao desgaste e tenacidade para um teor de nióbio de 0,50% em peso.

Inque; Kikuchi (2003), conforme apresenta a Figura 2.6 estudaram a variação do limite de escoamento (LE) do aço inoxidável ferrítico a temperatura de 950°C em função da porcentagem dos elementos de liga nióbio, molibdênio, tungstênio, titânio, entre outros no aço inoxidável ferrítico de médio cromo e baixo valor de elementos intersticiais (carbono e nitrogênio) e observaram que o nióbio foi o elemento que mais contribuiu para o aumento da resistência do material, devido ao endurecimento por solução sólida.

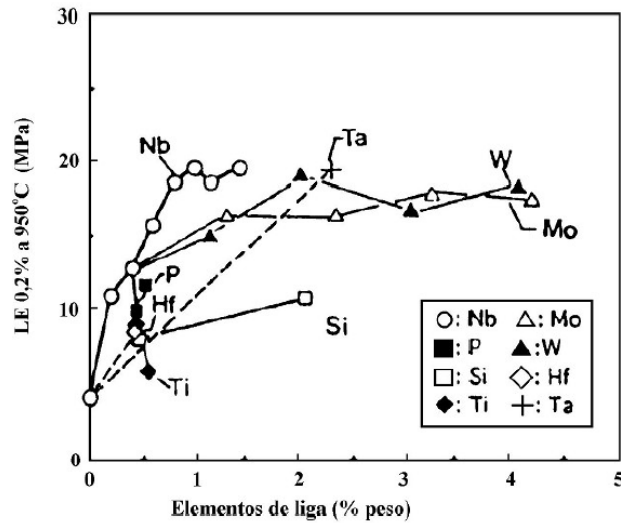


Figura 2.6. Influências dos elementos de liga no limite de escoamento a alta temperatura dos aços inoxidáveis ferríticos (INQUE; KIKUCHI, 2003)

### 2.2.3. Dupla estabilização com titânio e nióbio

Segundo Washko; Grubb (1991), a estabilização com titânio e nióbio pode ser uma boa alternativa para minimizar os problemas que ocorrem nos aços estabilizados com um ou outro elemento, uma vez que a quantidade de cada elemento é menor, minimizando possíveis efeitos nocivos destes elementos. Como a quantidade de titânio adicionado é menor, os problemas de tenacidade e elevação da temperatura de transição dúctil-frágil devido à formação de grandes partículas de  $Ti(C,N)$  são também minimizados. De acordo com Gordon; Bennekom (1996), na soldagem a bi-estabilização minimiza as chances de formação de trincas a quente, uma vez que os  $TiN$  formados ainda na poça de fusão líquida servem como pontos de nucleação de grãos diminuindo o seu tamanho na zona fundida e, conseqüentemente, aumentando a área de contorno de grão.

No caso de um aço bi-estabilizado ao Ti e Nb, o primeiro precipitado a se formar foi o  $TiO_2$  seguido do  $TiN$ . Se após a formação dos óxidos e nitretos de titânio ainda houver titânio disponível em solução, poderá ocorrer a formação de sulfetos de titânio  $Ti_{1-x}S$  e carbosulfetos de titânio e nióbio. Caso não mais haja titânio disponível em solução ocorrerá a formação de sulfetos de manganês  $MnS$  e carbonetos e carbonitretos de Nb. A formação de  $TiC$  ainda poderá ocorrer em função da dissolução dos precipitados  $Ti_{1-x}S$  durante o processo de fabricação do aço (BUCHER, 2004). A Figura 2.7 mostra a seqüência de precipitação para um aço bi-estabilizado.

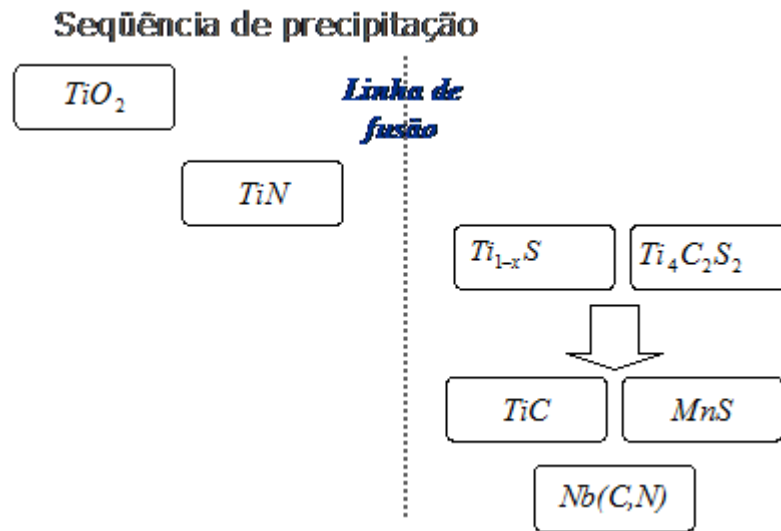


Figura 2.7. Seqüência de formação de precipitados para um aço bi-estabilizado ao *Ti* e *Nb* (MADEIRA, 2007)

Em termos de propriedades mecânicas e de corrosão, os aços duplamente estabilizados têm comportamento intermediário a mono-estabilização (GORDON; BENNEKOM, 1996).

Entre as principais diferenças microestruturais entre os elementos estabilizantes nióbio e titânio têm-se que o nióbio modifica mais a rede cristalina, possui um menor limite de solubilidade e um maior coeficiente de difusão na matriz ferrítica (OLIVEIRA, 2003). Para o caso da alteração da rede cristalina, tem-se um efeito não só de tamanho de átomos como efeito de interações eletrônicas. Além disto, esta maior alteração da rede cristalina pelo nióbio indica que sua adição permite uma maior resistência mecânica por meio de endurecimento por solução sólida. A maior difusão e menor limite de solubilidade do nióbio na matriz ferrítica permite que o mesmo, em temperaturas elevadas, difunda para os contornos de grão promovendo uma precipitação neste local.

Em condições práticas para as ligas duplamente estabilizadas e negligenciando-se o efeito da temperatura, trabalha-se com teores de titânio e nióbio superiores aos valores calculados estequiometricamente de modo a ter-se uma quantidade destes elementos em solução sólida ( $\Delta Nb$  e  $\Delta Ti$ ), conforme mostrado nas equações 2.3 e 2.4 (FUJIMURA; TSUGE, 1999):

$$\Delta Nb = [Nb] - (0,7 \times 7,74[C]) \quad \text{Equação 2.3}$$

$$\Delta Ti = [Ti] - 3,42[N] - (0,3 \times 4[C]) \quad \text{Equação 2.4}$$

Neste caso, considera-se que todo o nitrogênio precipita-se na forma de nitreto de titânio e que 70% do carbono na forma de carboneto de nióbio e o restante em carboneto de titânio (FUJIMURA; TSUGE, 1999). Além disto, a presença de dois estabilizantes pode também levar à formação de carbonitreto do tipo (TiNb)CN. O titânio pode também formar precipitados com o carbono e o enxofre ( $Ti_4C_2S_2$ ) (LACOMBE et al., 1990).

### 2.3. Soldagem dos Aços Inoxidáveis Ferríticos

#### 2.3.1. Soldabilidade

Apesar de toda a evolução dos aços inoxidáveis ferríticos, estes ainda são considerados de pior soldabilidade que os austeníticos. Modenesi (2001) comenta que em geral esta menor soldabilidade é devido a baixas ductilidade e tenacidade além de sensibilidade à corrosão intergranular. Trinca de solidificação também podem ocorrer na zona fundida. De uma maneira geral, a fragilização é mais intensa em aços com maiores teores de cromo e elementos intersticiais (carbono e nitrogênio) e a sensibilização à corrosão intergranular é maior com maiores teores de elementos intersticiais e menores teores de cromo, quando exposto a um meio agressivo.

Lippold; Kotecki (2005) citam que a fragilização da solda é atribuída a três fatores principais:

1. Granulação grosseira nas regiões de crescimento de grão da zona termicamente afetada e também na zona fundida, quando o metal de adição for também um aço inoxidável ferrítico;
2. Formação de uma rede de martensita ao longo dos contornos de grãos ferríticos (isto ocorre para ligas com maiores teores de elementos intersticiais);
3. Fragilização a alta temperatura devido à reprecipitação de carbonitreto em uma forma intensa e muito fina após a soldagem.

Segundo Campbell (1992) a condutividade térmica superior dos ferríticos em relação aos austeníticos gera uma necessidade de maior introdução de calor, que acaba contribuindo também para gerar crescimento de grão. Reddy; Mohandas (2001) apontam também, como um dos principais problemas enfrentados na soldagem aço inoxidável ferrítico a formação de grãos grosseiros na ZTA, contribuindo para a diminuição da resistência a tenacidade dessa região. Com relação ao crescimento de grão Vlack (1990) afirma que ele ocorre devido ao aumento da difusividade dos átomos (de todo o material) causada pelo aumento da temperatura, que induz uma força motriz de crescimento de grão

que ocorre devido ao deslocamento de átomos através do movimento atômico dos grãos com contorno convexo para grãos côncavos.

Tojo (2010) apresenta como solução para o crescimento de grão da zona fundida dos aços inoxidáveis ferríticos a substituição dos metais de adição de arames maciços por arames tubulares, obtendo um refino significativo do tamanho de grão. Esta redução está relacionada provavelmente aos elementos componentes do fluxo do metal de adição tubular, mas por ser um arame comercial não foram detalhados os componentes do material. Da mesma forma para metais de adição de aço inoxidável ferrítico maciço, Resende (2007) e Madeira; Modenesi (2008) observaram que estabilizações ao titânio geram um refino do tamanho de grão também significativo.

No mesmo sentido Souza (2009) apresenta a aplicação dos arames tubular ER409Ti e ER430LNb, em substituição do arame maciço ER308LSi de uniões de exaustores automotivos com o gás de proteção  $Ar+2\%O_2$  e segundo o autor verificou-se vantagens nestas substituições devido a reduções do tamanho de grão, maiores produtividades (característica do arame tubular) e maiores penetrações.

Segundo Cunto (2005) o elevado crescimento do tamanho de grão, aliado a formação parcial de martensita e a precipitação de carbonitretos de cromo, são as principais fontes causadoras de perda de ductilidade e redução da resistência à corrosão da solda de aços inoxidáveis não estabilizados (do tipo AISI 430).

Madeira (2007) afirma que os aços bi-estabilizados são particularmente interessantes na soldagem, pois os precipitados de TiN servem como pontos de nucleação para os grãos na zona fundida, contribuindo para uma estrutura com grãos menores. Já os finos precipitados de nióbio, Nb(C,N), parecem ter um papel mais efetivo na restrição do crescimento de grão na zona termicamente afetada. A Figura 2.8 apresenta o fenômeno da dissolução e reprecipitação. Nota-se que na ZTA há a presença de grandes carbonitretos de titânio e cromo ao passo que na ZF nota-se a presença de precipitados muito finos, porém em maior quantidade. Vê-se ainda que a reprecipitação dos pequenos precipitados da ZF obedece à orientação cristalográfica imposta pela subestrutura de solidificação.

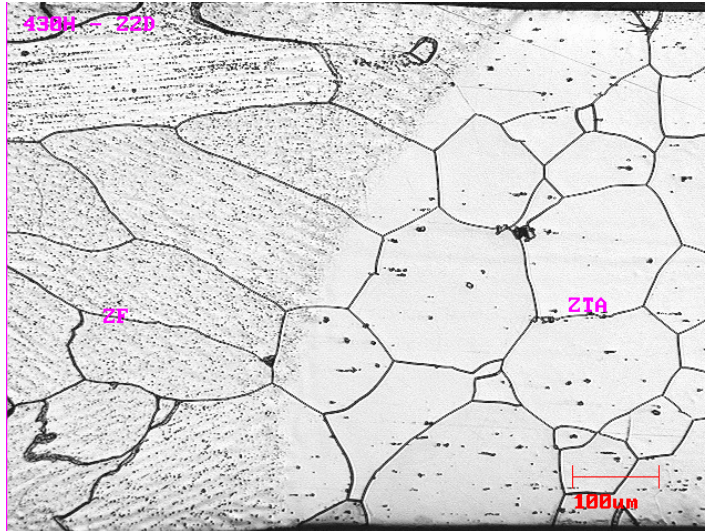


Figura 2.8. Dissolução e reprecipitação dos carbonitretos de titânio e cromo em uma liga com 17% de cromo e semi-estabilizada ao titânio (MADEIRA, 2007)

Meyer; Toit (2001) observaram em seu trabalho que na solda do aço inoxidável ferrítico a presença de martensita na estrutura ferrítica pode facilitar a ocorrência de uma fratura frágil. Os autores discutem ainda que o carbono e o nitrogênio podem afetar a solda (zona termicamente afetada) principalmente devido a maior dureza da martensita devido ao acréscimo daqueles elementos.

Ferrante (2002) afirma que os aços inoxidáveis ferríticos não estabilizados apresentam precipitados ricos em cromo (carbonetos ou nitretos de cromo) que ocorrem de forma intergranular ou transgranular, devido a supersaturação de carbono e ou nitrogênio na ferrita. Para enfrentar estes inconvenientes, principalmente durante a soldagem, são adicionados elementos que atuam como estabilizadores dos elementos intersticiais. Reddy; Mohandas (2001), conforme já citado, afirmam que a adição de elementos como o titânio, cobre e alumínio no metal de adição minimizam a formação de carbonetos de cromo nos contornos de grãos. Nakata et al. (1996) observou que o titânio diminui e o nióbio aumenta a tenacidade da solda, além de prevenir a sensitização a corrosão. Keown; Pickering (1982) destacam que o nióbio pode formar compostos intermetálicos que possuem efeito fragilizante acentuado, mas que pode ser suplantado pelo efeito benéfico de refino de grão ferrítico.

Na soldagem de aços estabilizados os precipitados encontrados no metal base não são conservados na zona fundida, pois as temperaturas atingidas nesta região são suficientes para dissolver todo tipo de precipitado. Durante o processo de solidificação (resfriamento da ZF) ocorre a reprecipitação em grande quantidade e tamanho menor, pois,

a grande taxa de resfriamento não permite que os precipitados cresçam. (HUNTER; EAGAR, 1980).

Madeira; Modenesi (2008) estudaram como se observa na Figura 2.9, os aspectos microestruturais para os metais de adição ER430Ti e ER430LNb e observou grãos mais finos para o ER430Ti e uma microestrutura mais homogênea da zona fundida com o uso do ER430LNb é mais homogênea, isto é, os grãos colunares têm tamanho menos variável. Relacionou este fato a maior presença de titânio com o uso do ER430Ti, que promove a adição de pontos de nucleação (óxidos e nitretos de titânio) na ZF tornando sua microestrutura mais heterogênea, com presença de grãos colunares finos e grãos equiaxiais. Também a presença de nitretos parece ser mais acentuada com o uso do arame ER430Ti podendo ser observada a formação de compostos nos contornos de grão, que podem estar associados à precipitação de carbonetos de cromo, uma vez que a previsão da composição química da ZF mostra um valor de delta negativo para a relação de estabilização, principalmente, em função do maior teor de C do arame ER430Ti. Por último, observou maiores quantidades de precipitados com menor tamanho quando do uso do ER430LNb. Este fato pode ser explicado pelo menor teor de titânio nesta zona fundida o que reduz a temperatura de precipitação e a probabilidade de formação de TiN.

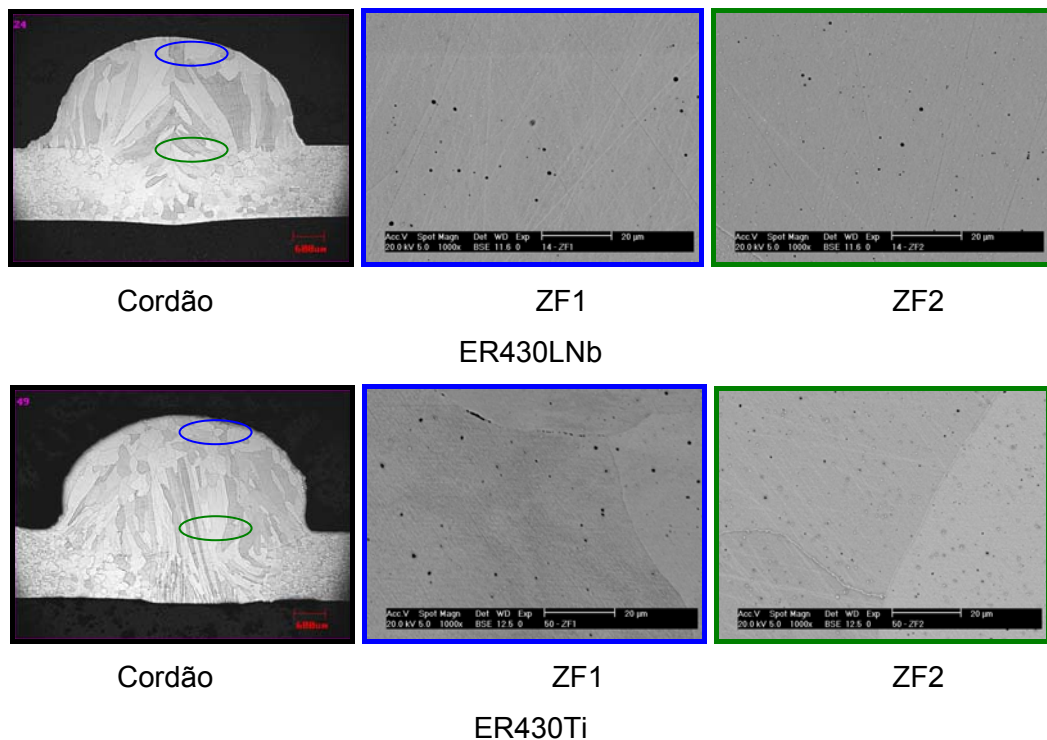


Figura 2.9. Comparação entre zonas fundidas com gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> (MADEIRA; MODENESI, 2008)

### 2.3.2. Metal de Adição

Normalmente os metais de adição utilizados nos processos de soldagem possuem uma composição química similar ao metal de base que se está soldando. Segundo Scotti (1991) desoxidantes ou outros elementos de liga são quase sempre adicionados ao metal de adição com o intuito de minimizar porosidades na solda ou para garantir propriedades mecânicas desejáveis na solda com gases de proteção ativos.

Dentre os elementos desoxidantes, Pereira (2000) afirma que os mais freqüentemente usados em eletrodos de aço são manganês, silício e alumínio e que o uso de desoxidantes em arames de enchimento varia de acordo com o gás e/ou condição usada. Além dos elementos desoxidantes, Karlsson (2005) afirma que os metais de adição de aço inoxidável ferrítico geralmente apresentam teores de cromo e molibdênio elevados para melhorar a resistência à corrosão além de, recentemente, o nitrogênio e até certo ponto o tungstênio, terem se tornado importantes elementos de liga para estes materiais.

Os aços inoxidáveis ferríticos eram soldados apenas com metais de adição austeníticos, principalmente para garantir uma qualidade adequada à solda. Modenesi (2001) afirma que em geral, quando se utiliza metais de adição com teores de carbono inferior a 0,03%, existe principalmente uma garantia de melhores resistências a corrosão intergranular e que metais de adição com adições de silício, principalmente no caso do metal de adição ER308LSi, possibilita maior fluidez à poça, facilitando o processo de soldagem.

Renaudot et al. (2000), afirmam que a soldagem de aços inoxidáveis ferríticos com metais de adição também ferríticos minimiza as alterações metalúrgicas bruscas provocadas pelo cordão de solda austenítico e promove melhor compatibilidade metalúrgica entre metal base e zona fundida devido as menores diferenças de dilatação térmica e microestrutura. Os autores afirmam que o metal de adição ER409Nb vem sendo utilizado desde a década de 90 para a soldagem de aços inoxidáveis ferríticos de baixo teor de cromo. Testes realizados com esse arame apresentaram cordões de boa qualidade de forma, ductilidade e resistência à corrosão intergranular.

Os arames ferríticos podem conter diferentes elementos em sua composição química tais como titânio, nióbio e alumínio, com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão das juntas. Inui et al. (2003) testou três tipos de metais de adição, não comerciais, de aço inoxidável ferríticos estabilizados, sendo um estabilizado apenas ao nióbio, o segundo ao nióbio e ao alumínio e o terceiro ao alumínio, titânio e nióbio na soldagem de aços inoxidáveis ferríticos. Neste trabalho o autor observou que a presença de alumínio, titânio e nitrogênio em quantidades adequadas é capaz e



resultar em uma zona fundida com grãos finos e, conseqüentemente, em melhores propriedades mecânicas.

Madeira (2007) comparando os resultados dos arames ER430Ti e ER430LNb utilizando o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>, observou uma maior penetração com o uso do ER430Ti. Este fato foi observado para a mesma regulagem da fonte de soldagem (tensão e velocidade de alimentação) e maiores correntes foram necessárias para a mesma taxa de fusão quando comparado com o outro arame. O autor concluiu que esta maior penetração está relacionada aos maiores valores de resistividade do metal de adição ER430Ti em relação ER430LNb. Os valores de resistividade elétrica foram medidos por Resende (2007) de forma comparativa para os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb, constatou-se que os dois primeiros arames possuem valores relativamente parecidos, já o último arame possui valores mais baixos de resistividade elétrica.

Resende (2007) comparou ainda os cordões de solda obtidos com os arames ER430Ti e ER430LNb, notou que a aparência do cordão de solda do ER430Ti foi bastante inferior, com menor molhabilidade e qualidade superficial pior. Este fato foi atribuído, como o principal efeito, a rugosidade superficial do arame ER439Ti, que resultou em alimentação do arame eletrodo de forma irregular.

Análises na transferência por curto-circuito para o metal de adição ER430Ti em comparação com o ER430LNb também foi realizada por Ferreira Filho (2007) onde observou instabilidades na transferência metálica por curto-circuito com o metal de adição estabilização a base de titânio e relacionou esta instabilidade a influência deste elemento nas tensões superficiais entre o arame e a gota durante a transferência metálica.

### 2.3.3. Gás de proteção

O processo MIG/MAG requer um gás de proteção para prevenir oxidações do metal no arco de soldagem. Além disso, o gás promove a estabilização do arco e uma transferência metálica uniforme. O gás de proteção afeta não somente as propriedades da solda, mas determina também a forma e penetração do cordão de solda, além do índice residual de hidrogênio, de nitrogênio e de oxigênio dissolvidos no metal da solda, podendo também adicionar elementos como o carbono, devido à composição do gás (LIAO; CHEN, 1998).

A interação da ação química e física do gás de proteção afeta as propriedades do arco e da solda e determina sua forma e padrão de penetração, além da quantidade de respingos gerados e geração de fumaça e fumos (LYTTLE; STAPON, 1990 e URMSTON, 1996). Norrish (1992) afirma que a função secundária do gás de proteção inclui o controle da geometria do cordão de solda e das propriedades mecânicas.

Além disso, a composição do gás influencia a velocidade de soldagem (pela alteração na transferência de calor, no formato do arco e na transferência metálica), o custo de limpeza e manutenção do equipamento de soldagem (pela variação da geração de respingos e fumos) e, como resultado, o custo de soldagem (PEREIRA, 2000).

Pequenas variações na composição da mistura de gás têm um efeito relativamente pequeno na taxa de fusão do arame em comparação com sua influência nas características de transferência arco/metálica e no comportamento da poça de solda. Nem sempre é possível especificar, com precisão, faixas de composições para misturas de gases para materiais ou aplicações específicas (LUCAS, 1992).

A seleção de um gás de proteção é usualmente feita com base em custos e qualidade. O uso de um gás mais caro é muitas vezes justificado, contanto que um aumento significativo de efeitos benéficos seja obtido, isto é, uma maior taxa de deposição ou a redução da necessidade de reparos de soldagem (BENNETT, 1989).

Pierre (1987) e Lyttle; Stapon (1990) sintetizam os fatores que governam a seleção de gases de proteção para MIG/MAG, entre eles estão o material de base a ser soldado, o tipo de transferência metálica desejado, o diâmetro do eletrodo e o tipo e posição de soldagem. Além disso, deve considerar o seu efeito na eficiência de proteção, na qualidade do metal de solda depositado, na forma da penetração, na estabilidade do arco, na geometria do cordão de solda e nas propriedades mecânicas da solda.

Para obter um gás de proteção que seja adequado para uma aplicação específica, uma mistura de gases geralmente é necessária. Cada gás básico contribui com determinadas propriedades para o desempenho global da mistura (SCOTTI, 1991).

Na soldagem MIG/MAG dos aços inoxidáveis, é comum o uso de argônio com um ou dois por cento de um elemento oxidante (oxigênio ou gás carbônico) para obter uma adequada estabilização do arco e da transferência metálica. O oxigênio é considerado duas a três vezes mais efetivo que o dióxido de carbono em relação à estabilização do arco, sendo a quantidade mínima que deve ser adicionada no gás de proteção é de 5% de  $\text{CO}_2$  ou 2% de  $\text{O}_2$ . O tamanho da gota é diminuído e o número de gotas transferidas por unidade de tempo aumenta com o aumento da quantidade de oxigênio no gás de proteção. O oxigênio reduz a tensão superficial do cordão de solda fundido, proporcionando melhor molhamento do cordão e maiores velocidades de soldagem. Pequenas adições de  $\text{CO}_2$  funcionam de maneira similar. (STENBACKA; PERSSON, 1992).

Soldagem com argônio puro, hélio puro ou com misturas destes resulta em um arco instável. Isso ocorre, porque a emissão de elétrons tem lugar a partir de áreas contendo óxidos. Quando a emissão ocorre, o óxido é rompido e o arco salta para outra área contendo óxidos, resultando em um desvio do arco. Desta forma, é necessária a adição de

pequenas quantidades de oxigênio ou dióxido de carbono ao gás para construírem-se, continuamente áreas próximas ao arco contendo óxidos às quais, desta maneira, têm um efeito estabilizador ao arco (STENBACKA; PERSSON, 1992). Como o arame está geralmente na polaridade positiva em MIG/MAG, o oxigênio é requerido para regenerar a camada de óxido necessária para estabilizar as raízes catódicas na superfície do material sendo soldado (BENNETT, 1989 e LUCAS, 1992).

A adição de oxigênio ou dióxido de carbono, também, reduz a tensão superficial da gota fundida na qual se estabiliza o arco quando se solda na forma goticular. A umectação do metal base é, também, melhor se comparada com argônio puro, por exemplo, o ângulo de contato entre a solda e o metal base torna-se menos pronunciado. A desvantagem do oxigênio e dióxido de carbono é a de que eles produzem uma superfície de solda oxidada, resultando em perda de elementos de liga, quando o material passa através do arco (perda por oxidação). A característica oxidante do arco depende das porcentagens de oxigênio e dióxido de carbono. Outra desvantagem do dióxido de carbono, no gás de proteção, é a inclusão de carbono no metal depositado (STENBACKA; PERSSON, 1992). Adições progressivas de dióxido de carbono em argônio puro proporcionam um balanço de deslocamento de goticular puro para um modo de transferência globular (VAIDYA, 2002).

Misturas com maiores níveis de dióxido de carbono podem ser usadas para transferência por curto-circuito, comumente argônio mais 20 ou 25% de CO<sub>2</sub>. Porém, Stenbacka; Persson (1989) mostram que mais que 15% de CO<sub>2</sub> no gás de proteção desestabiliza a transferência metálica e aumenta a quantidade de respingos. Souza (2010) observou que gases de proteção à base de argônio com teores de CO<sub>2</sub> variando entre 8 a 25% exigem que a região de estabilidade operacional de transferência por curto-circuito trabalhe com maiores valores de tensão de soldagem (arcos com aproximadamente mesmo comprimento), efeito mais pronunciado quando se altera de 15 para 25%.

Baixo; Dutra (2009) estudaram a estabilidade da transferência metálica e a molhabilidade dos cordões de solda na soldagem de um metal de adição de aço inoxidável duplex utilizando os gases de proteção argônio e misturas de argônio com dióxido de carbono ou oxigênio, além de outras misturas. Os autores não observaram alterações significativas em termos de estabilidade, independente do gás de proteção utilizado no modo de transferência por curto-circuito (com exceção quando se utilizou Ar+25%O<sub>2</sub>, que teve uma menor estabilidade), mas observaram uma menor molhabilidade quando se utilizou somente o argônio.

Segundo Pereira (2000), a mistura gasosa Ar+2%O<sub>2</sub> recomendada para o arame E410NiMo acarreta cordões com baixa molhabilidade, o que favorece o aparecimento de defeitos na solda multipasses. Além disso, o uso de atmosferas contendo CO<sub>2</sub> deveria ser

descartado, pois um acréscimo do teor de C no metal de solda poderia ocasionar aumento de dureza, o que reduziria sua tenacidade.

Cedré et al. (2006) analisando a influência do aumento de oxigênio em mistura no gás de proteção propuseram que o aumento da quantidade de oxigênio na mistura, e por tanto o aumento do mesmo na atmosfera do arco provoca uma diminuição da tensão superficial nas gotas de metal que se estão transferindo, o que facilita um mais fácil desprendimento da gota. O mesmo fato foi observado por Jönsson et al. (1995).

Um incremento na proporção de elementos oxidantes no gás de proteção aumenta as perdas de manganês, cromo, nióbio. As perdas por oxidação podem ser de 0,3% para manganês e cromo e cerca de 0,1% para silício e nióbio, quando o teor de oxigênio no gás é menor que 30%. O carbono é oxidado para volume menor somente para teor de oxigênio menor que 10% (STRASSBURG, 1976).

O dióxido de carbono, no gás de proteção, resulta na inclusão de carbono, bem como, uma oxidação do metal depositado. Uma desvantagem da inclusão de carbono, é que o teor de ferrita no metal depositado, pode decrescer, uma vez que o carbono é forte formador de austenita. Isto pode ter um efeito negativo na resistência às trincas de solidificação do metal depositado, bem como, não conseguir atingir os valores de ferrita especificados (LUNDQVIST, 1980). Liao; Chen, (1998) detectaram que a taxa de respingos aumenta com o aumento de dióxido de carbono contido em misturas de argônio com dióxido de carbono, sendo que o mesmo ocorre para o oxigênio.

Mohandas et al. (1999) realizaram em seu trabalho uma comparação soldando o aço inoxidável ferrítico ER430 pelo processo MIG utilizando argônio puro e uma mistura de argônio com 2% de oxigênio como gás de purga, onde observou um aumento da quantidade de austenita retida, que poderia ser devido à combinação do cromo com o oxigênio.

Liao; Chen (1998) avaliaram as propriedades mecânicas assim como as microestruturas com a variação do gás de proteção (misturas de argônio com oxigênio e/ou dióxido de carbono) também para aços inoxidáveis austeníticos, onde observaram que com o aumento do potencial de oxidação do gás de proteção ocorre uma redução da tenacidade a temperatura ambiente (energia absorvida no ensaio de impacto) devido as maiores frações volumétricas das inclusões e da ferrita  $\delta$  presentes no material. Observaram também que com o aumento de adições de dióxido de carbono no gás de proteção acarretou em uma diminuição no número de ferrita devido ao aumento da quantidade de carbono depositado na solda, uma vez que este elemento é gamagênico.

Ferreira Filho (2007) observou comparando a soldabilidade de aços inoxidáveis ferríticos sem e com estabilização (ER430, ER430Ti e ER430LNb) que na zona fundida dos metais de adição sem estabilização se forma uma rede de martensita no contorno de grão

quando se utiliza pequenas porcentagens de dióxido de carbono no gás de proteção, com o metal de adição estabilizado com titânio ocorreu a formação de martensita com a utilização de uma porcentagem acima de 4% de dióxido de carbono, provavelmente devido a baixa quantidade de titânio em relação ao alto percentual de carbono (estabilização inadequada) do arame e para o metal de adição estabilizado ao nióbio não ocorreu formação de martensita para gases de proteção contendo até 8% de dióxido de carbono.

Cardoso et al. (2003) similarmente realizou deposições sobre chapas de aço carbono de quatro camadas de soldas realizadas com o metal de adição E410NiMo, utilizando os gases de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub>, Ar+20%CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> puro e também observou que o teor de C aumentou diretamente com a quantidade de CO<sub>2</sub> no gás de proteção.

#### 2.4. Corrosão intergranular dos aços inoxidáveis ferríticos soldados e seus métodos de detecção

A sensitização dos aços inoxidáveis é a propensão à corrosão localizada em contornos de grão. Segundo Davis (1994) esta sensitização pode ocorrer devido à precipitação de carbonetos de cromo em contornos de grão, que formam uma região empobrecida em cromo a qual pode ser susceptível à corrosão. Kou (2003) apresenta esquematicamente um contorno de grão sensitizado (Figura 2.10), onde a linha preta representa os contornos de grão, os círculos pretos os carbonetos de cromo precipitados e as partes brancas, próximas aos contornos de grão são regiões empobrecidas em cromo, que se tornam susceptíveis à corrosão.

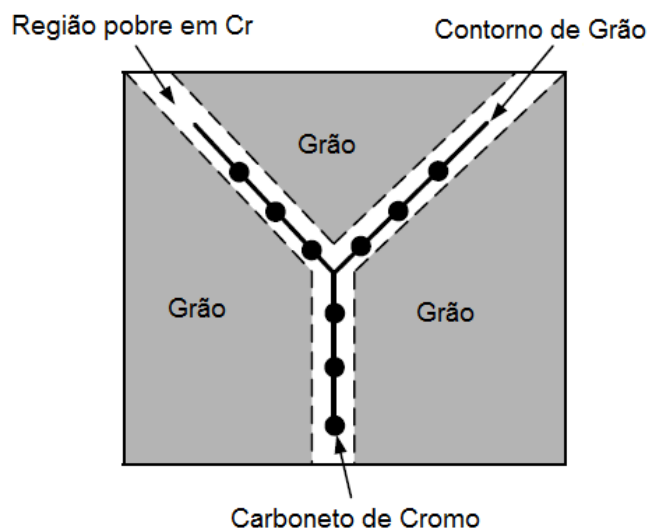


Figura 2.10. Representação esquemática do contorno de grão sensitizado de um aço inoxidável (KOU, 2003)

Sedriks (1996) observou que a corrosão intergranular pode ocorrer tanto nos aços austeníticos quanto nos ferríticos, mas a temperaturas e tempos muito mais baixos para os aços inoxidáveis ferríticos, conforme mostra a Figura 2.11. Segundo o autor isto ocorre devido à solubilidade de carbono e/ou nitrogênio na austenita ser muito maior que na ferrita em menores temperaturas.

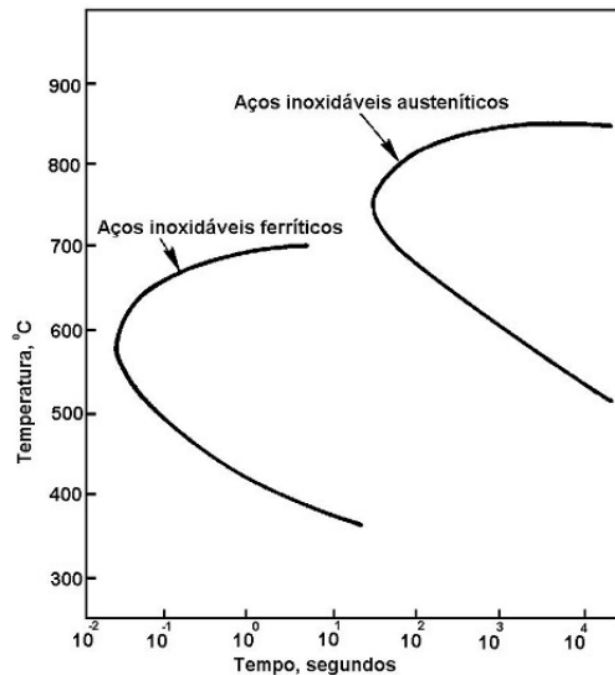


Figura 2.11. Comparação das temperaturas de sensibilidade para os dois principais tipos de aços inoxidáveis (SEDRICKS, 1996)

Uma vez que a solubilidade de carbono na ferrita em temperaturas inferiores a 700°C é muito baixa, nenhum tratamento térmico com temperatura de aquecimento abaixo deste valor pode evitar a precipitação de carbonetos e nitretos. A partir de 750°C, a solubilidade de precipitados na matriz é alta o suficiente para colocar uma quantidade considerável de carbono e nitrogênio em solução. No resfriamento ocorre diminuição da solubilidade, o que resulta em precipitação de carbonetos e nitretos contendo uma elevada fração de cromo. Se o resfriamento é moderadamente rápido, este causa um empobrecimento de cromo da matriz, na região adjacente aos precipitados e, desta maneira, torna a mesma susceptível à corrosão. O modo mais efetivo de eliminar a sensibilidade dos aços inoxidáveis ferríticos é recozê-los em aproximadamente 800°C ou resfriá-lo lentamente através da faixa de temperatura 700-500°C, o que permite a difusão de cromo para as regiões empobrecidas (LEE et al., 1999).

Segundo Zezulova; Protiva (1976) a corrosão intergranular é minimizada quando se realiza uma estabilização do aço inoxidável ferrítico com o nióbio com concentração superior a oito vezes a quantidade de carbono e nitrogênio. Já para o titânio basta que este tenha uma concentração seis vezes superior a do carbono e nitrogênio no material. Cunto (2005) afirma que adições de molibdênio ou aumento nos teores de cromo permitem obter aços inoxidáveis ferríticos com melhor resistência à corrosão.

Dentre os métodos de medição da sensitização em um material destaca-se o ataque eletrolítico em solução de cristais de ácido oxálico a 10 %, com o objetivo de auxiliar na posterior classificação das microestruturas observadas (de forma qualitativa) que Majidi; Streicher (1986) os classifica como “step” (Figura 2.12-a) quando as estruturas possuem limites de contornos de grãos não envolvidos por carboneto de cromo, “dual” (Figura 2.12-b) quando as estruturas possuem alguns contornos com “ditches”, somado a “steps”, mas sem nenhum grão completamente contornado por carbonetos de cromo, ou “ditch” (Figura 2.13-c) as estruturas que possuem um ou mais grãos completamente envolvidos por carboneto de cromo.

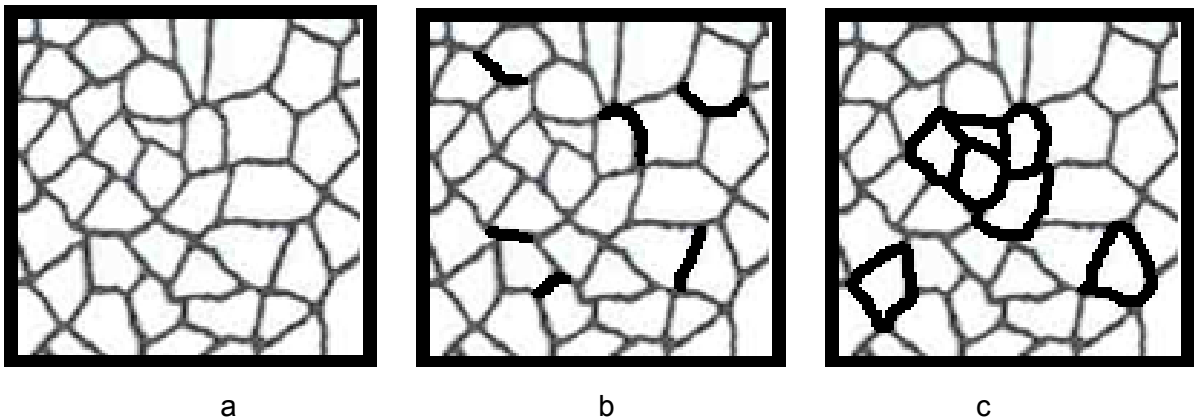


Figura 2.12. Representação esquemática destas estruturas (a) step, (b) dual e (c) ditch que podem ocorrer com o ataque eletrolítico em solução de cristais de ácido oxálico a 10 %, onde as partes escuras próximas aos grãos representam as regiões que sofreram corrosão intergranular

Com o ensaio DL-EPR (*Double Loop Electrochemical Potentionkinetic Reactivation*) consegue-se avaliar quantitativamente a suscetibilidade da junta soldada ao ataque intergranular. O método 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, conforme se

observa na Figura 2.13, é apresentado na forma de duas curvas levantadas em um gráfico. Uma curva é referente à polarização anódica ( $I_a$ ) e a outra à polarização reversa ( $I_r$ ). Os picos de cada curva correspondem aos valores máximos de corrente ( $I$ ) alcançados. A razão  $I_a/I_r$  determina o nível de sensitização que ocorreu no material (SILVA et al., 2005)

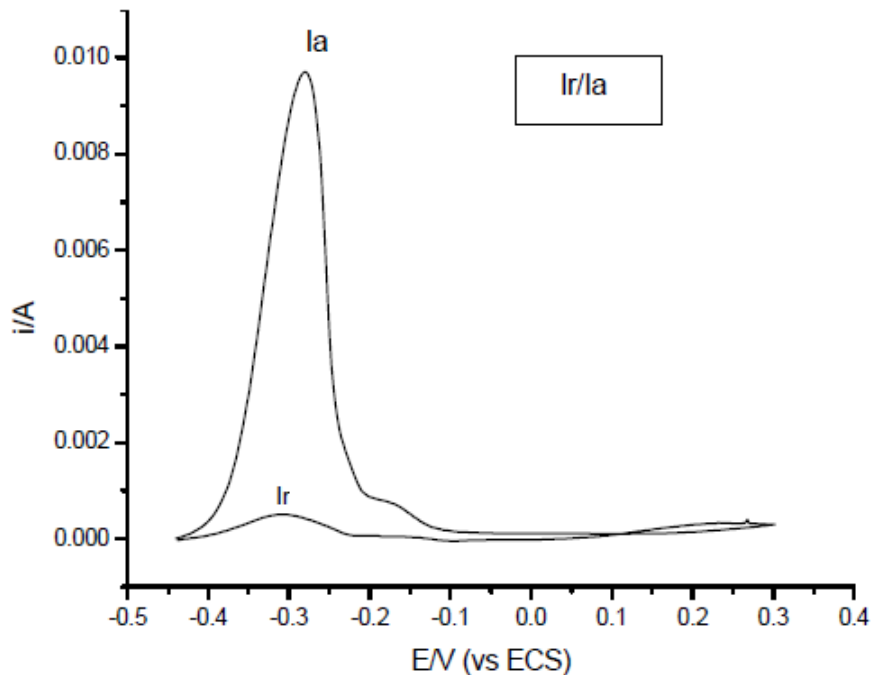


Figura 2.13. Representação gráfica do ensaio DL-EPR formado pelas curvas de polarização anódica ( $I_a$ ) e de polarização reversa ( $I_r$ ), apresentando o nível de sensitização que ocorreu no material ( $I_a/I_r$ ) (SILVA et al., 2005)

Segundo Majidi e Streicher (1986) para materiais austeníticos com tamanho de grão ASTM em torno de 3,5 as 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, segundo Silva et al. (2005) estas relações para os aços inoxidáveis ferríticos geraram discrepâncias quando comparadas com as estruturas obtidas. Kim et al. (2009) avaliando a corrosão intergranular do aço inoxidável ferrítico estabilizado ao titânio 409L (metal de base) aplicado em sistemas de exaustores automotivos pelo ensaio DL-EPR e observaram que valores acima de 0,3 para a relação ( $I_a/I_r$ ) já ocorriam corrosões significativas para o material devido a perda de cromo no contornos de grão causada pela segregação do cromo nas proximidades dos carbonetos de cromo formados.



Greeff; Toit (2006) estudaram a susceptibilidade do aço inoxidável ferrítico com 11-12% de cromo, não estabilizado, a sensitização após a soldagem com dois níveis de aporte térmico e observaram que para maiores aportes térmicos ocorre a formação de austenitas na ZTA, que durante o resfriamento pode auxiliar na diminuição da sensitização, uma vez se transformaram em martensita absorvendo maior quantidade de carbono, diminuindo, portanto, a formação de carbonetos. Observaram ainda que velocidades de soldagem excessivas, para este material, podem aumentar a sensitização quando se solda com baixo aporte térmico, uma vez que não formará martensita.

Lima (2007) estudou metodologias de avaliação da corrosão do aço inoxidável ferrítico AISI 439 soldado com um metal de adição austenítico por meio de um ataque eletrolítico com ácido oxálico e pelo ensaio DL-EPR. O autor observou que o metal de base não apresentou sensitização, sendo que foi observada esta sensitização na zona termicamente afetada tanto para baixos (88,9 KJ), quanto para maiores valores (252 KJ) de aporte térmico. Para confirmar estes dados realizou-se o ensaio DL-EPR, obtendo-se uma relação Ir/Ia de 0,44 para o metal de base, 1,08 para a zona termicamente afetada de menor aporte térmico e 1,44 para a de maior aporte térmico. Logo, a obteve-se valores contrários aos observados por Greeff; Toit (2006), que deve estar relacionado provavelmente à dupla estabilização presente no AISI 439.

Em seu trabalho Cunto (2005) estudou comparativamente a resistência a corrosão localizada dos aços inoxidáveis ferríticos AISI 434, 436 e 439 e observou uma maior dificuldade de "repassivação" para os aços AISI 434 em relação aos aços AISI 436 e 439. A observação da superfície dos aços AISI 434 e 304, após ensaios de imersão, indicaram a presença de ataque intergranular. Este resultado mostrou o efeito benéfico da adição dos estabilizadores Ti e Nb na resistência à corrosão intergranular dos aços ferríticos.

Moreira (2009) soldando o aço inoxidável ferrítico UNS43932 com arame tubular bi-estabilizado ao nióbio e titânio com o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> observou que a microestrutura não apresentou diferenças importantes em relação à do metal base, exceto um aumento do tamanho de grão, não observando ainda a sensitização dos cordões de solda para as condições estudadas.

Adições de nióbio entre 0,61 a 0,93% foram analisadas por Bond; Lislovz (1969) que verificaram uma resistência à corrosão intergranular aceitável, mesmo para amostras na condição soldada. Para o ensaio de ebulição em ácido nítrico 65%, foi mostrado que 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 aços inoxidáveis ferríticos e observaram que o material que não possuiu uma estabilização adequada ao nióbio tornou-se mais susceptível que os demais aços inoxidáveis estudados.

Bond; Lislovz (1969) analisaram o efeito da adição de Ti onde 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 outra segunda fase frágil.

Madeira (2007) realizou 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. O autor realizou este ensaio buscando confirmar a presença de carbonetos de cromo nos contornos de grãos, devido à ocorrência das precipitações e ao seu tamanho reduzido, que não puderam ser identificados com precisão pelo EDS. A Figura 2.14 apresenta as metalografias dos corpos de prova, onde nota-se que a ZF obtida com Ar+2%O<sub>2</sub> apresentou menores indícios de sensitização, ficando localizado somente nas laterais da ZF, ao passo que quando se soldou com o gás de proteção Ar2%N<sub>2</sub>3%CO<sub>2</sub> o ataque é generalizado. O ataque nas regiões adjacentes ao contorno de grão significa que os precipitados presentes nos contornos de grão analisados têm alto teor de cromo, fazendo com que as regiões adjacentes aos mesmos tenham menor teor deste elemento ficando susceptíveis ao ataque pelo ácido oxálico.

Os aços estabilizados ao titânio quando aquecidos a alta temperatura e depois resfriados rapidamente podem apresentar sensitização. Uma explicação para este fenômeno é que os precipitados do tipo *TiC* se dissolvem e durante o resfriamento rápido não há tempo suficiente para que o carbono seja reincorporado aos precipitados. Este carbono poderá formar carbonetos de cromo do tipo Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, levando à sensitização. Além disso, a situação pode ser agravada pela incorporação, durante a reprecipitação, de cromo aos precipitados do tipo M(C,N) (GORDON; BENNEKOM, 1996). Este fenômeno poderá ocorrer no resfriamento pós-soldagem devido às altas taxas de resfriamento impostas.

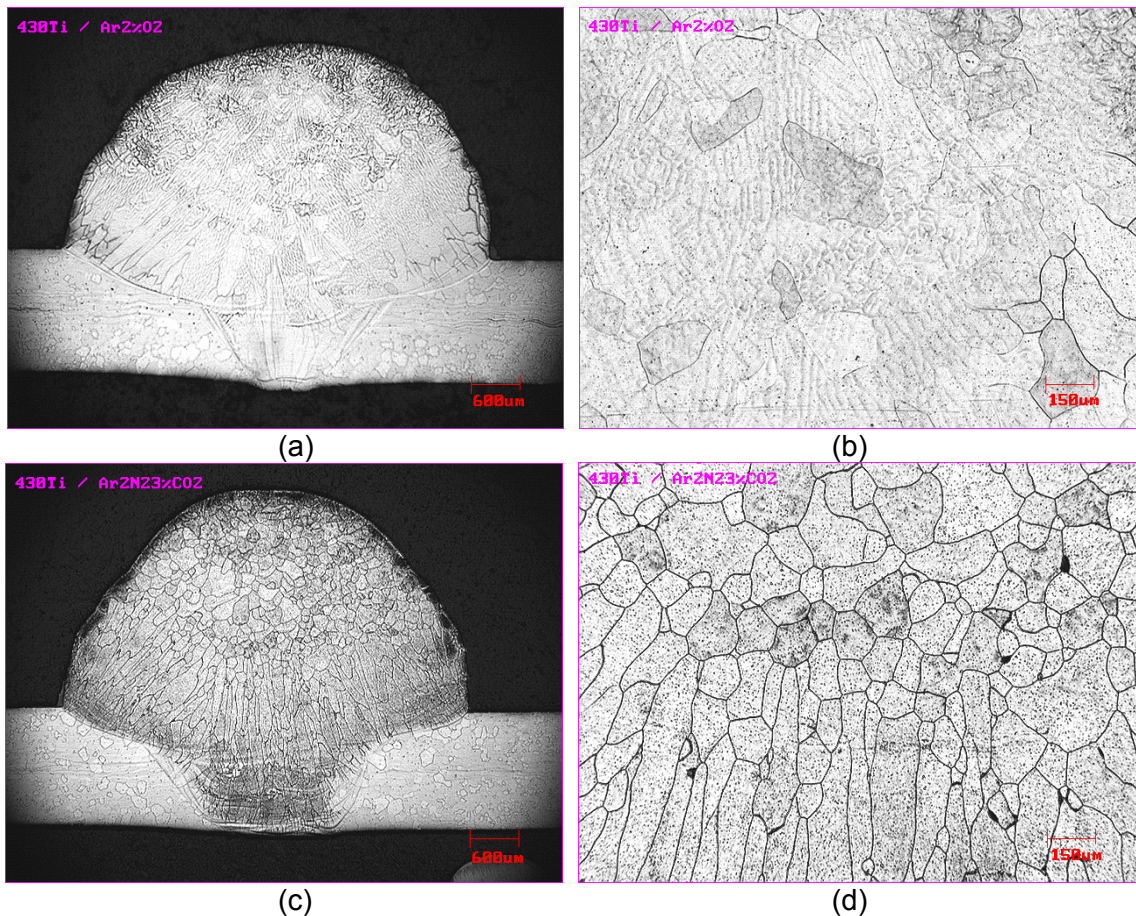


Figura 2.14. Zona fundida do 430Ti, ataque oxálico : (a) e (b) 430Ti e Ar2%O<sub>2</sub>; (c) e (d) 430Ti e Ar2%N<sub>2</sub>3%CO<sub>2</sub> (MADEIRA, 2007)

## 2.5 Ensaio Mecânicos aplicados à estruturas soldadas

Segundo a AWS (1991) Todos os tipos de estruturas soldadas devem possuir as propriedades necessárias para que desempenhem a determinada função. Para garantir que as juntas desempenharão bem a função determinada, torna-se necessário a realização de testes para que as propriedades sejam verificadas. Indica ainda que o ideal seria observar a estrutura nas condições de trabalho, mas realizar testes nestas condições é caro e de difícil realização. Então, testes normalizados e procedimentos para estes testes são utilizados para avaliar se um material pode ou não ser utilizado em um dado procedimento. Os testes geralmente utilizados são os testes de tração, dobramento, charpy e para materiais de menor espessura que podem sofrer uma conformação posterior, usa-se também ensaios de embutimento (Erichsen ou Olsen).

Ainda segundo a AWS (1991) o teste de tração para soldas é um pouco mais complexo devido à estrutura da solda ser heterogênea, tendo as três regiões típicas de uma

solda ZF, ZTA e MB. Para obter as propriedades desejadas adequadamente o ensaio de tração pode ser realizado com todo metal de solda (para determinar as propriedades de tensão do metal de solda), com teste de solda transversal (comumente utilizado para qualificar procedimentos) e teste de solda longitudinal (somente a tensão de ruptura é geralmente medida).

Yasuda et al. (1984) cita que para ensaios de tração a ruptura do corpo de prova pode ocorrer no metal base ou na região da solda, dependendo da dureza destas duas regiões. No caso de aços inoxidáveis ferríticos que têm baixo coeficiente de encruamento a ruptura ocorrerá quase sempre no metal base, a não ser que a fragilidade da zona fundida seja muito grande.

O teste de dobramento guiado é o mais utilizado em qualificações de procedimentos e de soldadores. Em testes de qualificação a espessura do corpo de prova e o diâmetro do dobrador são selecionados baseados na ductilidade do material do corpo de prova (AWS, 1991).

A seguir será discutido em um tópico isolado o ensaio de embutimento por este não ser um ensaio comum, necessitando, portanto, uma discussão com maiores detalhes de como é realizado e suas aplicações em análises de juntas soldadas.

#### 2.5.1. Ensaio de Embutimento

O ensaio de embutimento é importante na soldagem como complemento do teste de tração realizado em corpos de prova transversais, uma vez que geralmente a fratura neste tipo de corpo de prova acontece no metal de base. Utilizando o ensaio Ericksen na soldagem pode-se então observar como ocorrerá a fratura na solda, e a energia necessária para tal, como foi realizado por Madeira; Modenesi (2007).

Segundo Madeira (2007) o ensaio de embutimento consiste em um punção de ponta esférica que força uma chapa, presa por um prensa-chapas, até que a mesma sofra estricção e/ou ruptura. Os resultados deste ensaio são deslocamento do punção “h” e carga “F” (conforme Figura 2.16b) no momento em que o material tem uma perda mais acentuada de espessura (estricção ou ruptura). Este ensaio tem sido utilizado na avaliação de juntas soldadas para aços de menor espessura (até  $2 \cdot 10^{-3}$  m).

Existem inúmeros ensaios para a avaliação do embutimento, a maioria deles não padronizada. Dentre os normalizados destacam-se o ensaio Erichsen (mais utilizado na Europa e Japão), que consiste em esticar um corpo de prova em forma de disco até o surgimento de uma ruptura incipiente, medindo-se então a profundidade do copo assim formado.

O disco de chapa é inicialmente fixado entre a matriz e o anel de sujeição com carga de 1.000 kgf. O estampo tem formato esférico com diâmetro de  $2 \cdot 10^{-2}$  m. A cabeça do estampo é lubrificada. A Figura 2.15 apresenta um desenho esquemático do ensaio.

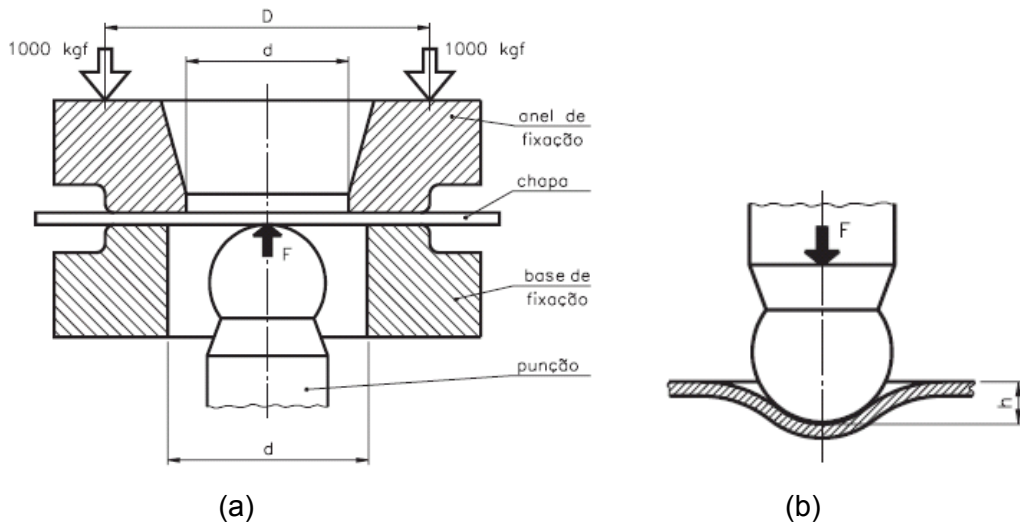


Figura 2.15. Configuração do ensaio Erichsen (a) corte transversal da prensa e (b) altura “h” e força “F”, as saídas do ensaio (MADEIRA, 2007)

Outro ensaio de embutimento padronizado e muito utilizado (principalmente nos Estados Unidos) é o Olsen, que difere do Erichsen apenas quanto às dimensões do estampo que tem cabeça esférica com 22 mm (7/8 pol) de diâmetro. O corpo de prova tem forma de disco e é fixado entre matrizes em forma de anel com 25 mm (1 pol) de diâmetro interno. Da mesma forma que no ensaio Erichsen, durante o teste são medidas continuamente a carga e o índice de ductilidade ou índice de embutimento é dado pela altura do copo, mas em milésimos de polegada, no momento em que a carga começa a cair.

Yasuda et al. (1984) realizou testes comparando o efeito do tipo de lubrificação nos valores Erichsen e os resultados encontrados mostraram que com a utilização de graxa grafitizada os valores Erichsen obtidos para o material soldado (SUS 304 soldado a laser) estavam no mesmo patamar dos valores obtidos para o metal base, independentemente, da relação entre largura do cordão e espessura da chapa. Já com o uso de polietileno como lubrificante os valores Erichsen obtidos para a junta soldada foram menores que os valores para o metal base na mesma condição. Além disso, para valores da relação largura da junta soldada pela espessura da chapa menores que quatro, os resultados foram superiores aos valores dos corpos de prova ensaiados com graxa. No entanto, para valores superiores a quatro houve uma forte queda dos valores Erichsen ensaiados com polietileno (Figura 2.16). Os autores afirmam ainda que a utilização de polietileno como lubrificante reduz o atrito e

faz com que a parte central do corpo de prova também se deforme. Assim, a queda nos valores Erichsen para juntas soldadas mais largas deve-se a maior participação da zona fundida na área que recebe deformação.

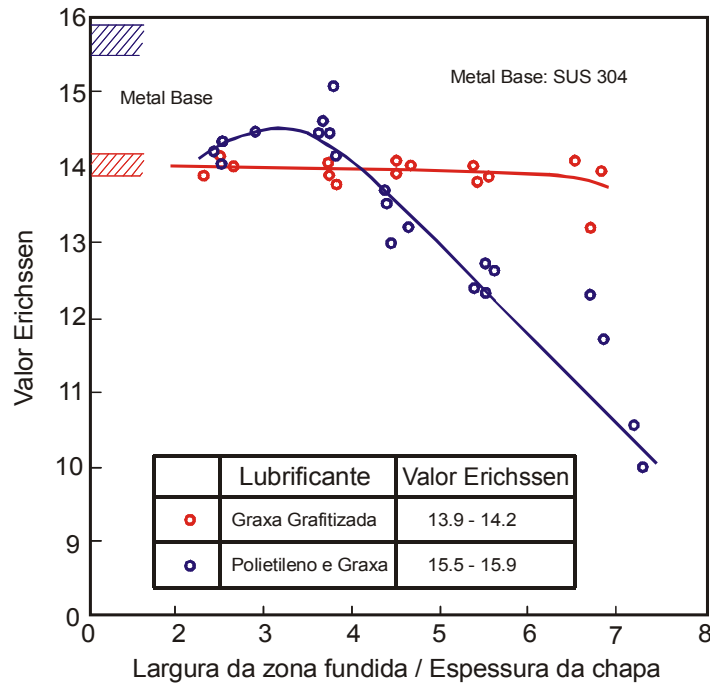


Figura 2.16. Valores Erichsen para o aço austenítico SUS 304 com lubrificação com polietileno e graxa de grafite (YASUDA et al., 1984)

Madeira; Modenesi (2010) ensaiaram corpos de prova de aço inoxidável ferrítico soldados com quatro energias de soldagem e observou (Figura 2.17) que os deslocamentos são um pouco maiores para os corpos de prova ensaiados com graxa e relação aos ensaiados com polietileno. Segundo o autor a explicação para tal fato vem da menor participação do metal base na deformação quando da utilização do polietileno como lubrificante. Outro dado relevante é que a variação da energia gerada pela fonte, desconsiderando o rendimento térmico, não levou a modificações significativas nos valores de deslocamento, apesar das grandes diferenças microestruturais, não sendo capaz, portanto, de quantificar a diferença de ductilidade existente entre as soldas de diferentes energias para o processo GMAW.

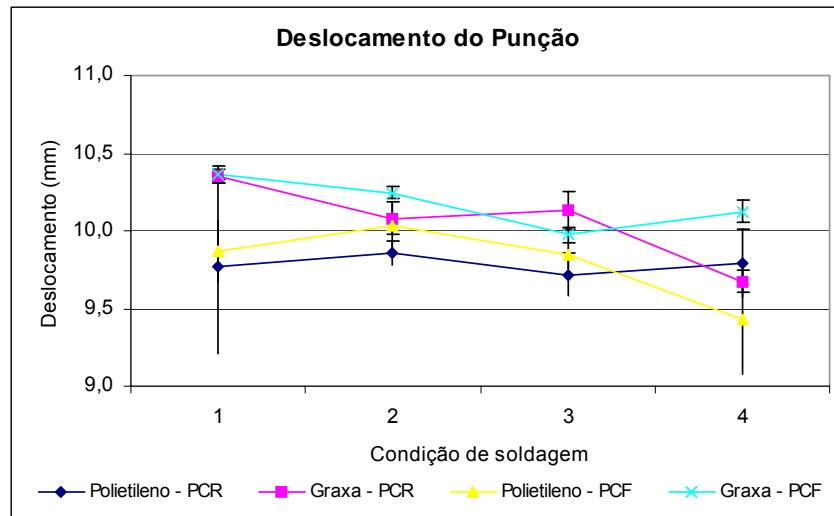


Figura 2.17. Comparativo entre o deslocamento do punção no ensaio Erichsen para quatro energias de soldagem utilizando graxa e polietileno (MADEIRA; MODENESI, 2010)

Chung et. al. (1999) utilizou o ensaio Erichsen para a avaliação de juntas soldadas, no entanto, não explicitou o tipo de lubrificação utilizada e classificou as juntas sem levar em consideração a participação relativa do metal base e da zona fundida na área de deformação. Já Washko; Grubb (1991) utilizaram valores do ensaio de embutimento “Olsen Cup” (similar ao Erichsen) levando em consideração somente o tipo de fratura encontrada.

Em seu trabalho Hunter; Eagar (1980) realizaram uma comparação por meio do teste de embutimento Olsen em chapas de 2 mm de aço inoxidável ferrítico bi-estabilizado ao titânio e nióbio e nas mesmas chapas soldadas pelo processo TIG com metal de adição, com o intuito de avaliar a ductibilidade do metal soldado Observou-se uma redução para praticamente um terço o valor da amplitude estampada 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) apud Hunter; Eagar (1980).

Ainda segundo Hunter; Eagar (1980) na busca do entendimento da causa de perda de ductibilidade nas soldas de aços inoxidáveis ferríticos estabilizados com titânio, além daquela atribuída normalmente ao crescimento de grão, observaram que durante a soldagem, precipitados estáveis se decompunham durante a fusão e voltavam a se precipitar em forma mais fina, liberando nitrogênio no metal de solda. A combinação do cromo com o nitrogênio liberado na reação de decomposição propicia o surgimento de titânio livre, que pode ter um efeito de endurecimento.

Washko e Grubb (1991), em trabalho que analisou fraturas de aços estabilizados ao titânio, nióbio e bi-estabilizados, levantaram a hipótese de que a presença de titânio em soldas minimiza a possibilidade de ocorrência de fratura frágil. Em aços estabilizados

somente ao nióbio constatou-se que corpos de prova submetidos ao ensaio de estiramento Olsen Cup, tiveram fratura frágil iniciada devido à presença de constituintes originários de filmes líquidos formados a partir de óxidos e nitretos. A presença de titânio inibiria este tipo de ocorrência pelo fato deste elemento combinar-se com oxigênio e nitrogênio formando óxidos e nitretos de titânio a temperaturas superiores à de fusão.

Madeira; Modenesi (2010) realizaram ainda testes Erichsen com lubrificação de polietileno e atuação do punção contra a raiz da solda em corpos de prova soldados sobre a chapa. A Com exceção da condição de soldagem onde se utilizou metal de adição ER430Ti e gás de proteção Ar2%N<sub>2</sub>3%CO<sub>2</sub>, onde fragilizou-se a zona fundida resultando na ocorrência de fratura frágil na mesma e levando a deslocamentos bem inferiores, as demais condições apresentaram desempenho semelhante (Figura 2.18). Segundo o autor uma possível causa para esta fragilização seriam os teores de C, N e Ti nesta ZF que promovem a precipitação em contorno de grão, que são responsáveis pela fragilização da junta soldada, além de poder levar à sensitização quando os precipitados em contorno de grãos são ricos em cromo.

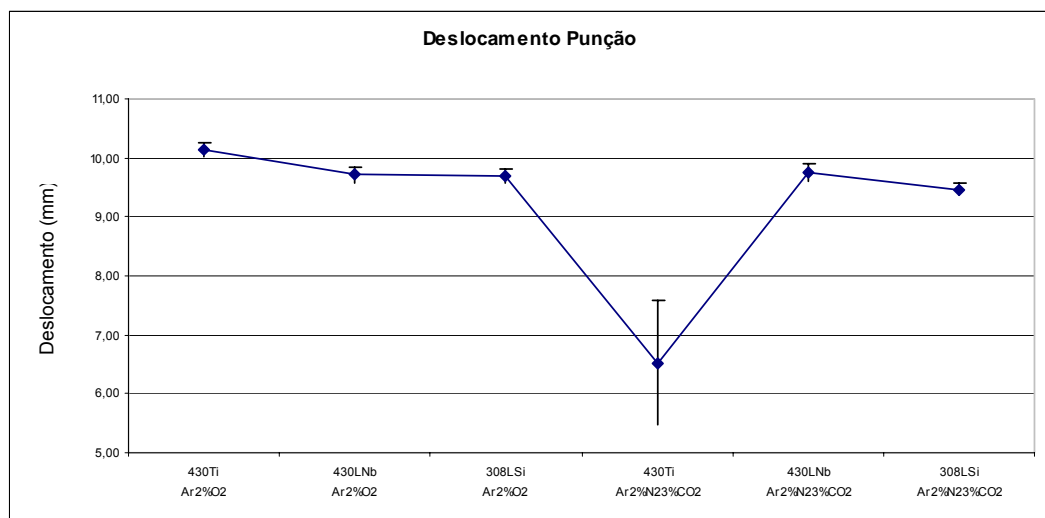


Figura 2.18. Deslocamento do punção em função da condição de soldagem utilizada (MADEIRA; MODENESI, 2010)

De um modo geral a melhor embutimento dos corpos de prova soldados com metal de adição estabilizado ao nióbio está relacionado com o aumento da conformabilidade dos aços inoxidáveis com a adição de nióbio. Guida (2006) verificou a conformabilidade de um material pode ser melhorado modificando sua composição química, que são medidos por meio do coeficiente de anisotropia normal médio ( $r$ ). Afirma ainda que quanto maior este



coeficiente melhor será a conformabilidade de um aço inoxidável, e que a adição de nióbio, uma vez que refina e homogeniza o grão, melhora, portanto, a embutimento do material.

No mesmo sentido, Hiramatsu (2010) afirma que a adição de nióbio é uma das formas mais efetivas de melhorar a embutimento dos aços inoxidáveis ferríticos. A quantidade de nióbio necessária para tal está relacionada com o teor de carbono e nitrogênio. Na Figura 2.19 o autor apresenta uma relação entre o coeficiente de anisotropia médio (r-value) e a quantidade de nióbio contida em um aço inoxidável ferrítico, mostrando que quanto maior o valor de nióbio melhor é o comportamento do aço com relação a sua embutimento.

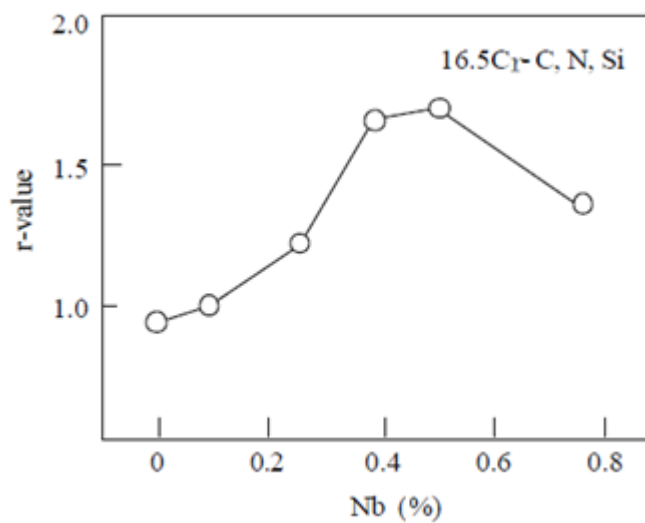


Figura 2.19. Gráfico do coeficiente de anisotropia médio (r-value) e a quantidade de nióbio contida em um aço inoxidável ferrítico (HIRAMATSU, 2010)

Em seu trabalho Ferreira (2005) analisando o coeficiente de anisotropia normal médio (r-value), observou valores mais baixos quando houve um acréscimo de nióbio (entre outros elementos modificados) em um aço inoxidável ferrítico comercial, relacionando este fato provavelmente a menor intensidade de fibra paralela à superfície da chapa.

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Este capítulo visa apresentar a descrição dos consumíveis e equipamentos utilizados, além da metodologia aplicada no desenvolvimento deste trabalho, buscando auxiliar a compreensão dos capítulos seguintes.

#### **3.1 Consumíveis**

Os consumíveis utilizados neste trabalho foram basicamente dois tipos de chapas de aço inoxidável ferrítico, dois metais de adição de aço inoxidável ferrítico e um de aço inoxidável austenítico, além de cinco tipos (composições) de gás de proteção. A seguir são discutidos de forma mais detalhada cada um destes consumíveis.

##### **3.1.1 Material de Base**

Os materiais de base utilizados foram os aços inoxidáveis ferríticos UNS 43932 e AISI 441, ambos possuindo médio cromo, com pequenas diferenças na bi-estabilização ao nióbio e ao titânio. Estes materiais foram selecionados por serem amplamente utilizados tanto na parte quente (AISI 441), quanto na parte fria (UNS 43932) de sistemas de exaustores automotivos. Os materiais foram cedidos pela empresa ArcelorMittal, que também realizou as medições de composição química por espectrômetro óptico, que são apresentadas na Tabela 3.1. Os corpos de prova utilizados possuíam as dimensões de 300x100x2 mm.

Tabela 3.1. Composição química dos materiais de base utilizados, fornecido pela ArcelorMittal

<b>MB</b>	<b>Cr</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>Ti</b>	<b>S</b>	<b>Nb</b>	<b><math>\Delta</math>Ti</b>	<b><math>\Delta</math>Nb</b>
<b>UNS 43932</b>	17,050	0,011	0,013	0,200	0,002	0,190	0,140	0,140
<b>AISI 441</b>	18,010	0,014	0,009	0,130	0,001	0,560	0,080	0,490

Notam-se pela Tabela 3.1 que, utilizando as fórmulas de estabilização de um aço inoxidável ferrítico bi-estabilizado ao titânio e nióbio de Fujimura; Tsuge (1999), dadas pelas Equações 2.3 e 2.4, foram calculados os níveis de estabilização ( $\Delta$ Ti e  $\Delta$ Nb) para os dois metais de base utilizados. O aço inoxidável ferrítico UNS 43932 apresentou valores similares de estabilização tanto ao nióbio, quanto ao titânio. Já o aço inoxidável ferrítico AISI 441 apresentou uma estabilização mais baixa ao titânio, mas consideravelmente maior ao nióbio, quando comparado com os valores obtidos para o aço inoxidável ferrítico UNS 43932.

### 3.1.2 Material de Adição

Foram utilizados três metais de adição, sendo um de aço inoxidável austenítico (ER308LSi), que foi tomado como padrão, uma vez que é o mais utilizado pela indústria automotiva (especificamente em exaustores), e dois metais de adição de aço inoxidável ferrítico, sendo um estabilizado ao titânio (ER430Ti) e outro estabilizado ao nióbio (ER430LNb). Todos possuíam diâmetro de 1,0 mm e foram cedidos pela empresa ArcelorMittal., que também realizou as análises das composições químicas por via úmida (Tabela 3.2).

Tabela 3.2. Composição química dos arames eletrodos utilizados, fornecido pela ArcelorMittal

<b>Elem.</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Nb</b>	<b>Ni</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Ti</b>
<b>ER308LSi</b>	0,018	0,056	19,620	1,930	0,001	10,290	0,012	0,750	0,056
<b>ER430Ti</b>	0,108	0,014	17,450	0,650	0,001	0,400	0,002	1,040	0,350
<b>ER430LNb</b>	0,027	0,014	17,660	0,425	0,440	0,440	0,004	0,430	0,004

Os arames, ER430Ti e ER430LNb, foram selecionados, pois uma vez que são de aço inoxidável ferrítico, possuem custos substancialmente menores em relação a um arame de aço inoxidável austenítico, devido a ausência de níquel. Além de serem metais de adição com boas perspectivas de inserção no mercado, inclusive sendo empregado, em menor escala, nos mercados europeu, asiático e até mesmo brasileiro.

Baseado nas fórmulas de Sato; Tanque (1995) para aços estabilizados ao titânio ou ao nióbio, apresentadas respectivamente nas Equações 2.1 e 2.2, realizou-se os cálculos

estequiométricos para o arame ER430Ti, que apresentou um gradiente de titânio negativo ( $\Delta Ti = -0,130$ ), ou seja, neste arame não há Ti suficiente para combinar-se com todo o C e N do arame, principalmente, em função do seu grande teor de C. Por outro lado, o arame ER430LNb possui um gradiente de nióbio positivo ( $\Delta Nb = 0,123$ ), ou seja, este arame possui quantidade de elementos estabilizantes superior a quantidade mínima para prevenir a formação de carbonetos ou nitretos de cromo e/ou a presença de uma quantidade de elementos intersticiais em solução sólida capaz de propiciar a formação de austenita a alta temperatura. Sendo assim, já é possível verificar que o arame ER430LNb possui uma estabilização superior ao arame ER430Ti, sendo provavelmente, mais adequado em situações com maiores teores de carbono e/ou nitrogênio.

Os menores teores de elementos estabilizantes apresentado pelo metal de adição ER430Ti podem ser compensados pelos elementos estabilizantes contidos no material de base utilizado. Além disso, a necessidade de uma maior quantidade de elementos estabilizantes dependerá dos teores de carbono e nitrogênio que vão efetivamente passar para a poça de fusão, dependendo além da composição química dos materiais de base e de adição, do gás de proteção utilizado.

### 3.1.3. Gás de Proteção

Para a realização dos testes foram utilizados cinco tipos de gás de proteção, sendo todos eles gases comerciais, fornecidos pela empresa WhiteMartins. Optou-se por gases comerciais para obter condições similares a possíveis realizações no cotidiano das indústrias automotivas. Os gases de proteção utilizados foram os seguintes:

- Ar;
- Ar+2%O<sub>2</sub>;
- Ar+4%CO<sub>2</sub>;
- Ar+8%CO<sub>2</sub>;
- Ar+25%CO<sub>2</sub>;

O Ar foi utilizado por ser um gás inerte, servindo como referência em futuras comparações com os demais gases utilizados. O Ar+2%O<sub>2</sub> foi utilizado por ser o gás de proteção mais utilizado pela indústria que utiliza aço inoxidável, sendo, junto com o arame de aço inoxidável austenítico o padrão para futuras comparações com as demais combinações arame-gás de proteção. Os demais gases, gerados de misturas de argônio com dióxido de carbono, foram utilizados para se estudar a influência do dióxido de

carbono, em diferentes teores, pois eles são relativamente mais baratos e por não existirem estudos justificando a não utilização deles com arames de aço inoxidável ferrítico. Além disso, o Ar+25%CO<sub>2</sub> vem sendo utilizado pela indústria (asiática principalmente) sem um conhecimento adequado de suas consequências nas propriedades do cordão de solda.

## 3.2. Equipamentos

### 3.2.1. Fonte de Soldagem

Para a realização dos testes, utilizou-se uma fonte eletrônica multiprocessos, mostrada na Figura 3.1, selecionada para operar no processo MIG/MAG no modo tensão constante, cujas principais características são corrente contínua ou alternada (convencional ou pulsada), corrente nominal de 300 A para fator de serviço de 100 %, corrente máxima de 450 A e tensão em vazio de 70 V.



Figura 3.1. Fonte de soldagem IMC Digitec 300

### 3.2.2. Mesa de Coordenadas

Para a padronização na realização dos ensaios de soldagem utilizaram-se uma mesa de coordenadas XY, ligada a um computador com hardware de interface, que por meio de um programa desenvolvido no LAPROSOLDA/UFU, podem-se determinar as coordenadas que a tocha de soldagem percorrerá. A utilização deste aparato deve-se a necessidade de padronização na realização dos ensaios. Este sistema utilizado para a movimentação da

tocha de soldagem é apresentado na Figura 3.2.

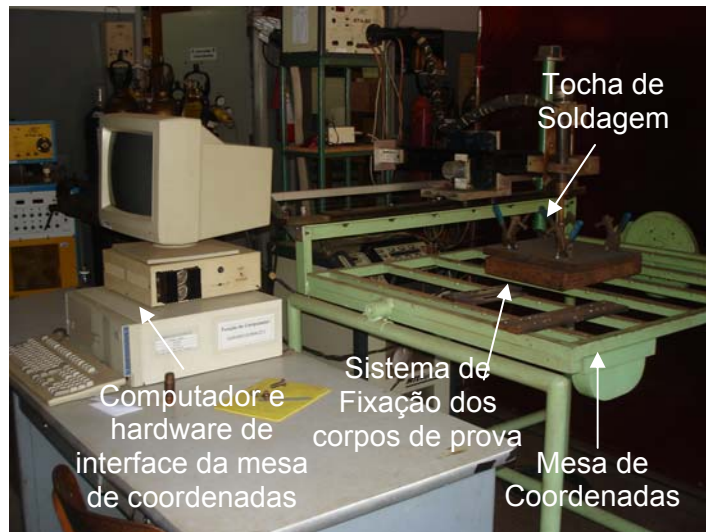


Figura 3.2. Sistema utilizado para a movimentação da tocha

### 3.2.3. Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados

Para monitorar os sinais elétricos do arco (corrente e tensão) foi usada uma placa de aquisição da National Instruments®, acoplada a um microcomputador com o "software" LabView® tanto para a aquisição dos sinais de corrente e tensão, como para tratamento destes sinais.

O sinal de corrente foi obtido pelo sensor de "efeito Hall" (placa EH-2). Como a placa de aquisição tem uma faixa de entrada de sinal de 0 a 10V, para se obter o sinal de tensão foi utilizado um divisor de tensão (DTS-6). Sendo que as duas placas foram ligadas a entrada da fonte.

Realizou-se esta etapa de aquisição de sinal em função da necessidade de se buscar uma condição de soldagem com mesma energia gerada pela fonte, desconsiderando o rendimento térmico, para todas as condições utilizadas de materiais e gás de proteção. Além disso, com os dados obtidos, tornou-se possível a montagem de gráficos de transferência metálica para a obtenção do tipo de transferência.

### 3.2.4. Microscópio Óptico

Para realização da análise microestrutural utilizou-se um microscópio óptico RISITEC, com ampliação máxima de mil vezes, que com o auxílio da câmera Pixelink e de um computador com o software "Global Image" realizou-se a captação das imagens. A Figura 3.3 mostra o microscópio óptico com a câmera acoplada utilizados na captação das

imagens.



Figura 3.3. Microscópio óptico

### 3.2.5. Equipamento para Medição de Microdureza

Realizaram-se os ensaios de microdureza (Vickers) com o microdurômetro marca Digimess modelo HVS-1000. A Figura 3.4 apresenta o microdurômetro utilizado.



Figura 3.4. Microdurômetro Digimess HVS-1000

### 3.2.6. Máquina de Ensaio Mecânicos

Os ensaios mecânicos foram realizados utilizando a máquina de ensaios estática servo-elétrica AG-X da Shimadzu que pode ser observada na Figura 3.5. Esta máquina é

composta pelo equipamento de ensaio mecânico, com capacidade máxima de 300 KN, computador e software Trapezium X que comanda a máquina.

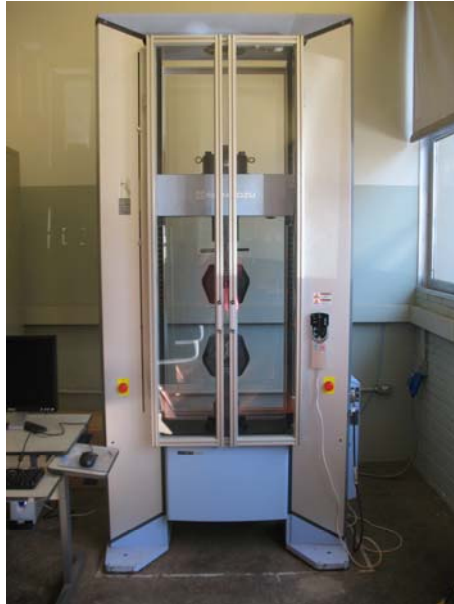


Figura 3.5. Máquina de ensaios estática servo-elétrica

A Figura 3.6 mostra em detalhe os acessórios utilizados na maquina de ensaios mecânicos para a realização dos ensaios de tração, sendo que para este tipo de ensaio têm-se uma capacidade de 300 KN.



Figura 3.6. Garras utilizadas no ensaio de tração na máquina de ensaios estática servo-elétrica



O ensaio de dobramento foi também realizado utilizando o equipamento de ensaios mecânicos da Shimadzu, que para este tipo de ensaio tem capacidade de 200 KN. A Figura 3.7 mostra os acessórios do ensaio de dobramento utilizados no equipamento da Shimadzu. Este ensaio tem a mesma função do ensaio de tração, ou seja, também tem o objetivo de verificar se a condição de soldagem foi adequada.



Figura 3.7. Cutelo e guias utilizados no ensaio de dobramento na máquina de ensaios estática servo-elétrica

O ensaio de embutimento foi realizado utilizando o equipamento de ensaios estática servo-elétrica da Shimadzu, que para este tipo de ensaio também tem capacidade de 200 KN. A Figura 3.8 mostra o penetrador e a matriz prensa chapas utilizados para o ensaio de embutimento na máquina de ensaios.



Figura 3.8. Penetrador e matriz prensa chapas utilizados para o ensaio de embutimento na máquina de ensaios estática servo-elétrica

### 3.2.7. Equipamento para realização do Ensaio de Sensitização

O equipamento utilizado para o ensaio de sensitização a corrosão intergranular consiste uma fonte CG Son Dual Tracking DC Power Supply que aplica uma densidade de corrente em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 % em um corpo de prova dentro de um Becker, como pode ser observado na Figura 3.9. Estes testes foram realizados pelo IFMA.

Após o ensaio de sensitização com o equipamento citado acima foram realizadas as análises microestruturais dos corpos de prova. Para isso, utilizou um analisador de imagens pertencente ao Laboratório de Caracterização Microestrutural de Materiais da Universidade Federal do Maranhão (LCMM-DEFIS/UFMA). Esse sistema é constituído de uma câmera digital OLYMPUS PM C35DX, adaptada a um microscópio óptico OLYMPUS BX51 TRF, que transfere a imagem para um computador e monitor, respectivamente, que pode ser observado na Figura 3.10. Com base no programa de imagens “Image-Pro Plus” versão 4.5 para Windows, as imagens foram congeladas e armazenadas no computador para identificação das estruturas.



Figura 3.9. Equipamento para ataque eletroquímico: (a) Fonte CG Son Dual Tracking Dc Power Supply; (b) Becker e corpo de prova

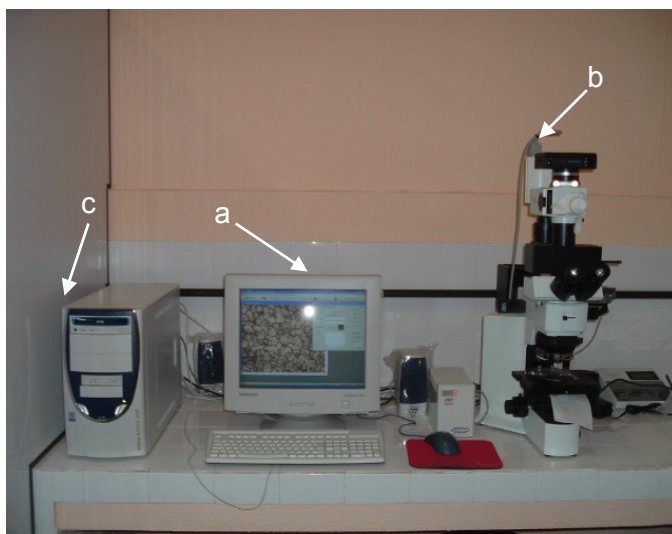


Figura 3.10. Conjunto aparelhos para obtenção das imagens microestruturais: (a) Microscópio Óptico OLYMPUS BX51 TRF; (b) Câmera Digital OLYMPUS PM C35DX; (c) Microcomputador

Realizou-se ainda o ensaio DL-EPR, utilizando-se uma célula convencional eletroquímica, Figura 3.11, de três eletrodos (um fabricado a partir de uma folha de platina, um eletrodo de calomelano saturado para servir como referência e o outro formado pelas amostras de aço inoxidável ferrítico). Esses eletrodos foram colocados dentro de uma solução eletrolítica 0,05 M  $H_2SO_4$  (ácido sulfúrico) + 0,01 M KSCN (tiocianato de potássio). O eletrodo de trabalho construí-se das amostras a serem estudadas.

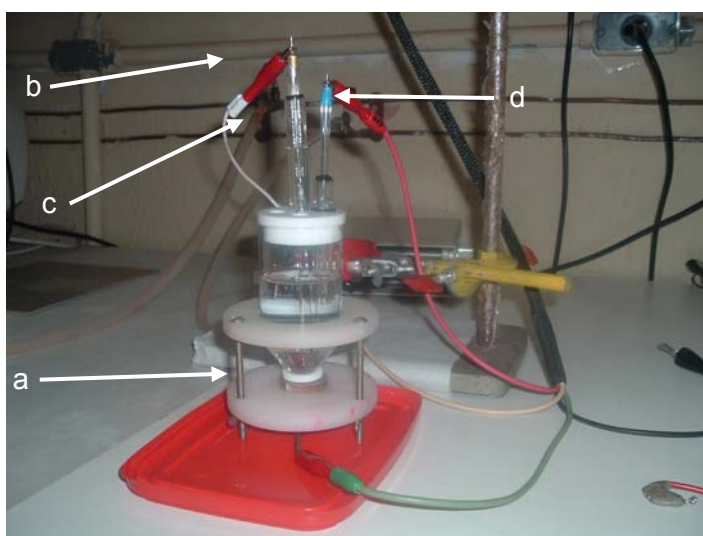


Figura 3.11. Célula eletroquímica composta por três eletrodos: (a) eletrodo de trabalho corpo de prova confeccionado a partir de aço ferrítico; (b) Eletrodo de referência de

calomelano saturado ECS; (c) capilar de lugging; (d) eletrodo auxiliar de platina

O equipamento utilizado para realização deste ensaio foi um Potenciostato/Galvanostato modelo PAR 263A pertencente ao Laboratório de Eletroquímica da Universidade Federal do Maranhão (LELQ-DEQUI/UFMA) acoplado a um computador, como ilustrado na Figura 3.12, interfaceado ao software PowerSuite, onde eram obtidos e tratados os dados.

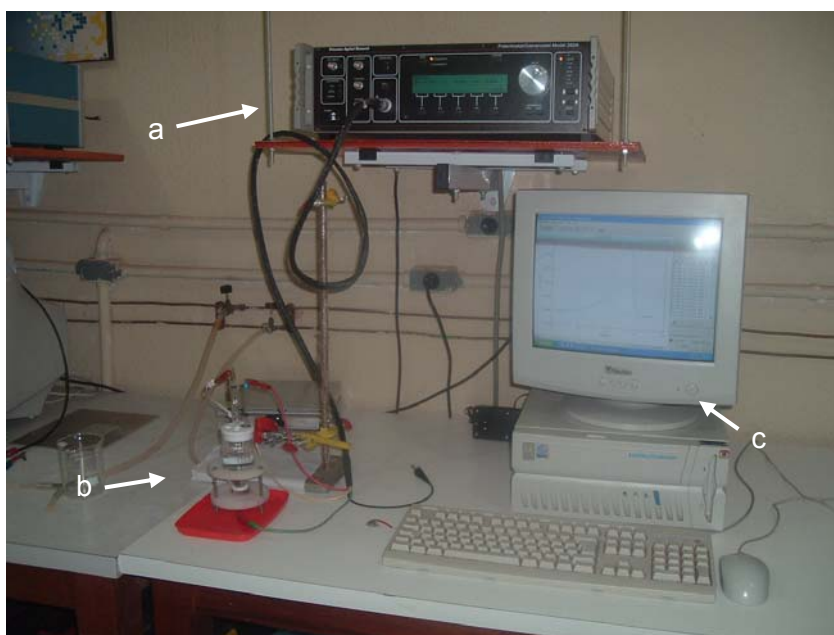


Figura 3.12. Conjunto aparelhos para obtenção das Curvas DL-EPR: (a) Potenciostato/Galvanostato modelo PAR 263A; (b) célula eletroquímica; (c) Computador

### 3.3. Metodologia de ensaio

A primeira etapa do trabalho foi composta pelo levantamento dos parâmetros de soldagem, buscando uma mesma energia gerada pela fonte, desconsiderando o rendimento térmico, para todas as condições estudadas. A segunda etapa foi composta pela soldagem da placa de teste e confecção dos corpos de prova e realização dos ensaios mecânicos e de sensitização.

### 3.3.1. Determinação dos parâmetros de soldagem

Para a realização desta etapa, utilizou-se inicialmente o metal de base UNS 43932 e o metal de adição ER308LSi e todos os gases de proteção estudados neste trabalho. Fixou-se a velocidade de alimentação, velocidade de soldagem, a tensão de soldagem, proporcionais à espessura de chapa (2 mm) e ao modo de transferência que se buscava (curto-circuito).

Para obtenção da mesma energia de soldagem (mesma corrente, tensão e velocidade de soldagem) variou-se a distância de bico de contato-peça (DBCP), deixando os demais parâmetros constantes (indutância de subida e de descida). Como eram dois metais de base, três metais de adição e cinco gases de proteção, totalizaram-se trinta condições de soldagem.

### 3.3.2. Soldagem da placa de teste

Com os parâmetros de soldagem definidos passou-se para a etapa de confecção dos corpos de prova para os ensaios mecânicos e de corrosão intergranular. Os corpos de prova foram retirados das placas de teste soldadas em juntas de topo, com uma chapa do mesmo metal de base funcionando como cobre-junta, como pode ser observada no esquema apresentado na Figura 3.13.

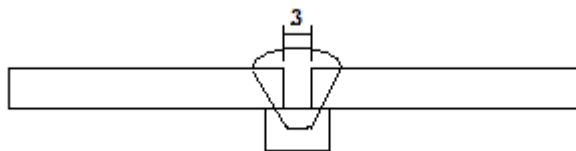


Figura 3.13. Configuração das soldas realizadas na placa de teste

Para a confecção dos corpos de prova de tração, de dobramento, de corrosão e microestrutural foram utilizadas duas chapas de dimensão de 300x100x2 mm soldadas em topo, com uma fresta de 3 mm entre elas. Testes preliminares foram realizados de forma a verificar a ausência de defeitos de soldagem nos cordões de solda.

Foram retirados os corpos de prova para o ensaio de corrosão e de microestrutura. Das placas de teste de onde seriam retirados os corpos de prova de ensaios mecânicos foram usinados reforço e cobre-junta, retirando-se posteriormente três corpos de prova de tração e seis corpos de prova de dobramento para cada condição.

Para a confecção dos corpos de prova de embutimento foram utilizadas duas chapas de dimensão de 300x50x2 mm soldadas em topo, também com um distanciamento de 3

mm entre as chapas. O mesmo procedimento realizado descrito anteriormente para a obtenção dos corpos de prova de tração e dobramento foram realizados para os de embutimento.

### 3.3.3. Análise Microestrutural

Para a realização desta etapa os corpos de prova foram lixados, polidos e atacados com o reagente Vilella. Utilizou-se, então, o microscópio óptico para realizar análises com os aumentos 40x, 100x, 400x e 1000x, para posteriormente as imagens serem analisadas.

#### 3.3.3.1. Medida de tamanho de grão

A medida do tamanho de grão foi realizada utilizando o método planimétrico de Jefferies no centro da zona fundida e na zona termicamente afetada. Este método consiste em desenhar um círculo em uma macrografia, delimitando uma área  $S$  conhecida, conforme mostra a Figura 3.14.

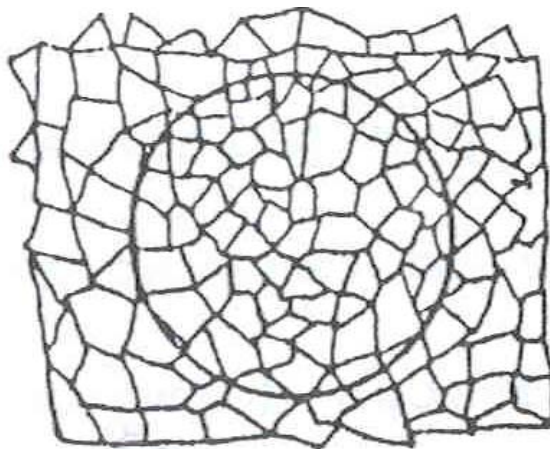


Figura 3.14. Esquema da metodologia utilizada pelo método planimétrico de Jefferies para determinação do tamanho de grão

Dentro do círculo determina-se o número de grãos inteiros no círculo ( $n_c$ ) e o número de grãos interceptados pela circunferência ( $n_i$ ). Com base nos valores encontrados determina-se o número de grãos equivalentes ( $n_{eq}$ ), somando-se o número de grãos inteiros no círculo a metade do número de grãos interceptados na circunferência, como se pode notar na Equação 3.1.

$$n_{eq} = \frac{n_i}{2} + n_C \quad \text{Equação 3.1}$$

O número de grãos por unidade de área ( $n_A$ ) é dado por  $n_{eq}/A$ , onde  $A$  é a área real do espécime examinado, conforme mostra a Equação 3.2. Se a micrografia foi obtido com  $m$  vezes, então se determina  $A$  pela Equação 3.3.

$$n_A = \frac{n_{eq}}{A} \quad \text{Equação 3.2}$$

$$A = \frac{S}{m^2} \quad \text{Equação 3.3}$$

O número de grãos por unidade de comprimento ( $n_L$ ) está relacionado com o  $n_A$  conforme segue na Equação 3.4.

$$n_A = 0,735 \cdot n_L \quad \text{Equação 3.4}$$

Logo, determina-se o diâmetro médio dos grãos ( $\bar{l}$ ) conforme mostra a Equação 3.5.

$$\bar{l} = \frac{1}{n_L} \quad \text{Equação 3.5}$$

Para se ter uma maior confiabilidade nos resultados o tamanho de grão foi medido três vezes, sendo as amostras tiradas do início, meio e final do cordão de solda.

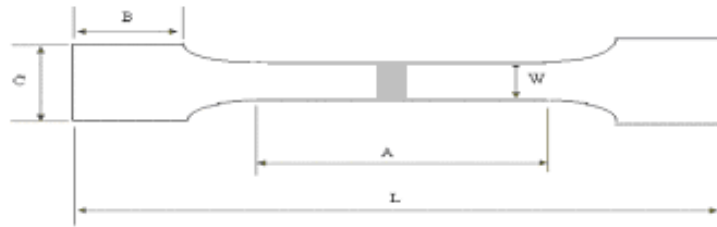
### 3.3.3.2. Análise de Microdureza

Realizaram-se para os metais de base e para cada uma das condições de soldagem estudadas cinco medidas de microdureza no centro da zona fundida e cinco na zona termicamente afetada. Destas cinco medidas retirou-se o maior e o menor valor para se obter a média e o desvio padrão, aumentando-se assim a confiabilidade nos resultados. Padronizou-se a força de 0,2452N, ou seja, 25g. A dimensão da pirâmide utilizada foi a padrão para o ensaio HV.

### 3.3.4. Ensaio de Tração

A Figura 3.15 apresenta as dimensões do corpo de prova de tração, que foram dimensionadas a partir da norma ABNT NBR 6152 (1992) – Determinação das propriedades mecânicas à tração.

O ensaio de tração foi realizado para verificar se a condição de soldagem foi adequada o suficiente, de modo que a fratura não ocorresse no cordão de solda (zona fundida e zona termicamente afetada), sendo então um ensaio qualitativo, do tipo passa ou não passa, que em soldagem é utilizado em qualificações de procedimentos. Avaliou-se também a tensão máxima obtidas no ensaio, conforme indicado na Figura 3.16, para verificar se esta varia em função do gás de proteção utilizado.



$$w = 12,5 \text{ mm } L = 200 \text{ mm } A = 57 \text{ mm } B = 50 \text{ mm } C = 20 \text{ mm}$$

Figura 3.15. Dimensões do corpo de prova de tração, baseado na norma NBR 6152

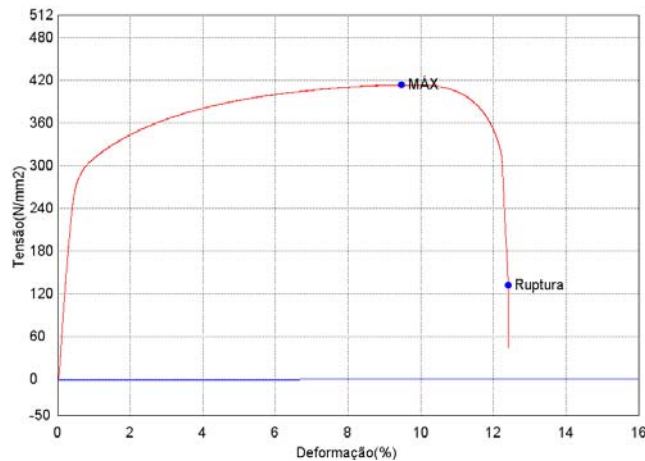


Figura 3.16. Gráfico da tensão em função da deformação para o ensaio de tração, indicando a tensão máxima (MAX) avaliada para cada ensaio

### 3.3.5. Ensaio de Dobramento

Nesta etapa realizou-se o ensaio de dobramento na face e na raiz para as trinta condições de soldagem, com três repetições para cada condição, totalizando cento e oitenta ensaios.



Para a confecção dos corpos de prova baseou-se na norma ABNT NBR 6153 (1998) – Dobramento em barras de aço com diâmetro até 20 mm, com algumas adaptações devido ao acessório de dobramento disponível para a realização do mesmo. A Figura 3.17 apresenta uma figura esquemática com as principais medidas do acessório de dobramento. Os corpos de prova de dobramento possuem dimensões de 22 mm de largura, sendo que a solda fica no centro do corpo de prova.

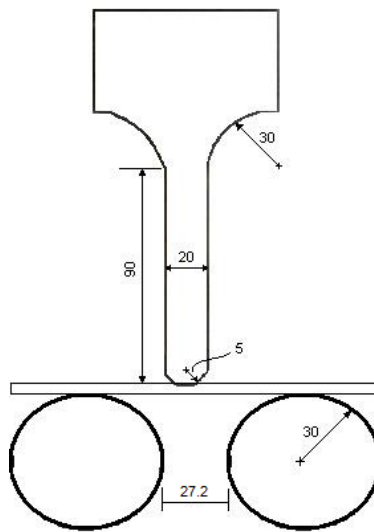


Figura 3.17. Representação esquemática das principais medidas do acessório de dobramento

Apesar do ensaio de dobramento ser apenas qualitativo, analisou-se a força máxima (MAX) para a realização do mesmo, desprezando-se o maior pico de força, pois se constatou que ele ocorria, conforme apresenta a Figura 3.18, devido ao contato da chapa com a parte arredondada do punção. Analisou-se ainda a energia (E) necessária para a realização do ensaio, representada pela área hachurada da Figura 3.18.

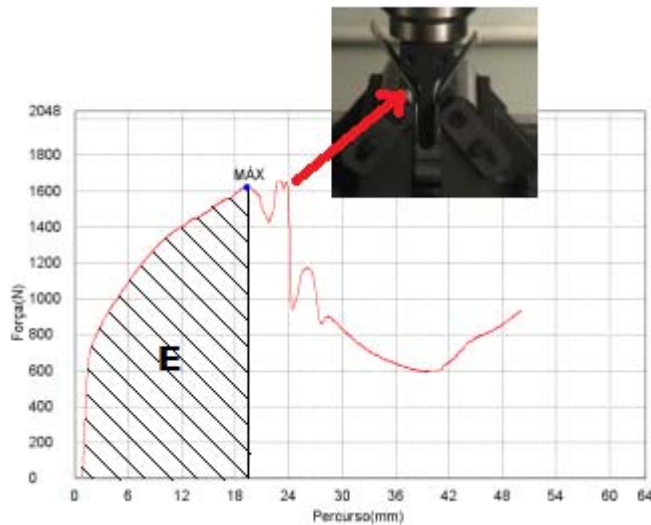


Figura 3.18. Gráfico da força em função do percurso para o ensaio de dobramento enfatizando a energia (E) necessária para a realização do ensaio, o ponto de força máxima e um segundo pico da força desenvolvido pelo encontro da chapa com os cantos arredondados do punção de dobramento

### 3.3.6. Ensaio de Embutimento

Realizou-se o ensaio de embutimento na face e na raiz com três repetições para cada condição de soldagem utilizado neste trabalho.

Baseou-se para a realização deste ensaio na norma ABNT NBR 5902 (1980) – Determinação do índice de embutimento em chapas de aço pelo método Erichsen modificado. A Figura 3.19 apresenta uma figura esquemática do corte transversal da prensa utilizada no ensaio Erichsen. O punção possui um diâmetro de 20 mm,  $d_i$  de 33 mm,  $d$  de 40 mm e  $D$  de 70 mm. Entretanto, a matriz prensa chapas e o punção da máquina de ensaios do LAPROSOLDA, que foi utilizada neste trabalho, possui dimensões diferentes das especificadas pela norma, sendo que o punção possui um diâmetro de 23 mm e  $d$ ,  $d_i$  e  $D$  possuem um diâmetro de 40 mm. Apesar de não contemplar a norma, decidiu-se utilizar o equipamento disponível, pois o intuito do teste é de comparar as condições de soldagem que foram realizadas neste trabalho.

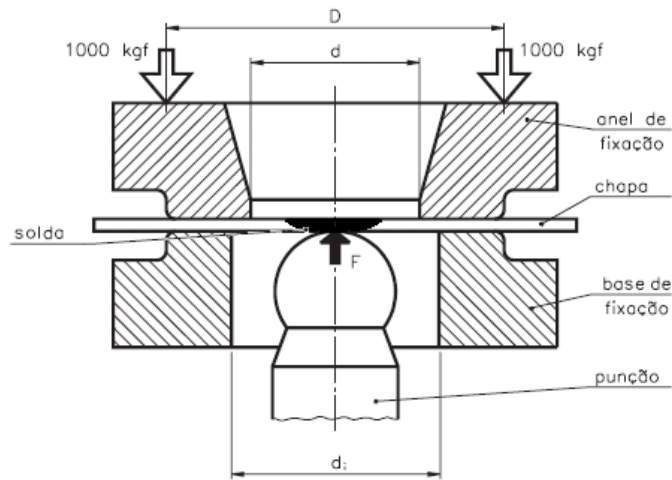


Figura 3.19. Figura esquemática do corte transversal da prensa

Outro fator importante especificado pela norma é que a chapa deve ser pressionada com uma carga de 10.000 N. Como o acessório utilizado para a realização do ensaio de embutimento possui um prensa chapas que aplica a força por meio de quatro parafusos utilizou-se um torquímetro para padronizar a pressão em todos os corpos de prova, como se observa na Figura 3.20. Calculou-se o torque necessário em cada parafuso para que a chapa ficasse sobre uma pressão de 10.000 N.

Os corpos de prova para este ensaio tiveram a dimensão de 100x100 mm, com o cordão de solda no centro do corpo de prova. Os furos nas chapas possuíam diâmetros superiores aos dos parafusos de fixação para viabilizar a passagem dos parafusos e possibilitar posterior centralização do cordão de solda com o punção.



Figura 3.20. Torquímetro utilizado para padronizar a pressão aplicada na chapa pelo prensa chapas do ensaio de embutimento

Utilizou-se como lubrificante a vaselina, pois a mesma apresenta um comportamento parecido com o polietileno. Segundo Madeira (2007) e Yasuda et al. (1984) quando se ensaia com este tipo de lubrificante há uma maior participação da zona fundida na deformação do que quando se utiliza a graxa como lubrificante.

O ensaio de embutimento tem a função de complementar os ensaios de tração e de dobramento, uma vez que estes ensaios são meramente qualitativos. Com o ensaio de embutimento conseguem-se informações complementares aos ensaios anteriores, obtendo-se informações relacionadas à ductilidade da junta soldada. Dentre estas informações destacam-se a força máxima (MAX), o deslocamento máximo ( $D_{MAX}$ ) que o punção realizou até o momento que a força começa a decrescer e a energia necessária para a realização do ensaio, calculada pela área (A) abaixo da curva da força em função do deslocamento, que podem ser observados na Figura 3.21 “a”. Outra informação também estudada foi a inclinação da curva de força em relação ao deslocamento do punção ( $\alpha$ ), na parte plástica, para a avaliação de como ocorreu o aumento da força em função do deslocamento, conforme se observa na Figura 3.21 “b”.

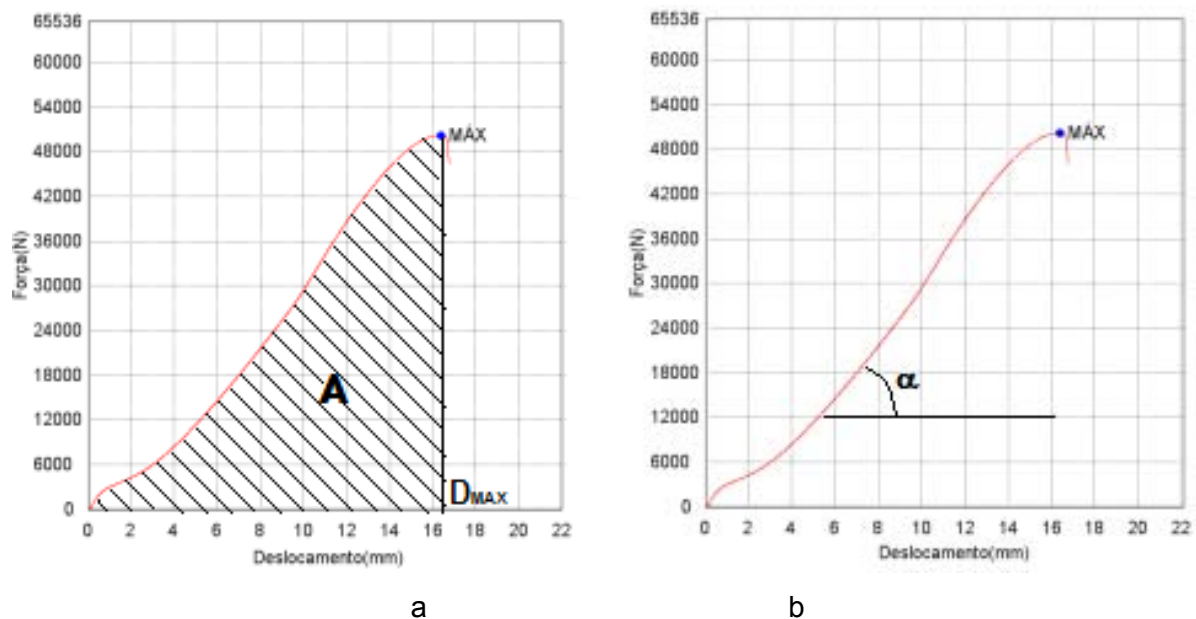


Figura 3.21. Gráficos da força em função do deslocamento para o ensaio de embutimento e os parâmetros força máxima (MAX), deslocamento máximo ( $D_{MAX}$ ), energia pela área (A) e inclinação da curva de força em relação ao deslocamento do punção ( $\alpha$ )

### 3.3.7. Ensaio de sensitização

Realizou-se o ensaio de corrosão para os dois metais de base, soldados com os três metais de adição, com os gases de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>, sendo

que para o arame ER308LSi foi analisado somente com o gás  $\text{Ar}+2\%\text{O}_2$  (condição referência, por ser a mais utilizado pela indústria), totalizando doze testes.

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, conforme apresentado no Capítulo II na Figura 2.13, classificando-as 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).

O ataque eletroquímico foi utilizado para a aceitação do material, contudo, ele gera resultados qualitativos. Tornou-se necessário então, a aplicação associada do ensaio DL-EPR, para avaliar quantitativamente a suscetibilidade da junta soldada ao ataque intergranular, conforme já mencionado no Capítulo II e apresentado na Figura 2.14.

Para este ensaio utiliza-se uma célula convencional eletroquímica de três eletrodos, sendo eles o eletrodo auxiliar fabricado a partir de uma folha de platina, um eletrodo de calomelano saturado (SCE) como o de referência e as amostras de aço inoxidável ferrítico como eletrodo de trabalho. Esses eletrodos foram colocados dentro de uma solução eletrolítica 0,05 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (ácido sulfúrico) + 0,01 M KSCN (tiocianato de potássio). O eletrodo de trabalho foi construído com as amostras do aço inoxidável ferrítico conforme Figura 3.22.

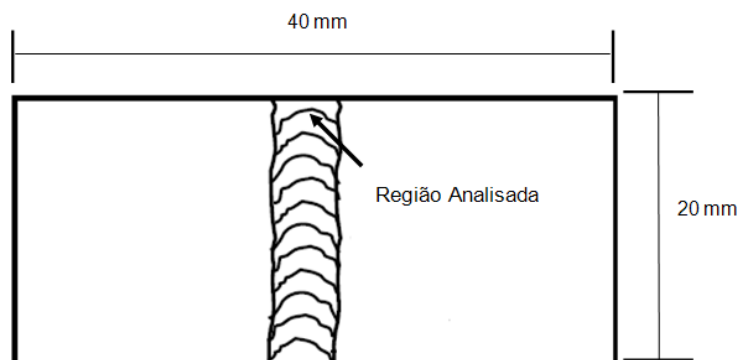


Figura 3.22. Região analisada pelo ensaio DL-EPR

Neste ensaio, a amostra é polarizada potenciocineticamente a partir do potencial de corrosão com uma velocidade de varrimento de 1,67 mV/s até um potencial em que a mesma fica passivada invertendo a direção de varrimento.

# CAPÍTULO IV

## DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para encontrar as condições de soldagem para os dois metais de base, três metais de adição e cinco tipos de gás de proteção, com energias geradas pela fonte (desconsiderando o rendimento térmico) similares. Apresenta ainda os aspectos dos cordões e as correntes e tensões obtidas durante a transferência metálica. Além de medições dos perfis dos cordões de solda e diluição e perspectivas das microestruturas das juntas soldadas calculadas por meio do diagrama de Schaeffler.

### 4.1. Introdução

As condições de soldagem deste trabalho foram obtidas soldando-se chapas de 2 mm em junta de topo com chanfro em "I" e fresta de 3 mm, utilizando um cobre-junta de mesmo material do metal de base, conforme apresentado na Figura 3.13, Capítulo 3.

Obtiveram-se as condições de soldagem em três etapas distintas, se diferenciando pelo metal de adição utilizado (ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb), que serão discutidas com detalhes nos tópicos que se seguem, apresentando a obtenção dos parâmetros de soldagem e estudos relacionados a estes.

### 4.2. Obtenção das condições de soldagem para o metal de adição ER308LSi

Os testes preliminares com o metal de adição foram realizados inicialmente com o material de base UNS 43932 e os cinco gases de proteção (Ar, Ar+2%O<sub>2</sub>, Ar+4%CO<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>), soldando-se juntas de topo com chanfro em "I". Conforme já mencionado, comercialmente o gás de proteção mais utilizado para a soldagem com o metal de adição austenítico é o Ar+2%O<sub>2</sub>. Segundo Stenbacka; Persson (1992), na soldagem

MIG/MAG dos aços inoxidáveis, é comum o uso de argônio com um ou dois por cento de um elemento oxidante (oxigênio ou gás carbônico). Logo, como gás de referência utilizou-se Ar+2%O<sub>2</sub>, além do argônio por ser um gás inerte, não exercendo, portanto, interações na solda. Os gases de proteção com adições de dióxido de carbono, para os metais de adição austeníticos foram estudados com o intuito de verificar as modificações que podem ocorrer na microestrutura e nos testes de impacto em juntas soldadas. Com isso, será possível comparar com o trabalho de Liao; Chen (1998) que realizou estudos com variações no gás de proteção (adição de dióxido de carbono) nos aços inoxidáveis austeníticos.

Para a realização do cálculo da energia utilizou-se a Equação 4.1, sendo que se desconsiderou neste cálculo o rendimento térmico do processo de soldagem, avaliando-se, portanto, somente a energia que foi gerada pelo processo.

$$E_s = \eta \cdot \frac{U_M \cdot I_M}{V_{SOLD}} \quad (4.1)$$

Onde: E<sub>s</sub> é a energia de soldagem (J/m);

$\eta$  é o rendimento térmico da solda (%), que foi desconsiderada neste estudo;

U<sub>M</sub> é a tensão média da solda (V);

I<sub>M</sub> é a corrente média da solda (A);

V<sub>SOLD</sub> é a velocidade de soldagem de processo (m/s).

Inicialmente determinou-se um valor de abertura (fresta) adequado para a junta de topo, utilizando-se cobre-junta de mesmo material do metal de base, com o intuito de se obter uma penetração total e evitar a falta de fusão lateral. Respeitando as considerações expostas anteriormente definiu-se que a fresta a ser utilizada deveria possuir um valor de 3 mm.

Definida a abertura a ser utilizada, iniciou-se a busca da tensão de soldagem (U), velocidade de soldagem (V<sub>SOLD</sub>) e velocidade de alimentação (V<sub>ALIM</sub>), que uma vez definidas serão padronizadas no restante do trabalho. Estes parâmetros de soldagem foram analisados utilizando o gás de proteção argônio, uma vez que este é o menos apropriado para realizar soldagem por curto-circuito, sendo, portanto, o de mais difícil soldabilidade entre os gases estudados.

A Tabela 4.1 apresenta os testes preliminares realizados com o metal de adição ER308LSi. Se iniciou a busca pela condição ideal com uma velocidade de alimentação de 6,7.10<sup>-2</sup> m/s, distância de bico de contato-peça (DBCP) de 12 mm, tensão de soldagem de

20 V e uma velocidade de soldagem de  $8 \cdot 10^{-3}$  m/s, mas o cordão de solda não apresentou um aspecto adequado, além de não garantir a falta de fusão lateral.

Tabela 4.1. Testes preliminares realizados com o metal de adição ER308LSi e o metal de base UNS 43932

Gás	U [V]	$V_{SOLD}$ $10^{-3}$ [m/s]	$V_{ALIM}$ $10^{-2}$ [m/s]	$K_{S/D}$	$U_M$ [V]	DBCP $10^{-3}$ [m]	$I_M$ [A]	$E_s$ [J/m]
Ar	20	8	6,7	20/20	18,1	12	123,8	268894
Ar	16	5	6,7	20/20	14,8	12	90,3	267288
<b>Ar</b>	<b>16</b>	<b>3</b>	<b>6,7</b>	<b>20/20</b>	<b>14,8</b>	<b>12</b>	<b>92</b>	<b>408480</b>
<b>Ar+2%O<sub>2</sub></b>	<b>16</b>	<b>3</b>	<b>6,7</b>	<b>20/20</b>	<b>14,8</b>	<b>14</b>	<b>94</b>	<b>417360</b>
<b>Ar+4%CO<sub>2</sub></b>	<b>16</b>	<b>3</b>	<b>6,7</b>	<b>20/20</b>	<b>14,8</b>	<b>14</b>	<b>93</b>	<b>412920</b>
<b>Ar+8%CO<sub>2</sub></b>	<b>16</b>	<b>3</b>	<b>6,7</b>	<b>20/20</b>	<b>14,8</b>	<b>15</b>	<b>93</b>	<b>412920</b>
Ar+25%CO <sub>2</sub>	16	3	6,7	20/20	14,8	12	99	439560
Ar+25%CO <sub>2</sub>	16	3	6,7	20/20	14,8	14	98	435120
<b>Ar+25%CO<sub>2</sub></b>	<b>16</b>	<b>3</b>	<b>6,7</b>	<b>20/20</b>	<b>14,8</b>	<b>16</b>	<b>94</b>	<b>417360</b>

Onde: U é a tensão regulada na fonte de soldagem;  $V_{SOLD}$  é a velocidade de soldagem;  $V_{ALIM}$  é a velocidade de alimentação regulada no alimentador;  $K_S$  é a indutância de subida e  $K_D$  a indutância de descida;  $U_M$  é a tensão média, medida na saída da fonte de soldagem; DBCP é a distância de bico de contato peça utilizado;  $I_M$  é a corrente média medida na saída da fonte de soldagem e  $E_s$  a energia gerada na tocha de soldagem, desprezando o rendimento térmico.

Diminuiu-se a velocidade de soldagem para  $5 \cdot 10^{-3}$  m/s e a tensão para 16 V, ficando mais próximo de um aspecto adequado. Manteve-se a tensão de soldagem em 16 V e diminuiu-se a velocidade de soldagem para  $3 \cdot 10^{-3}$  m/s, identificando-se que o cordão ficou com um aspecto adequado e isento de defeitos de soldagem. Desta forma, definiu-se a padronização da tensão de soldagem (ajustada na máquina) em 16 V, a velocidade de alimentação em  $6,7 \cdot 10^{-2}$  m/s, a Indutância de descida e de subida em 20, que é um valor médio da máquina utilizada, e finalmente, definiu-se a corrente média de soldagem em 92 A.

Buscou-se para os demais gases de proteção condições de soldagem que apresentassem uma corrente média de aproximadamente 92 A. Para tal, como se pode observar na Tabela 4.1, tornou-se necessário realizar ajustes somente no valor da DBCP. Com estas variações, para um mesmo gás de proteção, consegue-se modificações nos valores das correntes de soldagem. Este fato ocorre em função da variação do comprimento do eletrodo (“stickout”), que acarreta em um maior ou menor aquecimento do eletrodo antes de ocorrer a fusão (efeito joule). Baseado nas condições estudadas na Tabela 4.1 (valores



em negrito) definiu-se então os parâmetros de soldagem para o metal de adição ER308LSi, como se observa na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Condições de soldagem para o metal de adição ER308LSi

Arame	Gás de Proteção	$V_{SOLD}$ $10^{-3}$ [m/s]	$V_{ALIM}$ $10^{-2}$ [m/s]	$K_{S/D}$	DBCP $10^{-3}$ [m]	$I_M$ [A]	f [Hz]
ER308LSi	Ar	3	6,7	20/20	12	92	14
	Ar+2%O <sub>2</sub>				14	94	22
	Ar+4%CO <sub>2</sub>				14	93	23
	Ar+8%CO <sub>2</sub>				15	93	32
	Ar+25%CO <sub>2</sub>				16	94	38

Com o aumento do gás ativo em mistura ao argônio houve um aumento da DBCP de modo a se obter a mesma corrente de soldagem. Este aumento é realizado de modo a compensar a mudanças nos perfis dos arcos elétricos causadas com a alteração do gás de proteção utilizado. Segundo Suban e Tusek (2001) diferenças na condutividade térmica, que são propriedades de cada tipo de gás de proteção, causam alterações no perfil do arco (alterações no comprimento e largura do arco). Hilton & Norrish (1988) comentam que a adição de dióxido de carbono ou oxigênio ao argônio diminui o núcleo de condução do arco aumento da condutividade térmica devido a possíveis alterações no perfil do arco elétrico.

As Figuras 4.1 apresenta o oscilograma de corrente e tensão medidos na saída da fonte de soldagem ao se utilizar o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>. Para os demais gases de proteção os oscilogramas estão no Anexo A, Figuras A1 a A5, onde se observa que para todas as condições se obteve transferências por curto-circuito. Nota-se ainda, como mostra a Tabela 4.1 e pode ser observado pelas quantidades de picos nos gráficos de corrente das Figuras A1 a A5 que com o acréscimo de elementos oxidantes aumentou-se a de frequência de curto-circuito. Jönsson et al. (1995) comenta que a adição de oxigênio ao argônio promove redução do tamanho da gota no arco, pela redução da tensão superficial no contato gota/eletrodo, e aumenta sua taxa de transferência em aço.

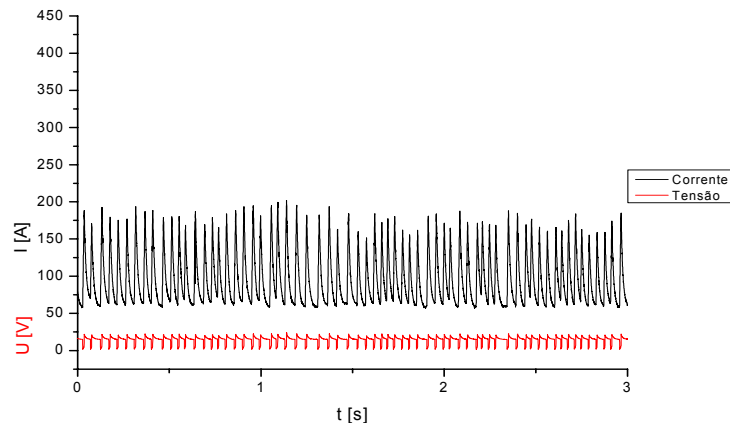


Figura 4.1. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>

A Figura 4.2 apresenta os aspectos dos cordões de solda com os parâmetros da Tabela 4.2 para o metal de base UNS 43932. Os aspectos dos cordões de solda realizados no metal de base AISI 441 são apresentados no Anexo A, Figura A6. Os cordões apresentam aspectos similares, verificando-se uma baixa quantidade de respingo. Quando se soldou o metal de base UNS 43932 evidenciam-se o aparecimento de núcleos de óxidos com todos os gases, com exceção de quando se utilizou o argônio puro, indicados nas figuras com um círculo.

A Figura 4.3 apresenta a forma como foram realizadas as medições dos perfis dos cordões de solda (largura (L), penetração (P) e reforço (R)) realizadas na sessão transversal do corpo de prova para todas as condições estudadas.

A Tabela 4.3 apresenta as médias e desvios padrões dos perfis (largura, penetração e reforço) dos cordões de solda. Para realização do cálculo destes valores foram realizadas três medições (início, meio e final) na sessão transversal do cordão para cada variável, que podem ser observadas nas Tabelas A1, A2 e A3, Anexo A.

A Figura 4.4 apresenta o gráfico da largura do cordão de solda em função do tipo de gás de proteção utilizado para os metais de base UNS 43932 e o AISI 441. A linha ligando os pontos de estudo foi colocada com o intuito de auxiliar na compreensão das variações obtidas. Observa-se que de uma forma geral, levando em consideração o desvio padrão, a largura dos cordões ficaram em uma mesma faixa para todos os gases de proteção utilizados, com exceção de quando se utilizou o argônio com o metal de base UNS 43932, que teve valores inferiores ao demais.

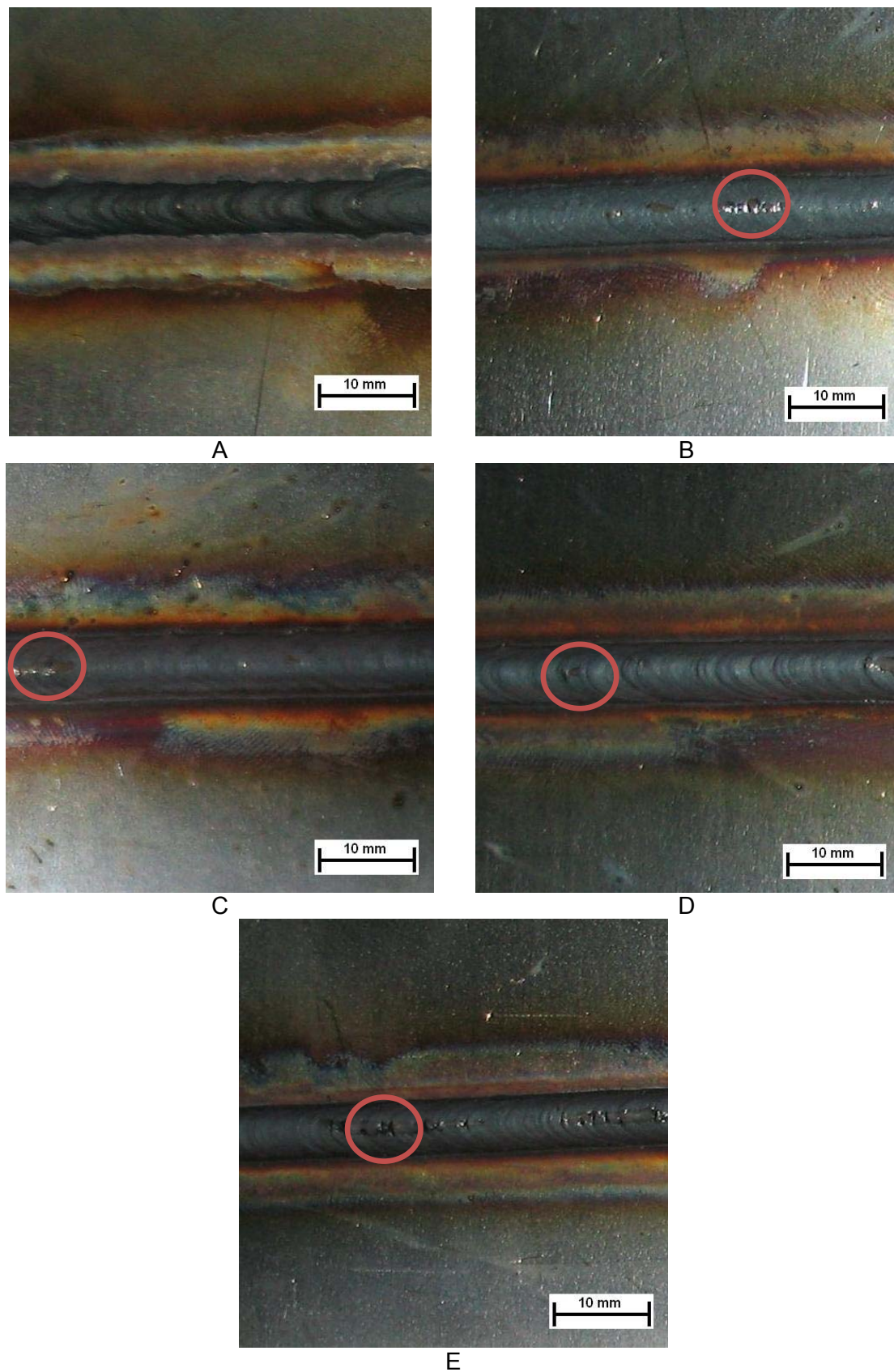


Figura 4.2. Aspectos dos cordões de solda do metal de base UNS 43932 e metal de adição ER308LSi, e gás de proteção: (a) Ar, (b) Ar+2%O<sub>2</sub>, (c) Ar+4%CO<sub>2</sub>, (d) Ar+8%CO<sub>2</sub> e (e) Ar+25%CO<sub>2</sub>

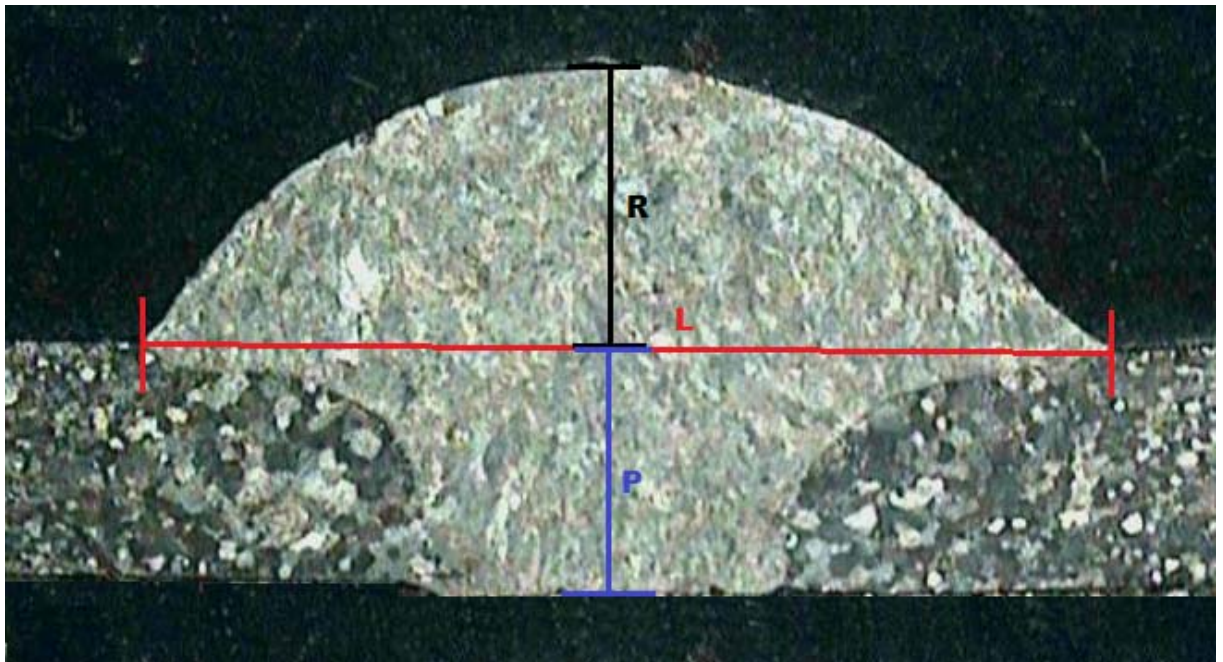


Figura 4.3. Medições da largura (L), penetração (P) e reforço (R) realizadas na sessão transversal do corpo de prova soldado com o metal de adição ER308LSi e gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> no metal de base AISI 441

Tabela 4.3. Médias e desvios padrões dos perfis (largura, penetração e reforço) dos cordões de soldados com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS 43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Largura 10 <sup>-3</sup> [m]		Penetração 10 <sup>-3</sup> [m]		Reforço 10 <sup>-3</sup> [m]	
			Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
UNS 43932	ER308LSi	Ar	5,68	0,06	2,30	0,02	2,59	0,22
		Ar+2%O <sub>2</sub>	7,49	0,38	2,24	0,09	2,40	0,24
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	7,50	0,22	2,16	0,03	2,53	0,08
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	6,43	0,58	2,05	0,02	2,61	0,50
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	6,26	0,67	2,25	0,30	2,63	0,41
AISI 439	ER308LSi	Ar	7,79	0,70	2,02	0,03	2,44	0,15
		Ar+2%O <sub>2</sub>	7,35	0,42	2,16	0,07	2,13	0,21
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	7,86	0,50	2,23	0,24	2,34	0,25
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	7,28	0,22	2,76	0,40	2,18	0,20
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	6,14	0,30	2,17	0,19	2,63	0,25

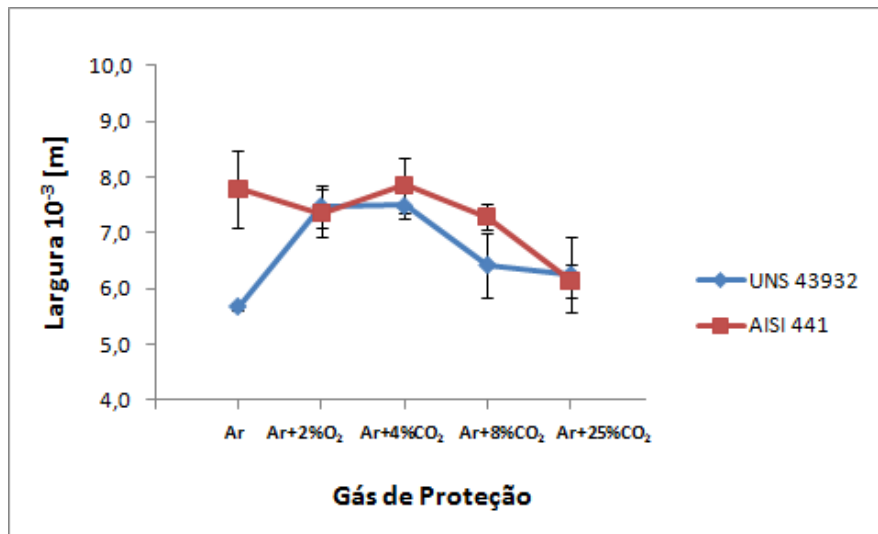


Figura 4.4. Gráfico da largura em função do gás de proteção medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS 43932 e AISI 441

A Figura 4.5 apresenta o gráfico da penetração dos cordões soldados e a Figura 4.6 apresenta o gráfico do reforço do cordão de solda em função do tipo de gás de proteção utilizado para os metais de base UNS 43932 e o AISI 441. Pode-se realizar uma análise similar a da largura de corte, uma vez que de uma forma geral os valores ficaram todos dentro de uma mesma faixa para cada item analisado.

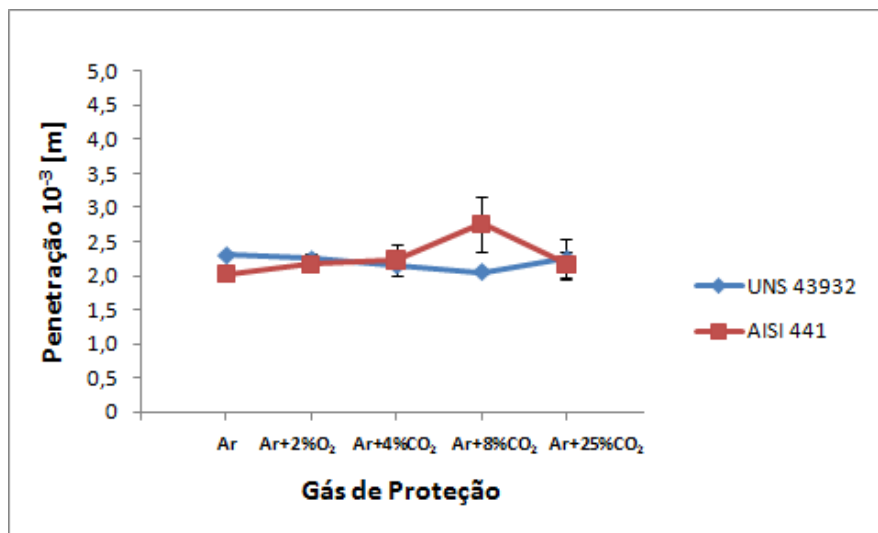


Figura 4.5. Gráfico penetração em função do gás de proteção medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS 43932 e AISI

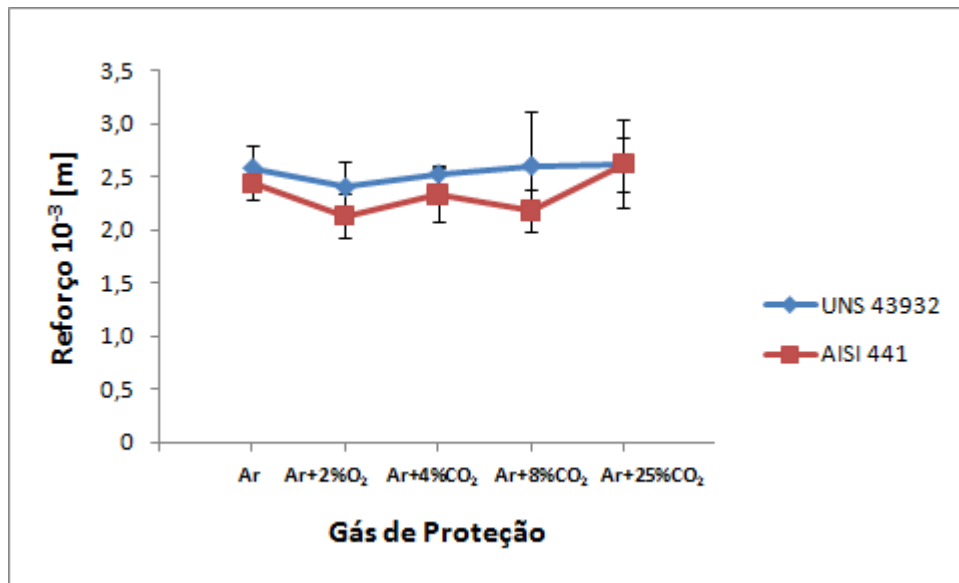


Figura 4.6. Gráfico do reforço em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS 43932 e AISI 441

Realizou-se ainda a medição da diluição utilizando a Equação 4.2.

$$\delta = \frac{A_F}{A_T} \cdot 100 (\%) \tag{4.2}$$

Onde  $\delta$  representa a diluição,  $A_F$  representa a área fundida do metal base (Figura 4.7 b) e  $A_T$  representa a área total do cordão de solda (Figura 4.7 c).

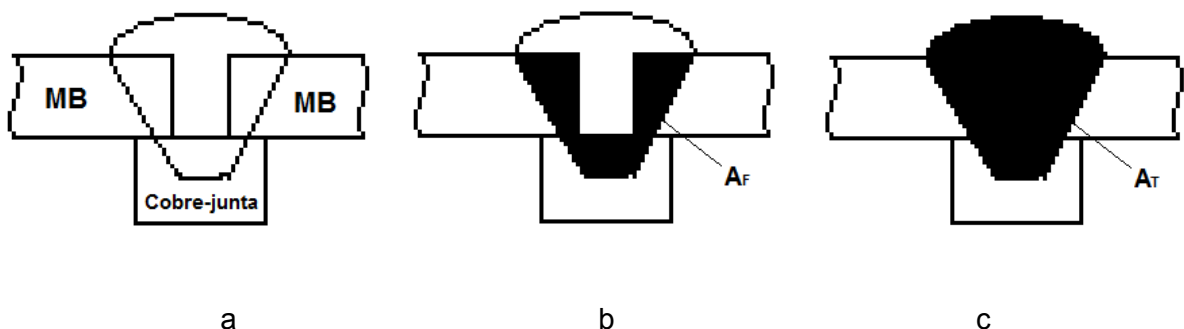


Figura 4.7. Representação esquemática (a) da junta soldada; (b) da área fundida ( $A_F$ ) e (c) da área total ( $A_T$ ) a serem medidas nas sessões transversais dos corpos de prova soldados

A Tabela 4.4 apresenta a diluição encontrada para todos os gases de proteção utilizados na soldagem com o metal de adição ER308LSi. Para a realização dos cálculos da

diluição foram utilizados os três valores medidos de área total e os três de área fundida apresentados na Tabela A4, Anexo A.

Tabela 4.4. Medições de diluição calculadas para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Diluição				
			A	B	C	Média	Desvio
UNS 43932	ER308LSi	Ar	22,30	21,56	16,79	20,22	2,99
		Ar+2%O <sub>2</sub>	20,71	25,43	19,85	22,00	3,00
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	19,25	20,63	-	19,94	0,97
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	21,26	13,17	21,16	18,53	4,64
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	23,55	20,47	13,71	19,24	5,03
AISI 439	ER308LSi	Ar	17,72	15,84	38,55	24,03	12,61
		Ar+2%O <sub>2</sub>	28,64	24,29	19,55	24,16	4,55
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	27,12	20,22	18,41	21,92	4,60
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	40,97	43,84	28,23	37,68	8,31
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	13,59	22,64	22,02	19,41	5,05

A Figura 4.8 apresenta o gráfico da diluição do cordão de solda em função do tipo de gás de proteção utilizado para os metais de base UNS 43932 e AISI 441. Observa-se que a diluição ficou dentro de uma mesma faixa para os dois metais de base, com excessão do soldado no metal de base AISI 441 com 8% de dióxido de carbono.

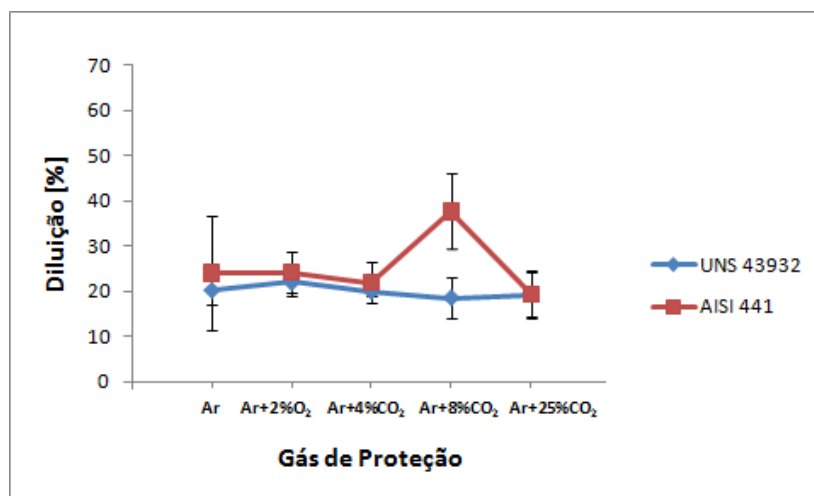


Figura 4.8. Gráfico da diluição em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS 43932 e AISI 441

### 4.3. Obtenção das condições de soldagem para o metal de adição ER430Ti

A Tabela 4.5 apresenta os testes preliminares realizados com o metal de adição ER430Ti e metal de base UNS 43932, para os cinco gases de proteção estudados. Para a obtenção dos parâmetros de solda utilizou-se a tensão de soldagem regulada na máquina de 16 V, velocidade de soldagem de  $3 \cdot 10^{-3}$  m/s, velocidade de alimentação de  $6,7 \cdot 10^{-2}$  m/min e a indutância de subida e descida, conforme definidos durante a obtenção dos parâmetros de solda para o metal de adição ER308LSi.

Baseado nas distâncias de bico de contato peça obtidas para a soldagem com o arame ER308LSi (que podem ser observadas na Tabela 4.2) realizou-se pequenas alterações na DBCP de modo a se obter correntes médias de soldagem de aproximadamente 92 A.

Tabela 4.5. Testes preliminares realizados com o metal de adição ER430Ti e o metal de base UNS 43932

Gás	U [V]	$V_{SOLD}$ $10^{-3}$ [m/s]	$V_{ALIM}$ $10^{-2}$ [m/s]	$K_{S/D}$	$U_M$ [V]	DBCP $10^{-3}$ [m]	$I_M$ [A]	E [J/m]
Ar	16	3	6,7	20/20	14,8	12	99	439560
Ar	16	3	6,7	20/20	14,8	14	98	435120
<b>Ar</b>	<b>16</b>	<b>3</b>	<b>6,7</b>	<b>20/20</b>	<b>14,8</b>	<b>16</b>	<b>90</b>	<b>399600</b>
Ar+2%O <sub>2</sub>	16	3	6,7	20/20	14,8	17	87	386280
<b>Ar+2%O<sub>2</sub></b>	<b>16</b>	<b>3</b>	<b>6,7</b>	<b>20/20</b>	<b>14,8</b>	<b>16</b>	<b>90</b>	<b>399600</b>
<b>Ar+4%CO<sub>2</sub></b>	<b>16</b>	<b>3</b>	<b>6,7</b>	<b>20/20</b>	<b>14,8</b>	<b>17</b>	<b>89</b>	<b>395160</b>
<b>Ar+8%CO<sub>2</sub></b>	<b>16</b>	<b>3</b>	<b>6,7</b>	<b>20/20</b>	<b>14,8</b>	<b>14</b>	<b>89</b>	<b>395160</b>
Ar+25%CO <sub>2</sub>	16	3	6,7	20/20	14,8	17	79	350760
Ar+25%CO <sub>2</sub>	16	3	6,7	20/20	14,8	16	84	372960
<b>Ar+25%CO<sub>2</sub></b>	<b>16</b>	<b>3</b>	<b>6,7</b>	<b>20/20</b>	<b>14,8</b>	<b>14</b>	<b>89</b>	<b>395160</b>

A Tabela 4.6 apresenta as condições de soldagem que foram selecionadas para trabalhar com o metal de adição ER430Ti. Nota-se que não houve um aumento da DBCP com o aumento do teor de dióxido de carbono em mistura com argônio, como foi observado para o arame ER308LSi, chegando em alguns casos até mesmo a haver uma diminuição do valor da DBCP. Este fato também foi observado por Resende (2007) em seu trabalho e pode estar relacionada com uma possível instabilidade na transferência metálica causada pelo titânio presente na composição química do metal de adição.



Tabela 4.6. Condições de soldagem para o metal de adição ER430Ti

Arame	Gás de Proteção	$V_{SOLD}$ $10^{-3}$ [m/s]	$V_{ALIM}$ $10^{-2}$ [m/s]	$K_{S/D}$	DBCP $10^{-3}$ [m]	$I_M$ [A]	f [Hz]
ER430Ti	Ar	3	6,7	20/20	16	90	17
	Ar+2%O <sub>2</sub>				17	89	21
	Ar+4%CO <sub>2</sub>				16	89	27
	Ar+8%CO <sub>2</sub>				14	89	20
	Ar+25%CO <sub>2</sub>				14	89	19

Comparando-se as frequências de curto-circuito apresentadas na Tabela 4.6 e nos oscilogramas de corrente e tensão de soldagem apresentados nas Figuras A.7 a A.11, Anexo A, com as obtidas quando se usou o metal de adição ER308LSi, nota-se que a transferência metálica é muito mais instável (menores frequências), fato também observado por Resende (2007) e Madeira (2007). Nota-se também que não há um aumento tão claro na quantidade de curto-circuito com o acréscimo de gás ativo em mistura com o argônio, e que pode estar relacionado com a instabilidade do metal de adição durante o processo de soldagem. Resende (2007) afirma que esta instabilidade é causada pela maior rugosidade do metal de adição ER430Ti, que faz com que o arame se prenda no conduto, atrapalhando assim a transferência metálica.

Os aspectos dos cordões de soldados com o arame ER430Ti e gases de proteção Ar, Ar+2%O<sub>2</sub>, Ar+4%CO<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>, respectivamente nos metais de base UNS 43932 e AISI 441, conforme se apresentam as condições de soldagem da Tabela 4.6 podem ser observados nas Figuras A.12 e A.13, Anexo A. Os cordões apresentam aspectos similares, com baixa quantidade de respingo. Quando se soldou o metal de base UNS 43932 evidenciam-se o aparecimento de núcleos de óxidos somente quando se utilizou o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub>.

Realizando uma comparação com o metal de base ER308LSi evidencia-se a importância da estabilização do metal de adição, uma vez que houve uma maior quantidade de núcleos de óxido quando soldou-se com aquele metal de adição, do que quando comparado com o metal de adição ER430Ti.

A Tabela 4.7 apresenta as média e o desvio padrão dos perfis (largura, penetração e reforço) dos cordões de solda realizados com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS 43932 e AISI 441. Da mesma forma realizada com os cordões soldados com o metal de adição ER430Ti, realizaram-se três medições na sessão transversal do cordão para cada variável, sendo uma no início (A), uma no meio (B) e uma no final (C) do cordão de solda, que podem ser observadas nas Tabelas A.5, A.6 e A.7, Anexo A.

Tabela 4.7. Médias e desvios padrões dos perfis (largura, penetração e reforço) dos cordões de soldados com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS 43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Largura $10^{-3}$ [m]		Penetração $10^{-3}$ [m]		Reforço $10^{-3}$ [m]	
			Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
UNS 43932	ER308LSi	Ar	6,09	1,17	3,53	0,21	1,69	0,16
		Ar+2%O <sub>2</sub>	7,26	0,22	2,14	0,11	2,23	0,15
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	6,98	0,15	2,14	0,08	2,12	0,21
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	6,90	0,18	2,58	0,26	2,21	0,45
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	6,09	0,30	3,36	0,86	1,95	0,49
AISI 439	ER308LSi	Ar	7,68	0,14	2,46	0,04	2,17	0,03
		Ar+2%O <sub>2</sub>	7,34	0,39	2,31	0,08	1,94	0,20
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	6,56	0,24	2,32	0,10	1,97	0,07
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	7,46	0,56	2,91	0,06	1,83	0,27
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	8,52	0,13	2,35	0,06	2,64	0,69

A Figura 4.9 apresenta o gráfico da largura do cordão de solda em função do tipo de gás de proteção utilizado nos metais de base UNS 43932 e AISI 441. Observa-se que de uma forma geral, levando em consideração o desvio padrão, a largura dos cordões ficaram em uma mesma faixa para todos os gases de proteção utilizados, com exceção de quando se utilizou o Ar+25%CO<sub>2</sub> com o metal de base AISI 441, que tiveram valores superiores ao demais.

A Figura 4.10 apresenta o gráfico da penetração e a A Figura 4.11 apresenta o gráfico do reforço do cordão de solda em função do tipo de gás de proteção utilizado nos metais de base UNS 43932 e AISI 441. Pode-se realizar para a penetração e reforço do cordão de solda uma análise similar, onde se observa de uma forma geral que os valores ficaram todos dentro de uma mesma faixa, independentemente do metal de adição e gás de proteção utilizados.

A Tabela 4.8 apresenta a diluição encontrada para todos os gases de proteção utilizados para o metal de adição ER430Ti. Para a realização dos cálculos foram utilizados os valores apresentados na Tabela A.8 (três valores medidos de área total e os três de área fundida), utilizando a Equação 4.1.

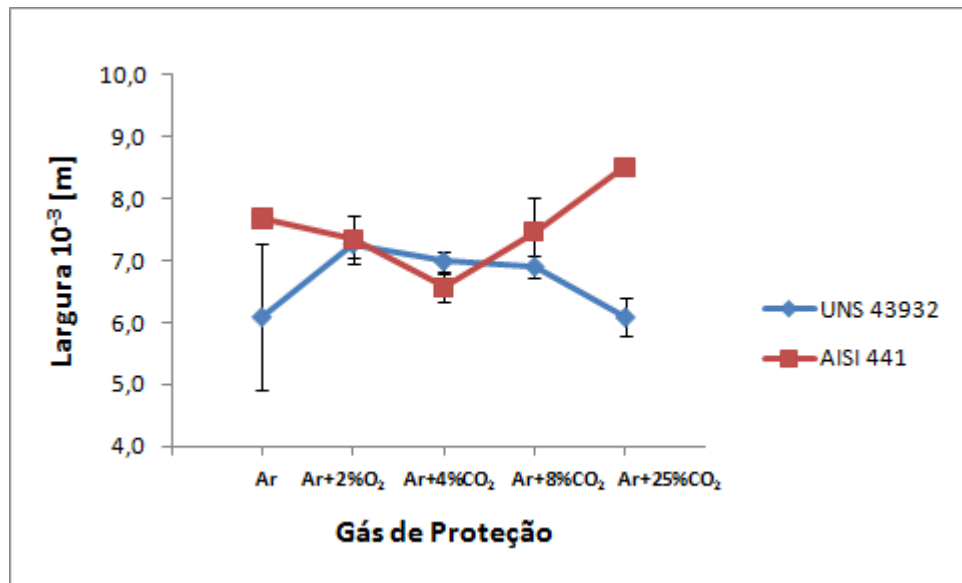


Figura 4.9. Gráfico da variação da largura em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS 43932 e AISI 441

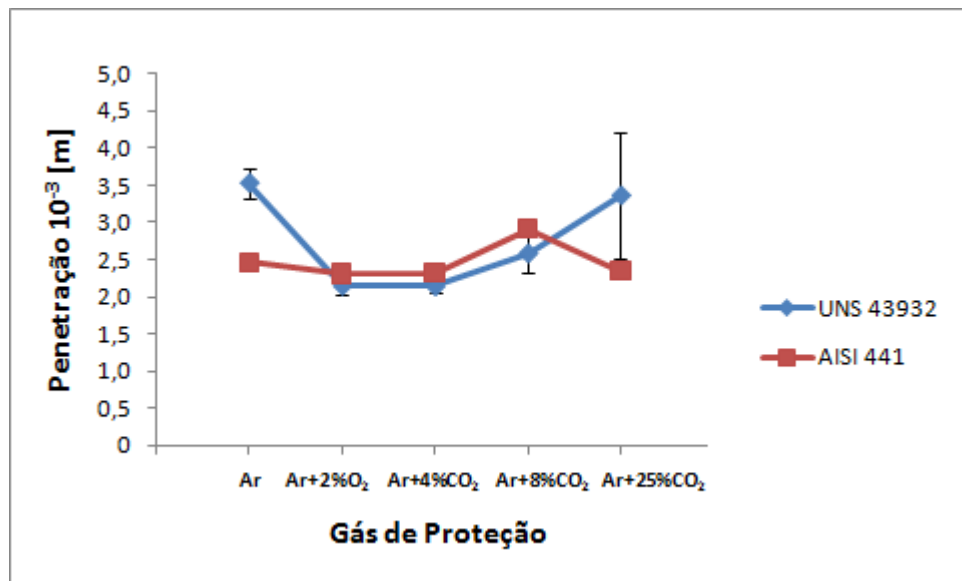


Figura 4.10. Gráfico da variação da penetração em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS 43932 e AISI 441

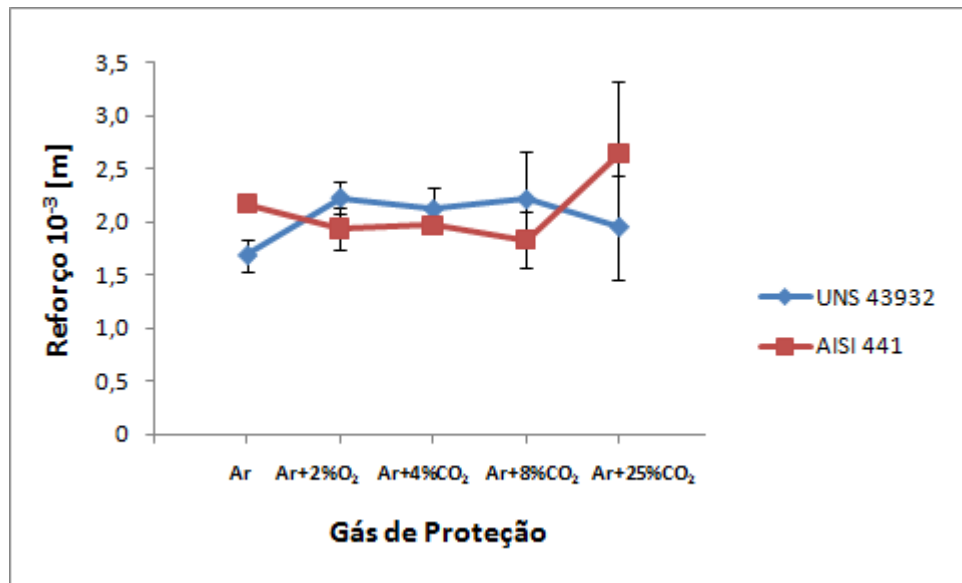


Figura 4.11. Gráfico da variação do reforço em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS 43932 e AISI 441

Tabela 4.8. Medições de diluição realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Diluição				
			A	B	C	Média	Desvio
UNS 43932	ER430Ti	Ar	41,04	43,78	52,09	45,64	5,75
		Ar+2%O <sub>2</sub>	35,11	25,20	30,21	30,17	4,95
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	32,46	26,20	31,13	29,93	3,30
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	35,49	21,29	44,48	33,75	11,69
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	59,20	62,82	44,19	55,40	9,88
AISI 439	ER430Ti	Ar	39,31	43,41	39,27	40,66	2,38
		Ar+2%O <sub>2</sub>	39,60	38,59	30,84	36,34	4,80
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	27,27	39,61	40,91	35,93	7,53
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	48,59	51,43	50,46	50,16	1,44
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	26,09	27,38	-	26,74	0,91

A Figura 4.12 apresenta o gráfico da diluição do cordão de solda em função do tipo de gás de proteção utilizado nos metais de base UNS 43932 e AISI 441. Observa-se que, levando em consideração as barras de desvio padrão, a diluição ficou dentro de uma mesma faixa para os dois metais de base.

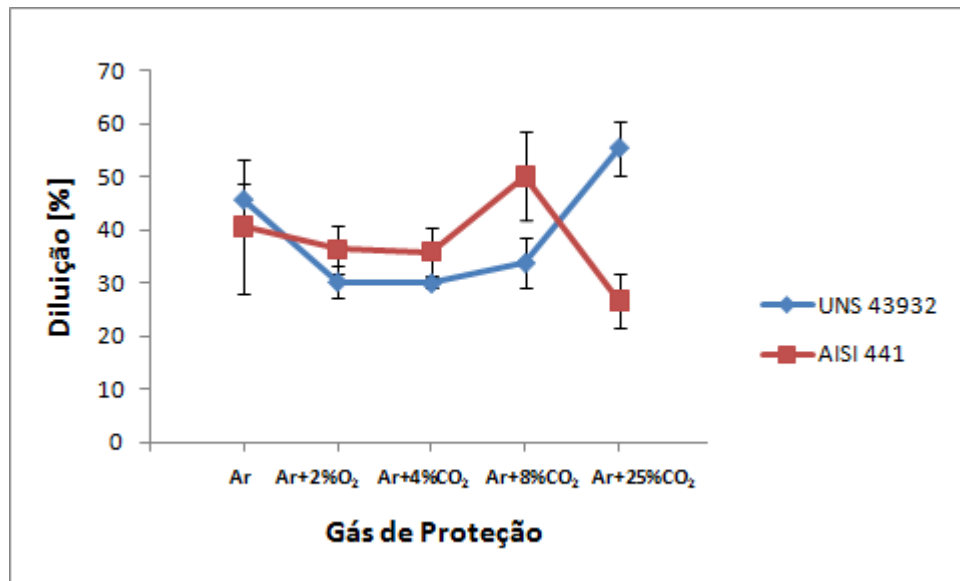


Figura 4.12. Gráfico da diluição em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS 43932 e AISI 441

#### 4.4 Obtenção das condições de soldagem para o metal de adição ER430LNb

A Tabela 4.9 apresenta os testes preliminares com o metal de adição ER430LNb, que foram realizados no metal de base UNS 43932, para os cinco gases de proteção. Para a obtenção dos parâmetros de solda utilizou-se a tensão de soldagem regulada na máquina (16 V), velocidade de soldagem ( $3 \cdot 10^{-3}$  m/s), velocidade de alimentação ( $6,7 \cdot 10^{-2}$  m/s) e a indutância de subida e descida definidos durante a obtenção dos parâmetros de solda para o metal de adição ER308LSi.

Da mesma forma realizada com o metal de adição ER430Ti, baseou-se nas distâncias de bico de contato peça obtidas para a soldagem com o arame ER308LSi (que podem ser observadas na Tabela 4.2), pequenas alterações na DBCP de modo a se obter correntes médias de soldagem de aproximadamente 92 A.

A Tabela 4.10 apresenta as condições de soldagem que foram selecionadas para trabalhar com o metal de adição ER430LNb. Nota-se que de forma similar ao que ocorreu com o metal de adição ER308LSi houve um aumento da DBCP com o aumento do teor de dióxido de carbono em mistura com argônio. Além de um aumento desta frequência com o aumento do teor de elemento oxidante no gás de proteção.

Tabela 4.9. Testes preliminares realizados com o metal de adição ER430LNb e o metal de base UNS 43932

Gás	U [V]	$V_{SOLD}$ $10^{-3}$ [m/s]	$V_{ALIM}$ $10^{-2}$ [m/s]	$K_{S/D}$	$U_M$ [V]	DBCP $10^{-3}$ [m]	$I_M$ [A]	E [J/m]
Ar	16	3	6,7	20/20	14,8	16	90	399600
Ar+2%O <sub>2</sub>	16	3	6,7	20/20	14,8	20	92	408480
Ar+4%CO <sub>2</sub>	16	3	6,7	20/20	14,8	20	89	395160
Ar+8%CO <sub>2</sub>	16	3	6,7	20/20	14,8	14	112	497280
Ar+8%CO <sub>2</sub>	16	3	6,7	20/20	14,8	20	94	417360
Ar+8%CO <sub>2</sub>	16	3	6,7	20/20	14,8	21	92	408480
Ar+25%CO <sub>2</sub>	16	3	6,7	20/20	14,8	22	91	404040

Tabela 4.10. Condições de soldagem para o metal de base ER430LNb

Arame	Gás de Proteção	$V_{SOLD}$ $10^{-3}$ [m/s]	$V_{ALIM}$ $10^{-2}$ [m/s]	$K_{S/D}$	DBCP $10^{-3}$ [m]	$I_M$ [A]	f [Hz]
ER430LNb	Ar	3	6,7	20/20	16	90	17
	Ar+2%O <sub>2</sub>				20	92	21
	Ar+4%CO <sub>2</sub>				20	89	23
	Ar+8%CO <sub>2</sub>				21	92	30
	Ar+25%CO <sub>2</sub>				22	91	41

Observa-se pela Tabela 4.10 e pelos oscilogramas de corrente e tensão de soldagem, medidos na saída da fonte, que quando se soldou com o metal de adição ER430LNb e respectivamente os gases de proteção argônio, Ar, Ar+2%O<sub>2</sub>, Ar+4%CO<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub> apresentados nas Figuras A.14 a A.18, Anexo A, que a frequência de curto-circuito apresentam um acréscimo com o aumento do teor de elemento oxidante no gás de proteção, similar ao que ocorreu com o metal de adição ER308LSi (Tabela 4.2).

Os aspectos dos cordões de soldados com o arame ER430LNb e gases de proteção Ar, Ar+2%O<sub>2</sub>, Ar+4%CO<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>, respectivamente nos metais de base UNS 43932 e AISI 441 (que podem ser observadas nas Figuras A.19 e A.20, Anexo A), conforme as condições de soldagem apresentadas na Tabela 4.10. Observa-se que os cordões apresentam aspectos similares, com baixa quantidade de respingo e sem presença de óxidos, conforme foi evidenciado para os outros metais de adição utilizados.

As Tabelas 4.17 a 4.21 apresentam as medições dos perfis dos cordões de solda (respectivamente largura, penetração e reforço) realizadas nos cordões soldados com o arame ER430LNb nos metais de base UNS 43932 e AISI 441. Da mesma forma realizada com os cordões soldados com os demais metais de adição, realizaram-se três medições na

sessão transversal do cordão para cada variável, sendo uma no início (A), uma no meio (B) e uma no final (C) do cordão de solda. Com estas três medidas tirou-se uma média aritmética e calculou-se o desvio padrão, para se ter maior confiabilidade nos resultados.

Tabela 4.11. Médias e desvios padrões dos perfis (largura, penetração e reforço) dos cordões de soldados com o metal de adição ER430LNb nos metais de base UNS 43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Largura $10^{-3}$ [m]		Penetração $10^{-3}$ [m]		Reforço $10^{-3}$ [m]	
			Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
UNS 43932	ER308LSi	Ar	6,59	0,45	3,03	1,12	2,36	0,86
		Ar+2%O <sub>2</sub>	7,38	0,25	2,45	0,20	2,42	0,34
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	7,62	0,25	2,42	0,31	2,71	0,23
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	6,62	0,16	2,43	0,25	2,67	0,58
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	6,51	0,33	2,30	0,10	2,50	0,12
AISI 439	ER308LSi	Ar	7,40	0,25	2,52	0,03	2,70	0,32
		Ar+2%O <sub>2</sub>	7,96	0,28	2,39	0,10	1,97	0,27
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	7,26	0,23	2,38	0,19	2,83	0,39
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	6,64	0,28	2,52	0,22	2,70	0,49
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	8,30	0,29	3,33	1,41	2,85	0,03

As Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam respectivamente os gráficos da largura, penetração e reforço medidos nas sessões transversais dos cordões de solda em função do tipo de gás de proteção utilizado para os metais de base UNS 43932 e AISI 441. Observa-se que de uma forma geral, levando em consideração o desvio padrão, os perfis dos cordões ficaram em uma mesma faixa para todos os gases de proteção utilizados.

A Tabela 4.12 apresenta os valores médios e o desvio padrão para os cordões de soldados com o metal de adição ER430LNb, para o cálculo utilizou-se os três valores medidos de área total e os três de área fundida, apresentados na Tabela A.12, Anexo A.

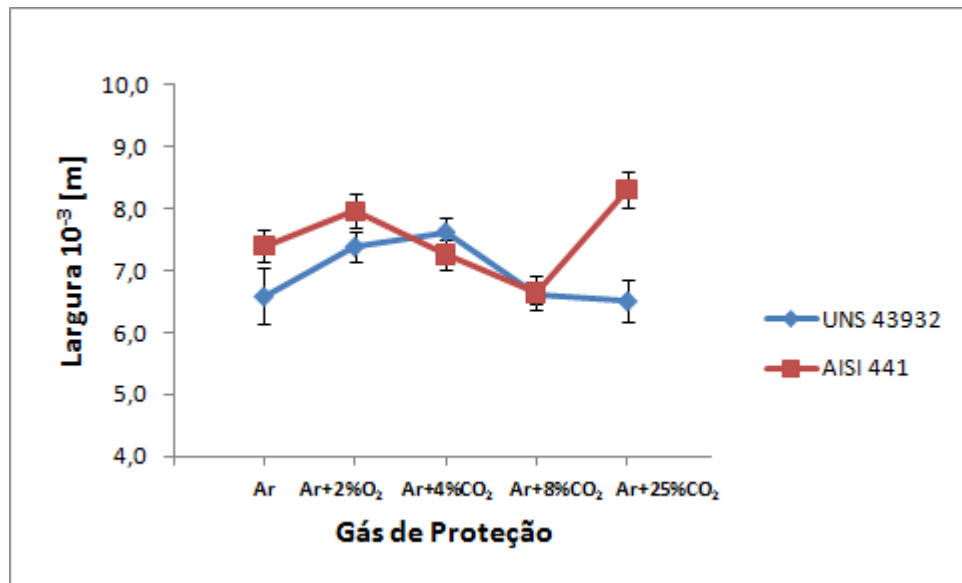


Figura 4.13. Gráfico da variação da largura em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932

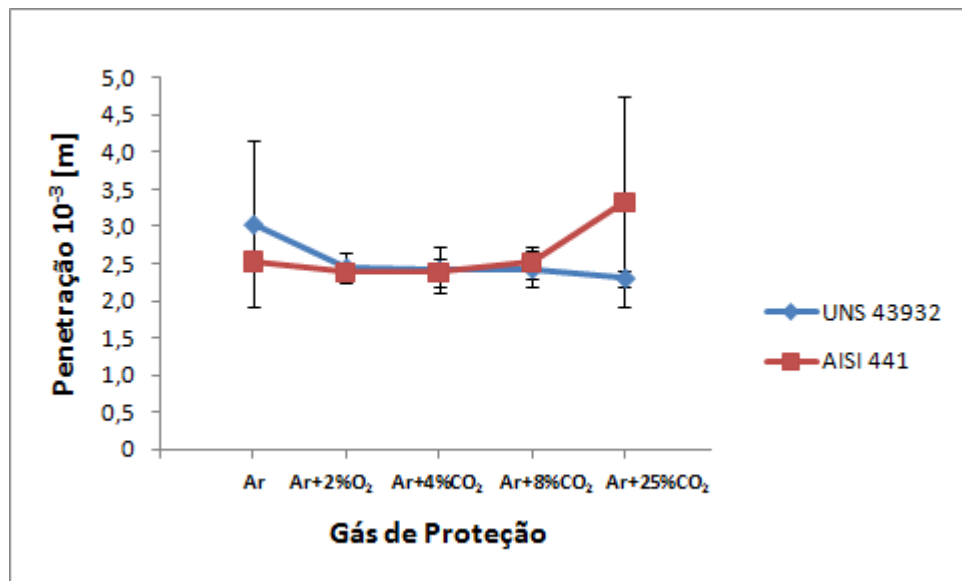


Figura 4.14. Gráfico da variação da diluição em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932



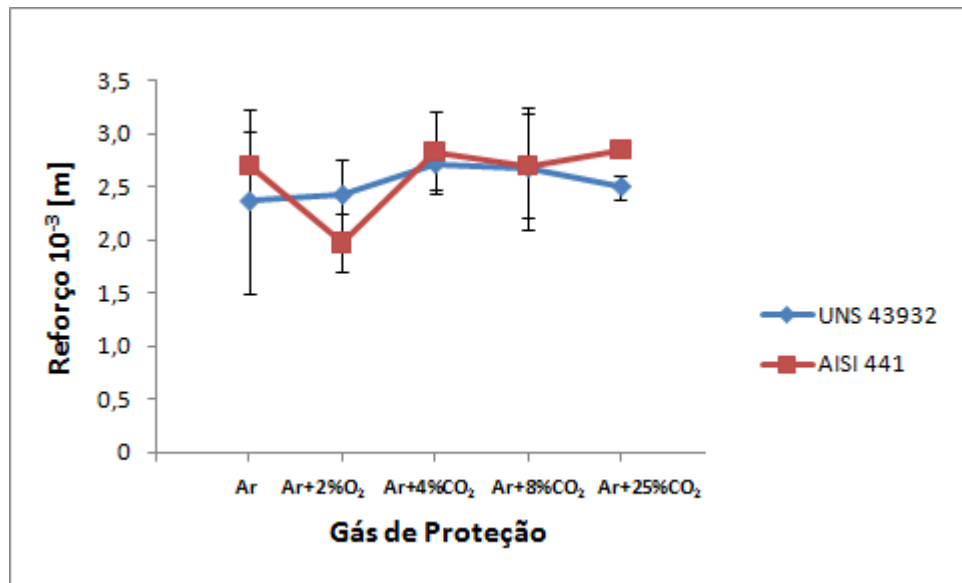


Figura 4.15. Gráfico da variação do reforço em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932

Tabela 4.12. Medições da diluição realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb nos metais de base UNS43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Diluição				
			A	B	C	Média	Desvio
UNS 43932	ER430LNb	Ar	20,19	61,48	20,33	34,00	23,80
		Ar+2%O <sub>2</sub>	22,08	26,78	36,85	28,57	7,55
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	34,48	9,06	22,95	22,17	12,73
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	36,71	15,16	27,62	26,50	10,82
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	26,08	24,79	36,55	29,14	6,45
AISI 439	ER430LNb	Ar	29,74	35,67	35,83	33,75	3,47
		Ar+2%O <sub>2</sub>	45,76	30,36	33,84	36,65	8,08
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	21,87	35,10	30,18	29,05	6,69
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	30,15	26,33	21,66	26,05	4,25
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	23,91	41,29	-	32,60	12,29

A Figura 4.16 apresenta o gráfico da diluição do cordão de solda em função do tipo de gás de proteção utilizado para os metais de base UNS 43932 e AISI 441. Observa-se que, levando em consideração as barras de desvio padrão, a diluição ficou dentro de uma mesma faixa para os dois metais de base.

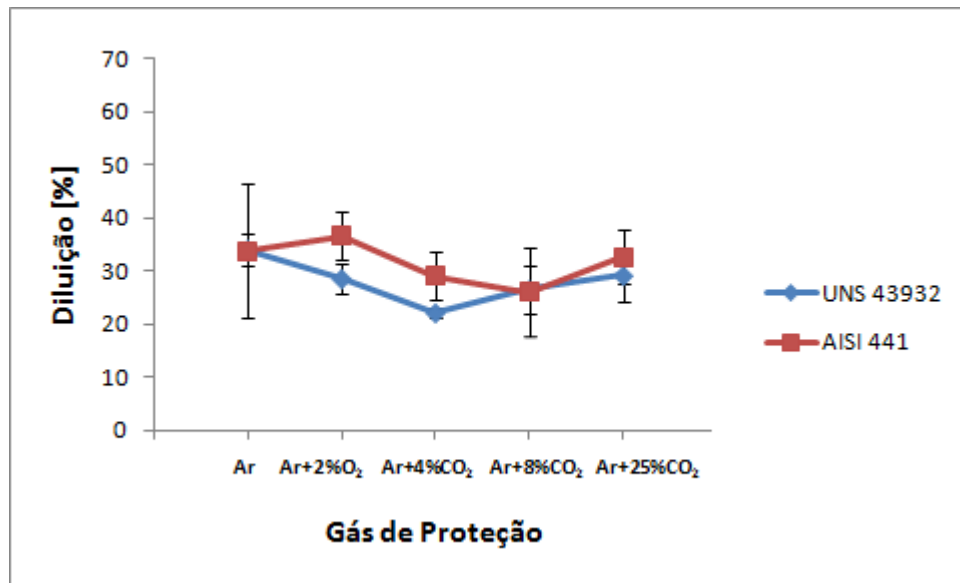


Figura 4.16. Gráfico da variação da diluição em função do gás de proteção utilizado medido na sessão do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb no metal de base UNS43932

#### 4.5. Comparativos entre os metais de adição

A Tabela 4.13 apresenta os valores médios e o desvio padrão calculados para cada par metal de adição e metal de base. Estes valores foram calculados utilizando as diluições encontradas para os cinco gases de proteção estudados para cada par metal de adição e metal de base.

Tabela 4.13. Diluição Média e Desvio Padrão para cada par Metal de Base e Metal de Adição

MB	Metal de Adição	Diluição Média	Desvio Diluição
UNS 43932	ER308LSi	20,0	1,3
UNS 43932	ER430Ti	39,0	11,2
UNS 43932	ER430LNb	28,1	4,3
AISI 439	ER308LSi	25,4	7,1
AISI 439	ER430Ti	38,0	8,5
AISI 439	ER430LNb	31,6	4,1

Com base nos valores apresentados na Tabela 4.13 as Figuras 4.17 e 4.18 apresentam a diluição em função do metal de adição utilizado respectivamente para o metal de base UNS 43932 e AISI 441.

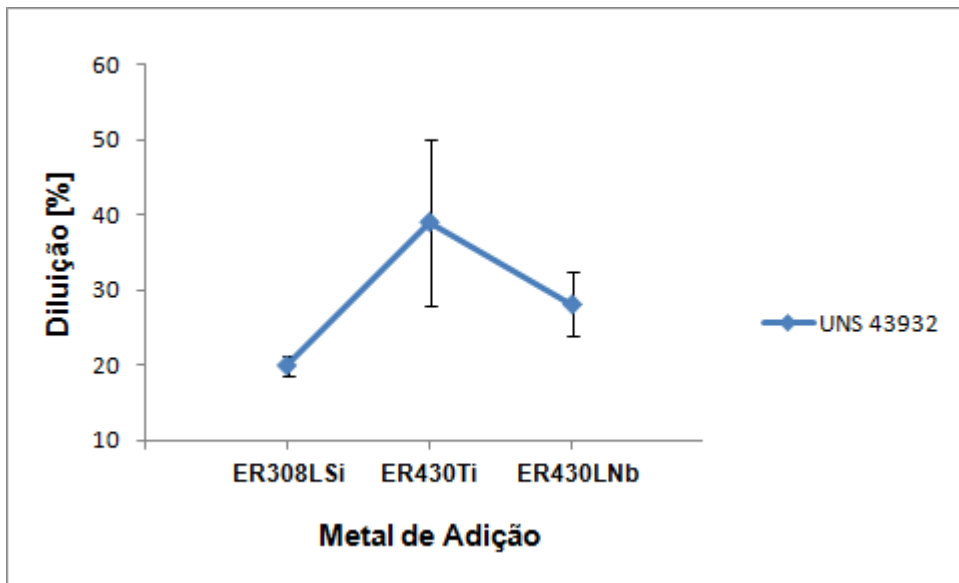


Figura 4.17. Diluição em função do metal de adição para o metal de base UNS 43932

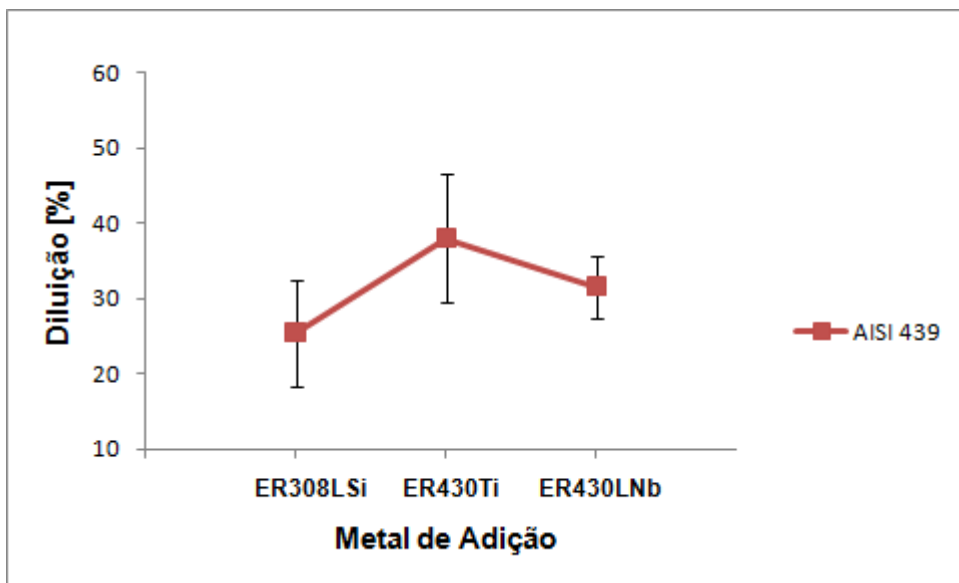


Figura 4.18. Diluição em função do metal de adição para o metal de base AISI 441

Nota-se que, levando em consideração o desvio padrão, pode-se afirmar que todos os metais de adição estudados ficaram aproximadamente dentro de uma mesma faixa de diluição. É importante a se observar é que os desvios padrões obtidos para o metal de adição ER430Ti foram muito superiores aos dos demais metais de adição para ambos metais de base. Este fato pode estar relacionado a instabilidade ao se soldar com este metal de adição, conforme já comentado anteriormente.

Analisando em termos de valores médios é possível afirmar, para os dois metais de base, que o metal de adição ER308LSi apresentou menores diluições e maiores valores

foram observados com o metal de adição ER430Ti. Madeira (2007) notou para mesmas regulagens da fonte de tensão constante, que o metal de adição ER430Ti necessita de maiores valores de corrente em relação aos outros dois arames, podendo este fato estar relacionado com as variações observadas. Porém, de estudos mais detalhados em trabalhos futuros

Com base nas composições químicas do material de base (Tabela 3.1) e do metal de adição (Tabela 3.2), nos valores de diluição para cada par metal de base-metal de adição apresentados na Tabela 4.13 e utilizando o programa Schaeffler baixado do site da ESAB (<http://www.esab.com/fi/fi/support/PC-ohjelmat.cfm>) em 05 de julho de 2009 realizou-se uma estimativa da microestrutura que será obtida para as soldas de cada par metal de base e metal de adição estudados neste trabalho, assim como estimativa da composição química da junta soldada. É importante frisar que não é levado em consideração o gás de proteção utilizado no processo de soldagem para esta estimativa, assim como o elemento titânio.

As Figuras 4.19 a 4.21 apresentam as estimativas de microestrutura da solda quando se utilizou o metal de base UNS43932 e respectivamente os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb.

Nota-se na Figura 4.19 que o metal de adição encontra-se em uma região do diagrama de Schaeffler com presença de austenita e ferrita e o metal de base encontra-se em uma região ferrítica. A solda com este metal de base encontra-se na mesma região do metal de adição, podendo haver, portanto, na solda a presença de austenita, ferrita e martensita. Considerando o diagrama, a composição do metal de base ficou em 0,017% de carbono, 0,68% de silício, 1,58% de manganês, 19,11% de cromo, 8,27% de níquel e 0,04% de nióbio.

A Figura 4.20 mostra que tanto o metal de adição, quanto o metal de base encontra-se na região ferrítica do diagrama de Schaeffler. A solda com este metal de base encontra-se na região limite da divisa entre a região ferrítica e a região onde há presença de martensita, ou seja, adições de carbono poderão influenciar na formação de martensita na região soldada. Considerando o diagrama, a composição do metal de base ficou em 0,070% de carbono, 0,79% de silício, 0,46% de manganês, 17,29% de cromo, 0,33% de níquel e 0,07% de nióbio.

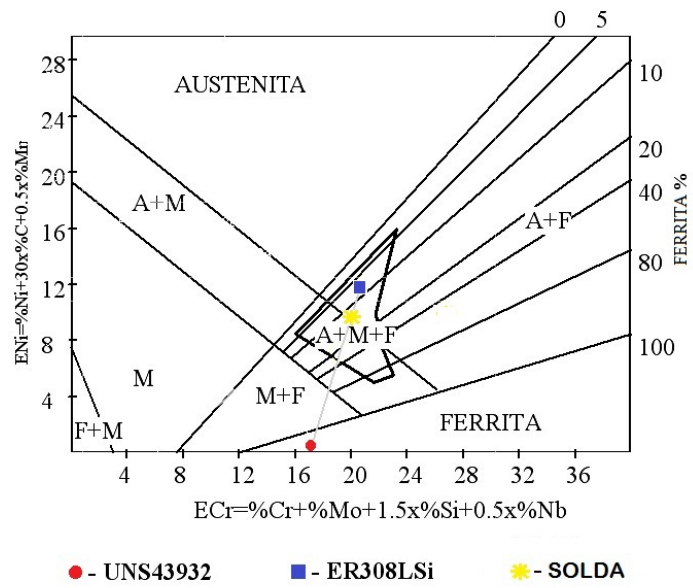


Figura 4.19. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi obtida pelo diagrama de Schaeffler

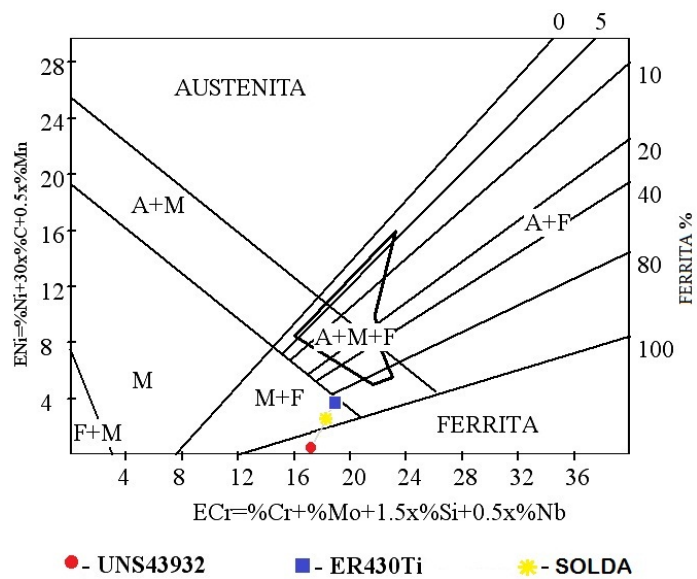


Figura 4.20. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti obtida pelo diagrama de Schaeffler

Na Figura 4.21 observa-se que o metal de adição, o metal de base e a solda encontram-se na região ferrítica do diagrama de Schaeffler, mostrando que provavelmente não haverá presença de martensita na região soldada. Considerando o diagrama, a

composição do metal de base ficou em 0,023% de carbono, 0,12% de silício, 0,35% de manganês, 17,49% de cromo, 0,38% de níquel e 0,37% de nióbio.

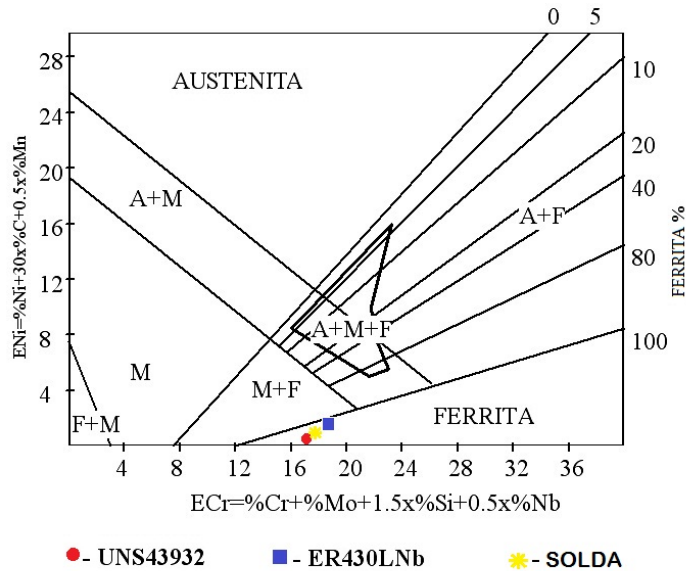


Figura 4.21. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb obtida pelo diagrama de Schaeffler

As Figuras 4.22 a 4.24 apresentam as estimativas de microestrutura da solda quando se utilizou o metal de base UNS441 e respectivamente os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb.

Pode-se realiza uma análise comparativa similar a que foi realizada para as soldas realizada no metal de base UNS43932, ou seja, a solda quando se utiliza o metal de adição ER308LSi pode apresentar tanto austenita, ferrita, quanto martensita. Considerando o diagrama, a composição do metal de base ficou em 0,017% de carbono, 0,66% de silício, 1,47% de manganês, 19,21% de cromo, 7,73% de níquel e 0,14% de nióbio. Observando-se quando comparado com a composição química da solda realizada no metal de base UNS 43932 uma queda na quantidade de níquel e um aumento de nióbio.

Para o metal de adição ER430Ti haverá presença de ferrita e martensita Considerando o diagrama, a composição do metal de base ficou em 0,072% de carbono, 0,80% de silício, 0,44% de manganês, 17,66% de cromo, 0,32% de níquel e 0,21% de nióbio. Havendo um aumento significativo apenas do nióbio, quando comparado com a solda realizada no metal de base UNS 43932, provavelmente devido a maior quantidade deste elemento no metal de base AISI 441 (Tabela 3.1, Capítulo 3).

Quando se utiliza o ER430LNb haverá somente ferrita Considerando o diagrama, a composição do metal de base ficou em 0,023% de carbono, 0,13% de silício, 0,33% de

manganês, 17,77% de cromo, 0,36% de níquel e 0,48% de nióbio. Havendo apenas um aumento de nióbio, quando comparado com a solda realizada no metal de base UNS 43932.

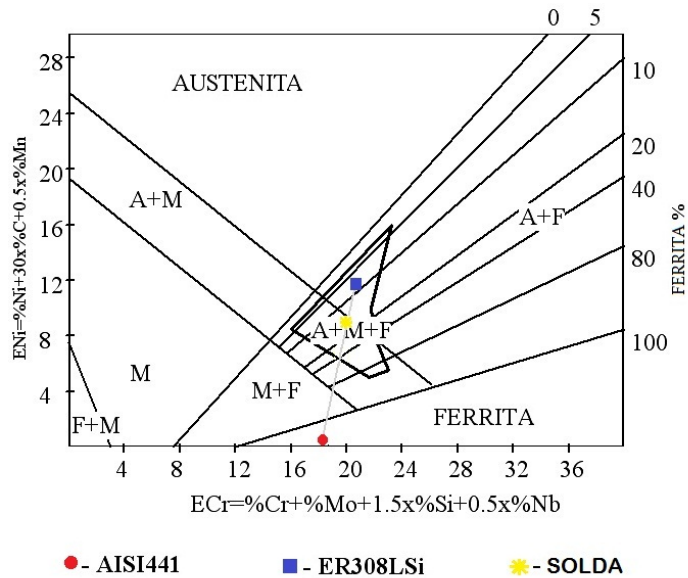


Figura 4.22. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER308LSi obtida pelo diagrama de Schaeffler

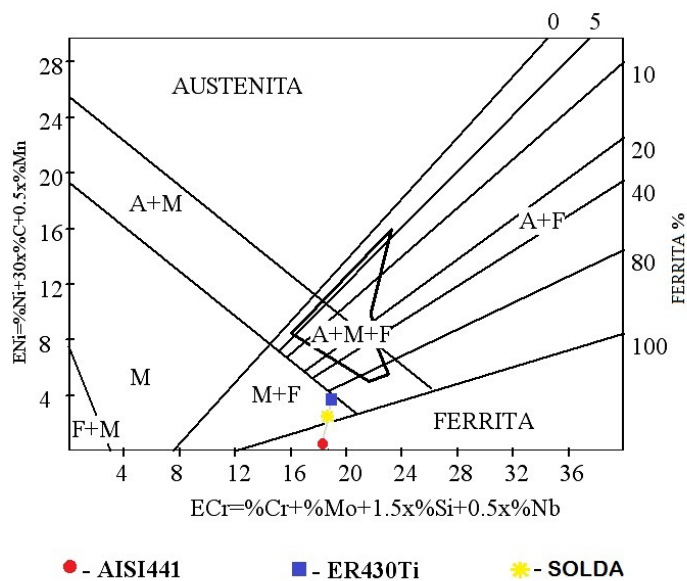


Figura 4.23. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430Ti obtida pelo diagrama de Schaeffler

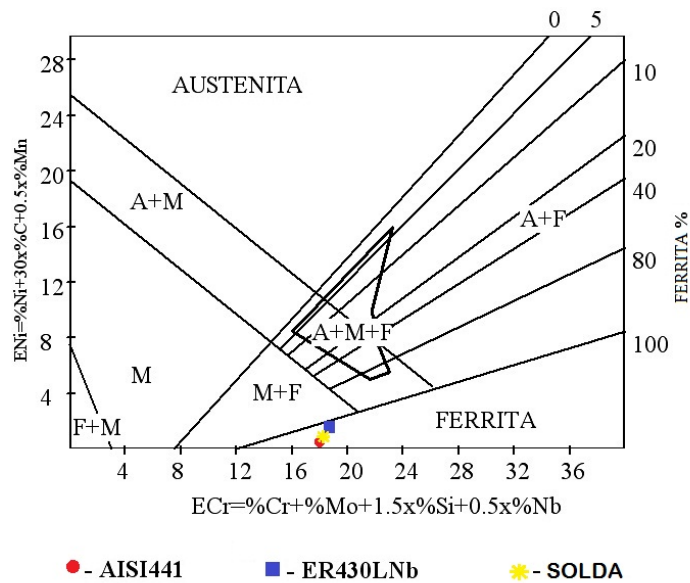


Figura 4.24. Estimativa da microestrutura da solda do metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430LNb obtida pelo diagrama de Schaeffle

#### 4.6. Conclusão parcial do Capítulo

Como conclusões parciais deste Capítulo pode-se afirmar que:

- Conseguiu-se soldar em todas as condições com energia gerada pela fonte (desconsiderando o rendimento térmico) similar.
- Os perfis dos cordões de solda para todas as condições ficaram com geometrias similares.
- A diluição para o metal da adição ER430Ti, em valor médio, foi um pouco superior aos demais arames utilizados.
- A estimativa da solda para o metal de adição ER308LSi é de uma estrutura com ferrita e austenita quando soldado no metal de base UNS 43932 e ferrita, austenita e martensita quando soldado no metal de base AISI 441.
- A estimativa da solda para o metal de adição ER430Ti é de uma estrutura com ferrita e martensita e para o arame ER430LNb é somente ferrita.
- Observou-se um aumento na quantidade de nióbio na estimativa das soldas realizadas no metal de base AISI 441 em relação ao UNS 43932.



# CAPÍTULO V

## ANÁLISE MICROESTRUTURAL E DE MICRODUREZA

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

### **5.1. Análise microestrutural, tamanho de grão e microdureza da zona termicamente afetada**

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

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

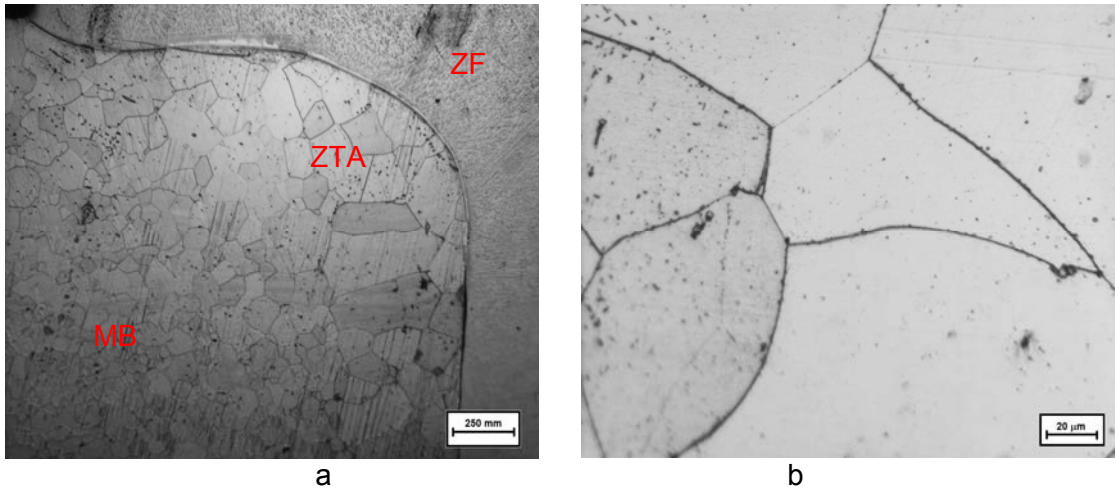


Figura 5.1. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base UNS43932 com o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> e metal de adição ER308LSi (a) 100 vezes da aumento; (a) 500 vezes da aumento

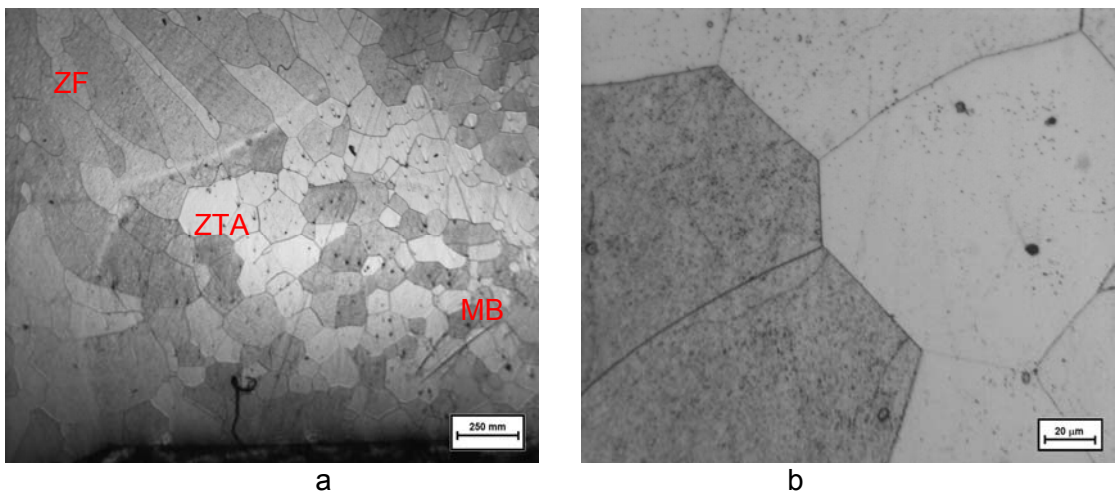


Figura 5.2. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base UNS43932 com o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub> e metal de adição ER430Ti (a) 100 vezes da aumento; (a) 500 vezes da aumento

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

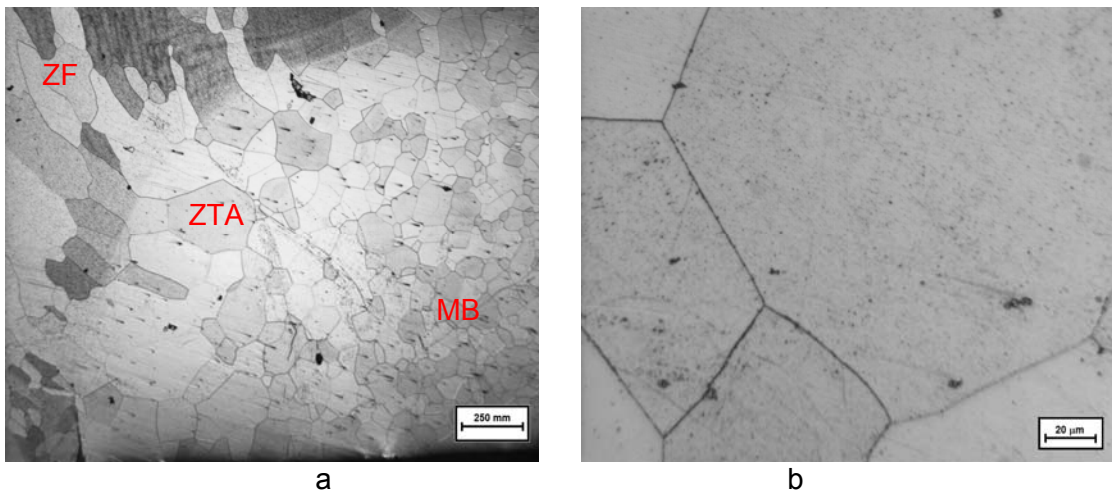


Figura 5.3. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base UNS43932 com o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> e metal de adição ER430LNb (a) 100 vezes da aumento; (a) 500 vezes da aumento

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

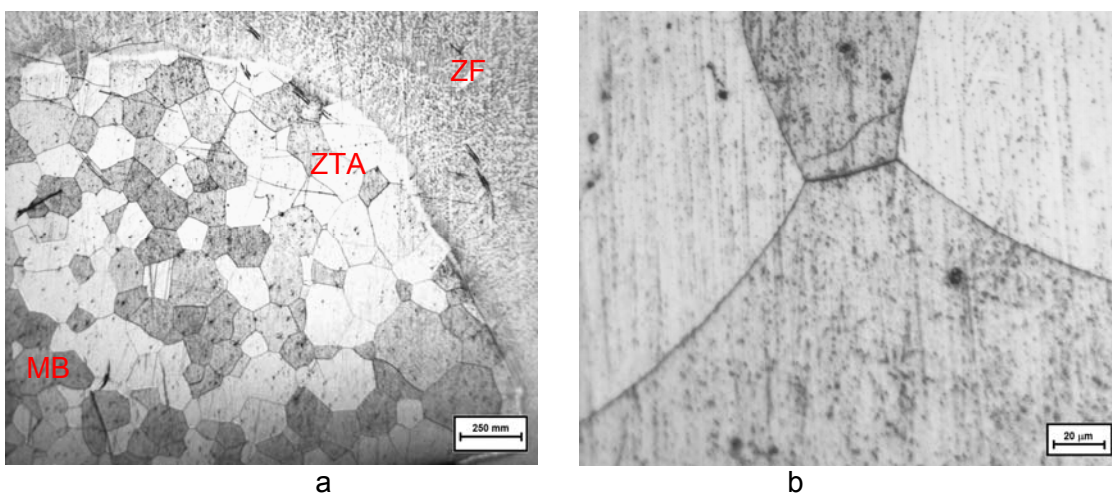


Figura 5.4. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base AISI 441 com o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> e metal de adição ER308LSi (a) 100 vezes da aumento; (a) 500 vezes da aumento

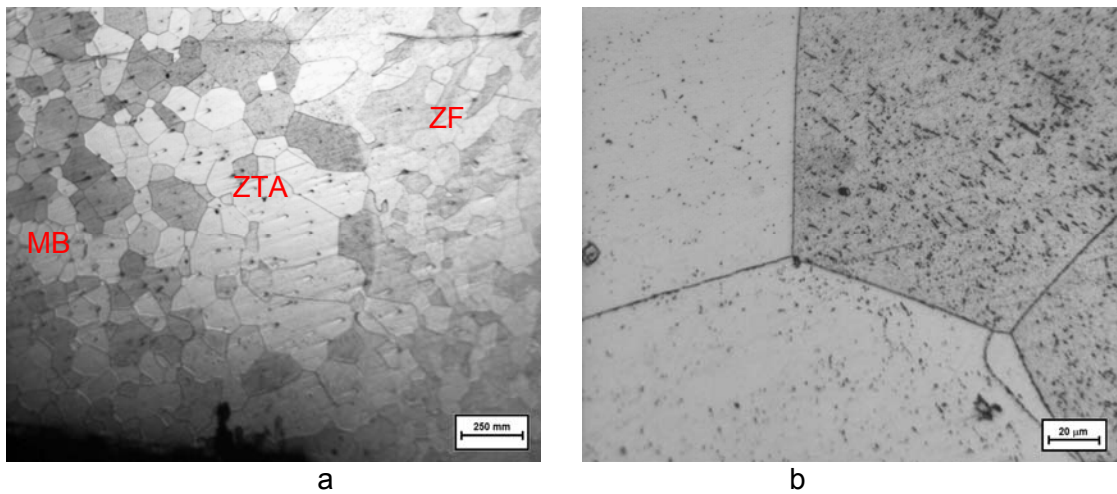


Figura 5.5. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base AISI 441 com o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub> e metal de adição ER430Ti (a) 100 vezes da aumento; (a) 500 vezes da aumento

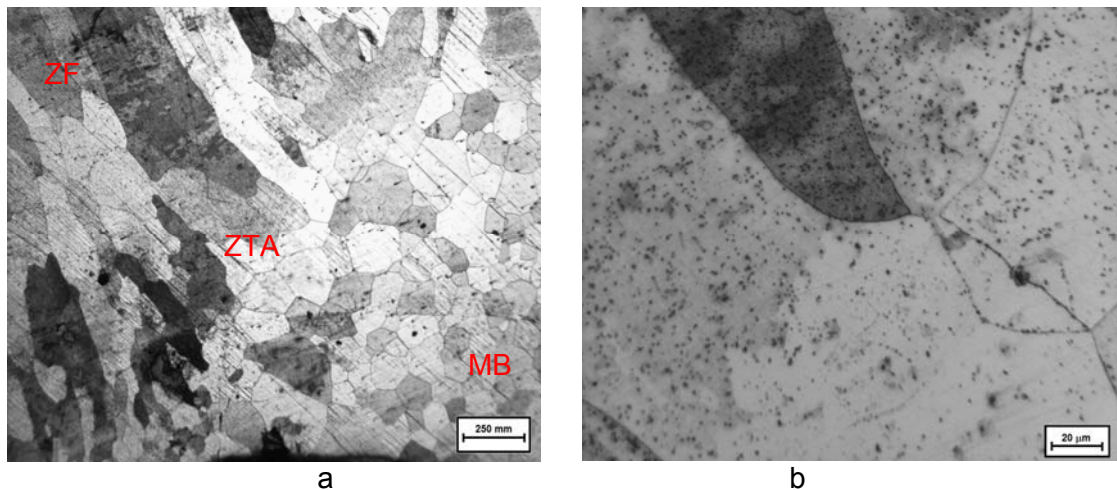


Figura 5.6. Microestrutura da zona termicamente afetada do corpo de prova soldado no metal de base AISI 441 com o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> e metal de adição ER430LNb (a) 100 vezes da aumento; (a) 500 vezes da aumento

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

rendimento térmico de 252 KJ (105 A e 20V), condições muito similares as utilizadas neste trabalho. Ao se compara estes valores com os dos metais de base, que possuem um tamanho de grão médio de aproximadamente 20  $\mu\text{m}$ , observa-se um aumento significativo do tamanho de grão da zona termicamente afetada

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

Metal de base	Gás de Proteção	Tamanho de grão [ $\mu\text{m}$ ]		
		ER308LSi	ER430Ti	ER430LNb
UNS 43932	Ar	154,3	169,4	160,2
	Ar+2%O <sub>2</sub>	158,2	156,2	148,9
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	160,2	156,2	174,6
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	152,4	167,0	148,9
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	154,3	158,2	158,2
AISI 441	Ar	148,1	163,5	160,2
	Ar+2%O <sub>2</sub>	148,9	158,2	156,2
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	154,3	156,2	158,2
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	167,0	156,2	158,2
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	169,4	160,2	169,4

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

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

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

A Tabela 5.3 apresenta as médias e desvios padrões da microdureza realizadas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada para os metais de base UNS 43932 e AISI 441, da mesma forma foram realizadas cinco medições e descartados o maior e o menor

valor encontrados. Os valores com todas as medições de microdureza são apresentadas nas Tabelas B.1 e B.2, anexo B.

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

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

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

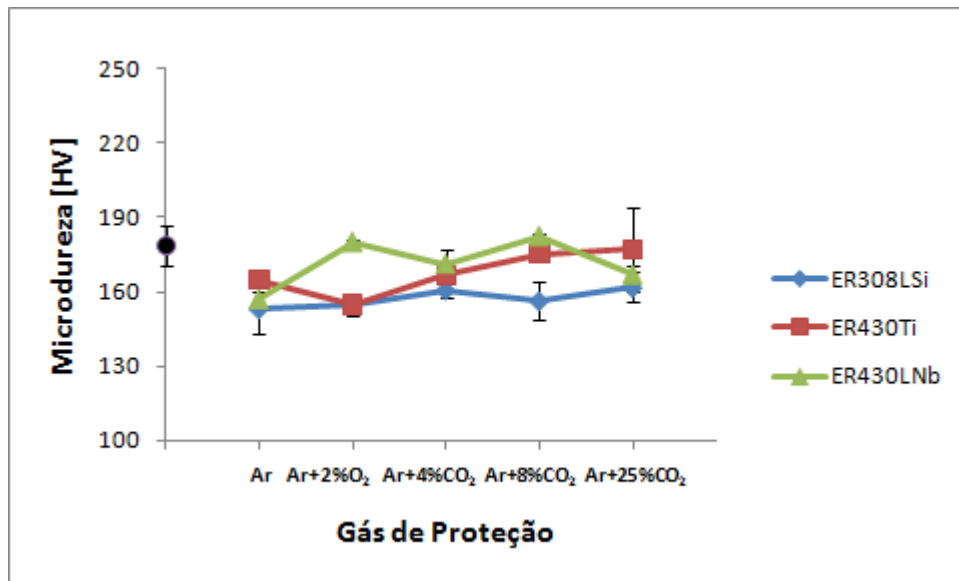


Figura 5.7. Gráfico dos valores de microdureza medidos na matriz ferrítica em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb no metal de base UNS 43932

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

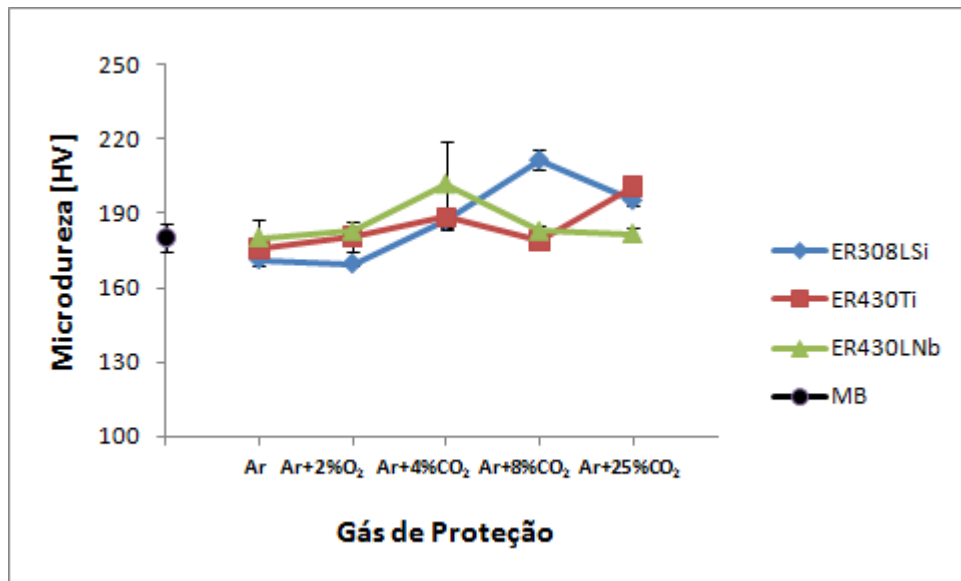


Figura 5.8. Gráfico dos valores de microdureza medidos na matriz ferrítica em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb no metal de base AISI 441

De um modo geral os valores de microdureza medidos na ZTA no metal de base UNS 43932 tiveram valores menores que os observados no metal de base AISI 441, provavelmente relacionadas as maiores quantidades de precipitados observadas nas Figuras 5.4 a 5.7. Os valores encontrados de microdureza, de forma geral, ficaram muito próximos aos encontrados por Madeira (2007), que fez a medida de microdureza na ZTA do metal de base UNS43932, ficando entre 160 e 180 HV.

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

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





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

As Figuras 5.10 a 5.14 apresentam a microestrutura com aumento de 630 vezes dos corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER308LSi, respectivamente para os gases de proteção Ar, Ar+2%O<sub>2</sub>, Ar+4%CO<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>. Serão apresentadas neste Capítulo somente as microestruturas dos cordões de solda realizados no metal de base UNS 43932, pois não ocorreram mudanças significativas das microestruturas com a alteração do metal de base para o AISI 441, que podem ser observadas nas Figuras B.1 a B5, Anexo B.

Analisando-se as Figuras 5.10 a 5.14 observa-se uma matriz austenítica com veios de ferrita (ferrita em espinha ou vermicular) para todas as condições de soldagem, independentemente do gás de proteção e do metal de base utilizados.

Conforme as estimativas realizadas pelo diagrama de Schaeffler, apresentada na Figura 4.19, Capítulo IV, para o metal de base UNS 43932, esperava-se uma microestrutura composta por austenita e ferrita, comprovando o que é visto nas figuras 5.10 a 5.14. As diferenças microestruturais comparando-se com as análises realizadas com o diagrama de Schaeffler (Figura 4.22, Capítulo IV,) para o metal de base AISI 441, que indica a presença de ferrita, austenita e martensita, está relacionada provavelmente a não ser ter levado em consideração o efeito do nitrogênio, que é um forte formador de austenita e também não leva em conta a presença de Ti.

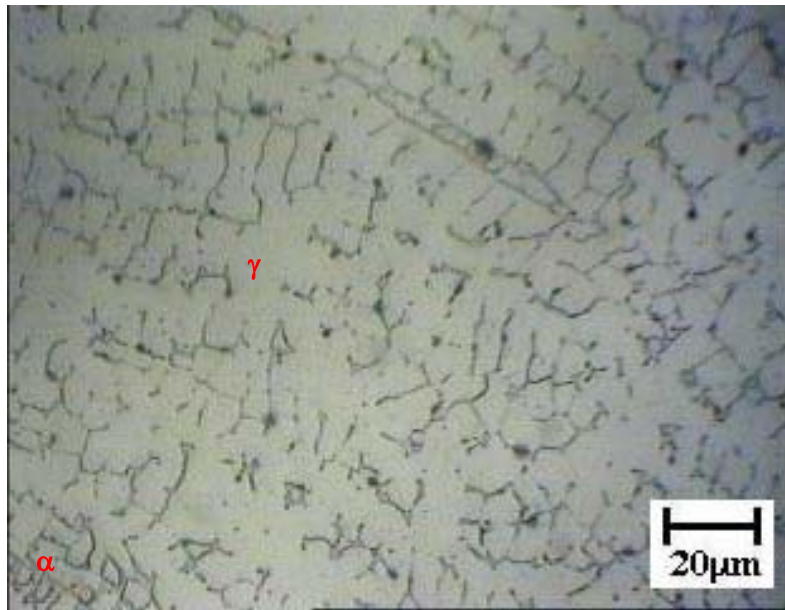


Figura 5.10. Matriz austenítica ( $\gamma$ ) com lamelas de ferrita ( $\alpha$ ) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar

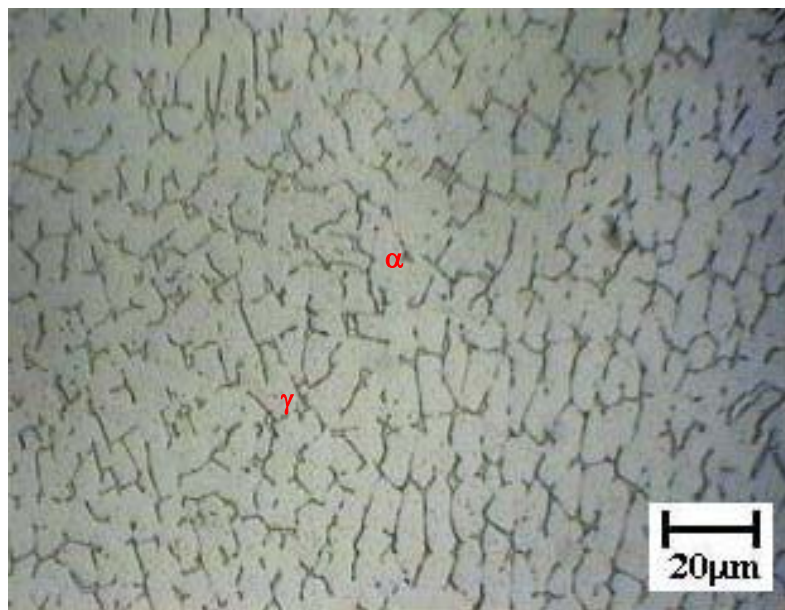


Figura 5.11. Matriz austenítica ( $\gamma$ ) com lamelas de ferrita ( $\alpha$ ) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>

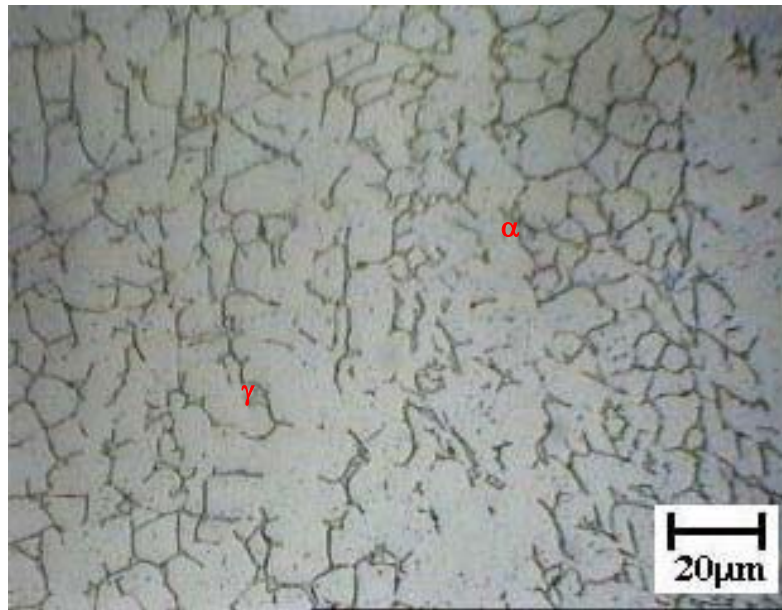


Figura 5.12. Matriz austenítica ( $\gamma$ ) com lamelas de ferrita ( $\alpha$ ) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+4%CO<sub>2</sub>

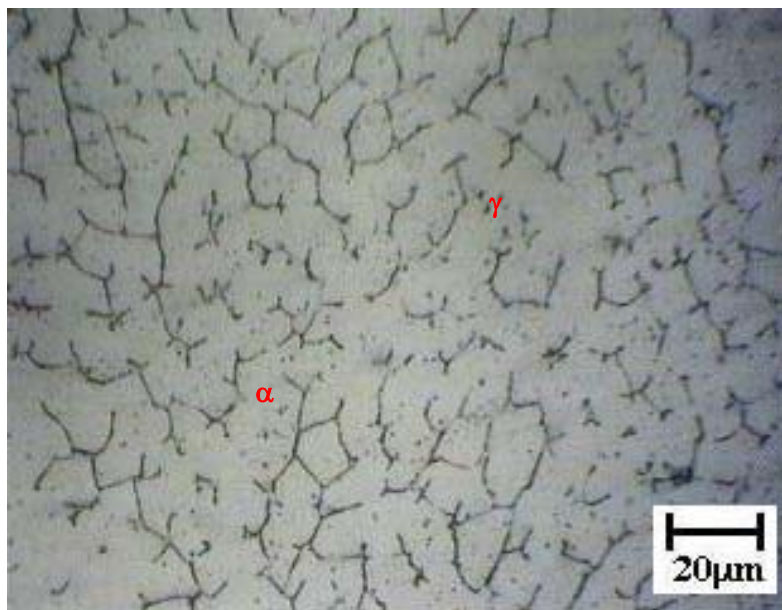


Figura 5.13. Matriz austenítica ( $\gamma$ ) com lamelas de ferrita ( $\alpha$ ) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub>

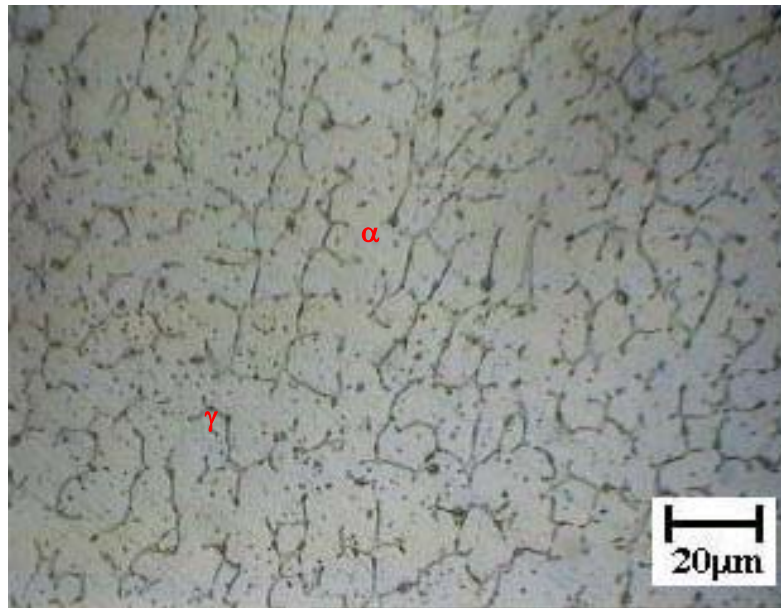


Figura 5.14. Matriz austenítica ( $\gamma$ ) com lamelas de ferrita ( $\alpha$ ) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub>

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

Tabela 5.4. Medições da porcentagem de ferrita na matriz austenítica para os corpos de prova soldados nos metais de base UNS 43932 e AISI 441 com o metal de adição ER308LSi

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

A Figura 5.15 apresenta o gráfico da porcentagem de ferrita em função do gás de proteção. É possível afirmar que em valores médios tem-se uma queda da quantidade da fase ferrita em relação à austenita com o acréscimo de dióxido de carbono no gás de proteção, que provavelmente está relacionada ao aumento de carbono (elemento gamagênico) introduzido à zona fundida como citado anteriormente. Liao; Chen (1998) comentam que o aumento de dióxido de carbono em mistura com o gás de proteção acrescenta-se carbono na zona fundida.

Comparando com os valores encontrados no diagrama de Schaeffler, que ficou em torno de 13,6% de ferrita para o metal de base UNS 43932 e em torno de 16,4% de ferrita para o metal de base AISI 441, ficando próximo ao encontrado na Tabela 5.5.

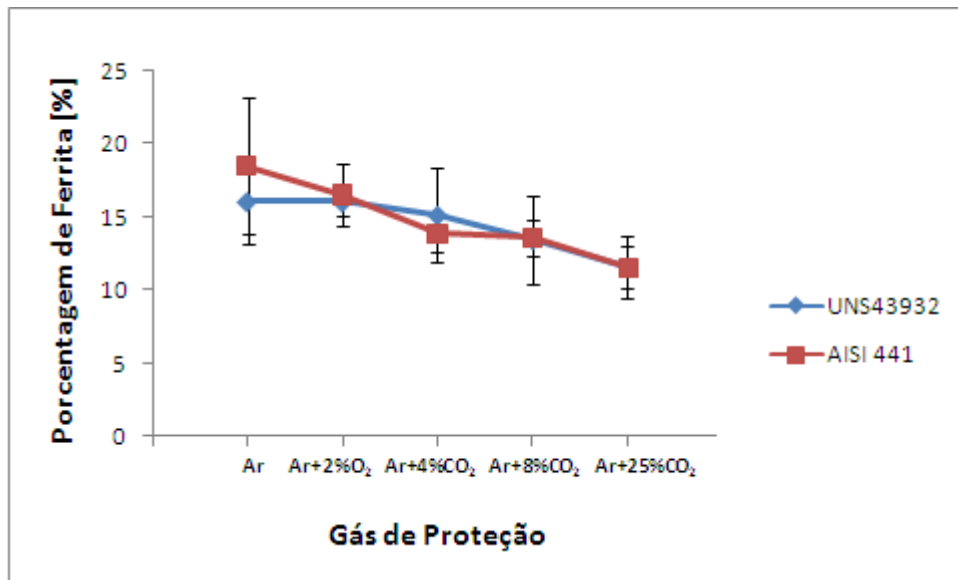


Figura 5.15. Gráfico da porcentagem de ferrita nos corpos de prova soldados com os metais de adição ER308LSi em função do gás de proteção utilizado

As Figuras 5.16 a 5.20 apresentam a microestrutura com aumento de 630 vezes dos corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER430Ti, respectivamente para os gases de proteção Ar, Ar+2%O<sub>2</sub>, Ar+4%CO<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>. Também serão apresentadas somente as microestruturas dos cordões de solda realizados no metal de base UNS 43932 por não ocorrerem mudanças significativas das microestruturas com a alteração do metal de base para o AISI 441, sendo estas microestruturas apresentadas nas Figuras B.6 a B.10, Anexo B.

Analisando-se as Figuras 5.16 a 5.19 observa-se uma matriz ferrítica com precipitados de titânio em todo o grão, conforme confirmado por microscópio eletrônico de varredura por Madeira (2007). Apesar de não ter sido medido, observa-se ainda um aumento da quantidade de precipitados em todo o grão, mas principalmente no contorno de grão, com o aumento da quantidade de dióxido de carbono no gás de proteção. Este

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

Conforme as estimativas realizadas pelo diagrama de Schaeffler nas Figuras 4.20 e 4.23 tanto para os corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932, quanto para os soldados no AISI 441 esperava-se uma microestrutura composta por ferrita e martensita. Entretanto, este fato não foi observado com a soldagem com gás de proteção até 8% de dióxido de carbono. Isto mostra que o titânio foi eficiente como elemento estabilizador.

Analisando a Figura 5.20, quando se utilizou Ar+25%CO<sub>2</sub> como gás de proteção com o metal de adição ER430Ti, além da matriz ferrítica e dos precipitados há a presença de martensita de contorno de grão, conforme expectativa apresentada pelo diagrama de Schaeffler (Figuras 4.20 e 4.23 do Capítulo 4). Esta presença ocorreu provavelmente devido a estabilização inadequada do arame ER430Ti, deixando carbono livre no metal soldado, que a altas temperaturas contribuiu para a precipitação da austenita e ao resfriar transformou-se em martensita.

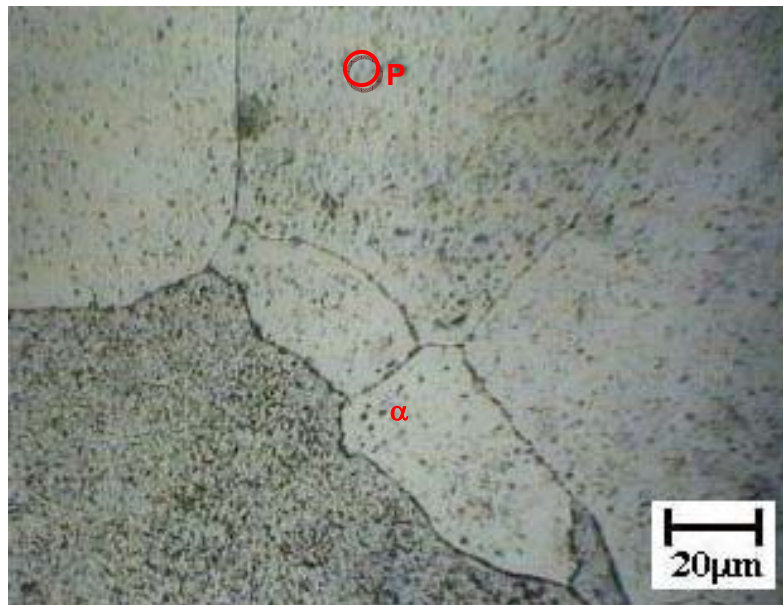


Figura 5.16. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de titânio (P) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar

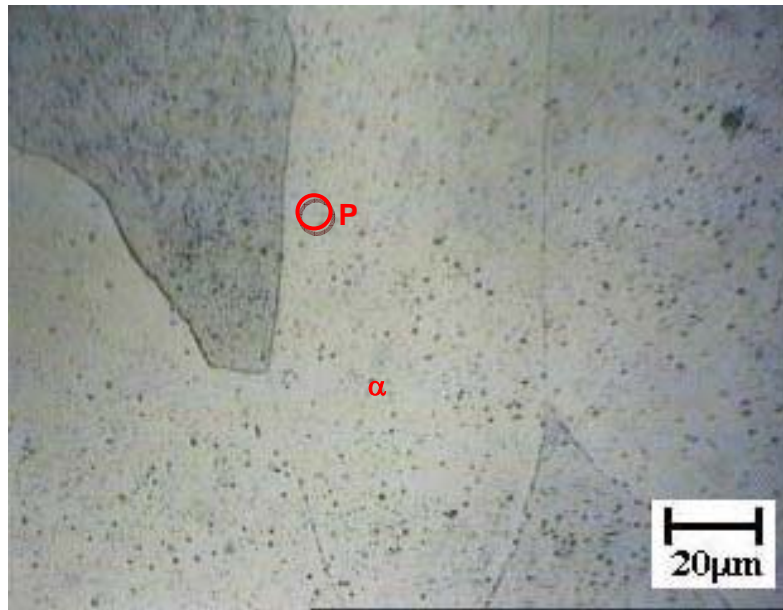


Figura 5.17. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de titânio (P) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>

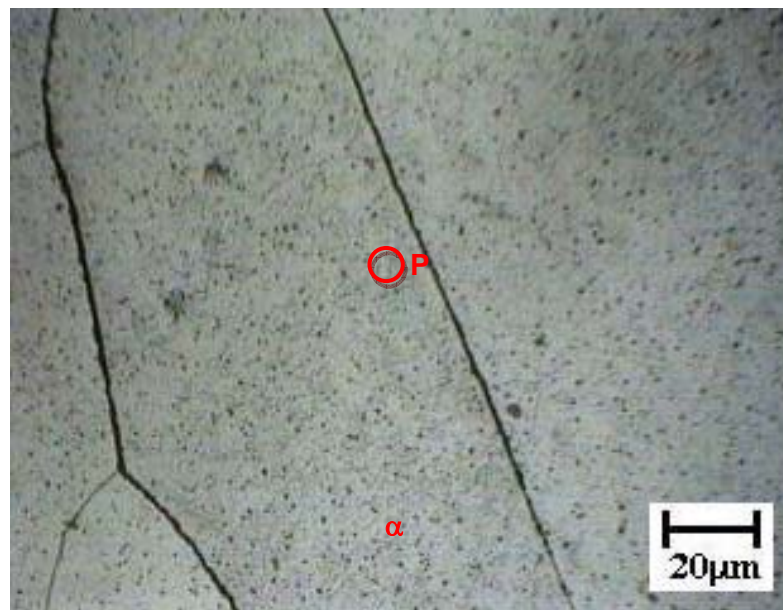


Figura 5.18. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de titânio (P) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+4%CO<sub>2</sub>

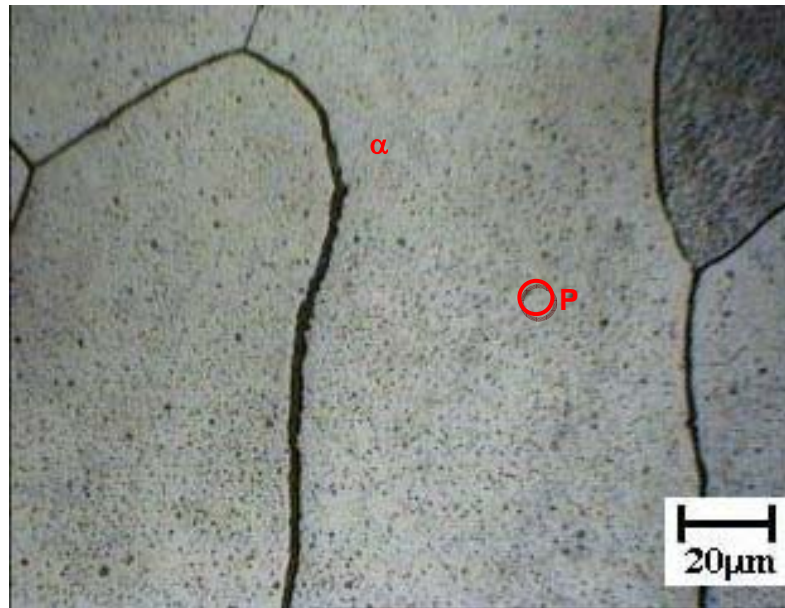


Figura 5.19. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de titânio (P) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub>

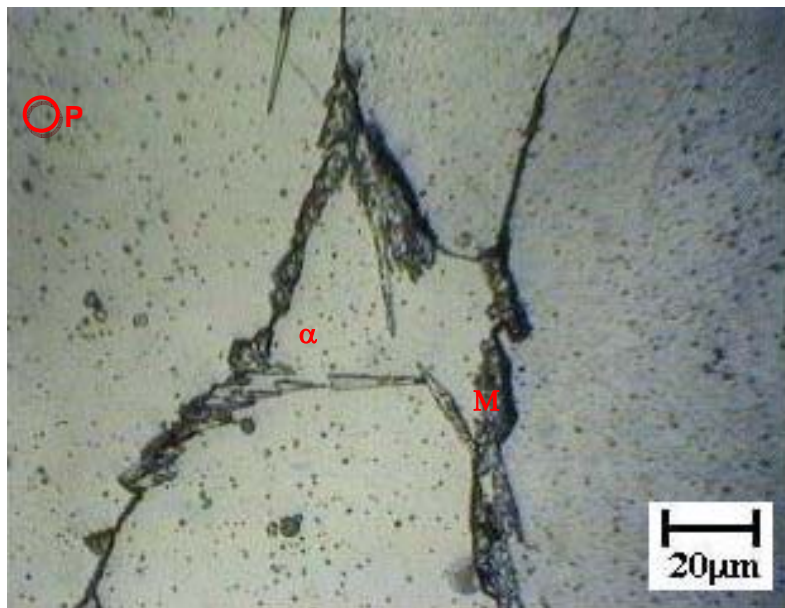


Figura 5.20. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de titânio (P) e martensita de contorno de grão (M) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub>

As Figuras 5.21 a 5.25 apresentam a microestrutura com aumento de 630 vezes dos corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER430LNb, respectivamente para os gases de proteção Ar, Ar+2%O<sub>2</sub>, Ar+4%CO<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>. Também serão apresentadas somente as microestruturas dos cordões de solda realizados no metal de base UNS 43932, as microestruturas com o metal de base para o AISI 441 são apresentadas nas Figuras B.11 a B.15, Anexo B.



Analisando-se as Figuras 5.21 a 5.25 observa-se uma matriz ferrítica com precipitados, provavelmente de nióbio, em todo o grão. Apesar de não ter sido medido, observa-se ainda um aumento da quantidade destes precipitados, porém, em menor quantidade quando comparado com os cordões de solda realizados com o metal de adição ER430Ti. Este aumento da quantidade de precipitados, provavelmente está relacionada ao aumento de dióxido de carbono que, conforme já mencionado, aumenta a quantidade de carbono introduzido no metal soldado. Não houve presença de martensita com o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub>, uma vez que o metal de adição utilizado possui uma adequada estabilização ao nióbio.

Pelas estimativas realizadas pelo diagrama de Schaeffler nas Figuras 4.21 e 4.24 tanto para os corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932, quanto para os soldados no AISI 441 esperava-se uma microestrutura composta somente por ferrita, confirmada pelas figuras 5.21 a 5.25.

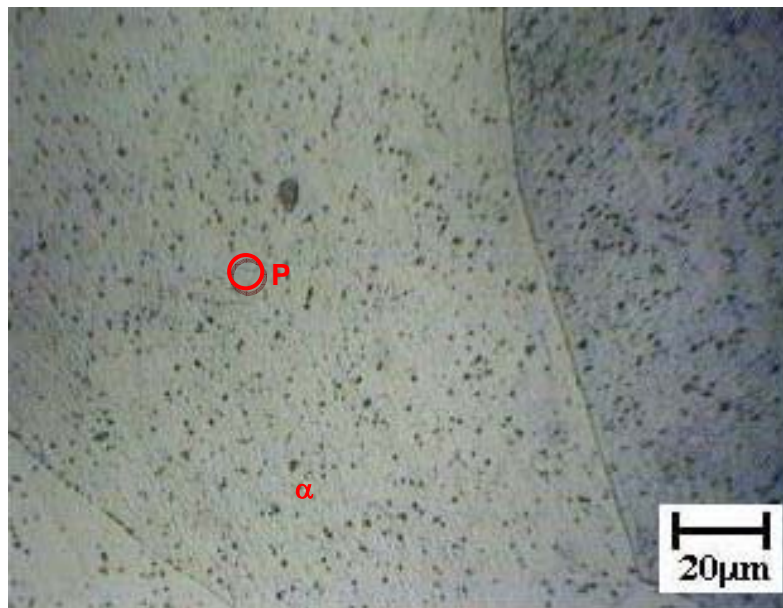


Figura 5.21. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de nióbio (P) zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar



Figura 5.22. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de nióbio (P) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>



Figura 5.23. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de nióbio (P) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+4%CO<sub>2</sub>

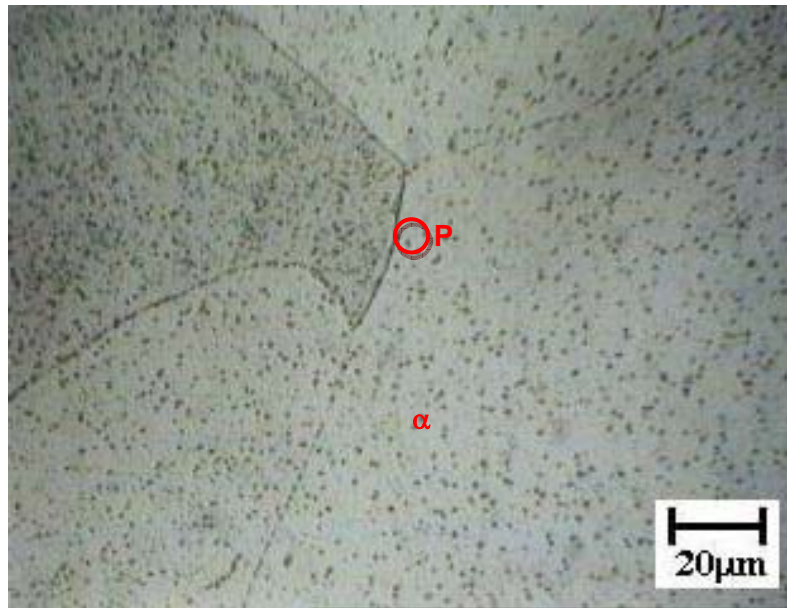


Figura 5.24. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de nióbio (P) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub>

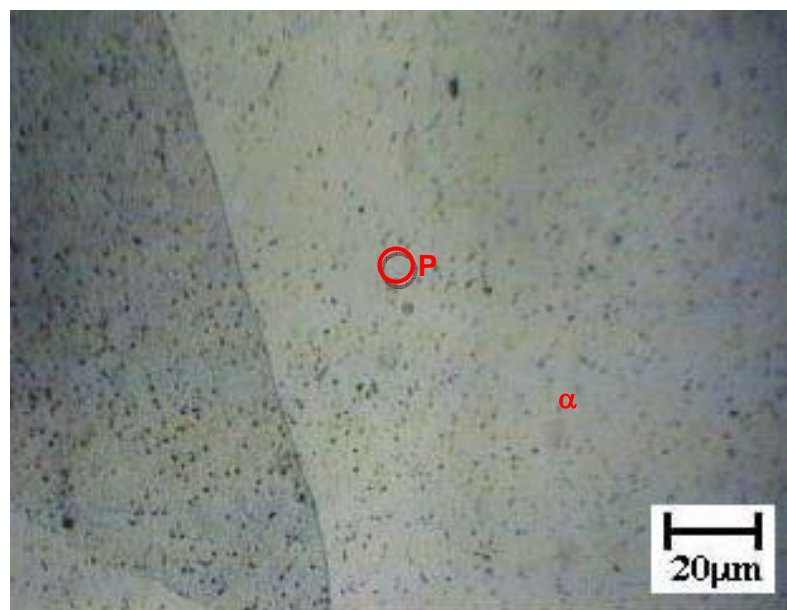


Figura 5.25. Matriz ferrítica ( $\alpha$ ) com precipitados de nióbio (P) da zona fundida do corpo de prova de metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub>

A Tabela 5.5 apresenta as medições do tamanho de grão realizadas na zona fundida dos corpos de prova soldados com os metais de adição ER430Ti e ER430LNb nos metais de base UNS43932 e AISI441. Todas as medições de tamanho de grão são apresentadas nas Tabelas B.3 e B.4, Anexo B.

As Figuras 5.26 e 5.27 apresentam os gráficos do tamanho de grão em função do gás de proteção para os corpos de prova soldados. Observa-se para os dois materiais de base

estudados que não houve uma variação significativa do tamanho de grão, com exceção do metal de adição ER430Ti soldado com argônio, que teve um tamanho menor que as demais condições estudadas.

Madeira (2007) para a soldagem com os metais de adição ER430Ti e ER430LNb e gases de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> e Ar+2%N<sub>2</sub>+3%CO<sub>2</sub> observou maiores tamanhos de grãos e maiores quantidades de precipitados para este último gás, principalmente para o metal de adição ER430Ti, similarmente ao que foi observado neste trabalho devido ao aumento de elementos intersticiais (carbono e nitrogênio).

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

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

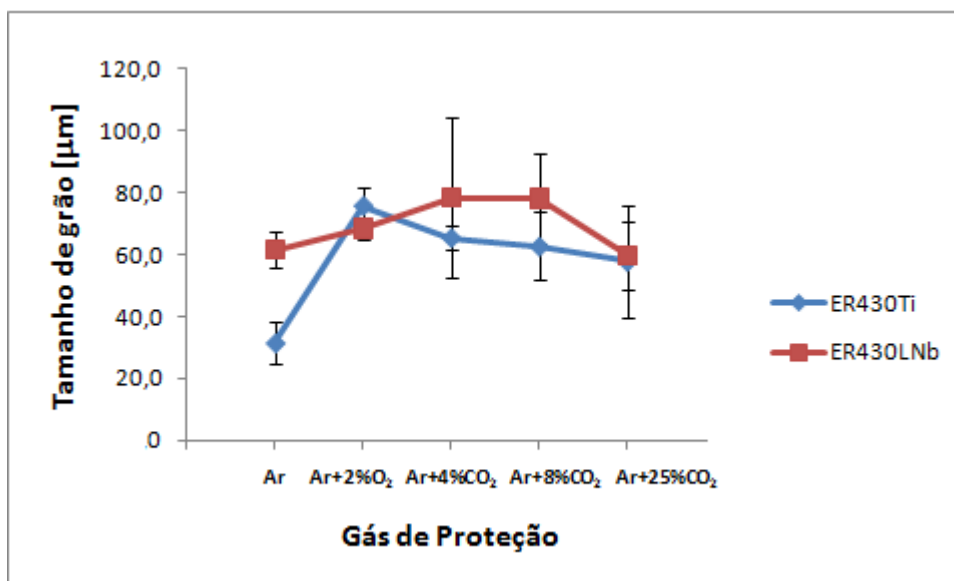


Figura 5.26. Gráfico do tamanho de grão em função do gás de proteção para os corpos de prova soldados com os metais de adição ER430Ti e ER430LNb no metal de base UNS 43932

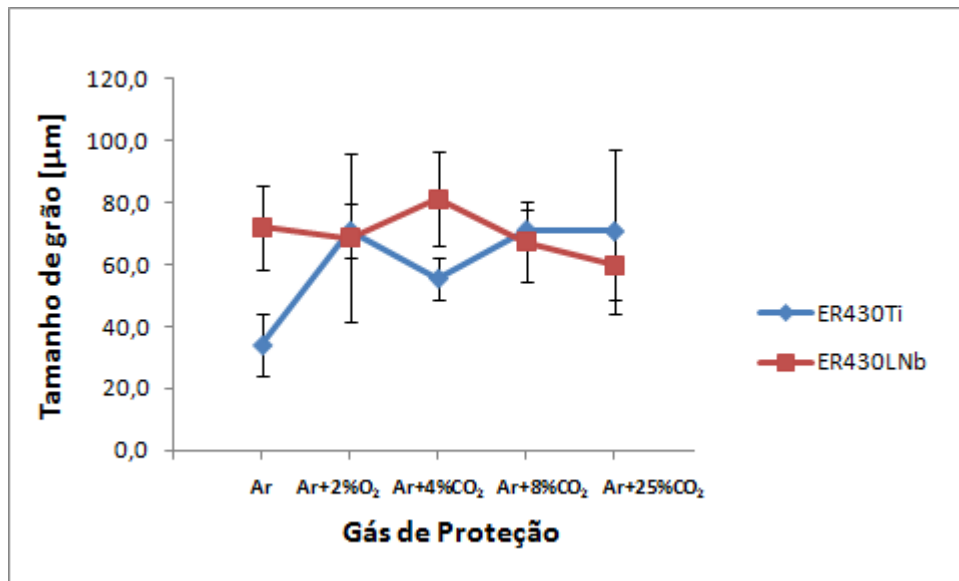


Figura 5.27. Gráfico do tamanho de grão em função do gás de proteção para os corpos de prova soldados com os metais de adição ER430Ti e ER430LNb no metal de base AISI 441

A Tabela 5.6 apresenta as medidas de microdureza realizadas na matriz austenítica (para o metal de adição ER308LSi) e ferrítica (para os metais de adição ER430Ti e ER430LNb) da zona fundida dos metais de base UNS 43932 e AISI 441.

Tabela 5.6. 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

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

A Tabela 5.7 apresenta as medidas de microdureza realizadas na martensita da zona fundida para os metais de base UNS 43932 e AISI 441 soldados com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub>.

Tabela 5.7. Medidas de Microdureza realizadas na martensita da zona fundida para os metais de base UNS43932 e AISI441

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

As Figuras 5.28, 5.29 e 5.30 apresentam os gráficos dos valores de microdureza medidos na matriz austenítica, ou ferrítica e martensita (quando presente) em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados respectivamente com os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb no metal de base UNS 43932.

Analisando as Figuras 5.28 e 5.30 observa-se que os valores de microdureza realizados na matriz ferrítica dos corpos de prova soldados com os metais de adição ER308LSi e ER430LNb ficaram muito próximos dos valores encontrados na matriz ferrítica do metal de base UNS 43932. Observa-se ainda que não há variação significativa das medidas de microdureza com a alteração do gás de proteção.

Na Figura 5.29 observa-se que os valores de microdureza realizados na matriz ferrítica dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti e os gases de proteção Ar e Ar+2%O<sub>2</sub> ficaram muito próximos dos valores encontrados na matriz ferrítica do metal de base UNS 43932. Observa-se ainda que com o acréscimo de dióxido de carbono no gás de proteção há um aumento significativo das medidas de microdureza, que ocorreram provavelmente devido ao aumento da quantidade de precipitados de titânio, conforme se observou nas Figuras 5.16 a 5.20. Quando se utilizou o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> observa-se a presença de martensita, que é evidenciada por um elevado valor de microdureza.

Cardoso (2003) observou para a soldagem do aço inoxidável uma dureza elevada quando soldado com Ar+8%CO<sub>2</sub>, próxima de 350HV, valor este que seria suficiente para reduzir a tenacidade do material. Estes valores são similares aos encontrados para a martensita quando se soldou com o metal de adição ER430Ti, esperando-se portanto, uma queda na tenacidade destas soldas.

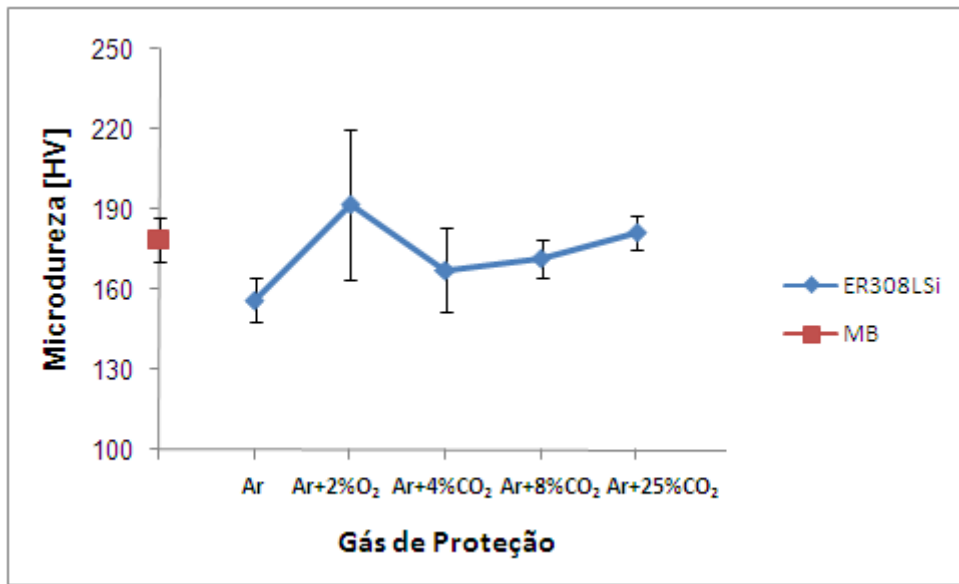


Figura 5.28. Gráfico dos valores de microdureza medidos na matriz austenítica em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi no metal de base UNS 43932

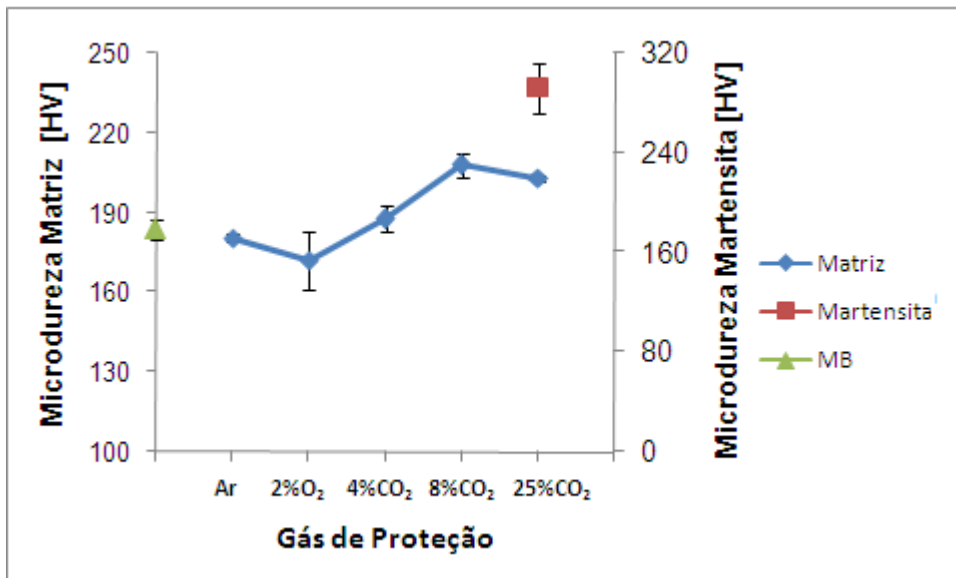


Figura 5.29. Gráfico dos valores de microdureza medidos na matriz ferrítica e na martensita em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti no metal de base UNS 43932

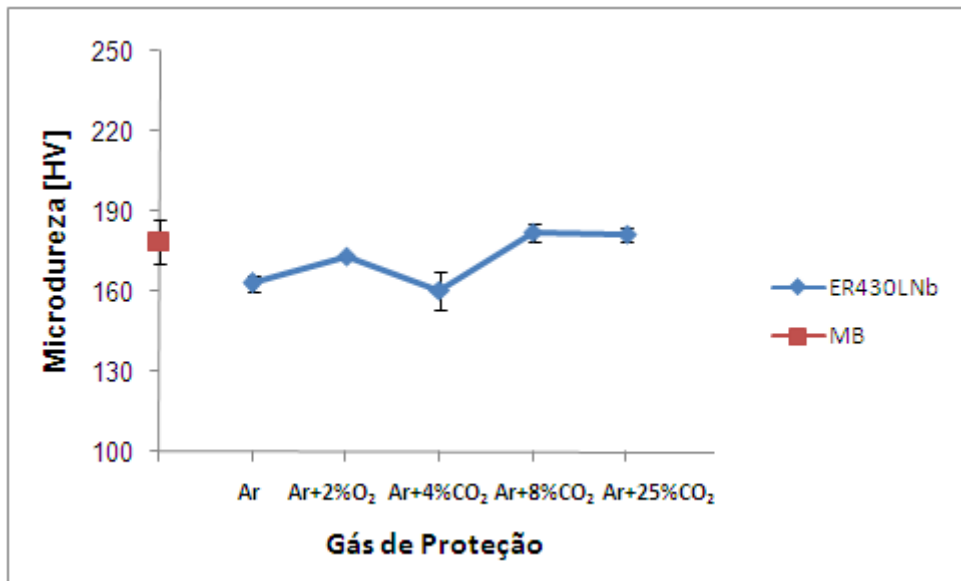


Figura 5.30. Gráfico dos valores de microdureza medidos na matriz austenítica em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932

As Figuras 5.31, 5.32 e 5.33 apresentam os gráficos dos valores de microdureza medidos na matriz austenítica, ou ferrítica e martensita (quando presente) em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados respectivamente com os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb no metal de base AISI 441.

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



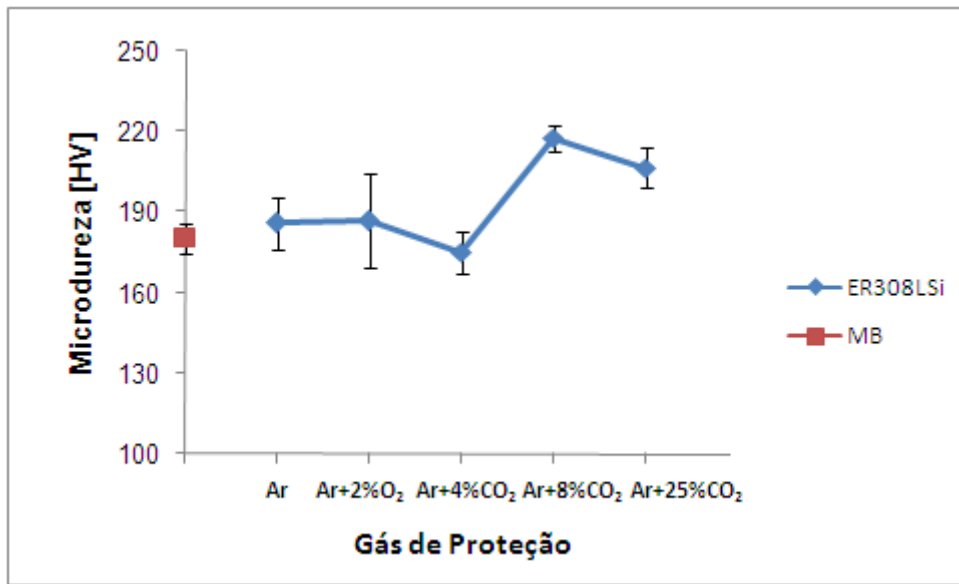


Figura 5.31. Gráfico dos valores de microdureza medidos na matriz austenítica em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi no metal de base AISI 441

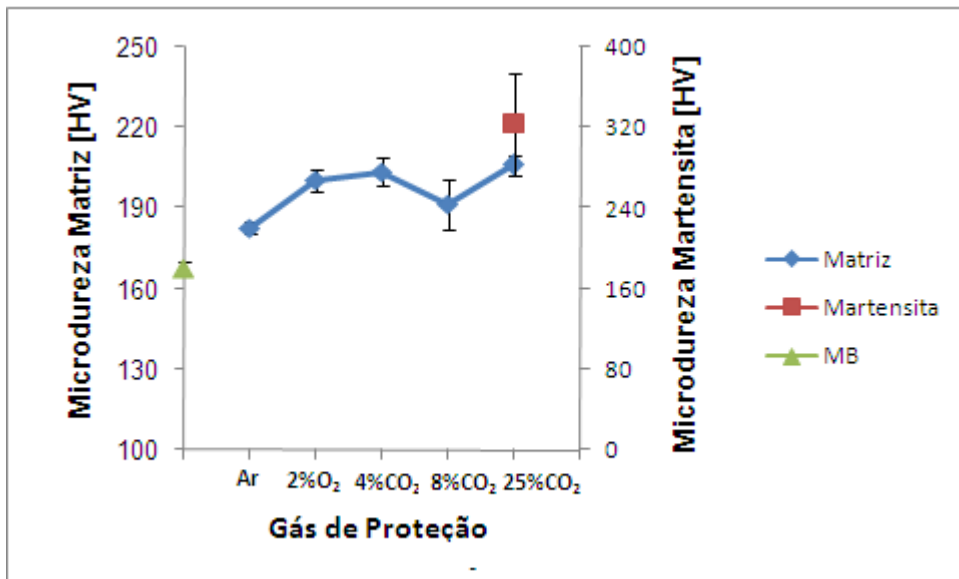


Figura 5.32. Gráfico dos valores de microdureza medidos na matriz ferrítica e na martensita em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti no metal de base AISI 441

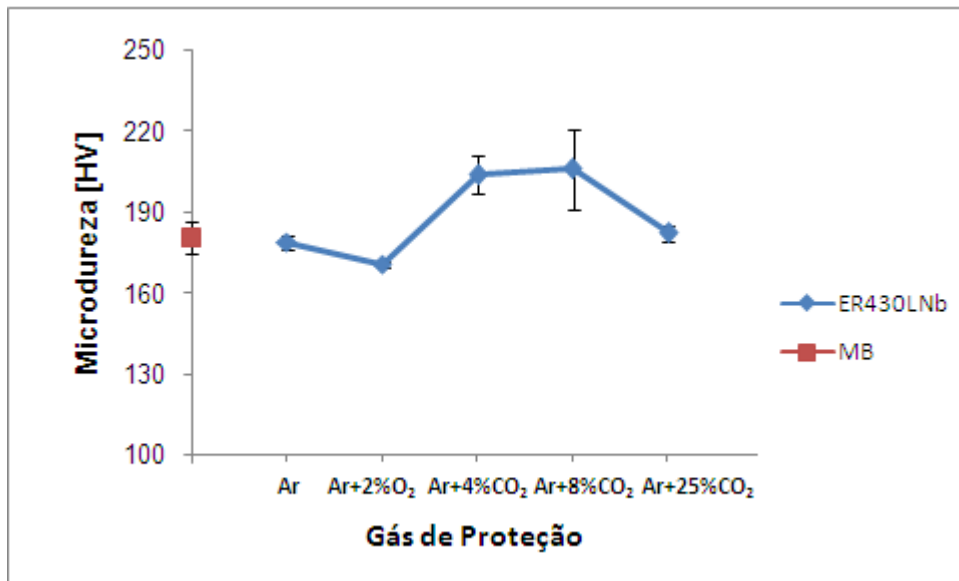


Figura 5.33. Gráfico dos valores de microdureza medidos na matriz ferrítica em função do gás de proteção utilizado para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441

### 5.3. Conclusão parcial do Capítulo

Como conclusões parciais deste Capítulo pode-se afirmar que:

- Não ocorreram variações significativas na zona termicamente afetada em termos de microestrutura, tamanho de grão e microdureza independentemente do gás de proteção e metal de adição utilizados.
- Na zona fundida para o metal de adição ER308LSi observou-se uma diminuição da porcentagem de ferrita com o acréscimo de dióxido de carbono no gás de proteção.
- Para o ER430LNb não ocorreram modificações significativas em termos microestruturais independentemente do gás de proteção utilizado. Foi observado um aumento de microdureza com o acréscimo do teor de dióxido de carbono.
- Para o metal de adição ER430Ti não ocorreram modificações significativas em termos microestruturais para o gás de proteção com dióxido de carbono até 8 %. Foi observado um aumento de microdureza com o acréscimo do teor de dióxido de carbono.
- Com 25% de dióxido de carbono no metal de adição ER430Ti ocorreu a formação de martensita com altos valores de microdureza.

# CAPÍTULO VI

## ENSAIOS MECÂNICOS

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, 4.9 e 4.16.

### 6.1. Ensaio 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 ZAC, mais especificamente na zona de ligação. 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%O<sub>2</sub> e Ar+4%CO<sub>2</sub>. 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 ZAC dos corpos de prova ensaiados. Estas falhas ocorreram devido à falta de fusão lateral, 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 a falta de fusão pré-existente na solda, que serviram de concentrador de tensão, este fato ocorreu em função de possíveis desalinhamentos da tocha de soldagem com o centro da junta soldada.

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

Meta de Adição	Gás de Proteção	A	B	C
ER308LSi	Ar	o	o	o
	Ar+2%O <sub>2</sub>	x	o	o
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	o	x	o
ER430Ti	Ar	o	o	o
	Ar+2%O <sub>2</sub>	o	o	o
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	o	o	o
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	o	o	o
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	o	o	o
ER430LNb	Ar	o	o	o
	Ar+2%O <sub>2</sub>	o	o	o
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	o	o	o
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	o	o	x
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	o	o	o

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

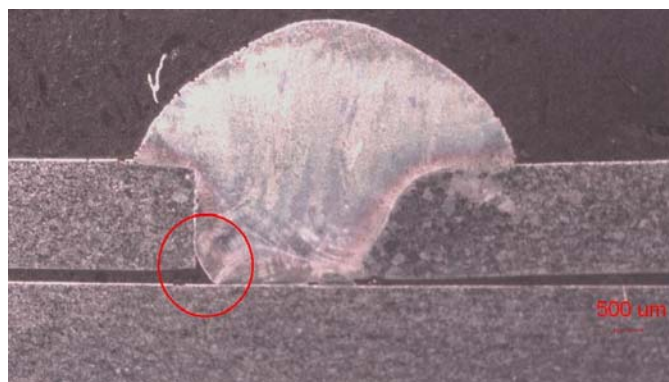


Figura 6.1. Falta de fusão lateral no corpo de prova de metal de base UNS 43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>

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	o	o	o
	Ar+2%O <sub>2</sub>	o	o	o
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	o	o	o
ER430Ti	Ar	o	o	o
	Ar+2%O <sub>2</sub>	o	o	o
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	o	o	o
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	o	o	o
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	o	o	o
ER430LNb	Ar	o	o	o
	Ar+2%O <sub>2</sub>	o	o	o
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	o	o	x
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	x	o	o
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	o	o	o

Onde: o 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 do cordão de solda.



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



Figura 6.3. Ensaio de tração onde o rompimento ocorreu na junta soldada (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%O<sub>2</sub> 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. Este diminuição na resistência a tração foi estudada por Bom; Kalnin (2008) que determinaram que falhas na região soldada, são diretamente proporcionais a diminuição da tensão de ruptura de corpos de provas transversalmente soldados.

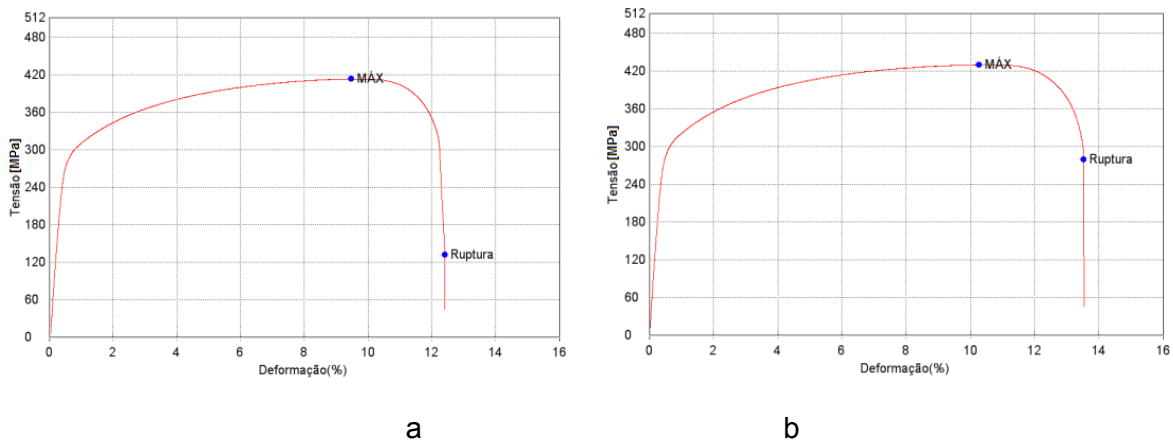


Figura 6.4. Gráfico da tensão em função da deformação para o ensaio de tração do metal de base (a) UNS 43932, (b) AISI441 soldado com o metal de adição ER308LSi e Ar+2%O<sub>2</sub> que teve fratura no metal de base

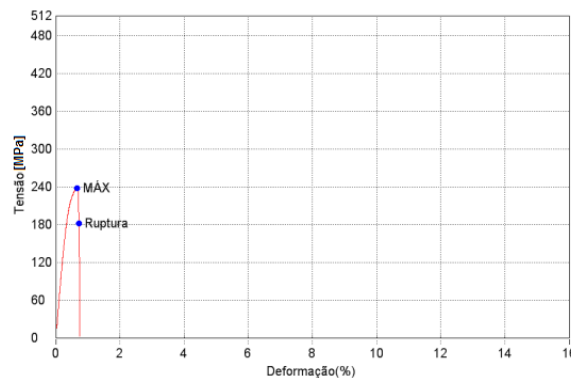


Figura 6.5. Gráfico da tensão em função da deformação para o ensaio de tração do metal de base UNS 43932, soldado com o metal de adição ER308LSi e Ar+2%O<sub>2</sub> que houve fratura na junta soldada (zona de ligação)

A Tabela 6.3 apresenta o limite de resistência alcançada 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 ensaios de tração realizados nos 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 ensaios de tração realizados nos 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 <sub>2</sub>	417	10	429	8
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	415	1	418	6
ER430Ti	Ar	419	16	414	4
	Ar+2%O <sub>2</sub>	413	13	415	5
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	403	9	423	11
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	414	6	417	5
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	430	8	405	11
ER430LNb	Ar	436	19	401	6
	Ar+2%O <sub>2</sub>	432	4	407	8
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	402	15	422	5
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	418	6	421	4
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	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.

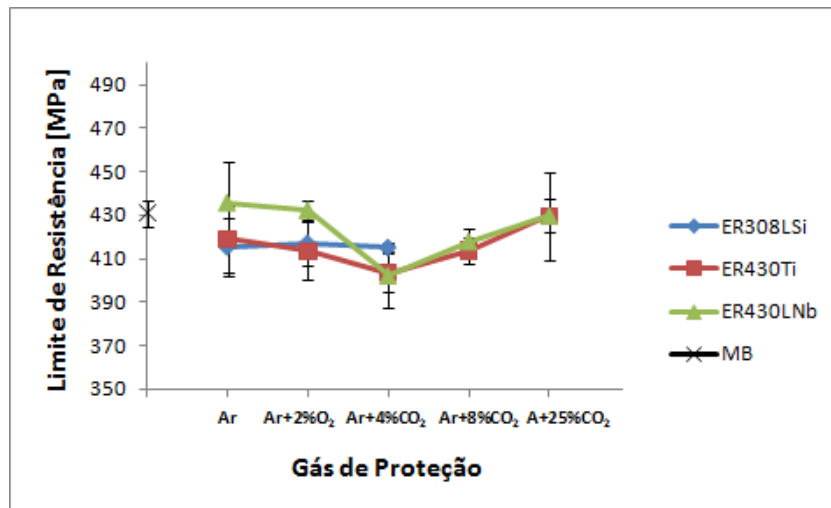


Figura 6.6. Gráfico da tensão máxima em função do gás de proteção para os três metais de adição estudados soldados no metal de base UNS43932

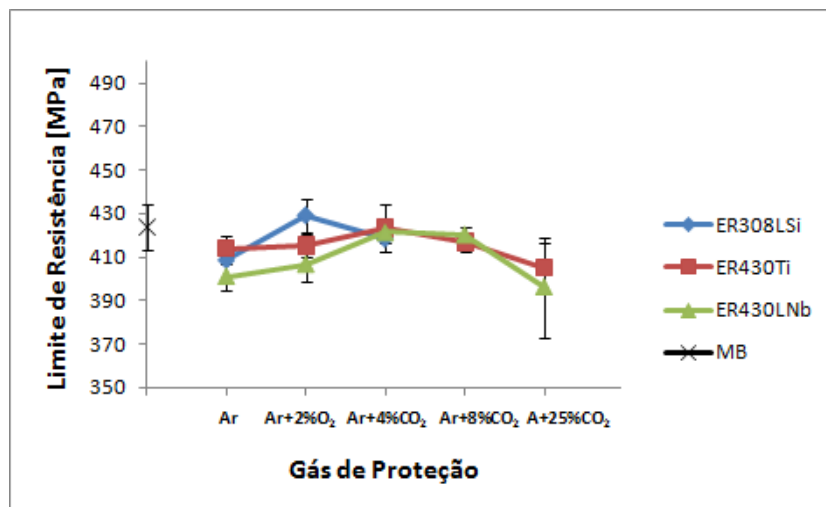


Figura 6.7. Gráfico da tensão máxima em função do gás de proteção para os três metais de adição estudados soldados no metal de base AISI441



## 6.2 Ensaio 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. Para análise será realizado o cálculo de energia e força máxima para realização do dobramento, com o intuito de 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 (ZAC ou ZF) devido a uma possível fragilização dessa região.

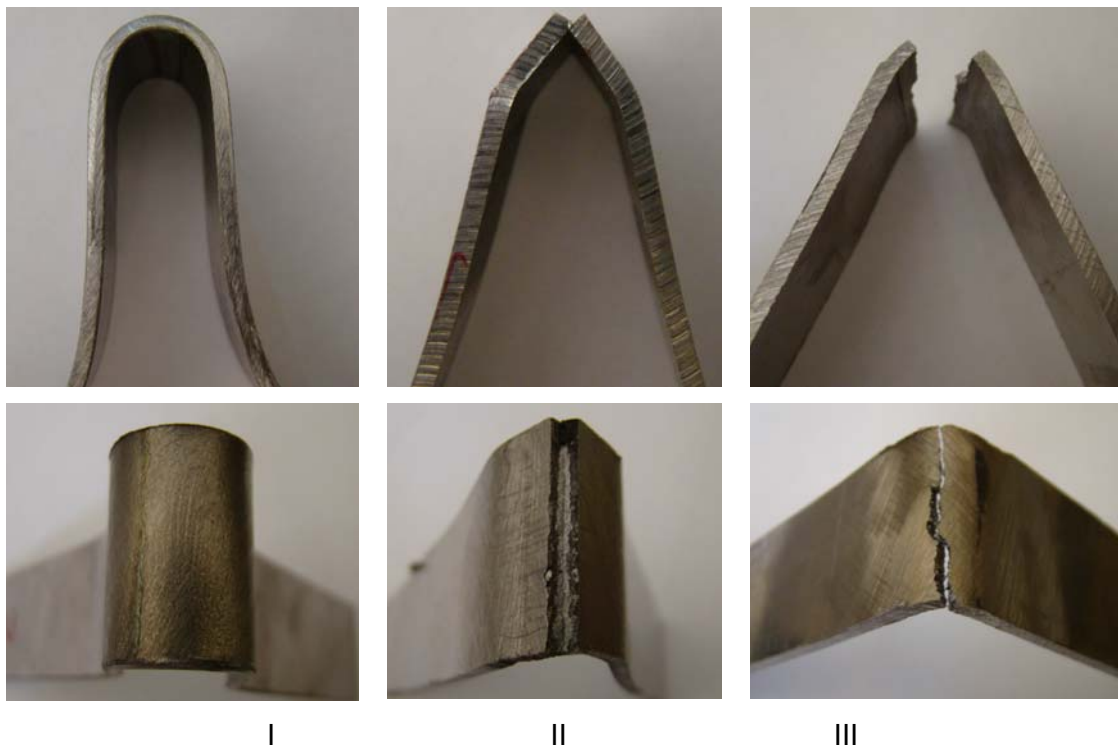


Figura 6.8. Corpo de prova onde (I) não ocorreu trinca ou rompimento no cordão de solda; (II) ocorreu rompimento devido à falha de soldagem (falta de fusão) no cordão de solda; (III) ocorreu rompimento devido à fragilidade do cordão de solda

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%CO<sub>2</sub> 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 pode ser explicada pelo encosto do corpo de prova na aste do cutelo, o que acarreta no aumento da resistência exercida ao dobramento.

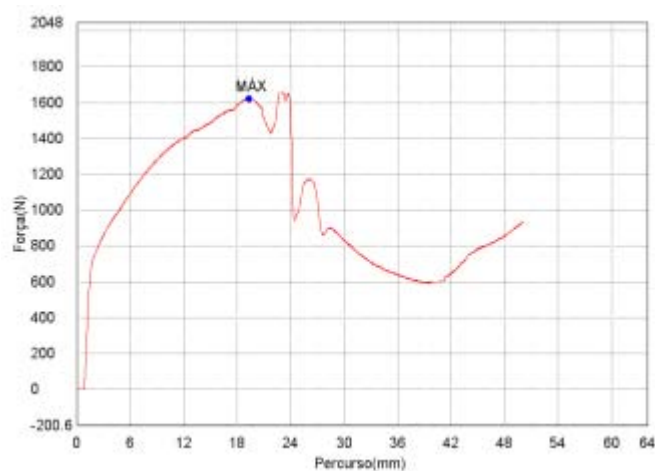


Figura 6.9. Gráfico da força em função do deslocamento do cutelo do ensaio de dobramento do corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb e gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> no metal de base AISI 441

As Tabelas 6.5 e 6.6 apresentam os ensaios de dobramento realizados respectivamente para os corpos de prova soldados transversalmente 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. As letras apresentadas 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. Ensaios 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 <sub>2</sub>	Raiz	II	II	II		
			Face	I	I	I		
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	II	II	II		
			Face	I	I	I		
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	II	II	II		
			Face	I	I	I		
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	II	II	II		
			Face	I	I	I		
		UNS43932	ER430Ti	Ar	Raiz	I	I	I
					Face	I	I	I
Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz			I	I	I		
	Face			I	I	I		
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz			I	I	I		
	Face			I	I	I		
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz			I	I	I		
	Face			I	I	I		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz			III	I	I		
	Face			I	III	III		
UNS43932	ER430LNb	Ar	Raiz	I	I	I		
			Face	I	I	I		
		Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	I	I	I		
			Face	I	I	I		
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	I	I	I		
			Face	I	I	I		
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	II	II	II		
			Face	I	I	I		
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	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%CO<sub>2</sub> 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”. A ocorrência desta fratura na junta soldada está ligada provavelmente a presença da martensita de contorno de grão, que foi observada na Figura 5.20. Esta martensita, que possui alto valor de dureza, provavelmente contribui 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 <sub>2</sub>	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	I	I	II
			Face	I	I	I
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	II	II	II
			Face	I	I	I
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
AISI441	ER430Ti	Ar	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	II
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	II
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	III	III	III
			Face	I	III	I
AISI441	ER430LNb	Ar	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	II	II	II
			Face	II	II	II
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	I	I	I
			Face	I	I	I
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	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.

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 necessária para o dobramento dos metais de base UNS 43932 e AISI 441

Metal de Base	Força Máxima [KN]					Energia [J]				
	A	B	C	Media	Desvio	A	B	C	Media	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 dividido em três etapas, tomando como base 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 (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 <sub>MAX</sub> [KN]		Energia [J]	
			Media	Desvio	Media	Desvio
ER308LSi	Ar	Face	1,79	0,16	24,72	3,61
	Ar+2%O <sub>2</sub>	Face	1,6	0,03	24,38	1,07
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	Face	1,77	0,1	22,22	2,64
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	Face	1,76	0,08	24,92	1,91
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	1,73	0,07	26,32	1,18

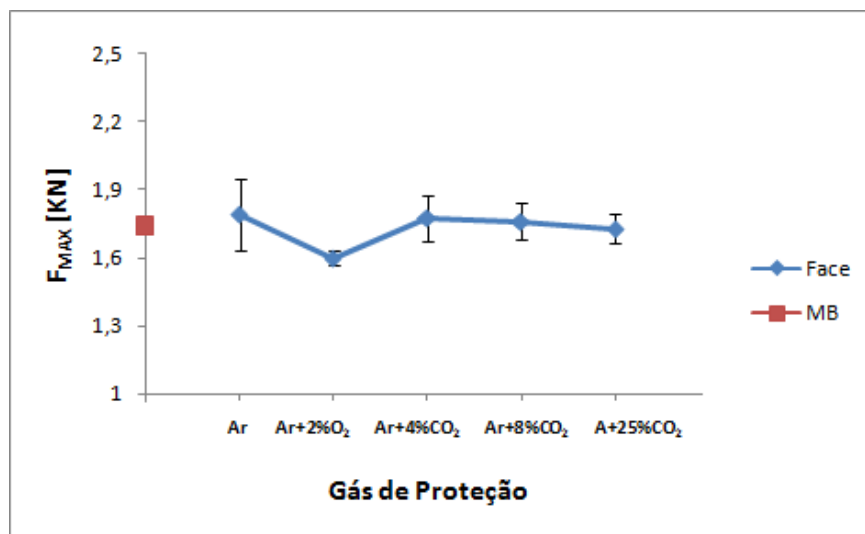


Figura 6.10. Força máxima para realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER308LSi no metal de base UNS43932

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.

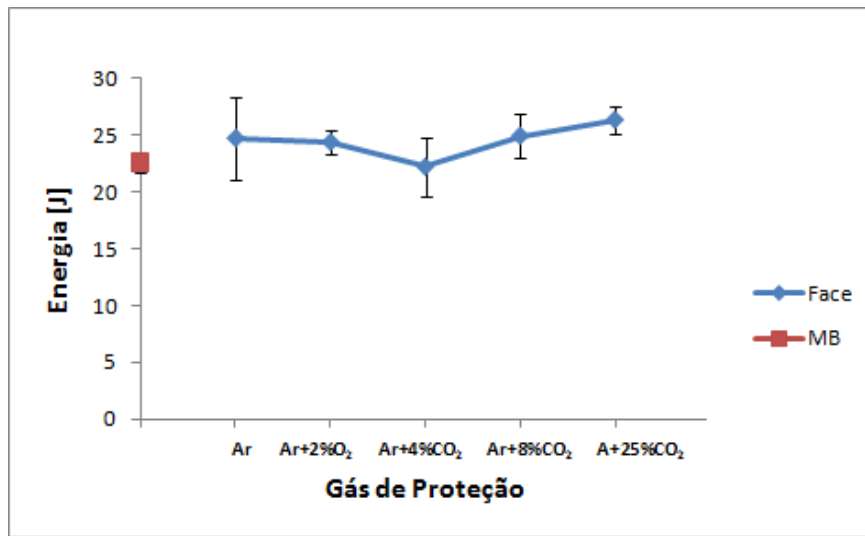


Figura 6.11. Energia total para a realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER308LSi no metal de base UNS43932

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 <sub>MAX</sub> [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 <sub>2</sub>	Raiz	1,84	0,09	23,57	3,4
		Face	1,88	0,02	23,27	2,49
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	1,7	0,31	22,51	1,32
		Face	1,74	0,08	20,03	3,98
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	-	-	-	-
		Face	1,64	0,04	20,85	3,02
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	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.

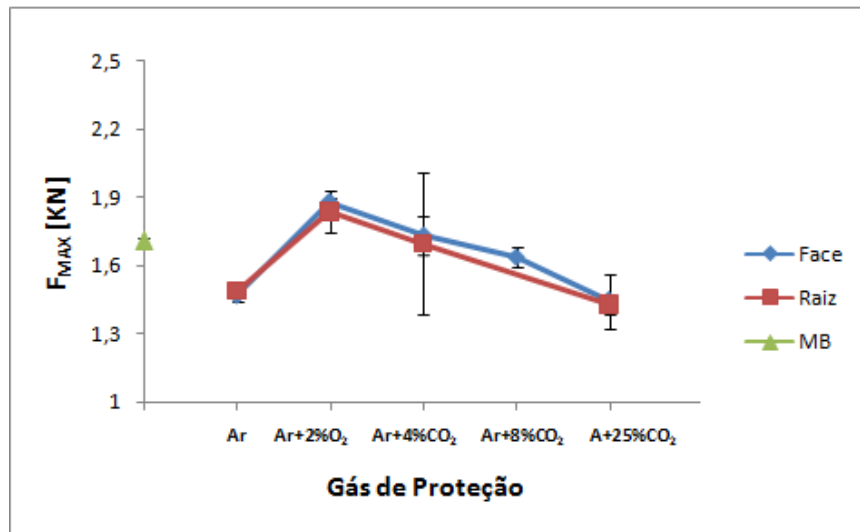


Figura 6.12. Força para realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER308LSi no metal de base AISI441

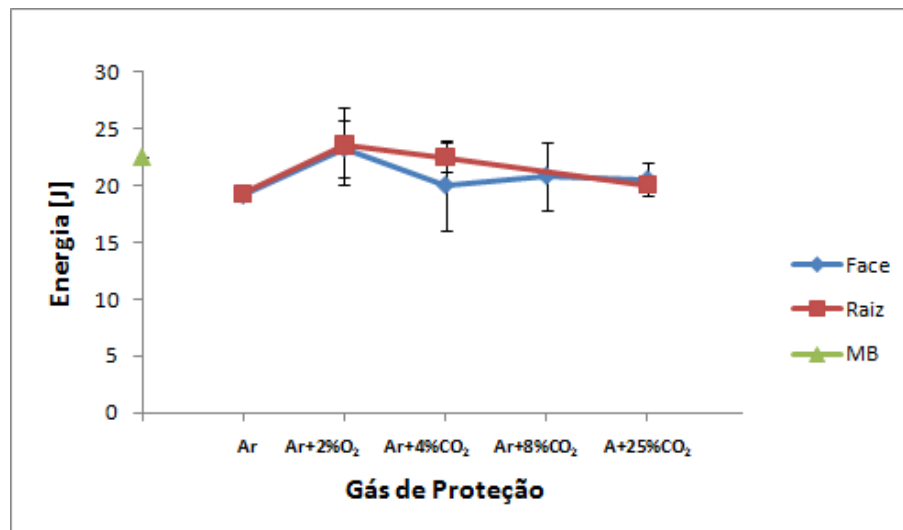


Figura 6.13. Energia total para a realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER308LSi no metal de base AISI441

### 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 <sub>MAX</sub> [KN]		Energia [J]	
			Media	Desvio	Media	Desvio
ER430Ti	Ar	Raiz	1,91	0,12	26,9	1,12
		Face	1,78	0,08	25,63	1,66
	Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	1,76	0,03	23,75	0,47
		Face	1,8	0,04	23,22	1,61
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	1,72	0,11	23,49	0,83
		Face	1,6	0,04	22,1	1,08
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	1,9	0,21	25,94	2,36
		Face	2,06	0,11	28,24	0,86
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	1,52	0,08	20,91	4,43
		Face	1,39	0,39	12,27	9,8

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 oito por cento 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%CO<sub>2</sub> e a letra “b” o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub>. 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.

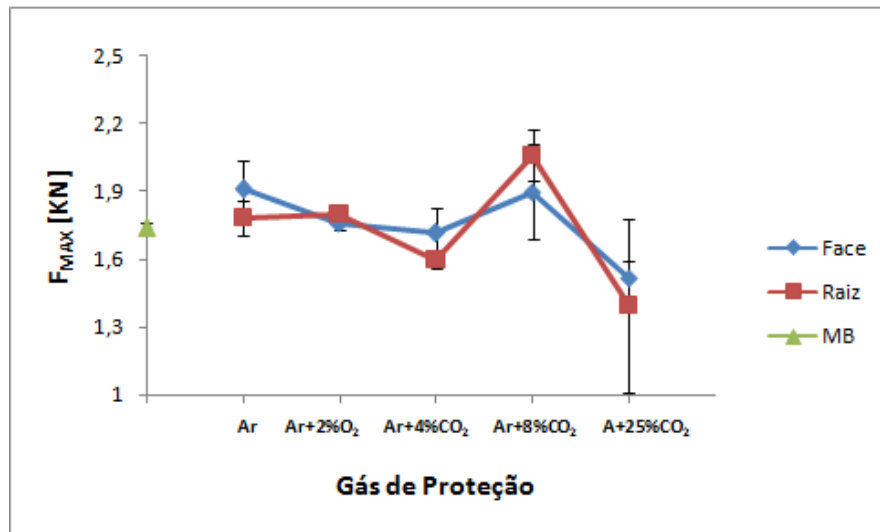


Figura 6.14. Força para realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER430Ti no metal de base UNS43932

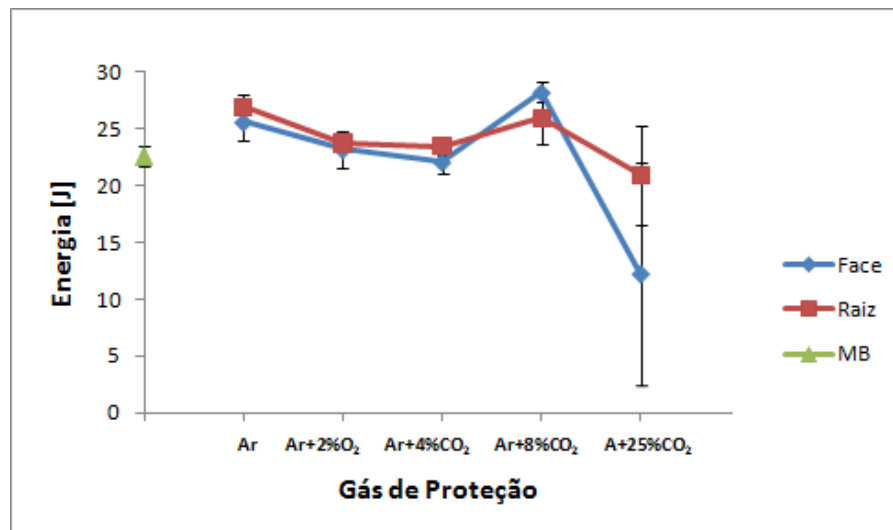


Figura 6.15. Energia total para a realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER430Ti no metal de base UNS43932

A Figura 6.17 apresenta a microestrutura do corpo de prova solado com Ar+25%CO<sub>2</sub> 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.

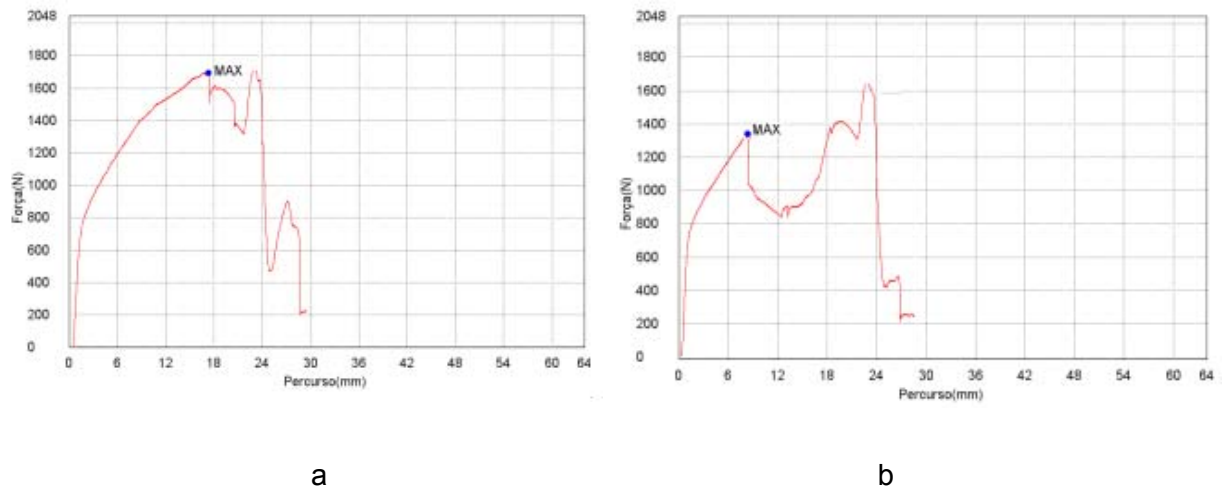


Figura 6.16. Gráfico da força máxima em função do percurso realizado pelo punção no ensaio de dobramento para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti (a) com o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub> e (b) com o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub>



Figura 6.17. Microestrutura do corpo de prova solado com o metal de adição ER430Ti e gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> 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 <sub>MAX</sub> [KN]		Energia [J]	
			Media	Desvio	Media	Desvio
ER430Ti	Ar	Raiz	1,55	0,1	22,3	1,74
		Face	1,63	0,08	21,97	2,7
	Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	1,65	0,03	22,97	1,31
		Face	1,65	0,02	22,39	0,64
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	1,67	0,04	20,93	2,14
		Face	1,62	0,07	21,01	0,87
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	1,68	0,04	23,36	0,56
		Face	1,66	0,05	22,02	1,81
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	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.

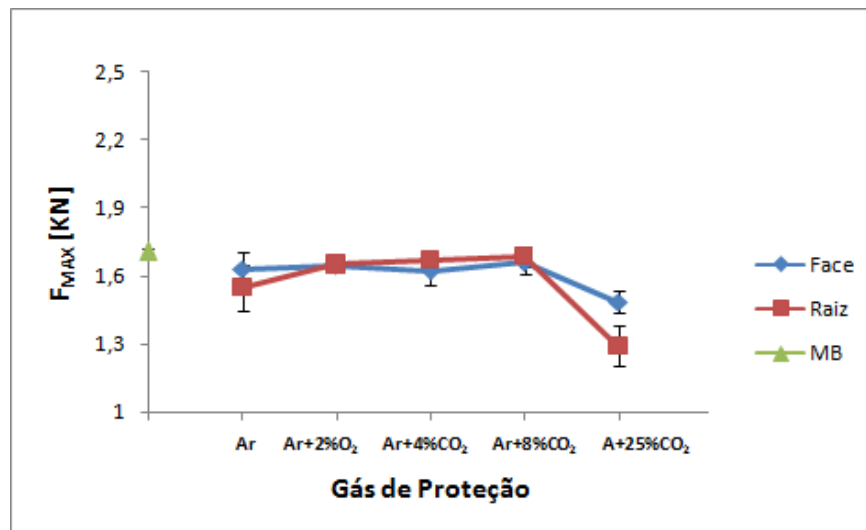


Figura 6.18. Força para realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER430Ti no metal de base AISI 441

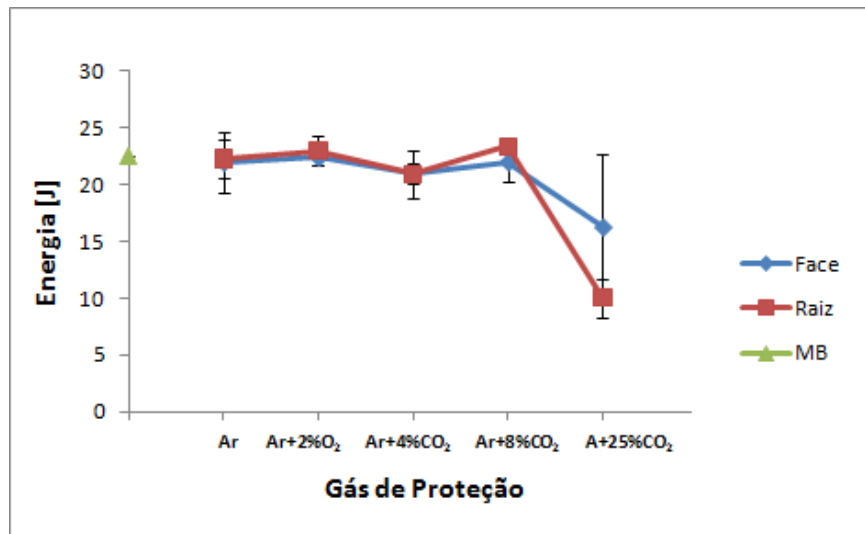


Figura 6.19. Energia total para a realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER430Ti no metal de base AISI 441

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 com vinte e cinco por cento de dióxido de carbono, também devido à presença de martensita. Da mesma forma, os valores encontrados até oito por cento de dióxido de carbono observa-se valores 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%CO<sub>2</sub> para ambos metais de base ocorre uma perda de ductilidade devido a presença de martensita, conforme observado na Figura 5.20 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 observa-se 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 <sub>MAX</sub> [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 <sub>2</sub>	Raiz	1,59	0,05	21,11	0,34
		Face	1,64	0,03	21,33	0,07
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	1,71	0,09	20,81	4,24
		Face	1,69	0,02	20,49	1,12
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	-	-	-	-
		Face	1,61	0,02	21,31	1,53
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	1,67	0,08	22,1	1,5
		Face	1,68	0,02	24,87	1,69

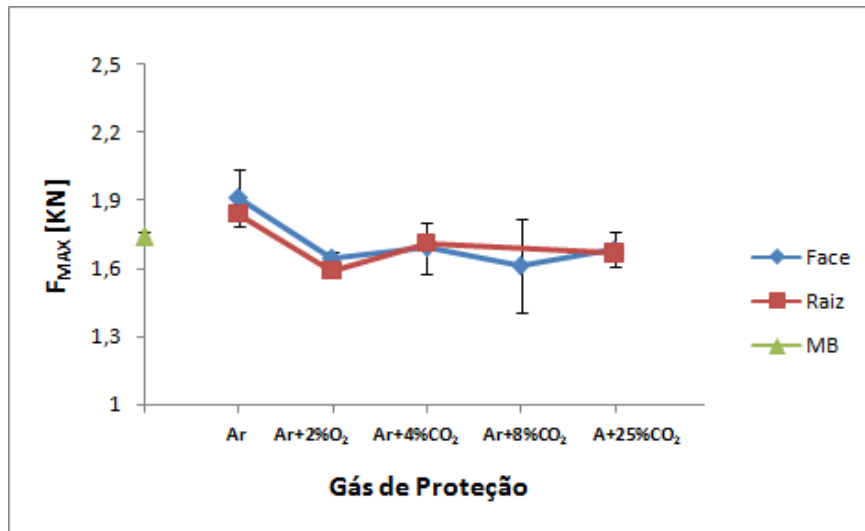


Figura 6.20. Força para realização de dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER430LNb e metal de base UNS43932

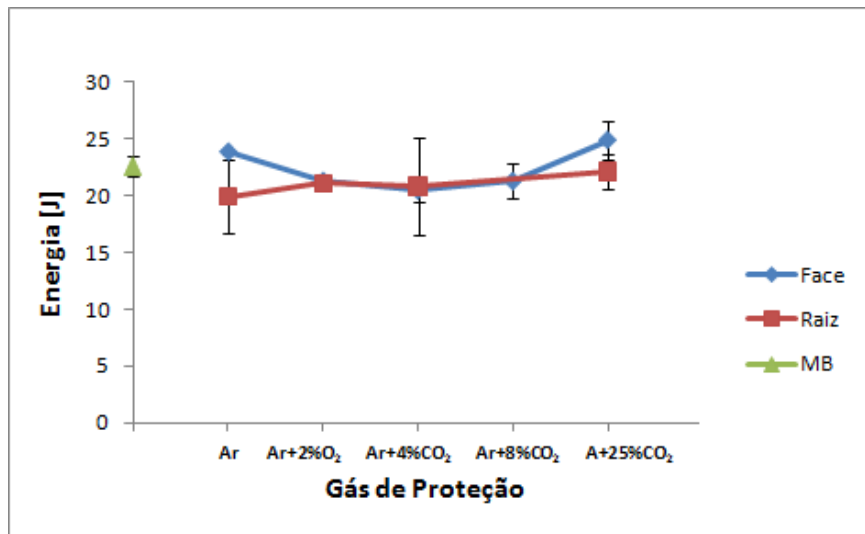


Figura 6.21. Energia total para a realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER430LNb no metal de base UNS43932

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 obtidos 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 <sub>MAX</sub> [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 <sub>2</sub>	Raiz	1,58	0,11	21,75	0,88
		Face	1,72	0,05	21,93	0,69
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	-	-	-	-
		Face	-	-	-	-
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	1,61	0,1	21,1	2,31
		Face	1,66	0,04	23,11	1,83
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	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.

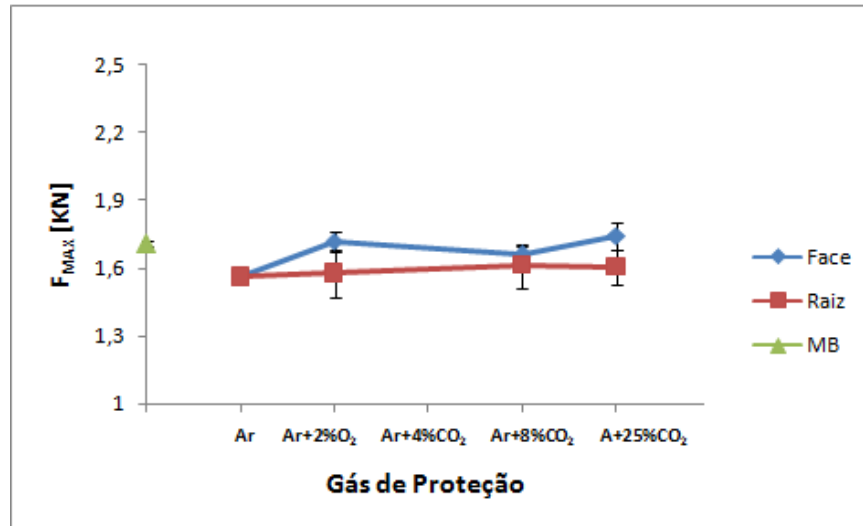


Figura 6.22. Força para realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441

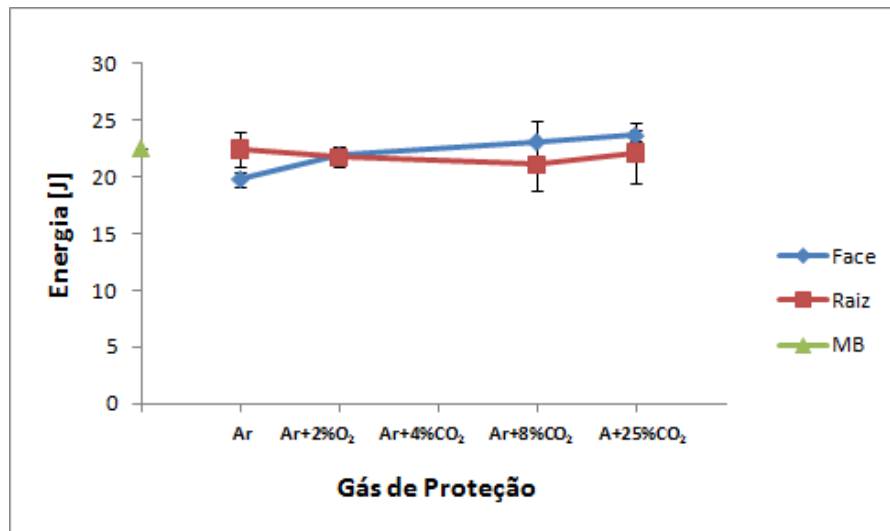


Figura 6.23. Energia total para a realização do dobramento em função do gás de proteção utilizado na solda realizada com o metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441

#### 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%CO<sub>2</sub> 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 energia obtidos 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

Metal de Base	Metal de Adição	F <sub>MAX</sub> [KN]		Energia [J]	
		Media	Desvio	Media	Desvio
UNS 43932	ER430Ti	1,82	0,14	24,91	2,1
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

Figura 6.24 apresenta o gráfico da 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. A Figura 6.25 apresenta o gráfico da 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 (2010) afirmam que a presença deste elemento aumenta a conformabilidade de um aço inoxidável ferrítico, uma vez que ele auxilia a recristalização do material devido aos precipitados ancorarem e impedirem o crescimento dos grãos, aumentando assim a ductilidade do material.

Para o metal de base UNS43932 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.

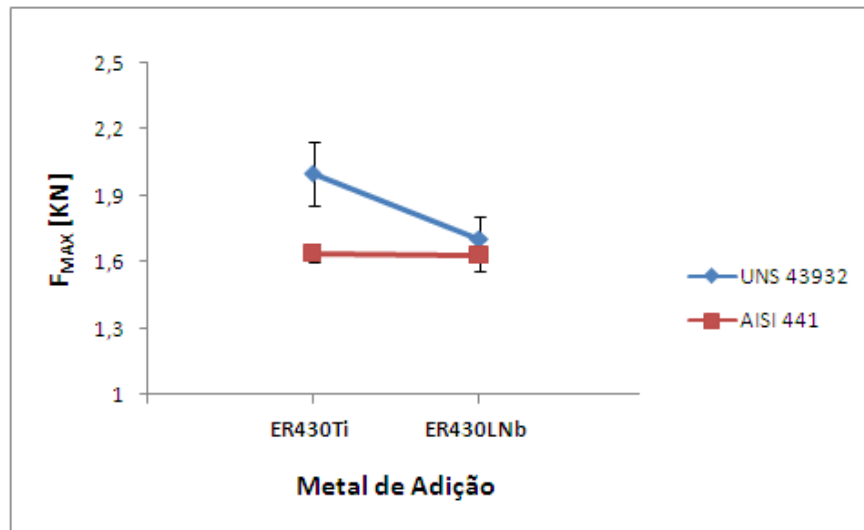


Figura 6.24. Gráfico da força máxima para realizar o dobramento em juntas soldadas de metal de base UNS 43932 e AISI 441 em função do metal de adição utilizado

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 esta 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.

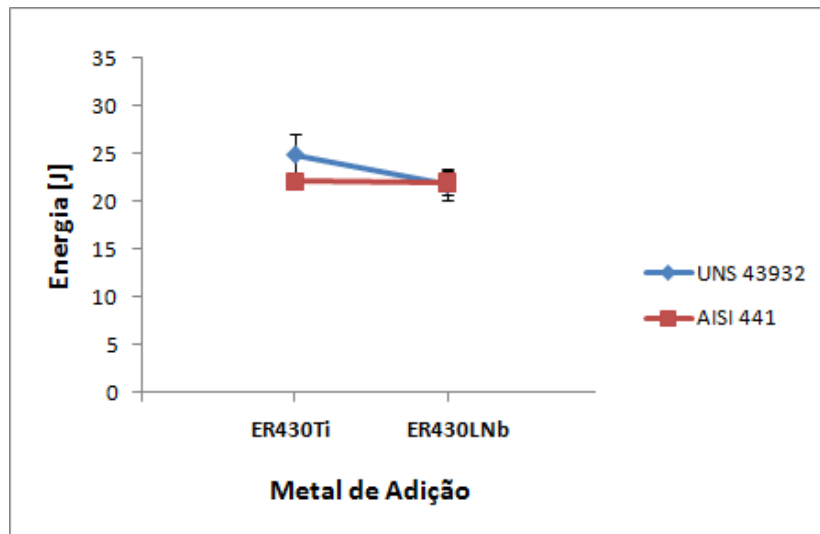


Figura 6.25. Gráfico da energia total para realizar o dobramento em juntas soldadas de metal de base UNS 43932 e AISI 441 em função do metal de adição utilizado

### 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 1.000 Kgf para não haver escorregamento, utilizando 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.

Foram analisados a força máxima, o deslocamento máximo, energia total para a realização do ensaio e a inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção. 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.

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.

Primeiramente, para ter parâmetros de comparação, realizaram-se ensaios de embutimento nas chapas dos metais de base de aço inoxidável ferrítico (UNS439 e AISI441). A Tabela 6.15 apresenta os valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção, energia total para a realização do ensaio e a inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção. 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 da força máxima, deslocamento máximo do punção, energia total para a realização do ensaio de embutimento e a inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os 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	I [Graus]	D. I
UNS 43932	49972,2	354,8	16,22	0,11	408,8	8,6	89,984	0,000
AISI441	51270,8	828,1	16,7	0,12	411,9	17,1	89,985	0,000

Onde:  $F_{MAX}$  representa a força máxima para a realização do ensaio, Desl. representa o deslocamento do punção, E representa a energia total para a realização do ensaio e I a inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção durante o ensaio

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 nos 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 a recristalização do material, aumentando assim sua ductilidade.

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.

Nota-se que o ensaio é caracterizado por um crescimento da força em função do deslocamento do punção até o momento em que o ensaio atinge um valor, chamado de força máxima, que a partir deste momento começa a ocorrer uma ruptura no material, logo, a força começa a decrescer. Conforme comentado, o critério de parada do ensaio é que houvesse uma queda de cinco por cento em relação à força máxima. Observa-se ainda na Figura 6.26b que o ensaio realizado no corpo de prova de metais de base a ruptura ocorreu na lateral da calota.

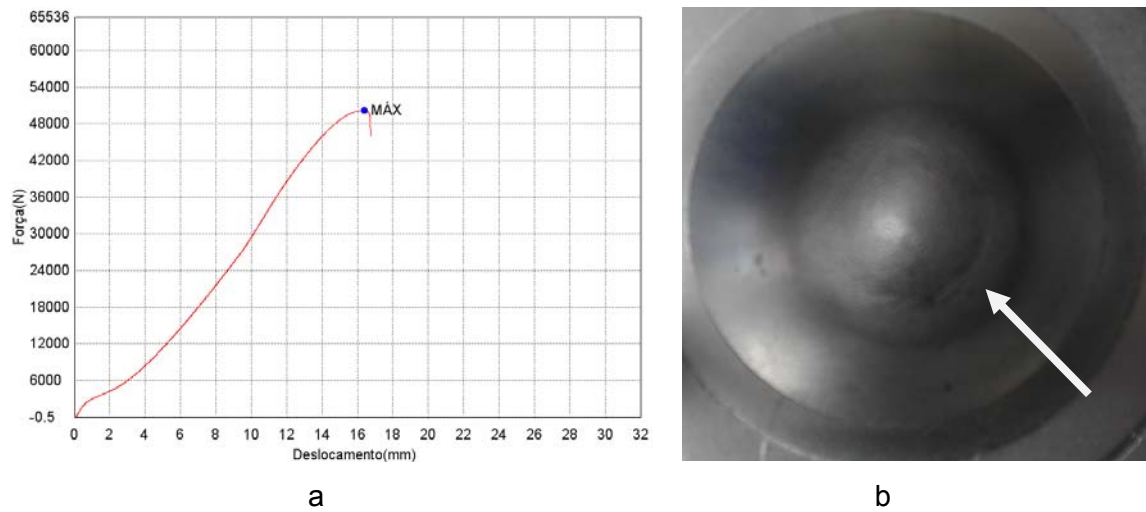


Figura 6.26. Ensaio de embutimento realizado no metal de base UNS 43932 (a) gráfico da força em função do deslocamento do punção e (b) aspecto do corpo de prova após o ensaio

Uma análise da força máxima, do deslocamento do punção, da energia total para a realização do ensaio de embutimento e do ângulo de inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção 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, sendo que estas situações são representados por traços nas Tabelas que serão apresentadas a seguir.

### 6.3.1. ER308LSi

A Figura 6.27 apresenta na letra “a” o gráfico 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%O<sub>2</sub> 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 o alcançar a carga máxima e o aspecto do corpo de prova ensaiado é composto por uma fratura na circunferência do punção.

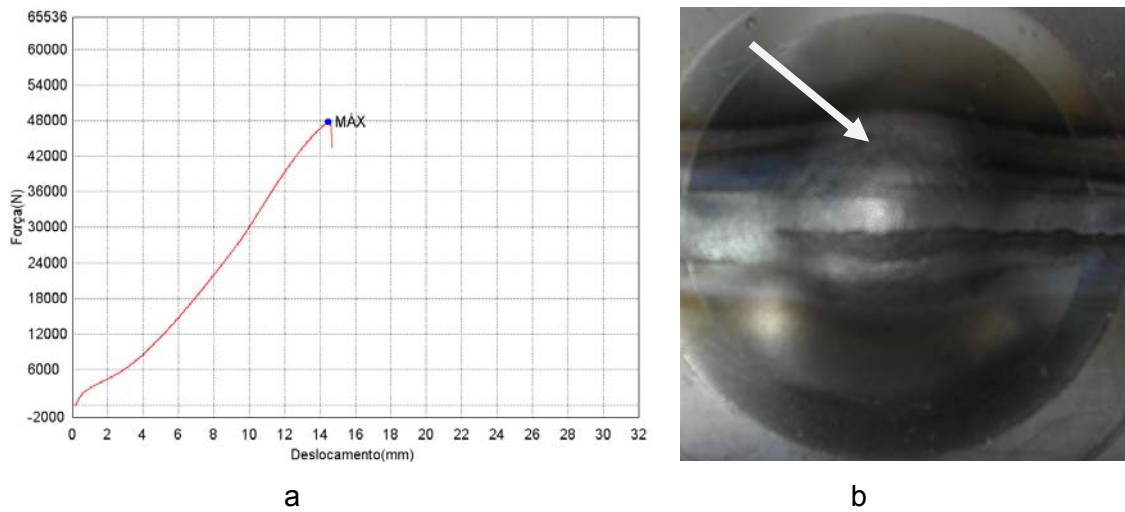


Figura 6.27. Ensaio de embutimento realizado na face do corpo de prova soldado no metal de base UNS 43932, com o metal de adição ER308LSi e com o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>, (a) gráfico da força em função do deslocamento do punção e (b) aspecto do corpo de prova após o ensaio

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

Tabela 6.16. Valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção, energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER308LSi

Gás de Proteção	Lado	F <sub>MAX</sub> [N]	D. F <sub>MAX</sub>	Desl. 10 <sup>-3</sup> [m]	D. Desl.	E [J]	D. E	I [Graus]	D. I
Ar	Face	43369	0	13,6	0	263	0	89,985	0,000
Ar+2%O <sub>2</sub>	Face	36112	16412	11,9	3,6	210	152	89,982	0,001
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	36090	11113	11,8	2,8	210	94	89,983	0,002
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	40461	12187	12,8	2,9	287	63	89,984	0,002
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	40076	4869	12,6	1,5	243	41	89,984	0,001

As Figuras 6.28 a 6.31 apresentam respectivamente os gráficos dos parâmetros apresentados nas Tabelas 6.26 e 6.27. 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 observou esta redução no 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), apud Hunter; Eagar (1980).

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 ocorrerem de variações significativas nas microdurezas, apresentadas nas Figuras 5.7 e 5.28 do Capítulo V, tanto da zona fundida, quanto da zona termicamente afetada com a variação do gás de proteção.

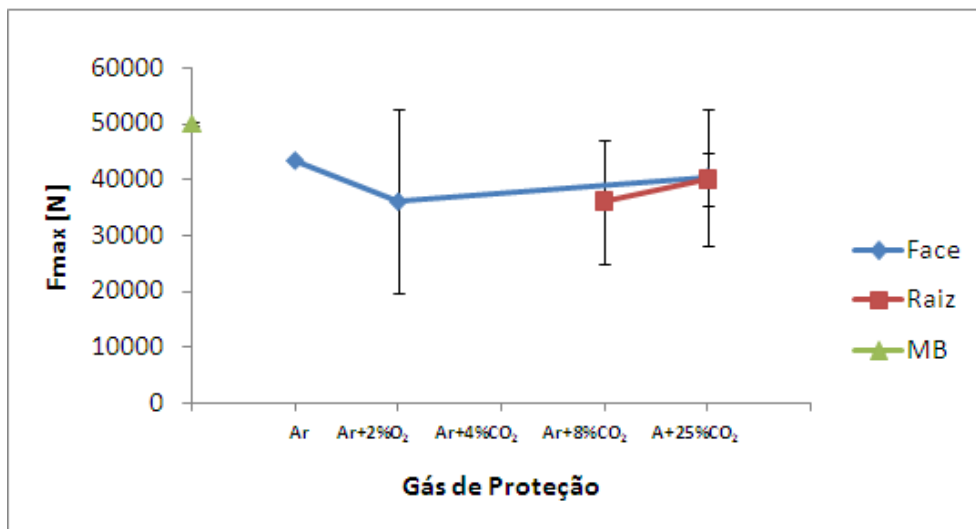


Figura 6.28. Gráfico da Força Máxima exercida pelo punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base UNS 43932

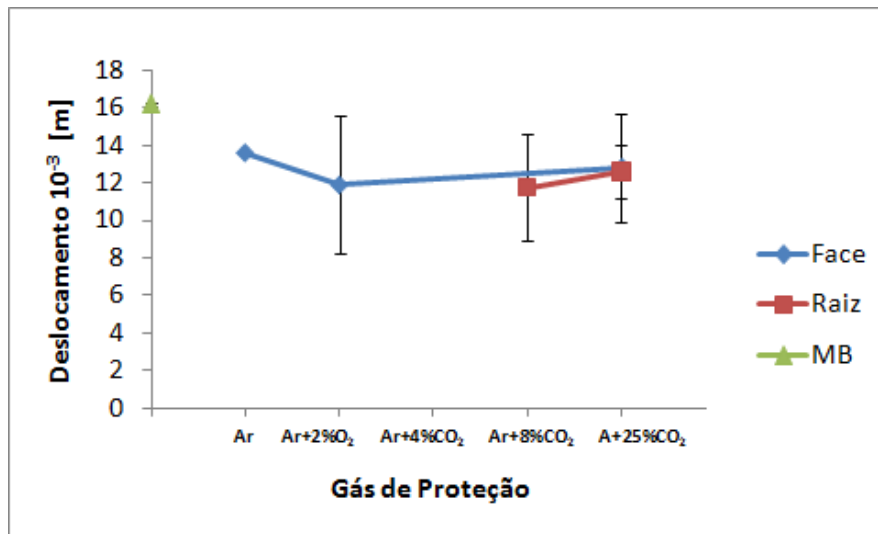


Figura 6.29. Gráfico do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base UNS 43932

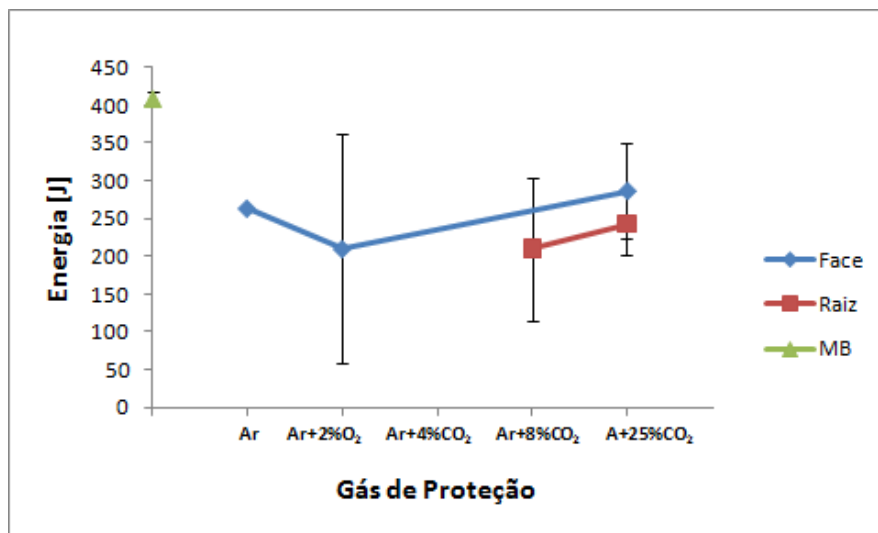


Figura 6.30. Gráfico da energia total para realização do ensaio de embutimento em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base UNS 43932



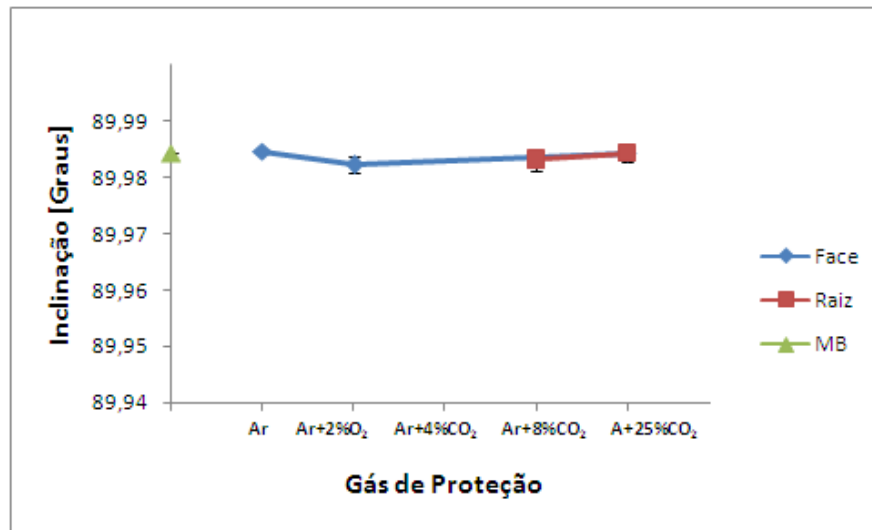


Figura 6.31. Gráfico da inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base UNS 43932

A Tabela 6.17 apresenta os valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção, energia total para a realização do ensaio de embutimento e a inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção 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 da força máxima, deslocamento do punção, energia total para a realização do ensaio de embutimento e a inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER308LSi

Gás de Proteção	Lado	F <sub>MAX</sub> [N]	D. F <sub>MAX</sub>	Desl. 10 <sup>-3</sup> [m]	D. Desl.	E [J]	D. E	I [Graus]	D. I
Ar	Face	36237	21648	12	5,1	231	210	89,986	0,000
Ar	Raiz	20269	2257	10,8	4,2	130	73	89,973	0,014
Ar+2%O <sub>2</sub>	Face	33098	747	11,2	0,3	162	3	89,983	0,001
Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	38919	18973	12,6	4,2	248	193	89,984	0,003
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	20069	8563	7,8	2,1	79	51	89,980	0,003
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Face	17085	2311	7,2	0,6	60	11	89,979	0,003
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	19418	5618	7,9	1,5	76	30	89,979	0,003
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	34687	11026	11,5	2,6	185	90	89,983	0,002
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	49356	1217	15,2	0,6	343	32	89,985	0,000

As Figuras 6.32 a 6.35 apresentam os gráficos dos parâmetros analisados nas Tabelas 6.28 e 6.29. 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, não possuindo 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.

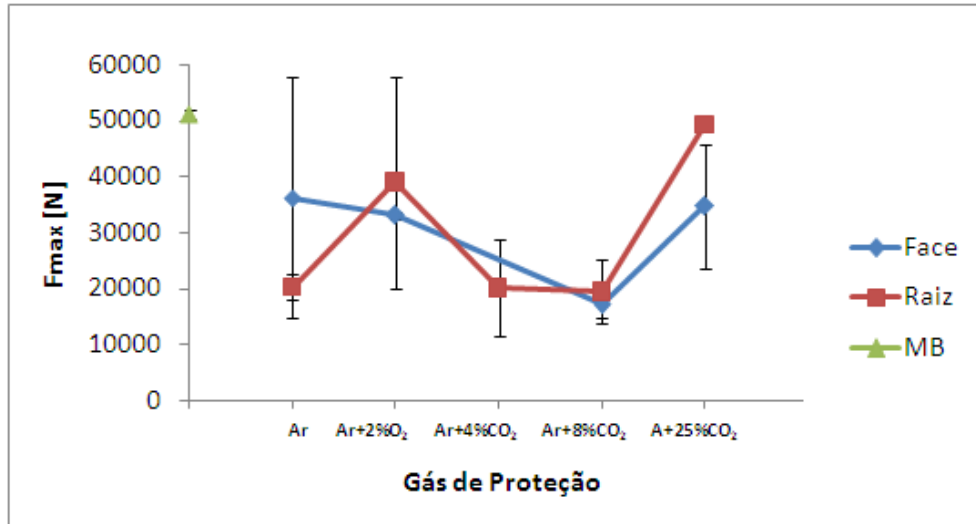


Figura 6.32. Gráfico da Força Máxima exercida pelo punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base AISI 441

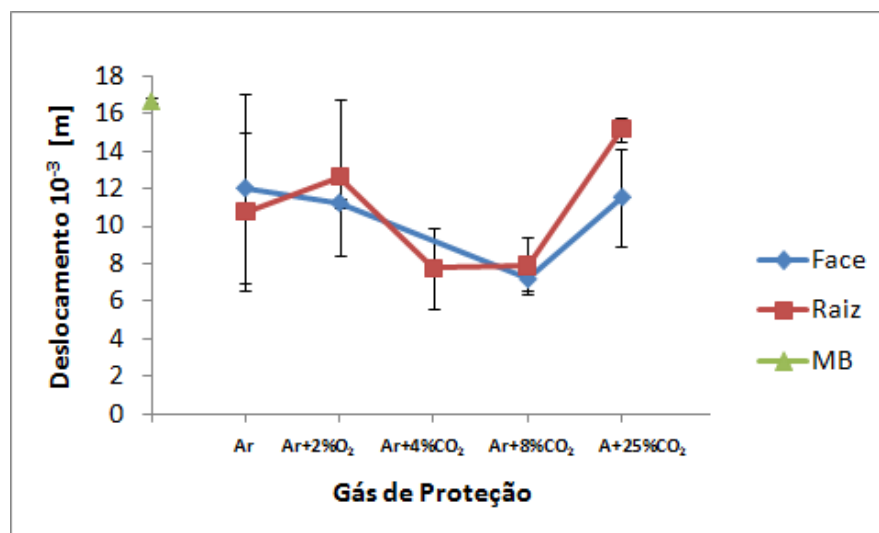


Figura 6.33. Gráfico do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base AISI 441

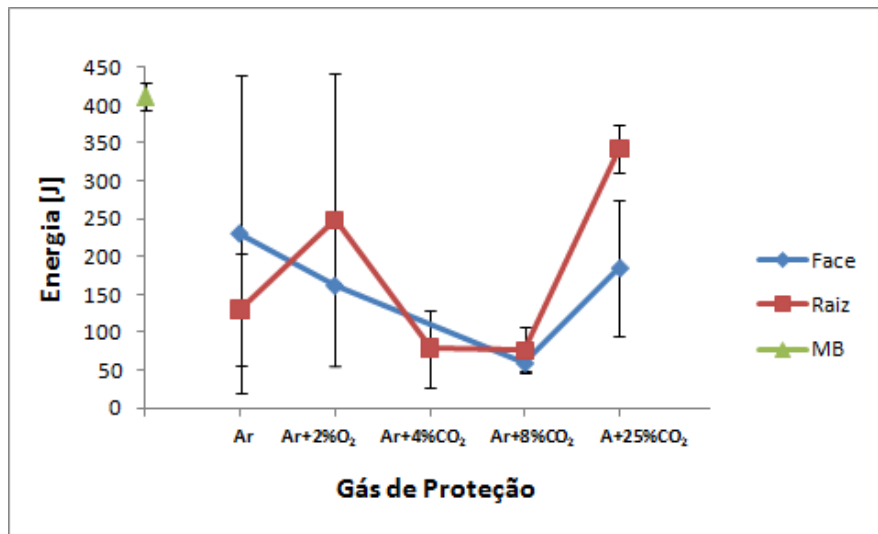


Figura 6.34. Gráfico da energia total para realização do ensaio de embutimento em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base AISI

441

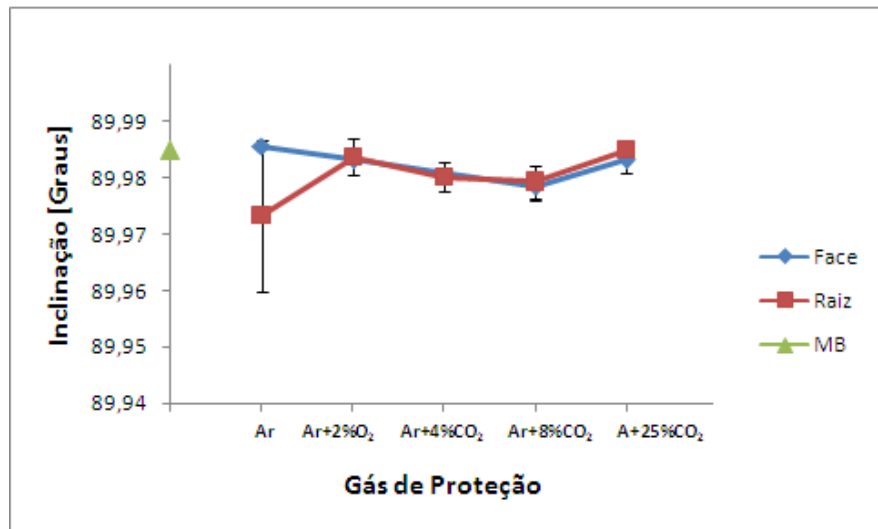


Figura 6.35. Gráfico da inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER308LSi no metal de base AISI 441

As grandes variâncias observadas nos ensaios com o metal de base AISI 441 podem estar relacionados com a possível não retirada dos ensaios onde teve concentrações devido a falhas na soldagem, conforme apresentado na Figura 6.1.

### 6.3.2. ER430Ti

As Figuras 6.36 e 6.37 apresentam na letra “a” os gráficos 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 para respectivamente os gases de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub> 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%O<sub>2</sub> o aspecto do corpo de prova ensaiado é composto por uma fratura na circunferência do 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 este tipo de fraturas potencializa a capacidade de medição da ductilidade na região soldada, uma vez que potencializa índices de embutimento (principalmente em termos de deslocamento) quando se tem microestruturas distintas entre a zona fundida e o metal de base

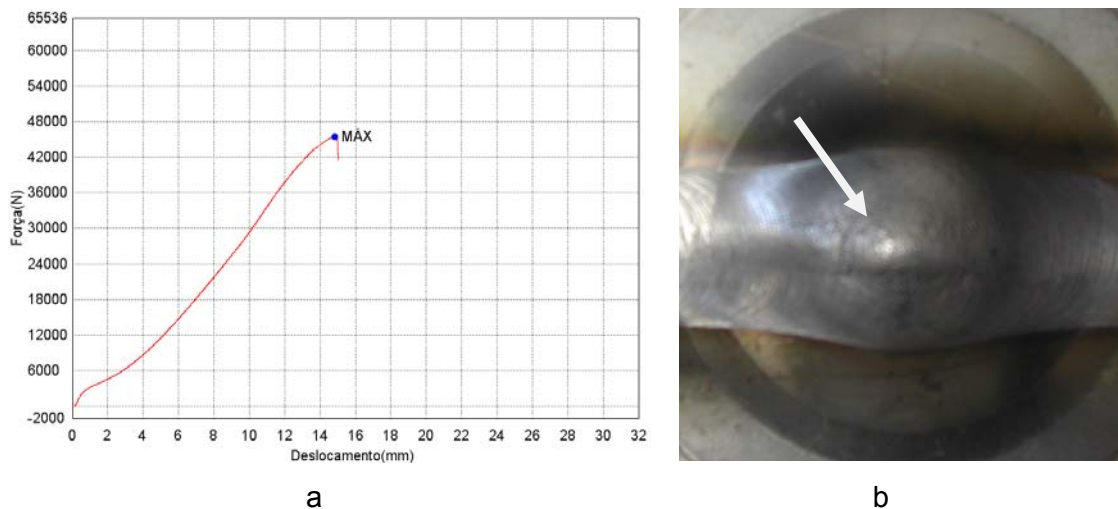


Figura 6.36. Ensaio de embutimento realizado na raiz do corpo de prova de metal de base UNS43932, soldado com o metal de adição ER430Ti e com o gás de proteção Ar (a) gráfico da força em função do deslocamento do punção e (b) aspecto visual do corpo de prova ensaiado

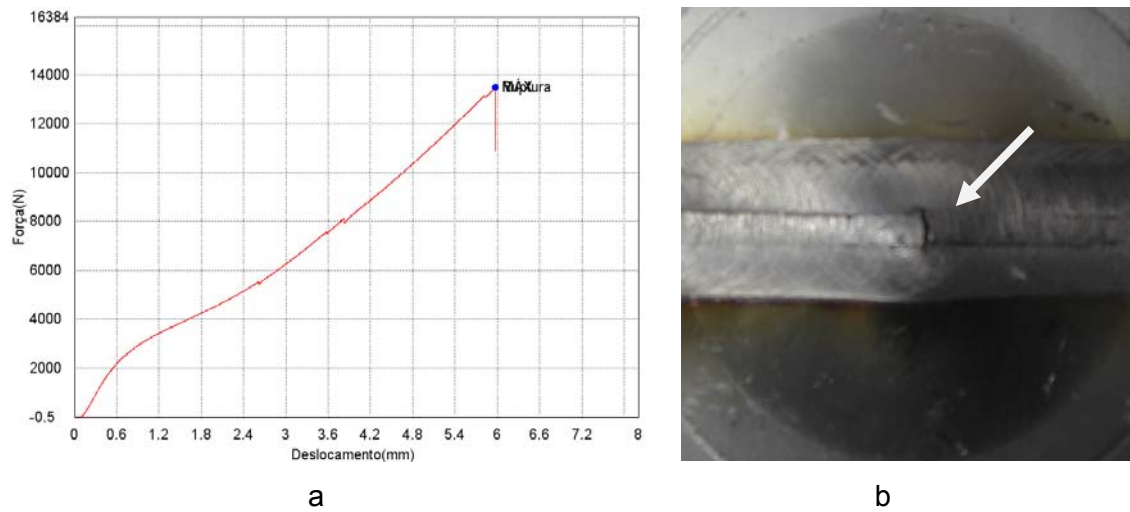


Figura 6.37. Ensaio de embutimento realizado na face do corpo de prova de metal de base UNS43932, soldado com o metal de adição ER430Ti e com o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> (a) gráfico da força em função do deslocamento do punção e (b) aspecto visual do corpo de prova ensaiado

A Tabela 6.18 apresenta os valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção, energia total para a realização do ensaio de embutimento e a inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER430Ti na face e na raiz. As Figuras 6.38 a 6.41 apresentam os gráficos dos parâmetros estudados. Observa-se nas Figuras 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 5.29), um diminuição do tamanho de grão (Figura 5.26) e por último observa-se pela microestrutura de forma qualitativa um aumento da quantidade de precipitados (Figuras 5.16 à 5.20), 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 da força máxima, deslocamento do punção, energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER430Ti

Gás de Proteção	Lado	F <sub>MAX</sub> [N]	D. F <sub>MAX</sub>	Desl. 10 <sup>-3</sup> [m]	D. Desl.	E [J]	D. E	I [Graus]	D. I
Ar	Raiz	41636	5370	13,5	1,9	265	85	89,984	0,000
Ar+2%O <sub>2</sub>	Face	27883	13879	9,7	3,9	139	117	89,983	0,002
Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	26070	2448	9,9	0,7	149	35	89,982	0,001
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Face	22371	8412	8,1	2,3	98	42	89,981	0,002
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	23538	2662	8,7	0,9	92	21	89,982	0,000
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Face	18951	8370	7,2	2,2	66	44	89,981	0,003
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	29584	0	10	0,0	131	0	89,983	0,000
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	11326	3054	5,2	1,0	31	12	89,973	0,004
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	4909	375	2,4	0,3	7	2	89,956	0,004

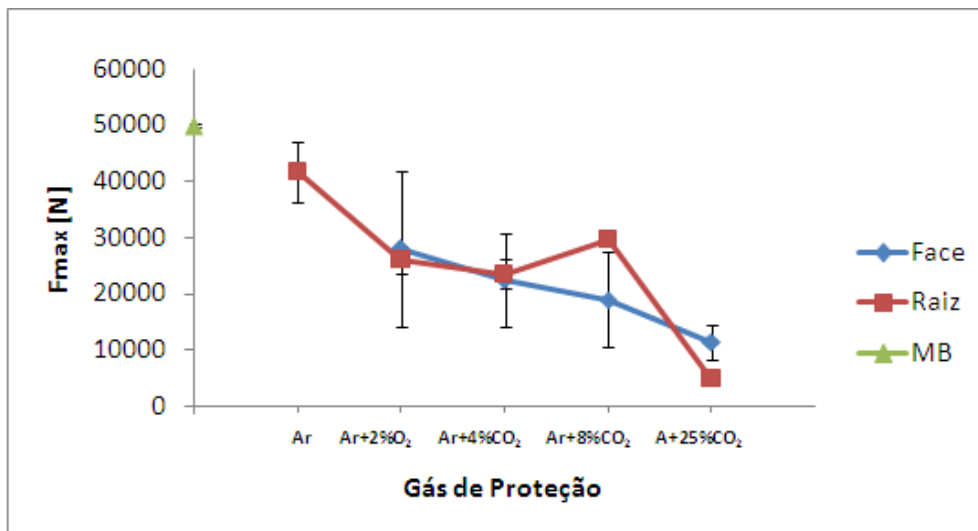


Figura 6.38. Gráfico da Força Máxima exercida pelo punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base UNS 43932

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

Os resultados encontrados são contrários as afirmações de Washko e 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 relacionado 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.

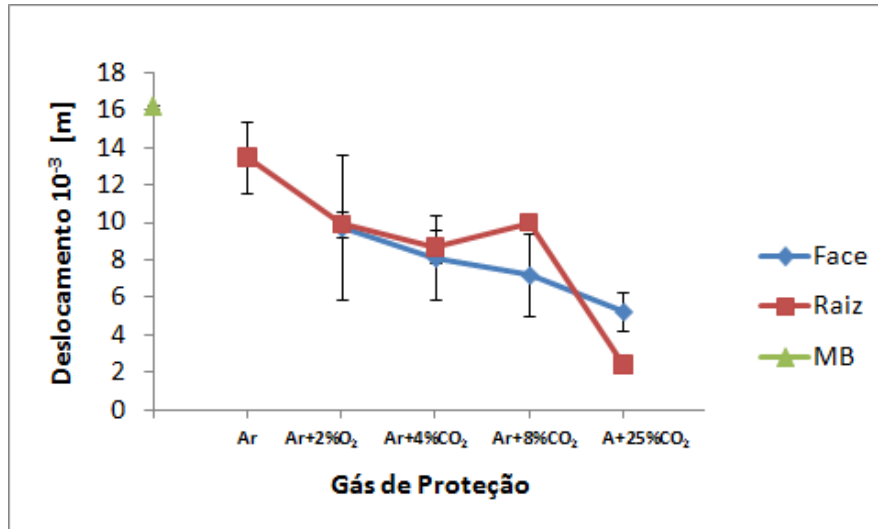


Figura 6.39. Gráfico do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base UNS 43932

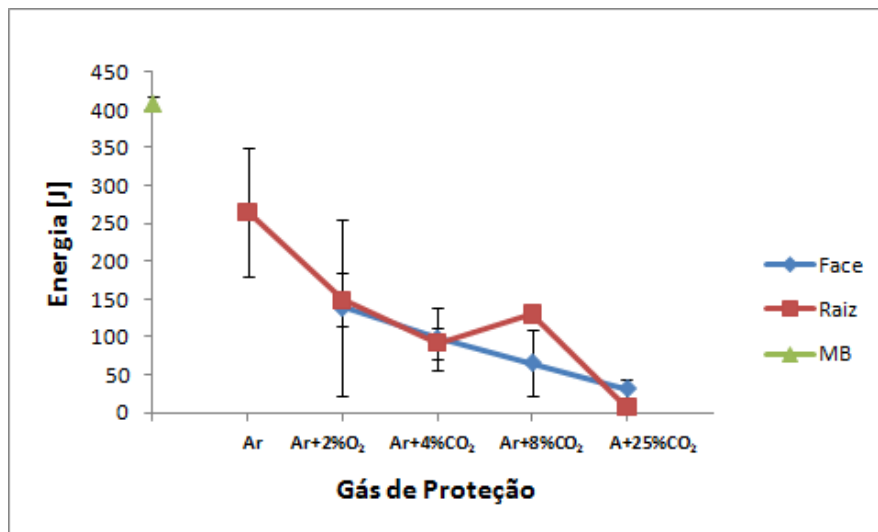


Figura 6.40. Gráfico da energia total para realização do ensaio de embutimento em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base UNS 43932

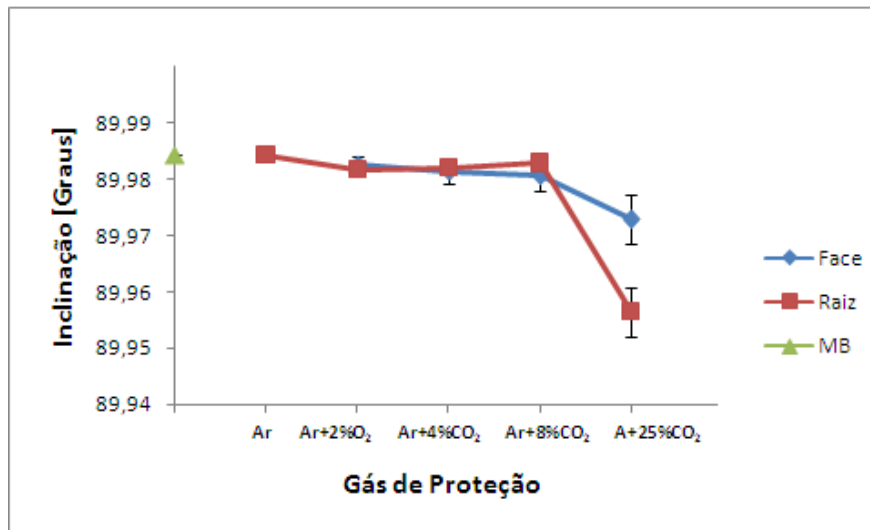


Figura 6.41. Gráfico da inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base UNS 43932

A Tabela 6.19 apresenta os valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção, energia total para a realização do ensaio de embutimento e a inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base AISI441. As Figuras 6.42 à 6.45 apresentam os gráficos dos parâmetros avaliados nas Tabelas 6.32 e 6.33, 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, observa-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. Força máxima, deslocamento do punção, energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430Ti

Gás de Proteção	Lado	F <sub>MAX</sub> [N]	D. F <sub>MAX</sub>	Desl. 10-3 [m]	D. Desl.	E [J]	D. E	I [Graus]	D. I
Ar	Face	48860	1764	15,6	0,6	371	44	89,984	0,001
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Face	22019	1571	8,2	0,4	81	10	89,980	0,001
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Face	6479	1909	3,5	0,8	12	5	89,967	0,002
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	4676	1132	2,2	0,8	7	3	89,956	0,003



Além de se observar 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 o material menos dúctil.

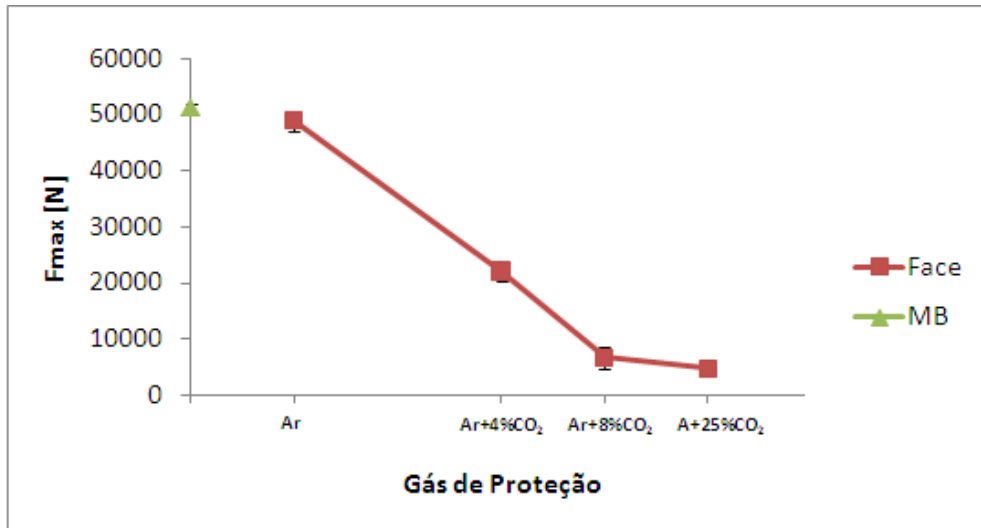


Figura 6.42. Gráfico da Força Máxima exercida pelo punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base AISI 441

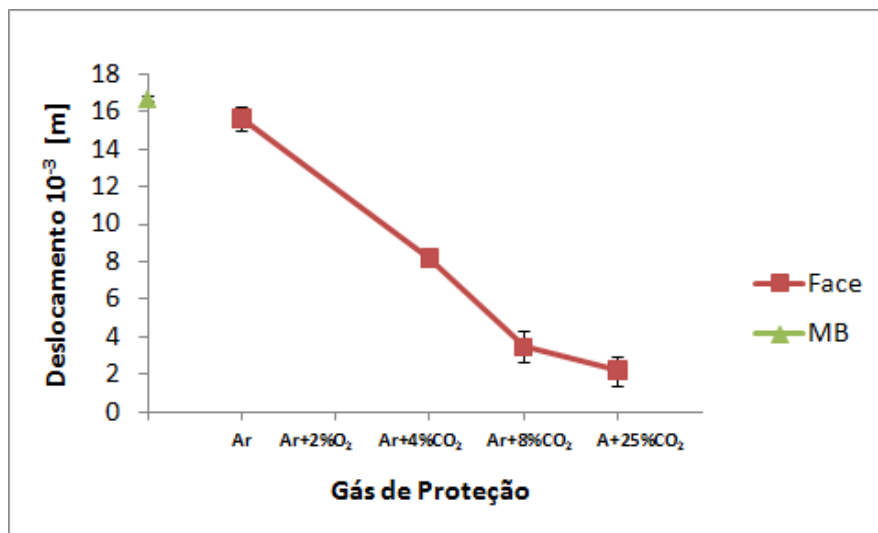


Figura 6.43. Gráfico do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base AISI441

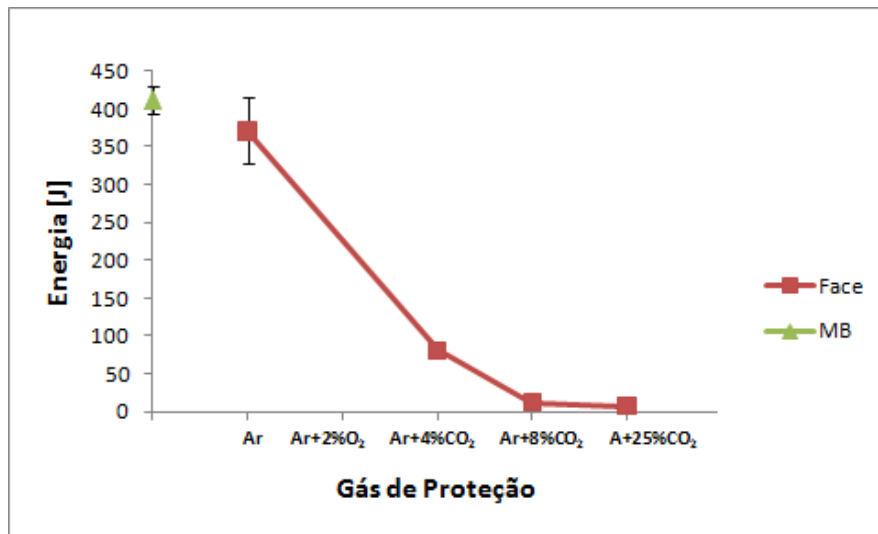


Figura 6.44. Gráfico da energia total para realização do ensaio de embutimento em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base AISI

441

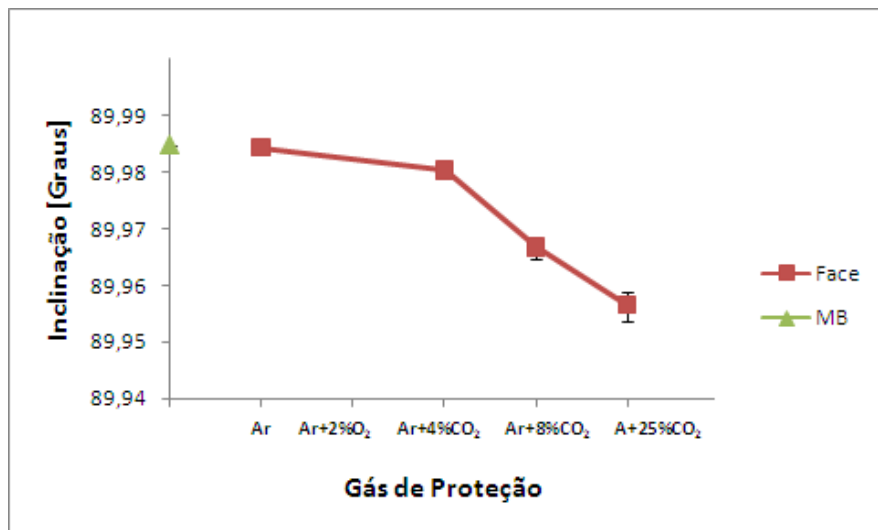


Figura 6.45. Gráfico da inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430Ti no metal de base AISI 441

### 6.3.3. ER430LNb

A Figuras 6.46 apresenta na letra “a” o gráfico 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%O<sub>2</sub> 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.

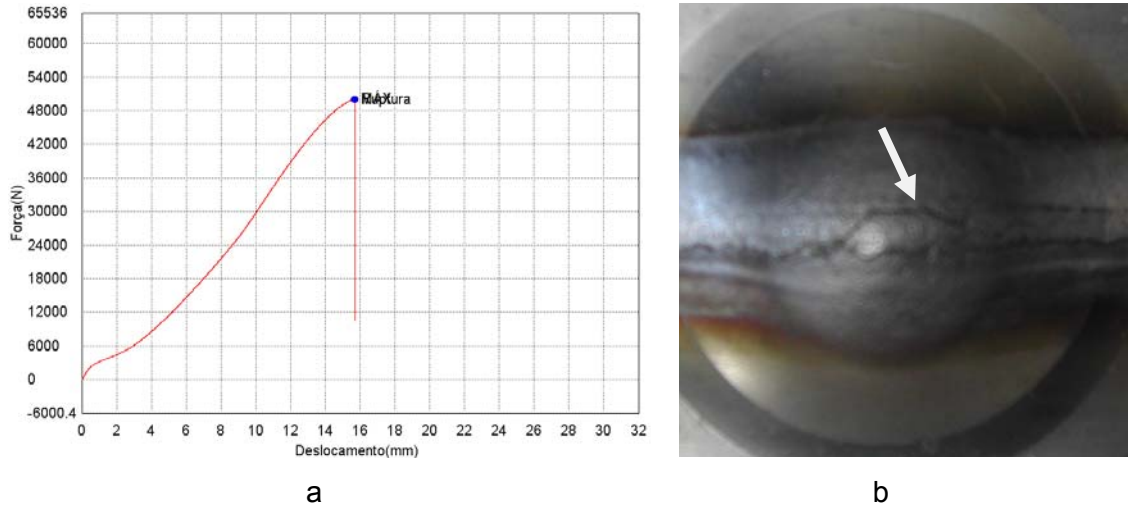


Figura 6.46. Ensaio de embutimento realizado na face do corpo de prova de metal de base AISI 441, soldado com o metal de adição ER430LNb e com o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> (a) gráfico da força em função do deslocamento do punção e (b) aspecto visual do corpo de prova ensaiado

A Tabela 6.20 apresenta os valores médios e o desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção, energia total para a realização do ensaio de embutimento e a inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER430LNb. As Figuras 6.47 a 6.50 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 retiradas das análises.

Tabela 6.20. Valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção, energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER430LNb

Gás de Proteção	Lado	F <sub>MAX</sub> [N]	D. F <sub>MAX</sub>	Desl. 10-3 [m]	D. Desl.	E [J]	D. E	I [Graus]	D. I
Ar	Face	40065	11277	13,1	3,1	261	131	89,98	0,00
Ar	Raiz	17381	1514	7	0,6	56	10	89,98	0,00
Ar+2%O <sub>2</sub>	Face	32792	10751	11,3	2,8	181	101	89,98	0,00
Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	24101	10286	8,9	3,2	108	84	89,98	0,00
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Face	36152	1413	11,7	0,6	184	18	89,98	0,00
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	32158	20096	11,2	5,4	210	211	89,98	0,00
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	21440	14611	8,8	3	102	85	89,98	0,01
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	34068	0	11,2	0	236	0	89,98	0,00
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	16845	8546	7	2,6	76	32	89,97	0,01

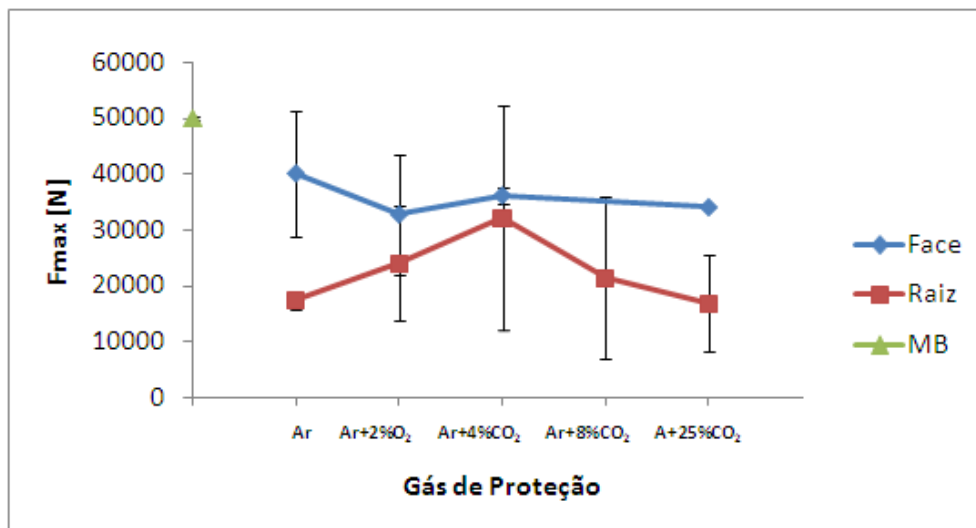


Figura 6.47. Gráfico da Força Máxima exercida pelo punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932

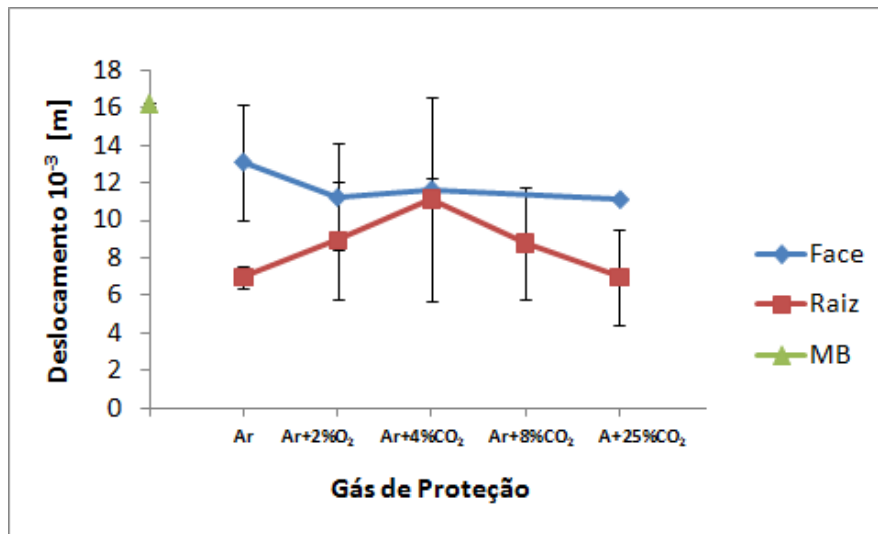


Figura 6.48. Gráfico do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932

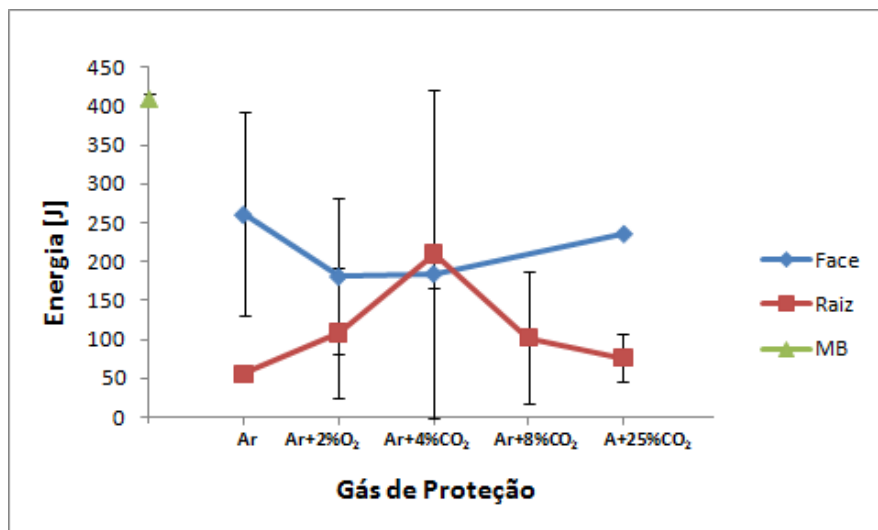


Figura 6.49. Gráfico da energia total para realização do ensaio de embutimento em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932

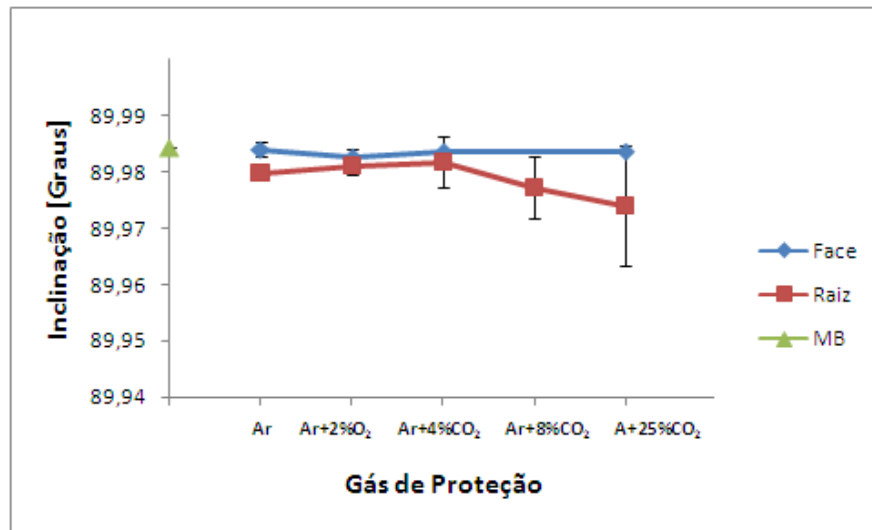


Figura 6.50. Gráfico da inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932

A Tabela 6.21 apresenta os valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção, energia total para a realização do ensaio de embutimento e a inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base AISI441 com o metal de adição ER430LNb.

Tabela 6.21. Valores médios e desvio padrão da força máxima, deslocamento do punção energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430LNb

Gás de Proteção	Lado	F <sub>MAX</sub> [N]	D. F <sub>MAX</sub>	Desl. 10-3 [m]	D. Desl.	E [J]	D. E	I [Graus]	D. I
Ar	Face	36063	6121	11,7	1,5	181	55	89,98	0,00
Ar	Raiz	29688	6901	10,5	1,8	142	61	89,98	0,00
Ar+2%O <sub>2</sub>	Face	36771	13241	12,5	2,9	244	106	89,98	0,00
Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	23507	23616	8,6	6,9	158	235	89,97	0,01
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Face	30202	16777	10,6	4,1	203	125	89,98	0,00
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	32537	13936	11,3	3,8	207	141	89,98	0,00
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Face	20191	9038	10,2	0,3	101	33	89,97	0,02
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	20822	0	7,9	0	99	0	89,98	0,00
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	23390	2482	9,5	1,1	107	27	89,98	0,00
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	28135	7969	10,3	1,5	130	54	89,98	0,00

As Figuras 6.51 a 6.54 apresentam os gráficos dos parâmetros apresentados nas Tabelas 6.21 em função do gás de proteção utilizado. Observam-se 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.

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 observa-se na Figura 5.30 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 (2010) afirmam que a presença nióbio aumenta a conformabilidade de um aço inoxidável ferrítico, facilitando, portanto, a realização do dobramento do corpo de prova soldado.

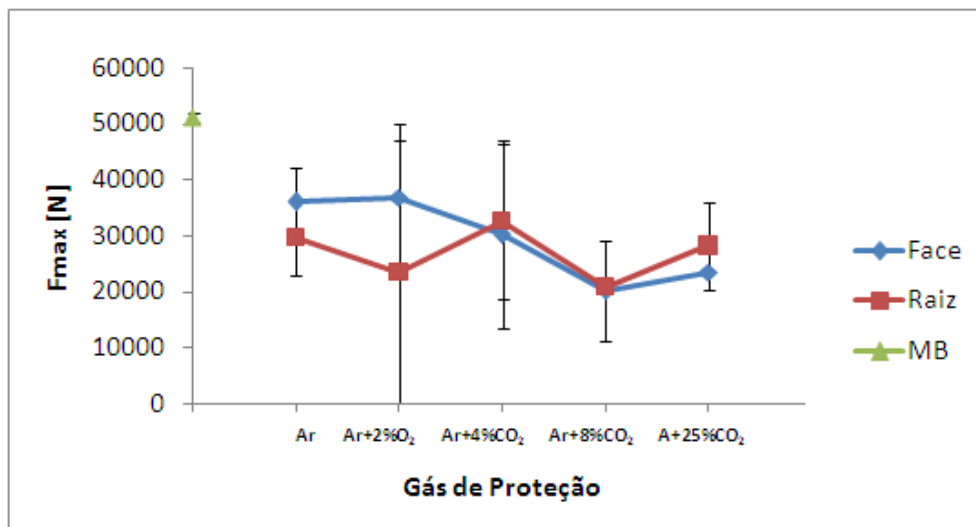


Figura 6.51. Gráfico da Força Máxima exercida pelo punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441

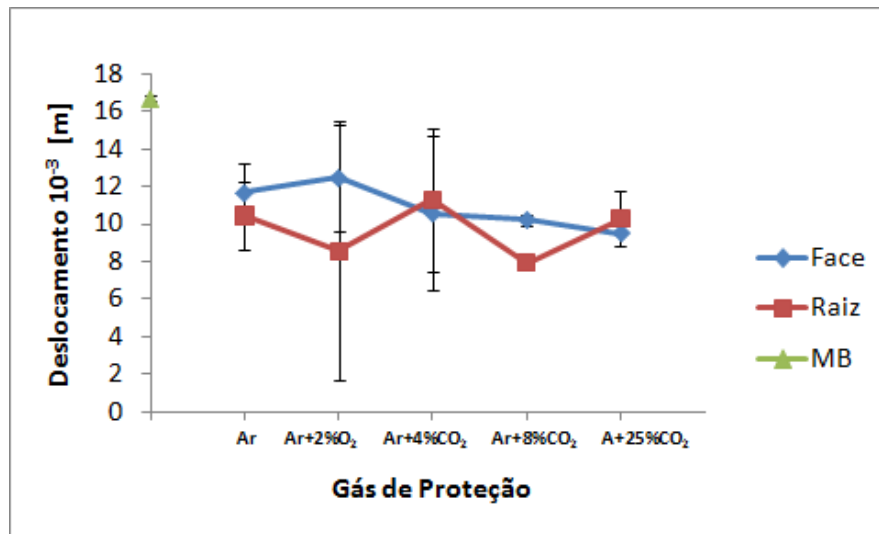


Figura 6.52. Gráfico do deslocamento do punção em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441

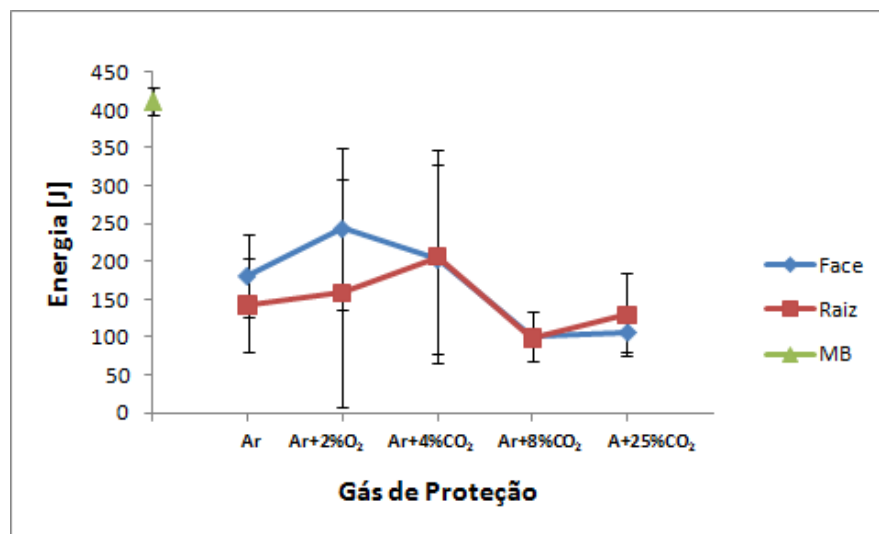


Figura 6.53. Gráfico da energia total para realização do ensaio de embutimento em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base AISI 441



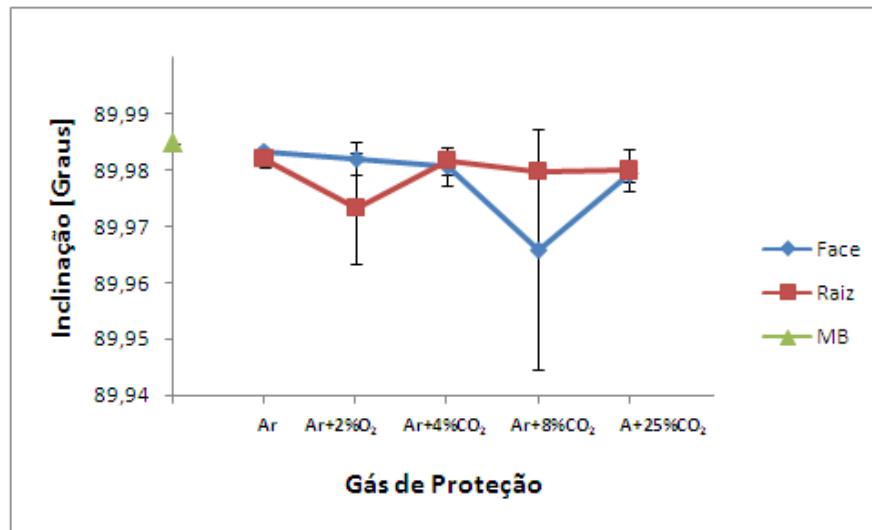


Figura 6.54. Gráfico da inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção da Força em função do gás de proteção utilizado na solda com metal de adição ER430LNb no metal de base UNS 43932

#### 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, nos fornece a ductilidade da solda. Além disso, as análises realizadas mostraram que para todos os gases de proteção e metais de adição mostraram-se 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 sofreram variações significativas. Portanto, para realizar uma análise com maior confiabilidade utilizaram-se, para uma mesma condição, os valores do deslocamento do punção para os cordões soldados nos dois metais de adição, somando-se os seis valores (uma vez que cada condição tinham três réplicas) para se determinar o gráfico apresentado na Figura 6.55.

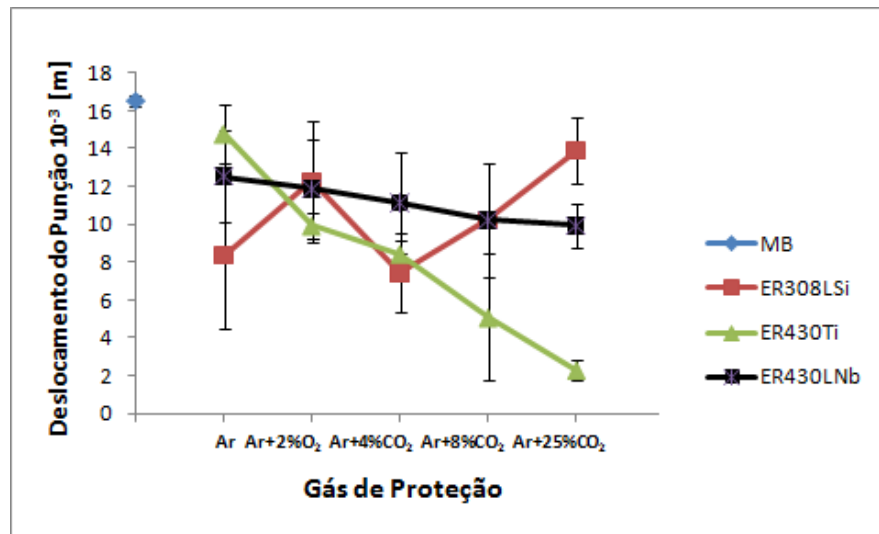


Figura 6.55. Análise comparativa do deslocamento máximo do punção para os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb

Nota-se pela Figura 6.56 que 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. Microestrutura e Microdureza dos corpos de prova estampados

A Figura 6.56 apresenta uma macro do corpo de prova embutido na raiz do metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> 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, mostrando que a zona fundida possuiu resistência superior à região da zona termicamente afetada.

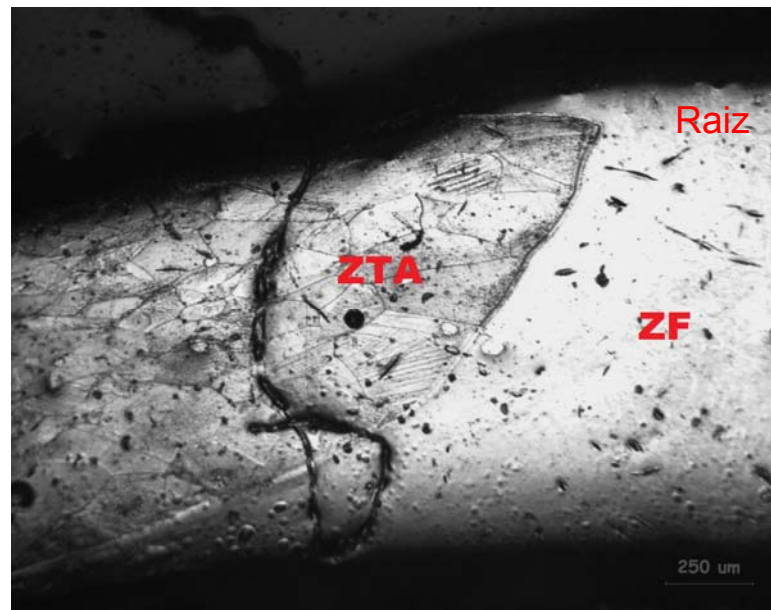


Figura 6.56. Macro do corpo de prova com embutimento na raiz do metal de base UNS 43932 soldado com o metal de adição ER308LSi e gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> com aumento de 40 vezes

A Figura 6.57 apresenta a microestrutura do corpo de prova estampado na face do metal de base UNS 43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub> com aumento de 40 vezes. Nota-se que a fratura nesta ocasião 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.

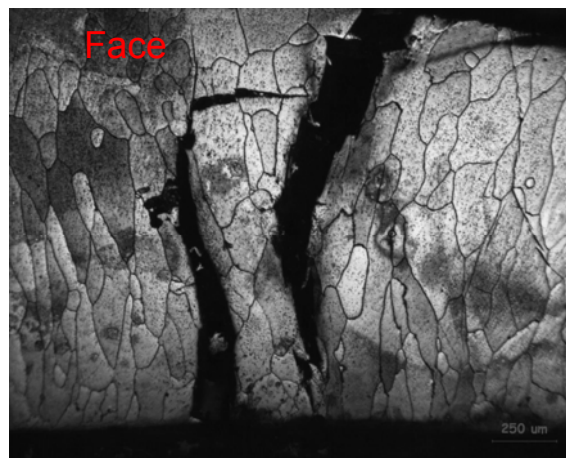


Figura 6.57. Microestrutura do corpo de prova estampado na face do metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub>

A Figura 6.59 apresenta a microestrutura 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%CO<sub>2</sub> 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, diminuindo a ductilidade do cordão de solda e principalmente aumentam a dureza da junta soldada.

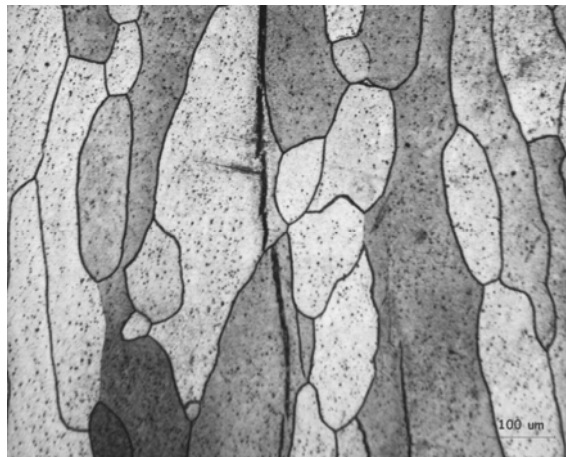


Figura 6.58. Microestrutura do corpo de prova estampado na face do metal de base UNS43932 soldado com o metal de adição ER430Ti e gás de proteção Ar+4%CO<sub>2</sub>

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 foi retirado 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.

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

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

A Tabela 6.23 apresenta as medidas de microdureza realizadas na matriz 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 6.23. 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	10,4
ER430Ti	272,3	2,1	224,7	3,2
	281,3	3,5	250,7	12,7
	246,7	5,5	237	7,8
ER430LNb	260,7	10,2	290,3	12,4
	234,3	9,5	289	8,2
	234	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%CO<sub>2</sub> 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 <sub>2</sub>	325	413	449	464	500	442,0	26,2
AISI 441	ER430Ti	Ar+25%CO <sub>2</sub>	439	494	497	520	702	503,7	14,2

As Figuras 6.59 e 6.60 apresentam os gráficos das medidas de microdureza realizadas na matriz 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).

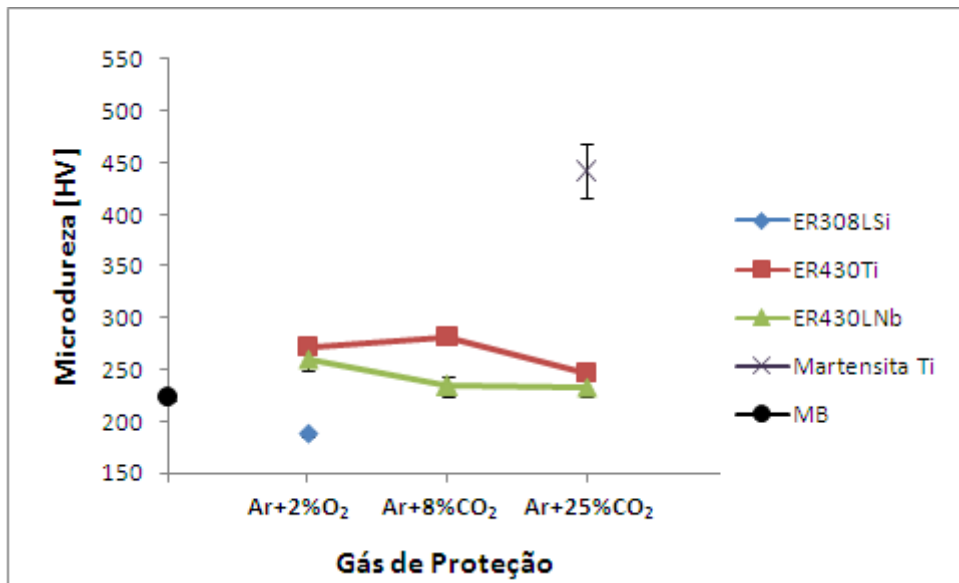


Figura 6.59. Microdureza medidas na matriz austenítica ou ferrítica e martensita da zona fundida em função do gás de proteção utilizados após o ensaio de embutimento dos corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932

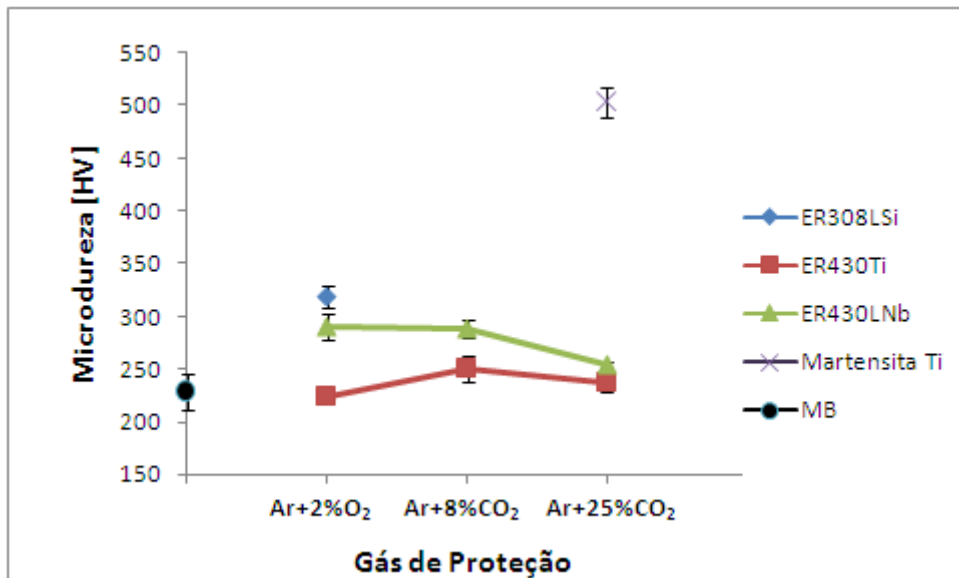


Figura 6.60. Microdureza medidas na matriz austenítica ou ferrítica e martensita da zona fundida em função do gás de proteção utilizados após o ensaio de embutimento dos corpos de prova soldados no metal de base AISI 441

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	12
	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 6.61 e 6.62 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 relacionada ao maior encruamento ocasionado pelos grandes deslocamentos do punção, gerando grandes deformações na zona termicamente afetada.

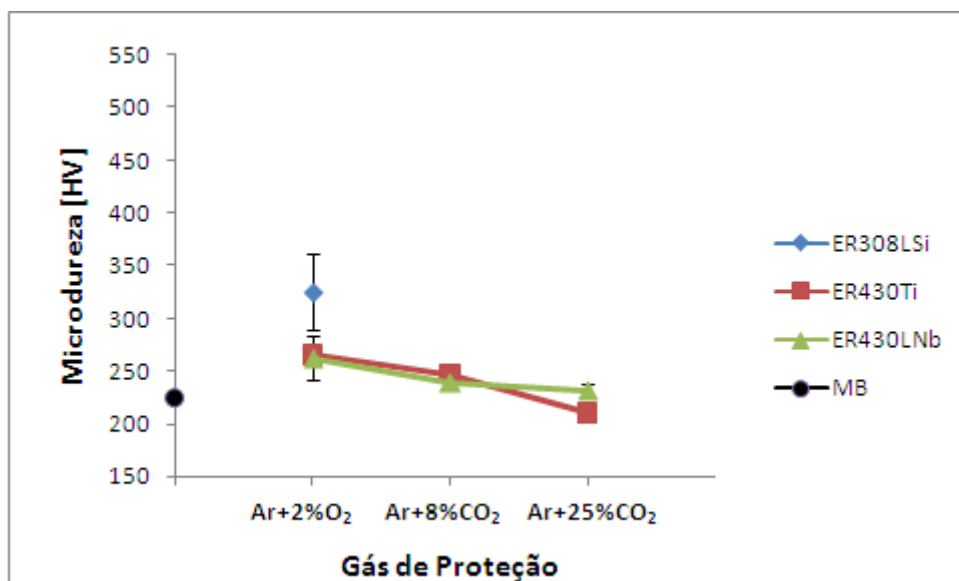


Figura 6.61. Microdureza medidas na matriz austenítica ou ferrítica da zona termicamente afetada em função do gás de proteção utilizados após o ensaio de embutimento dos corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932

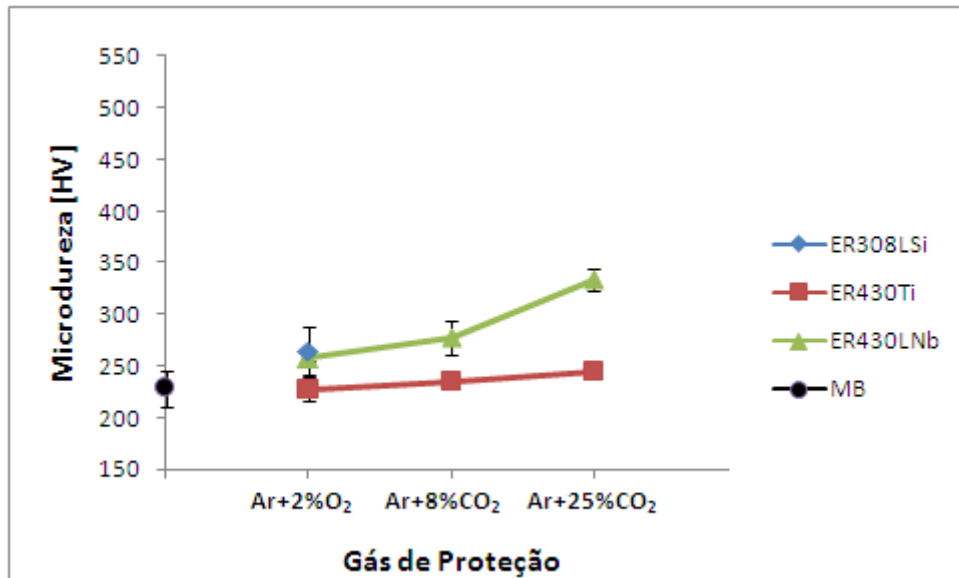


Figura 6.62. Microdureza medidas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada em função do gás de proteção utilizados após o ensaio de embutimento dos corpos de prova soldados no metal de base AISI 441

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. Conclusões Parciais

Como conclusões parciais deste Capítulo pode-se afirmar que:

- 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.

- Não se observaram variações na força e energia para os ensaios de dobramento realizados com os metais de adição ER308LSi e ER430LNb, independentemente do gás de proteção utilizados.

- Para o ensaio de dobramento com o metal de adição ER430Ti, até 8% de dióxido de carbono não se observaram variações na força e energia.

- Observaram-se quedas na força e energia 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.

- Não se observaram variações na força máxima, deslocamento do punção, energia, inclinação da curva de relação força em função do deslocamento para os ensaios de embutimento realizados com os metais de adição ER308LSi e ER430LNb, independentemente do gás de proteção utilizados.

- Para o metal de adição ER430Ti observou-se uma queda da força máxima, deslocamento do punção, energia e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento com o acréscimo de dióxido de carbono no gás de proteção utilizados.

- Em termos de microdureza observaram-se pequenos aumentos relacionados ao encruamento do material, não se observando variações significativas neste quesito com o acréscimo do dióxido de carbono no gás de proteção após o ensaio de 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%O<sub>2</sub> e com os metais de adição de aço inoxidável ferrítico ER430Ti e ER430LNb e gases de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub> 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, ele 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 que é o 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 adição, quando diluído ao 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 (*Double Loop Electrochemical Potentionkinetic Reactivation*), 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<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (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.

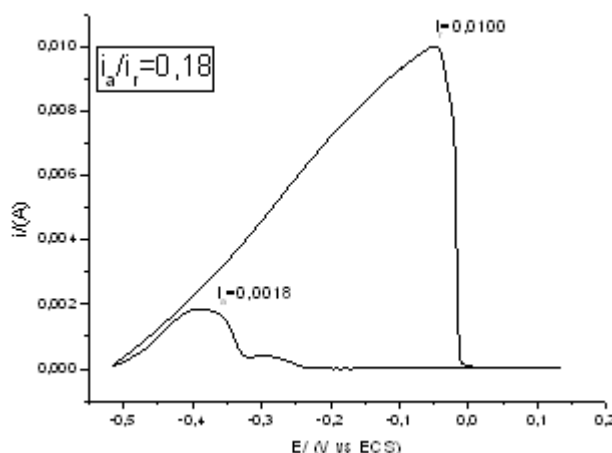
As análises serão divididas segundo os metais de adição estudados, seguido de uma comparação final dos resultados obtidos.

### 7.1.1. ER308LSi

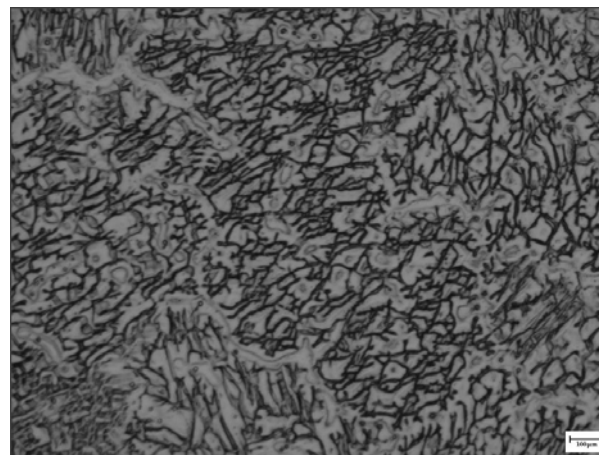
As Figuras 7.1 e 7.3 apresentam (a) o gráfico da curva referente à polarização anódica e à polarização reversa, com a razão  $i_a/i_r$  e (b) a microestrutura com 500 vezes de aumento do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %, para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> respectivamente nos metais de base UNS 43932 e AISI 441.

Analisando a Figura 7.1 (b), observa-se, com base na composição química do material, ataque realizado e em literatura corrente (Madeira (2007), Silva et al. (2005)), um ou mais grãos completamente envoltos 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.

Realizando análise similar na Figura 7.3 (b) também se observa 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.



a



b

Figura 7.1. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> 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 %

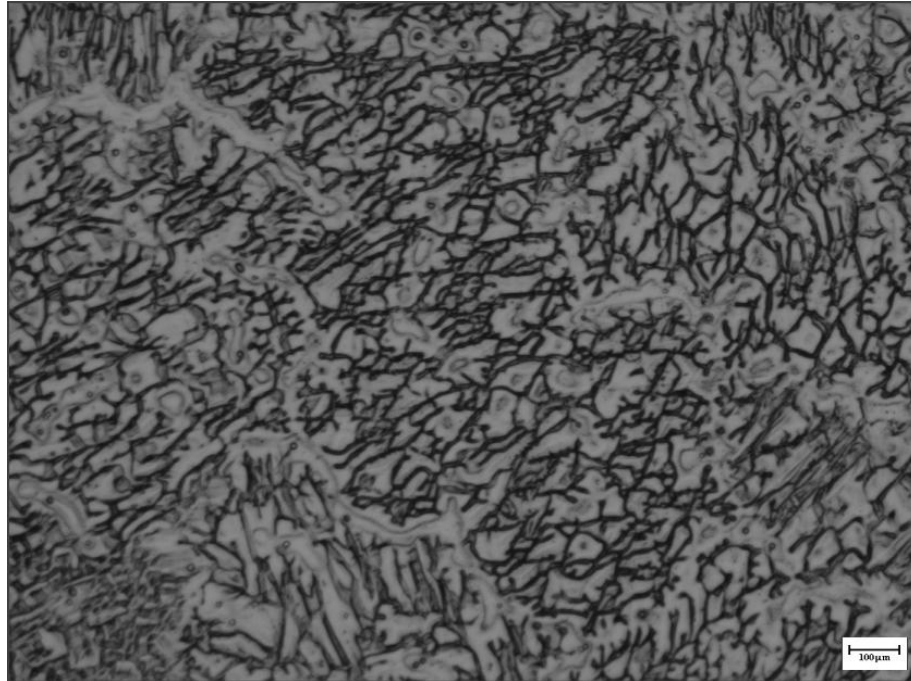
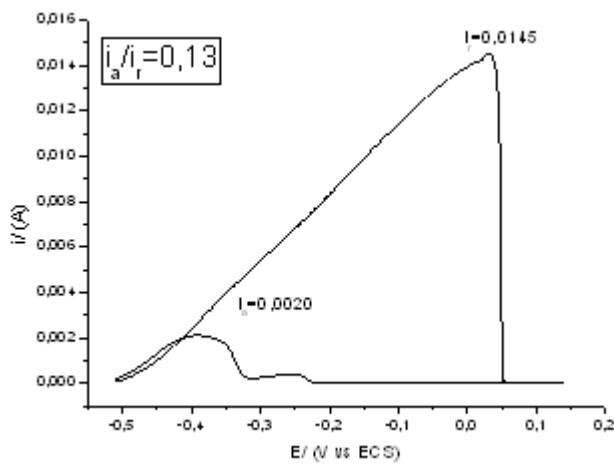
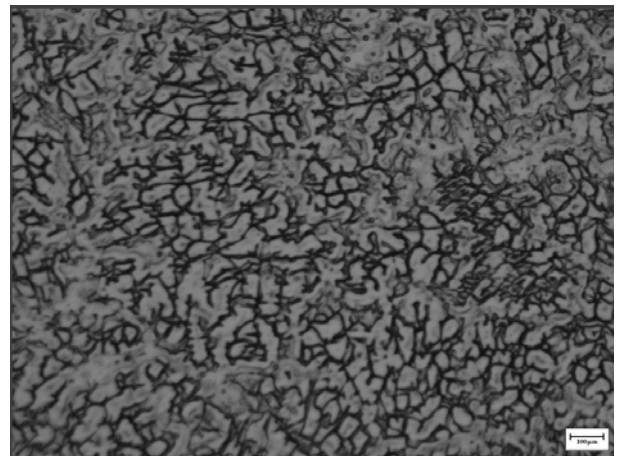


Figura 7.2. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> no metal de base UNS 43932 atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %



a



b

Figura 7.3. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> no metal de base AISI 441 (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 %

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 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 a quantidade 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.

### 7.1.2. ER430Ti

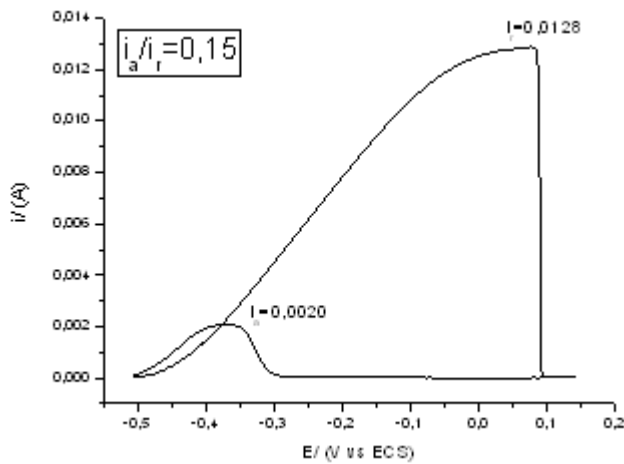
As Figuras 7.4, 7.5 e 7.6 apresentam (a) o gráfico da curva referente à polarização anódica e à polarização reversa, com a razão  $I_a/I_r$  e (b) a microestrutura com 500 vezes de aumento do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %, para os corpos de prova soldados no metal de base UNS43932, com o metal de adição ER430Ti e respectivamente os gases de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>.

Na Figura 7.4 (b) observa-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 o 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).

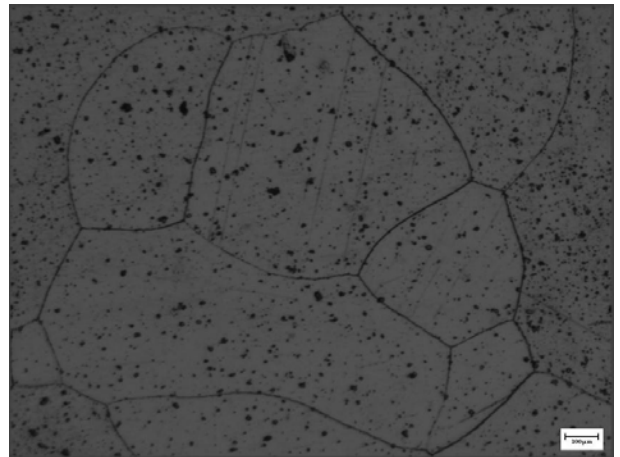
Moreira (2009) soldando o aço inoxidável ferrítico UNS43932 com arame tubular bi-estabilizado ao nióbio e titânio com o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> não observou corrosão intergranular. Provavelmente a discrepância dos valores encontrados pelo o autor quando comparado com os resultados obtidos neste trabalho deve estar relacionado à maior estabilizado 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 susceptíveis que os demais aços inoxidáveis estudados.

Para os gases de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub> apresentados respectivamente nas Figuras 7.5 e 7.6 (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%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub> foram respectivamente de 0,28 (Figura 7.4 (a)) e 0,38 (Figura 7.4 (a)) e correspondentes a uma estrutura “ditch”.

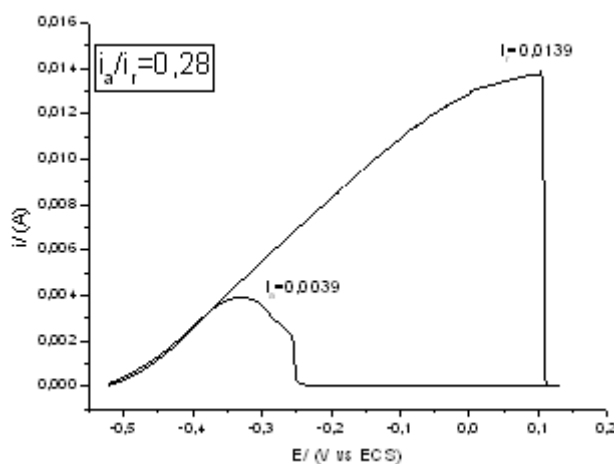


a

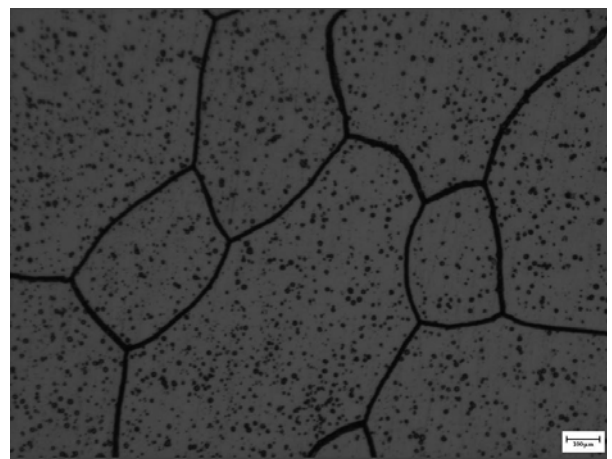


b

Figura 7.4. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> 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 %

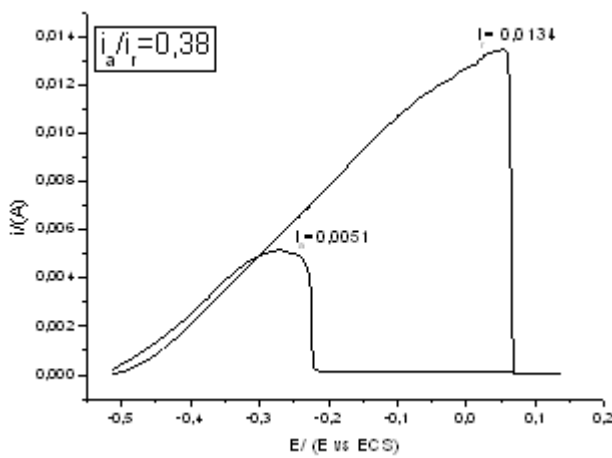


a

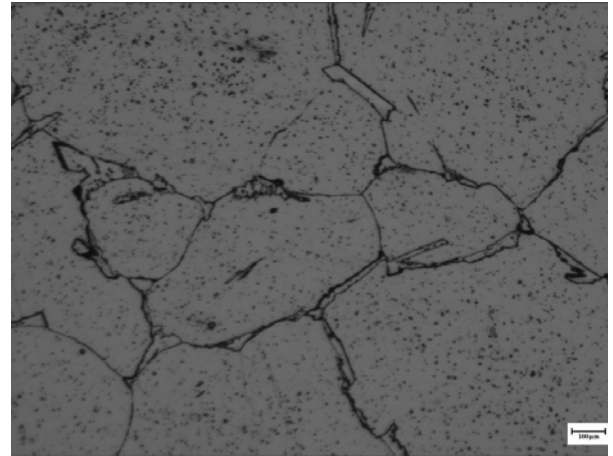


b

Figura 7.5. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub> 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



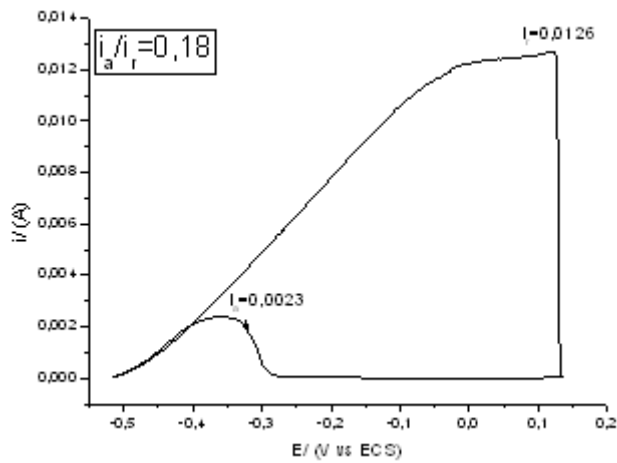
b

Figura 7.6. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> 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 %

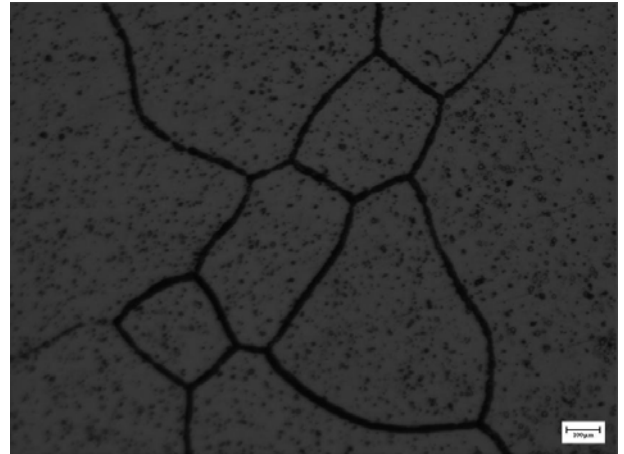
As Figuras 7.7, 7.8 e 7.9 apresentam (a) o gráfico da curva referente à polarização anódica e à polarização reversa, com a razão  $i_a/i_r$  e (b) a microestrutura com 500 vezes de aumento do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %, para os corpos de prova soldados no metal de base AISI 441, com o metal de adição ER430Ti e respectivamente os gases de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>.

Para todos os gases de proteção (Ar+2%O<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>) apresentados nas Figuras 7.7, 7.8 e 7.9 (b) observa-se um ou mais grãos completamente envolvidos 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%O<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub> foram respectivamente de 0,18 (Figura 7.7 (a)), 0,34 (Figura 7.8 (a)) e 0,38 (Figura 7.9 (a)) e correspondentes a uma estrutura "ditch".



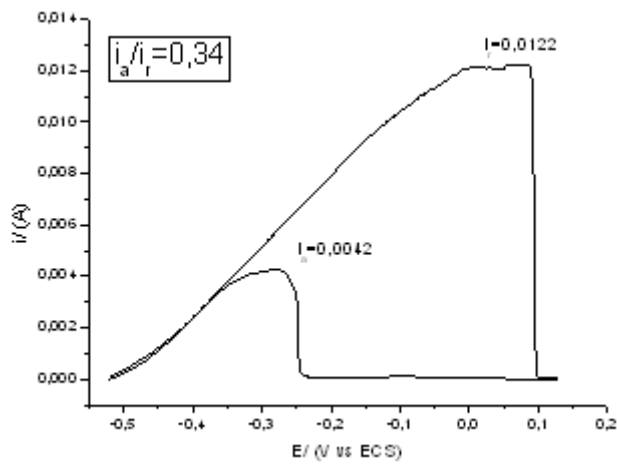


a

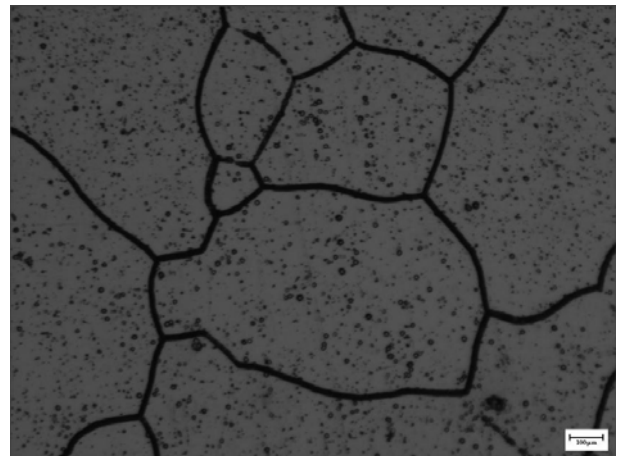


b

Figura 7.7. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> no metal de base AISI 441 (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 %

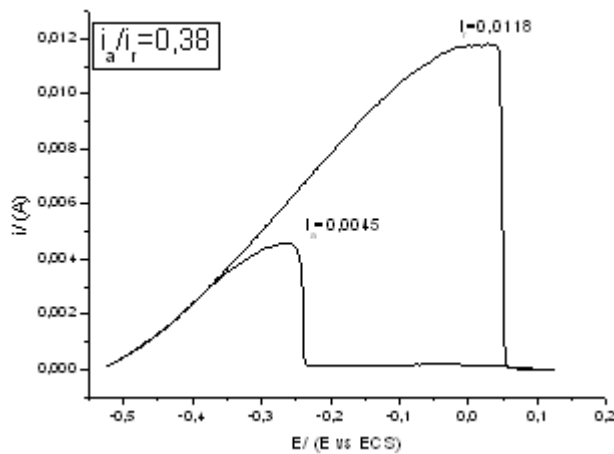


a

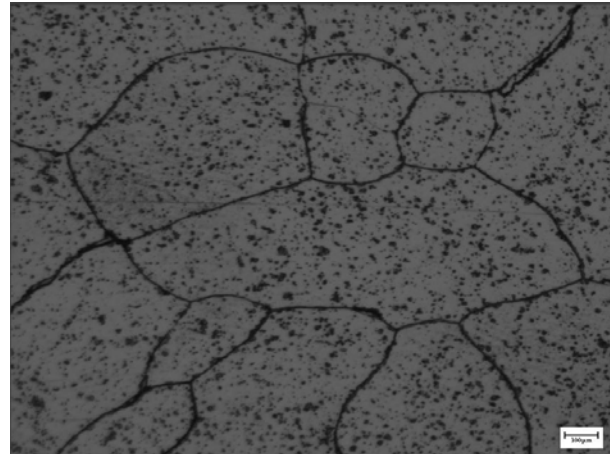


b

Figura 7.8. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub> no metal de base AISI 441 (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 7.9. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> no metal de base AISI 441 (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 formação das estruturas “ditches” próximas aos contornos de grão se deve a formação 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.

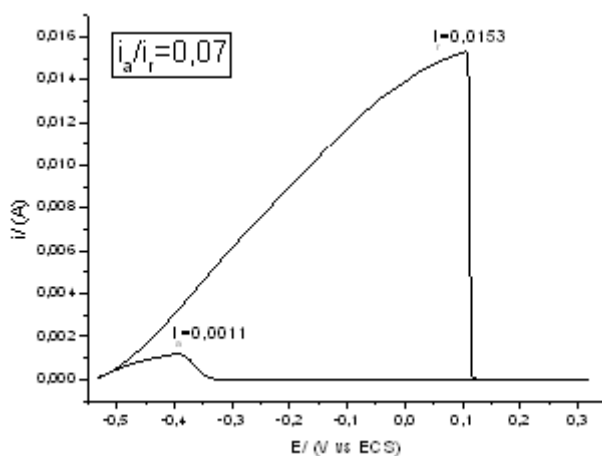
### 7.1.3. ER430LNb

As Figuras 7.10, 7.11 e 7.12 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%O<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>.

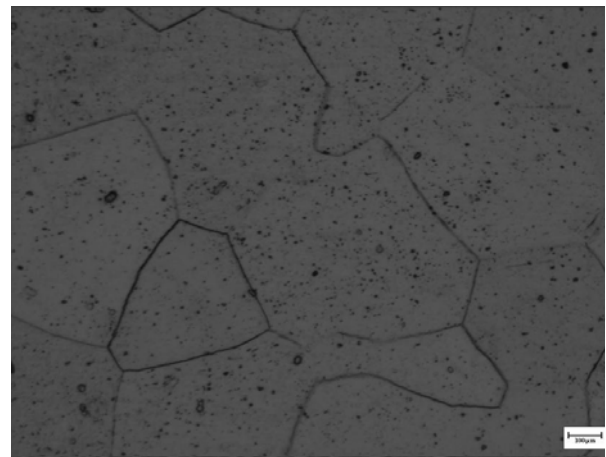
Nas Figuras 7.10 (Ar+2%O<sub>2</sub>) e 7.11 (b) (Ar+8%CO<sub>2</sub>) observam-se alguns contornos com “ditches”, somado a “steps”, mas sem nenhum grão completamente contornado por

“ditches” caracterizando-se uma estrutura “dual”. A relação das taxas de corrente ( $i_a/i_r$ ) 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%CO<sub>2</sub> apresentado na Figura 7.12 (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 7.12 (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%CO<sub>2</sub>, conforme discutido por Liao; Chen (1998).

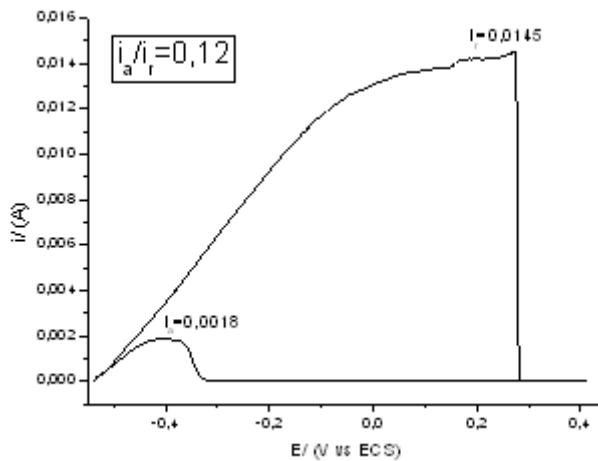


a

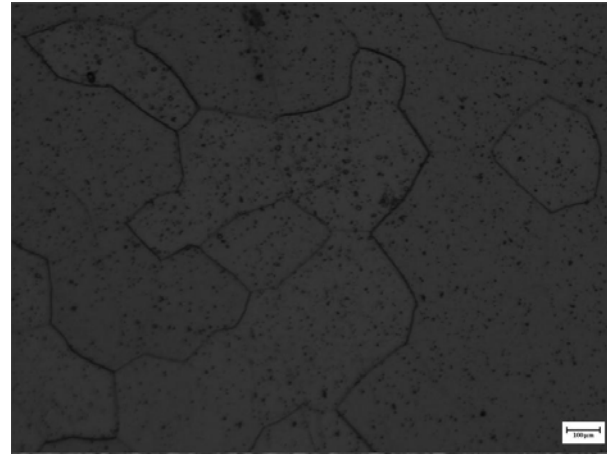


b

Figura 7.10. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> 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 %

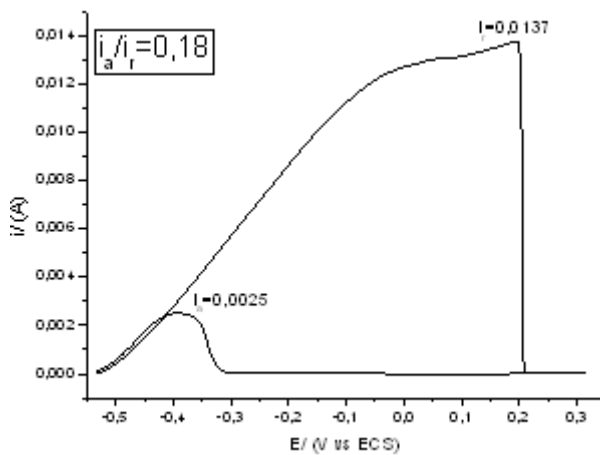


a

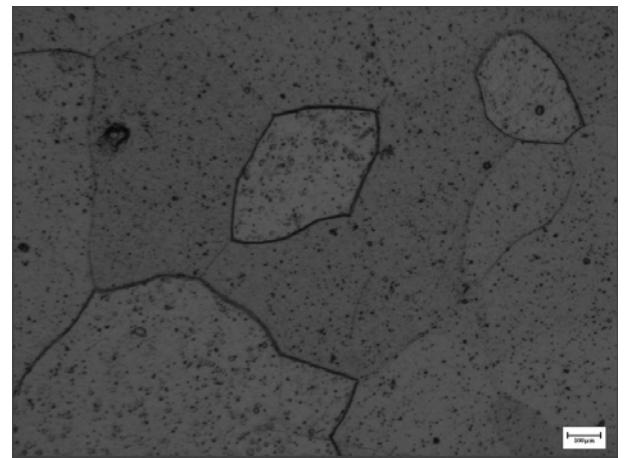


b

Figura 7.11. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub> 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



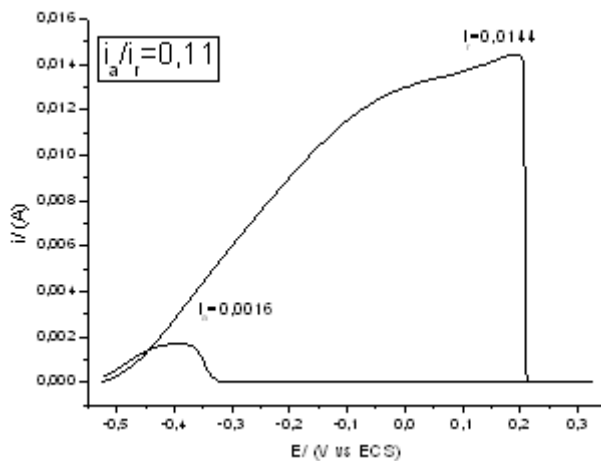
b

Figura 7.12. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> 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 %

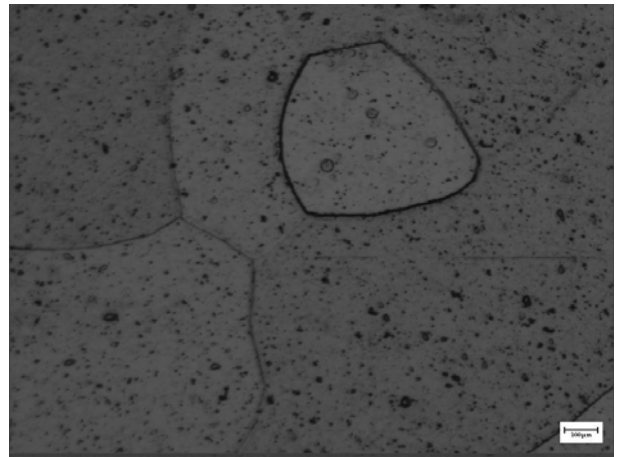
As Figuras 7.13, 7.14 e 7.15 apresentam (a) o gráfico da curva referente à polarização anódica e à polarização reversa, com a razão  $i_a/i_r$  e (b) a microestrutura com 500 vezes de aumento do corpo de prova atacado em uma solução de cristais de ácido oxálico a 10 %,

para os corpos de prova soldados no metal de base AISI 441, com o metal de adição ER430LNb e respectivamente os gases de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>, Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+25%CO<sub>2</sub>.

Uma análise similar a que foi realizada para o metal de base UNS 43932 pode ser realizada nas Figuras 7.13 (Ar+2%O<sub>2</sub>), 7.14 (Ar+8%CO<sub>2</sub>) e 7.15 (b) (Ar+25%CO<sub>2</sub>), 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”. Em relação as taxas de corrente ( $i_a/i_r$ ) encontrou-se para todas as situações uma estrutura “ditch”, com os grãos completamente circundados por carbonetos de cromo, concordando com o que foi observado na microestrutura.

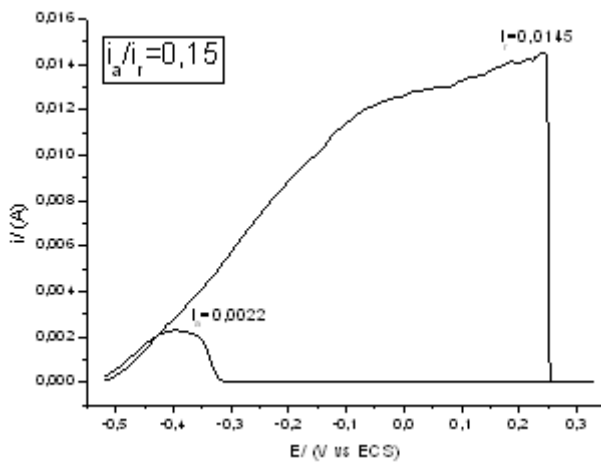


a

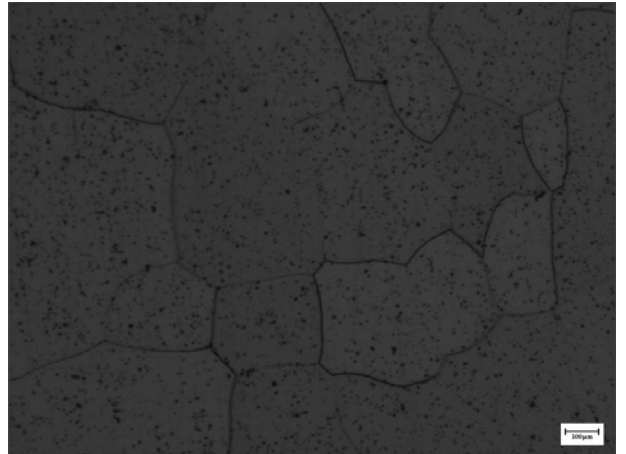


b

Figura 7.13. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> no metal de base AISI 441 (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 %

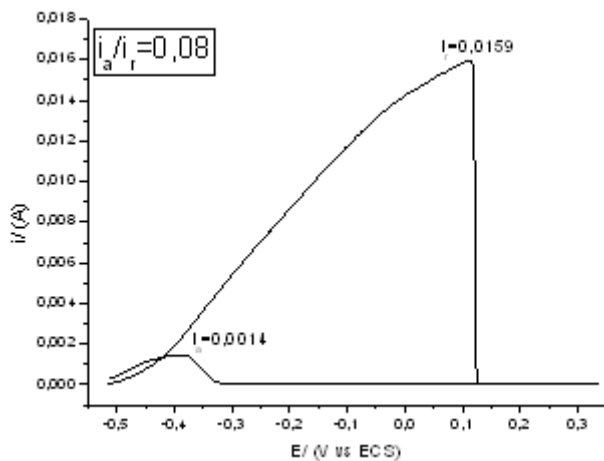


a

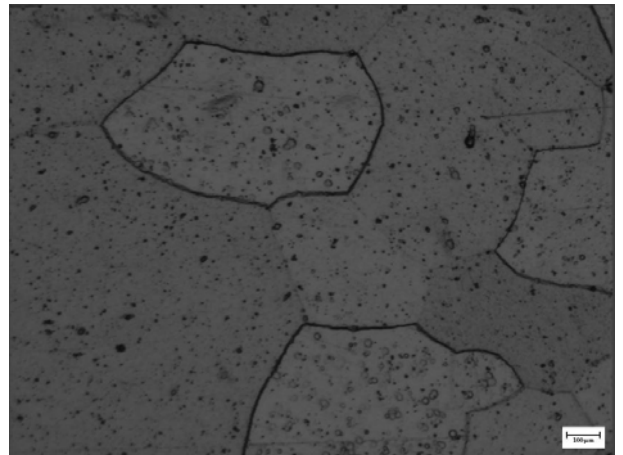


b

Figura 7.14. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub> no metal de base AISI 441 (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 7.15. Corpo de prova soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> no metal de base AISI 441 (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 formação da estrutura “ditch” próxima aos contornos de grão se deve ao carbono introduzido com o acréscimo de dióxido de carbono.

## 7.2. 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 7.16 e 7.17 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) verificou 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 susceptíveis.

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 <sub>2</sub>	0,18
		Ar+2%O <sub>2</sub>	0,15
	ER430Ti	Ar+8%CO <sub>2</sub>	0,28
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	0,38
	ER430LNb	Ar+2%O <sub>2</sub>	0,07
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	0,12
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	0,18
AISI 441	ER308LSi	Ar+2%O <sub>2</sub>	0,13
		Ar+2%O <sub>2</sub>	0,18
	ER430Ti	Ar+8%CO <sub>2</sub>	0,34
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	0,38
	ER430LNb	Ar+2%O <sub>2</sub>	0,11
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	0,15
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	0,18

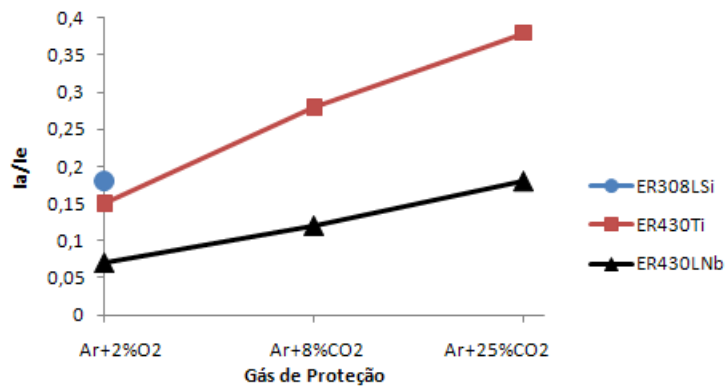


Figura 7.16. Nível de sensitização em função do gás de proteção para cordões soldados com os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb no metal de base UNS 43932



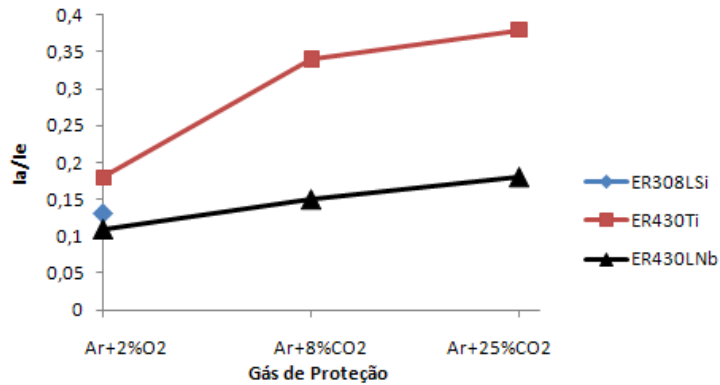


Figura 7.17. Nível de sensitização em função do gás de proteção para cordões soldados com os metais de adição ER308LSi, ER430Ti e ER430LNb no metal de base AISI 441

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 o 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.

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 microestrutura observou corrosão quando utilizaram-se gases ativos para a soldagem do material, condizendo com os resultados que foram obtidos neste trabalho.

## CAPÍTULO VIII

### CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos durante o Capítulo IV foi possível chegar as seguintes conclusões:

- O metal de adição ER430Ti não possui estabilização adequada, baseado nos cálculos sugeridos pela literatura. Esta estabilização é verificada para o metal de adição ER430LNb.
- A frequência de curto-circuito tende a aumentar com a adição de oxigênio ou dióxido de carbono na mistura com argônio, independente do valor da DBCP.
- A presença do titânio como elemento estabilizante reduz de forma significativa a frequência de curto-circuito.
- Conseguiu-se para todas as condições estudadas neste trabalho soldar por curto-circuito com a mesma energia fornecida pela tocha de soldagem.
- Há uma formação de núcleos de óxidos, na parte superior da zona fundida, ao se utilizar o metal de adição de aço inoxidável austenítico (ER308LSi), sendo ainda mais pronunciada com o aumento de dióxido de carbono no gás de proteção.

A partir dos resultados obtidos durante o Capítulo V 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 quando se utilizou o metal de base AISI 441 em relação ao UNS 43932.
- A microestrutura da zona fundida quando se soldou com o metal de adição ER308LSi foi composta por austenita com veios de ferrita, observando-se uma redução da quantidade de ferrita com o aumento de dióxido de carbono no gás de proteção. Não ocorreram variações significativa da microdureza independentemente do metal de base, gás de proteção e metal de adição utilizados.
- A microestrutura da zona fundida quando se soldou com o metal de adição ER430Ti foi composta por uma matriz ferrítica com precipitados no interior do grão. Houve um aumento da quantidade de precipitados com o aumento do dióxido de carbono no gás de proteção, acarretando em um aumento da microdureza do material. Ao se utilizar o gás de proteção com 25 % de dióxido de carbono, além da matriz ferrítica com precipitados nos interior do grão, se observou a presença de martensita de contorno de grão com valores de microdureza próximas à 350 HV para os dois metais de base estudados (UNS 43932 e AISI 441).
- A microestrutura da zona fundida ao se soldar com o metal de adição ER430LNb foi composta somente pela matriz ferrítica e precipitados no interior do grão independentemente do gás de proteção utilizado, observando um aumento destes precipitados com o aumento de dióxido de carbono.
- Não ocorreu formação de martensita ao se soldar com o metal de adição ER430LNb independentemente do gás de proteção utilizado (até 25 % de dióxido de carbono).

A partir dos resultados obtidos durante o Capítulo VI foi possível chegar as seguintes conclusões:

- 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.

- Os ensaios de dobramento para os corpos de prova soldados com os três metais de adição estudados não apresentaram ruptura devido a uma fratura frágil, com exceção dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti e gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> para ambos metais de base, onde ocorreram fraturas na zona fundida, provavelmente, devido a presença de martensita.
- Os corpos de prova soldados com os metais de adição ER308LSi e ER430LNb independentemente do gás de proteção e metal de base utilizados não sofreram variações significativas nos ensaios de embutimento, podendo-se concluir portanto, que não ocorreram variações significativas na ductilidade dos cordões de solda.
- Para os corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti verificou-se uma queda da ductilidade dos cordões de solda pelo ensaio de embutimento com o acréscimo de dióxido de carbono no gás de proteção.

A partir dos resultados obtidos durante o Capítulo VII foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Verificou-se que para a zona fundida do metal de adição ER430LNb não houve um acréscimo acentuado da sensitização medida pelo ensaio DL-EPR, ficando para os dois metais de base e independentemente do gás de proteção utilizados inferior ao valor medido na zona fundida do ER308LSi, que foi tomada como referência.
- Para a zona fundida dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti observou-se um aumento da sensitização com o acréscimo de dióxido de carbono no gás de proteção.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho chegar à seguinte conclusão:

- Levando em consideração os ensaios realizados neste trabalho, como conclusão final pode-se afirmar que não se deve utilizar o metal de adição ER430Ti com gás de proteção diferente do Ar+2%O<sub>2</sub>, que já é utilizado pela indústria. Os outros dois metais de adição, levando em consideração os testes realizados, apresentaram viabilidade na utilização do gás de proteção com até 25% de dióxido de carbono.

# 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 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. Estudar a influência da quantidade de dióxido de carbono no gás de proteção na fadiga a quente, pois esta é a segunda causa mais influente do final de vida de exaustores automotivos.
9. 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.
10. Para os aços utilizados inoxidáveis ferríticos simular ciclos de aquecimento e verificar formações da fase Laves, onde ela ocorrerá preferencialmente (ZF, ZAC 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 Metallurgy: **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 CO<sub>2</sub> 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.; TREMILIOSI 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 CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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.

DUTRA, J. C., MIG/MAG – Transferência metálica por curto-circuito – fontes de soldagem versus gases do arco. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v.. 13, n. 1, p. 019-024, Jan/Mar 2008.

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 Fe<sub>3</sub>Nb<sub>3</sub>C carbide and Fe<sub>2</sub>Nb Laves phase in niobium alloyed ferritic stainless steels. **ISIJ 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, World Congress and Exhibition, 2003 Detroit USA. **Anais World 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.

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.

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 Engineering A320**, p. 75-80, 1997.

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

LEE, S. B.; JUNG, M. C.; SONG, H.; RHEE, C. H. Effect of niobium on nitrogen solubility in high chromium steel. **SIJ International**, v. 42, n. 6, p. 603-608, 2002.

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. **Weld 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.

SEDRICKS, A. J. **Corrosion of stainless steels**, **The electrochemical society**, 2<sup>o</sup> 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: 3<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 3, 2005, **Anais 3<sup>o</sup> 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 Innovation**, 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.

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.



## ANEXO A

### RESULTADOS COMPLEMENTARES DO CAPÍTULO IV

Neste anexo encontram-se as Figuras com os oscilogramas de corrente e tensão, as Figuras com os aspectos e as Tabelas completas dos perfis dos cordões de solda para todas as condições de soldagem.

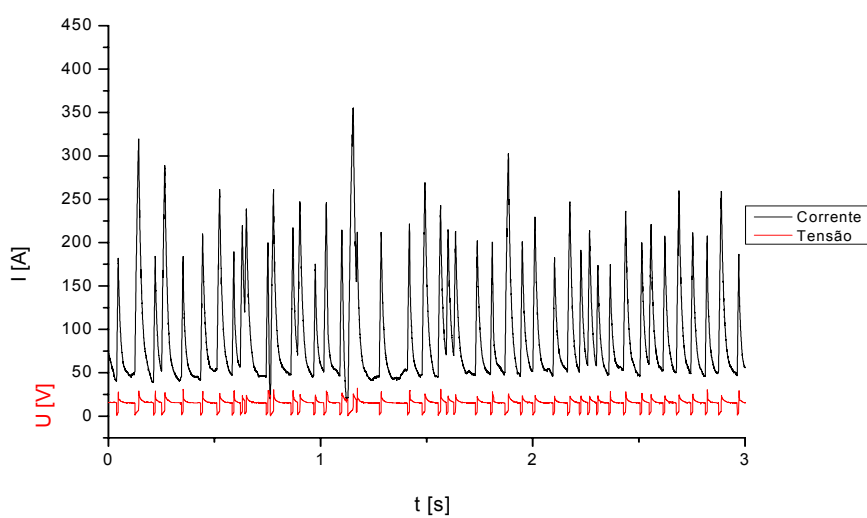


Figura A.1. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Argônio

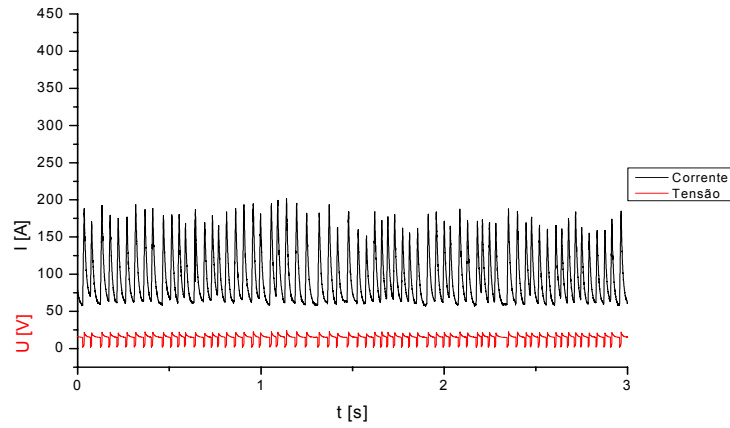


Figura A.2. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>

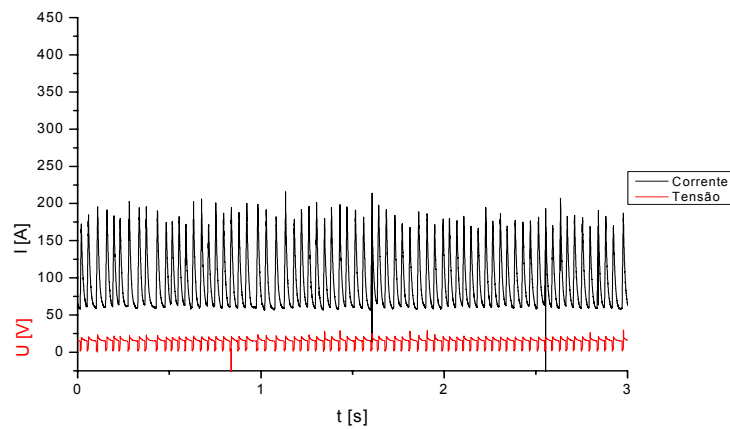


Figura A.3. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+4%CO<sub>2</sub>

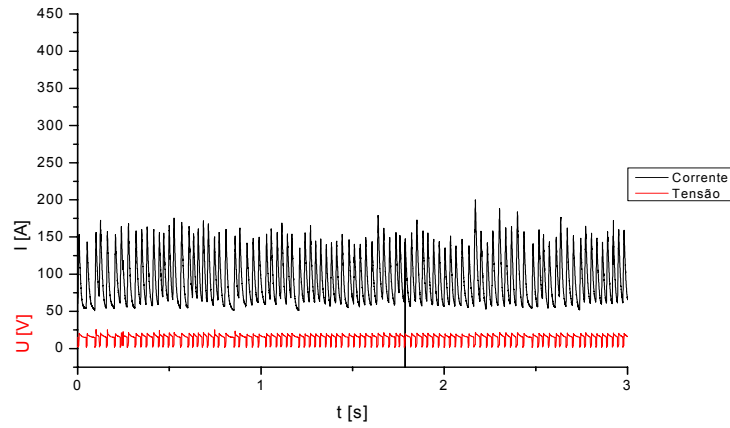


Figura A.4. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub>

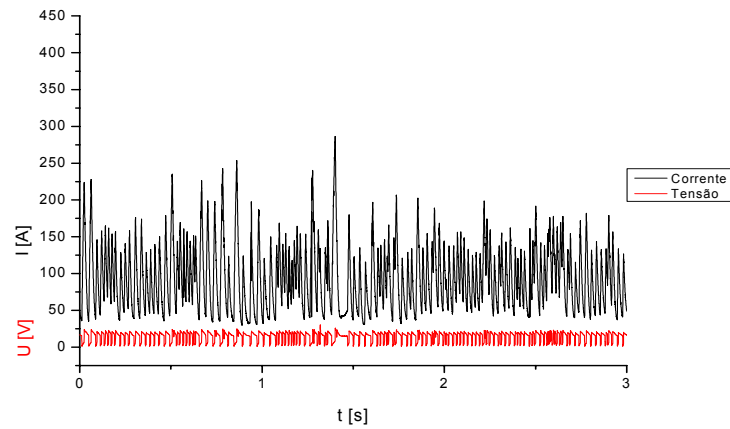


Figura A.5. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub>

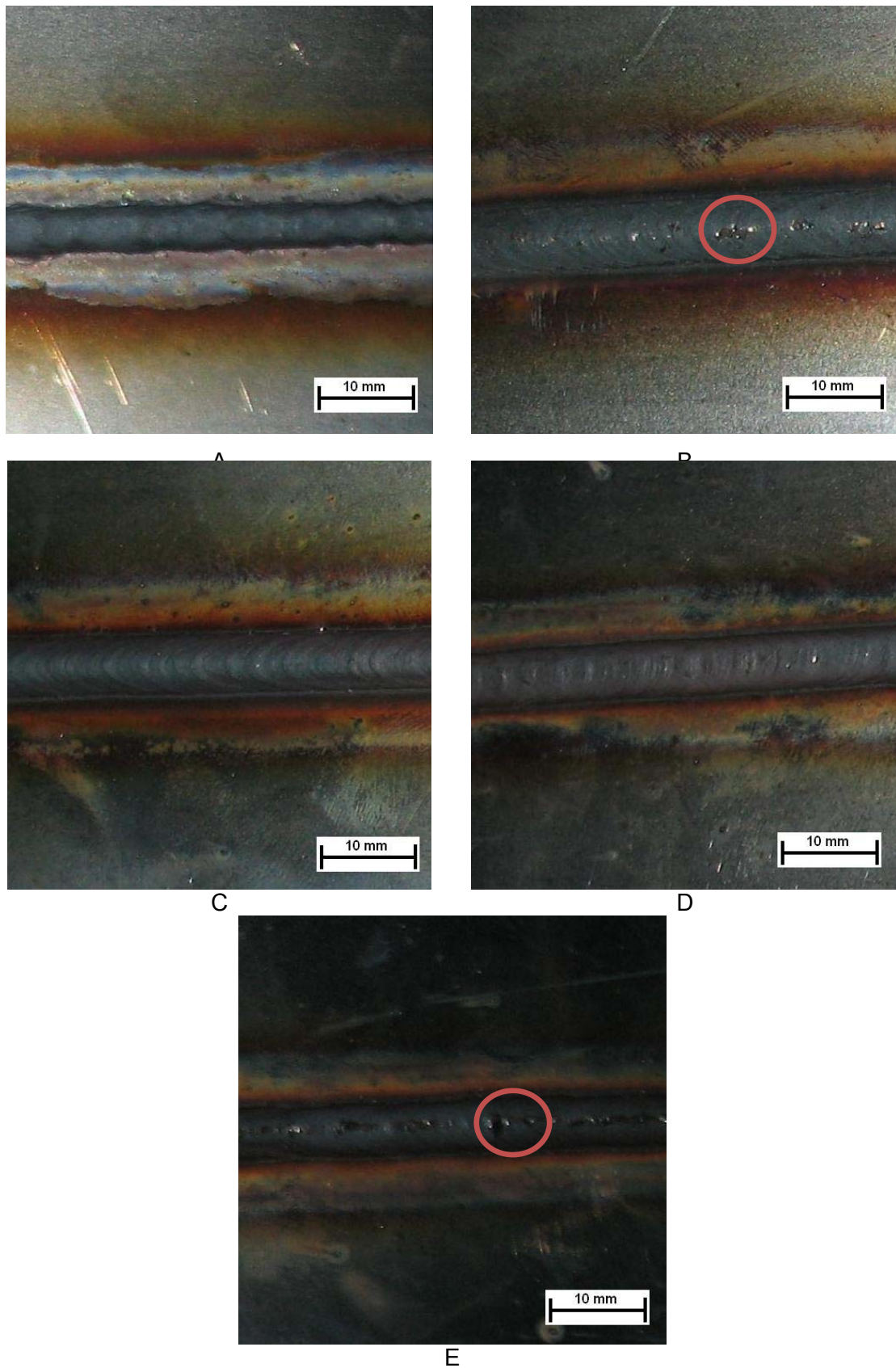


Figura A.6. Aspectos dos cordões de solda quando soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER308LSi, e gás de proteção: (a) Ar, (b) Ar+2%O<sub>2</sub>, (c) Ar+4%CO<sub>2</sub>, (d) Ar+8%CO<sub>2</sub> e (e) Ar+25%CO<sub>2</sub>

Tabela A.1. Medições de largura realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Largura				
			A	B	C	Média	Desvio
UNS 43932	ER308LSi	Ar	5,60	5,70	5,73	5,68	0,06
		Ar+2%O <sub>2</sub>	8,00	7,37	7,09	7,49	0,38
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	7,27	7,72	7,50	7,50	0,22
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	6,07	7,24	5,97	6,43	0,58
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	5,50	6,15	7,12	6,26	0,67
AISI 439	ER308LSi	Ar	7,56	7,08	8,74	7,79	0,70
		Ar+2%O <sub>2</sub>	6,77	7,77	7,52	7,35	0,42
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	7,24	7,87	8,46	7,86	0,50
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	6,97	7,47	7,41	7,28	0,22
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	5,76	6,16	6,50	6,14	0,30

Tabela A.2. Medições de penetração realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Penetração				
			A	B	C	Média	Desvio
UNS 43932	ER308LSi	Ar	2,32	2,29	2,30	2,30	0,02
		Ar+2%O <sub>2</sub>	2,26	2,32	2,15	2,24	0,09
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	2,13	2,17	2,17	2,16	0,03
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	2,07	2,05	2,04	2,05	0,02
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	2,58	2,17	2,00	2,25	0,30
AISI 439	ER308LSi	Ar	2,05	2,00	2,01	2,02	0,03
		Ar+2%O <sub>2</sub>	2,14	2,24	2,11	2,16	0,07
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	2,50	2,08	2,10	2,23	0,24
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	2,87	3,09	2,32	2,76	0,40
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	1,95	2,28	2,27	2,17	0,19

Tabela A.3. Medições de reforço realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Reforço				
			A	B	C	Média	Desvio
UNS 43932	ER308LSi	Ar	2,44	2,48	2,84	2,59	0,22
		Ar+2%O <sub>2</sub>	2,57	2,13	2,51	2,40	0,24
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	2,59	2,47	2,53	2,53	0,08
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	2,24	3,18	2,40	2,61	0,50
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	2,42	2,36	3,10	2,63	0,41
AISI 439	ER308LSi	Ar	2,41	2,61	2,31	2,44	0,15
		Ar+2%O <sub>2</sub>	1,89	2,27	2,24	2,13	0,21
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	2,05	2,49	2,47	2,34	0,25
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	2,28	1,95	2,32	2,18	0,20
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	2,92	2,46	2,50	2,63	0,25

Tabela A.4. Medições de área total e área fundida realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER308LSi nos metais de base UNS43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Área Total			Área Fundida		
			A	B	C	A	B	C
UNS 43932	ER308LSi	Ar	16,40	17,18	19,72	7,66	7,71	7,31
		Ar+2%O <sub>2</sub>	22,75	19,08	20,56	8,71	8,85	8,08
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	20,92	20,95	21,02	8,03	8,32	8,21
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	17,26	24,61	17,70	7,67	7,24	7,75
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	18,14	16,81	23,11	8,27	7,44	7,17
AISI 439	ER308LSi	Ar	19,73	20,72	25,29	7,50	7,28	13,75
		Ar+2%O <sub>2</sub>	17,15	20,10	19,62	8,91	8,88	7,84
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	18,67	21,23	24,15	9,06	8,29	8,45
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	23,06	22,02	21,62	13,45	13,65	10,10
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	19,71	18,38	18,75	6,68	8,16	8,13

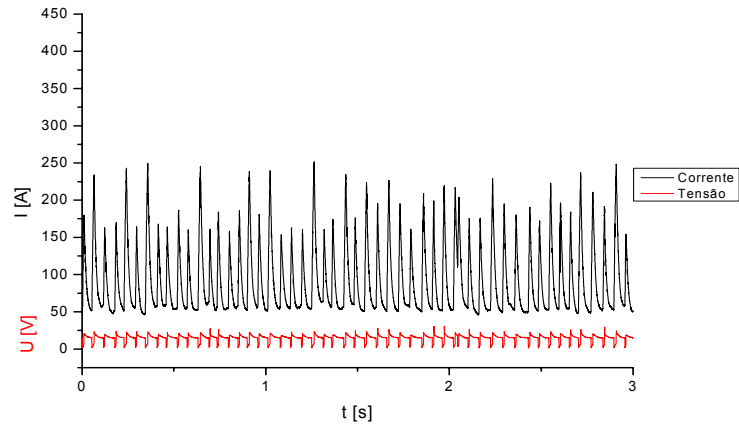


Figura A.7. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção argônio

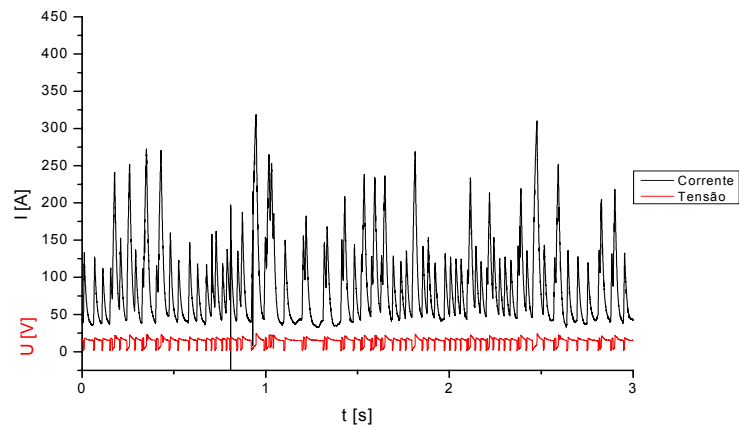


Figura A.8. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>

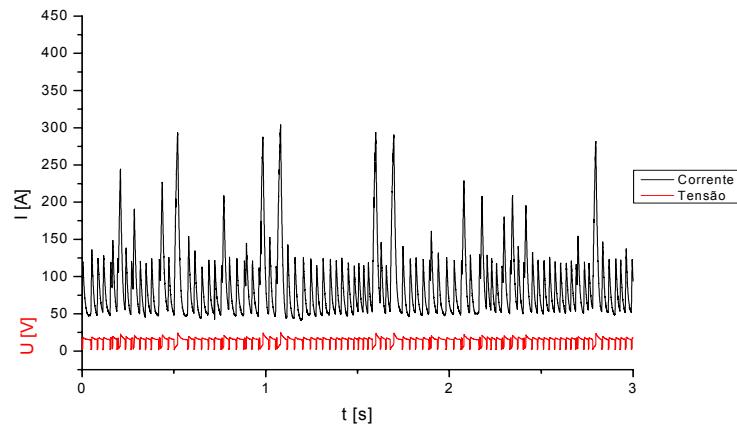


Figura A.9. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+4%CO<sub>2</sub>

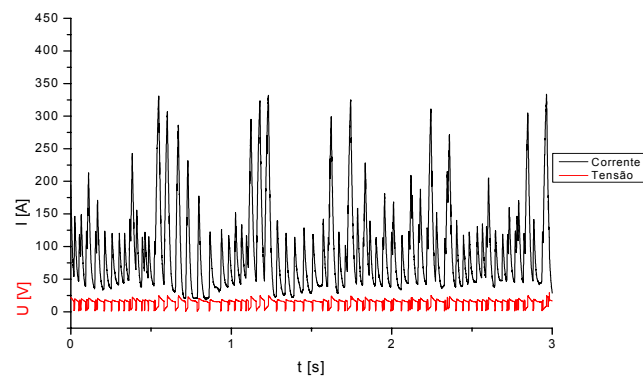


Figura A.10. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub>

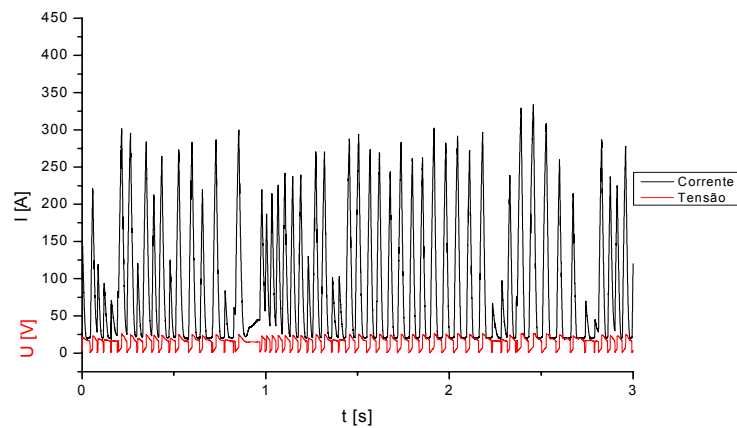


Figura A.11. Oscilograma da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub>



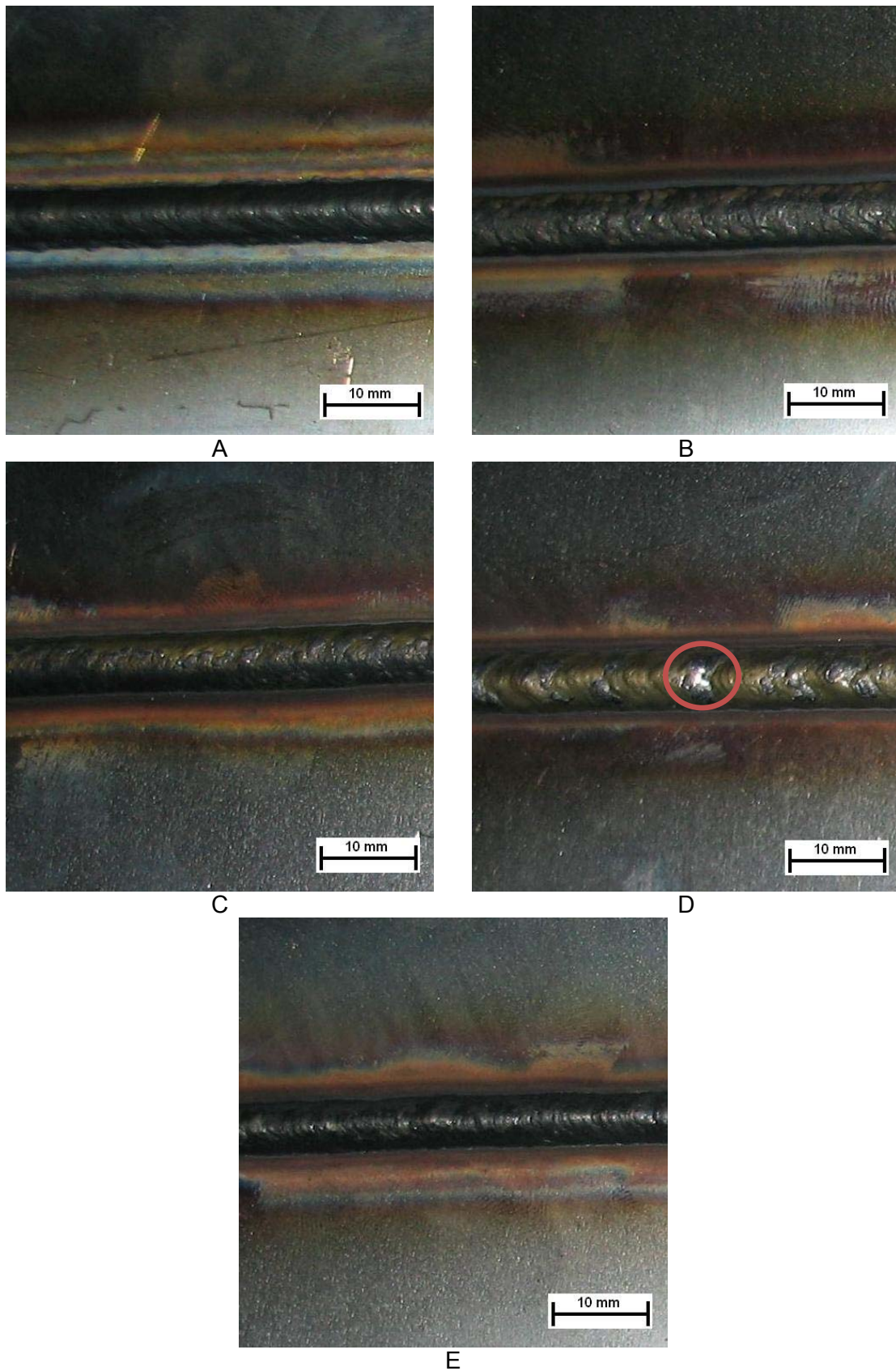


Figura A.12. Aspectos dos cordões de solda quando soldados no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER430Ti e gás de proteção: (a) Ar, (b) Ar+2%O<sub>2</sub>, (c) Ar+4%CO<sub>2</sub>, (d) Ar+8%CO<sub>2</sub> e (e) Ar+25%CO<sub>2</sub>

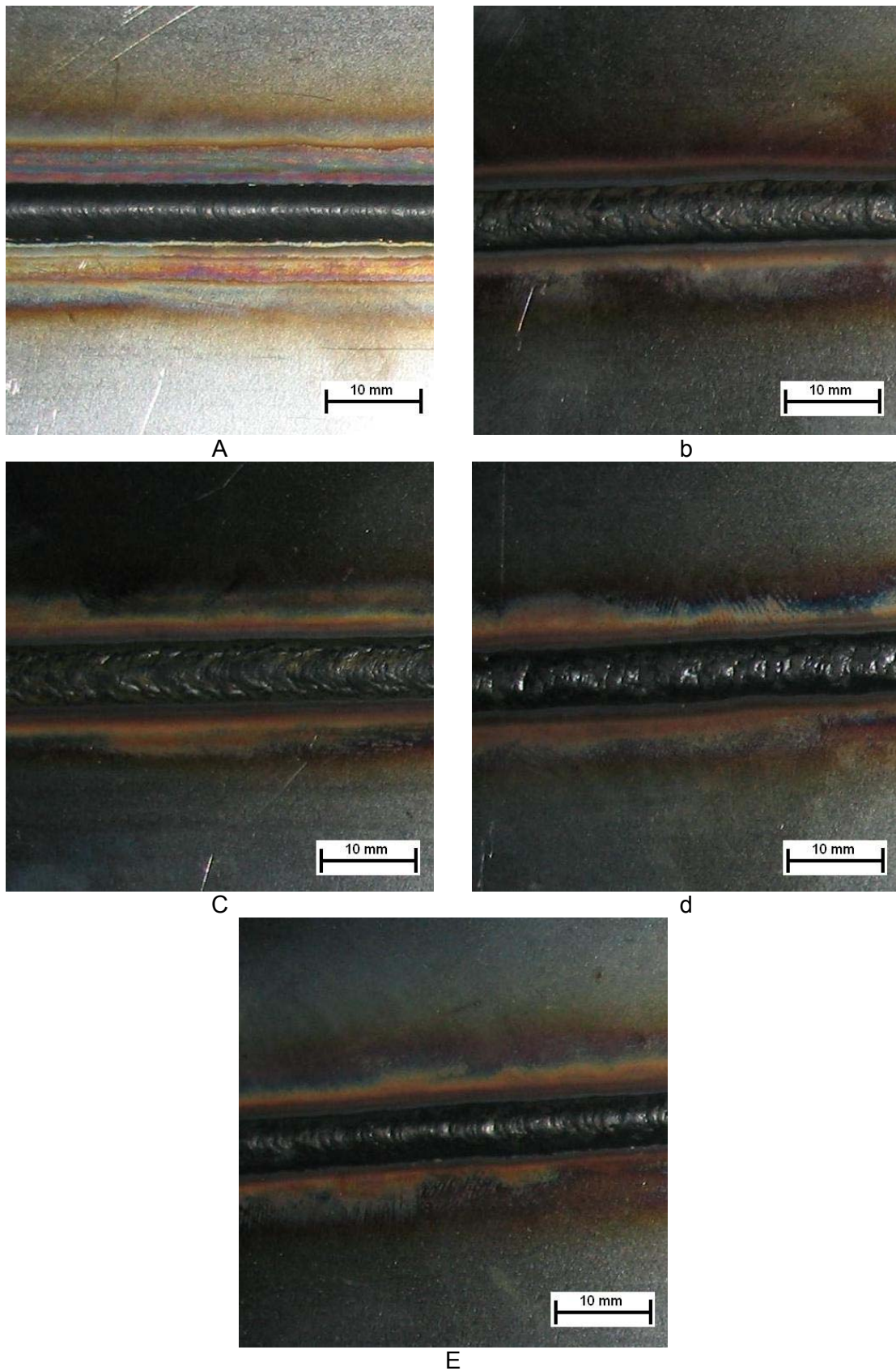


Figura A.13. Aspectos dos cordões de solda quando soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430Ti e gás de proteção: (a) Ar, (b) Ar+2%O<sub>2</sub>, (c) Ar+4%CO<sub>2</sub>, (d) Ar+8%CO<sub>2</sub> e (e) Ar+25%CO<sub>2</sub>

Tabela A.5. Medições de largura realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Largura				
			A	B	C	Média	Desvio
UNS 43932	ER430Ti	Ar	7,00	4,44	6,83	6,09	1,17
		Ar+2%O <sub>2</sub>	7,07	7,57	7,14	7,26	0,22
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	7,06	7,12	6,77	6,98	0,15
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	6,90	7,11	6,68	6,90	0,18
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	6,48	6,02	5,76	6,09	0,30
AISI 439	ER430Ti	Ar	7,49	7,80	7,75	7,68	0,14
		Ar+2%O <sub>2</sub>	7,77	7,44	6,82	7,34	0,39
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	6,23	6,76	6,70	6,56	0,24
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	8,19	7,36	6,84	7,46	0,56
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	8,39	8,64	8,52	8,52	0,13

Tabela A.6. Medições de penetração realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Penetração				
			A	B	C	Média	Desvio
UNS 43932	ER430Ti	Ar	3,38	3,43	3,77	3,53	0,21
		Ar+2%O <sub>2</sub>	2,26	2,05	2,12	2,14	0,11
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	2,15	2,05	2,21	2,14	0,08
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	2,69	2,28	2,77	2,58	0,26
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	3,35	4,22	2,51	3,36	0,86
AISI 439	ER430Ti	Ar	2,43	2,46	2,50	2,46	0,04
		Ar+2%O <sub>2</sub>	2,40	2,27	2,27	2,31	0,08
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	2,20	2,39	2,37	2,32	0,10
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	2,86	2,98	2,90	2,91	0,06
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	2,39	2,31	2,35	2,35	0,06

Tabela A.7. Medições de reforço realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Reforço				
			A	B	C	Média	Desvio
UNS 43932	ER430Ti	Ar	1,85	1,67	1,54	1,69	0,16
		Ar+2%O <sub>2</sub>	2,09	2,20	2,39	2,23	0,15
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	2,00	2,36	2,00	2,12	0,21
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	2,29	2,62	1,73	2,21	0,45
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	1,45	1,42	1,25	1,37	0,11
AISI 439	ER430Ti	Ar	2,15	2,21	2,16	2,17	0,03
		Ar+2%O <sub>2</sub>	2,14	1,74	1,94	1,94	0,20
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	1,98	2,03	1,90	1,97	0,07
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	2,13	1,61	1,75	1,83	0,27
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	2,81	3,23	3,01	3,02	0,30

Tabela A.8. Medições de área total e área fundida realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430Ti nos metais de base UNS43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Área Total			Área Fundida		
			A	B	C	A	B	C
UNS 43932	ER430Ti	Ar	21,18	18,25	20,50	12,69	11,99	14,68
		Ar+2%O <sub>2</sub>	21,89	23,59	23,08	11,69	9,95	10,97
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	21,24	22,61	19,85	10,89	9,92	10,18
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	24,49	21,78	22,23	12,69	8,64	13,89
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	23,60	23,42	15,46	17,97	18,71	10,83
AISI 439	ER430Ti	Ar	21,87	23,55	21,93	12,60	14,22	12,61
		Ar+2%O <sub>2</sub>	27,64	23,20	20,30	14,95	12,95	10,26
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	17,86	22,60	21,30	8,87	12,95	12,72
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	29,35	25,77	23,80	18,26	17,25	16,01
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	25,42	30,72	28,78	10,63	12,41	11,68

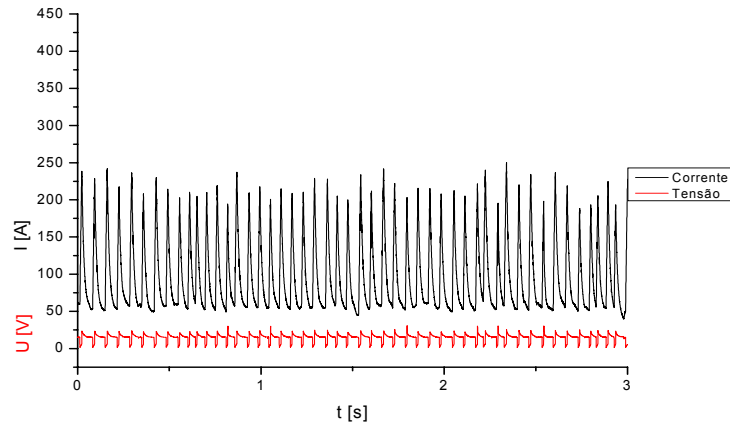


Figura A.14. Gráfico da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção argônio

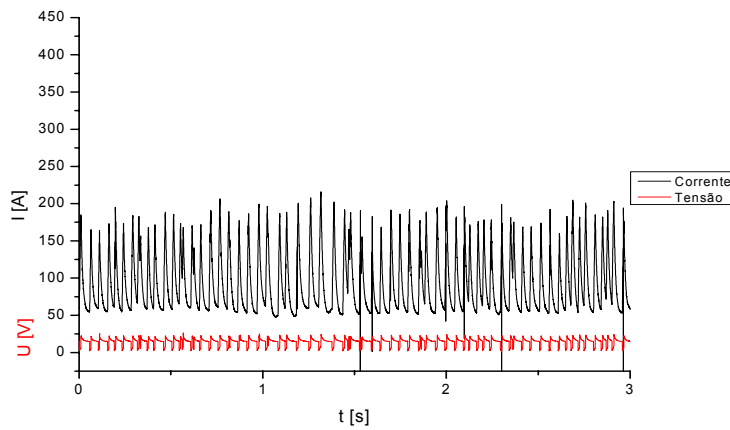


Figura A.15. Gráfico da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>

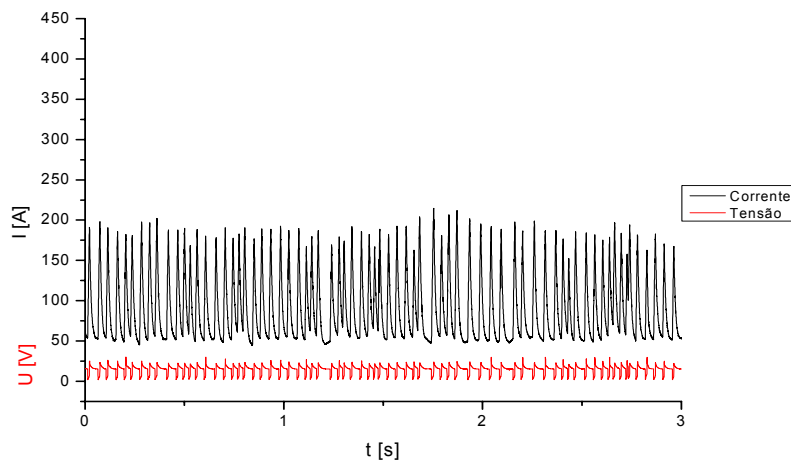


Figura A.16. Gráfico da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+4%CO<sub>2</sub>

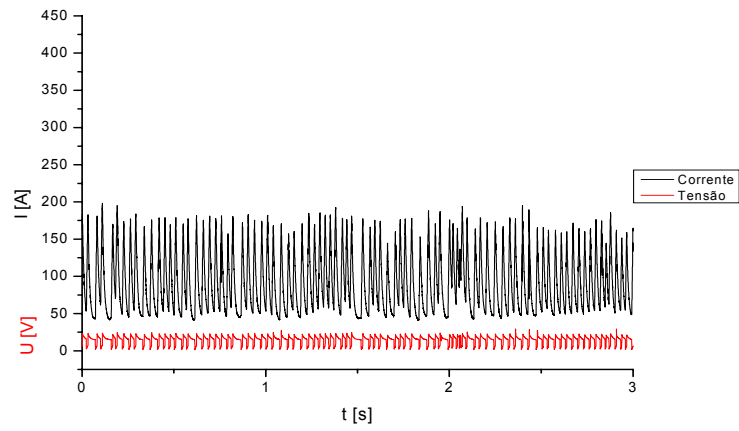


Figura A.17. Gráfico da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub>

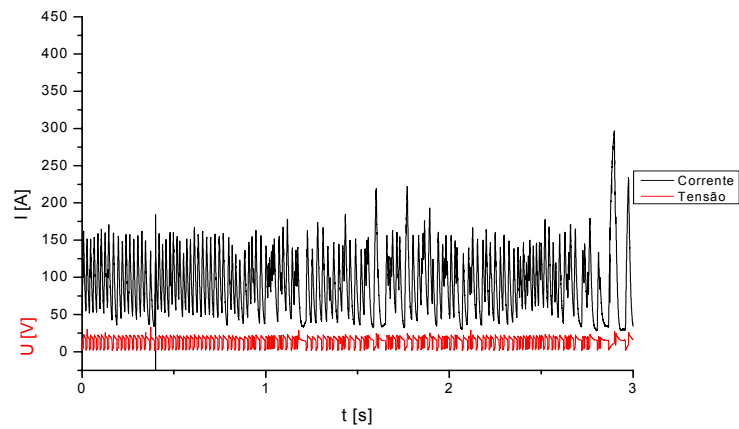


Figura A.18. Gráfico da corrente e da Tensão obtidos na condição onde se utilizou o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub>

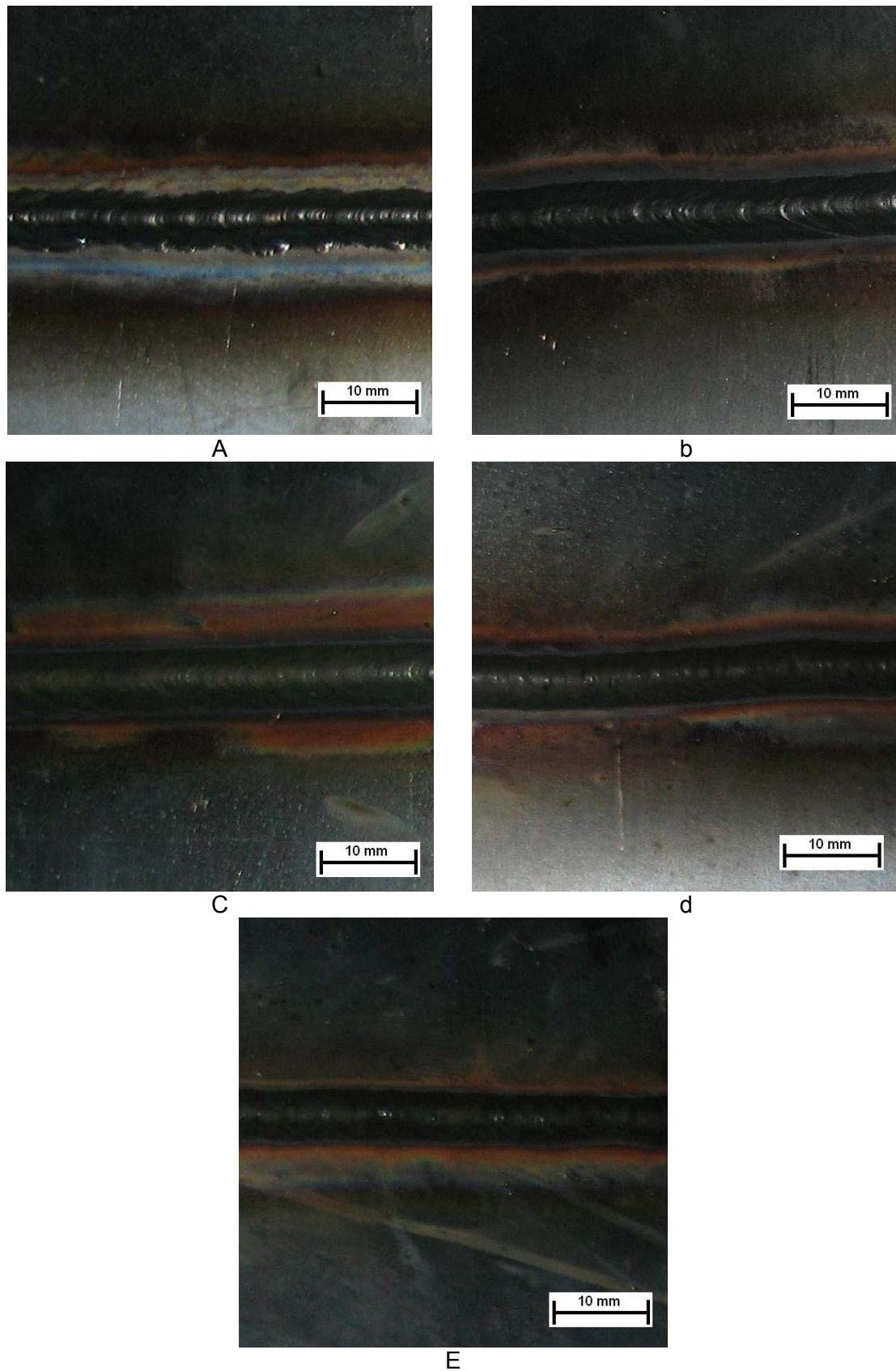


Figura A.19. Aspectos dos cordões de solda quando soldados no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER430LNb e gás de proteção: (a) Ar, (b) Ar+2%O<sub>2</sub>, (c) Ar+4%CO<sub>2</sub>, (d) Ar+8%CO<sub>2</sub> e (e) Ar+25%CO<sub>2</sub>

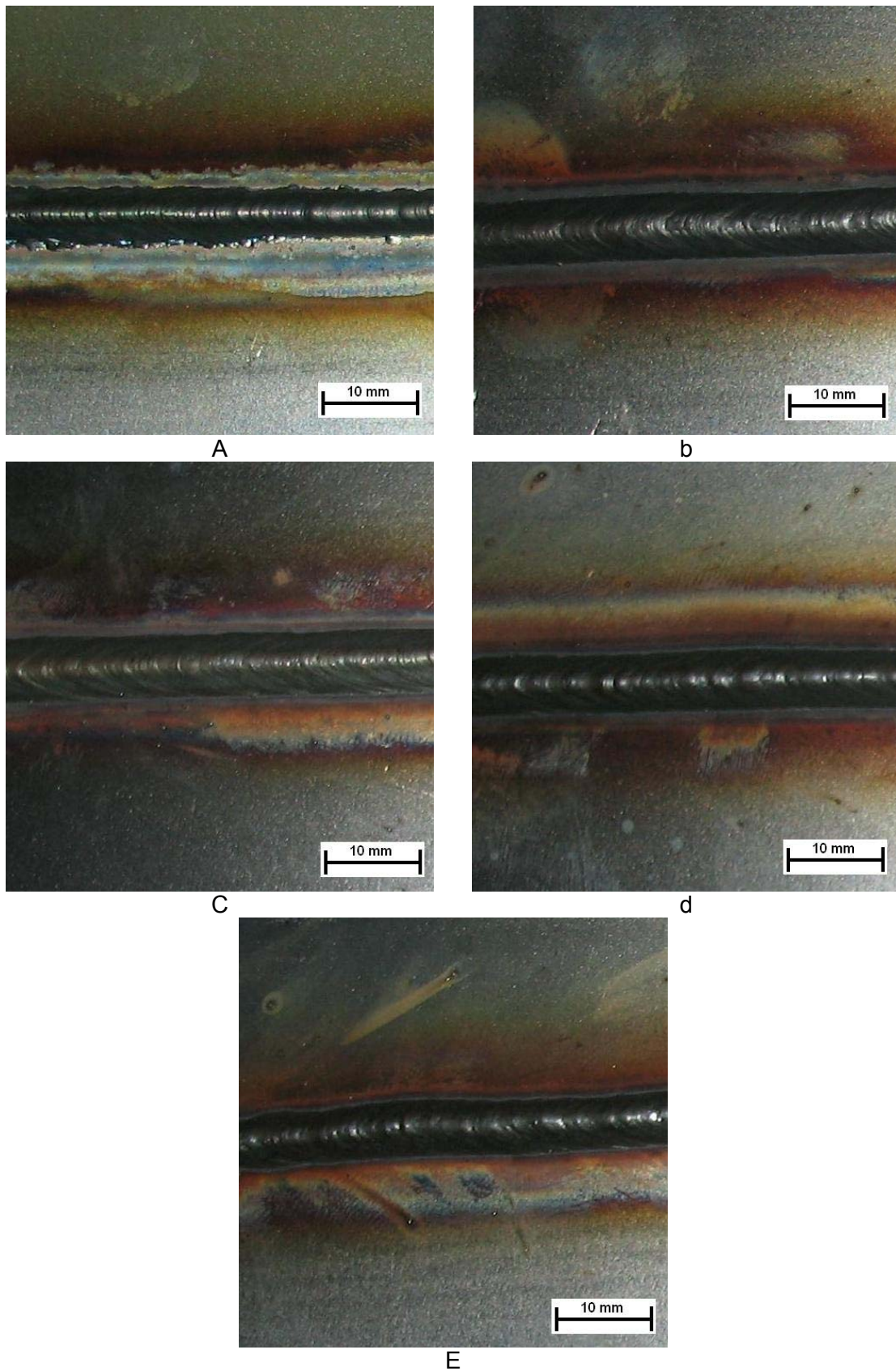


Figura A.20. Aspectos dos cordões de solda quando soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430LNb e gás de proteção: (a) Ar, (b) Ar+2%O<sub>2</sub>, (c) Ar+4%CO<sub>2</sub>, (d) Ar+8%CO<sub>2</sub> e (e) Ar+25%CO<sub>2</sub>



Tabela A.9. Medições da largura realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb nos metais de base UNS43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Largura				
			A	B	C	Média	Desvio
UNS 43932	ER430LNb	Ar	7,04	5,97	6,76	6,59	0,45
		Ar+2%O <sub>2</sub>	7,71	7,33	7,11	7,38	0,25
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	7,62	7,93	7,31	7,62	0,25
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	6,50	6,85	6,52	6,62	0,16
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	6,93	6,11	6,50	6,51	0,33
AISI 439	ER430LNb	Ar	7,21	7,75	7,25	7,40	0,25
		Ar+2%O <sub>2</sub>	8,35	7,74	7,79	7,96	0,28
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	7,54	6,97	7,27	7,26	0,23
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	6,92	6,25	6,75	6,64	0,28
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	8,01	8,59	8,30	8,30	0,29

Tabela A.10. Medições da penetração realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb nos metais de base UNS43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Penetração				
			A	B	C	Média	Desvio
UNS 43932	ER430LNb	Ar	2,24	4,32	2,54	3,03	1,12
		Ar+2%O <sub>2</sub>	2,37	2,30	2,67	2,45	0,20
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	2,55	2,06	2,64	2,42	0,31
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	2,69	2,19	2,41	2,43	0,25
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	2,25	2,42	2,24	2,30	0,10
AISI 439	ER430LNb	Ar	2,53	2,49	2,55	2,52	0,03
		Ar+2%O <sub>2</sub>	2,48	2,29	2,39	2,39	0,10
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	2,23	2,60	2,32	2,38	0,19
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	2,75	2,49	2,31	2,52	0,22
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	2,33	4,33	3,33	3,33	1,41

Tabela A.11. Medições do reforço realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb nos metais de base UNS 43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Reforço				
			A	B	C	Média	Desvio
UNS 43932	ER430LNb	Ar	2,86	1,37	2,86	2,36	0,86
		Ar+2%O <sub>2</sub>	2,72	2,50	2,05	2,42	0,34
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	2,50	2,95	2,68	2,71	0,23
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	2,37	3,34	2,31	2,67	0,58
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	2,63	2,40	2,47	2,50	0,12
AISI 439	ER430LNb	Ar	3,07	2,54	2,50	2,70	0,32
		Ar+2%O <sub>2</sub>	1,68	2,03	2,21	1,97	0,27
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	3,24	2,47	2,78	2,83	0,39
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	2,39	3,26	2,45	2,70	0,49
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	2,83	2,87	2,86	2,85	0,03

Tabela A.12. Medições de área total e área fundida realizadas na sessão transversal dos corpos de prova soldados com o metal de adição ER430LNb nos metais de base UNS43932 e AISI 441

MB	Arame	Gás de Proteção	Área Total			Área Fundida		
			A	B	C	A	B	C
UNS 43932	ER430LNb	Ar	20,84	21,47	21,62	8,21	17,20	8,40
		Ar+2%O <sub>2</sub>	23,41	22,30	20,47	9,17	9,97	11,54
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	21,46	20,51	21,23	11,40	5,86	8,87
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	21,00	25,14	18,46	11,71	7,81	9,10
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	20,22	16,69	20,85	9,27	8,14	11,62
AISI 439	ER430LNb	Ar	25,88	23,84	24,83	11,70	12,50	12,90
		Ar+2%O <sub>2</sub>	19,56	19,42	23,49	12,95	9,90	11,95
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	27,14	21,69	22,27	9,94	11,61	10,72
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	20,11	25,68	18,04	10,06	10,76	7,91
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	24,05	28,53	26,30	9,75	15,78	12,76

## ANEXO B

### RESULTADOS COMPLEMENTARES DO CAPÍTULO V

Neste anexo encontram-se as Tabelas completas das microdurezas realizadas na zona termicamente afetada e zona fundida, as Figuras com micrografias das zonas fundidas dos corpos de prova soldados no AISI 441 e Tabelas com as medidas dos tamanhos de grão das zonas fundidas dos corpos de prova soldados com os arames ER430Ti e Er430LNb.

Tabela B.1. Medidas de Microdureza realizadas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada para o metal de base UNS43932

Metal de base	Metal de Adição	Gás de Proteção	Microdureza (HV)						
			1	2	3	4	5	Média	Desvio
UNS43932	ER308LSi	Ar	139	147	147	165	165	153,0	10,4
		Ar+2%O <sub>2</sub>	150	150	157	158	181	155,0	4,4
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	146	158	160	164	181	160,7	3,1
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	148	149	156	164	177	156,3	7,5
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	151	155	163	167	176	161,7	6,1
	ER430Ti	Ar	148	162	166	166	182	164,7	2,3
		Ar+2%O <sub>2</sub>	145	152	156	156	159	154,7	2,3
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	164	165	165	170	183	166,7	2,9
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	172	173	175	178	183	175,3	2,5
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	156	161	175	195	197	177,0	17,1
	ER430LNb	Ar	155	155	156	160	162	157,0	2,6
		Ar+2%O <sub>2</sub>	167	179	180	181	181	180,0	1,0
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	162	165	174	175	181	171,3	5,5
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	178	181	183	183	188	182,3	1,2
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	154	165	165	171	182	167,0	3,5

Tabela B.2. Medidas de Microdureza realizadas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada para o metal de base AISI441

Metal de base	Metal de Adição	Gás de Proteção	Microdureza (HV)						
			1	2	3	4	5	Média	Desvio
AISI 441	ER308LSi	Ar	158	170	170	174	183	171,3	2,3
		Ar+2%O <sub>2</sub>	165	169	169	171	180	169,7	1,2
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	180	183	189	190	191	187,3	3,8
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	191	208	211	216	220	211,7	4,0
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	181	193	195	198	215	195,3	2,5
	ER430Ti	Ar	165	173	176	178	178	175,7	2,5
		Ar+2%O <sub>2</sub>	164	176	178	188	196	180,7	6,4
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	183	186	188	191	250	188,3	2,5
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	166	175	180	182	185	179,0	3,6
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	180	199	199	205	210	201,0	3,5
	ER430LNb	Ar	168	174	178	188	203	180,0	7,2
		Ar+2%O <sub>2</sub>	179	181	182	185	212	182,7	2,1
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	174	182	212	212	225	202,0	17,3
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	175	180	183	185	194	182,7	2,5
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	178	179	183	183	192	181,7	2,3

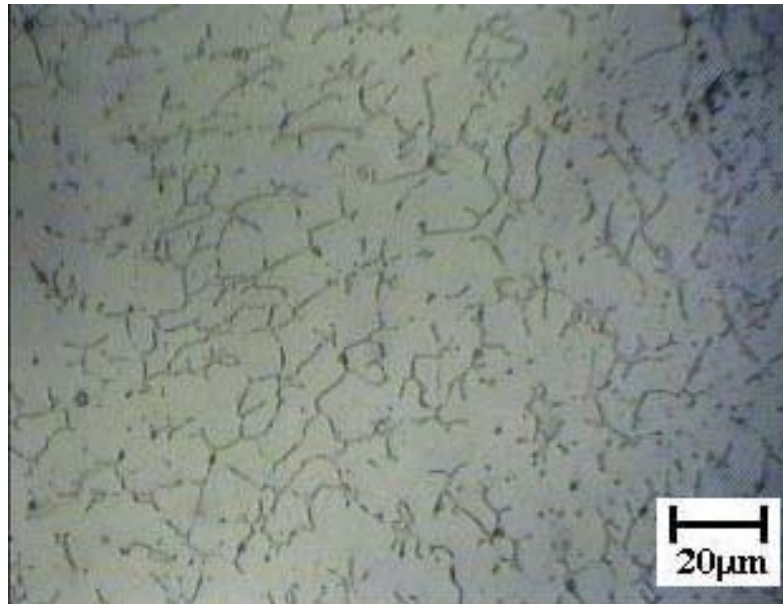


Figura B.1. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base Al SI441 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar

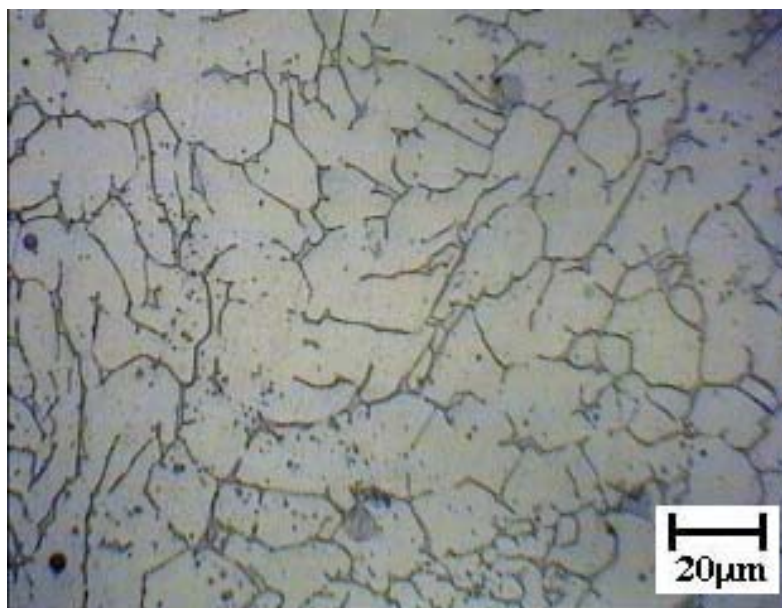


Figura B.2. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>

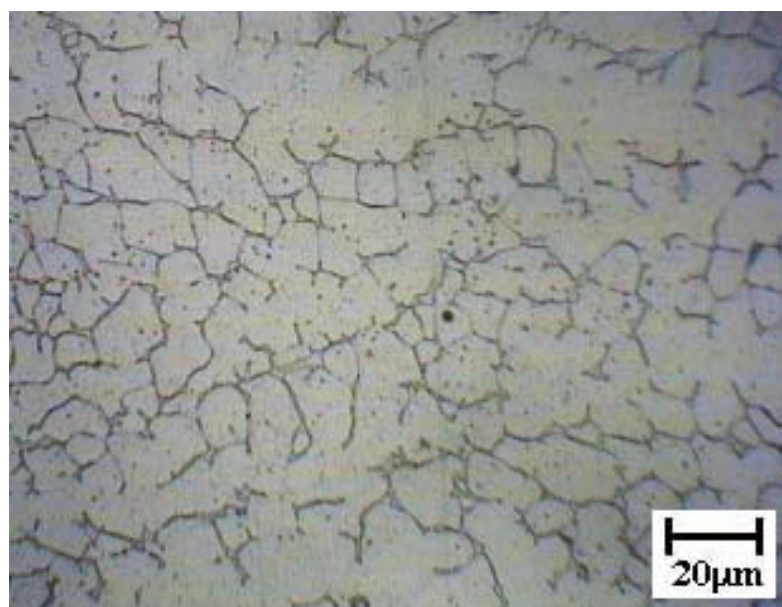


Figura B.3. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+4%CO<sub>2</sub>

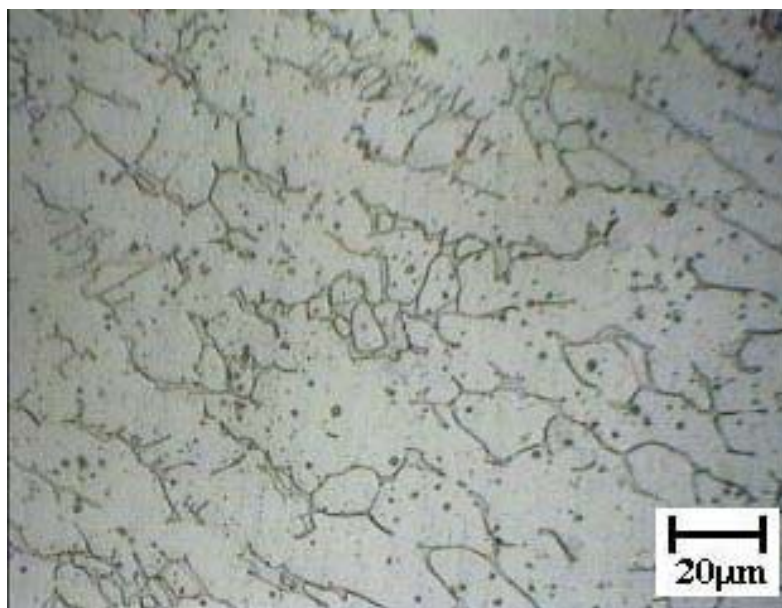


Figura B.4. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub>

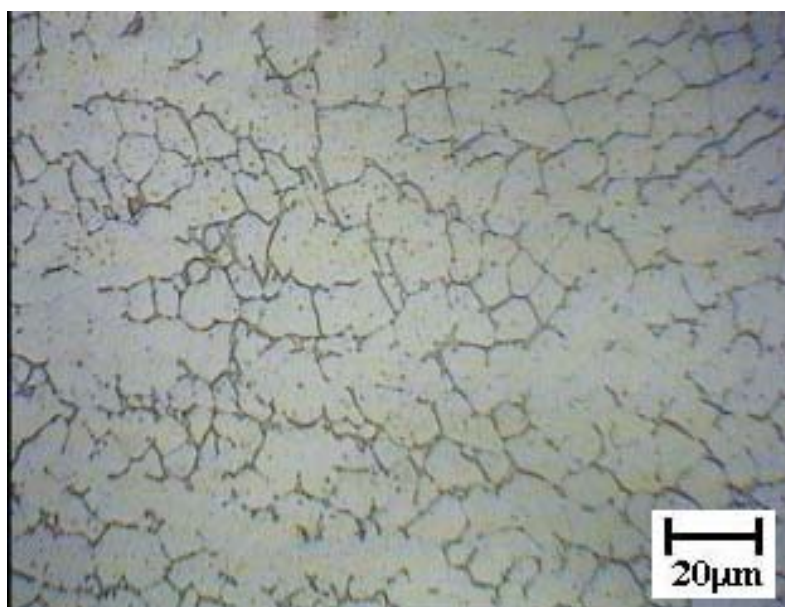


Figura B.5. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER308LSi e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub>

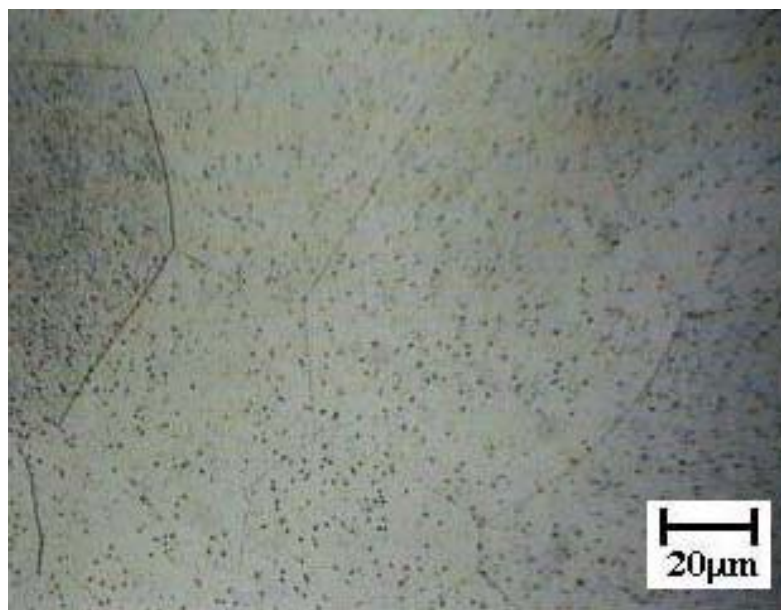


Figura B.6. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar



Figura B.7. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>

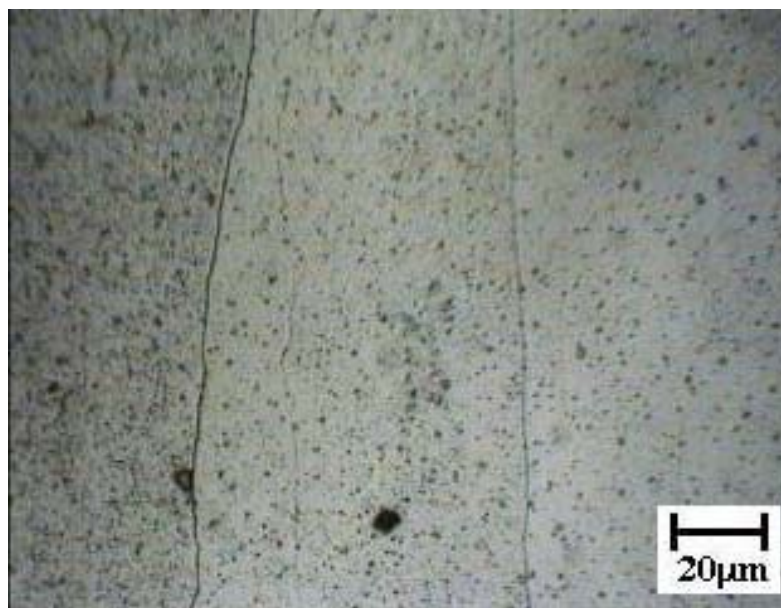


Figura B.8. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+4%CO<sub>2</sub>

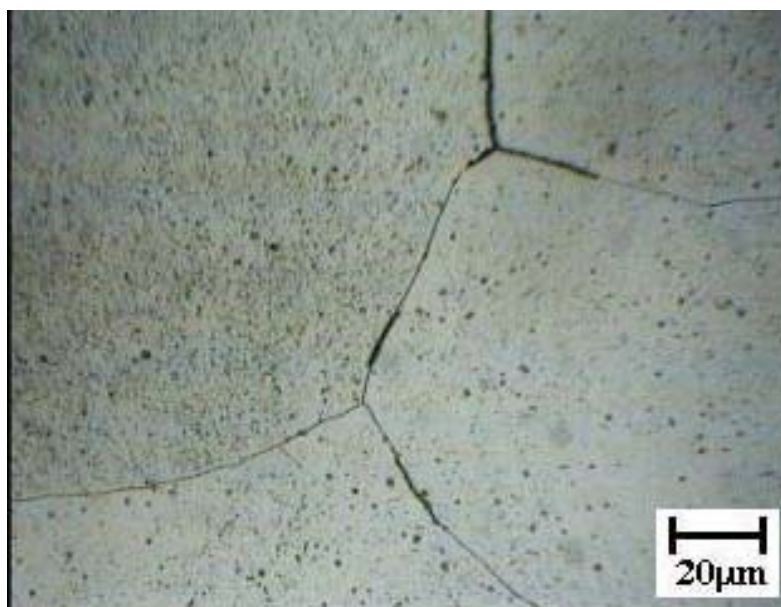


Figura B.9. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub>



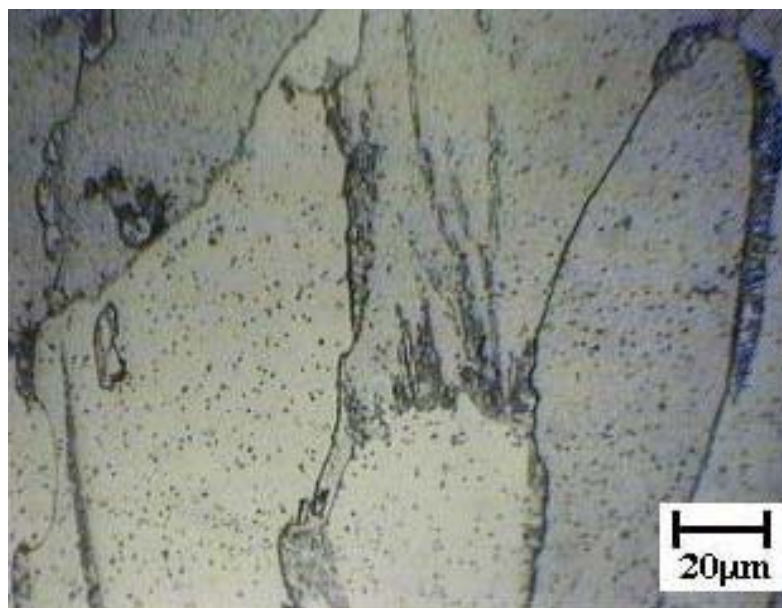


Figura B.10. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430Ti e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub>



Figura B.11. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar



Figura B.12. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub>

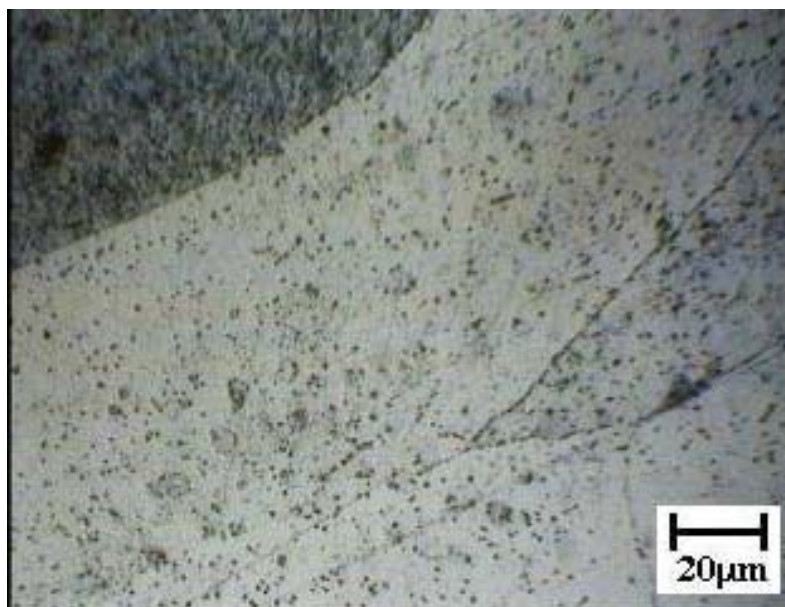


Figura B.13. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+4%CO<sub>2</sub>

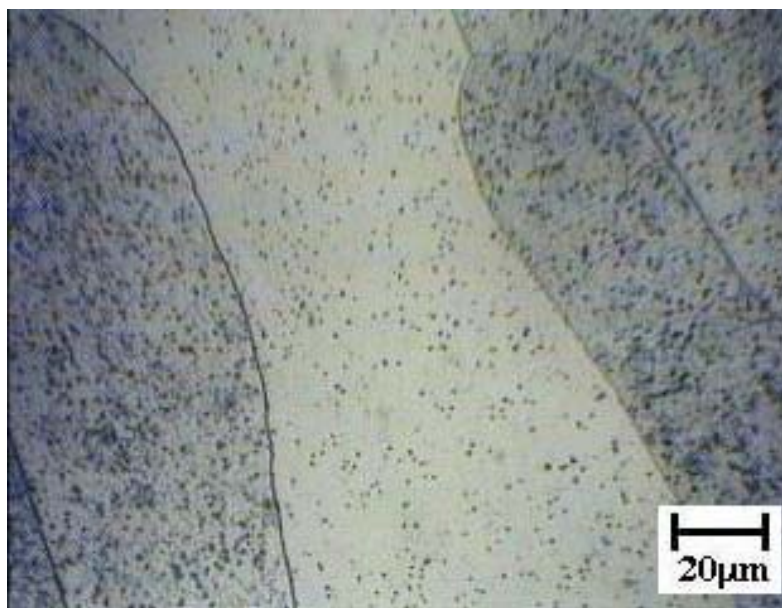


Figura B.14. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub>



Figura B.15. Microestrutura da zona fundida do corpo de prova de metal de base AISI441 soldado com o metal de adição ER430LNb e o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub>

Tabela B.3. Tamanho de grão medido za zona fundida com metal de base UNS 43932 com os metais de adição ER430Ti e ER430LNb

Metal de Base	Metal de Adição	Gás de Proteção	Tamanho de Grão [ $\mu\text{m}$ ]				
			A	B	C	Média	Desvio
UNS 43932	ER430Ti	Ar	24,2	33,2	37,3	31,6	6,7
		Ar+2%O <sub>2</sub>	82,6	72,4	72,4	75,8	5,9
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	63,3	69,8	63,3	65,5	3,7
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	57,0	55,7	75,4	62,7	11,0
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	48,5	78,7	46,2	57,8	18,2
UNS 43932	ER430LNb	Ar	61,5	55,7	67,4	61,5	5,9
		Ar+2%O <sub>2</sub>	72,4	67,4	65,3	68,4	3,7
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	106,6	72,4	55,7	78,2	25,9
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	78,7	92,3	63,3	78,1	14,5
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	53,3	72,4	53,3	59,7	11,0

Tabela B.4. Medições de tamanho de grão da zona fundida dos corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com os metais de adição ER430Ti e ER430LNb

Metal de Base	Metal de Adição	Gás de Proteção	Tamanho de Grão [ $\mu\text{m}$ ]				
			A	B	C	Média	Desvio
AISI441	ER430Ti	Ar	22,2	39,8	40,3	34,1	10,3
		Ar+2%O <sub>2</sub>	72,4	78,7	61,5	70,9	8,7
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	51,2	63,3	52,2	55,6	6,7
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	78,7	67,4	67,4	71,2	6,5
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	98,7	67,4	46,2	70,8	26,4
AISI441	ER430LNb	Ar	87,0	61,5	67,4	72,0	13,3
		Ar+2%O <sub>2</sub>	98,7	45,5	61,5	68,6	27,3
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	72,4	72,4	98,7	81,2	15,2
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	69,8	53,3	78,7	67,3	12,9
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	53,3	72,4	53,3	59,7	11,0

Tabela B.5. 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 o metal de base UNS43932

Metal de base	Metal de Adição	Gás de Proteção	Microdureza (HV)						
			1	2	3	4	5	Média	Desvio
UNS43932	ER308LSi	Ar	109	147	158	163	183	156,0	8,2
		Ar+2%O <sub>2</sub>	162	168	185	223	204	192,0	28,2
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	148	154	163	185	187	167,3	15,9
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	117	164	173	178	183	171,7	7,1
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	174	177	178	189	188	181,3	6,7
	ER430Ti	Ar	172	179	180	182	210	180,3	1,5
		Ar+2%O <sub>2</sub>	158	160	176	180	186	172,0	10,6
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	184	184	186	193	199	187,7	4,7
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	195	203	209	212	221	208,0	4,6
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	178	202	203	204	225	203,0	1,0
	ER430LNb	Ar	149	161	162	166	176	163,0	2,6
		Ar+2%O <sub>2</sub>	170	172	173	174	181	173,0	1,0
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	151	152	164	165	168	160,3	7,2
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	178	178	183	185	195	182,0	3,6
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	170	178	183	183	188	181,3	2,9

Tabela B.6. 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 o metal de base AISI441

Metal de base	Metal de Adição	Gás de Proteção	Microdureza (HV)						
			1	2	3	4	5	Média	Desvio
AISI 441	ER308LSi	Ar	158	175	190	193	203	186,0	9,6
		Ar+2%O <sub>2</sub>	168	172	182	206	207	186,7	17,5
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	164	166	178	181	182	175,0	7,9
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	206	214	216	223	230	217,7	4,7
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	195	199	207	214	215	206,7	7,5
	ER430Ti	Ar	167	181	182	185	202	182,7	2,1
		Ar+2%O <sub>2</sub>	195	198	198	205	207	200,3	4,0
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	191	198	205	208	220	203,7	5,1
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	174	181	193	200	202	191,3	9,6
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	191	202	208	208	214	206,0	3,5
	ER430LNb	Ar	162	176	180	180	185	178,7	2,3
		Ar+2%O <sub>2</sub>	149	170	170	172	174	170,7	1,2
		Ar+4%CO <sub>2</sub>	188	197	203	211	216	203,7	7,0
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	174	189	213	216	228	206,0	14,8
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	176	179	182	185	191	182,0	3,0

## ANEXO C

### RESULTADOS COMPLEMENTARES DO CAPÍTULO VI

Neste anexo encontram-se as Tabelas completas dos ensaios de tração, dobramento, embutimento e microdurezas realizadas na zona termicamente afetada e zona fundida após o ensaio de embutimento..

Tabela C.1. Limite de resistência dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932

Metal de Adição	Gás de Proteção	Limite de Resistência [MPa]				
		A	B	C	Media	Desvio
ER308LSi	Ar	424	422	400	415	13
	Ar+2%O <sub>2</sub>	<b>240</b>	424	410	417	10
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	414	<b>356</b>	416	415	1
ER430Ti	Ar	401	427	429	419	16
	Ar+2%O <sub>2</sub>	398	423	419	413	13
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	401	396	413	403	9
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	416	407	418	414	6
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	422	430	437	430	8
ER430LNb	Ar	444	449	414	436	19
	Ar+2%O <sub>2</sub>	431	437	429	432	4
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	391	419	397	402	15
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	414	422	<b>246</b>	418	6
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	446	407	436	430	20

Tabela C.2. Limite de Resistência dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova soldados no metal de base AISI441

Metal de Adição	Gás de Proteção	Limite de Resistência [MPa]				
		A	B	C	Media	Desvio
ER308LSi	Ar	416	414	396	409	11
	Ar+2%O <sub>2</sub>	436	430	421	429	8
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	425	416	414	418	6
ER430Ti	Ar	418	411	413	414	4
	Ar+2%O <sub>2</sub>	416	420	410	415	5
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	418	416	436	423	11
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	416	413	422	417	5
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	397	400	418	405	11
ER430LNb	Ar	401	407	395	401	6
	Ar+2%O <sub>2</sub>	416	404	400	407	8
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	425	418	<b>246</b>	422	5
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	<b>360</b>	423	418	421	4
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	370	401	416	396	23

Tabela C.3. Força máxima obtida do 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 <sub>MAX</sub> [KN]				
			A	B	C	Media	Desvio
ER308LSi	Ar	Face	1,68	1,90	-	1,79	0,16
	Ar+2%O <sub>2</sub>	Face	1,63	1,57	1,60	1,60	0,03
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	Face	1,85	1,81	1,66	1,77	0,10
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	Face	1,67	1,78	1,83	1,76	0,08
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	1,70	1,68	1,80	1,73	0,07

Tabela C.4. Energia consumida obtida do ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER308LSi e metal de base UNS 43932

Metal de Adição	Gás de Proteção	Lado	Energia [J]				
			A	B	C	Media	Desvio
ER308LSi	Ar	Face	22,17	27,27	-	24,72	3,61
	Ar+2%O <sub>2</sub>	Face	23,35	24,29	25,49	24,38	1,07
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	Face	23,85	23,64	19,17	22,22	2,64
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	Face	23,44	24,23	27,08	24,92	1,91
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	27,23	24,98	26,73	26,32	1,18



Tabela C.5. Força máxima 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	FMAX [KN]				
			A	B	C	Media	Desvio
ER308LSi	Ar	Raiz	-	-	1,49	1,49	0
		Face	1,50	1,47	1,44	1,47	0,03
	Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	1,83	1,74	1,93	1,84	0,09
		Face	1,88	1,85	1,89	1,88	0,02
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	1,48	1,92	-	1,70	0,31
		Face	1,67	1,71	1,83	1,74	0,08
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	-	-	-	-	-
		Face	1,66	1,66	1,59	1,64	0,04
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	1,47	1,44	1,38	1,43	0,04
		Face	1,56	1,32	1,45	1,44	0,12

Tabela C.6. Energia consumida 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	Energia [KN.mm]				
			A	B	C	Media	Desvio
ER308LSi	Ar	Raiz	-	-	19,30	19,30	0
		Face	18,86	19,69	18,84	19,13	0,48
	Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	26,04	24,98	19,69	23,57	3,40
		Face	20,45	25,19	24,16	23,27	2,49
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	21,58	23,45	-	22,51	1,32
		Face	16,84	24,49	18,75	20,03	3,98
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	-	-	-	-	-
		Face	20,55	24,02	17,99	20,85	3,02
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	20,23	20,67	19,32	20,07	0,69
		Face	20,89	18,95	21,77	20,54	1,44

Tabela C.7. Força máxima obtida 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	FMAX [KN]				
			A	B	C	Media	Desvio
ER430Ti	Ar	Raiz	1,90	2,04	1,79	1,91	0,12
		Face	1,71	1,87	1,78	1,78	0,08
	Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	1,77	1,78	1,73	1,76	0,03
		Face	1,77	1,79	1,84	1,80	0,04
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	1,59	1,74	1,82	1,72	0,11
		Face	1,56	1,63	1,60	1,60	0,04
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	1,66	1,99	2,04	1,90	0,21
		Face	2,00	1,99	2,19	2,06	0,11
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	1,51	1,60	1,45	1,52	0,08
		Face	1,84	1,18	1,16	1,39	0,39

Tabela C.8. Energia consumida para a realização do ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER430Ti e metal de base UNS43932

Metal de Adição	Gás de Proteção	Lado	Energia [KN.mm]				
			A	B	C	Media	Desvio
ER430Ti	Ar	Raiz	27,52	27,56	25,61	26,90	1,12
		Face	26,58	23,72	26,59	25,63	1,66
	Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	24,15	23,86	23,24	23,75	0,47
		Face	22,50	22,08	25,06	23,22	1,61
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	22,54	23,83	24,09	23,49	0,83
		Face	22,17	20,98	23,14	22,10	1,08
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	23,27	26,80	27,76	25,94	2,36
		Face	29,23	27,63	27,86	28,24	0,86
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	16,06	24,75	21,92	20,91	4,43
		Face	23,48	5,37	7,94	12,27	9,80

Tabela C.9. Força máxima 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 <sub>MAX</sub> [KN]				
			A	B	C	Media	Desvio
ER430Ti	Ar	Raiz	1,59	1,44	1,62	1,55	0,10
		Face	1,54	1,69	1,66	1,63	0,08
	Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	1,63	1,64	1,68	1,65	0,03
		Face	1,62	1,66	1,66	1,65	0,02
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	1,70	1,63	1,68	1,67	0,04
		Face	1,70	1,59	1,58	1,62	0,07
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	1,67	1,66	1,73	1,68	0,04
		Face	1,64	1,71	1,62	1,66	0,05
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	1,22	1,39	1,27	1,29	0,09
		Face	1,51	1,43	1,51	1,48	0,05

Tabela C.10. Energia consumida para a realização do ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER430Ti e metal de base AISI 441

Metal de Adição	Gás de Proteção	Lado	Energia [KN.mm]				
			A	B	C	Media	Desvio
ER430Ti	Ar	Raiz	23,75	20,38	22,76	22,30	1,74
		Face	21,09	19,81	24,99	21,97	2,70
	Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	22,53	24,44	21,93	22,97	1,31
		Face	21,65	22,76	22,77	22,39	0,64
	Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	22,19	18,46	22,15	20,93	2,14
		Face	21,98	20,31	20,75	21,01	0,87
	Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	23,96	22,86	23,27	23,36	0,56
		Face	20,15	23,78	22,12	22,02	1,81
	Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	8,16	11,50	10,44	10,03	1,71
		Face	17,21	9,39	22,07	16,22	6,39

Tabela C.11. Força máxima 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 <sub>MAX</sub> [KN]				
			A	B	C	Media	Desvio
ER430LNb	Ar	Raiz	1,77	1,79	1,97	1,84	0,11
		Face	2,08	1,63	2,01	1,91	0,24
	Ar+2%O2	Raiz	1,56	1,57	1,65	1,59	0,05
		Face	1,68	1,64	1,61	1,64	0,03
	Ar+4%CO2	Raiz	1,82	1,69	1,64	1,71	0,09
		Face	1,70	1,67	1,70	1,69	0,02
	Ar+8%CO2	Raiz	-	-	-	-	-
		Face	1,61	1,59	1,63	1,61	0,02
	Ar+25%CO2	Raiz	1,63	1,76	1,61	1,67	0,08
		Face	1,70	1,68	1,67	1,68	0,02

Tabela C.12. Energia consumida para a realização do ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER430LNb e metal de base UNS 43932

Metal de Adição	Gás de Proteção	Lado	Energia [KN.mm]				
			A	B	C	Media	Desvio
ER430LNb	Ar	Raiz	22,62	16,41	20,73	19,92	3,18
		Face	24,05	23,66	23,87	23,86	0,19
	Ar+2%O2	Raiz	20,83	21,00	21,49	21,11	0,34
		Face	21,31	21,41	21,27	21,33	0,07
	Ar+4%CO2	Raiz	22,92	15,93	23,58	20,81	4,24
		Face	21,53	19,30	20,65	20,49	1,12
	Ar+8%CO2	Raiz	-	-	-	-	-
		Face	19,65	22,66	21,62	21,31	1,53
	Ar+25%CO2	Raiz	20,82	23,75	21,72	22,10	1,50
		Face	22,96	25,47	26,19	24,87	1,69

Tabela C.13. Força máxima obtida 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	FMAX [KN]				
			A	B	C	Media	Desvio
ER430LNb	Ar	Raiz	1,56	1,60	1,53	1,56	0,04
		Face	1,54	1,58	1,58	1,57	0,02
	Ar+2%O2	Raiz	1,70	1,54	1,50	1,58	0,11
		Face	1,77	1,71	1,68	1,72	0,05
	Ar+4%CO2	Raiz	-	-	-	-	-
		Face	-	-	-	-	-
	Ar+8%CO2	Raiz	1,51	1,62	1,70	1,61	0,10
		Face	1,61	1,68	1,68	1,66	0,04
	Ar+25%CO2	Raiz	1,68	1,52	1,62	1,61	0,08
		Face	1,80	1,74	1,68	1,74	0,06

Tabela C.14. Energia consumida para a realização do ensaio de dobramento dos corpos de prova soldados com metal de adição ER430LNb e metal de base AISI 441

Metal de Adição	Gás de Proteção	Lado	Energia [KN.mm]				
			A	B	C	Media	Desvio
ER430LNb	Ar	Raiz	23,08	20,70	23,53	22,43	1,52
		Face	19,41	19,46	20,50	19,79	0,61
	Ar+2%O2	Raiz	22,76	21,23	21,26	21,75	0,88
		Face	22,41	21,14	22,23	21,93	0,69
	Ar+4%CO2	Raiz	-	-	-	-	-
		Face	-	-	-	-	-
	Ar+8%CO2	Raiz	19,14	20,50	23,65	21,10	2,31
		Face	25,22	22,22	21,90	23,11	1,83
	Ar+25%CO2	Raiz	23,83	19,11	23,45	22,13	2,62
		Face	23,65	24,12	23,23	23,67	0,44

Tabela C.15. Valores de força máxima e deslocamento máximo do punção para os ensaios de embutimento realizados nos metais de base UNS 43932 e AISI 441

MB	F <sub>MAX</sub> [N]	Média F	Desv. F	Deslocamento [mm]	Média D	Desv. D
UNS 43932	49721,3	49972,2	354,8	16,14	16,22	0,11
	50223,0			16,29		
AISI441	52188,5	51270,8	828,1	16,84	16,70	0,12
	51044,5			16,63		
	50579,4			16,63		

Tabela C.16. Valores de energia total para a realização do ensaio de embutimento e a inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os ensaios de embutimento realizados nos metais de base UNS 43932 e AISI 441

MB	Energia [KN.mm]	Média E	Desv E	Inclinação [Graus]	Média I	Desv I
UNS 43932	402,7	408,8	8,6	89,98	89,98	0,00
	414,8			89,98		
AISI441	431,5	411,9	17,1	89,98	89,98	0,00
	403,8			89,98		
	400,4			89,98		

Tabela C.17. Força máxima e o deslocamento do punção para a realização do ensaio de embutimento nos corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER308LSi

Gás de Proteção	Posição	F <sub>MAX</sub> [N]	Média F <sub>MAX</sub>	Desvio F <sub>MAX</sub>	Desl. [mm]	Média Desl.	Desvio Desl.
Ar	Face	43369	43369	0	13,6	13,6	0
		-			-		
		-			-		
Ar+2%O <sub>2</sub>	Face	47717	36112	16412	14,5	11,9	3,6
		24507			9,3		
		-			-		
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	46192	36090	11113	14,2	11,8	2,8
		37893			12,4		
		24186			8,7		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	45808	40461	12187	14,2	12,8	2,9
		26515			9,5		
		49061			14,8		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	40677	40076	4869	12,9	12,6	1,5
		44616			13,9		
		34935			11,0		

Tabela C.18. Energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER308LSi

<b>Gás de Proteção</b>	<b>Posição</b>	<b>Energia [KN.mm]</b>	<b>Média Energia</b>	<b>Desvio Energia</b>	<b>Inclinação [Graus]</b>	<b>Média Inclinação</b>	<b>Desvio Inclinação</b>
Ar	Face	263	263	0	89,98	89,98	0,00
		-			-		
		-			-		
Ar+2%O <sub>2</sub>	Face	318	210	152	89,98	89,98	0,00
		102			89,98		
		-			-		
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	301	210	94	89,99	89,98	0,00
		217			89,98		
		112			89,98		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	304	287	63	89,98	89,98	0,00
		217			89,98		
		339			89,99		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	233	243	41	89,98	89,98	0,00
		288			89,98		
		208			89,98		

Tabela C.19. Força máxima e o deslocamento do punção para a realização do ensaio de embutimento nos corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER308LSi

Gás de Proteção	Posição	F <sub>MAX</sub> [N]	Média F <sub>MAX</sub>	Desvio F <sub>MAX</sub>	Desl. [mm]	Média Desl.	Desvio Desl.
Ar	Face	51545	36237	21648	15,6	12,0	5,1
		20929			8,4		
		-			-		
Ar	Raiz	22841	20269	2257	8,7	10,8	4,2
		19347			8,1		
		18619			15,6		
Ar+2%O <sub>2</sub>	Face	32570	33098	747	11,4	11,2	0,3
		33626			11,1		
		-			-		
Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	52335	38919	18973	15,6	12,6	4,2
		25503			9,7		
		-			-		
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	14620	20069	8563	6,2	7,8	2,1
		15647			6,8		
		29939			10,2		
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Face	18786	17085	2311	7,6	7,2	0,6
		18016			7,5		
		14454			6,5		
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	-	19418	5618	-	7,9	1,5
		15445			6,9		
		23390			9,0		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	43722	34687	11026	13,8	11,5	2,6
		37937			12,1		
		22402			8,7		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	47972	49356	1217	14,4	15,2	0,6
		49837			15,4		
		50260			15,7		



Tabela C.20. energia total para a realização do ensaio de embutimento e a inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER308LSi

<b>Gás de Proteção</b>	<b>Posição</b>	<b>Energia [KN.mm]</b>	<b>Média Energia</b>	<b>Desvio Energia</b>	<b>Inclinação [Graus]</b>	<b>Média Inclinação</b>	<b>Desvio Inclinação</b>
Ar	Face	379	231	210	89,99	89,99	0,00
		82			89,99		
		-			-		
Ar	Raiz	107	130	73	89,98	89,97	0,01
		72			89,98		
		212			89,96		
Ar+2%O2	Face	164	162	3	89,98	89,98	0,00
		160			89,98		
		-			-		
Ar+2%O2	Raiz	385	248	193	89,99	89,98	0,00
		112			89,98		
		-			-		
Ar+4%CO2	Raiz	48	79	51	89,98	89,98	0,00
		51			89,98		
		138			89,98		
Ar+8%CO2	Face	68	60	11	89,98	89,98	0,00
		64			89,98		
		47			89,98		
Ar+8%CO2	Raiz	-	76	30	-	89,98	0,00
		55			89,98		
		98			89,98		
Ar+25%CO2	Face	266	185	90	89,98	89,98	0,00
		201			89,98		
		88			89,98		
Ar+25%CO2	Raiz	309	343	32	89,99	89,98	0,00
		347			89,98		
		373			89,98		

Tabela C.21. Força máxima e o deslocamento do punção para a realização do ensaio de embutimento nos corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER430Ti

Gás de Proteção	Posição	F <sub>MAX</sub> [N]	Média F <sub>MAX</sub>	Desvio F <sub>MAX</sub>	Desl. [mm]	Média Desl.	Desvio Desl.
Ar	Raiz	45433	41636	5370	14,8	13,5	1,9
		37838			12,1		
		-			-		
Ar+2%O <sub>2</sub>	Face	-	27883	13879	-	9,7	3,9
		18069			7,0		
		37697			12,5		
Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	26026	26070	2448	9,3	9,9	0,7
		28539			10,7		
		23644			9,8		
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Face	24106	22371	8412	8,8	8,1	2,3
		29780			10,0		
		13226			5,6		
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	24056	23538	2662	8,7	8,7	0,9
		20655			7,8		
		25904			9,6		
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Face	13032	18951	8370	5,6	7,2	2,2
		24869			8,8		
		-			-		
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	-	29584	0	-	10,0	0
		29584			10,0		
		-			-		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	13486	11326	3054	6,0	5,2	1,0
		9166			4,5		
		-			-		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	5311	4909	375	2,7	2,4	0,3
		4569			2,1		
		4847			2,4		

Tabela C.22. Energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER430Ti

<b>Gás de Proteção</b>	<b>Posição</b>	<b>Energia [KN.mm]</b>	<b>Média Energia</b>	<b>Desvio Energia</b>	<b>Inclinação [Graus]</b>	<b>Média Inclinação</b>	<b>Desvio Inclinação</b>
Ar	Raiz	325	265	85	89,98	89,98	0,00
		206			89,98		
		-			-		
Ar+2%O <sub>2</sub>	Face	-	139	117	-	89,98	0,00
		56			89,98		
		221			89,98		
Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	185	149	35	89,98	89,98	0,00
		149			89,98		
		114			89,98		
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Face	110	98	42	89,98	89,98	0,00
		132			89,98		
		52			89,98		
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	92	92	21	89,98	89,98	0,00
		71			89,98		
		113			89,98		
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Face	34	66	44	89,98	89,98	0,00
		97			89,98		
		-			-		
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	-	131	0	-	89,98	0,00
		131			89,98		
		-			-		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	40	31	12	89,98	89,97	0,00
		23			89,97		
		-			-		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	9	7	2	89,96	89,95	0,00
		6			89,96		
		7			89,95		

Tabela C.23. Força máxima e o deslocamento do punção para a realização do ensaio de embutimento nos corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430Ti

Gás de Proteção	Posição	F <sub>MAX</sub> [N]	Média F <sub>MAX</sub>	Desvio F <sub>MAX</sub>	Desl. [mm]	Média Desl.	Desvio Desl.
Ar	Face	50134	48860	1764	16,1	15,6	0,6
		49599			15,9		
		46846			15,0		
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Face	22991	22019	1571	8,4	8,2	0,4
		20207			7,7		
		22859			8,5		
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Face	7003	6479	1909	3,7	3,5	0,8
		8071			4,1		
		4362			2,5		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	5921	4676	1132	3,0	2,2	0,8
		4398			2,2		
		3709			1,4		

Tabela C.24. Energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430Ti

Gás de Proteção	Posição	Energia [KN.mm]	Média Energia	Desvio Energia	Inclinação [Graus]	Média Inclinação	Desvio Inclinação
Ar	Face	405	371	44	89,98	89,98	0,00
		386			89,98		
		322			89,98		
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Face	86	81	10	89,98	89,98	0,00
		69			89,98		
		88			89,98		
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Face	13	12	5	89,96	89,97	0,00
		16			89,97		
		6			89,967		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	10	7	3	89,96	89,96	0,00
		6			89,96		
		6			89,96		

Tabela C.25. Força máxima e o deslocamento do punção para a realização do ensaio de embutimento nos corpos de prova soldados no metal de base UNS43932 com o metal de adição ER430LNb

Gás de Proteção	Posição	F <sub>MAX</sub> [N]	Média F <sub>MAX</sub>	Desvio F <sub>MAX</sub>	Desl. [mm]	Média Desl.	Desvio Desl.
Ar	Face	48417	40065	11277	15,4	13,1	3,1
		44541			14,3		
		27238			9,6		
Ar	Raiz	-	17381	1514	-	7,0	0,6
		18452			7,4		
		16310			6,5		
Ar+2%O <sub>2</sub>	Face	44355	32792	10751	14,3	11,3	2,8
		30922			10,9		
		23099			8,6		
Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	35391	24101	10286	12,4	8,9	3,2
		15263			6,3		
		21650			8,1		
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Face	34703	36152	1413	11,1	11,7	0,6
		36227			11,6		
		37525			12,4		
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	46368	32158	20096	15,0	11,2	5,4
		17947			7,3		
		-			-		
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	38236	21440	14611	11,9	8,8	3,0
		11658			5,9		
		14427			8,5		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	-	34068	0	-	11,2	0
		34068			11,2		
		-			-		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	19851	16845	8546	8,0	7,0	2,6
		23480			8,9		
		7202			4,0		

Tabela C.26. Energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base UNS 43932 com o metal de adição ER430LNb

<b>Gás de Proteção</b>	<b>Posição</b>	<b>Energia [KN.mm]</b>	<b>Média Energia</b>	<b>Desvio Energia</b>	<b>Inclinação [Graus]</b>	<b>Média Inclinação</b>	<b>Desvio Inclinação</b>
Ar	Face	368	261	131	89,98	89,98	0,00
		300			89,98		
		115			89,98		
Ar	Raiz	-	56	10	-	89,98	0,00
		63			89,98		
		49			89,98		
Ar+2%O <sub>2</sub>	Face	288	181	101	89,98	89,98	0,00
		167			89,98		
		88			89,98		
Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	203	108	84	89,98	89,98	0,00
		44			89,98		
		78			89,98		
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Face	167	184	18	89,98	89,98	0,00
		183			89,98		
		204			89,98		
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	359	210	211	89,99	89,98	0,00
		61			89,98		
		-			-		
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	198	102	85	89,98	89,97	0,00
		37			89,98		
		70			89,97		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	-	236	0	-	89,98	0,00
		236			89,98		
		-			-		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	96	76	32	89,98	89,97	0,01
		94			89,98		
		40			89,96		

Tabela C.27. Força máxima e o deslocamento do punção para a realização do ensaio de embutimento nos corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430LNb

Gás de Proteção	Posição	F <sub>MAX</sub> [N]	Média F <sub>MAX</sub>	Desvio F <sub>MAX</sub>	Desl. [mm]	Média Desl.	Desvio Desl.
Ar	Face	40391	36063	6121	12,8	11,7	1,5
		31735			10,6		
		-			-		
Ar	Raiz	-	29688	6901	-	10,5	1,8
		34567			11,7		
		24808			9,2		
Ar+2%O <sub>2</sub>	Face	50073	36771	13241	15,7	12,5	2,9
		23592			10,2		
		36650			11,6		
Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	50776	23507	23616	16,6	8,6	6,9
		9882			4,6		
		9862			4,6		
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Face	49440	30202	16777	15,2	10,6	4,1
		18607			7,5		
		22560			9,0		
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	48440	32537	13936	15,6	11,3	3,8
		22460			8,6		
		26710			9,7		
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Face	26582	20191	9038	10,0	10,2	0,3
		13800			10,4		
		-			-		
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	-	20822	0	-	7,9	0
		-			-		
		20822			7,9		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	20573	23390	2482	8,3	9,5	1,1
		25252			10,4		
		24346			9,9		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	27976	28135	7969	10,1	10,3	1,5
		20247			8,9		
		36182			11,8		

Tabela C.28. Energia total para a realização do ensaio de embutimento e inclinação da curva de relação força em função do deslocamento do punção para os corpos de prova soldados no metal de base AISI 441 com o metal de adição ER430LNb

<b>Gás de Proteção</b>	<b>Posição</b>	<b>Energia [KN.mm]</b>	<b>Média Energia</b>	<b>Desvio Energia</b>	<b>Inclinação [Graus]</b>	<b>Média Inclinação</b>	<b>Desvio Inclinação</b>
Ar	Face	220	181	55	89,98	89,98	0,00
		142			89,98		
		-			-		
Ar	Raiz	-	142	61	-	89,98	0,00
		186			89,98		
		99			89,98		
Ar+2%O <sub>2</sub>	Face	366	244	106	89,98	89,98	0,00
		183			89,98		
		181			89,98		
Ar+2%O <sub>2</sub>	Raiz	430	158	235	89,98	89,97	0,01
		23			89,97		
		23			89,97		
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Face	340	203	125	89,98	89,98	0,00
		177			89,98		
		94			89,98		
Ar+4%CO <sub>2</sub>	Raiz	369	207	141	89,98	89,98	0,00
		124			89,98		
		127			89,98		
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Face	125	101	33	89,98	89,97	0,02
		78			89,96		
		-			-		
Ar+8%CO <sub>2</sub>	Raiz	-	99	0	-	89,98	0,00
		-			-		
		99			89,98		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Face	77	107	27	89,98	89,98	0,00
		127			89,98		
		118			89,98		
Ar+25%CO <sub>2</sub>	Raiz	118	130	54	89,98	89,98	0,00
		83			89,98		
		189			89,98		



Tabela C.29. 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 o metal de base UNS43932 estampado

Metal de base	Metal de Adição	Gás de Proteção	Microdureza (HV)						
			1	2	3	4	5	Média	Desvio
UNS43932	ER308LSi	Ar+2%O <sub>2</sub>	172	185	189	191	208	188,3	3,1
	ER430Ti	Ar+2%O <sub>2</sub>	268	270	273	274	289	272,3	2,1
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	262	278	281	285	285	281,3	3,5
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	233	241	247	252	269	246,7	5,5
	ER430LNb	Ar+2%O <sub>2</sub>	249	249	265	268	272	260,7	10,2
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	222	227	231	245	252	234,3	9,5
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	223	226	232	244	256	234,0	9,2

Tabela C.30. 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 o metal de base AISI441 estampado

Metal de base	Metal de Adição	Gás de Proteção	Microdureza (HV)						
			1	2	3	4	5	Média	Desvio
AISI441	ER308LSi	Ar+2%O <sub>2</sub>	284	307	325	325	364	319,0	10,4
	ER430Ti	Ar+2%O <sub>2</sub>	217	221	226	227	251	224,7	3,2
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	231	241	246	265	270	250,7	12,7
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	231	232	233	246	247	237,0	7,8
	ER430LNb	Ar+2%O <sub>2</sub>	249	276	297	298	385	290,3	12,4
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	262	282	287	298	397	289,0	8,2
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	227	251	255	257	330	254,3	3,1

Tabela C.31. Medidas de Microdureza realizadas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada para o metal de base UNS43932 estampado

Metal de base	Metal de Adição	Gás de Proteção	Microdureza (HV)						
			1	2	3	4	5	Média	Desvio
UNS43932	ER308LSi	Ar+2%O <sub>2</sub>	203	285	334	356	436	325,0	36,3
	ER430Ti	Ar+2%O <sub>2</sub>	252	258	267	270	277	265,0	6,2
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	222	244	244	254	256	247,3	5,8
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	192	205	208	217	227	210,0	6,2
	ER430LNb	Ar+2%O <sub>2</sub>	245	239	268	281	288	262,7	21,5
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	224	234	239	247	250	240,0	6,6
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	201	226	232	237	238	231,7	5,5

Tabela C.32. Medidas de Microdureza realizadas na matriz ferrítica da zona termicamente afetada para o metal de base AISI441 estampado

Metal de base	Metal de Adição	Gás de Proteção	Microdureza (HV)						
			1	2	3	4	5	Média	Desvio
AISI441	ER308LSi	Ar+2%O <sub>2</sub>	237	239	273	282	281	264,7	22,7
	ER430Ti	Ar+2%O <sub>2</sub>	196	216	228	240	319	228,0	12,0
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	224	233	234	237	245	234,7	2,1
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	237	241	245	248	261	244,7	3,5
	ER430LNb	Ar+2%O <sub>2</sub>	245	255	258	260	292	257,7	2,5
		Ar+8%CO <sub>2</sub>	242	260	280	292	294	277,3	16,2
		Ar+25%CO <sub>2</sub>	304	327	330	347	358	334,7	10,8

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)