



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS

WELLISON DA SILVA TAVARES

ESTUDO DAS TÉCNICAS DE REMOÇÃO DE MATERIAL EMPREGADAS
EM SOLDAGENS DE FABRICAÇÃO OU DE MANUTENÇÃO DE
ESTRUTURAS DE AÇOS

Fortaleza – CE
Janeiro de 2009

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS

ESTUDO DAS TÉCNICAS DE REMOÇÃO DE MATERIAL EMPREGADAS
EM SOLDAGENS DE FABRICAÇÃO OU DE MANUTENÇÃO DE
ESTRUTURAS DE AÇOS

Wellison da Silva Tavares

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta

Fortaleza – CE
Janeiro de 2009

T233e Tavares, Wellison da Silva
Estudo das técnicas de remoção de material empregadas em soldagens de fabricação ou de manutenção de estruturas de aços / Wellison da Silva Tavares, 2009.
f126. ; il., col., enc.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta
Área de concentração: Propriedades físicas e mecânicas dos Materiais
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia. Depto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Fortaleza, 2009.

1. Goivagem. 2. Esmerilhamento. 3. Plasma. 4. ASTM 4140. I. Motta, Marcelo Ferreira (orient.). II. Universidade Federal do Ceará – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais

CDD 620.11

A Deus
À meus pais
À minha esposa
À minhas filhas
À minhas irmãs

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e sabedoria.

À meus pais, pelo amor e apoio nas minhas decisões.

À minha esposa Camile, por seu apoio, compreensão e carinho em todos os momentos.

À minhas filhas M^ª. Letícia e M^ª. Luisa.

Ao meu orientador, prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta, pela dedicação e contribuição para a realização deste trabalho;

Ao Coordenador e Professor do Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Dr. Lindberg Lima Gonçalves, pelo excelente trabalho desenvolvido.

Ao Professor Dr. Hélio Cordeiro de Miranda do Laboratório de Engenharia de Soldagem/ENGESOLDA, pelos seus ensinamentos na realização deste trabalho.

Ao Reitor Dr. Jesualdo Pereira Farias, que faz parte do corpo discente do Laboratório de Engenharia de Soldagem/ENGESOLDA, pelos ensinamentos valiosos.

A todos os Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Ao Professor Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu, pelos ensinamentos e disponibilização dos equipamentos do Laboratório de Caracterização de Materiais/LACAM fundamental na realização do trabalho.

A todos os bolsistas e amigos do Laboratório de Engenharia de Soldagem/ENGESOLDA, em especial ao Francisco Edval e Francisco Akassio pela dedicação e contribuições para a realização deste trabalho.

À PETROBRAS/LUBNOR, pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa de apoio financeiro – CAPES.

Aos colegas da turma George Luiz, Helton Henrique, Januário, Lorena pela amizade durante o curso.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

Tavares, W. S. 2008, “Estudo das Técnicas de Remoção de Material na Manutenção de Estruturas Construídas com Aços Baixa Liga”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.

RESUMO

As indústrias em geral, frequentemente apresentam problemas em seus equipamentos pela ocorrência de defeitos como: trincas que surgem geralmente na Zona Afetada pelo Calor (ZAC) da solda, corrosão localizada em regiões pré-dispostas a esse fenômeno, e poros que geralmente são observados em cordões de solda mal executados. Assim, é necessário realizar reparos nessas estruturas através de técnicas específicas para essa finalidade, como; esmerilhamento sendo o mais utilizado, e os processos a arco voltaico, goivagem a arco plasma e goivagem com eletrodo de grafite. Neste trabalho inicialmente realizou-se uma estudo exploratório dos processos de remoção a arco voltaico, obtendo informações sobre parâmetros operacionais que forneçam condições de estabilidade no processo, sendo possível controlar o volume de material removido. Em seguida foi realizado uma simulação de manutenção em uma estrutura construída com o aço ASTM 4140 em juntas de 12 mm de comprimento e perfil em K com um lado de 2/3 da espessura e o outro de 1/3 da espessura, dimensões essas sugestões feitas por técnicos da Petrobras. Das cinco juntas analisadas nesta etapa, uma foi removida por esmerilhamento, duas goivadas a arco plasma e duas goivadas com eletrodo de grafite de 5 mm e 8 mm de diâmetro, respectivamente. Através das análises de microdureza e de microestrutura foi possível responder as principais questões e suspeitas inerentes em cada processo, como contaminação do metal base por carbono no processo de goivagem com eletrodo de grafite, extensão da zona termicamente afetada (ZAC), um possível encruamento da região próxima a superfície esmerilhada. Assim foi possível verificar que não houve uma extensão da ZAC das amostras processadas a arco voltaico, porem o processo de goivagem utilizando o eletrodo de 8 mm de diâmetro apresentou características críticas à junta processada. As amostras processadas a arco plasma ao final das etapas de manutenção tiveram poucas alterações microestruturais quando comparada com a amostra processada por esmerilhamento.

Palavras chaves: Goivagem, goivagem a arco plasma, esmerilhamento, ASTM 4140.

Tavares, W. S. 2008, "Study of Techniques for Removal of Material in the Maintenance of Structures Built with Low Alloy Steels". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.

ABSTRACT

The industries in general, frequent present problems in its equipment for the occurrence of defects as: crack that weld Heat (ZAC) of, corrosion located in regions daily pay-made use to this phenomenon, and pore appear generally in the Zone Affected for that generally is observed in weld laces badly executed. Thus, it is necessary to carry through repairs in these structures through specific techniques for this purpose, as; the most used esmerilhamento being, and the processes the voltaic arc, goivagem the arc plasma and goivagem with graphite electrode. In this work initially a exploratory study of the removal processes was become fulfilled the voltaic arc, getting information on operational parameters that supply conditions of stability in the process, being possible to control the volume of removed material. After that a simulation of maintenance in a structure constructed with steel ASTM 4140 in meetings of 12 mm of length and profile in K with a side of 2/3 of the thickness and the other of 1/3 of the thickness was carried through, dimensions these suggestions made for Petrobra's technician. Of the five meetings analyzed in this stage, one was removed by esmerilhamento, two goivadas the goivadas arc plasma and two with graphite electrode of 5 mm and 8 mm of diameter, respectively. Through the microstructure and micro-hardness analyses it was possible to answer the main inherent questions and suspicion in each process, as contamination of the metal base for carbon in the process of goivagem with graphite electrode, extension of the zone thermally affected (ZAC), a possible strain hardening of the next region the grinding surface. Thus it was possible to verify that the voltaic arc did not have an extension of the ZAC of the processed samples, to put the goivagem process using the electrode of 8 mm of diameter presented critical characteristics to together the processed one. The processed samples the arc plasma to the end of the stages of maintenance had few microstructure alterations when compared with the processed sample for grinding.

Key Words: gouging, gouging plasm arc, grinding, ASTM 4140.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	i
-------------------------------	----------

ÍNDICE DE TABELAS.....	vi
-------------------------------	-----------

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1 Introdução.....	1
1.1 Posicionamento do problema.....	1

CAPÍTULO II – OBJETIVOS

2 Objetivo.....	4
2.1 Objetivo Geral.....	4
2.2 Objetivos Específicos.....	4

CAPÍTULO III – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3 Revisão Bibliográfica.....	5
3.1 Goivagem com Eletrodo de Grafite.....	5
3.2 Processo Plasma.....	7
3.2.1 Sobre o Processo de Soldagem.....	7
3.2.2 Sobre o Processo de Corte e Goivagem.....	8
3.2.3 Arco Não-Transferido.....	11
3.2.4 Arco Transferido.....	11
3.2.5 Métodos de Partida.....	12
3.3 Comparação Entre os Processos de Remoção.....	13

3.3.1	Emissões de Poluentes	13
3.3.2	Níveis de Ruído	13
3.3.3	Qualidade da Remoção	14
3.4	Efeitos das Principais Variáveis dos Processos de Goivagem Sobre a Geometria da Vala de Material Removido	15
3.4.1	Velocidade de Goivagem e Intensidade de Corrente.....	15
3.4.2	Densidade de Energia.....	16
3.5	Aços-Liga	17
3.6	Microestruturas da ZAC e da Zona Fundida (ZF) dos aços	20
3.7	Influência da Composição na Zona Fundida dos aços.....	23
3.8	Influência das Inclusões nas Propriedades Mecânicas dos Aços e Modo de difusão.....	26

CAPÍTULO IV – MATERIAIS E MÉTODOS

4	Materiais e Métodos.....	28
4.1	Etapa 1: Estudo Exploratório dos Processos de Goivagem com Eletrodo de Grafite e Arco Plasma	28
4.1.1	Materiais e Equipamentos Utilizados na Etapa 1.....	30
4.1.2	Estudo Exploratório do Processo de Goivagem com Eletrodo de Grafite	32
4.1.2.1	1º Passo – Estudos Preliminares	32
4.1.2.2	2º Passo – Escolha da Fonte e Estudo dos Sinais Elétricos	32
4.1.2.3	3º Passo – Exploração dos Parâmetros Operacionais do Processo de Goivagem com Eletrodo de Grafite.....	33
4.1.3	Estudo Exploratório do Processo de Goivagem a Arco Plasma.....	35
4.1.3.1	Exploração de Parâmetros	35
4.2	Etapa 2: Simulação de Reparos de Juntas Soldadas e Análise de suas Propriedades Mecânicas e Características Metalúrgicas.....	37

4.2.1	Materiais e Equipamentos Utilizados na Etapa 2.....	39
4.2.2	Caracterização do Material como Recebido – Etapa 2	42
4.2.3	Escolha da Junta e Processo de Soldagem - 1º Passo	42
4.2.3.1	Caracterização das Juntas Soldadas	43
4.2.4	Processos de Remoção - 2º Passo	44
4.2.4.1	Caracterização das Amostras Após a Remoção de Material.....	44
4.2.5	Soldagem Final das Juntas - 3º Passo.....	45
4.2.5.1	Caracterização das Amostras Após a Soldagem Final	45

CAPÍTULO V – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5	 Resultados e Discussões.....	46
5.1	 Etapa 1 - Estudo Exploratório dos Processos de Goivagem com Eletrodo de Grafite e Arco Plasma	46
5.1.1	Estudo Exploratório do Processo de Goivagem com Eletrodo de Grafite.	46
5.1.1.1	1º Passo – Estudos Preliminares	46
5.1.1.2	2º Passo - Escolha da Fonte e Estudo dos Sinais Elétricos	47
5.1.1.3	3º Passo - Exploração dos Parâmetros Operacionais do Processo de Goivagem com Eletrodo de Grafite.....	56
5.1.2	Estudo Exploratório do Processo de Goivagem a Arco Plasma.....	64
5.2	 Etapa 2 - Simulação de Reparos de Juntas Soldadas e Análise de suas Propriedades Mecânicas e Características Metalúrgicas.....	79
5.2.1	Caracterização do Material como recebido	79
5.2.2	Caracterização das Amostras Após as Soldagens - 1º Passo.....	80
5.2.3	2º Passo – Caracterização das Amostras Após Remoção de Material.....	84
5.2.4	3º Passo – Caracterização Após a Soldagem Final da Junta.....	95

CAPÍTULO VI – CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1	Considerações Finais.....	101
------------	----------------------------------	------------

CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES

7.1	Conclusões.....	103
------------	------------------------	------------

CAPÍTULO VIII – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

8.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	106
------------	--	------------

CAPÍTULO VIII – Referências Bibliográficas

9.1	Referências bibliográficas.....	107
------------	--	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Processo de goivagem a arco plasma.....	2
Figura 3.1 Corte com Eletrodo de Grafite (HANDBOOK, 1987).....	5
Figura 3.2 Diferenciação básica entre os processos TIG e soldagem a arco Plasma	8
Figura 3.3 Peças de uma tocha plasma.....	10
Figura 3.4 Tipos de arco do processo PAW. (Bracarense, 2000).....	11
Figura 3.5 Partida por contato.....	12
Figura 3.6 Partida por Alta Freqüência.	12
Figura 3.7 Efeito da intensidade de corrente sobre a geometria da zona fundida.	15
Figura 3.8 Efeito da distribuição de densidade de energia na penetração da solda. A peça é uma placa de alumínio 6061 de 3,2 mm de espessura. Aporte térmico: 880 W, velocidade de soldagem: 4,23 mm/s. A densidade de energia da fonte de calor diminui de (a) para (d). (Kou e Le, 1983).....	16
Figura 3.9 Faixa de temperabilidade do aço 4140.	17
Figura 3.10 Diagrama de revenimento do aço 4140.....	18
Figura 3.11 Variação das propriedades mecânicas com o refino do tamanho de grão para os aços ARBL.	20
Figura 3.12 Microestrutura do metal de solda não alterado mostrando diferentes constituintes microestruturais (MODENESI, 2004).....	23
Figura 3.13 Microestrutura da ZF obtida na soldagem SMAW em função do teor de Mn para (a) 0,045%C e (b) 0,145%C (Evans, G.M., Bailey, N, 1997).....	24
Figura 3.14 Microestrutura da ZF obtida na soldagem SAW em função do teor de Ni. M–martensita.	24
Figura 3.15 Microestrutura da ZF obtida na soldagem SAW em função do teor de Cr para (a) 1,0%Mn e (b) 1,8%Mn (Evans, G.M., Bailey, N, 1997).....	25
Figura 4.1 Organograma da Etapa 1 – Estudo Exploratório.....	29

Figura 4.2 Robô KUKA modelo KR16.	30
Figura 4.3 Equipamentos para processo de goivagem a arco plasma.	31
Figura 4.4 Sistema de aquisição de dados.	31
Figura 4.5 Amostra do aço AISI 516 Gr 60.	33
Figura 4.6 Automação do sistema de goivagem a arco plasma.	35
Figura 4.7 Organograma da Etapa 2.....	38
Figura 4.8 Amostra do aço AISI 4140 com as regiões das análises identificadas.	40
Figura 4.9 Microscópio ótico com sistema de aquisição de imagem.	41
Figura 4.10 a) Microscópio eletrônico de varredura (MEV) b) Microdurômetro Vickers.	41
Figura 4.11 esquemática do perfil em K da amostra de 4140.	43
Figura 4.12 a) e b) Apresentam os sistemas de controle de velocidade e fixação das amostras, respectivamente.	43
Figura 4.13 Apresenta o perfil da amostra retirada do 1º Passo.	44
Figura 4.14 Apresenta o perfil da amostra retirada do 2º Passo.	45
Figura 4.15 Perfil da amostra retirada do 3º Passo.....	45
Figura 5.1 Oscilogramas de tensão e corrente para o eletrodo de 5mm de diâmetro utilizando as fontes: a) Fonte 1, b) Fonte 2 e c) Fonte 3.....	48
Figura 5.2 Histogramas para os sinais de corrente para o eletrodo de 5 mm de diâmetro, em a) Fonte 1, b) Fonte 2, c) Fonte 3.....	49
Figura 5.3 Ampliação dos Oscilogramas de tensão e corrente. a) Fonte 1, b) Fonte 2 e c) Fonte 3.....	51
Figura 5.4 Oscilograma de tensão e corrente para o eletrodo de 8 mm de diâmetro a) Fonte 1, b) Fonte 2, c) Fonte 3.....	53
Figura 5.5 Apresenta os histogramas para os sinais de corrente das fontes, a) Fonte 1, b) Fonte 2, c) Fonte 3.....	54

Figura 5.6 Oscilogramas tensão e corrente das amostras 1 à 4 processadas com eletrodo de 5 mm de diâmetro: a) amostra processada com 300 A e 180 cm/min, b) 300 A e 180 cm/min, c) 300 A e 360 cm/min e d) 350 A e 360 cm/min.....	56
Figura 5.7 Oscilogramas tensão e corrente das amostras 5 à 8 processadas com eletrodo de Ø8 mm: a) amostra processada com 350 A e 180 cm/min, b) 400 A e 180 cm/min, c) 350 A e 360 cm/min e d) 400 A e 360 cm/min.....	58
Figura 5.8 a) Amostra 3 processada com eletrodo de 5 mm de diâmetro e b) amostra 8 processada com eletrodo de 8 mm de diâmetro.....	59
Figura 5.9 Apresenta a influência das variáveis: diâmetro do eletrodo sobre a razão da massa removida por massa média depositada durante o processo de soldagem.....	62
Figura 5.10 Apresenta o volume de material removido para dois níveis de velocidade do eletrodo, a) e b) respectivamente.....	63
Figura 5.11 Amostras de 1 a 9 todas processadas com ângulo de ataque de 35°.....	65
Figura 5.12 Amostras de 10 a 18 todas processadas com ângulo de 55°.....	66
Figura 5.13 Amostras de 19 a 26 efeito da variação da altura do arco (ângulo 45° e velocidade 120 cm/min).....	67
Figura 5.14 Amostras de 27 a 32 condições especiais com altura do arco de 12 mm.....	67
Figura 5.15 a) Influência de corrente sobre a largura, b) influência da velocidade sobre a largura e c) influência do ângulo e corrente sobre a largura.....	70
Figura 5.16 a) Influência do ângulo sobre a penetração b) Influência de corrente sobre a penetração, c) influência da velocidade sobre a penetração e d) influência do ângulo e corrente sobre a penetração e) influência da corrente e velocidade sobre a penetração.....	72
Figura 5.17 a) Influência do ângulo de ataque do eletrodo sobre a área fundida, b) influência da corrente sobre a área fundida c) influência da velocidade sobre a área fundida d) influência da corrente e velocidade sobre a área fundida.....	73
Figura 5.18 a) Influência do ângulo de ataque do eletrodo sobre a remoção do metal fundido, b) influência da corrente sobre a remoção do metal fundido c) influência do ângulo e corrente sobre a remoção do metal fundido.....	75

Figura 5.19 a) Influência da altura da coluna do plasma sobre a largura, b) sobre a penetração, c) área total fundida e d) área fundida não removida.	77
Figura 5.20 Microdureza do Aço ASTM 4140 como recebido.	79
Figura 5.21 Microestrutura do Material como recebido. a) Foto realizada por (MO) x200 e b) Foto realizada no (MEV) x2000.	80
Figura 5.22 Microdureza da Etapa 1, amostras soldadas.	81
Figura 5.23 Microestrutura do Metal de Solda das Amostras. a) Aumento 100x, b) aumento 500x e c) e d) aumento de 1000x todas realizadas por (MO).	82
Figura 5.24 Microestrutura das ZAC's das Amostras. a) e b) Regiões adjacente ao metal de solda, c) e d) Martensita identificada próxima ao MS e e) e f) Regiões adjacentes ao metal base.	83
Figura 5.25 Amostras onde foram realizadas as microdurezas. a) plasma com 70 A, b) plasma com 100 A, c) grafite com Ø5 mm, d) grafite com Ø8 mm.	84
Figura 5.26 Microdureza das amostras removidas nas regiões de ZAC clara.	85
Figura 5.27 Microestrutura obtida por (MO) das amostras processadas a arco plasma com corrente de 100 A a), b) e corrente 70 A c) e d) microestruturas obtidas das regiões claras das amostras analisadas.	86
Figura 5.28 Microestrutura obtida nas amostras processadas com eletrodo de grafite com Ø8 mm micrografia a) e b) e eletrodo Ø5 mm nas micrografias c) e d) microestruturas obtidas das regiões claras das amostras analisadas.	88
Figura 5.29 Microestrutura obtida da amostra processada por esmerilhamento.	89
Figura 5.30 Microdureza das amostras removidas nas regiões de ZAC escura.	90
Figura 5.31 Microestrutura obtida pelo (MO) das amostras processadas a plasma com 70A micrografia a), b) e plasma com 100A micrografias c) e d).	92
Figura 5.32 Microestrutura obtidas pelo (MEV) das amostras processadas a plasma com 70A micrografia a), b) e plasma com 100A micrografias c) e d).	92
Figura 5.33 Microestrutura obtida nas amostras processadas com eletrodo de grafite de Ø5mm micrografia a), b) e grafite de Ø8mm micrografias c) e d).	93
Figura 5.34 Microestrutura obtida da amostra processada por esmerilhamento.	94

- Figura 5.35 Perfil de microdureza das amostras após a soldagem final.....95
- Figura 5.36 Microestrutura das amostras esmerilhada, a) região da ZAC-GG, b) região da ZAC-GF, c) microestrutura da região onde foram realizadas as impressões de microdureza.97
- Figura 5.37 Microestrutura da amostra goivada a arco plasma com 70 A; a) região da ZAC – GG, b) região da ZAC – GF e c) região da ZAC - Inter-crítica. A microestrutura da amostra goivada a plasma com 100 A está mostrada no item; d) região da ZAC – GG, e) região da ZAC – GF e f) transição da ZAC – GF com ZAC - Inter-crítica.98
- Figura 5.38 Apresenta a microestrutura da ZAC da amostra goivada com eletrodo de grafite de 5 mm, nos itens a) e b) região da ZAC – GG e c) região da ZAC – GF.99
- Figura 5.39 Microestrutura da ZAC da amostra processada com o eletrodo de grafite de Ø8 mm obtida por Microscopia Ótica (MO) está mostrada nos itens: a) e b).....100
- Figura 5.40 Microestrutura da ZAC da amostra processada com o eletrodo de grafite de Ø8 mm obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) está mostrada nos itens a), b), c) e d).....100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 Faixa de Corrente Recomendada.....	.6
Tabela 4.1 Composição química do aço SAE 1020 (% em massa).....	30
Tabela 4.2 Composição química do aço AISI A516 Gr 60 (% em massa).....	30
Tabela 4.3 Apresenta os parâmetros utilizados nas oitos condições exploradas no processo de goivagem com eletrodo de grafite.....	34
Tabela 4.4 Parâmetros para estudo exploratório do processo a plasma.....	36
Tabela 4.5 Parâmetros para estudo exploratório do processo a plasma verificando a influencia da altura do arco	37
Tabela 4.6 Parâmetros para estudo exploratório do processo a plasma, condições especiais.	37
Tabela 4.7 Composição química do aço AISI 4140.....	39
Tabela 4.8 Composição química do eletrodo 8018-B2.....	40
Tabela 4.9 Amostras processadas na etapa 2.	45
Tabela 5.1 Apresenta a média das notas atribuídas ao acabamento das oito amostras processadas com eletrodo de grafite.....	60
Tabela 5.2 Acompanhamento da deposição e remoção de massa dos processo.	61
Tabela 5.3 Apresenta os resultados os resultados de corrente média, densidade de corrente, e razão entre a massa removida pela média da massa depositada.....	61
Tabela 5.4 Resultados qualitativos do estudo exploratório do processo plasma.	64
Tabela 5.5 Medidas geométricas das amostras goivadas a arco plasma.....	68
Tabela 5.6 Resultados obtidos por um programa de análise estatística sobre a influência das variáveis do processo sobre a característica final da remoção.....	69
Tabela 5.7 Composição química do aço ASTM 4140 utilizado.....	79
Tabela 5.8 Valores de microdureza das bandas claras e escuras.....	82

CAPÍTULO I

1. Introdução

1.1 Posicionamento do problema

Na fabricação ou na manutenção e recuperação de equipamentos e estruturas por soldagem ocorrem a necessidade, em muitas situações, de remover soldas defeituosas ou trincas superficiais e internas nas estruturas. Os defeitos que ocorrem são: trincas que surgem geralmente na Zona Afetada pelo Calor (ZAC) da solda, corrosão localizada em regiões pré-dispostas a esse fenômeno e poros que geralmente são observados em cordões de solda mal executados.

Esses defeitos, em sua maioria, são observados em equipamentos e estruturas metálicas construídas com materiais estruturais temperáveis, como é o caso dos aços ASTM 4140, uma vez que são bastantes empregados para construção mecânica, por apresentarem boa resistência mecânica e ductilidade apropriada. Com isso, tem-se o receio de realizar reparos, seja de manutenção ou de fabricação, dessas estruturas devido às alterações microestruturais e nas propriedades mecânicas causadas pelos processos utilizados nas remoções dos defeitos citados.

Estas operações de remoções de defeitos, em muitos procedimentos, são realizadas principalmente com o auxílio de esmerilhadeiras e, em menor frequência, com goivagem a arco elétrico formado entre um eletrodo de carvão e a peça. A utilização do arco plasma em operações de goivagem vem sendo proposta ao mercado da soldagem como uma alternativa rápida e de boa qualidade, tornando-se uma terceira opção aos usuários para estas operações.

Entre essas opções, há vários pontos discordantes entre especialistas da área encarregados da elaboração de procedimentos de recuperação ou fabricação de equipamentos e estruturas por soldagem. Essas divergências foram constatadas, por exemplo, em discussões com técnicos e engenheiros da Petrobras que atuam nas unidades de refino ou de pesquisas da empresa. Nestas discussões, pode-se constatar que alguns especialistas justificam o uso do esmerilhamento por se tratar de um processo que impõe

menos calor à peça quando comparado com os demais processos de goivagem a arco voltaico, apesar do maior tempo de trabalho e desgaste operador da esmerilhadeira.

Os receios à utilização das técnicas de goivagem estão relacionados alterações metalúrgicas como transformações de fase e crescimento de grão, conseqüentes das elevadas energias, deixando o material inadequado para determinadas aplicações. No processo de goivagem com eletrodo de grafite, que utiliza alta energia por unidade de comprimento, há a preocupação com a precipitação e contaminação por carbonetos, bem como com a oxidação da superfície da remoção, devido à utilização do ar como gás de remoção.

No processo de goivagem a plasma também há oxidação da superfície removida devido também à utilização do ar como gás de remoção, outro fator que gera receios à utilização deste processo é devido à alta densidade de energia característica do processo que pode ocasionar, em uma pequena região, grandes alterações nas propriedades do material devido a alta taxa de resfriamento, como aumento da microdureza. A Figura 1.1 mostra a realização de uma goivagem a arco plasma.

Por outro lado, os defensores dos processos de remoção a arco voltaico argumentam que após a goivagem há a necessidade de realizar uma operação final de esmerilhamento para atingir o acabamento adequado à soldagem posterior de enchimento junta, e que nesta operação uma eventual região afetada pelo calor do arco voltaico seria removida pela esmerilhadeira ou sofreria um refino devido aos passes de enchimento. Além destes fatores, o tempo de processo seria significativamente reduzido, bem como o esforço do operador da esmerilhadeira.

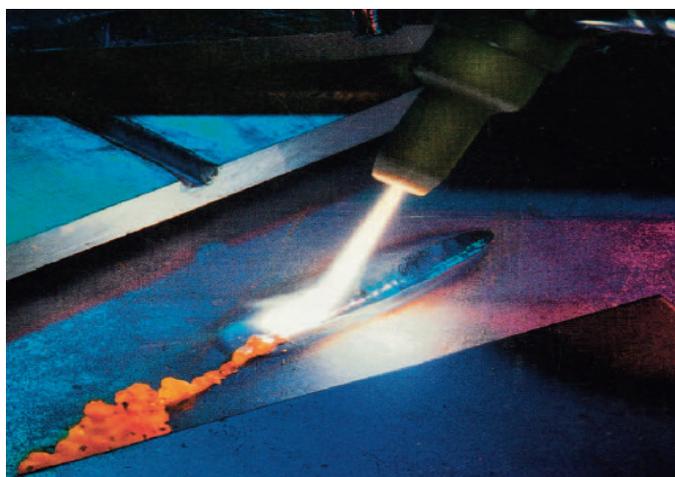


Figura 1.1 Processo de goivagem a arco plasma.

Resultados de investigação no domínio das reparações por soldagem mostram, por exemplo, que as reparações de componentes tubulares podem ser realizadas com sucesso, e que a vida dos componentes reparados pode ser prolongada por décadas. Porém, as reparações por soldagem produzem normalmente alterações marcantes na estrutura e propriedades mecânicas do material, que podem prejudicar de forma significativa o componente em serviço dos equipamentos.

Portanto, torna-se importante um estudo mais detalhado dos processos de remoção de material de peças soldadas para buscar “explicações e esclarecimentos” para essas questões levantadas e ao mesmo tempo definir os melhores parâmetros operacionais, para uma melhor performance de cada processo. Deve-se destacar que este trabalho, se não inédito, é um dos poucos que se propõe a realizar um estudo das alterações microestruturais e discussões sobre a aplicação das técnicas.

CAPÍTULO II

2 Objetivo

2.1 Objetivo Geral

- Este trabalho tem por objetivo geral realizar um estudo comparativo entre os processos de remoção de material por esmerilhamento e por arco voltaico: goivagem a arco plasma e goivagem com eletrodo de grafite, em simulações de manutenção que necessitam de remoção de soldas defeituosas.

2.2 Objetivos Específicos

- No processo de goivagem a arco com eletrodos de grafite, realizar um estudo exploratório dos principais parâmetros operacionais como: diâmetro do eletrodo, corrente e velocidade de goivagem, ângulo de ataque do eletrodo e vazão do ar comprimido e avaliar seus efeitos no comportamento dos sinais elétricos (tensão e corrente) e características dimensionais e qualitativas da vala removida.
- No processo de goivagem a arco plasma, realizar um estudo exploratório dos principais parâmetros operacionais, que forneça informações sobre aspectos geométricos da vala removida: penetração, largura, massa de material fundido.
- Estudo comparativo entre as três técnicas de remoção de material (esmerilhamento, goivagem com eletrodos de grafite e com arco plasma) em simulações de etapas de manutenção de uma estrutura construída com aço ASTM 4140, e avaliar as alterações microestruturais e do perfil de microdureza, decorrentes dos processos.

CAPÍTULO III

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Goivagem com Eletrodo de Grafite

O processo utiliza uma tocha especial que se assemelha ao alicate do processo eletrodo revestido. Essa possui um orifício que direciona um jato de ar comprimido para a expulsão do metal líquido proveniente da poça de fusão, formada pelo arco elétrico entre o eletrodo e a peça, conforme mostrado na Figura 3.1.

O processo é empregado frequentemente para a remoção de raízes de solda imperfeitas.

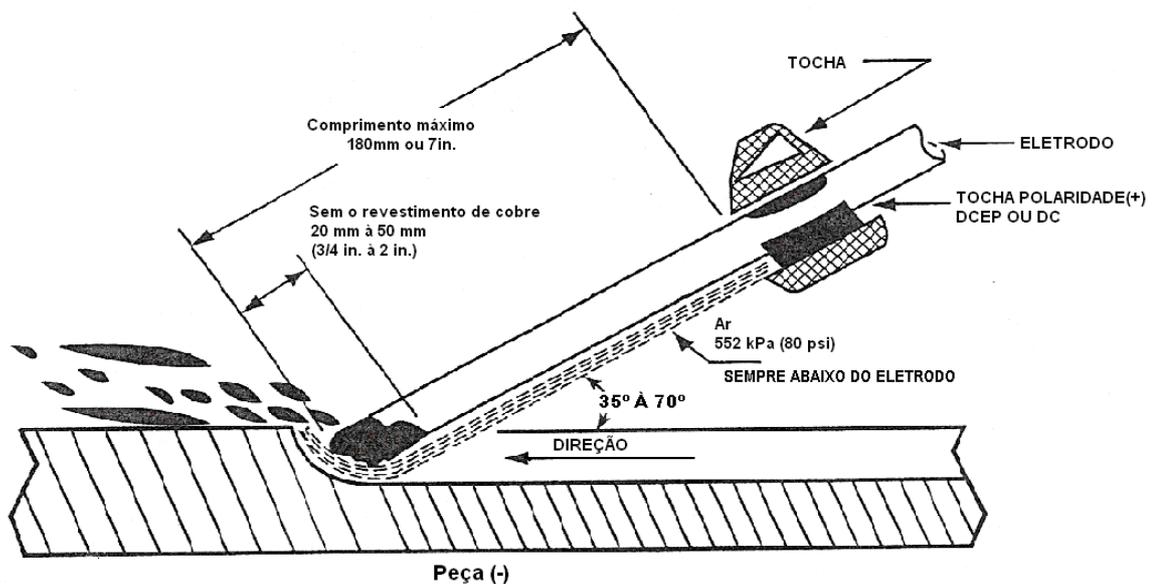


Figura 3.1 Corte com Eletrodo de Grafite (HANDBOOK, 1987).

Os eletrodos são considerados não consumíveis, porém desgastam-se com o uso. Diversos tipos de eletrodos são usualmente empregados no processo de goivagem a arco, os mais comumente usados são os revestidos de cobre com núcleo de grafite, que se prestam para serviços em corrente contínua e estão disponíveis nas bitolas de 4,0 a 25,4 mm. Os eletrodos revestidos de cobre também podem ser fabricados para operarem em

corrente alternada, nesse caso há a necessidade de se adicionar elementos estabilizadores de arco, estando disponíveis nos diâmetros de 4,0 até 13,0 mm.

Eletrodos de grafite de menor custo também são fabricados sem revestimento somente para corrente contínua, mas são poucos utilizados restringindo-se a bitolas de até 9,5 mm. Os eletrodos revestidos de cobre são geralmente preferidos, devido ao desgaste menor durante a operação do que os eletrodos nus (Gimenes, 1995).

As faixas de tensão de arco normalmente empregadas estão em torno de 35 a 56 V e as tensões em vazio devem ter no mínimo 60 V. Na Tabela 3.1 apresenta as faixas de correntes recomendadas, por diâmetro de eletrodo.

Tabela 3.1 Faixa de Corrente Recomendada

Tipos de Fonte Corrente (A)	Diâmetro Eletrodo (mm)			
	5,0	6,0	8,0	9,5
CCEP	150	200	250	350
	200	400	450	600
CA	150	200	300	400
	200	300	500	600
CCEN	150	200	300	400
	180	250	400	500

OBS.: Para eletrodos de 4,0 mm usar CCEP de 90 a 150 A

CCEP- (Corrente constante de eletrodo positivo); CA- (Corrente alternada); CCEN- (Corrente constante de eletrodo negativo).

A pressão de trabalho do jato de ar comprimido requerida para realizar a remoção satisfatória da poça de fusão, normalmente está compreendida na faixa de 5,6 a 7,0 Kgf/m². Tochas para serviço leve podem trabalhar com garrafas de ar comprimido com pressões em torno de 2,8 kgf/mm². Pressões acima de 7,0 kgf/mm² algumas vezes são usadas, mas não há evidências de melhorias na eficiência de remoção de metal.

3.2 Processo Plasma

3.2.1 Sobre o Processo de Soldagem

Para o melhor entendimento do processo de goivagem a plasma, será descrito o processo de soldagem a plasma e apresentadas as devidas alterações do processo de soldagem para o processo de corte e goivagem.

O processo de soldagem a arco Plasma (PAW) é um processo que produz a coalescência dos materiais, pelo aquecimento devido a um arco construído entre o eletrodo e a peça e o eletrodo (arco transferido) ou entre o eletrodo e o bocal constritor da tocha (arco não-transferido). A proteção é realizada por um gás quente e ionizado proveniente da tocha. Este gás de proteção deve ser inerte ou uma mistura de gases inertes.

O processo de soldagem a arco Plasma, assim como o processo (TIG) usa eletrodo não consumível. A tocha tem um bocal que cria uma câmara de gás ao redor do eletrodo. O arco aquece o gás da câmara até uma temperatura que se torna ionizado e que passa a conduzir eletricidade. Este gás ionizado é denominado como Plasma (BRACARENCE, 2000).

Este processo pode ser utilizado para soldar a maioria dos materiais em todas as posições. Ele fornece um melhor controle direcional do arco e uma menor zona afetada pelo calor do que no processo (TIG). O maior problema é o custo relativamente alto do equipamento de controle e um treinamento mais consistente do operador (REIS, R. P. 2007)

O processo de soldagem a arco plasma é basicamente uma extensão do processo de soldagem (TIG). Entretanto, tem-se uma maior densidade de energia e uma maior velocidade do gás plasma em virtude do gás ser forçado através do bocal de construção causando um aumento significativo da temperatura do plasma (BRACARENCE, 2000).

Figura 3.2 mostra as diferenças básicas entre o processo de soldagem (TIG) e o processo de soldagem a plasma.

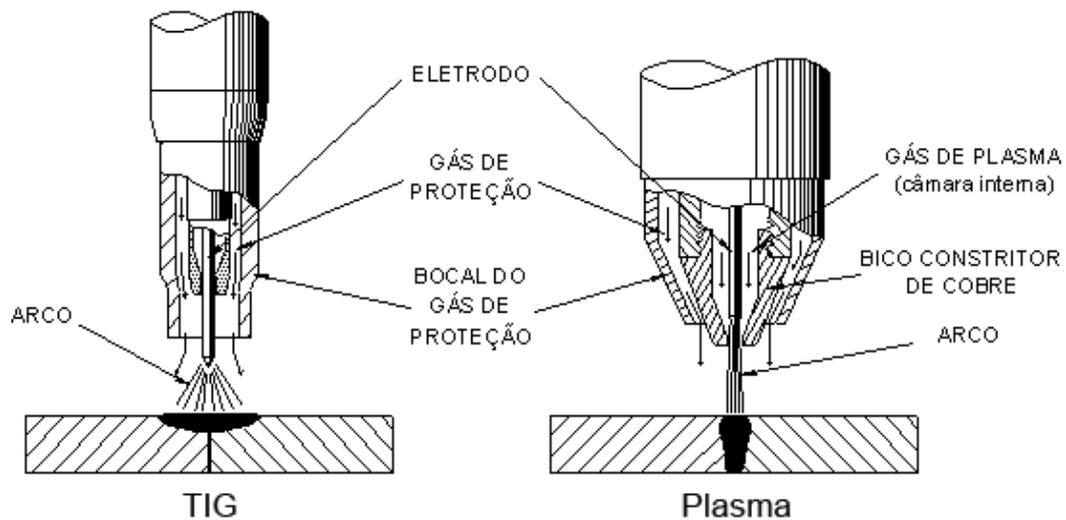


Figura 3.2 Diferenciação básica entre os processos TIG e soldagem a arco Plasma

3.2.2 Sobre o Processo de Corte e Goivagem

O processo de corte a plasma foi inventado em 1954 em Torawanda no Laboratório de Linde divisão de Union Carbide. O jovem cientista, Robert Gage descobriu que tomando um arco TIG e obrigando-o a passar através de um pequeno orifício implicou no aumento considerável da densidade de energia do arco e da temperatura chegando a níveis de 24.000 Kelvin, ou mais. Ao utilizar um fluxo alto de gás através desse orifício ocasionou a remoção do metal fundido da poça de fusão, cortando o material. Uma vez que o gás do arco estava em um estado superaquecido conhecido como plasma, o processo foi chamado de corte a plasma. Contudo, somente na década de 80, com o advento dos sistemas portáteis e de baixo custo, tornou-se um processo popular e sua utilização vem crescendo no mercado industrial, (RUHAM P. R., 2007).

O corte plasma, utilizado no mesmo estado em que foi descoberto, é atualmente chamado de corte plasma convencional. Pode ser aplicado a cortes de vários metais com espessuras diferentes. É muito usado, por exemplo, para cortar aço inoxidável, aço-carbono e alumínio. Para se obter um bom rendimento do trabalho, é preciso utilizar o gás adequado para corte de cada material, controlar a vazão do gás e a tensão do arco elétrico, levar em conta a capacidade de condução de corrente da tocha de plasma e as propriedades do metal a ser cortado.

Uma tocha mecanizada com capacidade para 1.000 ampères pode cortar até 250 mm de aço inoxidável ou alumínio. Entretanto, habitualmente, na indústria, a espessura de corte não ultrapassa 50 mm.

Essa técnica de corte foi introduzida na indústria em 1957 e, inicialmente, era usada para cortar qualquer metal a altas velocidades de corte. As chapas a serem cortadas variavam de 0,5 mm até 250 mm.

Uma variação do processo foi obtida com a utilização do ar atmosférico como gás de remoção, esse tipo de corte incorpora em seu processo o ar comprimido como um elemento que substitui os gases industriais de alto custo, como hidrogênio e hélio e proporciona um corte mais econômico. O oxigênio presente no ar fornece uma energia adicional que aumenta a velocidade de corte em 25%. Esse processo pode ser usado para corte de aço inoxidável e alumínio. Entretanto, a superfície desses materiais tende a ficar fortemente oxidada, o que não é adequado para certas aplicações.

A principal desvantagem desse processo de corte é a rápida erosão do eletrodo. Um eletrodo de tungstênio, por exemplo, desgasta-se em poucos segundos se o gás de corte contiver oxigênio. Por isso, é necessária a utilização de eletrodos especiais feitos de zircônio, háfnio ou ligas de háfnio. Mesmo com o emprego de eletrodos especiais, a vida útil deles é bem menor que a dos eletrodos do processo de plasma convencional.

Assim, pode-se afirmar que as principais características do processo de corte a plasma ser as altas velocidades do gás e uma focalização maior da coluna do arco, possibilitando uma maior concentração de energia gerando o corte. No caso da goivagem a plasma, o arco é ligeiramente desfocado devido ao aumento do furo constritor, deixando a seção transversal do arco um pouco maior do que o especificado para a realização do corte.

Além do arco voltáico ser desfocado no processo de goivagem, existem outras diferenças na utilização dessa técnica para o corte. O arco de corte é dirigido para baixo através do metal em um ângulo reto diminuindo a seção de corte, facilitando a expulsão do metal para fora da junta, gerando duas peças. Enquanto no processo de goivagem a plasma, a tocha está inclinada a um ângulo menor que 70° em relação à peça de trabalho.

A Figura 3.3 apresenta os acessórios de uma tocha de corte. A tocha serve de suporte para os consumíveis e é refrigerada por um fluido que circula por estas peças (gás ou água). O distribuidor ou difusor de gás é construído de material isolante e tem como principal finalidade dar sentido rotacional ao gás. O eletrodo conduz a corrente até um inserto de háfnio presente na ponta do eletrodo responsável pela emissão de elétrons para a geração do plasma. O bico constrói o plasma e o guia para o metal a ser cortado. A capa tem como função manter os consumíveis alinhados e isolar a parte elétrica do bocal frontal. O bocal frontal guia o fluxo de jato de ar coaxial. Por ser refrigerado e isolado, o bocal pode ser apoiado à chapa.

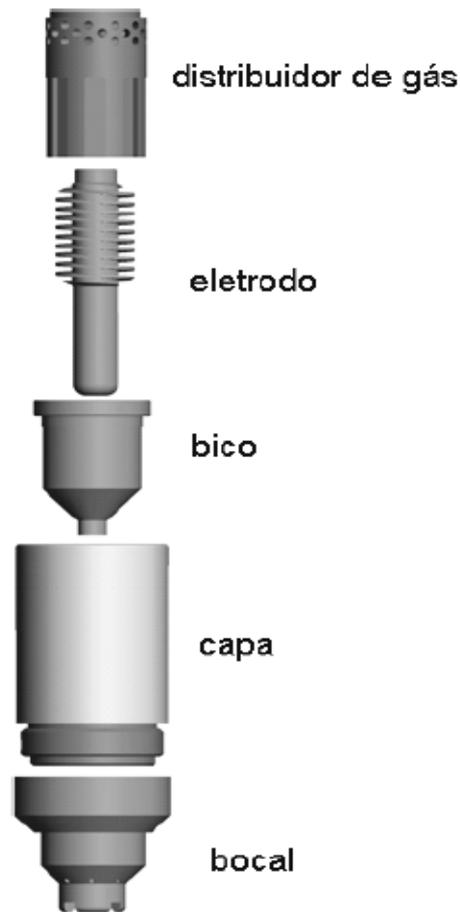


Figura 3.3 Peças de uma tocha plasma.

Uma aplicação deste processo está na manutenção e reparação de estruturas soldadas, muitas vezes em defeitos de soldagens ou problemas em materiais submetidos a condições operacionais severas, gerando defeitos como fissuras. Em empresa de fundição, a goivagem é utilizada para remover barbatanas, e defeitos como vazios. Contudo onde existe metal sendo reparado ou fabricado, frequentemente existe a necessidade do processo de goivagem.

Goivagem a plasma pode muitas vezes ser o melhor método para realização destas tarefas de remoção, por uma variedade de razões. Primeiro, é um processo que gera poucos fumos. Muitos dos meios alternativos de goivagem produzem grandes quantidades de fumos metálicos vaporizados e os inerentes problemas. Em segundo lugar, a goivagem a plasma muitas vezes pode produzir um resultado de maior qualidade (remoção mais homogênea melhor acabamento da remoção), do que outros métodos, isto é particularmente importante para as goivagens onde a junta será ressoldada. Em terceiro lugar, por estas e outras razões, a goivagem a plasma pode ser globalmente o processo de mais baixo custo, quando todos os custos inerentes ao processo são calculados.

3.2.3 Arco Não-Transferido.

O processo plasma pode-se apresentar em duas versões. Entretanto, o que sempre é comum às duas versões é a necessidade de um sistema de alta tensão em alta frequência (ligado entre o bico constritor e o eletrodo) para romper o dielétrico do gás que flui na câmara interna, formando um ambiente ionizado.

Em alguns tipos de sistemas, o arco gerado entre os elementos citados é o responsável pela produção contínua de plasma, o qual sai pelo bico de cobre, forçado pelo gás que flui através do que se pode chamar de câmara de ionização. Este sistema é conhecido como processo plasma com arco não transferido, o qual tem como grande vantagem poder ser utilizado em peças não condutoras de eletricidade. A Figura 3.4 ilustra os dois tipos de arco do processo PAW, onde o comportamento do arco é semelhante para os casos de corte e goivagem.

3.2.4 Arco Transferido

Entretanto, a versão mais comum do processo plasma é a que fundamentalmente não depende deste arco entre eletrodo e bico de cobre para gerar calor para a soldagem. O referido arco, que nesta versão é sempre de pequena potência (correntes menores que 15 A), é chamado de arco piloto e serve como elemento de ponte para formar um outro arco, dito principal, o qual é estabelecido entre o eletrodo de tungstênio e a peça-obra. Se este arco principal é de corrente contínua, o arco piloto não precisará ficar aceso durante a soldagem. Entretanto, se o arco principal for de corrente alternada, o arco piloto tem de ficar aceso para manter a ionização durante as inversões de polaridade do arco principal.

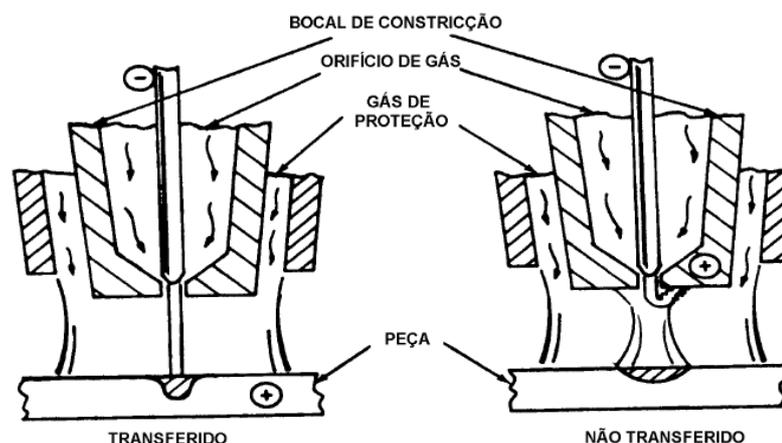


Figura 3.4 Tipos de arco do processo PAW. (Bracarense, 2000).

3.2.5 Métodos de Partida

Na partida por contato o eletrodo e bico estão em contato (“curto-circuito”) e conectados a fonte plasma (Figura 3.5). A pressão de gás faz se distanciarem o bico e o eletrodo, criando um arco. Este arco (piloto) é auto-sustentável (corrente CC); Este tipo de partida é encontrado em muitos sistemas pequenos.

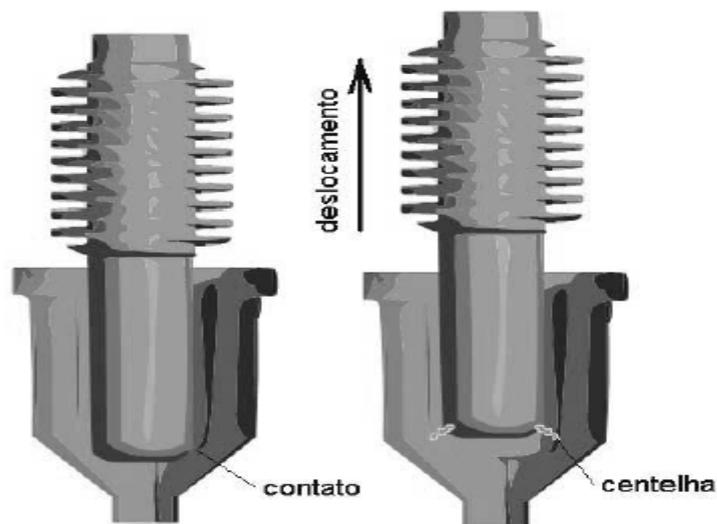


Figura 3.5 Partida por contato.

Na partida por alta frequência é utilizado uma alta tensão elétrica (de 5 a 10 kVCA) em frequências elevadas para gerar o arco piloto, como mostrado na Figura 3.6. Este método é utilizado nos sistemas com eletrodo refrigerado por líquido. Apesar de ser utilizado na maioria dos sistemas plasma, oferece o inconveniente de causar interferências na rede elétrica, requerendo um aterramento eficiente para proteção principalmente de equipamentos eletrônicos instalados próximos ao equipamento ou mesmo nas máquinas de corte.

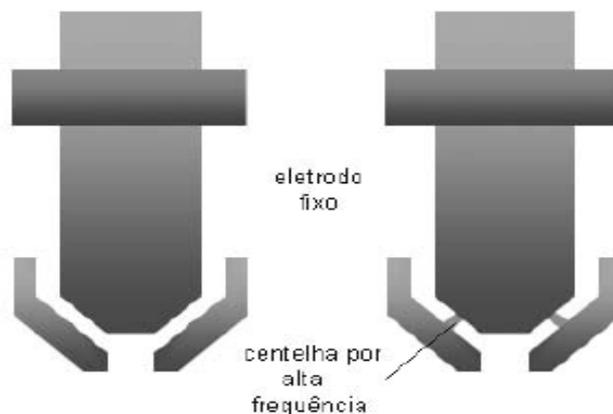


Figura 3.6 Partida por Alta Frequência.

3.3 Comparação Entre os Processos de Remoção

3.3.1 Emissões de Poluentes

A goivagem a ar com eletrodo de grafite, gera fumos que podem ser danosos à saúde. Como o arco no final da vareta de carbono funde o material da peça, uma forte explosão do metal fundido devido ao jato de ar expulsa o material líquido para fora da poça de fusão. Os constituintes do metal líquido reagem fortemente com o ar a alta temperatura, evaporando boa parte do metal fundido em finas gotículas e criando uma fase que consiste em vapor metálico, pó de carvão, e derivados metálicos. Normalmente, esta reação para a goivagem com eletrodo de grafite gera fumos em um nível é muito além do permitido para exposição em um ambiente de soldagem. Dependendo também do material a ser goivado, pode ocorrer a exposição à algumas toxinas provenientes do metal base, podendo agravar o problema. Um lado positivo para o processo de goivagem com eletrodo de grafite é que não produz a emissão de poluentes do tipo ozônio ou óxidos de nitrogênio pelo fato dele ser protegido pelo ar atmosférico (F. ROBERT, 2006).

Quando o processo de goivagem a plasma é utilizado para realizar a mesma tarefa, a quantidade de fumos gerados é bastante inferior. À semelhança da goivagem a ar com carbono e a arco plasma é que ambos utilizam arco elétrico para fundir o metal. No entanto, ao contrário da goivagem a ar com carbono, o gás plasma em si utiliza bem menos ar para empurrar o metal líquido para fora da fenda. Isso é feito com muito menos violência do que ocorre com eletrodo de grafite, como resultado disto ocorrem bem menos vaporização do metal líquido e reações com o ambiente circundante (F. ROBERT, 2006).

Quando o ar é usado como o gás de plasma, há ainda alguma reação que produz alguns fumos. No entanto, o volume produzido é consideravelmente menor do que com a goivagem com eletrodo de grafite. Quando o gás de plasma for inerte, a redução dos fumos gerados é drástica. O metal líquido no momento está protegido da atmosfera circundante pelo gás inerte do fluxo de plasma e tem poucas chances de reagirem com o ar atmosférico. O resultado, na maioria dos casos, é um nível muito baixo de fumos (F. ROBERT, 2006).

3.3.2 Níveis de Ruído

Um benefício adicional da goivagem a plasma sobre a goivagem com eletrodo de carbono é que gera menos ruído. Em equivalentes aplicações, a goivagem a plasma gera

cerca de 10 dB a menos ruído do que a goivagem com carbono. No entanto, proteção auditiva ainda é necessária quando se utiliza goivagem a plasma. podem variar de acordo com os níveis de ruído de acordo com a distância do arco.

Testes realizados indicam que os níveis de ruído do processo de goivagem com eletrodo de carbono é tão elevado que apesar da proteção auricular os níveis ainda são altos o que deixa a tolerância da utilização do processo para alguns minutos por dia. Os níveis mais baixos de ruído da goivagem a plasma combinados com a proteção auditiva determinada por norma aumentam os limites tolerado para utilização do processo por mais tempo durante o dia. As medições do ruído devem ser realizadas a pedido específico, para determinar os níveis adequados de proteção e tempo de exposição do operador (F. ROBERT, 2006).

3.3.3 Qualidade da Remoção

Quando é analisada a qualidade dos processos, a goivagem a arco plasma realmente tem algumas vantagens em relação ao processo de goivagem com eletrodo de grafite. Devido à utilização do eletrodo de grafite, pode ocorrer a contaminação do material base por carbono. Durante a remoção do metal, o eletrodo de grafite se desgasta, e normalmente é observada uma pequena quantidade de metal líquido, com excesso de carbono que re-solidifica na fenda, criando condições adequadas para que mecanismos de difusão ocorram e originem uma camada rica em carbono. Isso pode ser um problema no caso dos aços devido à fragilização dessas regiões, gerando defeitos como fissuração.

O problema é semelhante quando empregado nos aços inoxidáveis, além dessa camada ser regiões propícias ao início de corrosão. Há também outro problema relacionado com o ar quando é utilizado como gás de remoção, pois o ar reage com a camada de metal líquido sobre a superfície da fenda, causando uma camada superficial oxidada. Este não é um problema exclusivo para os aços carbono, mas também dos aços inoxidáveis e de outras ligas resistente à corrosão, esta camada deve ser removida antes do enchimento da junta por soldagem (F. ROBERT, 2006).

No processo de goivagem a plasma, como se utiliza um eletrodo de Tungstênio e não se desgasta na mesma velocidade do grafite, não ocorrem problemas de contaminação do material devido ao eletrodo, porem quando o ar é utilizado como gás de remoção os mesmos problemas são observados nos processos, porém em menor quantidade no processo plasma devido à sua vazão ser menor que na goivagem com grafite. Contudo, quando remoções de responsabilidade são requeridas são utilizados os gases inertes para

realizar as remoções. Desta forma, a fenda é isolada da atmosfera e é geralmente livre de oxidação e outras contaminações. Em alguns casos, quando possível, podem ser realizadas as ressoldagens sem o processo de limpeza adicional.

3.4 Efeitos das Principais Variáveis dos Processos de Goivagem Sobre a Geometria da Vala de Material Removido

3.4.1 Velocidade de Goivagem e Intensidade de Corrente

Devido à semelhança dos processos de goivagem com os processos de soldagem a arco voltaico, pode-se realizar uma analogia sobre as influencias das variáveis de processo sobre a geometria da zona fundida. Desta forma, para um determinado eletrodo, a velocidade de fusão da poça de fusão aumenta com o aumento da intensidade de corrente empregada (supondo constantes as demais condições). Este efeito deve-se ao aumento da temperatura do material processado (J. C. DUTRA, 1979). Assim, pode-se afirmar que o volume de material removido está diretamente relacionado com a intensidade de corrente, como ilustrado na Figura 3.7. (onde "V" é velocidade e I são as correntes)

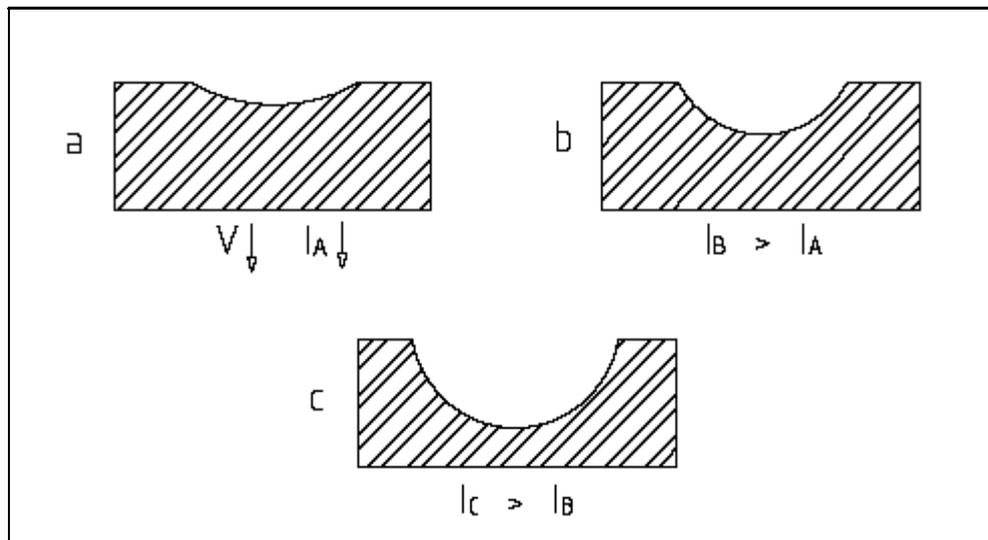


Figura 3.7 Efeito da intensidade de corrente sobre a geometria da zona fundida.

Outra variável que influencia bastante a zona fundida é a velocidade de deslocamento, porém esta relação é inversamente proporcional, pois com o aumento da

velocidade da fonte de calor, ou velocidade de goivagem, implica numa menor energia por unidade de comprimento diminuindo a zona fundida.

3.4.2 Densidade de Energia

A Figura 3.8 demonstra o efeito da distribuição de densidade de energia de uma fonte de calor na geometria da zona fundida. Observa-se que para uma mesma magnitude de aporte térmico (880 W), quanto mais concentrado for à fonte de calor, ou seja, quanto maior a densidade de energia, maior será a penetração da solda. De fato, como se pode ver na (Figura 3.8 d), não somente a penetração diminui, mas a largura da solda também diminui, quando a fonte de calor se espalha excessivamente, condição essa verificada, por exemplo, quando se aumenta o diâmetro do eletrodo, sendo uma característica que pode ser extrapolada para o processo de goivagens com eletrodo de grafite já que a faixa de diâmetros de eletrodos para esse processo é bastante extensa.

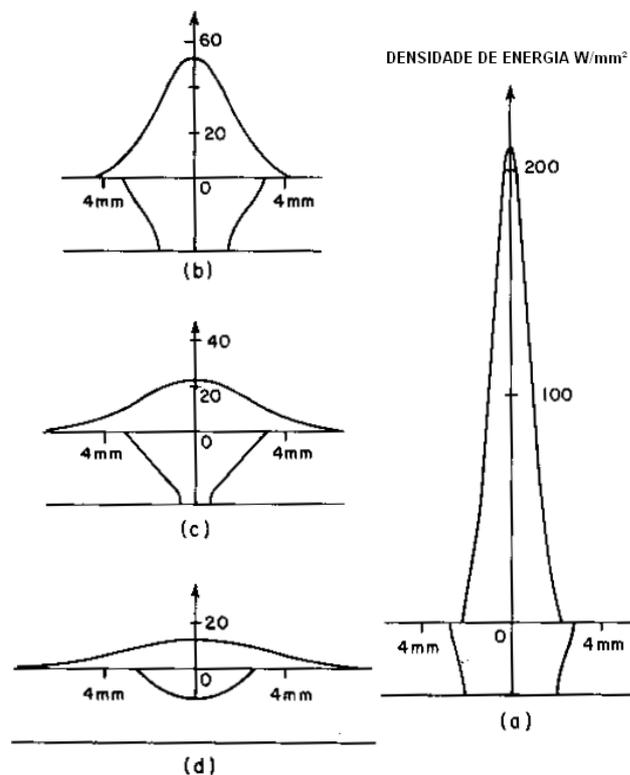


Figura 3.8 Efeito da distribuição de densidade de energia na penetração da solda. A peça é uma placa de alumínio 6061 de 3,2 mm de espessura. Aporte térmico: 880 W, velocidade de soldagem: 4,23 mm/s. A densidade de energia da fonte de calor diminui de (a) para (d). (Kou e Le, 1983)

3.5 Aços-Liga

De acordo com a ABNT, os aços-liga são os aços que possuem (Si) inferiores a 0,6% e (Mn) até 1,65%, e que apresentam outros elementos, cuja a soma das concentrações de todos os elementos, inclusive carbono, não podem ultrapassar 6%. Assim como é o caso do aço ASTM 4140 que trata-se de um aço bifásico (CHIAVERINI, 2008).

O aço ASTM 4140 tem sido bastante utilizado na fabricação de peças e componentes que necessitem de boa resistência mecânica, e ductilidade apropriada. Sendo possível controlar suas propriedades através de tratamentos térmicos de tempera e revenimento.

A temperabilidade é medida através do ensaio Jominy. A norma ABNT NBR- 6339 descreve o ensaio e fornece todos os elementos necessários a sua execução. As faixas de temperabilidade representam o resultado de numerosas determinações realizadas através do ensaio Jominy. A Figura 3.9 mostra os resultados do ensaio de Jominy para o aço ASTM 4140, onde se verifica a queda de dureza na medida em que se afasta da superfície do corpo de prova.

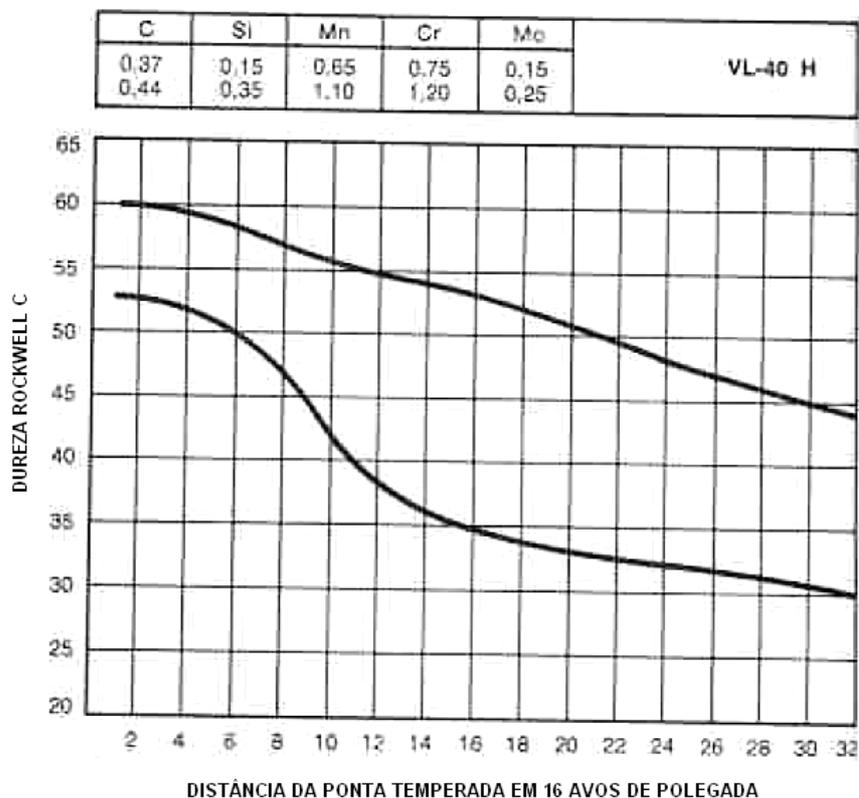


Figura 3.9 Faixa de temperabilidade do aço 4140.

Depois de usinadas, as amostras são temperadas e revenidas a partir de duas temperaturas de austenitização comumente características como 870°C e 1200°C. Os meios de têmpera mais empregados são a água, óleo e salmoura.

Os aços temperados e revenidos apresentam relativamente boa proporção entre resistência ao escoamento e tenacidade devido à fina dispersão da mistura de ferrita e cementita dentro da microestrutura. A resistência ao escoamento e a tenacidade dos aços temperados e revenidos são altas se o tamanho de grão da austenita prévia é fino. O diagrama das propriedades do aço 4140 esta mostrada na Figura 3.10.

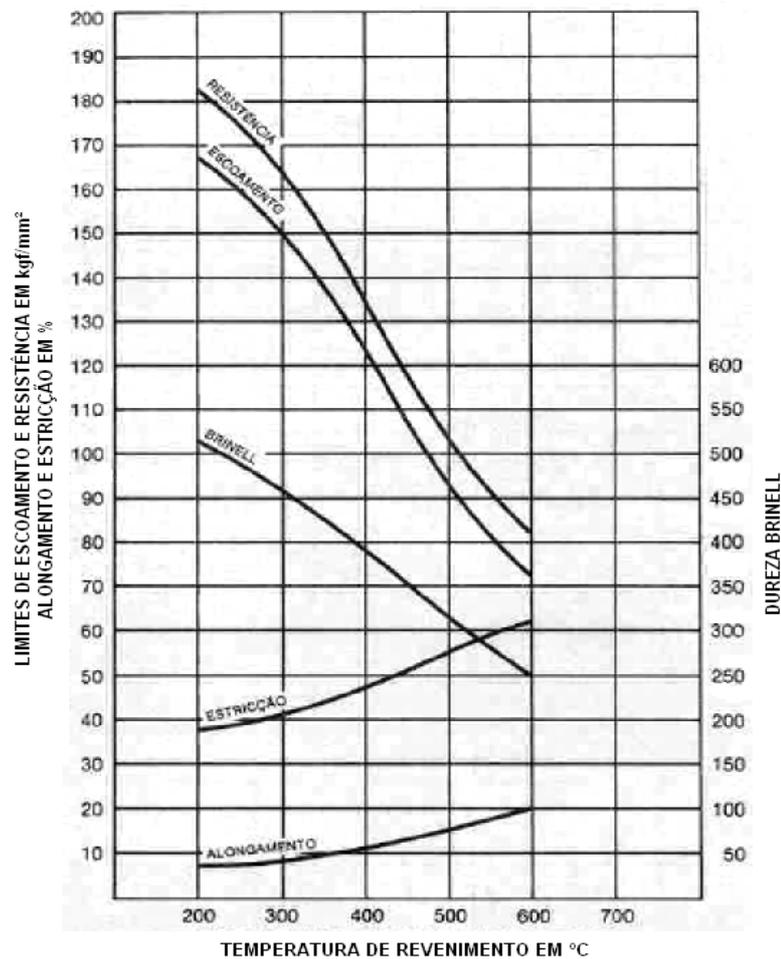


Figura 3.10 Diagrama de revenimento do aço 4140.

O refino do tamanho de grão dos aços, por ciclo de temperatura, pode ser feito por repetidas transformações de fase $\alpha \rightarrow \gamma$ (LUIZ RIBEIRO, 2006)

Um dos meios mais efetivos do refino da austenita precedente é por ciclos de temperatura, ou seja, por ciclos de aquecimento e resfriamento do aço. O refino da

microestrutura dos aços por ciclos de temperatura pode ser efetuado por taxa de resfriamento que favorece a transformação difusional de austenita para perlita, ou por taxas que favorecem a transformação da austenita para bainita ou transformações adifusionais para martensita.

Para obter melhores efeitos do refino da estrutura e maiores acúmulos do efeito do ciclo, as amostras devem ser aquecidas rapidamente e o tempo de mudança da temperatura de austenitização extremamente pequeno. O número de ciclos não deve exceder o valor crítico quando micro-trincas podem aparecer e a tenacidade cair em relação ao limite de escoamento. Além disso, por ciclos de temperatura a dureza do aço pode cair devido ao refino do tamanho de grão da austenita precedente. Devido a menor dureza do aço tratado por ciclo de temperatura, a bainita e a perlita fina podem ser formadas, exceto martensita após têmpera.

As propriedades mecânicas dos aços revenidos são melhores após têmpera da microestrutura de martensita homogênea do que após têmpera da microestrutura de martensita e bainita ou mistura de martensita e perlita fina.

O ciclo de tratamento térmico com a combinação de transformações difusionais ou pouco difusionais dos aços provam ser o método mais conveniente de tratamento térmico para reforçar os aços por têmpera e revenido. Este ciclo combinado consiste de:

- Ciclo de temperatura com transformação difusional;
- Primeira têmpera;
- Segunda têmpera.

O meio de têmpera e a temperatura máxima de austenitização determinam diretamente as condições de dureza. Para efetuar boas propriedades mecânicas por têmpera, o aquecimento até a temperatura de austenitização deve levar em conta austenita de granulação fina. Portanto, a temperatura antes da têmpera deve ser geralmente um pouco acima da temperatura máxima do ciclo de temperatura. A Figura 3.11 mostra como variam as propriedades mecânicas dos aços ARBL com o refino da estrutura (Luiz Ribeiro, 2006).

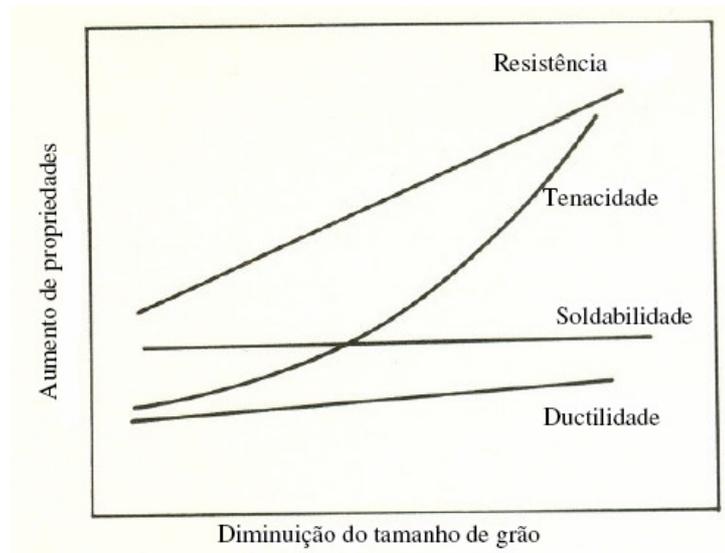


Figura 3.11 Variação das propriedades mecânicas com o refino do tamanho de grão para os aços ARBL.

3.6 Microestruturas da ZAC e da Zona Fundida (ZF) dos aços

A microestrutura é uma característica que governa as propriedades de muitos aços tendo uma direta relação com os processos de fabricação e os ciclos térmicos submetidos ao material.

A microestrutura bifásica constituída de ferrita e martensita pode ser obtida por aquecimento do aço hipoeutetóide de baixa liga entre as temperaturas Ac_1 (temperatura final de transformação de austenita para ferrita) e Ac_3 (temperatura inicial de transformação da austenita para ferrita) transformando a fase ferrita em austenita e, posteriormente, com um rápido resfriamento ocorrendo a transformação da austenita em martensita.

No aço SAE 4140, a temperatura Ac_3 varia dentro do intervalo de temperatura de 780 °C a 810 °C e a temperatura Ac_1 varia de 730 °C a 760 °C (A. ROSE - Y. GAPONOV apud LUIZ RIBEIRO, 2006). Desde que o intervalo de Ac_1 - Ac_3 do aço SAE 4140 é relativamente pequeno, o ciclo de temperatura máxima deve ser alto o bastante para acomodar qualquer variação de temperatura Ac_3 .

Por controle da forma, tamanho, quantidade e dispersão da martensita na matriz ferrítica, uma relação considerável de resistência-ductilidade é obtida. Quando a fração de volume da martensita dentro da matriz do aço bifásico aumenta, o limite de escoamento e a resistência à tensão aumentam enquanto a ductilidade diminui. Ao passo que dentro do aço com concentração de carbono constante, a dureza das ilhas de martensita aumenta

enquanto a fração de volume da martensita diminui. Quando aços bifásicos foram primeiramente desenvolvidos, os estudos iniciais se concentravam basicamente em suas propriedades de forma. Hoje, sabe-se que é perfeitamente possível melhorar as propriedades mecânicas como dureza, tenacidade, resistência à fadiga, etc. através do controle adequado da forma, tamanho, quantidade e composição química da martensita dentro da matriz de ferrita para isso é importante conhecer as influências dos elementos de liga e como os ciclos térmicos afetam na formação da martensita (AHN YS, 1999 - KIM KJ, 1997, apud LUIZ RIBEIRO, 2006).

Os principais problemas relativos às alterações metalúrgicas e distorções de peças soldadas são associados, normalmente, aos processos que envolvem fusão.

Para os aços com baixo teor de carbono e baixa liga, a poça de fusão solidifica-se inicialmente como ferrita, podendo sofrer uma reação peritética com a formação de austenita. Durante o resfriamento, a ferrita remanescente transforma-se em austenita. Esta, em função das elevadas temperaturas, sofre um grande crescimento de grão, tendendo a apresentar uma estrutura de grãos colunares e grosseiros, similar à estrutura original de fusão da ZF. Em temperaturas mais baixas, inferiores a 900°C, a austenita se decompõe, resultando em diferentes produtos ou constituintes.

Assim, a microestrutura da zona fundida do metal de solda baixo carbono e baixa liga é resultado do crescimento epitaxial colunar do metal de solda solidificado, sendo influenciada pelo estado inicial da austenita (composição, tamanho de grão, micro-segregações e estado de deformações), das condições de aquecimento e resfriamento, bem como do efeito dos elementos de liga.

Em uma solda em um só passe, a microestrutura da ZF será formada pelos produtos da decomposição da austenita em ferrita durante o ciclo de resfriamento contínuo, sendo que a ferrita assume diferentes morfologias, algumas de grande semelhança. As características desta microestrutura, tanto em escala microscópica como em escala sub-microscópica, são fundamentais na determinação das propriedades finais da ZF (MODENESI, 2004).

As fases resultantes da decomposição da austenita são basicamente: ferrita, cementita e martensita. Além destas, pequenas quantidades de austenita podem permanecer inalteradas (austenita retida) e diferentes precipitados (outros carbonetos, nitretos, etc.) e inclusões podem existir. Estas fases podem aparecer na forma de diferentes constituintes, nem sempre de fácil identificação, a qual é ainda mais dificultada pela grande diferença de aparência destes constituintes em relação aos do metal base. Estas

dificuldades causaram, há algumas décadas, a proliferação de terminologias diferentes e conflitantes para descrever a microestrutura do metal de solda. Há cerca de 20 anos, o Instituto Internacional de Soldagem (IIW) desenvolveu um sistema de classificação para os constituintes do metal de solda, baseado na sua observação com o microscópio ótico, que se tornou o mais aceito atualmente. Segundo este sistema, os constituintes mais comuns da zona fundida podem ser classificados como: (WAINER, E., 1992)

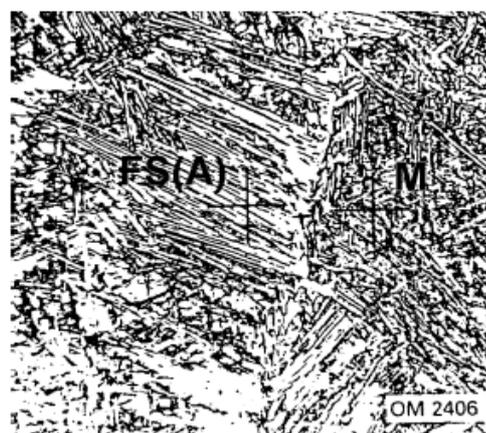
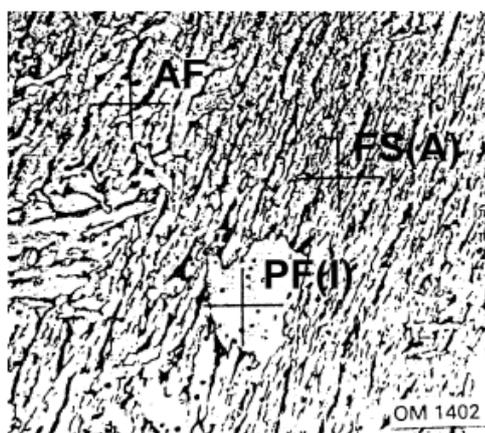
► Ferrita primária (primary ferrite) = PF – Pode ocorrer como ferrita de contorno de grão (grain boundary ferrite) = PF(G) ou como ferrita poligonal intragranular (intragranular polygonal ferrite) PF(I); (Figura 3.12).

► Ferrita acicular (acicular ferrite) = AF – É constituída por pequenos grãos de ferrita não alinhados no interior do grão da austenita prévia. A relação comprimento/largura deve ser menor que 4:1 para duas ripas adjacentes ou não-alinhadas; (Figura 3.12).

► Ferrita com fase secundária (ferrite with second phase) = FS – Pode ocorrer sob duas formas: ferrita com fase secundária alinhada (ferrite with aligned second phase) = FS(A) onde ocorrem duas ou mais ripas adjacentes e a relação comprimento/largura é maior que 4:1. Outra forma é a ferrita com fase secundária não alinhada (ferrite with non aligned second phase) = FS(NA), a qual circunda regiões de ferrita acicular; (Figura 3.12).

► Agregado ferrita/carboneto (ferrite carbide ageregate) = FC – Estrutura de ferrita fina e carbonetos, que tanto pode ser uma precipitação interface, como perlita. Se o agregado for identificado como perlita, pode ser distinguido com FC(P); (Figura 3.12).

► Martensita (martensite) = M – Este microconstituente pode apresentar-se sob duas formas: martensita escorregada (lath martensite) = M(L) ou martensita maclada (twin martensite) = M(T). (Figura 3.12).



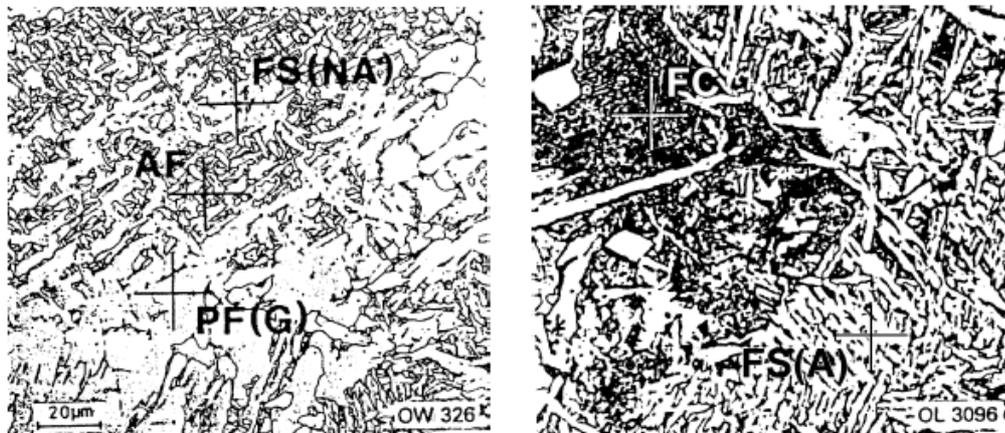


Figura 3.12 Microestrutura do metal de solda não alterado mostrando diferentes constituintes microestruturais (MODENESI, 2004).

3.7 Influência da Composição na Zona Fundida dos aços

A influência da composição química, presença de precipitados e da velocidade de resfriamento na formação dos diferentes constituintes descritos no item 3.6 é complexa. Em geral, a presença de um elemento de liga diminui a velocidade de decomposição da austenita, favorecendo a ocorrência desta transformação a uma temperatura mais baixa, ou mesmo suprimindo-a, para uma velocidade de resfriamento suficientemente elevada. Diferentes elementos podem, entretanto, afetar de forma diferente detalhes da reação de decomposição da austenita. Discuti-se, a seguir, de forma resumida, o efeito de alguns elementos químicos na microestrutura da zona fundida (EVANS, G.M., BAILEY, N, 1997).

- ❖ Manganês promove um refinamento da microestrutura. Um aumento de seu teor até cerca de 1,5% leva à formação de ferrita acicular em lugar de ferrita primária de contorno de grão e de placas laterais de ferrita. A Figura 3.13 mostra a alteração da microestrutura devido à variação do teor de Mn em soldas obtidas com o processo SAW.
- ❖ Silício é o principal desoxidante do metal de solda, sendo, neste aspecto, cerca de quatro vezes mais efetivo que o manganês. Não é muito efetivo para promover a formação de ferrita acicular, favorecendo mais estruturas de placas laterais.

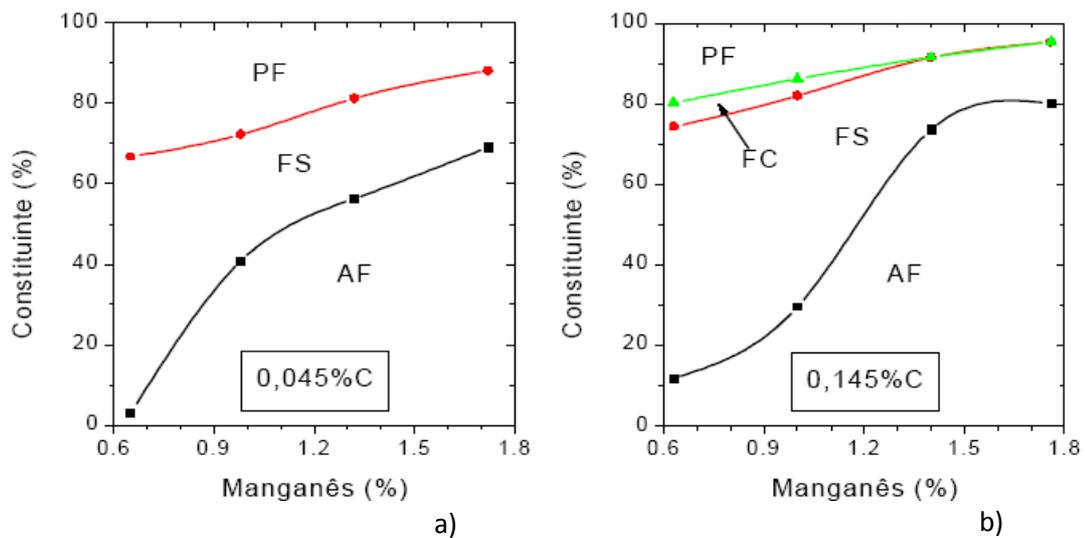


Figura 3.13 Microestrutura da ZF obtida na soldagem SMAW em função do teor de Mn para (a) 0,045%C e (b) 0,145%C (EVANS, G.M., BAILEY, N, 1997).

- ❖ Níquel (Figura 3.14) influencia a microestrutura de forma similar, mas menos intensa do que o Mn, favorecendo o refinamento da estrutura e a formação de ferrita acicular. Em termos de propriedades mecânicas, o Ni tem um importante efeito benéfico na tenacidade da solda.
- ❖ Molibdênio e cromo (Figura 3.15) estabilizam a ferrita e aumentam a temperabilidade fortemente. Tendem a reduzir a quantidade de ferrita de contorno de grão, favorecendo a formação de ferrita acicular e principalmente de bainita superior (FS(UB)).

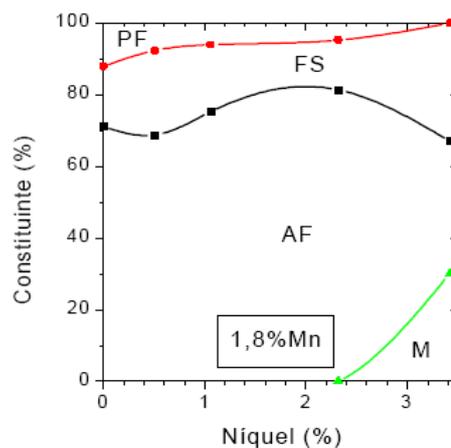


Figura 3.14 Microestrutura da ZF obtida na soldagem SAW em função do teor de Ni. M- martensita.

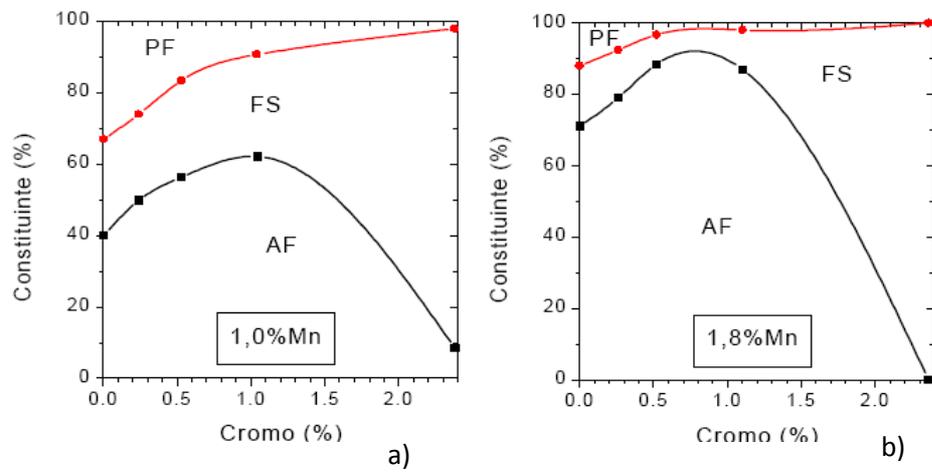


Figura 3.15 Microestrutura da ZF obtida na soldagem SAW em função do teor de Cr para (a) 1,0%Mn e (b) 1,8%Mn (Evans, G.M., Bailey, N, 1997).

3.8 Influência das Inclusões nas Propriedades Mecânicas dos Aços e Modo de difusão.

Na prática e do ponto de vista da influência das propriedades mecânicas no comportamento de uma inclusão é comum separá-las, baseadas em seu tamanho, em dois grandes grupos: macro e micro-inclusões (KIESSLING, 1968).

Muitas pesquisas realizadas ao longo dos anos constataram que o efeito fundamental de uma inclusão no aço é facilitar a formação de fissuras quando o material está sujeito a esforços mecânicos (KIESSLING, 1968). Porém, verificações através de estudos comprovaram que somente as macro-inclusões levam a este comportamento, o que leva a evitar o seu aparecimento durante as etapas de produção do aço (KIESSLING, 1968). Com relação às micro-inclusões suas presenças são toleráveis dentro de certos limites, pois estas não exercem influência sobre as propriedades mecânicas, podendo em certos casos trazer efeitos benéficos como, por exemplo, o controle do tamanho de grão da matriz, aumento do limite de elasticidade e da dureza do material, facilitando a precipitação de carbonetos e nitretos, impedindo-os de se precipitarem no limite do grão (KIESSLING, 1968).

Esta subdivisão das inclusões, (macro e micro-inclusões) com respeito ao seu efeito nas propriedades mecânicas é baseada em uma “dimensão crítica”, acima da qual a inclusão poderá trazer consideráveis perdas de propriedades mecânicas aos aços. Seus valores estão entre 50 a 500 μ m, e vão depender do tipo de aço, tipo e localização da inclusão no material e, além disso, da propriedade de interesse que se pretende manter ou melhorar de acordo com a utilização prática.

As macro-inclusões agem como concentradores de tensões ocasionando na maioria dos casos micro-rupturas locais e o surgimento de micro-fissuras que rapidamente se propagam e levam a fratura do material. Por isto, é importantíssimo na área da mecânica da fratura estimar o tempo de vida útil de cada componente e ter o controle exato dos diversos parâmetros que controlam este comportamento: forma, dimensões, posição e natureza da inclusão (KIESSLING, 1968).

As inclusões de carbono devido ao processo de goivagem com eletrodo de grafite podem ser geradas por dois fatores (KIESSLING, 1968). O primeiro ocorre quando o metal fundido não é totalmente removido da vala, pois este material reage com os elementos presentes no arco. O segundo modo de contaminação por carbono no metal base pode

ocorrer devido à difusão que ocorre durante um curto-circuito. Pode-se estimar esta segunda contaminação pelas equações de difusão em estado não-estacionário.

Sabendo que a maioria das situações práticas envolvendo difusão ocorrem em condição de estado não-estacionário (condições transientes). Isto é, o fluxo de difusão e o gradiente de concentração em um ponto específico no interior de um sólido variam ao longo do tempo. Havendo como resultado um acúmulo do elemento que se encontra em difusão. (CALLISTER W. D. Jr, 2002)

A formulação matemática para este tipo de difusão é conhecida por segunda lei de Fick e está apresentada na Equação 1, onde pode-se relacionar a concentração C em relação ao tempo “t” e a posição o material “x”, x sendo zero na extremidade da superfície.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Equação. 1}$$

Quando são conhecidas, as condições de contorno possuem um sentido físico e assim é possível determinar a concentração de um elemento no material em uma determinada posição ou quanto do tempo que esse material permanece em condições de difusão. Para isso é necessário conhecer as condições de contorno abaixo.

$$\text{Para } t = 0, \quad C = C_0 \text{ em } 0 \leq x \leq \infty$$

$$\text{Para } t > 0, \quad C = C_s \text{ (a concentração superficial constante) em } x = 0$$

$$C = C_0 \text{ em } x = \infty$$

Aplicando estas condições de contorno obtém-se a Equação 2.

$$\frac{Cx - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad \text{Equação. 2}$$

Sabendo que o D trata-se do coeficiente de difusão e indica a taxa segundo a qual os átomos se difundem, é possível determinar este coeficiente através da Equação 3, onde D0 é uma constante pré-exponencial independente da temperatura (m²/s), Qd é a energia de ativação para a difusão e R constante dos gases.

$$D = D_0 \cdot \exp \left(-\frac{Q_d}{RT} \right) \quad \text{Equação. 3}$$

CAPÍTULO IV

4 Materiais e Métodos

O trabalho foi dividido em duas etapas. A primeira focada nos processos de remoção a arco voltaico, onde foi realizado um estudo exploratório dos processos de goivagem com eletrodo de grafite e arco plasma.

Na segunda etapa, realizou-se um estudo das alterações metalúrgicas e propriedade mecânica (microdureza) decorrentes das operações de manutenção que necessitasse da remoção completa do cordão de solda defeituoso. Para tanto, foram confeccionados corpos de prova para simular soldas com defeitos, cujos reparos foram realizados pelos processos de esmerilhamento, goivagem com eletrodo de grafite e arco plasma.

4.1 Etapa 1: Estudo Exploratório dos Processos de Goivagem com Eletrodo de Grafite e Arco Plasma

O estudo exploratório da goivagem com eletrodo de grafite consistiu na avaliação dos efeitos dos parâmetros operacionais importantes como: corrente, velocidade de operação, ângulo de ataque (ângulo do eletrodo com a chapa), vazão do ar comprimido e diâmetro do eletrodo sobre a estabilidade do arco voltaico e aspecto qualitativo da vala de material removido, vislumbrando uma melhor resposta dos processos para aplicações como: eliminação de uma trinca interna ao material, que necessita de uma remoção de grande volume de metal ou reparos de defeitos superficiais que requerem uma menor remoção.

O estudo exploratório do processo de goivagem a plasma foi feito com menos variáveis do que o processo com eletrodo de grafite. Isto é devido a sua característica de ter uma boa estabilidade do arco o que possibilitou realizar o estudo apenas sobre as variáveis operacionais: ângulo de ataque do eletrodo, altura do arco, velocidade de corte e corrente.

Como o trabalho teve duas etapas com estudos exploratórios diferentes, construiu-se um organograma de procedimentos para facilitar o entendimento dos estudos feitos. (Figura 4.1)

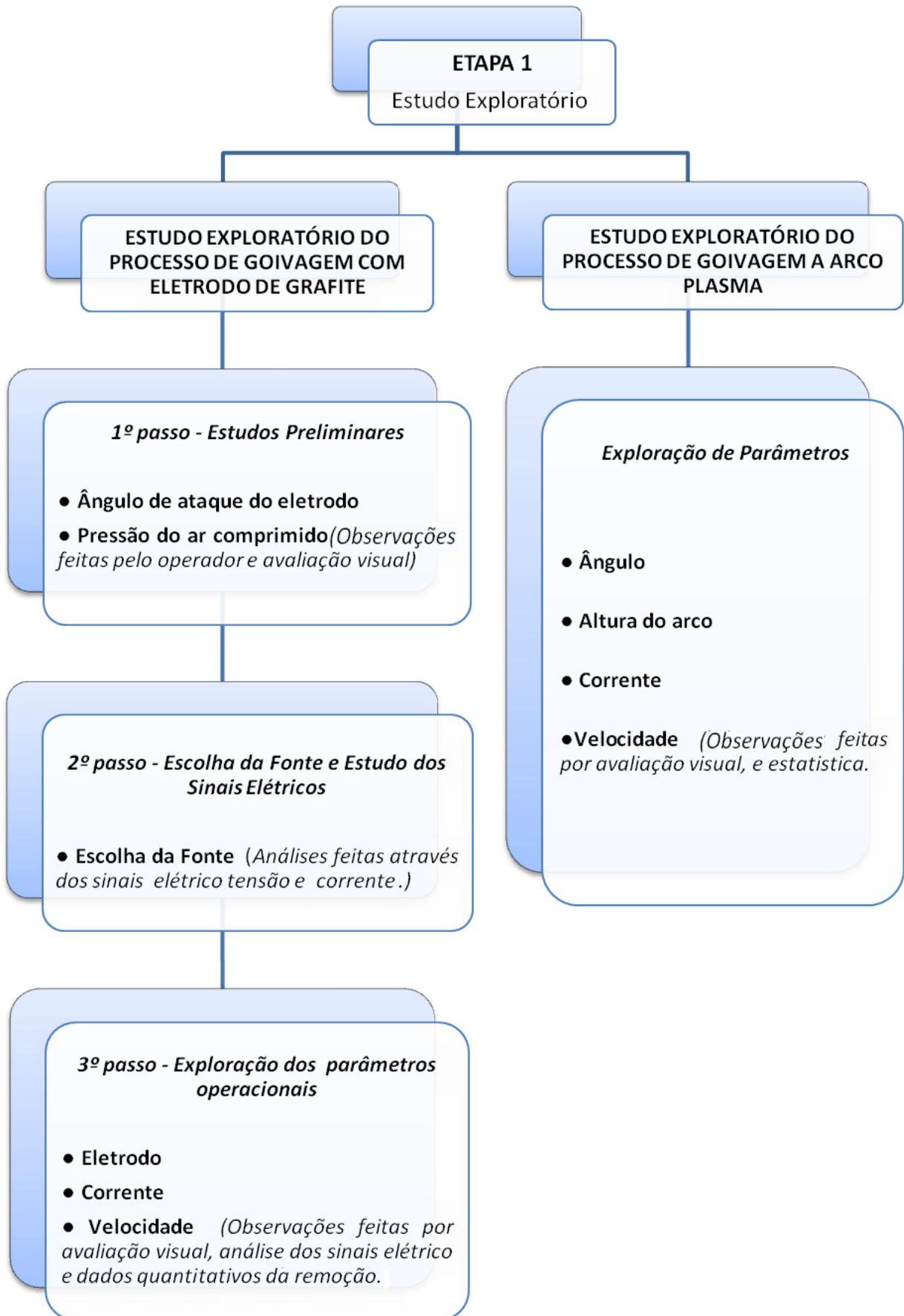


Figura 4.1 Organograma da Etapa 1 – Estudo Exploratório.

4.1.1 Materiais e Equipamentos Utilizados na Etapa 1

Para o desenvolvimento desta etapa do trabalho, foram utilizadas chapas de aço carbono SAE 1020 de 6 mm e 19 mm de espessura na goivagem a arco plasma e o aço ASTM 516 Gr. 60 na espessura de 12,7 mm na goivagem com grafite. Esses materiais foram escolhidos por se tratarem de aços de menor custo que estavam disponíveis no laboratório e porque neste primeiro momento não serão analisadas as alterações metalúrgicas e as propriedades mecânicas decorrentes dos processos. A Tabela 4.1 e a Tabela 4.2 mostram a composição química dos aços utilizados.

Tabela 4.1 Composição química do aço SAE 1020 (% em massa).

C	Mn	S	P
0,20	0,4	0,05	0,03

Tabela 4.2 Composição química do aço AISI A516 Gr 60 (% em massa).

C	Mn	S	Cr	Si	Al	P
0,18	0,99	0,008	0,004	0,20	0,041	0,023

Foram realizados cordões de solda nas amostras processadas no 3º passo do (Estudo Exploratório do Processo de Goivagem com Eletrodo de Grafite). A realização destas soldas foi automatizada com auxílio de um robô KUKA modelo KR 16. (Figura 4.2)

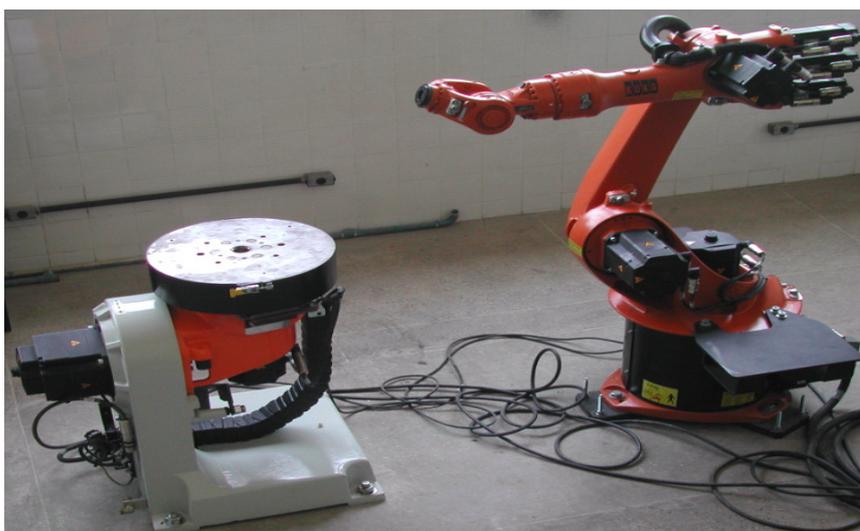


Figura 4.2 Robô KUKA modelo KR16.

Para a realização das goivagens a arco plasma foi utilizada a fonte Powermax1650 Figura 4.3 a), específica para esta operação, conectada a um compressor Twister Schulz 2hp Figura 4.3 b) através de uma linha de ar comprimido, devidamente filtrada.

Uma característica importante da fonte de goivagem a plasma é que ela controla a pressão do ar comprimido necessária para a realização da goivagem, dentro de uma faixa que vai de 5,0 a 7,0 bar. Quando a pressão do ar cai abaixo dessa faixa, a fonte apresenta um “erro” e não realiza a operação. Esse fato garante que as pressões utilizadas nas operações de goivagem a plasma foram realizadas dentro das condições de pressão especificadas pelo fabricante da fonte.



Figura 4.3 Equipamentos para processo de goivagem a arco plasma.

Foi utilizado o sistema de aquisição de dados spider 8 mostrado na Figura 4.4, para obtenção dos sinais elétricos da tensão e corrente, analisados no 2º e 3º passo do (Estudo Exploratório do Processo de Goivagem com Eletrodo de Grafite).



Figura 4.4 Sistema de aquisição de dados.

4.1.2 Estudo Exploratório do Processo de Goivagem com Eletrodo de Grafite

4.1.2.1 1º Passo – Estudos Preliminares

Por se tratar de um processo pouco estudado, viu-se a necessidade de investigar os efeitos do ângulo de ataque do eletrodo e a pressão do ar comprimido sobre o aspecto qualitativo da vala e estabilidade do processo, com o intuito de identificar uma faixa de valores que forneçam remoções satisfatórias.

Assim, foram realizados vários testes varrendo o ângulo de ataque no intervalo de 25º à 70º e a pressão do ar comprimido na faixa de 6,0 a 8,5 bar.

Os demais parâmetros utilizados foram mantidos fixos e selecionados conforme a recomendação do fabricante do eletrodo, que para o de 5 mm de diâmetro, recomenda correntes em torno de 300 A e para o de 8 mm, em torno de 400 A.

4.1.2.2 2º Passo – Escolha da Fonte e Estudo dos Sinais Elétricos

O processo de goivagem com eletrodo de grafite, por se tratar de um processo sem elementos no eletrodo que auxiliam na manutenção do arco elétrico, (diferentemente ao observado no processo de soldagem com eletrodo revestido, e pelo gás utilizado na remoção ser o ar atmosférico), tem a característica de ser instável. Como havia disponível no laboratório três fontes com características operacionais e de fabricantes diferentes, decidiu-se por realizar um estudo que indicasse a melhor fonte para condução dos ensaios de goivagem.

Os ensaios realizados consistiram em realizar goivagens com as três fontes de soldagem disponíveis. As primeiras goivagens foram feitas com o eletrodo de 5 mm de diâmetro e empregando corrente contínua constante de 300 A. A velocidade de goivagem foi fixada em 180 cm/min e obtida com o auxílio de uma tartaruga, que servia de referência e guia para o soldador. Em segundo momento, ensaios semelhante foram realizados empregando o eletrodo de 8 mm, corrente de 400 A e velocidade de goivagem de 180 cm/min.

A análise dos resultados foi feita baseada nos sinais elétricos de tensão e de corrente através de histogramas da corrente e oscilogramas, obtendo informações da frequência de curto-circuito, de tempo de arco extinto, da corrente e da tensão média.

O material utilizado nos passos 1 e 2 foi o aço 1020 com espessura 19mm.

4.1.2.3 3º Passo – Exploração dos Parâmetros Operacionais do Processo de Goivagem com Eletrodo de Grafite

O Passo 3 consistiu em realizar um estudo sistemático das variáveis do processo. Foi escolhida a fonte que apresentou nos ensaios realizados no Passo 2 os melhores resultados em termos de estabilidade de arco (menor extinção) e qualidade da vala de material removido através dos sinais tensão e corrente

Novos ensaios foram realizados com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros: diâmetro do eletrodo, corrente de goivagem, velocidade de goivagem e ângulo de ataque sobre a geometria da remoção, como; penetração, largura, volume de material removido e acabamento da remoção. Foram adquiridos os sinais de tensão e de corrente dos ensaios realizados.

Para realizar esta etapa, foram confeccionados 10 corpos de prova do material AISI A516 Gr 60 por ser um aço estrutural amplamente empregado em equipamentos do Setor de Petróleo e Gás Natural, como torres, tanques de armazenamento e tubulações. A Figura 4.5 mostra as dimensões dos corpos de prova. Cada corpo de prova foi soldado de forma automatizada com auxílio de um robô KUKA modelo KR 16, (Figura 4.2), utilizando o processo MIG/MAG, com os seguintes parâmetros nominais: corrente 120 A, tensão 20 V, gás de proteção C25 (75% argônio com 25% CO₂). O objetivo da realização das soldagens automatizada foi garantir uma maior repetitividade das condições de soldagens e um volume de material depositado aproximadamente constante em todos os corpos de prova soldados

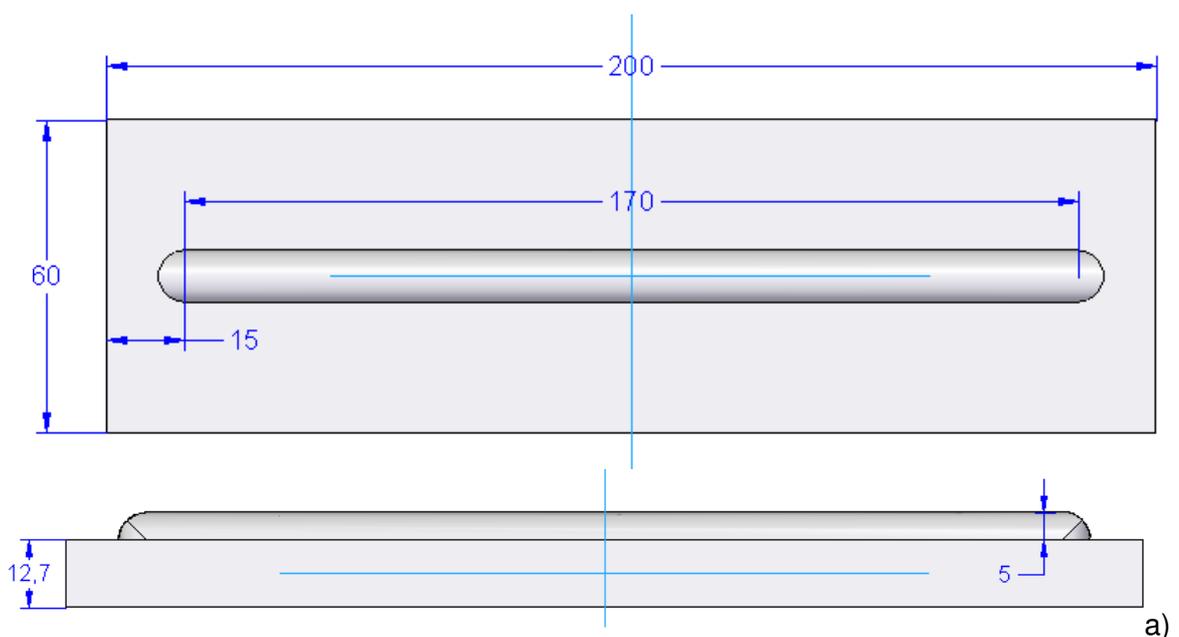


Figura 4.5 Amostra do aço AISI 516 Gr 60.

Tabela 4.3 Apresenta os parâmetros utilizados nas oitos condições exploradas no processo de goivagem com eletrodo de grafite.

Amostra	Diâmetro do Eletrodo de Grafite (mm)	Ângulo de ataque (°)	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)
01	5	55	300	180
02	5	55	300	360
03	5	55	350	180
04	5	55	350	360
05	8	55	400	180
06	8	55	400	360
07	8	55	350	180
08	8	55	350	360

Para tentar quantificar o aspecto geométrico da remoção, foi medida a massa das amostras em cada momento deste estudo (antes da realização do cordão de solda, após a soldagem e após a goivagem), que juntamente com uma avaliação do perfil, da vala aberta em cada ensaio, para posterior análise visual dos corpos de prova.

A avaliação visual consistiu em observações feitas por pesquisadores integrantes do ENGESOLDA – UFC. Todos os corpos de prova foram dispostos para a análise visual e em seguida os avaliadores atribuíram notas específicas às remoções de acordo com o aspecto visual. Estas notas foram:

- ❖ “0” para remoção de aspecto ruim;
- ❖ “5” para remoção com aspecto regular;
- ❖ “10” para remoção com aspecto bom ou muito bom.

Levou-se em consideração no momento de atribuir notas aos corpos de prova critérios como continuidade da remoção, presença ou não metal fundido não removido.

Desta forma, para cada condição analisada, calculou-se a média com base nas notas atribuídas.

4.1.3 Estudo Exploratório do Processo de Goivagem a Arco Plasma

4.1.3.1 Exploração de Parâmetros

O estudo exploratório do processo de goivagem a arco plasma torna-se importante para determinar as faixas de valores para os principais parâmetros operacionais do processo, como: corrente, ângulo de ataque da tocha, distância bico (eletrodo) peça e velocidade de avanço da tocha. O objetivo é obter condições operacionais que forneçam remoção de boa qualidade para diferentes finalidades, como para remover elevadas penetrações no caso de chapas grossas, quando o defeito for interno, ou no caso de chapas finas, cuja dificuldade encontra-se na manutenção de equipamentos construídos com chapas de até 6 mm de espessura, que quase sempre a manutenção é feita por esmerilhamento, demandando elevado tempo operacional.

Para melhor controlar os parâmetros operacionais explorados nesta etapa, optou-se por automatizar o processo através de um sistema para controle do avanço da tocha (Tartaruga). Pretendia-se controlar a taxa de remoção de material e a energia. Também está ilustrada na Figura 4.6 o ângulo de ataque da tocha e a medida da altura do arco.

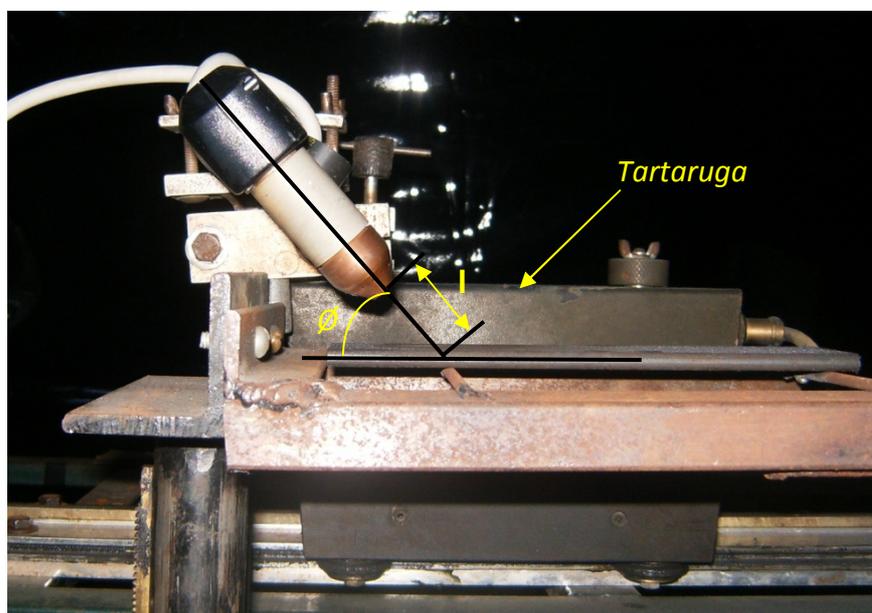


Figura 4.6 Automação do sistema de goivagem a arco plasma.

A seguir está apresentando nas Tabela 4.4, 4.5 e 4.6 um total de 32 condições exploradas, que para um melhor estudo das características mencionadas anteriormente foi dividido o estudo exploratório do processo a plasma em três grupos de amostras.

No primeiro momento foram realizados 18 condições apresentadas na Tabela 4.4 onde verificou-se a influência de três níveis de correntes três níveis de velocidade dois ângulos de ataque da tocha e mantendo fixa a altura do arco plasma em 8 mm.

Em seguida foi retiradas amostras e feita a preparação metalográfica que consistiu de lixamento da granulação 100 até 1200 seguido de polimento de 3 μm e 1 μm e por fim ataque de 45 segundos em uma solução de ácido nítrico 5%

Tabela 4.4 Parâmetros para estudo exploratório do processo a plasma

Amostra	Ângulo	Altura do Arco (mm)	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)
1	35°	8	100	160
2	35°	8	70	160
3	35°	8	40	160
4	35°	8	40	120
5	35°	8	40	80
6	35°	8	70	80
7	35°	8	70	120
8	35°	8	100	120
9	35°	8	100	80
10	55°	8	100	160
11	55°	8	70	160
12	55°	8	40	160
13	55°	8	40	120
14	55°	8	40	80
15	55°	8	70	120
16	55°	8	70	80
17	55°	8	100	120
18	55°	8	100	80

Da amostra 19 à 26 apresentadas na Tabela 4.5 tem-se 8 condições cujo o objetivo foi explorar a influência da altura do arco plasma sobre a geometria da remoção, para isso manteve-se fixo o ângulo de ataque da tocha em 45° e a velocidade de goivagem em 120 cm/min sendo valores intermediários as faixas exploradas anteriormente.

Tabela 4.5 Parâmetros para estudo exploratório do processo a plasma verificando a influencia da altura do arco

Amostra	Ângulo	Altura do Arco (mm)	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)
19	45°	6	70	120
20	45°	8	70	120
21	45°	10	70	120
22	45°	12	70	120
23	45°	12	100	120
24	45°	10	100	120
25	45°	8	100	120
26	45°	6	100	120

Da amostra 27 à 32 apresentadas na Tabela 4.6 tratam-se de condições denominadas especiais, cujo o objetivos dessas condições foi de obter um processo de elevada remoção de material com bom acabamento.

Tabela 4.6 Parâmetros para estudo exploratório do processo a plasma, condições especiais.

Amostra	Ângulo	Altura do Arco (mm)	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)
27	55°	12	100	160
28	55°	12	100	120
29	55°	12	100	80
30	55°	12	70	160
31	55°	12	70	120
32	55°	12	70	80

As avaliações qualitativas desse estudo exploratório foram feitas através de observações durante o processo de remoção e por observações sobre o acabamento superficial. As análises quantitativas foram feitas através do programa (Image-Pro Plus 6.0) onde se mediu penetração, largura e volume de material removido e através de análise na função Anova no Statistica 7.0, conseguiu-se avaliar a influência dessas variáveis de entrada sobre a geometria da remoção.

4.2 Etapa 2: Simulação de Reparos de Juntas Soldadas e Análise de suas Propriedades Mecânicas e Características Metalúrgicas

O Organograma da Figura 4.7 foi construído com o intuito de auxiliar o leitor na compreensão dos procedimentos adotados nos experimentos da Etapa 2.

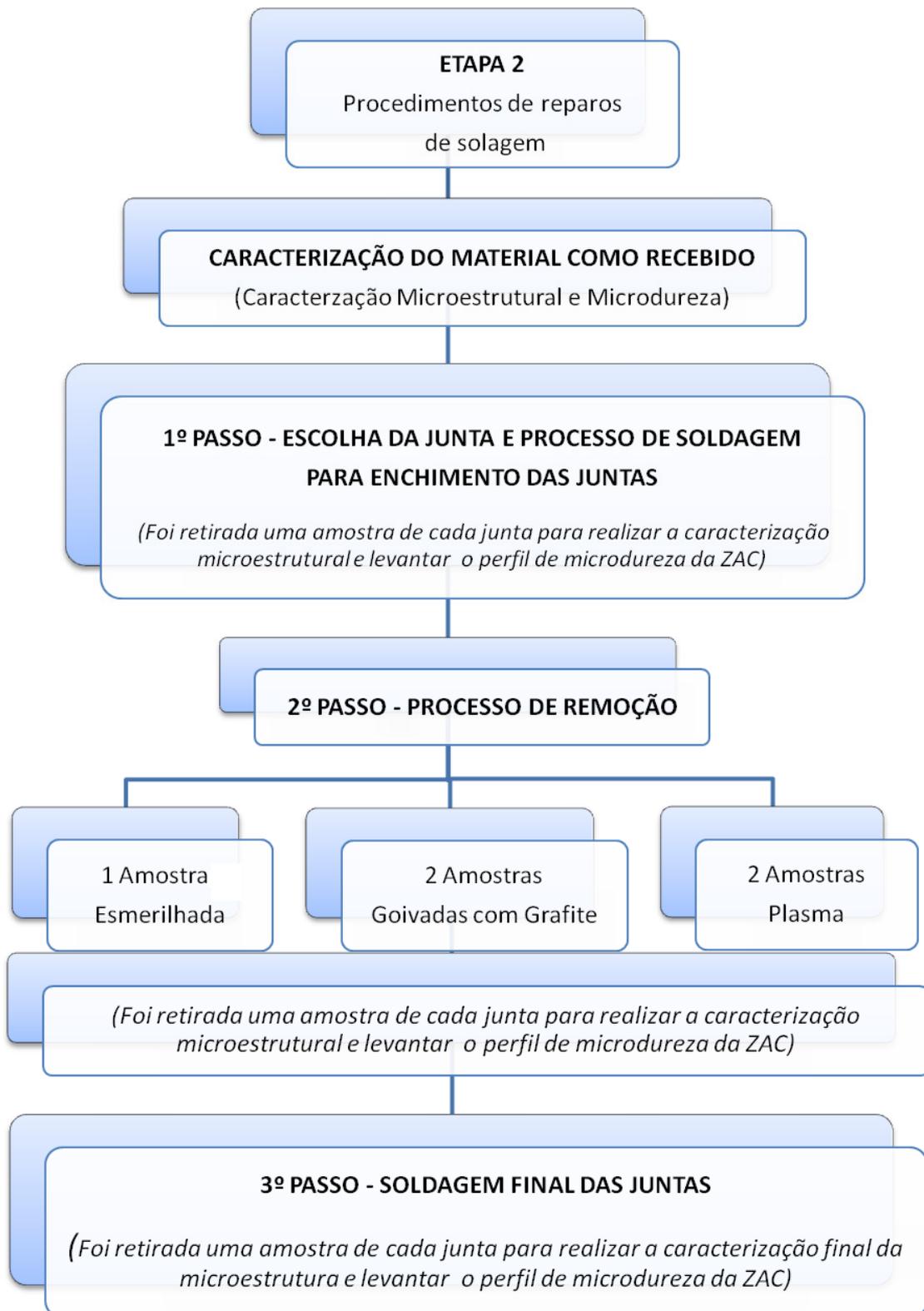


Figura 4.7 Organograma da Etapa 2.

O objetivo desta etapa foi simular procedimentos empregados na manutenção de uma estrutura soldada com defeito, utilizando três técnicas de remoção de manutenção.

- ❖ Uma amostra processada por esmerilhamento.
- ❖ Duas amostras processadas por goivagem com grafite, sendo uma com eletrodo de Ø5 mm e outra com eletrodo de Ø8 mm.
- ❖ Duas amostras processadas com goivagem a arco plasma.

Os procedimentos foram comparados através da microestrutura e da microdureza das amostras, auxiliando a tomada de decisão na escolha de qual processo se enquadra melhor em uma determinada aplicação.

Os parâmetros ângulo e corrente foram escolhidos com base nas análises da Etapa 1 sendo as condições que apresentaram o melhor conjunto de características, como volume de material removido e acabamento superficial da remoção, totalizando cinco condições distintas investigadas. Os parâmetros altura do arco e velocidade dependem muito do operador o que tornou mais difícil de controlar.

4.2.1 Materiais e Equipamentos Utilizados na Etapa 2

Foi utilizado nesta etapa o aço AISI 4140 por se tratar de um aço bastante utilizado em bocais de equipamentos e sua propriedade de excelente temperabilidade, o que potencializa as transformações metalúrgicas, fornecendo a condição mais crítica para cada processo empregado.

O aço AISI 4140 foi utilizado na forma de chapa com espessura 19 mm. Ele é classificado como um aço para construção mecânica, ligado e especial [NBR NM 172/2000]. Esta descrito a seguir na Tabela 4.7 a composição química do aço AISI 4140 de acordo com a norma.

Tabela 4.7 Composição química do aço AISI 4140

C	Si	Mn	P (máx.)	S (max.)	Cr	Mo
0,38-0,43	0,15-0,30	0,75-1,00	0,035	0,035	0,80-1,10	0,15-0,25

O eletrodo recomendado para soldar esse tipo de material é o AWS 8018-B2, sendo utilizado na fabricação e reparos de caldeiras, tubos, super-aquecedores. A composição química do eletrodo está mostrada na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 Composição química do eletrodo 8018-B2

C	Si	Mn	Cr	Mo
0,06	0,50	0,6	1,30	0,5

A Figura 4.8 mostra a junta antes de ser realizada a primeira soldagem, ilustrando as posições onde foram realizados os cortes para remoção das amostras a serem analisadas em cada etapa.

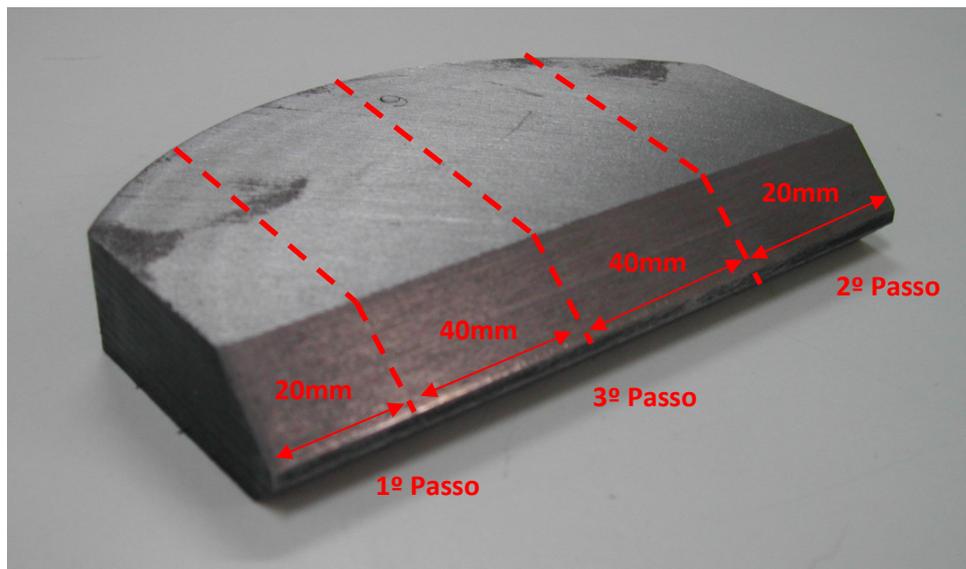


Figura 4.8 Amostra do aço AISI 4140 com as regiões das análises identificadas.

A preparação das amostras para análises metalográficas consistiu em lixamento utilizando uma lixadeira rotativa e lixas com granulação de 220, 320, 400, 600. Após a etapa de lixamento foi realizado um polimento com pasta de diamante de 3 μm , 1 μm e 1/4 μm , seguido de um ataque químico com o reagente Nital 2%, para revelar a microestrutura.

A caracterização da microestrutura foi realizada através de MO (microscopia ótica) utilizando-se um microscópio Jenaplan/Karl Zeiss com câmera digital acoplada e sistema de aquisição de imagem (Figura 4.9), e também um MEV (microscópio eletrônico de varredura) Phillips XL acoplado com sistema de análise de energia dispersiva de raio-X (Figura 4.10). Para a determinação das microdurezas utilizou-se o equipamento Microdurômetro Vickers, mostrado na (Figura 4.10).



Figura 4.9 Microscópio óptico com sistema de aquisição de imagem.



Figura 4.10 a) Microscópio eletrônico de varredura (MEV) b) Microdurômetro Vickers.

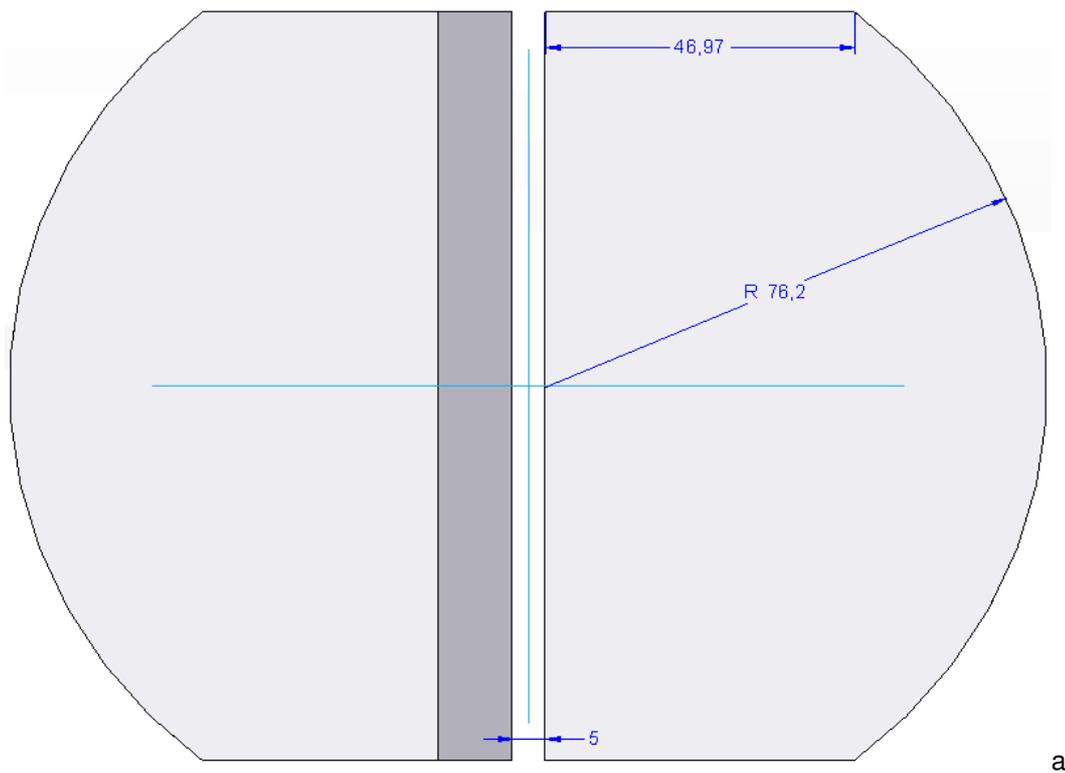
4.2.2 Caracterização do Material como Recebido – Etapa 2

Esta etapa consistiu em realizar no Laboratório de Caracterização de Materiais da UFC (LACAM) a caracterização metalúrgica e determinação da microdureza do aço AISI 4140 estudado neste trabalho, na condição como recebido. Foi realizada inicialmente a análise química do material, utilizando o equipamento SHIMADZU PDA-7000 Optical Emission Spectrometer, e posteriormente determinadas a microdureza e a microestrutura do material.

A caracterização microestrutural das amostras foi realizada através de exames metalográficos nas regiões adjacentes às regiões onde foram realizadas as microdurezas, por se tratar de regiões mais influenciadas pelos processos.

4.2.3 Escolha da Junta e Processo de Soldagem - 1º Passo

A escolha da junta a ser soldada foi definida numa reunião feita com Engenheiros e Técnicos da Petrobras, quando sugeriram a utilização do perfil em K, em 2/3" da espessura para um lado e 1/3" da espessura para o outro e 2 mm de raiz, pois esta configuração é bastante utilizada em suas estruturas de equipamentos, como mostra a Figura 4.11.



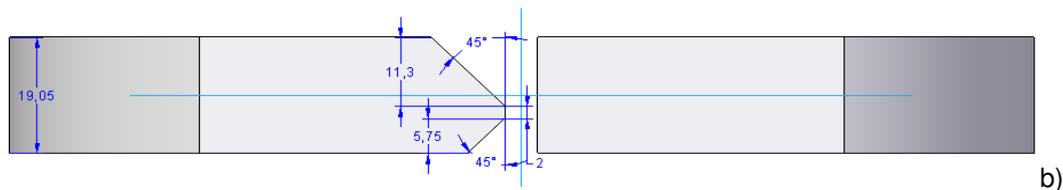


Figura 4.11 esquemática do perfil em K da amostra de 4140.

Primeiramente, foram realizadas as soldagens das 5 juntas. O processo escolhido para a realização das soldagens desta etapa foi o eletrodo revestido, por se tratar do processo mais utilizado na realização das soldagens nas aplicações deste material, sugeridos pelos técnicos das empresas. Um cuidado tomado na realização das soldagens foi a secagem adequada do eletrodo por 1 h à 175° C, segundo recomendações do fabricante, por se tratar de eletrodo básico e higroscópico. Procurou-se também restringir bem as juntas a serem soldadas para evitar distorções nas amostras e aproximar ao máximo das condições encontradas em campo. Os parâmetros de soldagem utilizados foram corrente de 120 A e velocidade de 25 cm/min, baseado no sistema de controle de velocidade (Tartaruga), como mostra a Figura 4.12.

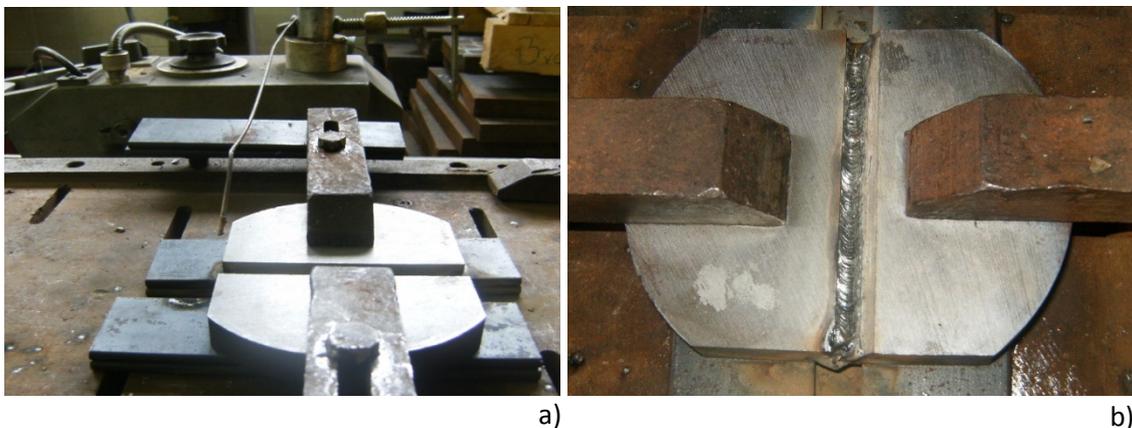


Figura 4.12 a) e b) Apresentam os sistemas de controle de velocidade e fixação das amostras, respectivamente.

4.2.3.1 Caracterização das Juntas Soldadas

Após as soldagens, foram retiradas amostras de cada uma das juntas e realizadas análises na seção transversal onde inicialmente levantou-se o perfil de microdureza de cada amostra como mostra a Figura 4.13, esquematizando as amostras e os locais onde foram realizadas as análises de microdureza e microestrutura.

O objetivo dessa caracterização foi mostrar as possíveis alterações nas propriedades e características microestruturais decorrente do processo de soldagem para posterior comparação com a microestrutura das amostras obtidas no 2º e 3º passos desta etapa.

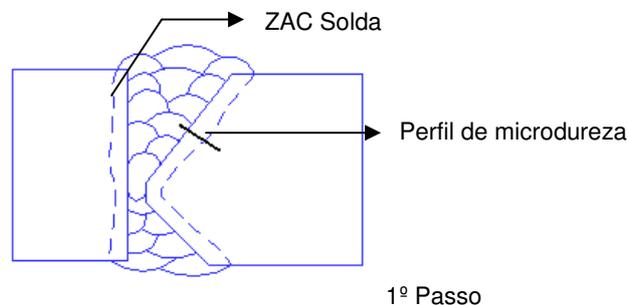


Figura 4.13 Apresenta o perfil da amostra retirada do 1º Passo.

4.2.4 Processos de Remoção - 2º Passo

Após a soldagem dos corpos de prova, realizou-se a remoção da solda. Para o estudo considerou-se que um defeito ocorreu na região de 2/3 da junta em K e que toda essa região deveria ser removida. Assim a amostra permaneceu unida pelo lado de 1/3 da junta, como ilustrado na Figura 4.14.

Este passo foi executado por um soldador qualificado, que foi instruído a remover todo o cordão de solda do lado 2/3 da espessura, aproximando ao máximo o perfil original da junta.

Uma observação importante é que em todos os processos de goivagem, seja a grafite ou a plasma, é necessário realizar passes com a esmerilhadeira para possibilitar uma melhor visão do operador e aproximar ao máximo o perfil da remoção ao perfil original da amostra e assim possibilitar uma ressoldagem adequada. Desta forma, todas as amostras analisadas neste passo foram submetidas ao acabamento final com a esmerilhadeira.

4.2.4.1 Caracterização das Amostras Após a Remoção de Material

Após a remoção do defeito, foi retirada uma amostra de cada junta, como a região identificada na Figura 4.14, onde foram escolhidas duas regiões distintas para realizar as análises metalográficas e de microdureza. As definições dessas regiões foram feitas da seguinte forma: uma região contemplando uma ZAC, que predomina na amostra e oriunda do processo de soldagem (região clara). Uma outra região menor, que aparece em pequenas quantidades em todas as amostras goivadas, que é predominantemente oriunda dos processos de remoção a arco voltaico (região escura).

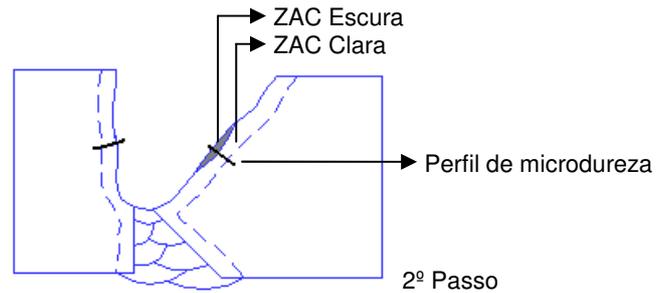


Figura 4.14 Apresenta o perfil da amostra retirada do 2º Passo.

A seguir estão mostrados na Tabela 4.9 as condições escolhidas a partir dos ensaios realizados na Etapa 1.

Tabela 4.9 Amostras processadas na etapa 2.

Amostra	Processo	Ângulo do Eletrodo	Corrente (A)
01	Esmerilhamento	-	-
02	Plasma	55º	70
03	Plasma	35º	100
04	Grafite Ø5	45º	300
05	Grafite Ø8	45º	400

4.2.5 Soldagem Final das Juntas - 3º Passo

A ultima etapa do processo de manutenção consistiu em realizar o enchimento da junta pelo mesmo processo de soldagem utilizado no 1º Passo desta etapa.

4.2.5.1 Caracterização das Amostras Após a Soldagem Final

Finalizadas as soldagens, retirou-se a ultima amostra de cada corpo de prova para realizar a caracterização final. A Figura 4.15 apresenta o perfil da amostra retirada nesta etapa.

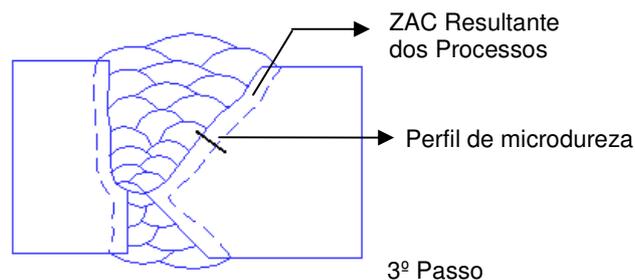


Figura 4.15 Perfil da amostra retirada do 3º Passo.

CAPÍTULO V

5 Resultados e Discussões

5.1 Etapa 1 - Estudo Exploratório dos Processos de Goivagem com Eletrodo de Grafite e Arco Plasma

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos na etapa 1 deste trabalho que consistiu em um estudo exploratório dos processos de goivagem com eletrodo de grafite com arco plasma.

5.1.1 Estudo Exploratório do Processo de Goivagem com Eletrodo de Grafite.

Nesta etapa, foram realizados estudos exploratórios com o processo de goivagem com eletrodo de grafite, sendo investigado os efeitos de diversos parâmetros operacionais sobre a estabilidade do processo e o aspecto da vala de material removido.

5.1.1.1 1º Passo – Estudos Preliminares

Primeiramente, foram realizados estudos com o eletrodo de 5 mm de diâmetro. Os ensaios realizados foram feitos com parâmetros fornecidos pelo fabricante do eletrodo, que para esse diâmetro recomenda correntes em torno de 300 A. Assim, foi possível analisar as características do processo para diferentes ângulos de ataque do eletrodo.

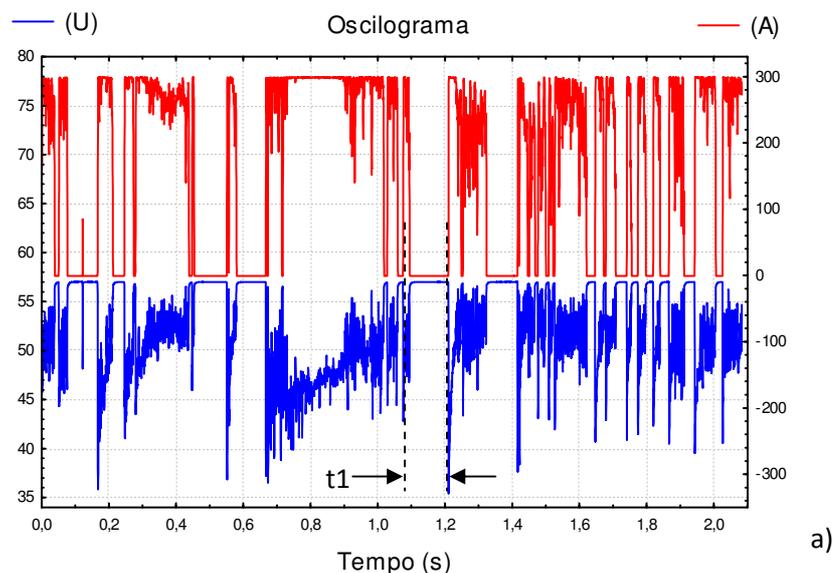
Observou-se que goivagem com ângulos de ataque da tocha abaixo de 25° resultaram em arcos instáveis, sendo difícil mantê-los acesos, além de ocasionar uma tendência de ocorrer furos na peça. Porém, as goivagens realizadas com ângulos na faixa de 25° a 30° forneceram condições estáveis, com baixa penetração e à medida que o ângulo era aumentado notou-se um aumento na penetração, como era de se esperar. Na faixa de 50° a 55°, foram obtidas condições de elevada penetração e boa estabilidade do arco, porém ângulos superiores a essa faixa, até 70° tornavam a remoção do metal fundido instável, causando um alto nível de respingos, dificultando o trabalho do operador e prejudicando o acabamento superficial.

O segundo estudo realizado neste processo foi a verificação de uma faixa de pressão ótima para a remoção da poça de fusão. Para o estudo anterior foi utilizada a vazão máxima do compressor que através de um regulador e controlador de pressão foi possível fixar a pressão estática da linha em 8,2 bar e uma pressão no regime transiente de 6,5 bar. Quando se tentou reduzir a vazão mantendo fixos os demais parâmetros observou-se uma dificuldade em remover o metal fundido, causando uma ineficiência na remoção, para ambos os eletrodos, sendo mais crítico para o eletrodo de 8 mm de diâmetro.

Assim, com base nesses resultados, para que se tenha uma melhor remoção de material por goivagem com eletrodo de grafite, nas demais condições exploradas neste trabalho, estabeleceu-se que seriam empregados ângulos de ataque variando na faixa de 50° a 55° e a máxima pressão fornecida pelo compressor, 8,2 bar.

5.1.1.2 2º Passo - Escolha da Fonte e Estudo dos Sinais Elétricos

Verificados os efeitos dos dois parâmetros no 1º passo; pressão da linha e ângulo de ataque do eletrodo, passou-se a verificar a estabilidade do processo utilizando três fontes de soldagem. A seleção da fonte para realização da goivagem foi baseada no comportamento do sinal elétrico das três fontes distintas, possibilitando uma análise comparativa entre elas. A seguir, estão mostrados nas Figura 5.1 a), b), c) os oscilogramas tensão e corrente e nas Figura 5.2 a), b), c) os histogramas de corrente correspondentes para as fontes Fonte 1, Fonte 2 e Fonte 3. Estas amostras foram processadas com o eletrodo de 5 mm de diâmetro, com 300 A de corrente e velocidade de goivagem de 180 cm/min.



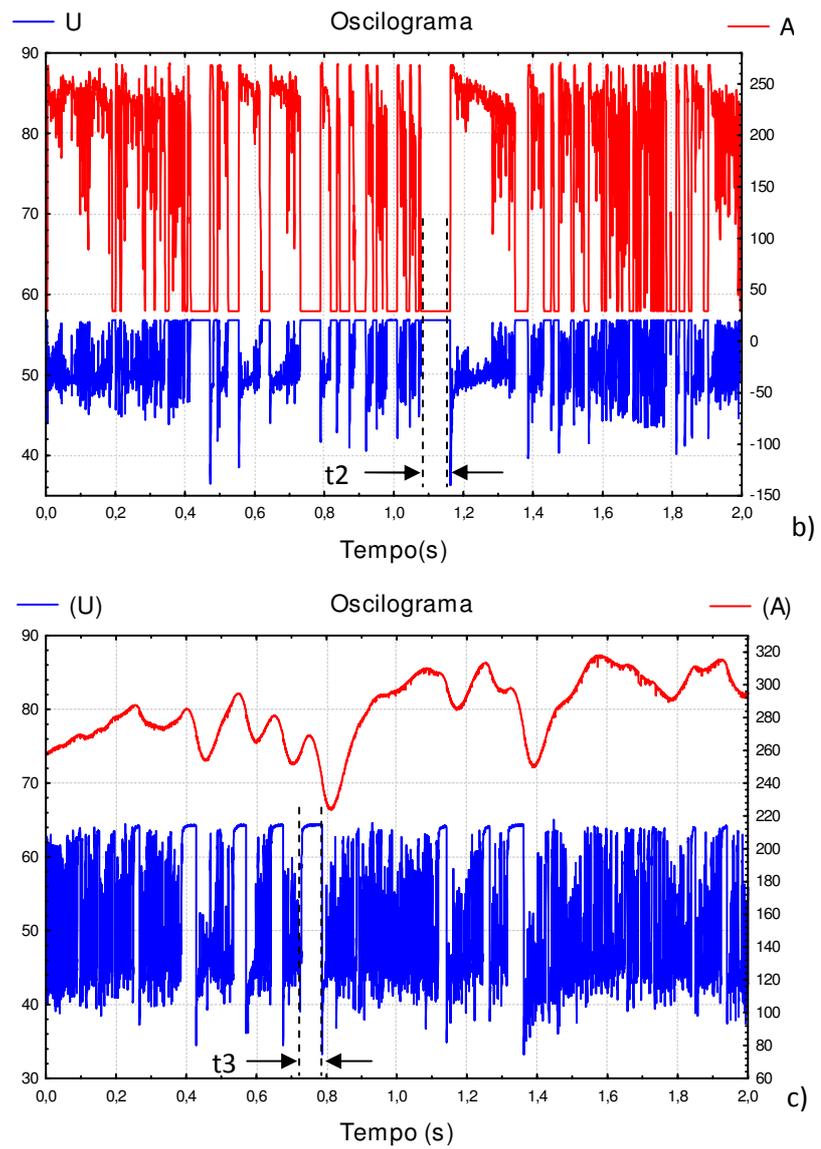


Figura 5.1 Oscilogramas de tensão e corrente para o eletrodo de 5mm de diâmetro utilizando as fontes: a) Fonte 1, b) Fonte 2 e c) Fonte 3.

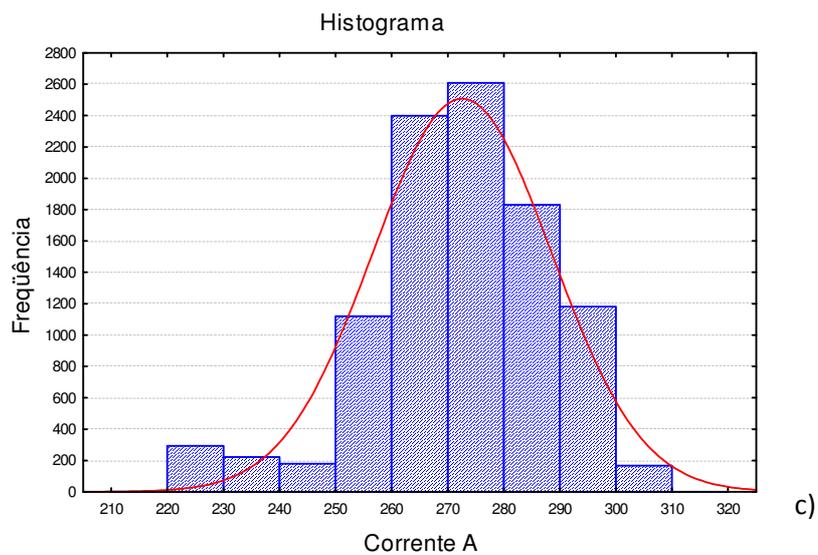
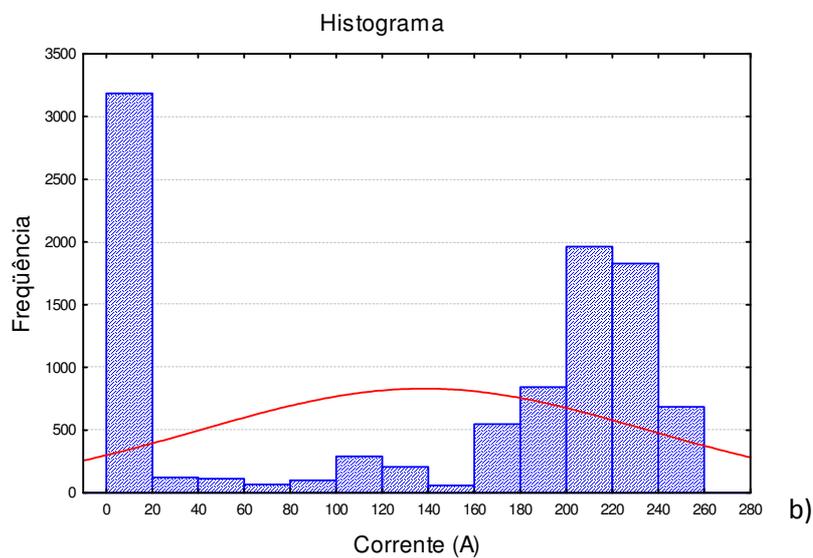
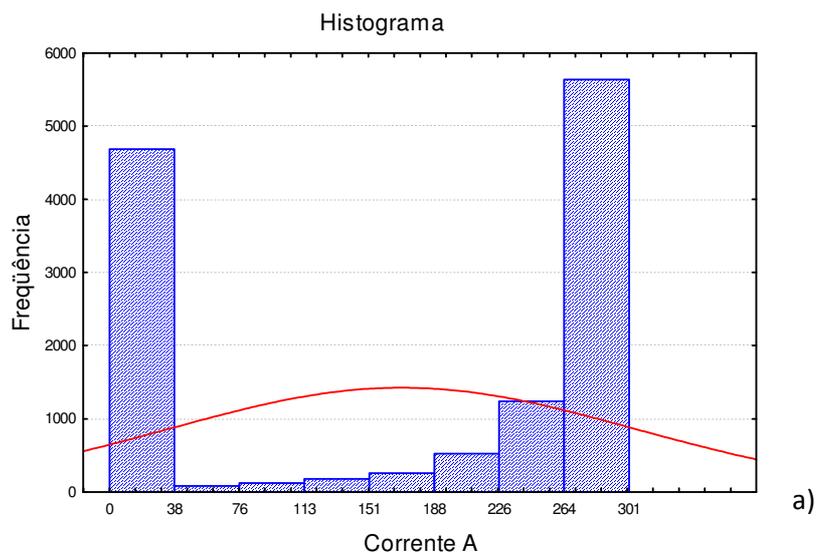


Figura 5.2 Histogramas para os sinais de corrente para o eletrodo de 5 mm de diâmetro, em
 a) Fonte 1, b) Fonte 2, c) Fonte 3.

Os sinais elétricos, tensão e corrente, para o processo de goivagem com eletrodo de grafite mostraram que o processo não apresenta um comportamento bem definido ou uma periodicidade aparente do sinal, independente da fonte empregada. Porém, pode-se ressaltar pelas Figura 5.1 a) e b) a característica do arco elétrico em constante extinção e re-ignição, em alta frequência, o que não necessariamente implica em um processo instável. Verificou-se que a instabilidade do processo está associada aos longos períodos de extinção do arco elétrico.

O comportamento oscilatório do sinal elétrico pode estar relacionado ao momento em que a poça de fusão é expulsa da vala, deixando uma distância maior entre o eletrodo e a peça, o que ocasiona a extinção do arco, até que o eletrodo se aproxime o suficiente da peça para ocorrer a re-ignição do arco. Essa hipótese surgiu durante as execuções das operações, onde foi observado que logo após uma grande fusão e remoção do metal base, o arco voltaico se apagava. Um maior tempo de permanência no estado de arco extinto pode significar que o volume de material removido anteriormente à extinção foi elevada, deixando uma grande distância do eletrodo à peça, o que demanda mais tempo para a re-ignição do arco.

Comparando as fontes elétricas multi-processos Fonte 2 e a Fonte 1 Figuras 5.1 a) e b), pode-se perceber que a frequência de apagamento do arco foi maior na Fonte 2. Por outro lado, tempos de extinções maiores foram verificados na Fonte 1, como mostrado em $t_1 > t_2$. Uma ligeira regularidade na manutenção do arco foi superior para a Fonte 1, pois diminui o tempo em que o arco permanece extinto, porém é necessário também verificar os níveis de corrente alcançados e suas variações, através de histogramas, para se ter uma melhor avaliação da estabilidade do processo, bem como do aspecto da vala aberta, proporcionados por cada fonte de soldagem analisada.

Ao analisar os histogramas correspondentes a estas fontes, mostrados nas Figura 5.2 a) e b), notou-se que a corrente média da Fonte 1 foi de (169 ± 134) A, e no caso de Fonte 2, a corrente média foi de (137 ± 96) A. Comparando estes níveis pode-se verificar que a dispersão das correntes foi bastante elevada, porém os níveis maiores foram alcançados na Fonte 1. Entretanto, em ambas as fontes os valores médios de corrente estiveram bem abaixo do valor nominal ajustado de 300 A.

Levando em consideração todos estes efeitos da Fonte 1 levou uma pequena vantagem em relação à Fonte 2, por apresentar uma ligeira regularidade na manutenção do arco e níveis de corrente superiores e mais próximos ao valor ajustado.

No caso da Fonte 3 o sinal de tensão e corrente mostrado na Figura 5.1 c) diferencia-se bastante dos sinais das outras duas fontes. Observa-se que houve flutuações da

corrente, mas em momento algum verificou-se o apagamento do arco voltaico. Por consequência, observou-se uma remoção mais regular e o aumento do volume de metal removido.

O histograma da Figura 5.2 mostra que o menor valor observado da corrente foi de 220 A chegando a níveis de 320 A e corrente média de (272 ± 16) A, a mais alta dentre as fontes exploradas e mais próxima do valor nominal ajustado.

Para tentar verificar a (característica estática das fontes) CEF, responsável pelo amortecimento da corrente, foi ampliado um trecho de cada um dos oscilogramas da Figura 5.1, apresentados anteriormente, Figura 5.3 a), b) e c).

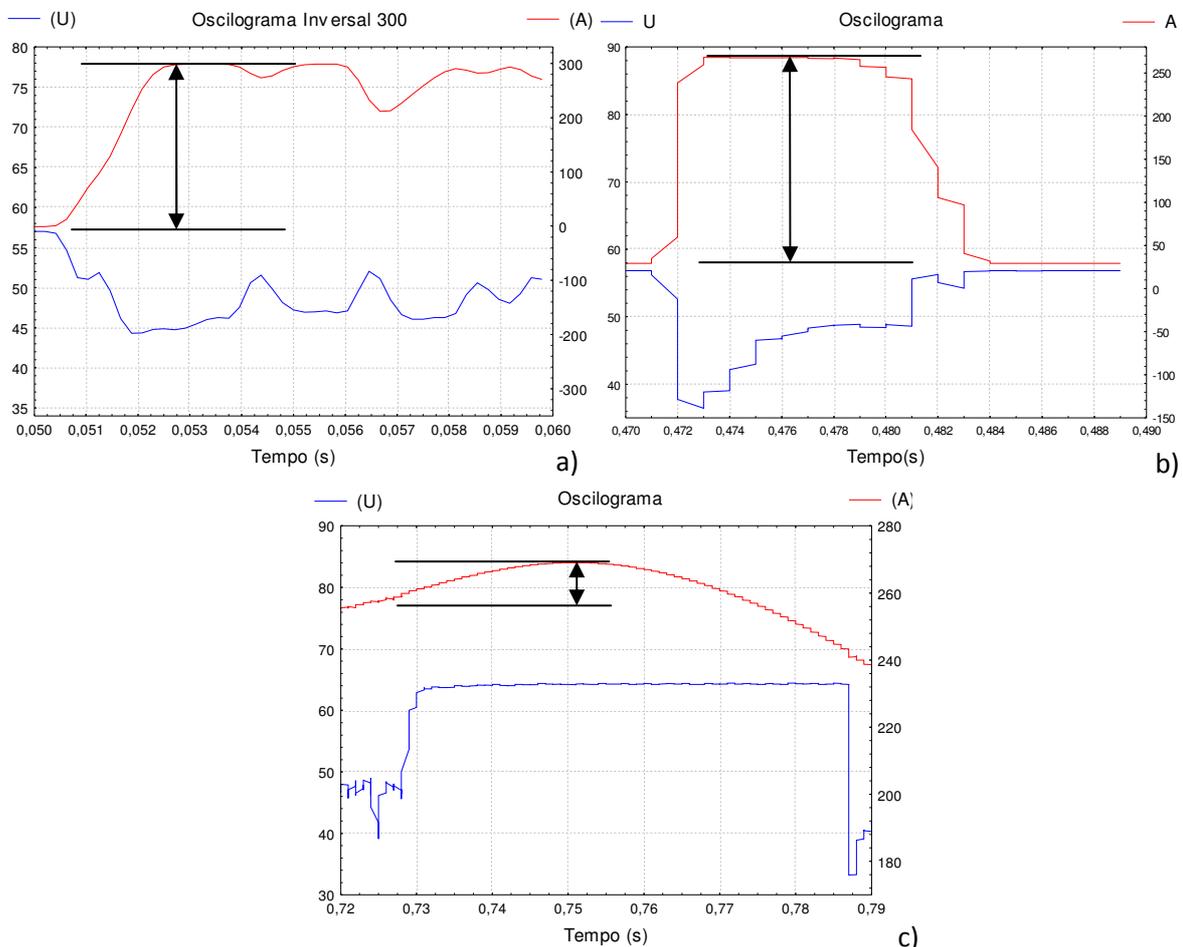


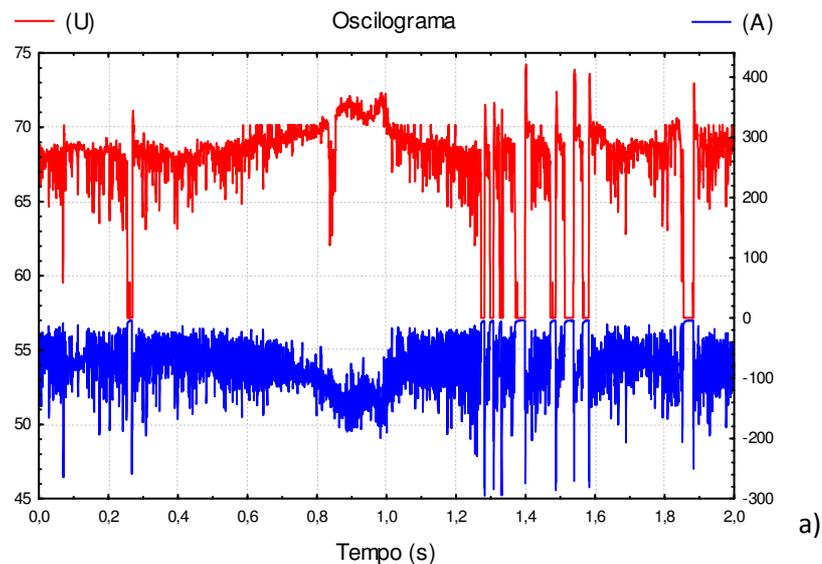
Figura 5.3 Ampliação dos Oscilogramas de tensão e corrente. a) Fonte 1, b) Fonte 2 e c) Fonte 3

Analisando os oscilogramas das Figuras 5.3 a) e b), observa-se uma diferença entre as fontes Fonte 1 e 2. Pois o oscilograma da Figura 5.3 a), apresenta uma taxa de variação da corrente menor em relação à Fonte 2, ou seja, aparentemente uma maior indutância,

apesar de ambas terem sido ajustadas de forma similar, conforme recomendações do fabricante. Talvez este crescimento mais lento da corrente tenha contribuído para uma maior regularidade do arco o que resultou em um menor número de extinções, em relação à Fonte 2.

Com a ampliação dos oscilogramas pode-se perceber uma característica que diferencia a Fonte 3 das outras duas, pois quando a tensão vai para vazio (60 V) a corrente sofreu um aumento de aproximadamente 15 A, conforme pode ser observado na Figura 5.3 c). Novamente, observa-se um resultado semelhante ao já comentado. Um crescimento mais lento ainda da corrente, portanto uma indutância ainda maior, proporcionando uma melhor estabilidade de arco, com menos extinções e variações menos bruscas da corrente.

Da mesma forma realizada anteriormente, foi feito um estudo das três fontes para o eletrodo de 8 mm de diâmetro com os parâmetros ajustados em 400 A de corrente e velocidade de 180 cm/min. A Figura 5.4 mostra o oscilogramas de tensão e de corrente e a Figura 5.5 os histogramas correspondentes para estes sinais.



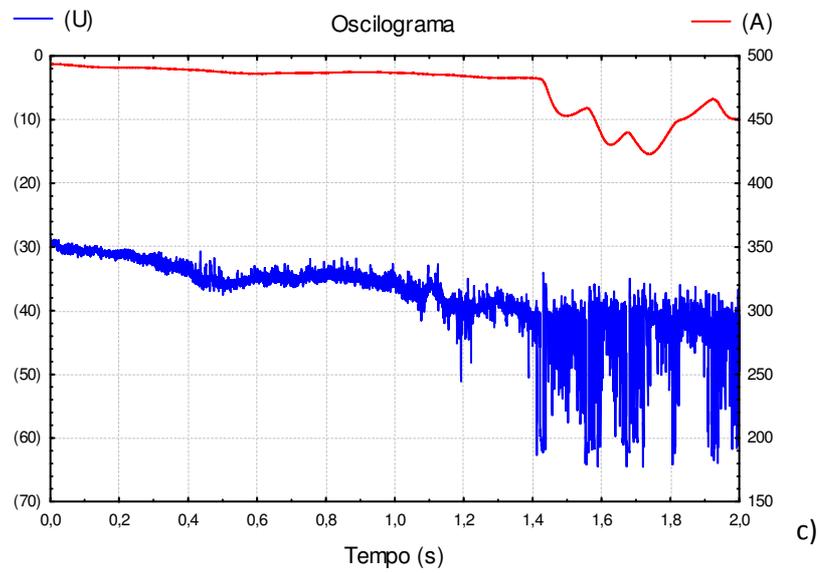
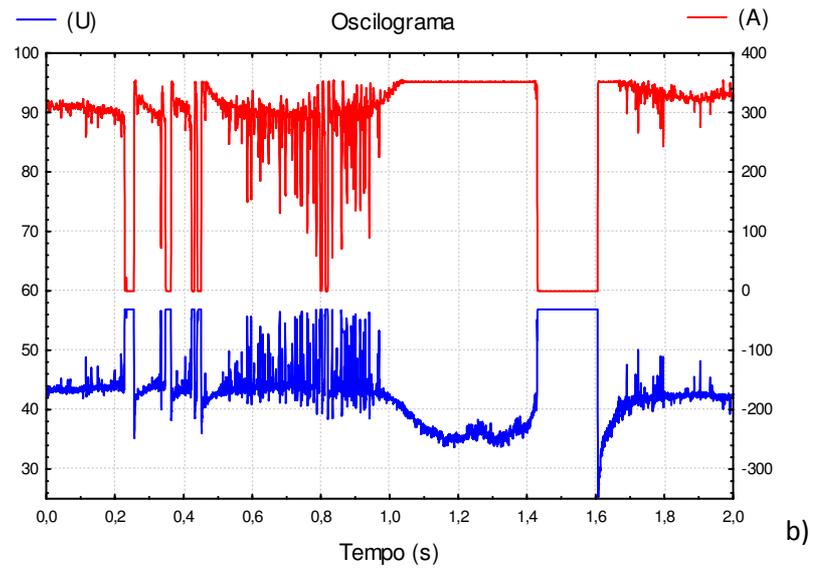


Figura 5.4 Oscilograma de tensão e corrente para o eletrodo de 8 mm de diâmetro a) Fonte 1, b) Fonte 2, c) Fonte 3.

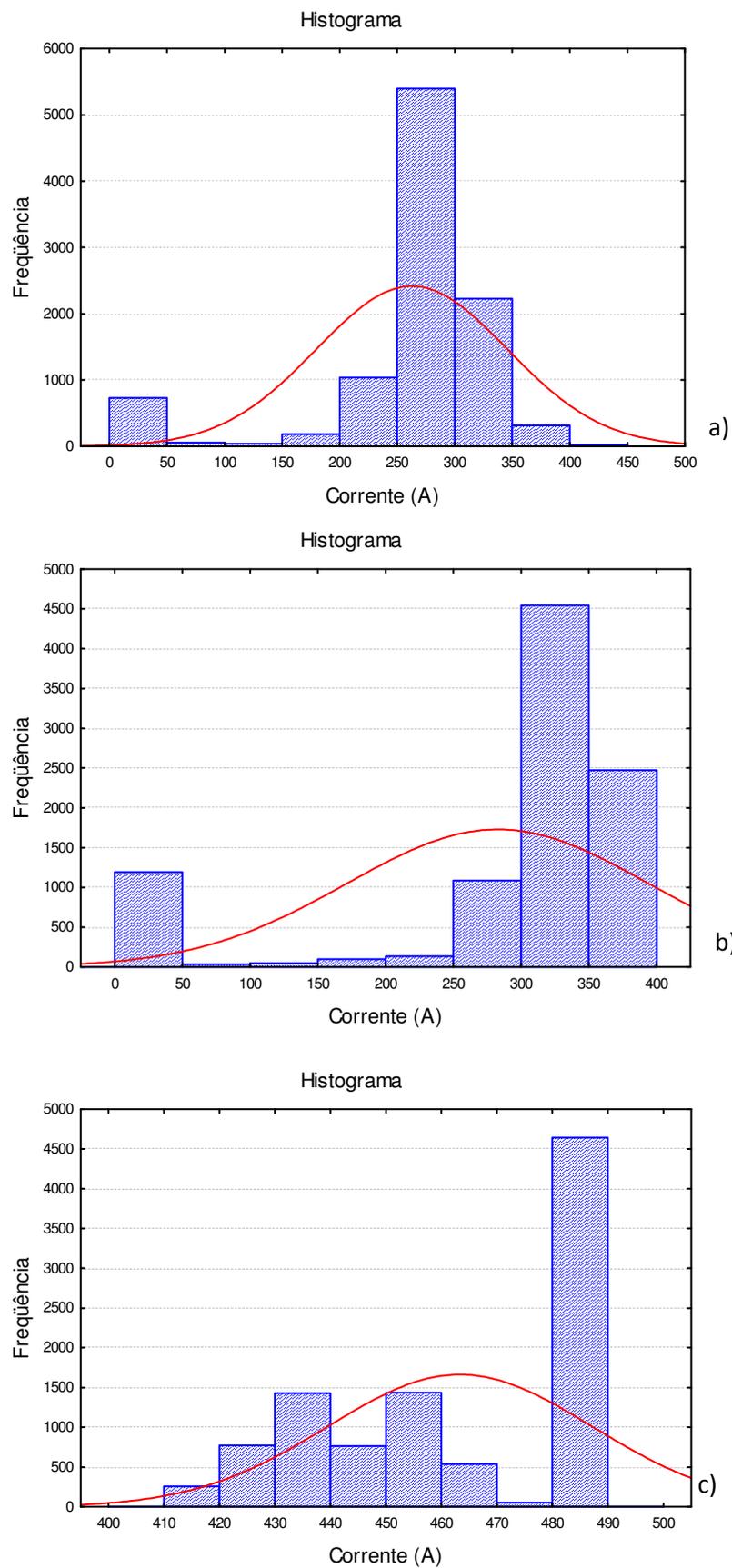


Figura 5.5 Apresenta os histogramas para os sinais de corrente das fontes, a) Fonte 1, b) Fonte 2, c) Fonte 3.

Observando o sinal tensão e corrente da Fonte 1, notou-se que a frequência de oscilação foi menor quando comparado com o sinal obtido por esta mesma fonte para o eletrodo de 5 mm de diâmetro. Com relação ao tempo de permanência no estado de arco extinto nota-se um baixo tempo em relação à Fonte 2, como mostra $t_1 < t_2$ nas Figura 5.4 a) e b), o que fornece uma boa estabilidade ao processo e uma remoção mais regular.

Já para o sinal da Fonte 2, também foi observada uma redução na frequência de oscilação quando comparado com o sinal obtido por esta mesma fonte para o eletrodo de 5 mm de diâmetro. Contudo, o sinal apresentou um trecho com o tempo maior no estado de arco extinto. Pode ser observado no oscilograma que logo antes da extinção do arco, ocorre um período de estabilidade, quando a tensão caiu para valores entorno de 35 V por um período de aproximadamente 0,5 s, o que pode ter removido um grande volume de material ocasionando, em seguida, a extinção de arco.

Os sinais elétricos de tensão e corrente da Fonte 3 apresentaram a mesma forma para os eletrodos de 5 mm e 8 mm de diâmetro, sem a ocorrência do apagamento do arco, contudo os níveis de corrente observados nos oscilogramas para o eletrodo de 8 mm foram elevados, quando comparados com a corrente nominal ajustada. Esse aumento provavelmente ocorreu devido às correntes de curto-circuito serem superiores à corrente nominal ajustada, e o elevado índice de curtos-circuitos ocorridos durante o processo, com uma boa estabilidade como mostra a Figura 5.4 c).

Através dos histogramas pode ser observar os níveis de corrente alcançados nos processos. Para a Fonte 1, a corrente média ficou em (261 ± 83) A, a Fonte 2 teve uma corrente média de (281 ± 111) A, mostrando que a Fonte 1 apresentou um menor nível de corrente porém com uma dispersão também menor. Contudo, a Fonte 3 apresentou o maior nível de corrente média e a menor dispersão dentre as fontes estudadas, ficando em (463 ± 24) A.

Com base nestes resultados, escolheu-se a Fonte 3 para ser utilizada na continuidade do trabalho, uma vez que esta superou as demais fontes quando comparadas as características dos sinais elétricos, apresentando melhores características nos seguintes aspectos: estabilidade do arco, pois promoveu arcos sem extinção para ambos os eletrodos, maiores níveis de corrente com menor dispersão e, por fim, melhor regularidade na remoção.

5.1.1.3 3º Passo - Exploração dos Parâmetros Operacionais do Processo de Goivagem com Eletrodo de Grafite

❖ Estudo dos Sinais Elétricos

A seguir, na Figura 5.6, são mostrados os oscilogramas das amostras 1 a 4, goivadas conforme parâmetros apresentados na Tabela 4.3 com o eletrodo de 5 mm de diâmetro.

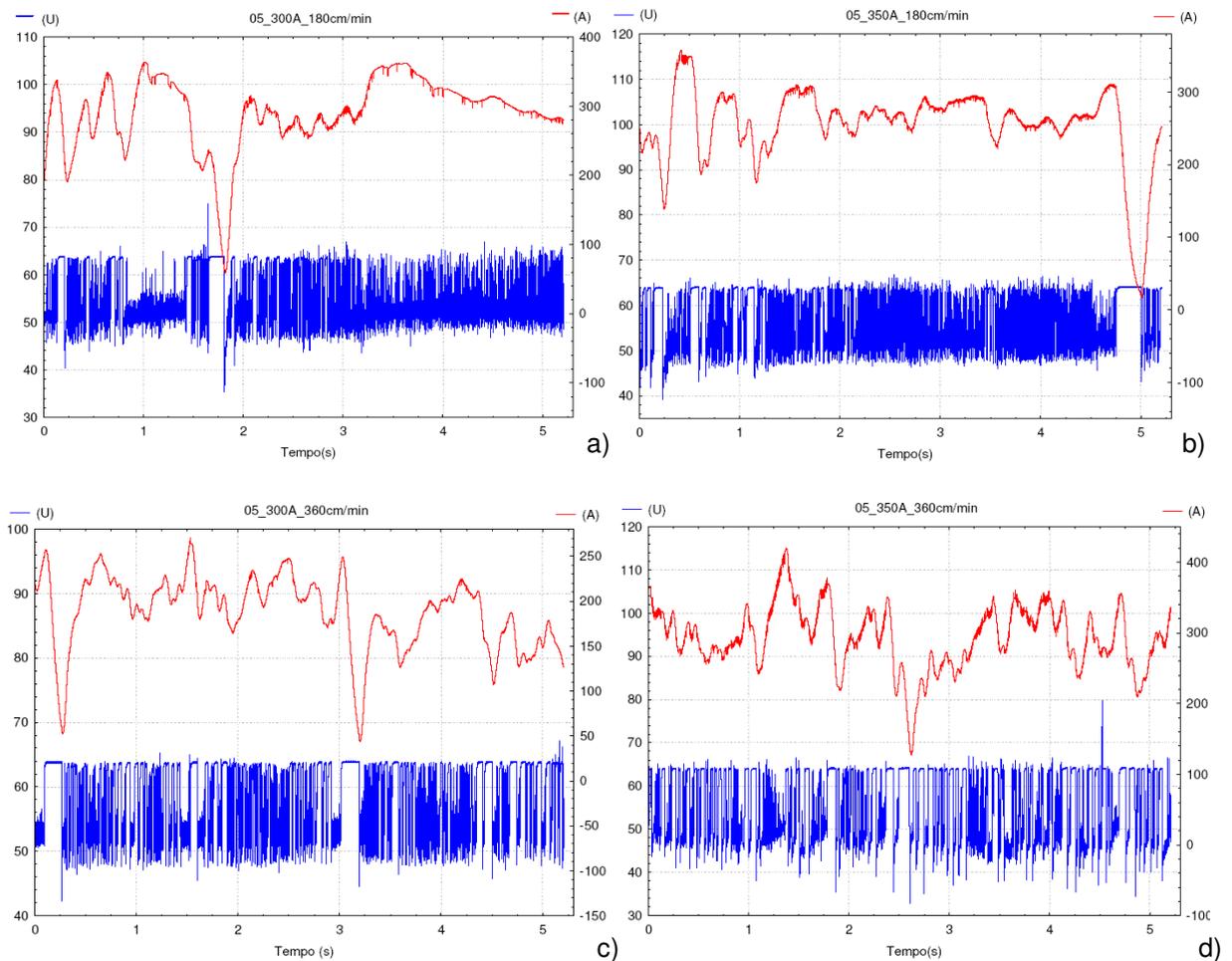


Figura 5.6 Oscilogramas tensão e corrente das amostras 1 à 4 processadas com eletrodo de 5 mm de diâmetro: a) amostra processada com 300 A e 180 cm/min, b) 300 A e 180 cm/min, c) 300 A e 360 cm/min e d) 350 A e 360 cm/min.

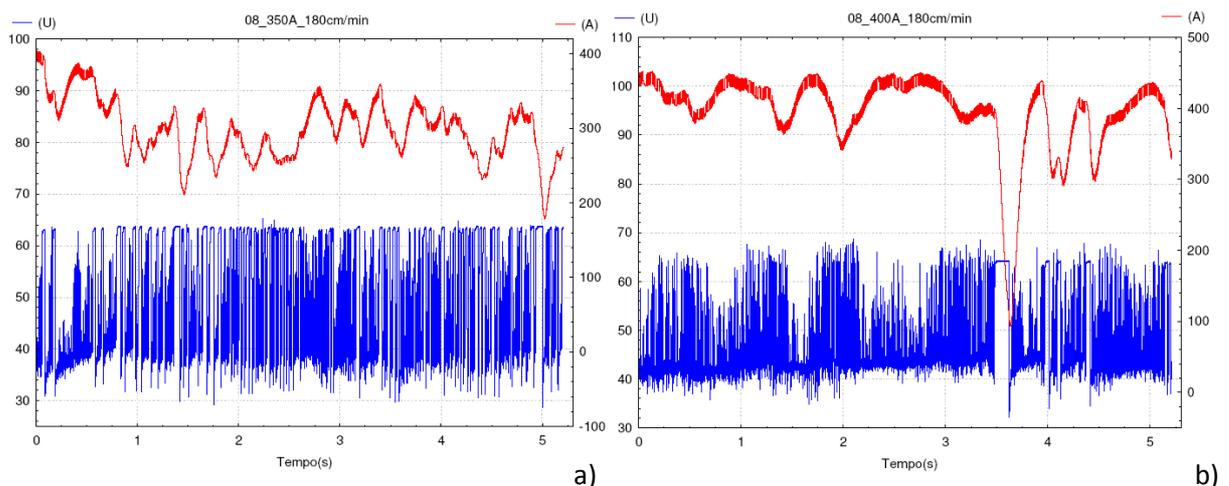
Está mostrado na Figura 5.6 a) o oscilograma da amostra 1 processada com corrente de 300 A e a menor velocidade desse estudo, que foi de 180 cm/min. A corrente média medida foi de (292 ± 51) A, correspondente aos valores esperados, comparado ao nível de

corrente ajustado. Porém, observando a Figura 5.6 b), relativa à amostra 3, processada com os parâmetros: corrente de 350 A e velocidade de 180 cm/min, verificou-se uma queda da corrente média para (256 ± 53) A, inferior ao valor ajustado, no entanto foi a amostra que apresentou um melhor acabamento superficial.

As Figura 5.6 c) e d) mostram os oscilogramas das amostras processadas com a velocidade maior de 360 cm/min e correntes de 300 e 350 A respectivamente. Os níveis de corrente média foram (188 ± 40) A para a amostra processada com 300 A e (294 ± 45) A para a amostra processada com 350 A. Desta forma, os sinais mostraram que para o eletrodo de 5 mm de diâmetro há uma limitação para os níveis mais elevados de corrente, ou seja, quando a corrente ajustada na fonte ultrapassa os 300 A, os valores médios obtidos mantiveram-se na na faixa de 250A a 300 A, com alguns picos de corrente mais elevados, valores muito próximos para a corrente máxima especificada pelo fabricante para este diâmetro de eletrodo.

Em uma análise feita sobre as amostras goivadas com velocidades mais baixas, verificaram-se que os sinais de tensão destas amostras apresentaram uma maior frequência de oscilação quando comparadas às amostras processadas com maior velocidade, porém não foram observadas nenhuma variação da estabilidade do arco, para ambas condições.

A Figura 5.7 mostra os oscilogramas das amostras 5 a 8, todas processadas com o eletrodos de 8 mm de diâmetro.



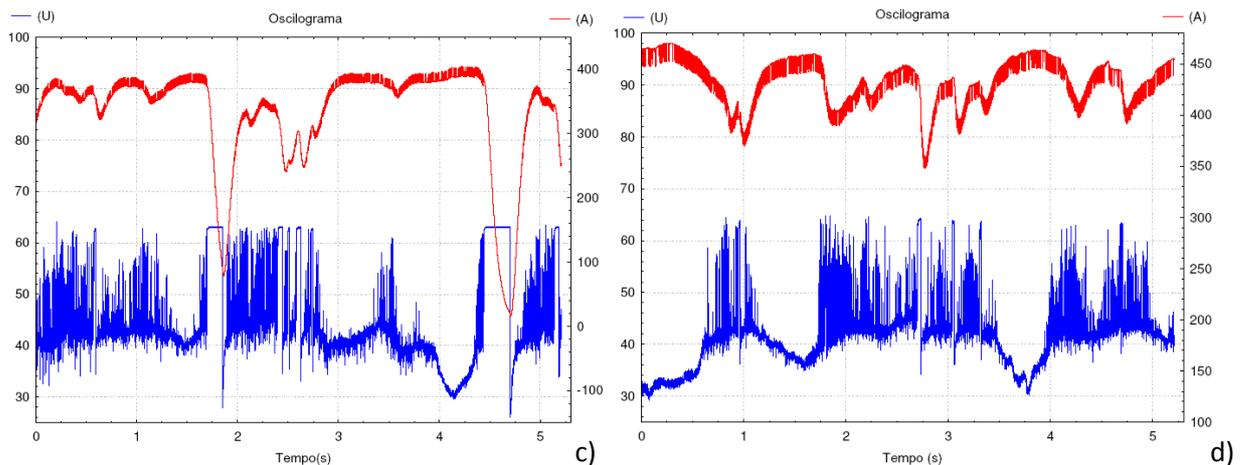


Figura 5.7 Oscilogramas tensão e corrente das amostras 5 à 8 processadas com eletrodo de Ø8 mm: a) amostra processada com 350 A e 180 cm/min, b) 400 A e 180 cm/min, c) 350 A e 360 cm/min e d) 400 A e 360 cm/min.

Figura 5.7 a) mostra o oscilograma da amostra 7 processada com corrente ajustada na fonte de 350 A e a menor velocidade desse estudo, que foi de 180 cm/min. Esta amostra apresentou uma corrente média de (299 ± 39) A, porém foi o ensaio que teve o melhor aspecto visual sem nenhuma região de curto-circuito. Figura 5.7 b) corresponde a amostra 5 processada com corrente de 400 A e velocidade de 180 cm/min, o nível da corrente média do processo foi dentro do ajustado, ficando em (396 ± 56) A, a remoção apresentou bom acabamento superficial com alta penetração. Figura 5.7 c) e d) mostram os oscilogramas das amostras processadas com a velocidade maior de 360 cm/min e corrente de 350 A e 400 A, respectivamente. Os níveis de corrente média foram de (334 ± 80) A para a amostra 8, ajustada para 350 A e (433 ± 23) A para a amostra 6, ajustada para 400 A. Pode-se notar que houve um aumento da corrente média destas amostras quando comparadas com as amostras processadas com velocidade menor, isso pode estar relacionado com o fato de que as amostras 6 e 8 apresentaram um número de curto-circuito maior, sendo observado em inspeções visuais, o que implica na ocorrência de correntes de curto-circuito, que tem níveis mais elevados do que a corrente ajustada.

Porém, foi observado um maior número de curtos, em uma análise da frequência de oscilação da corrente das amostras processadas com velocidades menores de goivagem, foram verificados resultados semelhantes aos obtidos com o eletrodo de 5 mm, ou seja uma maior frequência de oscilação dos sinais de tensão e corrente.

❖ Estudo Quantitativo da Remoção

Para possibilitar uma avaliação quantitativa da qualidade da vala removida, foram definidos critérios de análises. Na Figura 5.8 a) está apresentado o aspecto da remoção da amostra 3, processada com eletrodo de 5 mm de diâmetro. Nela pode-se identificar um critério adotado, que trata da irregularidade da remoção, destacada na região central da amostra. Já na Figura 5.8 b) está apresentada a remoção da amostra 8 processada com eletrodo de 8 mm de diâmetro. Nesta figura estão identificados mais dois critérios de julgamento: regiões onde ocorreram curtos-circuitos e regiões que apresentaram metal fundido não removido.

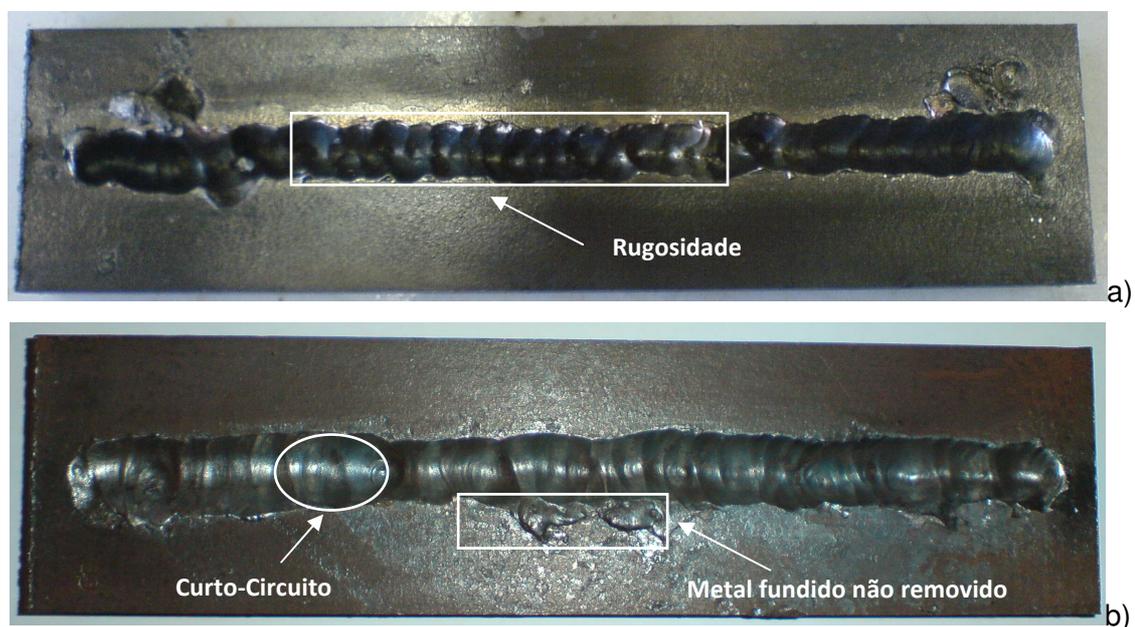


Figura 5.8 a) Amostra 3 processada com eletrodo de 5 mm de diâmetro e b) amostra 8 processada com eletrodo de 8 mm de diâmetro.

O aspecto da remoção foi bastante semelhante para cada grupo de amostras, processadas com 5 mm e 8 mm de diâmetro, sendo que as amostras goivadas com o eletrodo de menor diâmetro foram ligeiramente inferiores, pois o índice irregularidade da remoção foi sempre maior para o eletrodo de 5 mm de diâmetro. É importante ressaltar que essas características estão diretamente relacionadas à habilidade do operador, mas de uma maneira em geral a remoção foi bastante irregular com regiões de maior e outras de menor penetração.

A Tabela 5.1 mostra a média das notas obtidas pela avaliação de três pesquisadores do Laboratório ENGESOLDA, UFC, que utilizaram como base os critérios destacados na Figura 5.8.

Tabela 5.1 Apresenta a média das notas atribuídas ao acabamento das oito amostras processadas com eletrodo de grafite.

Amostra	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Etetrodo (mm)	Média Das Notas
01	300	180	Ø 5	5,0
02	300	360	Ø 5	1,7
03	350	180	Ø 5	6,7
04	350	360	Ø 5	6,7
05	400	180	Ø 8	5,0
06	400	360	Ø 8	6,7
07	350	180	Ø 8	10
08	350	360	Ø 8	8,3

Pode-se destacar como uma característica comum da goivagem com eletrodo de grafite a presença da região de metal fundido não removido, como apresentado na Figura 5.8 b), porém notou-se que as amostras processadas com eletrodo de maior diâmetro apresentaram uma maior presença dessa característica e também uma maior dificuldade na sua remoção, isso pode estar associado ao fato do eletrodo de 8 mm de diâmetro possuir uma menor densidade de corrente e fundir uma maior área superficial de metal, gerando uma poça líquida mais larga e de difícil expulsão, nas condições experimentais empregadas neste ensaio.

As amostras processadas com eletrodo de 5 mm de diâmetro apresentaram uma irregularidade maior que as processadas com o eletrodo de 8 mm, deixando o acabamento da vala muito grosseiro, o que demandou um maior tempo de esmerilhamento para dar o acabamento adequado à superfície da amostra.

A amostra 08 apresentou um conjunto de características muito bom, com excelente acabamento superficial e sem regiões de metal fundido não removido, porém nas regiões onde ocorreram curtos-circuitos, houve remoção elevada de material chegando a furar a peça. Em aplicações onde são necessárias grandes e profundas remoções, esse processo dará uma boa resposta.

Por se tratar de uma remoção irregular, de difícil medição das características geométricas como profundidade e largura da vala, decidiu-se por analisar como resposta a massa de material removido de cada condição, assim a Tabela 5.2 apresenta os valores das massas de cada amostra, antes e após a soldagem e depois das goivagens.

A Tabela 5.3 apresenta os valores de corrente média obtidos nas goivagens das amostras. São apresentadas as densidades de corrente e razão entre a massa removida

pela média das massas depositadas. No cálculo das razões das massas, separou-se as massas em dois grupos que seriam utilizados nas goivagens com os eletrodos de 5 e 8 mm. As amostras processadas com eletrodo de 5 mm de diâmetro teve a média de massa depositada de 66,3 g, já as amostras processadas com eletrodo de 8 mm, a média foi de 42,7 g. A priori não existe razões para essa diferença entre a média das massas, já que o processo de soldagem empregado foi o mesmo com a utilização das mesmas condições e parâmetros de soldagem, o que pode ter ocorrido foi uma variação quando ajustada a velocidade de alimentação do arame.

Tabela 5.2 Acompanhamento da deposição e remoção de massa dos processo.

Amostras	Massa (g)	Massa após Soldagem (g)	Massa após Goivagem (g)	Massa Depositada (g)	Massa Removida (g)
01	1046,7	1085,3	977,3	38,6	108
02	1033,7	1098,9	1019,9	65,2	79
03	977,9	1056,1	947,9	78,2	108,2
04	1017,7	1100,9	1019,1	83,2	81,8
05	1048	1090,7	924,3	42,7	166,4
06	1061,8	1108,4	1010,2	46,6	98,2
07	1003,9	1048,2	910,6	44,3	137,6
08	1049,6	1086,9	1008	37,3	78,9

Tabela 5.3 Apresenta os resultados os resultados de corrente média, densidade de corrente, e razão entre a massa removida pela média da massa depositada.

Amostras	Corrente Média (A)	Densidade de Corrente (A/mm ²)	Mas. Removida/ Med. Mas. Depositada
01	292 ± 51	14,87	1,63
02	188 ± 40	9,57	1,19
03	256 ± 53	13,04	1,63
04	294 ± 45	14,97	1,23
05	396 ± 56	7,88	3,90
06	433 ± 23	8,61	2,30
07	299 ± 39	5,95	3,22
08	334 ± 80	6,64	1,85

Numa primeira avaliação do resultado da razão das massas depositada e removida apresentada na Tabela 5.3, percebe-se que nas amostras goivadas com o eletrodo de 8 mm, ocorreram índices mais elevados da razão entre as massa, amostras 05, 06, 07 e 08. Possivelmente, um arco mais largo, gerado pelo eletrodo de maior diâmetro, resultou numa

poça fundida de maior dimensão tornando a remoção mais regular, justificando o menor nível de irregularidade à superfície da remoção quando comparado com o aspecto da remoção oriunda do processo de goivagem com eletrodo de grafite de 5 mm de diâmetro.

Na Figura 5.9 é possível visualizar a influência dos diferentes diâmetros dos eletrodos sobre a razão da massa removida por massa depositada.

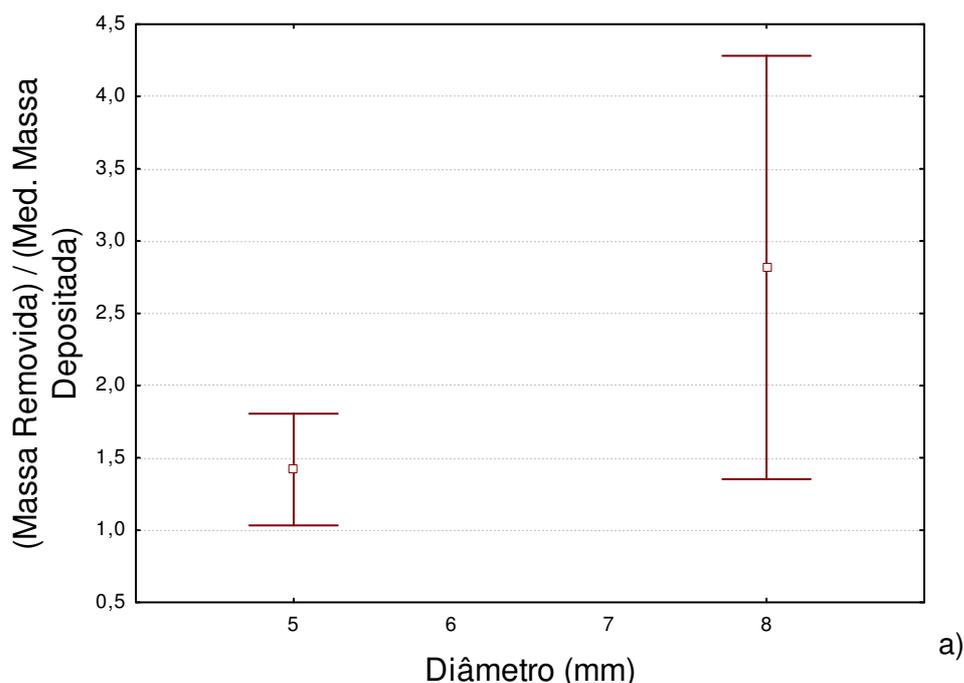


Figura 5.9 Apresenta a influência das variáveis: diâmetro do eletrodo sobre a razão da massa removida por massa média depositada durante o processo de soldagem.

A Figura 5.9 mostra que a goivagem com eletrodo de 5 mm de diâmetro remove cerca de 1,5 vezes o volume de material depositado num cordão de solda convencional realizado pelo processo MIG/MAG, com uma pequena dispersão desse valor. Essa pequena dispersão pode ser justificada pela pouca variação dos valores de corrente média obtidos nos diferentes níveis de correntes explorados, como discutido no item 5.1.1.3 (Estudo dos Sinais Elétricos) e reforçado a seguir pelas observações feitas através da Figura 5.10. Por outro lado o processo de goivagem com eletrodo de 8 mm pode remover um maior volume quando comparado com o volume depositado, porém com uma maior dispersão, que é justificado pela maior variação da corrente média obtida nos diferentes níveis de correntes explorados. Analisando a Figura 5.10 foram obtidas algumas conclusões importantes quando comparados os resultados dos dois diâmetros de eletrodo explorados.

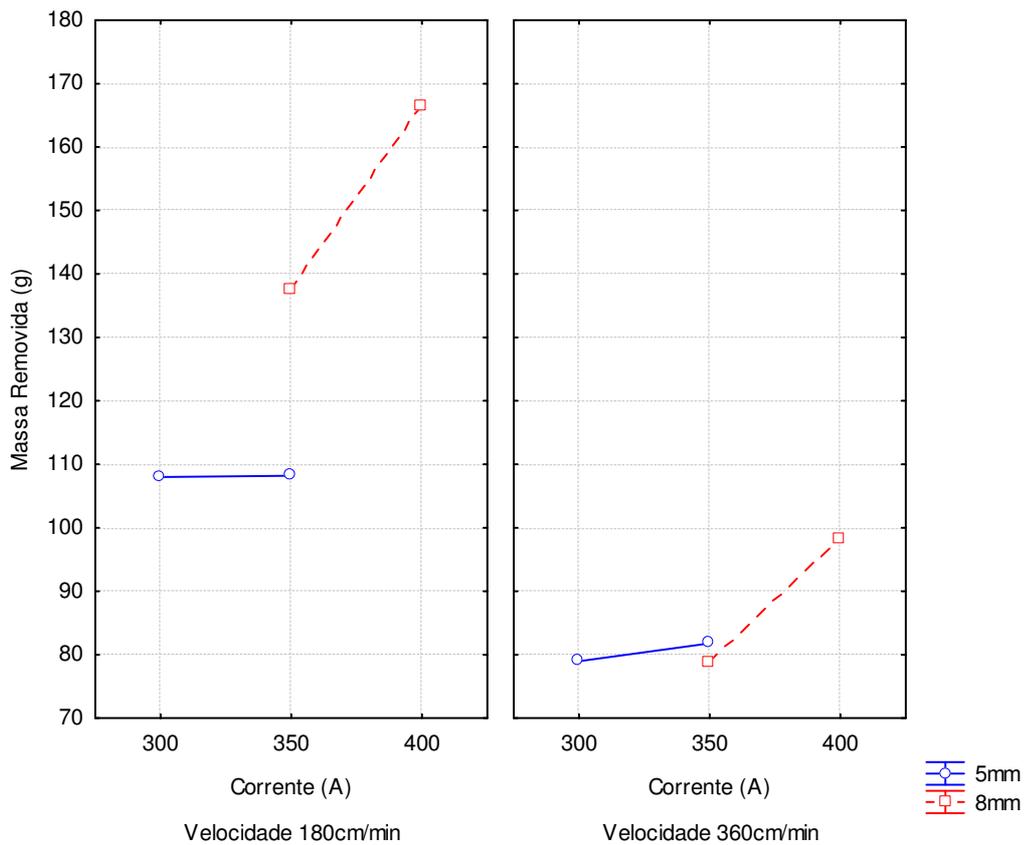


Figura 5.10 Apresenta o volume de material removido para dois níveis de velocidade do eletrodo, a) e b) respectivamente.

Inicialmente foram comparados os resultados do parâmetro velocidade de avanço do eletrodo sobre a massa de metal removido, que apresentou um comportamento esperado. A velocidade maior implica numa redução do volume removido devido a uma menor energia fornecida a peça, porém quantificando essa redução obtém-se uma redução de 42% para o eletrodo de 8 mm e uma redução de 26% para o eletrodo de Ø5mm o que torna o resultado para o eletrodo de 8 mm de diâmetro mais significativo devido a sua maior remoção. Outra observação bastante interessante foi feita sobre o parâmetro corrente, onde para o eletrodo de 8 mm de diâmetro, comportou-se de forma esperada, aumentando significativamente o volume de material removido quando passamos de 350 A para 400 A o que não ocorreu no eletrodo de Ø5 mm, pois quando ajustada a corrente de 350 A na fonte não houve aumento significativo no volume de material removido, portanto confirmando os resultados apresentados nos histogramas correspondentes acima.

5.1.2 Estudo Exploratório do Processo de Goivagem a Arco Plasma

❖ Análises Qualitativas

Para poder apresentar as principais características de cada condição empregada no estudo exploratório do processo a arco plasma, foi construída uma tabela com as observações qualitativas feitas pelo operador em cada condição. A Tabela 5.4 mostra os resultados.

Tabela 5.4 Resultados qualitativos do estudo exploratório do processo plasma.

Amostra	Características observadas
1	Excelente acabamento, porem difícil remoção da escória
2	Excelente acabamento
3	Excelente acabamento
4	Excelente acabamento
5	Excelente acabamento
6	Excelente acabamento, porém difícil remoção da escória
7	Excelente acabamento, fácil remoção da escória.
8	Excelente acabamento remoção difícil escória
9	Excelente acabamento remoção difícil escória
10	Ruim, com respingos, remoção não satisfatória
11	Excelente acabamento no inicio um pouco irregular a remoção
12	Excelente acabamento (semelhante às amostras com 35º)
13	Excelente acabamento (semelhante às amostras com 35º)
14	Excelente acabamento (semelhante às amostras com 35º)
15	Excelente acabamento. no inicio um pouco irregular a remoção
16	Excelente acabamento, maior penetração
17	Ruim, com respingos, remoção não satisfatória
18	Ruim, com respingos, remoção não satisfatória
19	Muito bom variando apenas na penetração e largura
20	Muito bom variando apenas na penetração e largura
21	Muito bom variando apenas na penetração e largura
22	Muito bom variando apenas na penetração e largura
23	Ruim
24	Ruim
25	Ruim
26	Ruim
27	Ruim baixa penetração
28	Ruim baixa penetração
29	Ruim baixa penetração
30	Excelente acabamento boa penetração
31	Excelente acabamento boa penetração
32	Excelente acabamento boa penetração grande penetração

As Figura 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 mostram os perfis das 32 condições ensaiadas. Pode-se observar as características geométricas e o aspecto da vala gerada com a remoção do material com jato de plasma. Cabe ressaltar que estas amostras não foram esmerilhadas após a goivagem, sendo assim, os acabamentos observados foram obtidos exclusivamente pelas goivagens. Amostras de aço soldadas, quando preparadas nestas condições, revelam com nitidez a zona afetada pelo calor do arco, porém como pode ser observado nas macrografias mostradas nas figuras, não foi possível perceber, nestas resoluções, a existência da ZAC das amostras, o que mostra que o processo de goivagem a arco plasma aplicado nesse tipo de material (aço baixo carbono), resulta em uma ZAC de dimensões pequena, quando comparadas às ZAC's de peças soldadas. A seguir estão apresentadas na Figura 5.11 as amostras processadas com ângulo de 35°.

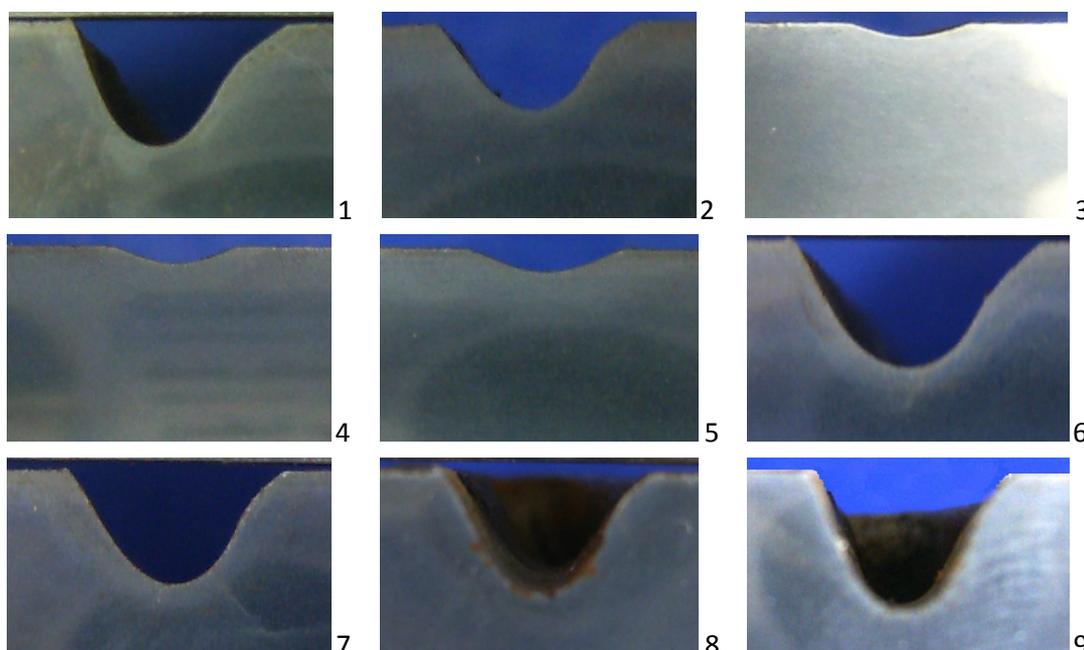


Figura 5.11 Amostras de 1 a 9 todas processadas com ângulo de ataque de 35°

Pode-se verificar que na Figura 5.11 que as amostras apresentaram para todas as condições empregadas um excelente acabamento até quando utilizado níveis de correntes mais elevado em torno de 100 A, como mostra os itens 1, 8 e 9. É possível verificar nos itens 3, 4 e 5 condições que removeram pequenos volumes de material com excelente acabamento, sendo condições boas para manutenção de equipamento construídos com chapas finas.

A Figura 5.12 apresenta as amostras processadas com ângulo de ataque da tocha em 55°. Para este ensaios foram encontradas condições críticas à remoção do metal fundido

nas amostras processadas com correntes de 100 A deixando grande volume de material fundido não removido, itens 10, 17 e 18, e nas amostras processadas com correntes de 70 A percebe-se a existência dessa característica em menor quantidade, o que pode ser completamente removida no passe posterior de acabamento com a esmerilhadeira, itens 11, 15 e 16. As condições utilizando o menor nível de corrente em 40 A novamente apresentaram condições de excelente acabamento podendo ser utilizado em equipamentos construídos com chapas finas.

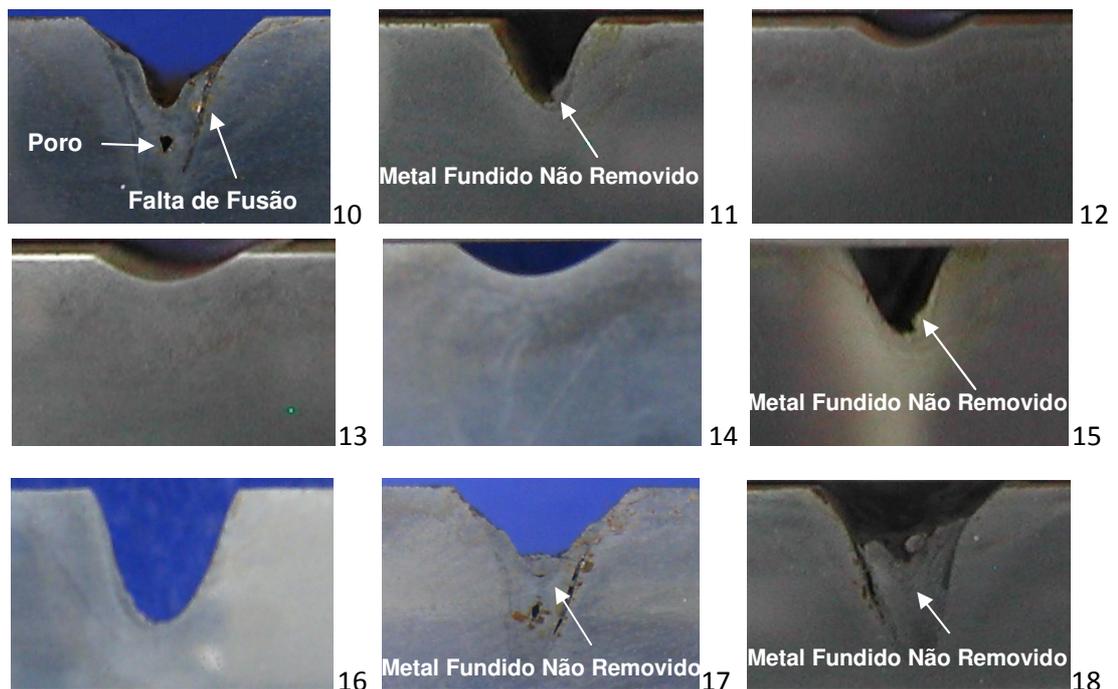


Figura 5.12 Amostras de 10 a 18 todas processadas com ângulo de 55°

A Figura 5.13 apresenta as amostras 19 à 26. Com relação à altura do arco plasma, foi verificado que para correntes maiores, em torno de 100 A, apresentou uma ineficiência a remoção do metal fundido para qualquer comprimento do arco como observado nas imagens 23 à 26 da Figura 5.13, porém quando utilizado correntes com nível intermediário, de 70 A, remoção foi satisfatória para comprimentos do arco de 8 mm a 12 mm imagens 20, 21 e 22, sendo irregular para o comprimento menor com 6 mm de coluna do arco plasma, imagem 23.

A Figura 5.14 apresenta as amostras 27 à 32 onde utilizando a maior altura da coluna do arco plasma foi verificado que as três condições utilizando correntes de 70 A apresentaram excelente acabamento superficial com elevada remoção de metal fundido

como apresentados nas imagens 30, 31 e 32. No entanto quando utilizado a corrente de 100 A novamente foi observado a presença de metal fundido não removido imagens 27, 28 e 29.

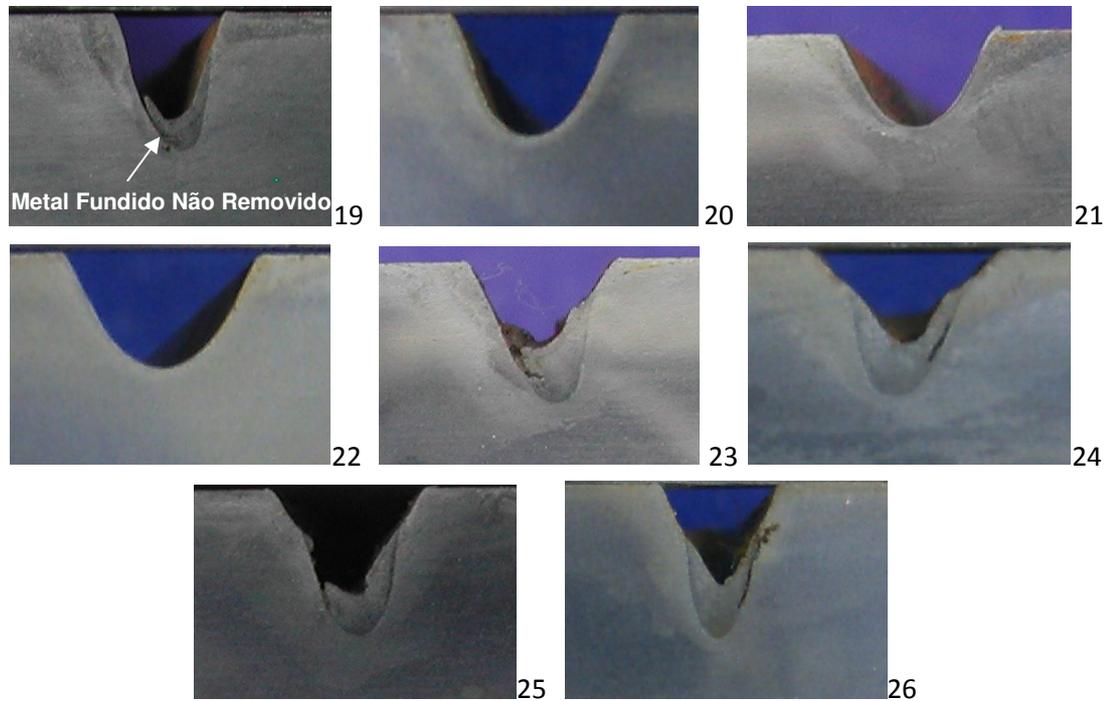


Figura 5.13 Amostras de 19 a 26 efeito da variação da altura do arco (ângulo 45° e velocidade 120 cm/min)

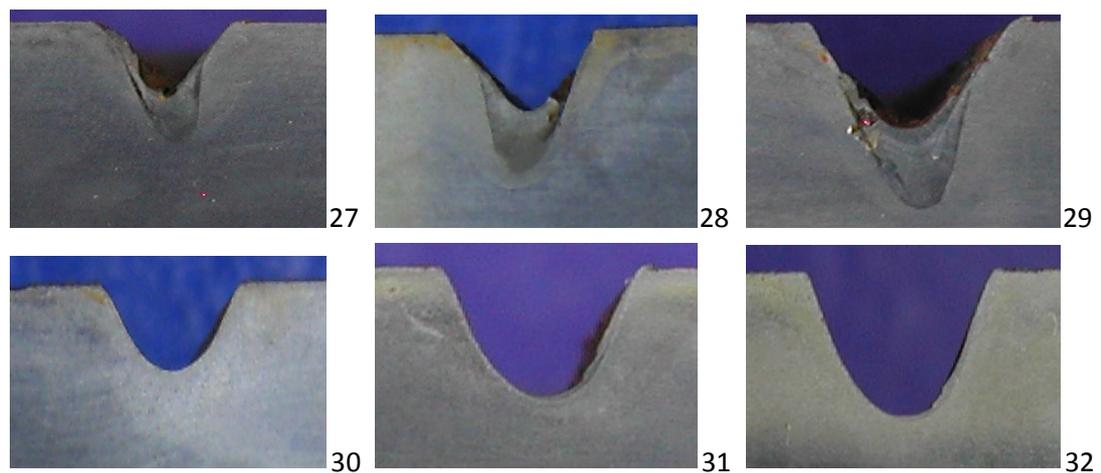


Figura 5.14 Amostras de 27 a 32 condições especiais com altura do arco de 12 mm.

A Tabela 5.5 mostra as medidas geométricas das 32 amostras apresentadas na Figura 5.14. As medidas foram obtidas pelo programa de imagem, Imagem Pro Plus.

Tabela 5.5 Medidas geométricas das amostras goivadas a arco plasma.

Amostra	Largura	Penetração	Área	Metal Remanescente
1	5,57	3,06	9,79	-
2	4,97	1,96	5,74	-
3	3,01	0,50	0,83	-
4	3,50	0,43	0,94	-
5	4,29	0,58	1,60	-
6	6,22	2,80	10,77	-
7	5,29	2,15	7,04	-
8	6,87	3,74	16,18	-
9	8,05	5,03	22,54	-
10	4,85	5,60	12,55	6,53
11	3,93	3,19	7,94	1,53
12	4,34	0,67	1,91	-
13	4,40	0,83	2,42	-
14	5,75	1,20	4,23	-
15	4,65	3,50	10,75	1,71
16	5,57	4,44	15,97	1,46
17	4,79	6,44	14,57	7,23
18	6,44	7,23	22,38	12,33
19	4,27	4,80	13,45	2,91
20	4,62	3,35	10,20	-
21	5,08	3,06	9,51	-
22	5,72	2,77	10,37	-
23	5,24	5,12	15,57	5,40
24	5,17	5,54	15,49	6,09
25	4,70	5,59	15,04	4,06
26	4,69	6,23	16,75	6,09
27	4,60	5,19	12,38	5,49
28	5,14	5,05	14,60	5,75
29	5,26	6,35	21,67	8,52
30	5,08	2,40	7,92	-
31	5,14	3,27	11,51	0,90
32	5,70	3,63	14,66	0,89

❖ **Análises Quantitativas**

Para realizar as análises quantitativas das condições processadas foi medida a geometria da remoção pelo programa (Image-pro-plus 7.0) sendo medidas a penetração, a largura, a área fundida e a área fundida não removida. Em posse destes dados utilizou-se um programa de análise estatística, tratando-se de uma ferramenta poderosa para análise de relações entre variáveis. Assim passou-se a analisar o grau de influência de cada

variável sobre os aspectos finais da geometria como (penetração, largura, área fundida e área fundida não removida).

A seguir está mostrada na Tabela 5.6 o grau de influência das variáveis (ângulo, corrente e velocidade) e a combinação entre elas sobre as características finais da remoção, para as amostras de 1 a 18 deixando uma tabela balanceada sendo uma condição necessária para realizar esse tipo de análise. As linhas que apresentam o p-level inferior a 0,05 significam que com 95% de confiabilidade há influência da variável ou combinação de variáveis sobre a característica analisada.

Tabela 5.6 Resultados obtidos por um programa de análise estatística sobre a influência das variáveis do processo sobre a característica final da remoção.

1-ÂNGULO, 2-CORRENTE, 3-VELOCIDADE						
LARGURA						
	df Effect	MS Effect	df Error	MS Error	F	p-level
1	1	0,519622	4	0,112022	4,63856	0,097572
2	2	5,330311	4	0,112022	47,58263	0,001627
3	2	4,097699	4	0,112022	36,57935	0,002688
12	2	2,961506	4	0,112022	26,43678	0,004947
13	2	0,082967	4	0,112022	0,74063	0,532550
23	4	0,076889	4	0,112022	0,68637	0,637875
PENETRAÇÃO						
	df Effect	MS Effect	df Error	MS Error	F	p-level
1	1	9,18404	4	0,033305	275,7570	0,000077
2	2	30,15005	4	0,033305	905,2753	0,000005
3	2	1,70685	4	0,033305	51,2495	0,001411
12	2	1,62366	4	0,033305	48,7514	0,001553
13	2	0,01393	4	0,033305	0,4182	0,684032
23	4	0,28377	4	0,033305	8,5205	0,03078
ÁREA						
	df Effect	MS Effect	df Error	MS Error	F	p-level
1	1	16,6443	4	1,613883	10,31320	0,032545
2	2	309,2919	4	1,613883	191,64450	0,000107
3	2	64,6483	4	1,613883	40,05760	0,002261
12	2	4,3139	4	1,613883	2,67300	0,183177
13	2	.7090	4	1,613883	0,43930	0,672231
23	4	12,0261	4	1,613883	7,45160	0,038686

Continuação da Tabela 5.6.

METAL NÃO REMOVIDO						
	df Effect	MS Effect	df Error	MS Error	F	p-level
1	1	52,65398	4	1,714603	30,70914	0,005185
2	2	32,23500	4	1,714603	18,00270	0,009245
3	2	1,58910	4	1,714603	0,92680	0,466953
12	2	32,23500	4	1,714603	18,80027	0,009245
13	2	1,58910	4	1,714603	0,92680	0,466953
23	4	1,71460	4	1,714603	1,00000	0,50000

❖ *Largura*

Sobre a característica final largura da remoção teve uma forte relação entre as variáveis corrente, velocidade e a combinação de corrente e ângulo da tocha, como mostrado no Figura 5.15 a), b) e c).

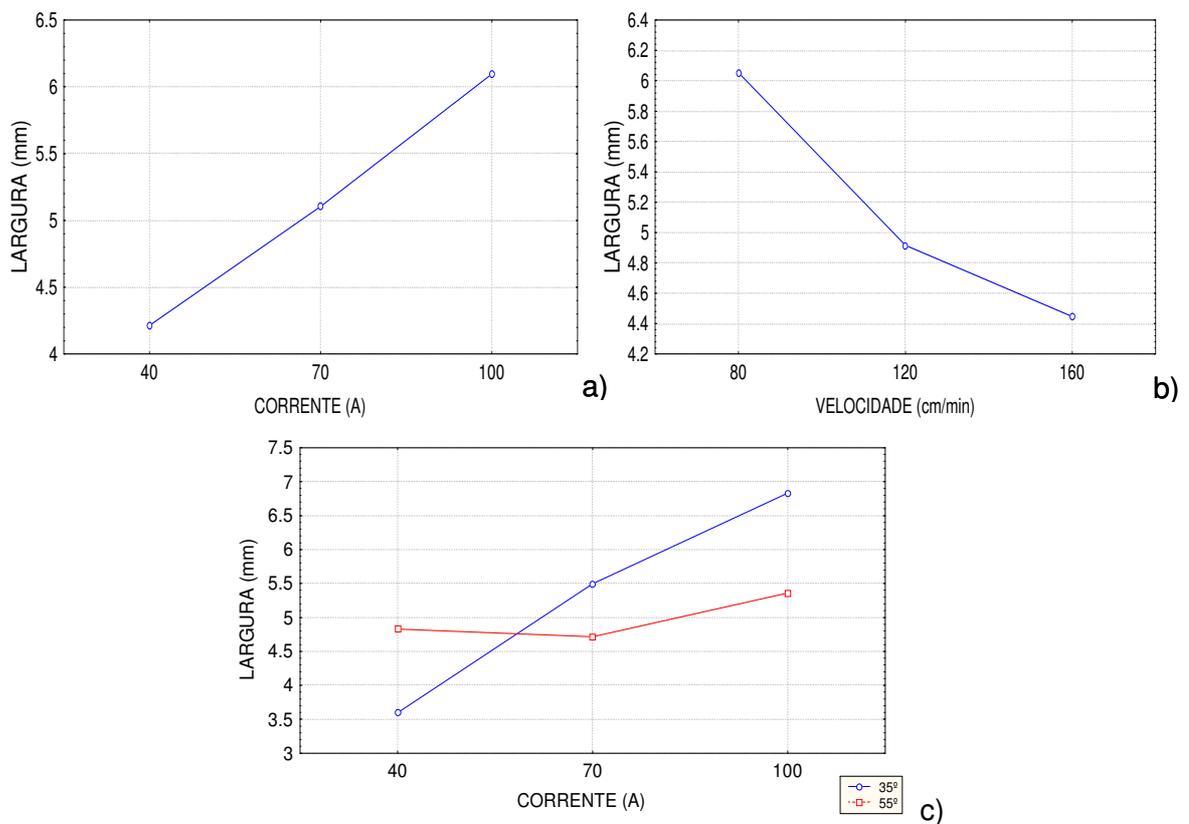


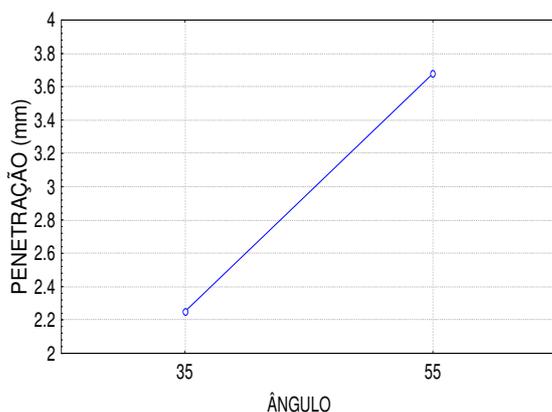
Figura 5.15 a) Influência de corrente sobre a largura, b) influência da velocidade sobre a largura e c) influência do ângulo e corrente sobre a largura.

Pela Figura 5.15 a) nota-se que a menor corrente trabalhada forneceu uma remoção de 4,2 mm na largura enquanto que a maior corrente teve um aumento de aproximadamente 45% sobre a largura. Pela Figura 5.15 b) observa-se a relação da velocidade sobre a largura, e como observada na literatura, (DUTRA, 1979) quando se aumentou a velocidade de avanço da fonte de energia, a largura caiu significativamente de 6,1 mm com velocidade de 80 cm/min para 4,4 mm aproximadamente em 160 cm/min, correspondendo a um decréscimo de 27% sobre a largura. A Figura 5.15. c) mostra que a interação corrente e ângulo também afetou significativamente a largura.

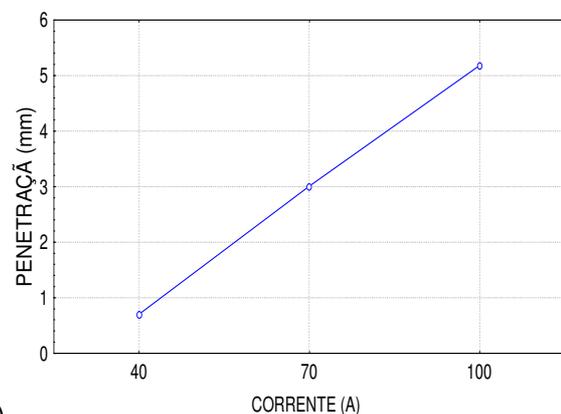
Em correntes mais baixas, o uso de um ângulo de ataque menor tende a gerar uma vala com largura menor, entretanto este comportamento muda com o aumento da corrente, ou seja, goivagens executadas com ângulos de ataque de aproximadamente 35° resultaram em valas mais largas, à medida que a corrente é aumentada. Os resultados mostram que um aumento do ângulo de ataque acima deste valor pouco afeta a largura da vala gerada. Isto se deve provavelmente ao direcionamento do calor nos diferentes ângulos, como para ângulos maiores o direcionamento do calor é para regiões mais internas da peça, há a tendência de gerar valas mais estreitas e profundas, por outro lado, ângulos menores concentra o calor na superfície da peça e tendem a gerar valas largas e rasas.

❖ Penetração

Analisando a característica final penetração da remoção, observa-se uma forte relação entre a penetração das valas com as variáveis: ângulo de ataque, corrente e velocidade de goivagem, e as ações combinadas da corrente com o ângulo de ataque da tocha e da corrente com a velocidade da tocha, como apresentado nas Figura 5.16 a), b), c), d), e).



a)



b)

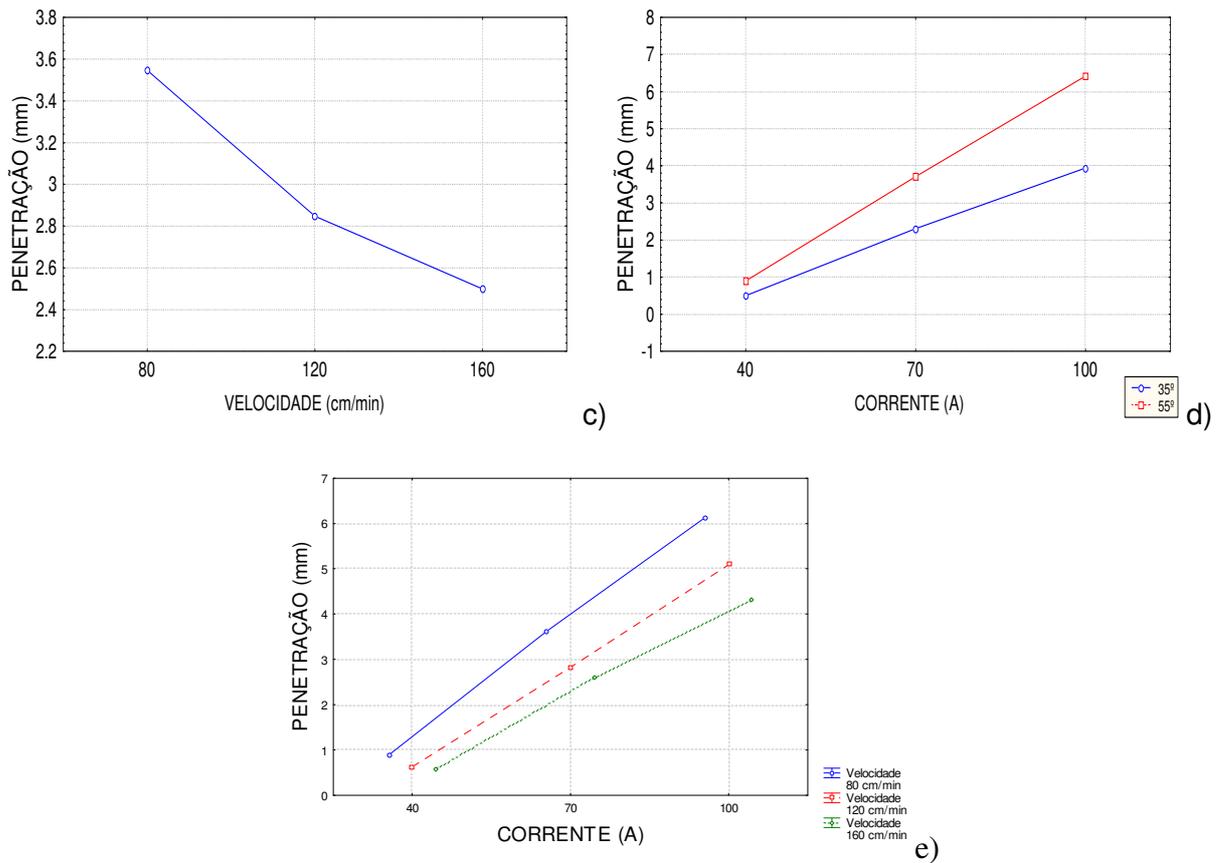


Figura 5.16 a) Influência do ângulo sobre a penetração b) Influência de corrente sobre a penetração, c) influência da velocidade sobre a penetração e d) influência do ângulo e corrente sobre a penetração e) influência da corrente e velocidade sobre a penetração.

Com relação ao parâmetro ângulo da tocha, este é de fundamental importância sobre a penetração, pois através desse ajuste consegue-se obter um aumento de aproximadamente 64%, quando variando o ângulo de 35° para 55° e mantendo fixa a energia fornecida à peça. Estes resultados confirmam as discussões anteriores, ângulos maiores geram valas mais estreitas e profundas. A corrente e a velocidade se comportaram de acordo com o esperado, ou seja, quando se aumenta a corrente ou se diminui a velocidade de avanço da tocha, aumenta-se a energia por unidade de comprimento fornecida à peça, assim uma maior fusão na peça é gerada, conseqüentemente, uma maior penetração. É interessante ressaltar que a corrente influenciou mais significativamente a penetração do que a velocidade, podendo ser verificada na magnitude da variação da penetração.

❖ *Área Fundida*

Os resultados dessa característica, área total fundida, são importantes por relacionarem diversas condições de parâmetros exploradas, associadas à quantidade de material que pode ser removido no processo. O conhecimento dos efeitos dos parâmetros do processo pode auxiliar na escolha de parâmetros para diferentes aplicações, por exemplo: quando se necessita realizar pequenas remoções superficiais como em defeitos em chapas finas, quais parâmetros se aplicam melhor para esse caso, ou no caso oposto a esse, quando se tem chapas grossas e necessita remover elevada quantidade de material. As Figura 5.17. a), b), e c) mostram as variáveis ângulo, corrente e velocidade, as quais tiveram uma forte relação com essa característica analisada.

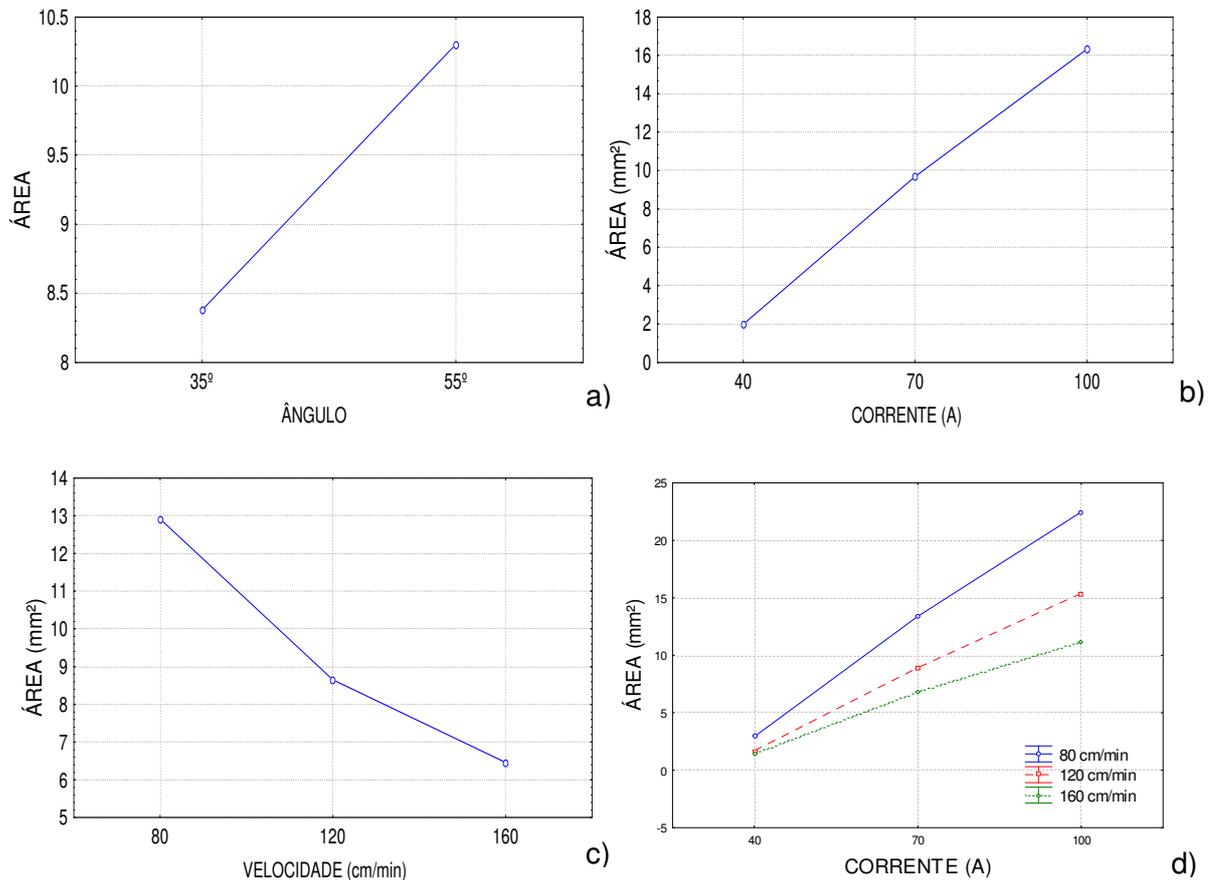


Figura 5.17 a) Influência do ângulo de ataque do eletrodo sobre a área fundida, b) influência da corrente sobre a área fundida c) influência da velocidade sobre a área fundida d) influência da corrente e velocidade sobre a área fundida.

Para o caso do ângulo de ataque do eletrodo, tem-se que o maior ângulo forneceu um aumento de aproximadamente 23% na área fundida. Assim, para uma mesma energia empregada no processo consegue-se aumentar significativamente o volume de material removido, apenas modificando o ângulo da tocha. O comportamento observado nas outras duas variáveis; corrente e velocidade, foi o previsto pela literatura (DUTRA, 1979), ou seja, quanto maior a corrente maior a energia fornecida à peça, conseqüentemente maior fusão. Da mesma forma, quanto menor a velocidade do deslocamento da tocha, maior a energia, implicando numa maior fusão do material. Contudo, nota-se que a corrente modifica mais significativamente o volume de material fundido do que a velocidade, como mostra o Figura 5.17 b) e c).

A Figura 5.17 d) apresenta influência do efeito combinado da corrente e da velocidade sobre a área de metal fundido. Pode-se observar na figura que em corrente mais baixas o efeito da velocidade sobre a área fundida é não significativa que não houve uma interação com a variação das variáveis sobre a área fundida. Porém, em correntes mais altas, a variação da área fundida é maior para as diferentes velocidades empregadas.

❖ *Metal fundido não removido*

Sobre essa última característica analisada é importante ressaltar que a presença desse material não removido é prejudicial à junta, porque além do pouco volume de metal removido, o acabamento geralmente é ruim. Outro problema relacionado a este metal remanescente é que pode ocorrer falta de fusão desse volume de material com o material base da peça, como mostrado na Figura 5.14, amostras 10 e 26. Conseqüentemente, quando a remoção apresenta essas características, é necessário realizar a remoção dessa região, provavelmente por esmerilhamento, para que num posterior enchimento da junta, por processos de soldagens, não impliquem em problemas como falta de fusão ou descontinuidades na junta soldada.

As variáveis que tiveram relações significativas com essa característica foram o ângulo de ataque do eletrodo, corrente e a combinação dessas duas variáveis, corrente e ângulo, como mostrado na Figura 18.

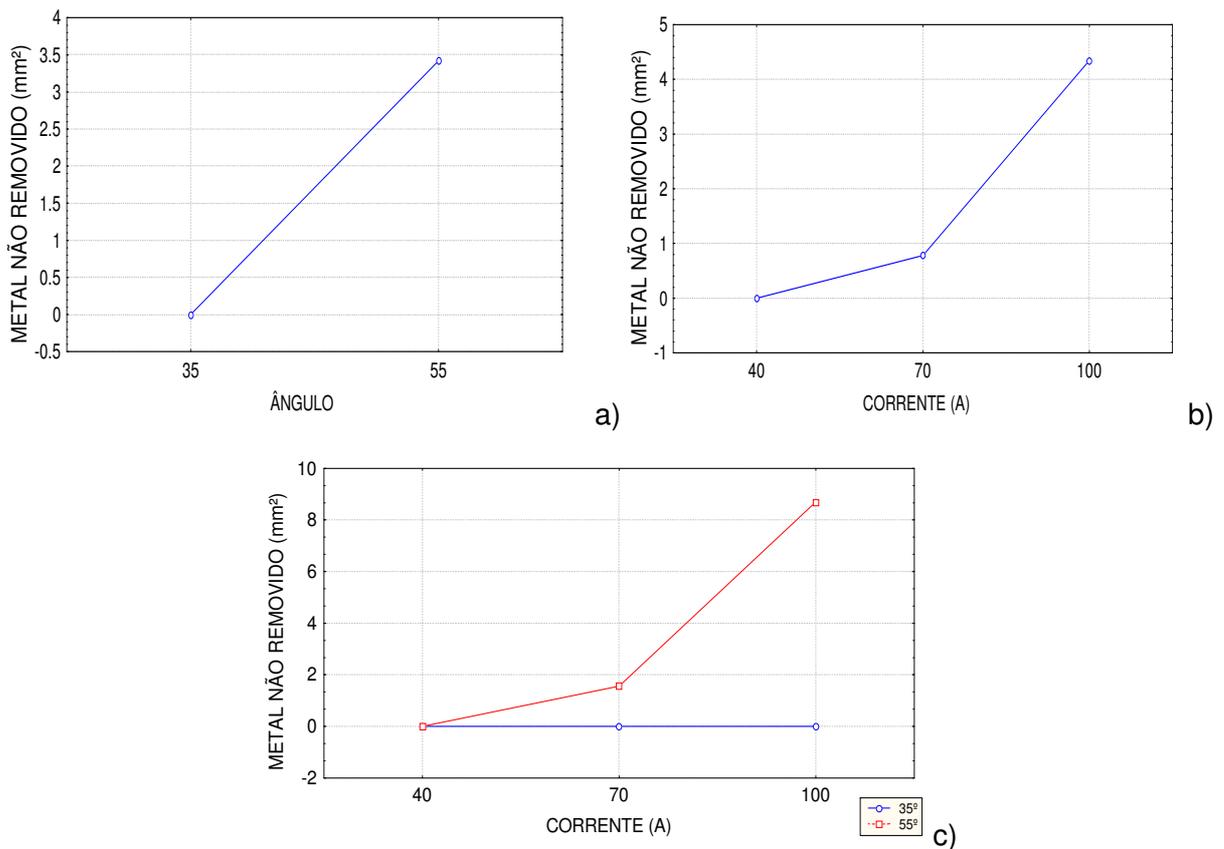


Figura 5.18 a) Influência do ângulo de ataque do eletrodo sobre a remoção do metal fundido, b) influência da corrente sobre a remoção do metal fundido c) influência do ângulo e corrente sobre a remoção do metal fundido.

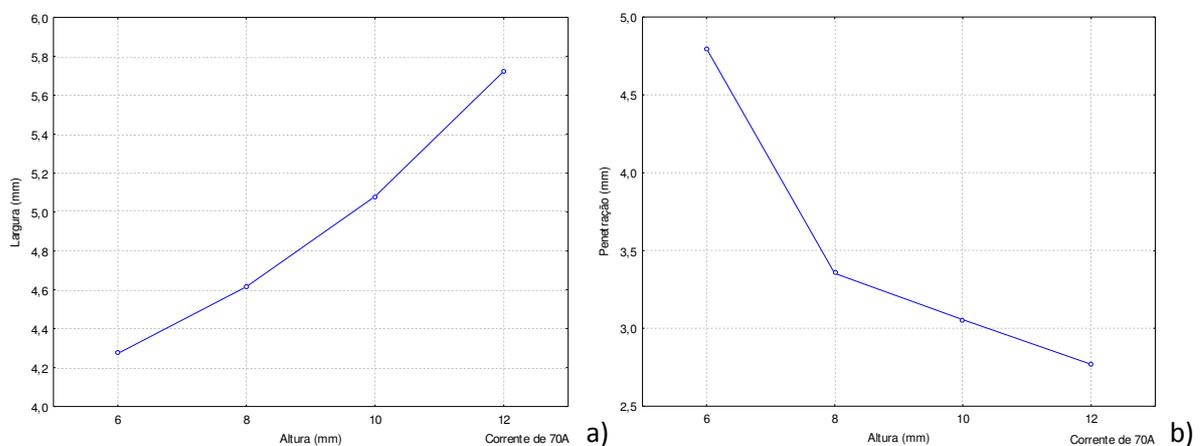
Pode-se notar que com o ângulo menor de 35° não proporcionou a formação desta região, mesmo que variando a corrente ao maior nível. Porém, quando se utilizaram maiores ângulos de ataque do eletrodo, pôde-se perceber um aumento significativo sobre a formação desta região, principalmente quando a corrente empregada foi de 100 A, o que implicou num aumento de aproximadamente 360% quando comparada com a amostra que utilizou corrente de 70 A. Uma observação importante sobre o volume de metal não removido quando empregada a corrente de 70 A, é que foi bastante pequena como mostra a Figura 5.14, amostras 11, 15 e 16, o qual pode ser removido completamente no passe final de acabamento com a esmerilhadeira, antes das soldagens.

❖ *Análises relacionadas ao ângulo de ataque.*

Pode-se observar nas amostras de 1 à 9 da Figura 5.11 que o ângulo pequeno da tocha em torno de 35° fornece um acabamento superficial satisfatório para todas as condições, ate mesmo quando a energia utilizada no processo foi a mais elevada, como no caso da amostra 9, que apresenta a maior corrente explorada no processo (100 A) e a menor velocidade de avanço da tocha (80 cm/min), sendo a condição mais crítica para a remoção do metal fundido. Ao se trabalhar com o ângulo de 55° da tocha nas amostras 10 à 18, notou-se que as amostras processadas com corrente de 100 A apresentaram insuficiência na remoção do metal fundido, como pode ser visto na Figura 5.14 amostras 10, 17 e 18), porém, as amostras com correntes mais baixas apresentaram excelente acabamento.

Altura do Arco

As amostras 19 a 26 foram obtidas de goivagens processadas com o intuito de explorar a influência da altura da coluna de plasma sobre as características da remoção. Assim, como foi relatado na Tabela 5.4 e verificado nas Figura 5.14 (23, 24, 25 e 26) as amostras processadas com a corrente elevada de 100 A apresentaram insuficiência na remoção onde foi observada a presença de material fundido não removido, o que torna inviável ou mesmo necessário uma maior atenção na utilização dessas condições na prática. Portanto, concentraram-se as análises de geometria apenas nas amostras processadas com corrente de 70 A. As Figura 5.19 a), b), c) e d) mostram os resultados das características largura, penetração, área fundida e área fundida não removida respectivamente.



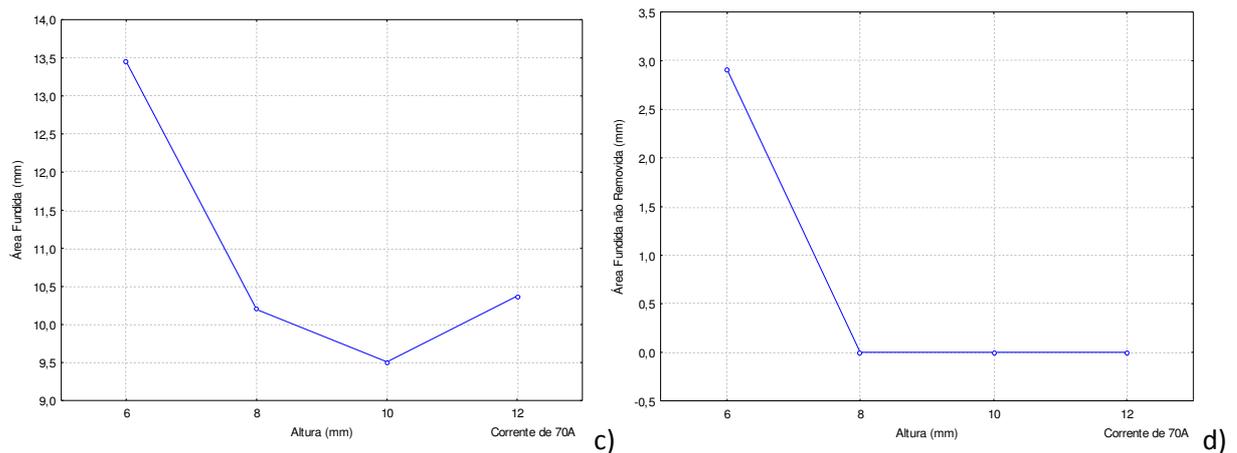


Figura 5.19 a) Influência da altura da coluna do plasma sobre a largura, b) sobre a penetração, c) área total fundida e d) área fundida não removida.

Os resultados de largura e penetração se comportaram como esperado, uma vez que, quanto maior o comprimento da coluna do arco, maior será o diâmetro da circunferência da base do cone da coluna de plasma na peça, porém a penetração diminui quando a coluna aumenta devido à densidade de corrente na peça ser menor. A redução da área removida com o aumento da altura do arco (Figura 5.16 c) pode também ser explicada pela maior área da base da coluna do plasma que, para uma inclinação fixa da tocha de 45° , tende a aumentar com a altura do arco. Por consequência, há uma queda na densidade de corrente resultando em valas mais largas, rasas e menos volumosas, além da redução da própria pressão do arco plasma exercida sobre a chapa, também responsável pela redução da área fundida.

Comportamento semelhante foi observado para área não removida (Figura 5.19 d) - queda na quantidade de material não removido com o aumento a altura do arco. Aparentemente, uma distância maior do bocal à peça favorece a um menor volume fundido bem como facilita a expulsão de material pelo jato de ar comprimido.

Condições Especiais

As amostras 27 a 32 foram processadas com ângulo 55° e distância tocha – peça elevada, com 12 mm. O principal objetivo foi de verificar condições experimentais de bom acabamento superficial ao variar a corrente e a velocidade de avanço da tocha. Porém da mesma forma como observado anteriormente, quando a corrente de trabalho foi de 100 A, a remoção foi insuficiente, o que mostra que nas altas energias, principalmente quando a

corrente é elevada, a geometria da tocha juntamente com a vazão do ar comprimido, disponível para a realização deste trabalho, foram insuficientes para remover satisfatoriamente a poça de fusão.

5.2 Etapa 2 - Simulação de Reparos de Juntas Soldadas e Análise de suas Propriedades Mecânicas e Características Metalúrgicas

5.2.1 Caracterização do Material como recebido

Essa etapa teve o objetivo de apresentar as características do material como recebido para auxiliar nas análises posteriores. Primeiramente, foi verificada a composição química do material ASTM 4140, que apresentou as seguintes concentrações dos elementos mostradas na Tabela 5.7. Todos os elementos estão dentro das faixas especificadas para esse material.

Tabela 5.7 Composição química do aço ASTM 4140 utilizado.

C	Si	Mn	P (máx.)	S (max.)	Cr	Mo
0,43	0,26	0,85	0,01	0,0036	0,84	0,18

O material foi adquirido na forma de um tarugo, de secção circular com 154 mm de diâmetro, a partir do qual foram confeccionados os corpos de prova. As medidas de microdureza e análises metalográficas realizadas no material como recebido foram na extremidade diâmetro externo do tarugo. Na Figura 5.20 estão mostrados os valores de microdureza medidos do material.

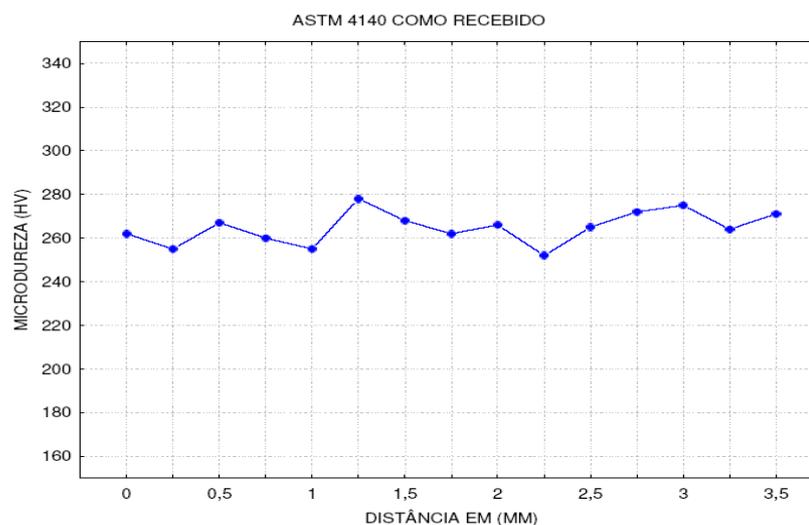


Figura 5.20 Microdureza do Aço ASTM 4140 como recebido.

A microdureza do material ficou na faixa de $(264,8 \pm 4,13)$ HV, o que indica que o material como recebido apresenta-se na condição normalizada.

A microestrutura do material como recebido está mostrado na Figura 5.21 a) realizada através de microscopia ótica (MO) e a Figura 5.21 b) através de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Pode-se observar nas microestruturas a presença de grãos grandes com a predominância de fases perlita e ferrita primária de contorno de grão (PF), identificadas nas Figura 5.21 a) e b).

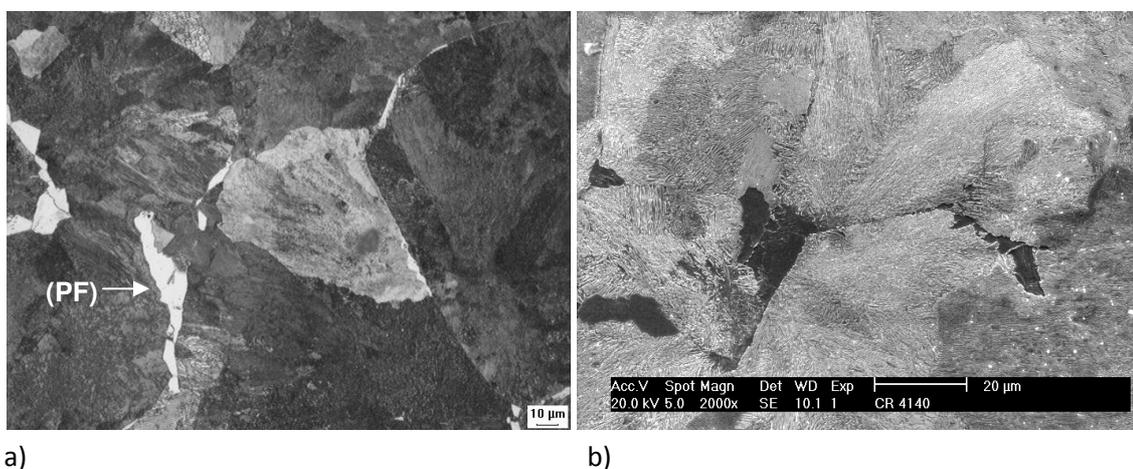


Figura 5.21 Microestrutura do Material como recebido. a) Foto realizada por (MO) x200 e b) Foto realizada no (MEV) x2000.

5.2.2 Caracterização das Amostras Após as Soldagens - 1º Passo.

O objetivo principal desta etapa foi analisar a propriedade mecânica (microdureza) e caracterizar a microestrutura da ZAC das amostras soldadas conforme procedimento descrito no subitem (4.2.3. Escolha da Junta e Processo de Soldagem - 1º Passo) o objetivo é possibilitar uma comparação entre essa microestrutura com as microestruturas do material após as operações de remoção de material e re-soldagem das amostras. Assim, observar a influência de cada processo sobre a propriedade do material.

A Figura 5.22 mostra o perfil de microdureza das 5 amostras soldadas, tendo início no metal de solda onde foram realizados quatro impressões de microdureza nesta região, fornecendo uma microdureza média (255 ± 30) HV considerando todas as amostras. Sobre a ZAC das amostras teve uma pequena variação entre as medidas de microdureza, provavelmente devido à sobreposição das várias ZAC's oriundas dos passes de enchimento

da junta, implicando, assim, em regiões de grãos refinados e outras de granulação mais grosseira. A média da microdureza na ZAC foi de (320 ± 50) HV.

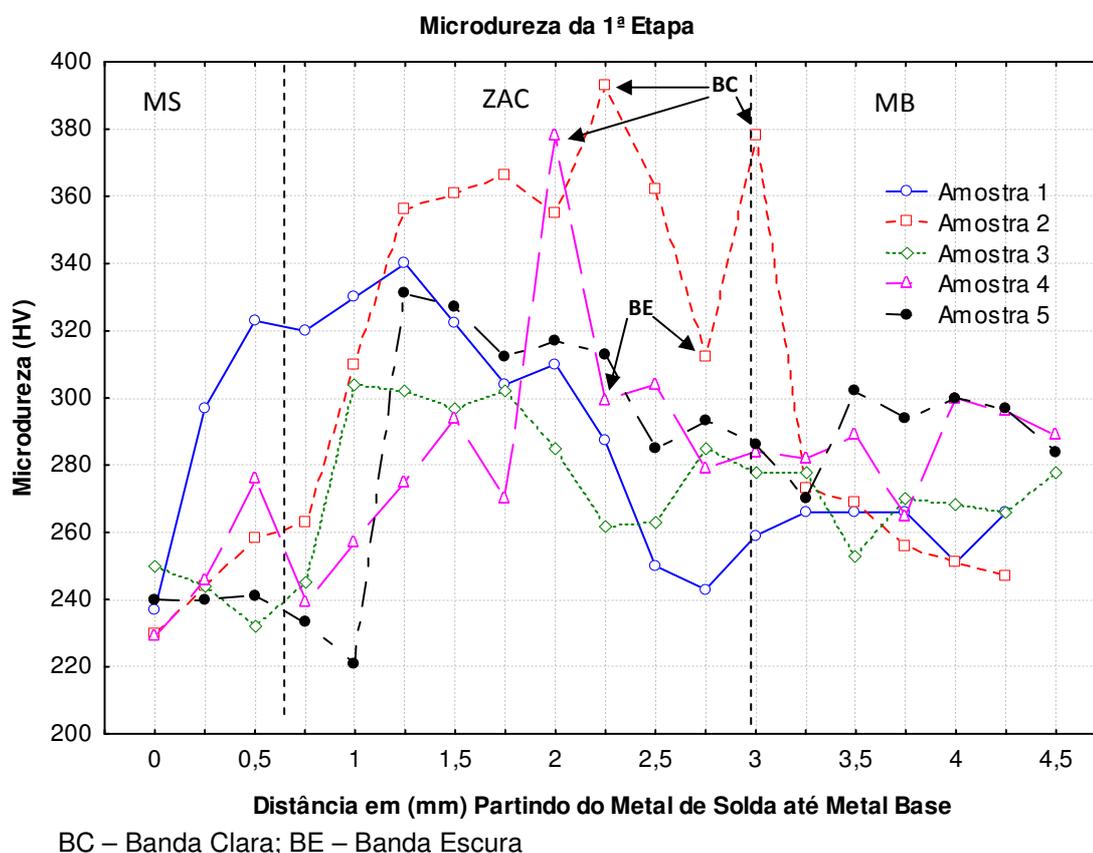


Figura 5.22 Microdureza da Etapa 1, amostras soldadas.

A extensão das ZAC's também é um resultado interessante para verificar a suspeita de que os processos de remoção estendam as zonas termicamente afetadas. O comprimento médio das ZAC's ficou dentro da faixa de $(2,8 \pm 0,3)$ mm, medido com o mesmo equipamento onde foram realizadas as microdurezas.

O IIW propôs um sistema de classificação para microestrutura através de microscopia ótica que vem sendo amplamente utilizada em trabalhos que buscam identificar constituintes microestruturais no metal de solda e na ZAC de aços C-Mn e baixa liga. Assim, neste trabalho, será adotada a terminologia sugerida pelo IIW para o aço ASTM 4140.

A microestrutura do metal de solda das amostras está apresentada na Figura 5.23. Observa-se uma estrutura com granulação fina, como pode ser verificado nos diferentes aumentos das Figura 5.23 a) e b). É composta principalmente por ferrita primária – PF, ferrita acicular – AF, e ferrita de segunda fase alinhada – FS(A). Cada uma destas microestruturas está destacada nas Figura 5.23 c) e d).

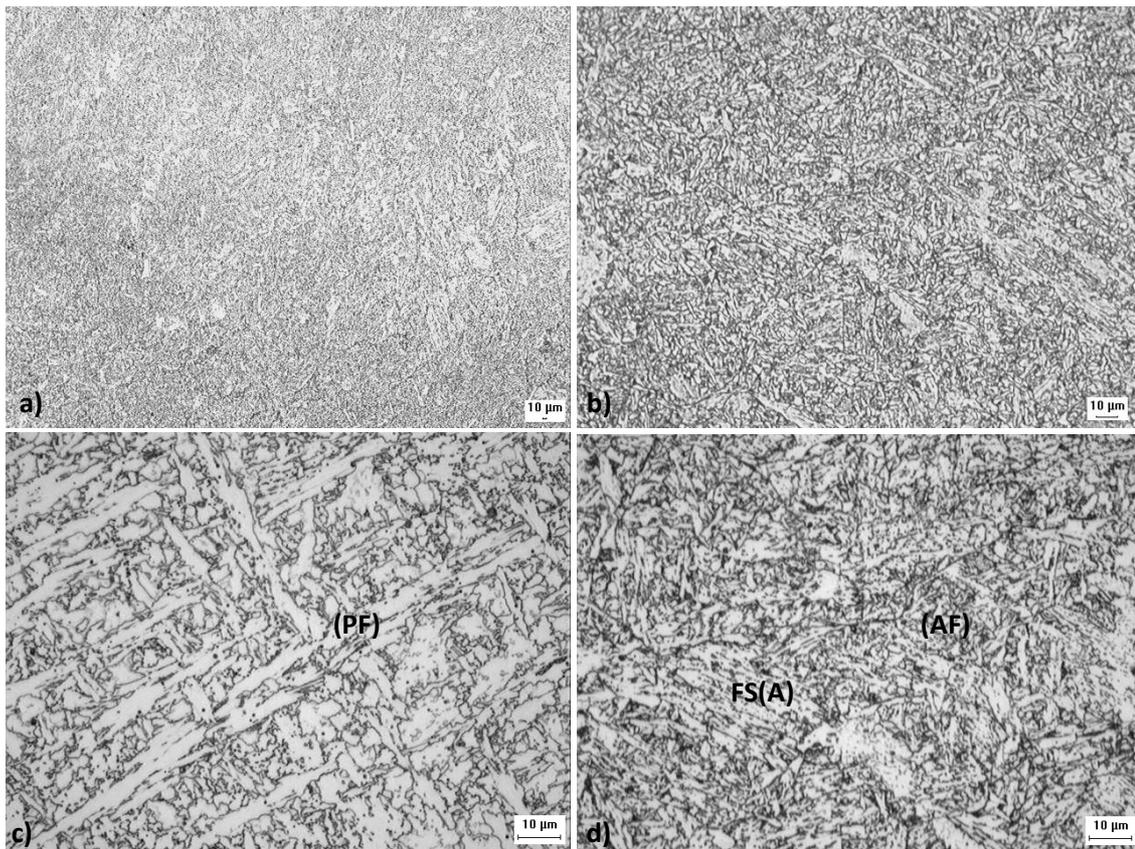


Figura 5.23 Microestrutura do Metal de Solda das Amostras. a) Aumento 100x, b) aumento 500x e c) e d) aumento de 1000x todas realizadas por (MO).

As microestruturas das ZAC's das amostras apresentaram uma estrutura semelhante entre elas, com a predominância da fase de agregados ferrita/carbonetos (FC) mostrada nas Figura 5.24 a) e b). Pode ser observada também nestas microestruturas a existência de bandas claras e escuras que surgem na direção de laminação destes materiais. De acordo com Silva e colaboradores, as bandas claras são regiões ricas em cromo e molibdênio e devido a afinidade desses elementos com o carbono, acredita-se que essas regiões têm uma maior concentração de carbono também, o que deixa estas regiões, com uma maior temperabilidade. Este aumento na temperabilidade foi verificada pelo ensaio de microdureza do material mostrado na Figura 5.22, sendo a região clara mais dura que a região escura, como mostram os valores de microdureza na Tabela 5.8

Tabela 5.8 Valores de microdureza das bandas claras e escuras.

	Banda Clara	Banda Escura
Microdureza (HV)	364 ± 64	315 ± 44

Foi observado também em algumas amostras na região da ZAC-GG a presença de martensita (M) e ferrita com segunda fase alinhada FS(A) como apresentada nas Figura 5.24 c) e d).

As Figura 5.24 e) e f) mostram a interface da ZAC-IC, predominantemente composta por agregados de ferrita e carbonetos (FC), e do metal base

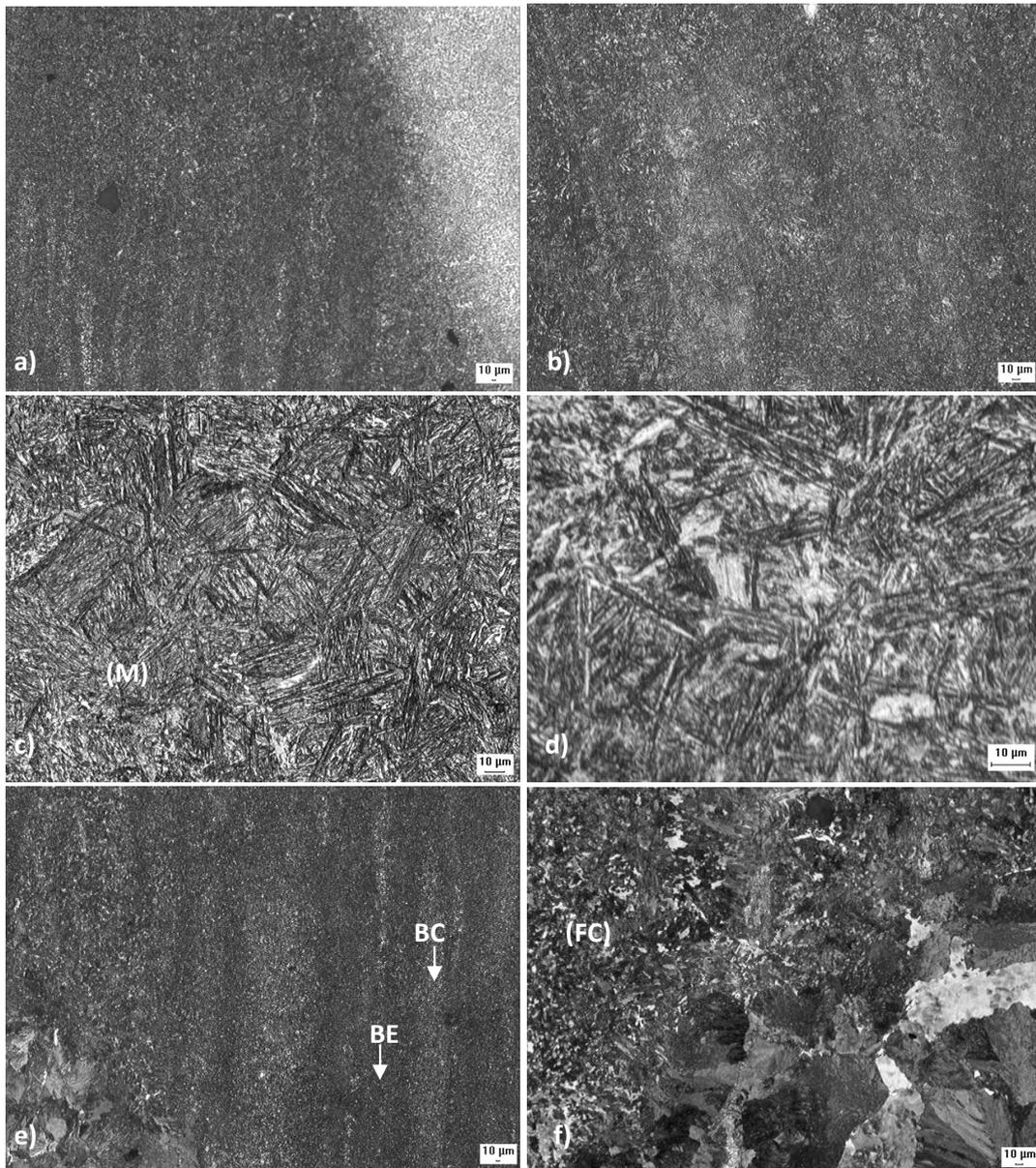


Figura 5.24 Microestrutura das ZAC's das Amostras. a) e b) Regiões adjacente ao metal de solda, c) e d) Martensita identificada próxima ao MS e e) e f) Regiões adjacentes ao metal base.

5.2.3 2º Passo – Caracterização das Amostras Após Remoção de Material.

Quando realizados os ataques para revelar a macroestrutura das amostras desta etapa, foi notada a existência de “dois tipos de ZAC’s”, uma semelhante à encontrada no processo de soldagem do 1º passo deste estudo (1º Passo – Caracterização das Amostras Após as Soldagens) e outra ZAC, de extensão menor e de aspecto mais escuro, encontrada esporadicamente nas amostras processadas a arco voltaico, tanto com eletrodo de grafite quanto com a arco plasma, não sendo observada na amostra esmerilhada. Assim decidimos realizar dois perfis de microdureza contemplando essas regiões.

Na Figura 5.25 estão apresentadas as amostras e as regiões onde foram levantadas os perfis de microdurezas, um contemplando a região de ZAC clara e outra na região de ZAC escura.

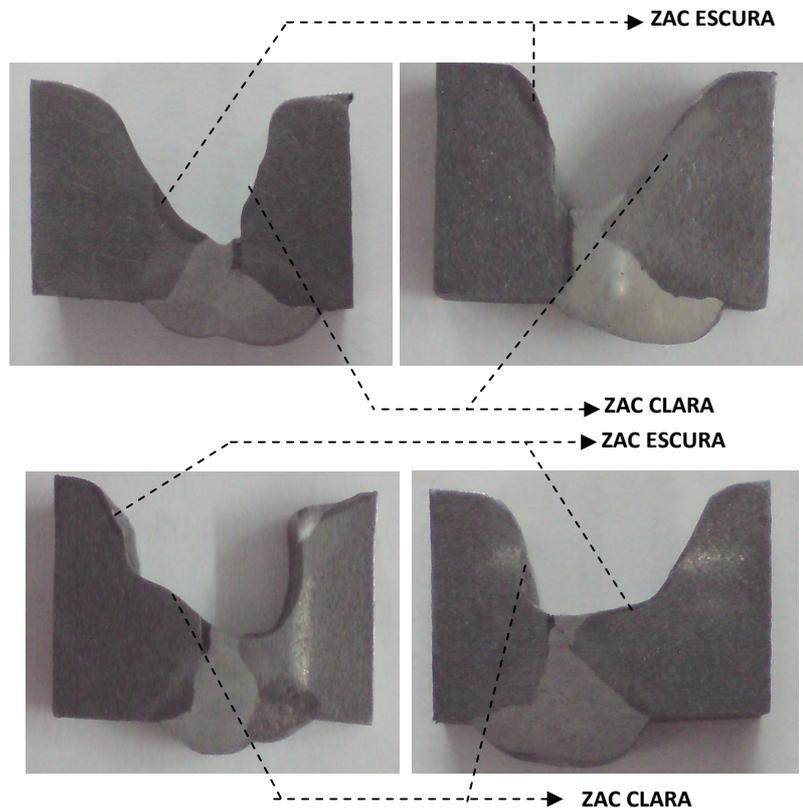


Figura 5.25 Amostras onde foram realizadas as microdurezas. a) plasma com 70 A, b) plasma com 100 A, c) grafite com Ø5 mm, d) grafite com Ø8 mm.

A Figura 5.26 mostra os perfis de microdureza levantados nas amostras removidas, partindo da extremidade da remoção percorrendo toda a ZAC até chegar ao metal base, Figura 4.14 esse perfil de microdureza foi realizado nas ZAC’s que predominam nas regiões claras das amostras removidas,

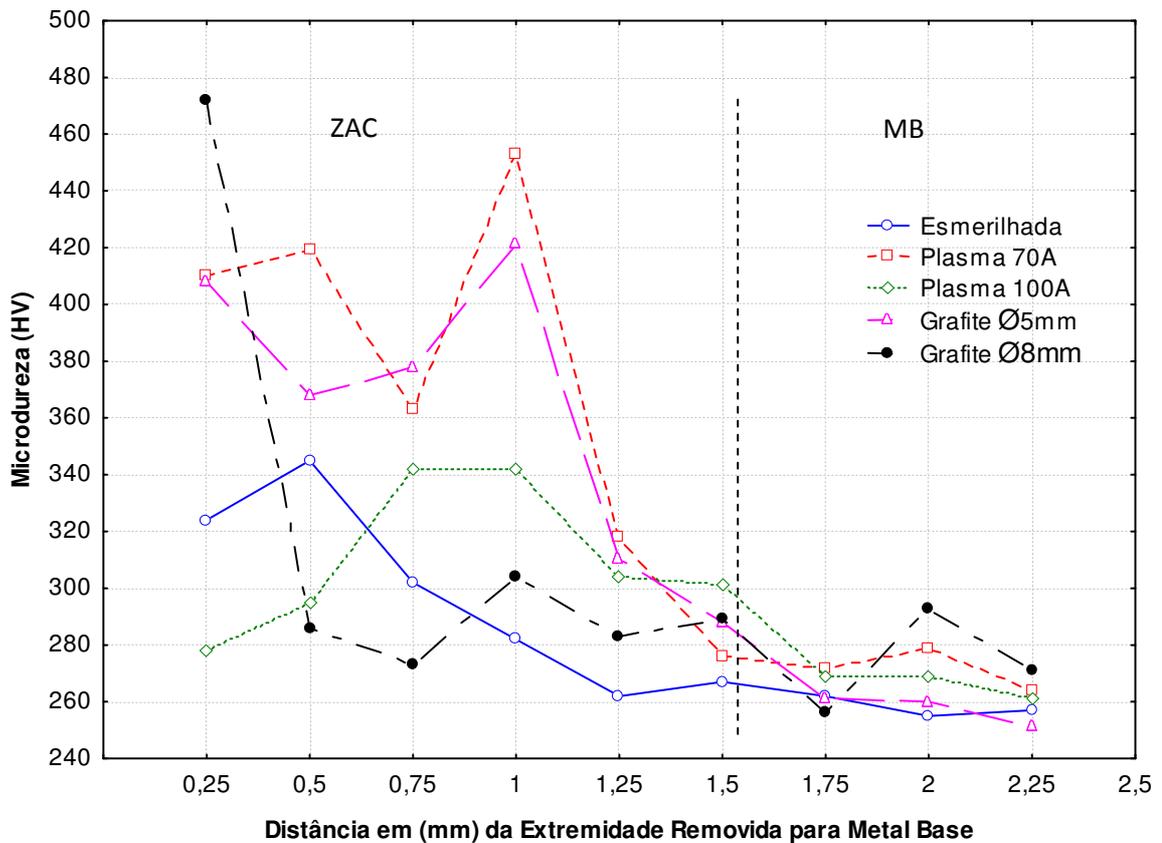


Figura 5.26 Microdureza das amostras removidas nas regiões de ZAC clara.

É possível observar na Figura 5.26 que a amostra goivada a arco plasma com corrente de 100 A apresentou valores de microdureza mais baixo do que o processo de goivagem a plasma com 70 A, ficando com os níveis de microdureza na faixa de 280 HV a 340 HV. Verifica-se que as amostras esmerilhada e goivada com eletrodo de 8 mm foram as condições que apresentaram perfis com menores valores de dureza.

A amostra goivada a arco plasma com corrente de 70 A apresentou um nível de microdureza na faixa de 360HV a 460HV. Este fato pode está relacionado com a velocidade de resfriamento do processo, que no caso da amostra processada com 70 A tem uma menor energia por unidade de comprimento, implicando numa velocidade de resfriamento maior do que a amostra processada com 100 A e, por consequência, na formação de microconstituintes do tipo martensita e uma maior fase de agregados de ferrita carbonetos FC, como podem ser observadas nas Figura 5.27 c) e d).

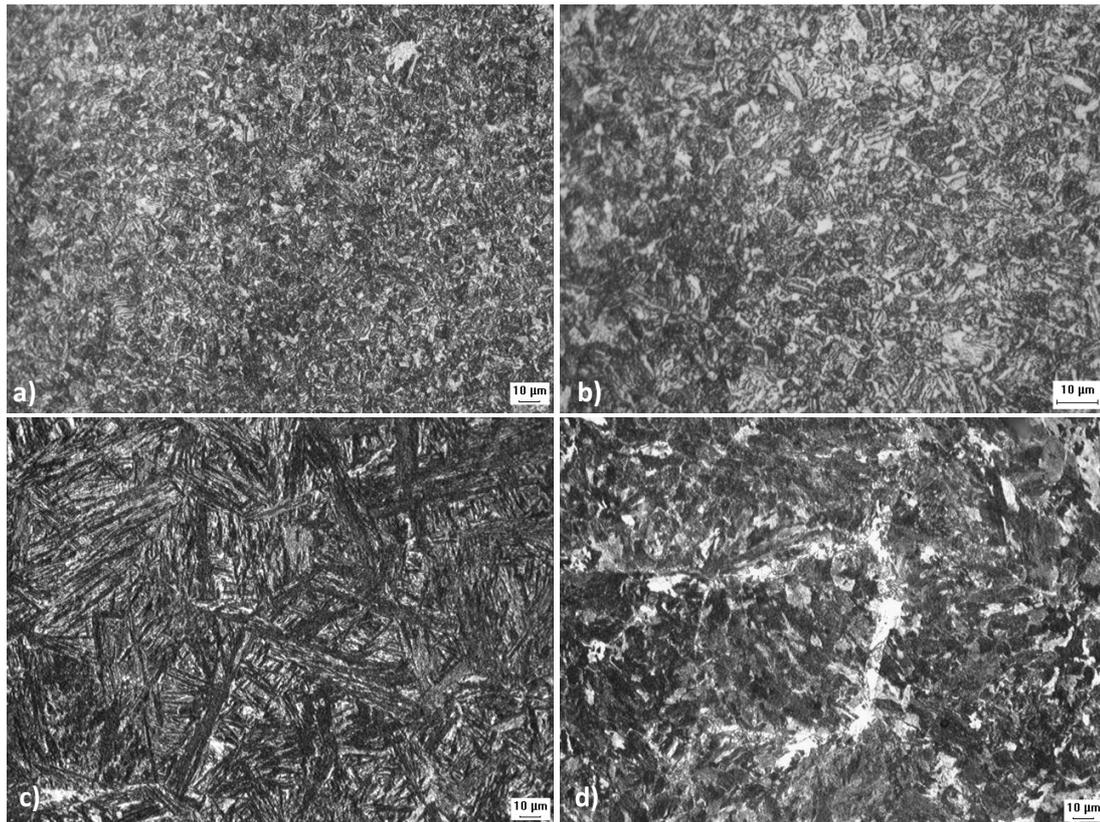


Figura 5.27 Microestrutura obtida por (MO) das amostras processadas a arco plasma com corrente de 100 A a), b) e corrente 70 A c) e d) microestruturas obtidas das regiões claras das amostras analisadas.

Da mesma forma observada nos processos a plasma, o processo com eletrodo de grafite com 5 mm de diâmetro teve níveis mais elevados de microdureza do que o eletrodo de Ø8 mm, podendo ser justificado da mesma forma, pois o processo com eletrodo de 5 mm de diâmetro tem uma menor energia por unidade de comprimento, quando comparado com o processo de goivagem utilizando o eletrodo de grafite de 8 mm de diâmetro, conseqüentemente uma maior taxa de resfriamento.

Um resultado interessante foi observado nas amostras processadas por goivagem com eletrodo de grafite, onde não foi observada uma extensão da zona termicamente afetada. Pelo contrário, a amostra processada por eletrodo de grafite com 8 mm de diâmetro apresentou apenas um valor na extremidade da remoção cujo o nível era elevado e as demais impressões tiveram níveis inferiores aos da ZAC das demais amostras. Essa pequena região mais dura observada nesta amostra teve o comprimento de 0,28 mm o que pode estar relacionado com uma possível contaminação por carbono devido ao eletrodo.

Para melhor discutir esse assunto, foi estimado através das equações de difusão em regime transiente o comprimento da camada contaminada por carbono, devido a um

possível curto-circuito do eletrodo na peça. Foram estabelecidas algumas condições de contorno para realização desses cálculos, que foram: tempo médio em que o eletrodo permanece em curto ($t = 0,5$ s) e temperatura do eletrodo, considerada igual à temperatura de fusão do carbono de 3800 K. Esses valores foram escolhidos utilizando um critério conservador, pois o eletrodo dificilmente chega a essas temperaturas uma vez que o eletrodo não é consumido durante o processo. Para realizar essa simulação é considerado que durante o curto a extremidade de curto apresenta concentração instantânea igual a concentração do eletrodo e através dos cálculos é determinado a distância 'x' até onde a concentração torna-se igual a concentração do material base.

Dados:

$$\begin{array}{ll}
 C_x \cong C_o = 0,4\% & \text{❖ } C_o \text{ e } C_x \text{ - correspondem à concentração inicial e concentração em um} \\
 & \text{ dado ponto, respectivamente. O valor de } 0,4 \text{ corresponde a} \\
 C_s = 99\% & \text{ concentração do material 4140} \\
 t = 0,5s & \text{❖ } C_s \text{ - corresponde à concentração da fonte, "eletrodo" de } 0,99\%
 \end{array}$$

Determinação do D:

$$\begin{array}{ll}
 Q_d = 80 \text{ KJ / mol} & T = 3800 \text{ K} \\
 R = 8,31 \text{ J / mol.k} & D_o = 6,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}
 \end{array}$$

$$\text{1ª Equação} \quad D = D_o \cdot \exp\left(-\frac{Q_d}{R.T}\right) \quad D = 4,92 \times 10^{-8}$$

$$\text{2ª Equação} \quad \frac{C_x - C_o}{C_s - C_o} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D.t}}\right)$$

$$0 = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D.t}}\right) \quad \therefore \quad \operatorname{erf}(z) = 1 \Rightarrow z = 2,8$$

$$\frac{x}{2\sqrt{D.t}} = 2,8 \Rightarrow x = 5,6\sqrt{0,5 \cdot 4,92 \cdot 10^{-8}} \quad x = 0,8783 \text{ mm}$$

Como a camada dura medida foi de 0,28 mm e a estimada foi de 0,88 mm aproximadamente, seria plausível que essa região possivelmente foi contaminada por carbono, já que o comprimento medido é inferior ao estimado e que o passe de acabamento

com a esmerilhadeira não foi suficiente para remover toda a camada, possivelmente contaminada por carbono.

Nas Figura 5.28 a) e b) estão apresentadas as microestruturas da amostra processada com eletrodo de grafite de 8 mm de diâmetro que teve uma microestrutura semelhante às amostras soldadas. Verifica-se a presença de pequenas quantidades de martensita (M) em uma matriz predominantemente de agregado de ferrita/carbonetos (FC). As microestruturas da amostra processada com eletrodo de grafite com 5 mm estão apresentada nas Figura 5.28 c) e d). Nota-se a presença de uma estrutura mais complexa com grão de ferrita com segunda fase alinhada, FS (A) e martensita (M) em uma estrutura de agregados de ferrita/carbonetos (FC).

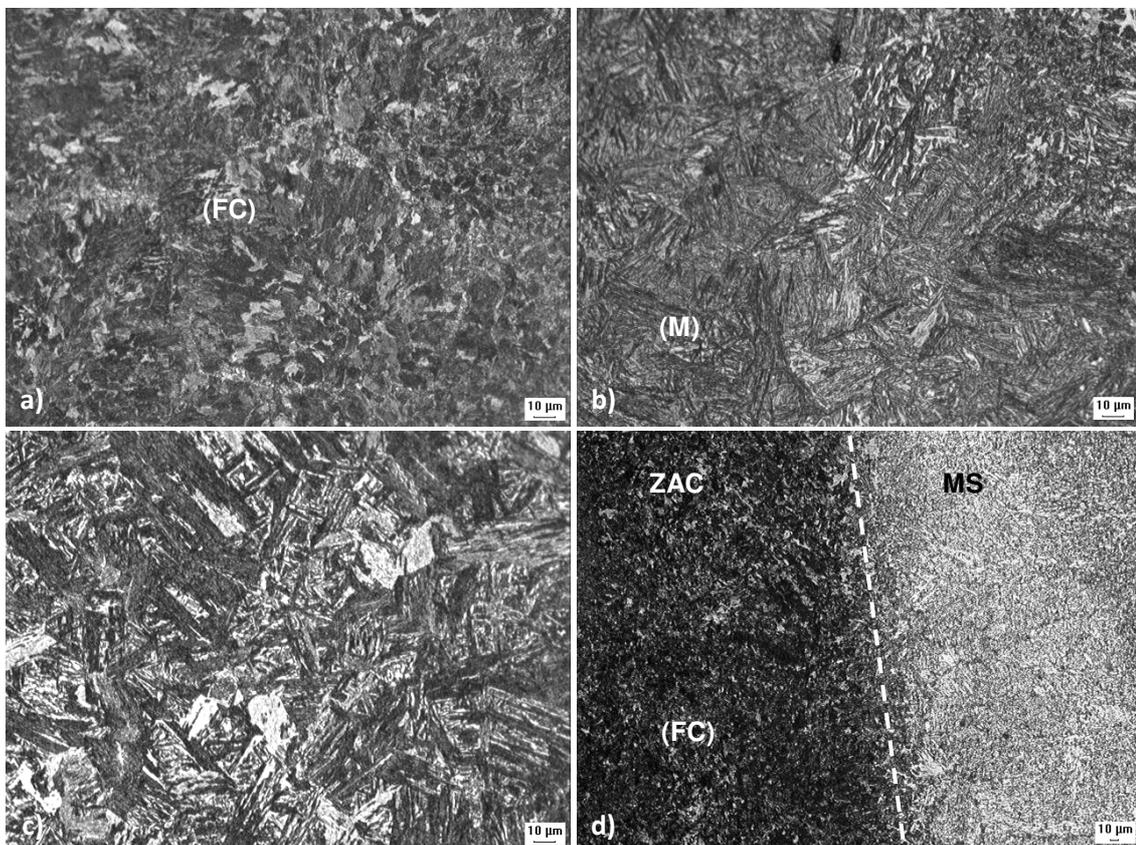


Figura 5.28 Microestrutura obtida nas amostras processadas com eletrodo de grafite com $\varnothing 8$ mm micrografia a) e b) e eletrodo $\varnothing 5$ mm nas micrografias c) e d) microestruturas obtidas das regiões claras das amostras analisadas.

As microestruturas apresentadas das amostras goivadas com eletrodo de grafite de 5 mm ou 8 mm de diâmetro não apresentaram evidências de uma possível contaminação por carbono, uma vez que as microestruturas apresentadas nas Figura 5.28 a), b), c) e d) não

apresentaram indícios que comprovassem este fato. O elevado nível de microdureza pode ser explicado devido a a formação de martensita como mostra a Figura 5.28

A amostra esmerilhada apresentou um perfil de microdureza semelhante ao obtido nas amostras soldadas no 1º passo deste estudo, ver Figura 5.26, porém com comprimento menor que nas outras amostras goivadas. Este fato deveu-se provavelmente à remoção de boa parte das ZAC's oriundas do enchimento das juntas durante o esmerilhamento, que por não ter a presença de arco voltaico em sua remoção, o processo tem a tendência de reduzir até mesmo eliminar a ZAC.

A microestrutura da amostra esmerilhada está mostrada na Figura 5.29. Pode-se notar a semelhança com a microestrutura apresentada nas amostras soldadas 1º passo deste estudo, com a predominância de agregado de ferrita/carbonetos FC e uma granulação fina já que a região da ZAC-GG foi removida nesta região da amostra.

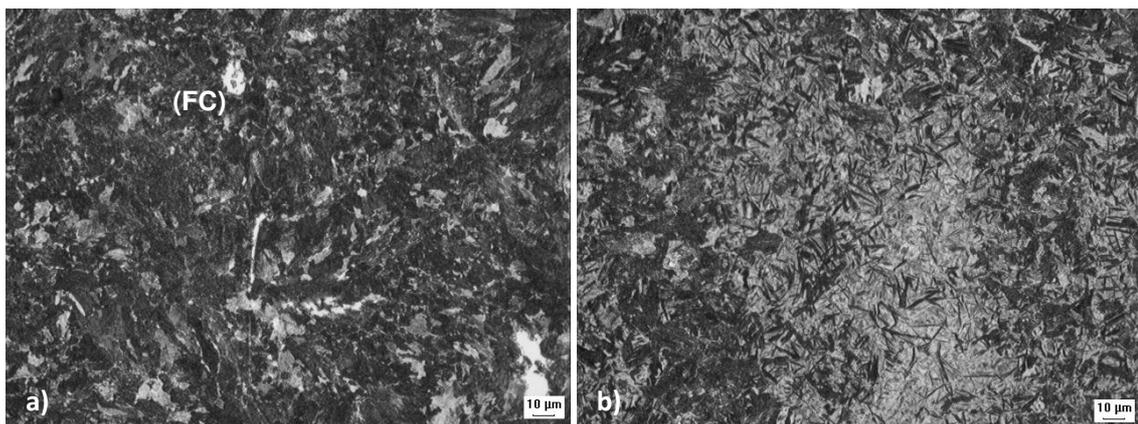


Figura 5.29 Microestrutura obtida da amostra processada por esmerilhamento.

A Figura 5.30 mostra o 2º perfil de microdureza obtido nas regiões escuras das amostras esmerilhada e goivadas.

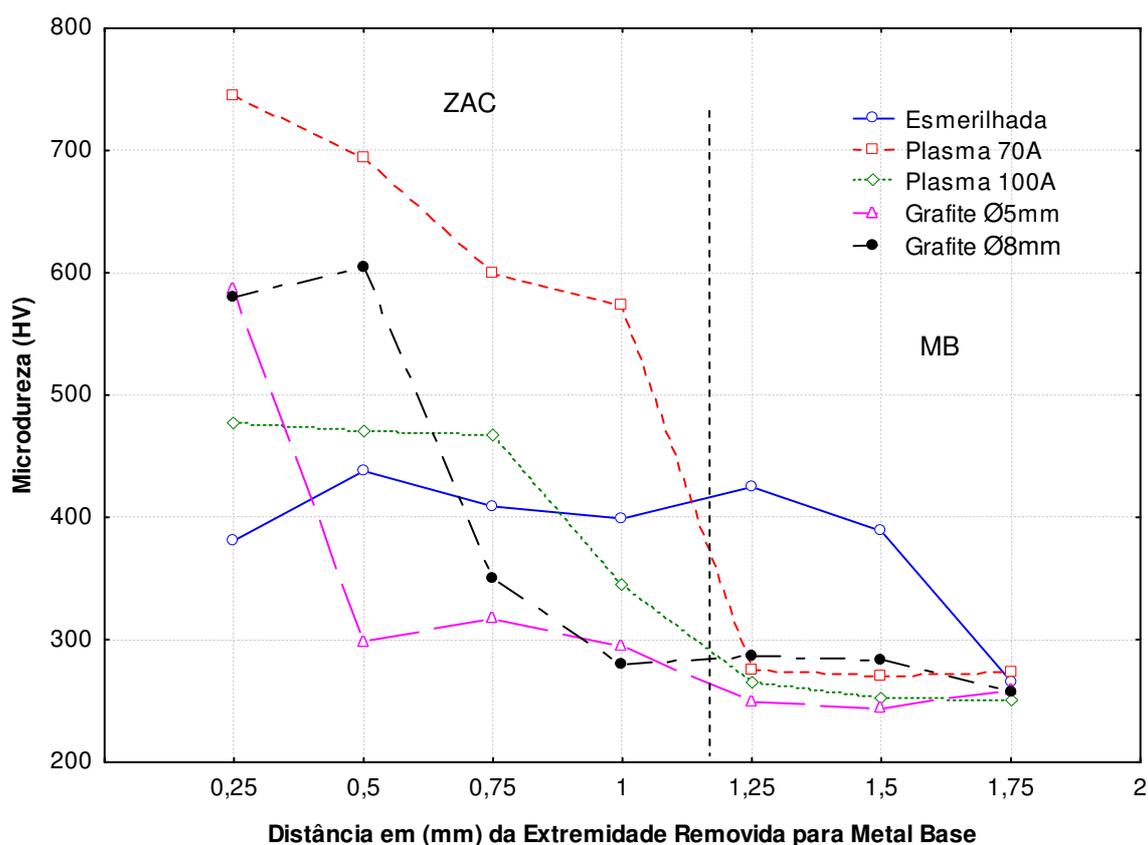


Figura 5.30 Microdureza das amostras removidas nas regiões de ZAC escura.

O processo a arco plasma com corrente de 70 A foi a condição que apresentou a maior microdureza dentre os processos estudados, chegando a níveis de 750 HV de microdureza. Este nível de microdureza é pode ser resultado de uma série de fatores.

O primeiro fator importante para esse resultado está relacionado com a geometria da tocha (ângulo de ataque da tocha), que para essa remoção foi utilizado ângulos elevados, em torno de 50° a 55° , o que direciona o calor do arco direto para a raiz da junta, como pode ser verificado na Figura 5.25 a), fazendo com que o gradiente de temperatura nessa região seja maior, resultando em resfriamento também mais rápido.

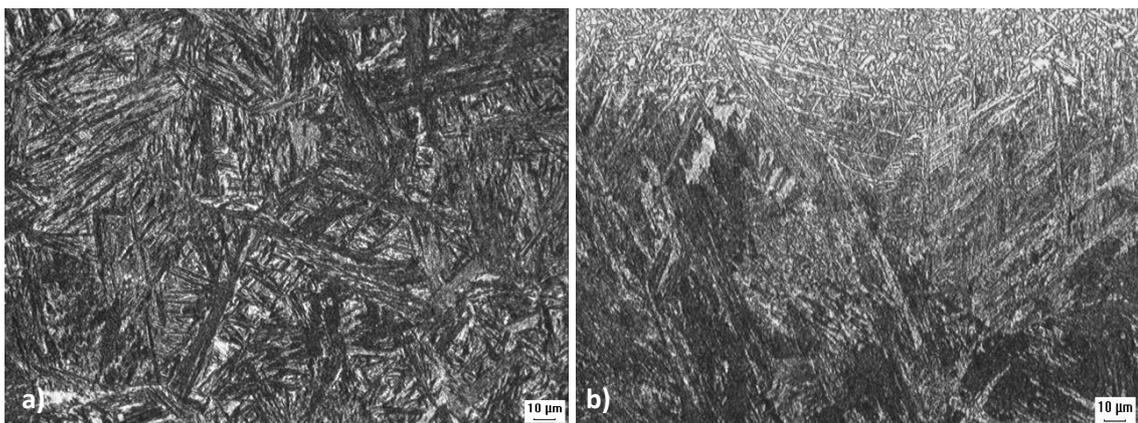
Outro fator importante, que já foi até mencionado, é que se trata do processo de maior taxa de resfriamento, pois se tem a menor energia dentre os processos a arco explorado, devido à corrente ser a menor e as velocidades empregadas serem semelhantes entre os processos. Também devido à própria característica física do processo plasma, que tem uma alta densidade de energia, colaborando para que haja um resfriamento brusco, provocando uma transformação adifusional prevalecendo à formação de martensita (M), principalmente nas bandas claras, como pode ser visto nas Figura 5.31 a) e b) obtidas em (MO). A Figura 5.32 a) e b) mostra as micrografias obtidas nestas regiões pelo (MEV), pode-

se verificar a existência de ferrita de segunda fase alinhada FS(A) na forma de bainita inferior na matriz martensítica.

O processo a arco plasma com 100 A apresentado na Figura 5.30, apresentou nos primeiros pontos, próximo à superfície, o menor perfil de microdureza dentre os processos a arco e ficando com níveis parecidos ao obtido no processo de esmerilhamento, esse efeito é justificado também pelo ângulo da tocha que foi de 30° a 35° direcionando o calor do arco para a região da frente de fusão. A microestrutura desta amostra esta apresentada nas Figura 5.31 c) e d) onde apresentou uma estrutura de grão grosseiros de martensita (M) e as fases ferrita de segunda fase alinhada FS(A) e agregados de ferrita/carbonetos. (FC). A Figura 5.32 c) e d) mostram as micrografias obtidas nesta amostra pelo (MEV), destacado as bandas existentes no material.

Uma possível otimização do processo poderia ser alcançada utilizando uma corrente de 70 A, com um ângulo mais agudo de aproximadamente 30° o que provavelmente diminuiria o volume de material removido e a ZAC dessa condição provavelmente não seria tão crítica, quanto à apresentada neste estudo, podendo ser uma favorável condição para aplicações em reparos de estruturas de paredes finas fabricadas com materiais temperáveis.

Contudo, a melhor análise para tomada de decisão e comparação entre os processos é obtida através das análises finais das amostras após as soldagens, pois como essas camadas endurecidas são pequenas, a energia do processo de soldagem para o enchimento das juntas pode ser capaz de recuperar essas regiões.



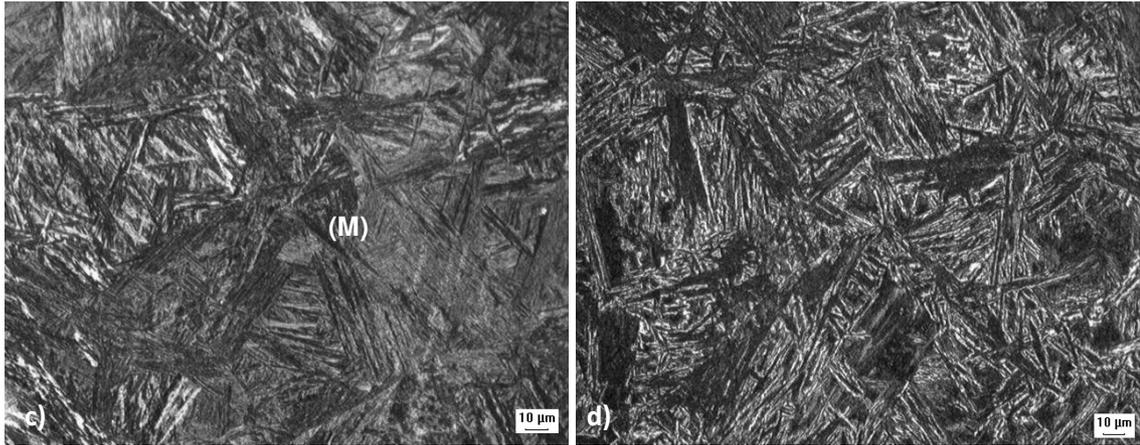


Figura 5.31 Microestrutura obtida pelo (MO) das amostras processadas a plasma com 70A micrografia a), b) e plasma com 100A micrografias c) e d).

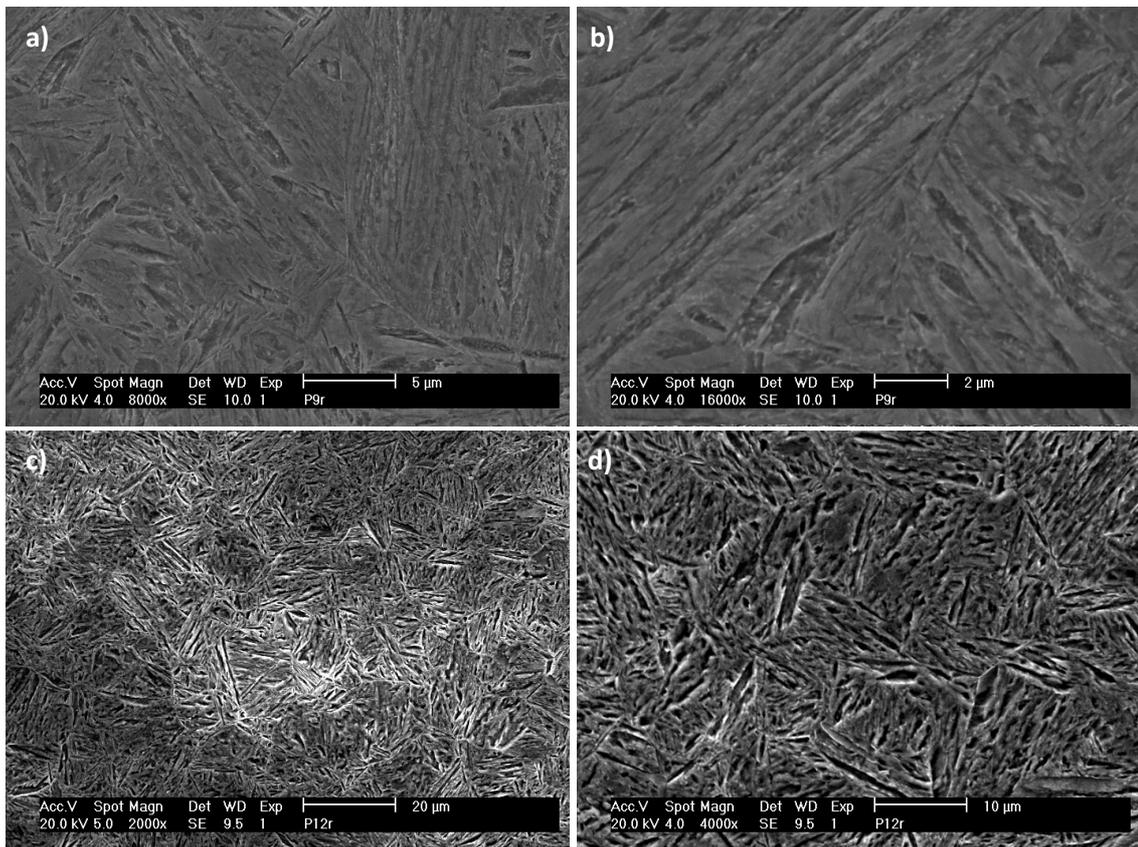


Figura 5.32 Microestrutura obtidas pelo (MEV) das amostras processadas a plasma com 70A micrografia a), b) e plasma com 100A micrografias c) e d).

Os processos de goivagem com eletrodo de grafite de Ø5 mm e Ø8 mm apresentaram níveis de microdureza semelhantes, com picos da ordem de 600 HV, apenas para o ponto mais próximo à superfície do chanfro.

Também foi observado que não houve uma expansão da ZAC nestas amostras, devido ao esmerilhamento. O que deixa todas as condições com essa característica semelhante.

As Figura 5.33 a) e b) mostram as microestruturas encontradas na amostra processada com eletrodo de 5 mm e as Figura 5.33 c) e d) as microestruturas encontradas na amostra processada com eletrodo de 8 mm. Ambas as amostras apresentaram micro-constituintes semelhantes, porém diferentes das demais amostras goivadas com plasma e esmerilhadas, pois foi observada uma grande quantidade de martensita revenida. Este micro-constituente formou-se devido à energia do processo ser elevada o que diminui a taxa de resfriamento, fazendo com que o carbono presente nessas estruturas se agreguem deixando as agulhas de cementita mais escuras em uma matriz de ferrita mais clara.

Essas estruturas são benéficas ao material, pois aumentam a resistência do material mantendo uma boa tenacidade e ductilidade ao material.

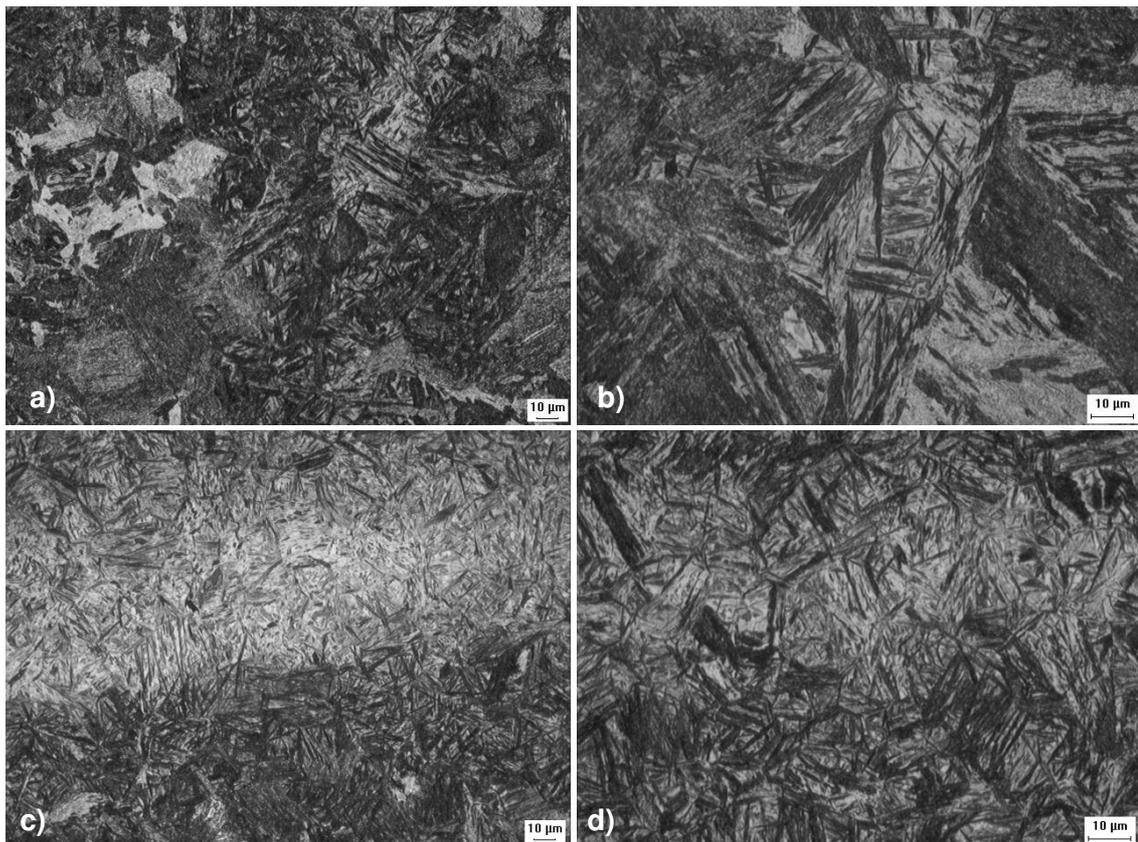


Figura 5.33 Microestrutura obtida nas amostras processadas com eletrodo de grafite de Ø5mm micrografia a), b) e grafite de Ø8mm micrografias c) e d).

A amostra esmerilhada apresentou novamente um comportamento semelhante ao apresentado nas amostras soldadas no 1º passo deste estudo, assim não foram observadas alterações na microdureza ou na microestrutura devido ao processo de esmerilhamento, nem regiões encruadas, devido à uma possível deformação superficial causada pela operação.

A Figura 5.34 mostra a microestrutura nas regiões adjacentes ao local onde foram feitas as medidas de microdureza e a extremidade da remoção. Podem ser observadas também as bandas claras e escuras na direção de laminação.

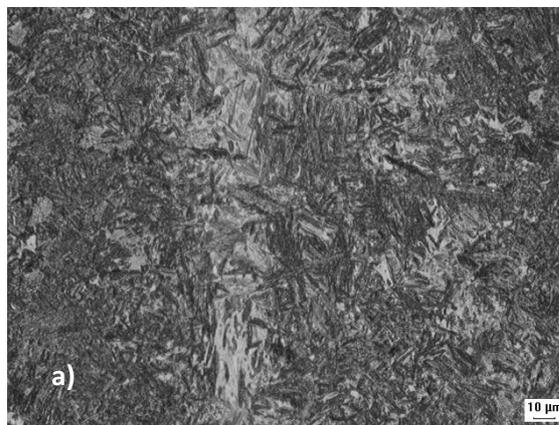
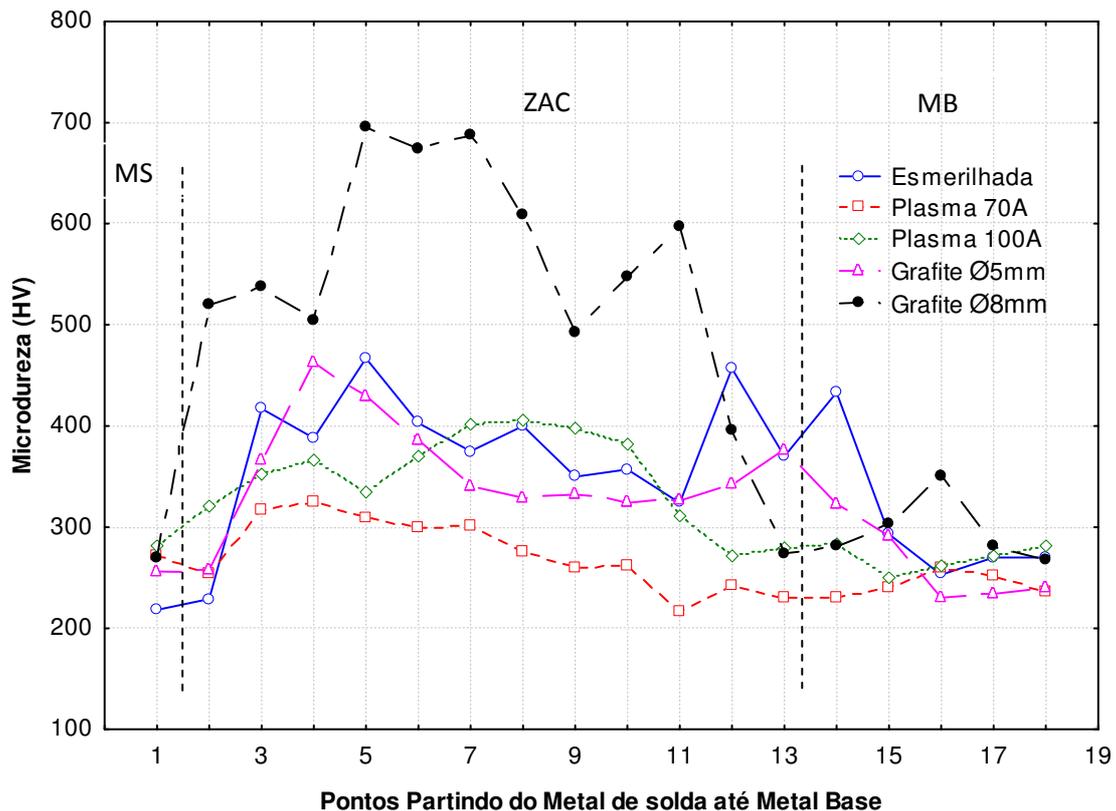


Figura 5.34 Microestrutura obtida da amostra processada por esmerilhamento

5.2.4 3º Passo – Caracterização Após a Soldagem Final da Junta

Estão mostrados na Figura 5.35 os perfis de microdureza obtidos nas amostras após a realização da última soldagem. As medidas iniciam-se no metal de solda, percorrem toda a ZAC até estabilizar no metal base.



“O levantamento do perfil de microdureza ocorreu após a realização das soldagens de enchimento das juntas, porém a identificação das amostras na figura se deu pelo processo de remoção a qual cada amostra foi submetida.”

Figura 5.35 Perfil de microdureza das amostras após a soldagem final.

Pode-se verificar na Figura 5.35 que o processo de maior microdureza na ZAC foi o processo de goivagem com eletrodo de grafite de 8 mm, chegando a picos de 700 HV, que são valores altos de microdureza para determinadas aplicações, sendo crítico quando esta estrutura estiver sujeito a ambientes corrosivos e/ou sob-tensão.

Notou-se que houve um aumento considerável da microdureza desta amostra quando comparada com a análise feita na mesma amostra após a realização da goivagem no 2º Passo desta etapa do trabalho (Caracterização das Amostras Após Remoção de Material). Este resultado é interessante pois as demais condições mantiveram os níveis de microdureza inferior ou iguais aos verificados nas amostras após as remoções de material.

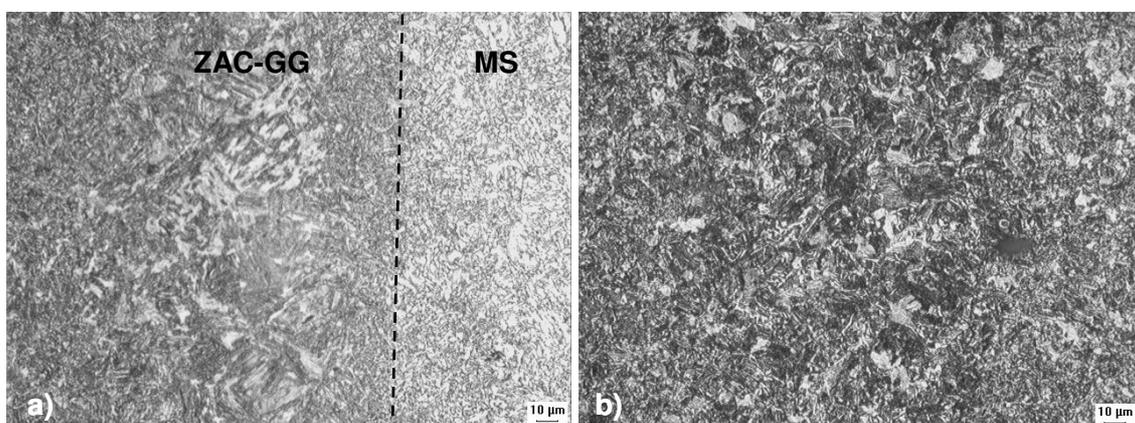
O perfil de microdureza após a soldagem da amostra que foi esmerilhada apresentou níveis um pouco superior na região da ZAC do que o perfil apresentado na soldagem do 1º passo desta etapa (Caracterização das Amostras Após as Soldagens). A microdureza da ZAC desta amostra ficou na faixa de 400 HV, contudo as demais amostras processadas a arco voltaico tiveram os mesmos níveis de microdureza, ou inferiores como, por exemplo, o processo de goivagem a plasma com corrente de 70 A, cujo maior valor de microdureza foi de 327 HV.

Foi feita uma varredura no microscópio ótico por toda a ZAC das amostras e foi constatada uma homogeneidade da zona termicamente afetada, sendo eliminada as regiões mais escuras percebidas nas amostras após as goivagens. Por se tratarem de regiões de dimensões reduzidas, talvez a a energia imposta durante o processo de soldagem final tenha sido capaz de recuperar completamente esta microestrutura.

Nos parágrafos seguintes faz-se a caracterização microestrutural desta etapa, iniciando pela amostra esmerilhada para possibilitar uma comparação com as amostras removidas a arco.

A Figura 5.36 a) apresenta a microestrutura da ZAC-GG, pode-se observar uma estrutura de granulação grosseira de fase Ferrita pró-eutetoide. Já na Figura 5.36 b) está apresentada a microestrutura da ZAC-GF, predominando a fase FC com alguns grãos de ferrita dispersos.

Na Figura 5.36 c) está apresentada a microestrutura da ZAC-GF, onde foram realizadas as impressões de microdureza, sendo constituída de agregado de ferrita e carbonetos. Pode-se observar a presença das bandas claras nesta microestrutura, porém a microdureza medida nesta região não foi elevada. Não foi observada a formação de martensita nesta amostra.



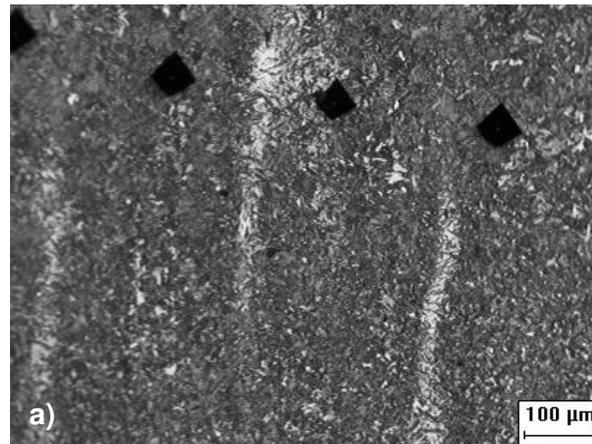
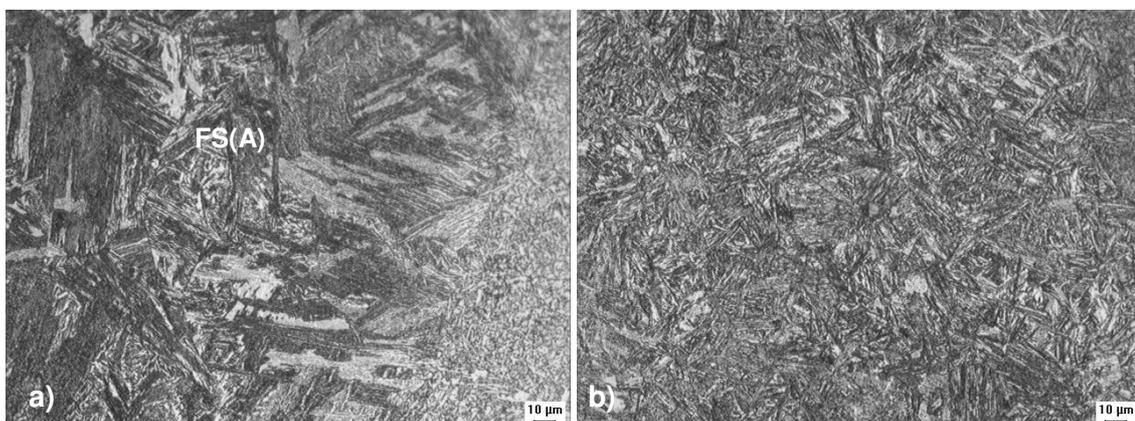


Figura 5.36 Microestrutura das amostras esmerilhada, a) região da ZAC-GG, b) região da ZAC-GF, c) microestrutura da região onde foram realizadas as impressões de microdureza.

A microestrutura das amostras processadas a arco plasma com 70 A e 100 A de corrente estão mostradas na Figura 5.37. Observa-se na Figura 5.37 a) a microestrutura da ZAC-GG da amostra goivada a plasma com 70 A. Observa-se uma estrutura de grãos grosseiros de ferrita, o que justifica os baixos valores de microdureza apresentados na Figura 5.35 desta amostra. A microestrutura da ZAC-GF, apresentada na Figura 5.37 b) da amostra após a soldagem final apresentou as mesmas fases na ZAC-GF da amostra soldada no passo 1 desta etapa (Caracterização das Amostras Após as Soldagens), porém com uma granulação mais refinada.

A microestrutura da ZAC-GG da amostra goivada pelo processo plasma com 100 A está mostrada na Figura 5.37 d) e a microestrutura da ZAC-GF, está mostrada na Figura 5.37 e). Pode-se observar uma estrutura de grãos grosseiros tanto na ZAC-GG quanto na ZAC-GF e, comparando com a microestrutura da amostra processada com 70 A, é observado uma menor quantidade de ferrita na estrutura, o que justifica o aumento do nível de microdureza observado nesta amostra.



Continuação Figura 5.34 pagina 97.

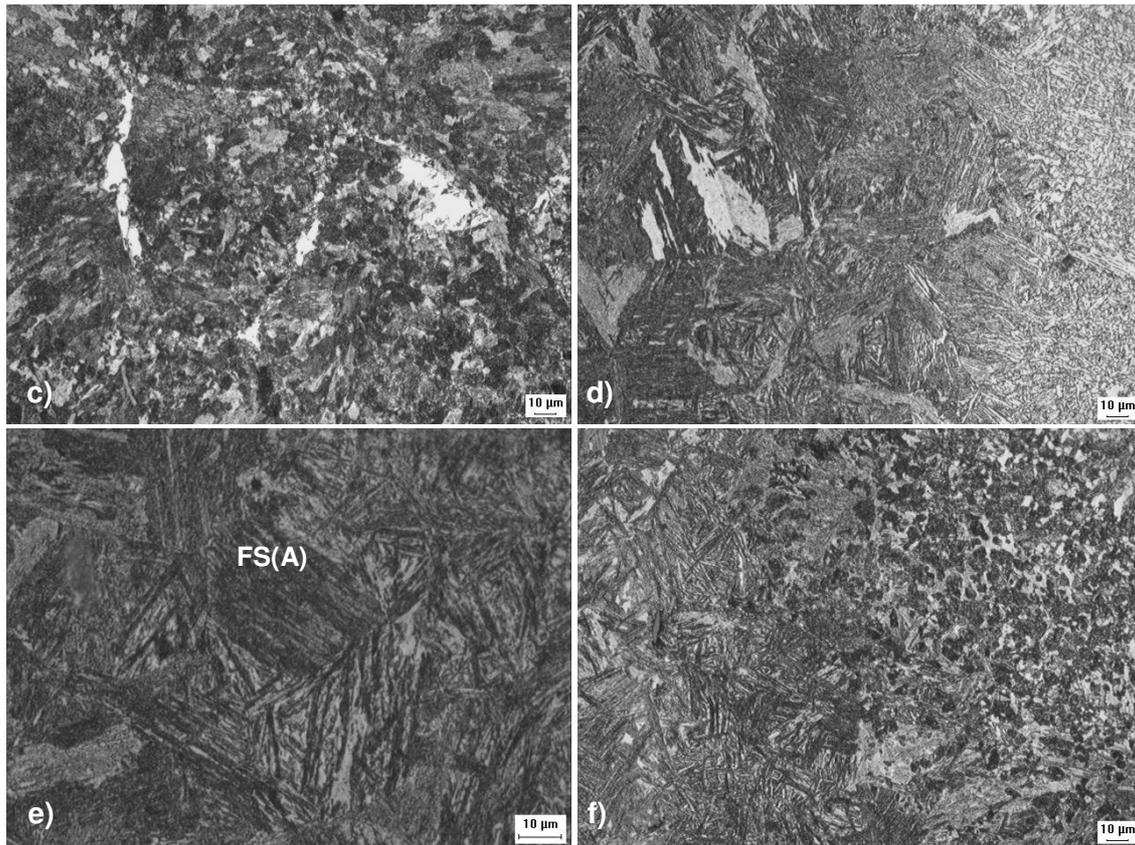


Figura 5.37 Microestrutura da amostra goivada a arco plasma com 70 A; a) região da ZAC – GG, b) região da ZAC – GF e c) região da ZAC - Inter-crítica. A microestrutura da amostra goivada a plasma com 100 A está mostrada no item; d) região da ZAC – GG, e) região da ZAC – GF e f) transição da ZAC – GF com ZAC - Inter-crítica.

Está apresentada na Figura 5.38 a microestrutura final da amostra goivada por eletrodo de grafite de 5 mm de diâmetro. Nas Figura 5.38 a) e b) estão apresentadas a interface do metal de solda com a ZAC-GG. Pode-se observar uma estrutura de grãos grandes de ferrita de segunda fase alinhada FS (A) em maior quantidade, e ferrita pró-eutetoide, observada nos contornos de grão da austenita prévia. A Figura 5.38 c) mostra a região da ZAC–GF, onde se percebe que houve um pequeno refino do tamanho de grão.

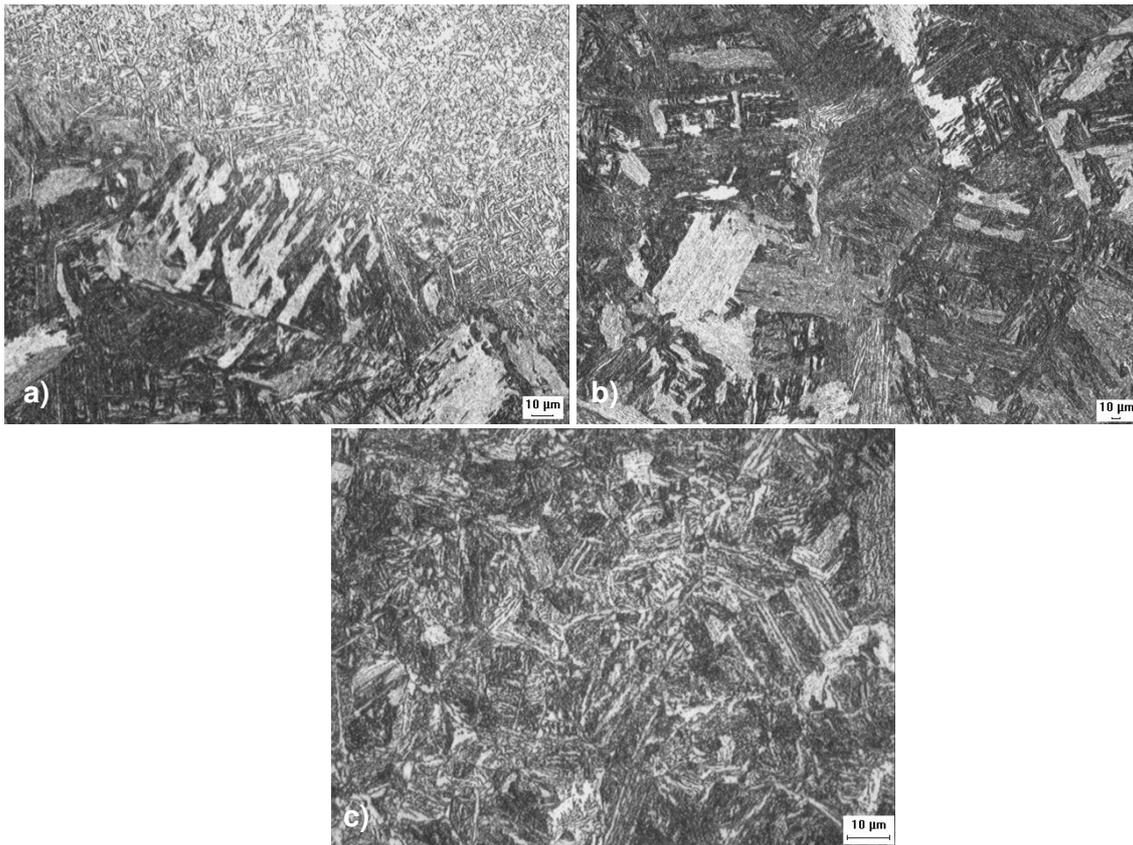


Figura 5.38 Apresenta a microestrutura da ZAC da amostra goivada com eletrodo de grafite de 5 mm, nos itens a) e b) região da ZAC – GG e c) região da ZAC – GF.

A amostra goivada com eletrodo de grafite com 8 mm de diâmetro foi a condição que apresentou a maior alteração microestrutural dentre os processos e condições exploradas neste estudo. As Figura 5.39 a) e b) apresentam as regiões onde foram realizadas as impressões de microdureza. Pode-se perceber que as regiões onde foram obtidas as maiores microdurezas apresentadas na Figura 5.35, com valores em torno de 700 HV, para essa amostra foram obtidas nas regiões de bandas claras, correspondendo a uma placa de martensita rica em cromo e molibdênio. Segundo Victor 2008, essas camadas podem ser prejudiciais devido à heterogeneidade da microestrutura comprometendo a tenacidade do material.

A microestrutura dessa amostra obtida pelo (MEV) está apresentada na Figura 5.40 contemplando a região da ZAC-GG. Pode-se verificar a presença de placas de martensita (M) nas regiões de bandas claras observadas no (MO), como mostra a Figura 5.39. Nas regiões de bandas escuras foi observada a formação de algumas placas de martensita (M) intercaladas com grãos de ferrita de segunda fase alinhada FS(A), na forma de bainita inferior como observado na Figura 5.40 c) e d).

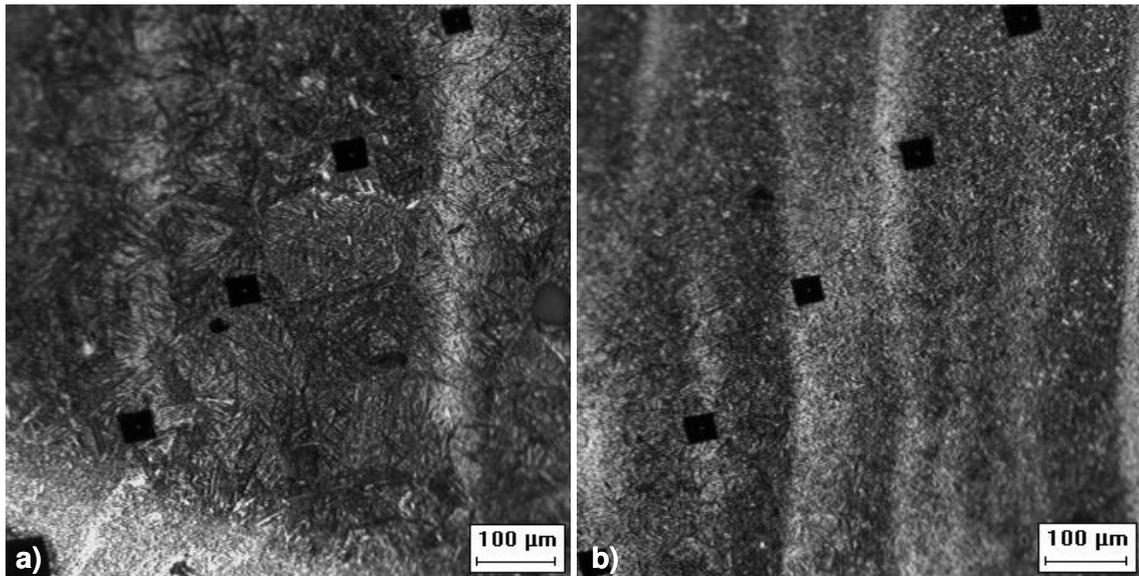


Figura 5.39 Microestrutura da ZAC da amostra processada com o eletrodo de grafite de Ø8 mm obtida por Microscopia Ótica (MO) está mostrada nos itens: a) e b).

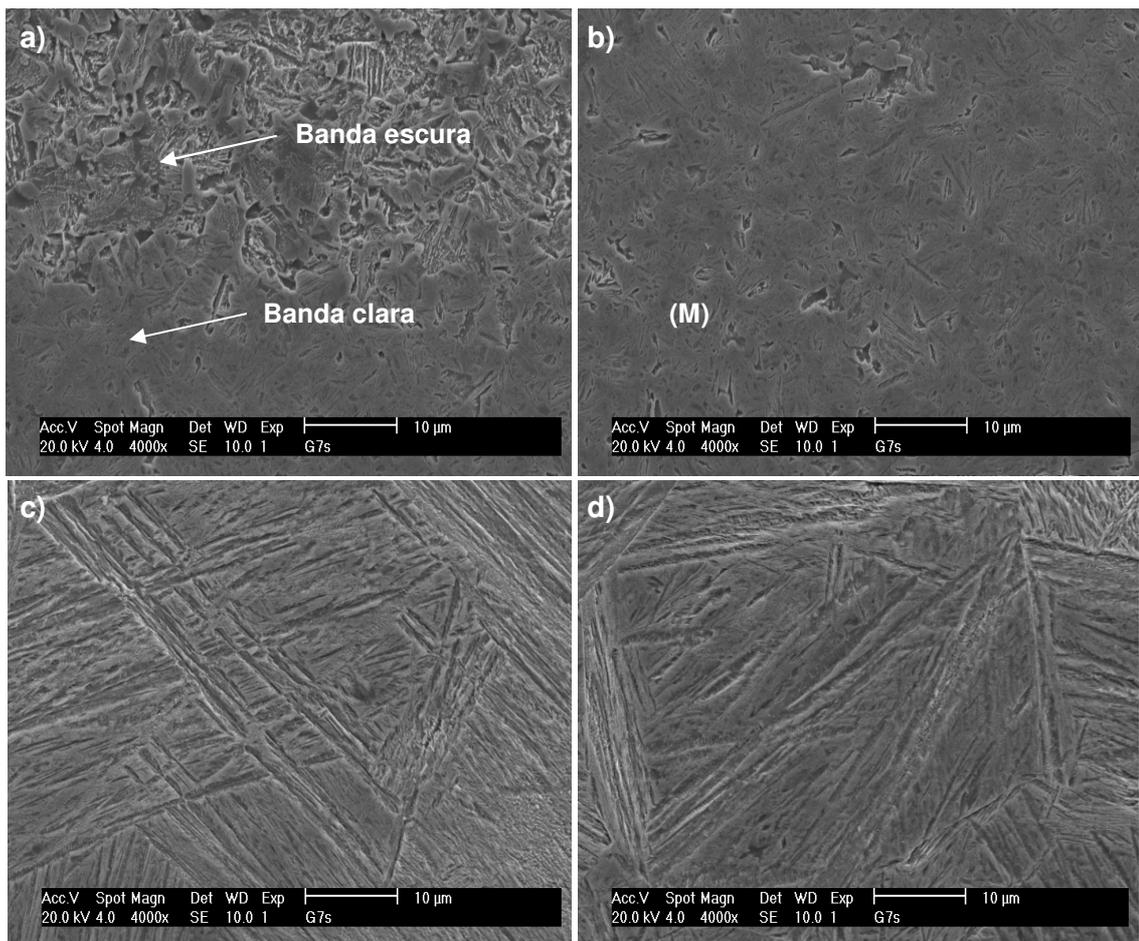


Figura 5.40 Microestrutura da ZAC da amostra processada com o eletrodo de grafite de Ø8 mm obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) está mostrada nos itens a), b), c) e d).

CAPÍTULO VI

6 Considerações Finais

Os processos de goivagem a arco voltaico tanto com eletrodo de grafite quanto a arco plasma têm como vantagem em relação ao processo de esmerilhamento a velocidade de operação, além de exigirem menos esforços do operador.

Com relação à contaminação por carbono do metal base, devido ao processo de goivagem com eletrodo de grafite, não foram observadas evidências de tal contaminação, podendo ter sido removido completamente durante o processo de esmerilhamento no passo de acabamento.

Uma vantagem encontrada no processo de goivagem a arco plasma sobre o processo de goivagem com eletrodo de grafite foi a possibilidade de se realizar pequenas remoções, que são necessárias para reparar estruturas construídas com chapas finas.

Não foi observado o encruamento do material das amostras esmerilhadas, devido à uma possível deformação plástica superficial causada pela operação. Também, não sendo observadas alterações de microdureza e microestrutura significativa oriundas do processo de esmerilhamento.

Foi verificado também nas amostras de aço AISI 4140, que não houve uma extensão da ZAC das amostras, tanto no processo plasma quanto no processo com eletrodo de grafite. Porém, foi observado a existência de pequenas regiões próximas às superfícies (regiões escuras) que foram mais afetadas termicamente devido aos processos de remoção a arco, com elevada microdureza e com uma microestrutura predominantemente composta por Martensita (M) e Ferrita de Segunda Fase Alinhada FS(A).

Uma análise das amostras, após a soldagem final (3º passo - Caracterização Após a Soldagem Final da Junta), mostra que o efeito dos ciclos térmicos tende a uniformizar as microestruturas e microdureza do material, independente do processo utilizado para a remoção de material (goivagem ou esmerilhamento). Esta afirmação é sustentada pelos perfis de microdureza próximos observados no gráfico da Figura 5.32 e pelas semelhanças nas microestruturas observadas. Exceção é feita à amostra goivada com eletrodo de 8 mm, que apresentou valores mais elevados de microdurezas, medidas em regiões com microestruturas em forma de placas de martensita ricas em cromo e molibdênio.

Em uma análise geral do trabalho, os resultados encontrados mostram que os processos de goivagem com eletrodos de carbono ou plasma podem ser uma boa alternativa em substituição ao esmerilhamento, na fabricação ou reparação de equipamentos, quando um grande volume de material necessita ser removido.

CAPÍTULO VII

7. Conclusões

Nas condições em que foram realizadas este estudo, as seguintes conclusões podem ser destacadas.

ESTUDO EXPLORATÓRIO DO PROCESSO DE GOIVAGEM COM ELETRODO DE GRAFITE

- Para o eletrodo de 8 mm de diâmetro, o melhor acabamento superficial e um alto volume de material removido foram alcançados com correntes de goivagem na faixa de valores próximos a 350 A e um ângulo de ataque de aproximadamente 55°.
- O aumento da corrente e a redução da velocidade de goivagem promovem um aumento do volume de material removido.
- Para o diâmetro de 5 mm, os valores de corrente de goivagem obtidos não superaram os 300 A, o que limitou o volume de material removido quando comparado com o volume removido pelo eletrodo de 8 mm.

ESTUDO EXPLORATÓRIO DO PROCESSO DE GOIVAGEM A ARCO PLASMA.

- No processo de goivagem a plasma, um aumento da corrente e uma redução da velocidade de goivagem proporcionam a formação de uma vala de material removida mais larga.

- Para ângulos de ataque maiores, próximos a 55° , a largura da vala pouco se altera quando a corrente de goivagem é aumentada.
- A penetração da vala de material removido tende a aumentar quando a corrente e o ângulo de ataque da tocha aumentam e a velocidade de goivagem diminui.
- Os aumentos do ângulo de ataque e da corrente de goivagem tendem a elevar o volume de material removido.
- Quando a altura do arco plasma é aumentada, ou seja, quando se afasta o bico da tocha da peça, a largura da vala tende a aumentar, a penetração e o volume de material removido a diminuir.
- Condições críticas na remoção do metal fundido foram encontradas nas amostras processadas com corrente de 100 A e ângulo na faixa de 50° a 55° deixando um grande volume de material fundido não removido da vala de goivagem.

CONCLUSÕES DA ETAPA DE CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALÚRGICAS DO PROCESSO DE MANUTENÇÃO.

- Foram detectadas ZAC's de extensão pequenas em todas as amostras, oriundas dos processos de remoção com grande alteração metalúrgica e elevados níveis de microdureza.
- Não foi observada contaminação por carbono devido ao processo de goivagem com eletrodo de grafite.
- As amostras goivadas a arco plasma, após a etapa de enchimento, apresentaram os níveis de microdureza na mesma ordem de grandeza da amostra processada por esmerilhamento.

- O processo de goivagem com o eletrodo de 8 mm de diâmetro apresentou o maior nível de microdureza dentre as amostras, chegando ao nível de 700 HV.
- A microestrutura predominante na amostra goivada com o eletrodo de 8 mm de diâmetro foi de placas de martensita com algumas agulhas de bainita inferiores nas regiões de bandas claras e nas regiões de bandas escuras grãos de martensita intercalados com grãos de ferrita de segunda fase alinhada. Sendo uma microestrutura típica para esse processo devido ao nível de microdureza medido.
- Os resultados de microdureza e de microestrutura mostraram que o processo de goivagem com eletrodo de grafite com 5 mm de diâmetro mostrou ser confiável, podendo ser utilizado em substituição ao processo de esmerilhamento em remoções que exijam grandes volumes de material.
- A goivagem com eletrodo de grafite com eletrodo de 8 mm de diâmetro requer maiores cuidados a sua utilização, pois quando utilizado em aços temperáveis ocasionou grandes alterações metalúrgicas que dependendo das condições de utilização do equipamento, podem comprometer a estrutura.

CAPÍTULO VIII

8. Sugestões para Trabalhos Futuros

Realizar análises de tensões residuais sobre juntas processadas pelos três métodos de remoção, possibilitando uma análise sobre esse aspecto, pois não foi abordado neste trabalho.

Realizar um estudo sobre os custos relativos a cada processo para auxiliar na tomada de decisão à qual processo utilizar.

CAPÍTULO IX

9. Referências Bibliográficas

K. W. MAHIN, W. WINTERS, T. M. HOLDEN, R. R. HOSBONS and S.R. MacEWEN, "Prediction and Measurement of Residual Elastic Strain Distribution in Gas Tungsten Arc Welds", *Welding Journal*, 70 (9), 1991.

J. D. KIM, C. J. KIM, C. M. CHUNG, "Repair welding of etched tubular components of nuclear power plant by Nd: YAG Laser", *Materials Processing Technology*, 2001.

A. K. BHADURI, S. K. RAI, T. P. S. GILL, S. SUJITH AND T. JAYAKUMAR, "Evaluation of Repair Welding Procedure for 2.25Cr 1Mo and 9Cr 1Mo Steel Welds", *Science and Technology of Welding and Joining*, 2001.

SAMARDŽIĆ I., SIEWERT T, "Reliability Improvements in Repair Welding of High-strength Steels", *IIW Doc IX*, 2002

C. VEIGA, A. LOUREIRO, J. PINA, A. C. BATISTA, "Efeito de sucessivos reparos por soldagem", *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*. Vol. 9, N.º 3, pp. 111-120, 2005.

BRACARENCE, ALEXANDRE Q.: *Processo de Soldagem PAW*, editado pelo autor Belo Horizonte, 2000.

MODENESI, J. P, MARQUES V. P. SANTOS B. D. "Introdução à Metalurgia da Soldagem", Cap. 6, Belo Horizonte, 2005.

THOMPSON J, "Handbook, Mold, Tool and die Repair Welding", William Andrew Inc. 1982.

LUIZ GIMENES JR, "Processos Usuais de Soldagem II", FATEC-SP, 1995.

WELDING HANDBOOK, Vol. 1, 8th ed., “American Welding Society”, Miami, FL, p, 1987.

BRACARENCE, ALEXANDRE Q.: “Processo de Soldagem PAW”, Editado pelo autor em 2000.

REIS R. P, SCOTTI A, “Fundamentos e Prática da Soldagem a Plasma”, Editora Artliber, 2007

ROBERT FERNICOLA, “Focus on Cutting”, SVETSAREN - The ESAB Welding and Cutting Journal Vol. 60 NO. 2005.

KOU, S. LEO . “Wending Metallurgy”, 1ªEd., NEW YORK: JOHN WILEY & SONS, 1987.

CHIAVERINI, VICENTE, “Aços e Ferros Fundidos”, 7ª Ed., São Paulo, 2008.

ANDRÉ L. V. COSTA E SILVA PAULO ROBERTO MEI, “Aços e Ligas Especiais”, 2ª edição revistas e ampliadas, Editora Edgard Blücher, 2006.

LUIS P. P. G. RIBEIRO, “Caracterização das Propriedades Mecânicas do Aço SAE 4140 após Diferentes Tratamentos de Têmpera e Revenido.”, Rio de Janeiro, 2006.

EVANS, G. M. BAILEY, N. “Metallurgy of Basic Weld Metal”, Cambridge, Abington Publishing, 1997.

R. KIESSLING, “Non Metallic inclusions in steel, Iron and Steel Institute”, London, 1968.

CALLISTER, Willian D., Jr: “Materials Science and Enginnering An Introduction”, 3ª Ed. Jonh Wiley & Sons, Inc. 1994.

MODENESI, J. P. “Soldabilidade dos Aços Transformáveis”, MARÇO DE 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 172/2000; Critérios de Classificação dos Aços. Rio de Janeiro, 2000. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 87/2000; “Aços Carbono e Ligados para Construção Mecânica-Designação e Composição Química”. Rio de Janeiro, 2000. 19p.

VICTOR H.C. de ALBUQUERQUE , CLEITON C. SILVA, CÍCERO R.O. MOURA C,D, WILLYS M. AGUIAR, JESUALDO P. FARIAS, “Effect of nonmetallic inclusion and banding on the success of the two-layer temper bead welding technique”, Materials and Design, 2008.

WILLYS M. AGUIAR, “Soldagem do Aço ABNT 4140 Sem Tratamento Térmico Posterior”. Fortaleza, Dissertação de Mestrado, UFC-Ce, 2001.

CLEITON C. SILVA, VICTOR H.C. de ALBUQUERQUE, CÍCERO R.O. MOURA, WILLYS M. AGUIAR, JESUALDO P. FARIAS, “Evaluation of AISI 4140 Steel Repair Without Post-Weld Heat Treatment”, ASM International, 2008.

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](#)