

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**INFLUÊNCIA DO PROCESSO MIG/MAG TÉRMICO SOBRE A
MICROESTRUTURA E A GEOMETRIA DA ZONA FUNDIDA**

**TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA
A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**

SÉRGIO RODRIGUES BARRA

FLORIANÓPOLIS – SC, AGOSTO DE 2003

**INFLUÊNCIA DO PROCESSO MIG/MAG TÉRMICO SOBRE A
MICROESTRUTURA E A GEOMETRIA DA ZONA FUNDIDA**

SÉRGIO RODRIGUES BARRA

**ESTA TESE FOI JULGADA PARA A OBTENSÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Prof. Augusto José de Almeida Buschinelli, Dr. -Ing.
(Orientador)

Prof. José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr. Eng.
(Coordenador do Curso)

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng. – (Presidente)

Prof. Jesualdo Pereira Farias, Dr. Eng.
(Membro)

Prof. Américo Scotti, Ph.D.
(Membro)

Prof. Paulo César Okimoto, Dr. Eng.
(Membro)

Prof. Ramón Sigifredo C. Paredes, Dr. Eng.
(Membro)

“A ciência não pode revogar os fatos. Ela deve utilizar a relação complementar *teoria x experimento* para tentar explicar o surgimento de um novo fenômeno”.

Barra/2003

A minha esposa Geovana, meu pilar de sustentação, por dividir e compartilhar os momentos bons e difíceis nesta etapa de minha vida profissional;

Aos meus filhos, Isabel, Serginho e Raquel, por representarem a minha principal fonte de inspiração e energia;

A Edna pelo amor dedicado aos meus filhos e pelo duplo papel de mãe e pai;

Aos meus pais, Walter e Maria, pela educação e carinho necessários na formação do meu caráter;

Aos meus “poucos” irmãos, Iracema, Jurema, Walter, Sandra, Cláudio, Nilton, Nilma, Nara, Silvia, José e Cristiane, por fazerem parte de minha vida.

Agradecimentos

Ao todo poderoso **Senhor Deus** pela proteção e orientação na busca do melhor caminho;

Ao meu amigo e Orientador Augusto Buschinelli pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho, *moldagem* de pensamento científico e o apoio nos momentos difíceis;

A dona Idalina (Dadá) pelo carinho e apoio;

Ao amigo Carlos Porfírio (Beto) pelos momentos de descontração e pelo apoio na confecção e preparação dos corpos-de-prova;

A equipe do LABSOLDA/IMC (Prof. Jair, Raul, Denise, Valério, Jean, Régis, Pablo e Larry “*in memoriam*”) pelo apoio, dica e amizade durante esta jornada;

Aos amigos de 91, em especial ao João e o Paulo, pela amizade e a convivência;

Aos amigos do GETSOLDA/UFPA e do DEM/UFPA;

Aos amigos, Jerusa, Sandra, Ana, Leonardo, Graciela, Elarrat, Victor Vergara, André Coelho, Schifler, Ricardo, Serginho, Suziane, Francisco, Ramon, Aldo, Niño, Cleide e Motta pelo apoio e momentos de descontração;

À equipe do LAPROSOLDA, em especial aos professores Américo Scotti e Valtair Ferrarezi, pela receptividade, liberação da bancada *shadowgrafia* e o apoio na realização da filmagem do processo de transferência metálica;

Ao amigo Eduardo, doutorando LAPROSOLDA/UFU, pela inestimável colaboração e orientação na realização do processo de filmagem da região do arco (*shadowgrafia*);





Ao povo brasileiro, através do **CNPq**, pela concessão da bolsa de estudo;

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS	xxiii
RESUMO	xxvii
ABSTRACT	xxviii
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	01
1.1 Introdução	01
1.2 Importância e contribuição científica do trabalho	03
1.3 Objetivos	03
1.4 Organização do trabalho	04
CAPÍTULO II – O PROCESSO MIG/MAG	05
2.1 Introdução	05
2.2 O processo MIG/MAG	05
2.2.1 Aplicações, vantagens e limitações do processo MIG/MAG	07
2.2.2 Equipamentos e consumíveis	09
a) Fontes	09
b) Sistema de alimentação de arame	12
c) Gás de proteção	13
d) Arame	15
2.2.3 Parâmetros de soldagem e tópicos afins	15
a) Tensão de Soldagem (U_s)	16
b) Corrente de soldagem (I_s)	16
c) Velocidade de soldagem (v_s)	16
d) Ângulo de inclinação da tocha de soldagem	17
e) Distância entre o bico de contato e o metal de base (DCP)	18
2.3 Modos de Transferência metálica	19
2.3.1 Forças atuantes na transferência metálica	21
a) Teoria do equilíbrio das forças estáticas	21
a.1) Força devido a aceleração da gravidade (F_g)	21
a.2) Força eletromagnética ou de Lorentz (F_{em})	22
a.3) Força de arraste do plasma (F_a)	23
a.4) Força devido a tensão superficial (F_γ)	23

a.5)	Força devido ao jato de vapor (F_v)	24
b)	Modos de transferência metálica	24
b.1)	Modo de transferência goticular (<i>spray</i>)	26
b.2)	Transferência controlada	26
b.2.1)	Critérios para a estabilidade no modo pulsado	30
b.2.2)	Efeito dos parâmetros de pulsação sobre a estabilidade do arco elétrico	39
b.2.3)	<i>MIG/MAG Térmico</i>	43
2.4	O controle sinérgico	49
CAPÍTULO III – EFEITOS METALÚRGICOS DA PULSAÇÃO DE CORRENTE		51
3.1	Introdução	51
3.2	Fundamentos de metalurgia da soldagem	51
3.2.1	Agitação da poça de fusão	51
3.2.2	Solidificação da zona fundida	54
a)	Macroestrutura da zona fundida	56
b)	Variações na macroestrutura da zona fundida	58
3.2.3	Efeitos da soldagem multi-passe sobre a zona fundida	60
3.2.4	Efeitos metalúrgicos da pulsação da corrente de soldagem	63
CAPÍTULO IV – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL		71
4.1	Introdução	71
4.2	Processo de soldagem	71
4.2.1	Consumíveis	71
a)	Metal de base	71
b)	Metal de adição	72
c)	Proteção gasosa	72
4.2.2	Parâmetros de pulsação para o modo pulsado convencional	73
4.2.3	Procedimentos de soldagem complementares	74
2.2.4	Equipamentos	74
a)	Fonte de soldagem e modo de operação	74
b)	Placa de aquisição e controle INTERDATA	75
c)	<i>Software</i> de controle do processo <i>MIG/MAG Térmico</i>	76
d)	Programa de monitoração do processo de soldagem	77
e)	Bancada de soldagem	79
4.2.5	Deposição dos cordões	81

a)	Preparação e deposição dos cordões	81
b)	Ensaio preliminares	84
	Procedimento adotado na avaliação do efeito da F_t	86
	Procedimento adotado na avaliação do efeito do C_t	87
	Procedimento adotado na avaliação da D_{pt}	88
	Procedimentos adotados na avaliação da Im_t e do D_t	89
c)	Análise fatorial (2^k)	91
4.2.6	Procedimento para avaliação da estabilidade do processo de transferência metálica (comparação entre as ondas I e II)	98
4.2.7	Procedimento para filmagem em alta velocidade (<i>shadowgrafia</i>)	100
a)	Seleção de quatro pacotes de <i>pulsção térmica</i>	100
b)	Formação da imagem (sombra)	100
c)	Captura dos pares de sinais $I_s \times imagem$ e $U_s \times imagem$	102
d)	Sincronização dos sinais de U da câmera com os sinais de I_s e U_s	102
4.3	Metalurgia	103
4.3.1	Extração dos corpos-de-prova	103
4.3.2	Preparação metalográfica	104
4.3.3	Revelação da estrutura	105
a)	Macrografia	105
b)	Micrografia	106
4.3.4	Determinação do tamanho e forma do grão	108
a)	Determinação do tamanho médio dos grãos (AIMg)	109
b)	Determinação da forma do grão ou modo de crescimento (AIMg)	111
c)	Determinação da largura média do grão austenítico primário	113
4.3.5	Determinação da fração volumétrica dos microconstituintes	114
4.3.6	Determinação do volume de vazios e sua distribuição (AIMg)	115
a)	Determinação da densidade do metal de base e do arame	115
b)	Seleção e extração da zona fundida	115
c)	Determinação da massa e volume do corpo-de-prova	116
d)	Determinação da densidade do corpo-de-prova	117
e)	Determinação do volume de vazios	117
f)	Determinação da localização preferencial dos vazios (poros)	119
4.3.7	Microscopia ótica	119
4.3.8	Microscopia eletrônica de varredura	120

4.3.9	Levantamento da dureza média da zona fundida	120
CAPÍTULO V – RESULTADOS E DISCUSSÕES		122
5.1	Introdução	122
5.2	Avaliação do efeito da <i>pulsção térmica</i> sobre a região do arco	122
5.2.1	Variação no valor do comprimento do arco (ℓ_0)	122
5.2.2	Perda da condição de uma gota transferida por pulso (UGPP)	126
5.2.3	Agitação da poça de fusão	129
5.2.4	Geração de salpico e fuligem (fumos)	130
5.2.6	Influência da frequência térmica (F_t) sobre o sinal de v_a	133
5.3	Análise isolada dos parâmetros de <i>pulsção térmica</i>	134
5.3.1	Efeito da frequência térmica (F_t)	134
a)	Aspecto superficial e geometria do cordão	135
b)	Microestrutura da zona fundida	140
5.3.2	Efeito da distância entre pulsos (D_{pt})	144
a)	Aspecto superficial e geometria do cordão	144
b)	Microestrutura da zona fundida	146
5.3.3	Efeito do ciclo ativo térmico (C_t)	149
a)	Aspecto superficial e geometria do cordão	150
b)	Microestrutura da zona fundida	151
5.3.4	Efeito da corrente média total (I_{m_t}) e do desnível térmico (D_t)	153
a)	Aspecto superficial e geometria do cordão	153
b)	Microestrutura da zona fundida	155
5.4	Influência da pulsção térmica sobre a subestrutura da ZF	158
5.5	Formação de porosidade decorrente do processo <i>MIG Térmico</i>	161
a)	Porosidade na raiz do cordão	161
b)	Banda de porosidade na interface da <i>base</i> com o <i>pulso térmico</i>	164
5.6	Avaliação conjunta das variáveis envolvidas na <i>pulsção térmica</i>	166
a)	Efeito sobre o aspecto superficial	167
b)	Efeito sobre a largura média do cordão	170
c)	Efeito sobre o reforço médio do cordão	173
d)	Efeito sobre a diferença na largura da ZTA (aço carbono)	176
e)	Efeito sobre o volume de vazios na ZF (AlMg)	180
f)	Efeito sobre o diâmetro médio dos grãos e PMC (AlMg)	184

g)	Efeito sobre a largura do grão austenítico primário (aço carbono)	187
h)	Efeito sobre as frações volumétricas de FA e FP(G) (aço carbono)	190
5.7	Ocorrência de microestrutura complexa de solidificação na ZF	192
CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		
FUTUROS		196
6.1	Conclusões	196
6.2	Recomendações pra trabalhos futuros	198
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		199
ANEXOS		210

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 2.1 - Classificação dos modos de transferência metálica	20
--	----

CAPÍTULO III

Tabela 3.1 – Técnicas de refino aplicáveis no processo de solidificação	63
---	----

CAPÍTULO IV

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas dos metais de base	72
--	----

Tabela 4.2 – Características dimensionais adotadas e composições químicas apresentadas pelos metais de base	72
---	----

Tabela 4.3 – Características e composições químicas obtidas na deposição dos metais de adição	72
---	----

Tabela 4.4 – Resumo dos parâmetros de pulsação convencional para o aço	73
--	----

Tabela 4.5 – Resumo dos parâmetros de pulsação convencional para o AlMg	74
---	----

Tabela 4.6 – Características técnicas apresentadas pela fonte de soldagem	75
---	----

Tabela 4.7 – Condições utilizadas na soldagem em simples deposição	84
--	----

Tabela 4.8 – Pacotes operacionais de pulsação utilizados para variar os valores de F_t na soldagem do aço carbono	87
---	----

Tabela 4.9 – Pacotes operacionais de pulsação utilizados para variar os valores de F_t na soldagem do AlMg	87
--	----

Tabela 4.10 – Pacotes operacionais utilizados na variação de C_t na soldagem do aço	88
---	----

Tabela 4.11 – Pacotes operacionais utilizados na variação de C_t na soldagem do AlMg	88
--	----

Tabela 4.12 – Pacotes operacionais utilizados na avaliação de D_{pt} na soldagem do aço	89
---	----

Tabela 4.13 – Pacotes operacionais utilizados na avaliação de D_{pt} na soldagem do AlMg	89
--	----

Tabela 4.14 – Pacotes operacionais utilizados para variar os valores de D_t e Im_t na soldagem do aço carbono	90
---	----

Tabela 4.15 – Pacotes operacionais utilizados para variar os valores de D_t e Im_t na soldagem do AlMg	90
--	----

Tabela 4.16 – Planejamento fatorial completo 2^5 para avaliação da onda I na soldagem do aço carbono	94
---	----

Tabela 4.17 – Planejamento fatorial completo 2⁵ para avaliação da onda I na soldagem do AlMg	94
Tabela 4.18 – Fatorial 2³ para avaliar a onda II na soldagem do aço carbono	95
Tabela 4.19 – Fatorial 2³ para avaliar a onda II na soldagem do AlMg	95
Tabela 4.20 – Matriz de planejamento utilizada na análise do efeito da <i>pulsção térmica</i> na soldagem do aço carbono (onda I)	96
Tabela 4.21 – Matriz de planejamento utilizada na análise do efeito da <i>pulsção térmica</i> na soldagem do AlMg (onda I)	97
Tabela 4.22 – Matriz de planejamento utilizada na análise do efeito da <i>pulsção térmica</i> na soldagem do aço carbono (Onda II)	98
Tabela 4.23 – Matriz de planejamento utilizada na análise do efeito da <i>pulsção térmica</i> na soldagem do AlMg (Onda II)	98
Tabela 4.24 – Pacotes operacionais utilizados na avaliação da estabilidade do processo de <i>pulsção térmica</i>	101
Tabela 4.25 – Procedimento adotado na preparação das superfícies para análise metalográfica dos corpos-de-prova	105
Tabela 4.26 – Definição do tamanho de grão baseado no número ASTM (n)	110

CAPÍTULO V

Tabela 5.1 – Efeito da frequência térmica sobre a presença de porosidade na ZF	144
Tabela 5.2 – Efeito da Dpt sobre a presença de porosidade na ZF	149
Tabela 5.3 – Efeito do <i>ciclo ativo térmico</i> sobre a presença de porosidade na ZF	153
Tabela 5.4 – Efeito dos parâmetros de <i>pulsção térmica</i> sobre o aspecto superficial do cordão (liga AlMg)	168
Tabela 5.5 – Efeito dos parâmetros de <i>pulsção térmica</i> sobre o aspecto superficial do cordão. Aço carbono	168
Tabela 5.6 – Efeito dos parâmetros de <i>pulsção térmica</i> sobre a largura média do cordão (liga AlMg)	171
Tabela 5.7 – Efeito dos parâmetros de <i>pulsção térmica</i> sobre a largura média do cordão (Aço carbono)	171
Tabela 5.8 – Efeito dos parâmetros de <i>pulsção térmica</i> sobre o reforço médio do cordão (liga AlMg)	174

Tabela 5.9 – Efeito dos parâmetros de <i>pulsção térmica</i> sobre o reforço médio do cordão (aço carbono)	174
Tabela 5.10 – Efeito dos parâmetros de <i>pulsção térmica</i> sobre a diferença na largura da ZTA (aço carbono)	177
Tabela 5.11 – Efeito dos parâmetros de <i>pulsção térmica</i> sobre o volume de vazios na zona fundida (liga AlMg)	180
Tabela 5.12 – Efeito dos parâmetros de <i>pulsção térmica</i> sobre o diâmetro médio do grão (liga AlMg)	185
Tabela 5.13 – Efeito dos parâmetros de <i>pulsção térmica</i> sobre o valor de PMC (liga AlMg)	185
Tabela 5.14 – Efeito dos parâmetros de <i>pulsção térmica</i> sobre a largura do grão austenítico primário (aço carbono)	187
Tabela 5.15 – Efeito dos parâmetros de <i>pulsção térmica</i> sobre o volume de FA (aço carbono)	190
Tabela 5.16 – Efeito dos parâmetros de <i>pulsção térmica</i> sobre o volume de FP(G) (Aço carbono)	190

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura 2.1 – Descrição genérica do processo <i>MIG/MAG</i>	06
Figura 2.2 – Característica estática da fonte x curva do arco	11
Figura 2.3 – Ângulos de posicionamento da tocha	17
Figura 2.4 – Representação da distância contato peça e da projeção do arame (stickout)	18
Figura 2.5 - Representação esquemática dos principais modos de transferência	20
Figura 2.6 – Balanço estático das forças atuantes na gota	22
Figura 2.7 – Descrição da técnica de <i>shadowgrafia</i>	25
Figura 2.8 – Representação do processo de transferência no modo pulsado	27
Figura 2.9 – Características estáticas possíveis de serem empregadas no modo pulsado	30
Figura 2.10 – Condições de transferência em função dos valores de I_p e t_p selecionados	31
Figura 2.11 – Representação do arco como um conjunto de resistores	32
Figura 2.12 – Relação simplificada entre a taxa de fusão (T_{xf}) e a taxa de alimentação (T_{xa})	33
Figura 2.13 – Condição de equilíbrio entre a taxa de alimentação e a taxa de fusão	34
Figura 2.14 – Condições de transferência: (a) grande tempo de destacamento provocando mais de uma projeção e (b) influência do tempo de pulso na forma de projeção da gota	36
Figura 2.15 – Representação dos oscilogramas mostrando as características do processo de destacamento	37
Figura 2.16 – (a) procedimento para a determinação de a e (b) Histograma mostrando a distribuição dos tempos de destacamento	38
Figura 2.17 – Representação esquemática das possíveis formas de ondas (taxa de resposta dl/dt) impostas por diferentes equipamentos	42
Figura 2.18 – Fragmentação do eletrodo durante a abertura do arco, decorrente da imposição de um nível alto de I e da v_a (abertura na região intermediária de ℓ)	43

Figura 2.19 – Representação da variante <i>MIG/MAG Térmico</i>	44
Figura 2.20 – Representação da variação no perfil de penetração e da formação de escamas durante a soldagem com a variante <i>MIG/MAG Térmico</i>	46
Figura 2.21 – <i>Pulsção térmica</i> sem a variação no valor de v_a	48
Figura 2.22 – Forma de onda agregando as vantagens da soldagem nas polaridades CCEP e CCEN	49
Figura 2.23 - Fluxograma esquemático de um algoritmo sinérgico comercial	50
CAPÍTULO III	
Figura 3.1 – Efeito convectivo na poça de fusão provocado por diferentes forças	52
Figura 3.2 – Possíveis morfologias na interface de crescimento em função dos valores de G , R_s e C₀	55
Figura 3.3 – Crescimento competitivo dos grãos durante a solidificação da ZF	57
Figura 3.4 – (a) e (b) Efeito da velocidade de soldagem sobre a forma da poça e modo de solidificação e (c) variação estrutural na solidificação da ZF	59
Figura 3.5 – Influência de fatores metalúrgicos sobre a resistência mecânica e a tenacidade	61
Figura 3.6 – Comparação esquemática das alterações estruturas obtidas em simples deposição (a), através de multi-passe (b) e <i>pulsção térmica</i> (c)	62
Figura 3.7 – Representação da onda com modulação para controle da solidificação (a) e forma de crescimento obtido na ZF sem e com a aplicação rampa de modulação em 10 Hz (b), no aço inoxidável AISI 316	66
Figura 3.8 – Variação de penetração provocada pelo uso da <i>pulsção térmica</i> na soldagem <i>MIG/MAG</i>	68
Figura 3.9 – Alteração na estrutura da ZF gerado pela variação de G.R_s em função da imposição de <i>pulsção térmica</i>	68
Figura 3.10 – (a) Macrografia mostrando a escamação na estrutura do depósito (regiões A, B e C), oriunda do efeito conjunto da <i>pulsção térmica</i> e da soldagem multi-passe e (b) granulometria nas referidas regiões	69
Figura 3.11 – Variações obtidas na granulometria da ZF em função da forma de onda de corrente aplicada	70

CAPÍTULO IV

Figura 4.1 – Tela do programa de controle TERMICO2	78
Figura 4.2 – (a) Sistema de deslocamento da tocha e pontos de tomada de tensão e (b) localização do sensor Hall	79
Figura 4.3 – Representação esquemática da bancada de soldagem	80
Figura 4.4 – (a) Detalhe dos equipamentos utilizados no processo aquisição e (b) controle do processo de soldagem	80
Figura 4.5 – (a) Fonte de soldagem DIGITEC 450 e (b) detalhe do sistema de tracionamento e do posicionamento do sensor da v_a	81
Figura 4.6 – Representação esquemática da forma de onda de <i>pulsação térmica</i> contendo modulação conjunta da corrente média (Im) com a velocidade de alimentação do arame (v_a), onda I	83
Figura 4.7 – Representação esquemática da forma de onda de <i>pulsação térmica</i> contendo modulação apenas na corrente média (Im), onda II	83
Figura 4.8 – Forma de deposição adotada. Onde (a) AlMg e (b) aço carbono	84
Figura 4.9 – Oscilogramas contendo os sinais sincronizados de I , U e v_a (liga AlMg)	99
Figura 4.10 – Detalhes da bancada experimental de <i>shadowgrafia</i> por laser. Onde: (a) fonte de laser, filtros e lentes para controle do diâmetro do feixe, (b) sistema de deslocamento da tocha, (c) filmadora e monitor e (d) micros utilizados no controle e aquisição dos sinais elétricos	101
Figura 4.11 – Processo de formação e aquisição da imagem da região do arco. Onde: (a) sombra gerada pela tocha posicionada na frente do feixe de laser e (b) imagem (quadro) gerada pela filmadora	102
Figura 4.12 – Exemplo do resultado final obtido pela técnica de <i>shadowgrafia</i> . Como informação, verifica-se o estabelecimento da condição UGPP (liga AlMg) e a presença de ondulação na poça de fusão	103
Figura 4.13 – Apresentação das características do cordão de solda e do detalhe da região de medição das respostas de interesse	104
Figura 4.14 – Detalhe das regiões selecionadas para análise e do modo de extração dos corpos-de-prova (CP). Onde: (a) CP para avaliação da microestrutura da ZF e (b) CP para análise gravimétrica	105
Figura 4.15 – Representação esquemática da célula eletrolítica	108

Figura 4.16 – (a) Visão geral da célula eletrolítica e (b) recipiente para eletrólise	108
Figura 4.17 – Representação esquemática da técnica utilizada para determinação do diâmetro dos grãos	111
Figura 4.18 – Representação da técnica utilizada para determinação do parâmetro do modo de crescimento (PMC)	112
Figura 4.19 – Técnica utilizada na determinação da largura do grão colunar	113
Figura 4.20 – Representação esquemática do processo de quantificação das percentagens volumétricas	114
Figura 4.21 – Método utilizado para a determinação das massas e dos volumes dos corpos-de-prova	117
Figura 4.22 – Equipamentos utilizados na caracterização dos corpos-de-prova (imagem e perfil de dureza)	119
Figura 4.23 – Efeito do tipo de ataque sobre o aspecto da endentação	121
CAPÍTULO V	
Figura 5.1 – Comportamento do comprimento do arco (ℓ_0) em função da forma de onda de pulsação	124
Figura 5.2 – Comportamento do comprimento do arco (ℓ_0) em função da forma de onda de pulsação	125
Figura 5.3 – Efeito da forma de onda I sobre UGPP	127
Figura 5.4 – Instabilidade na condição UGPP , decorrente da variação em ℓ e da resistividade (material)	128
Figura 5.5 – Destacamento da gota apresentando um diâmetro maior que o arame, após a imposição de dois pulsos de corrente (perda da condição UGPP)	129
Figura 5.6 – Diferença no grau de agitação da poça de fusão entre as fases de <i>pulso térmico</i> e de <i>base térmica</i>	130
Figura 5.7 – Mecanismo de formação do salpico na soldagem do AlMg	132
Figura 5.8 – Ocorrência de explosão da gota instante antes do destacamento	132
Figura 5.9 – Efeito da <i>freqüência térmica</i> sobre a dinâmica de \mathbf{v}_a	134
Figura 5.10 – Efeito da <i>freqüência térmica</i> sobre a geometria e o aspecto superficial do cordão	135
Figura 5.11- Efeito da <i>freqüência térmica</i> sobre o aspecto superficial e o perfil	

de penetração	136
Figura 5.12 – Efeito da <i>pulsção térmica</i> sobre a direção de crescimento dos grãos na zona fundida (liga AlMg)	137
Figura 5.13 – Efeito da <i>pulsção térmica</i> sobre a diferença de largura da ZTA (alargamento através do recuo da linha de fusão – LF)	139
Figura 5.14 – Influência da <i>freqüência térmica</i> sobre a microestrutura da zona fundida	141
Figura 5.15 – Efeito da <i>freqüência térmica</i> sobre a granulometria apresentada pela zona fundida (AlMg)	141
Figura 5.16 – Efeito da <i>freqüência térmica</i> sobre a variação do volume de microconstituintes da zona fundida (a), microestrutura na região colunar para $F_t = 0,5$ Hz (b) e microestrutura na região colunar para $F_t = 10$ Hz (c)	142
Figura 5.17 – Formação de nódulos de FA na interface térmica (início de pt)	143
Figura 5.18 – Efeito da <i>distância entre pulsos</i> sobre a geometria e o aspecto superficial do cordão	145
Figura 5.19 – Efeito da <i>distância entre pulsos</i> sobre o aspecto superficial e o perfil de penetração	145
Figura 5.20 – Influência da <i>distância entre pulsos</i> sobre a microestrutura da zona fundida	146
Figura 5.21 – Efeito da <i>distância entre pulsos</i> sobre a granulometria apresentada pela zona fundida (AlMg)	147
Figura 5.22 – Efeito da <i>distância entre pulsos</i> sobre a variação do volume de microconstituintes da zona fundida	148
Figura 5.23 – Aparente refino na região do <i>pulso térmico</i>	149
Figura 5.24 – Efeito do <i>ciclo ativo térmico</i> sobre a geometria e o aspecto superficial do cordão	150
Figura 5.25 – Efeito do <i>ciclo ativo térmico</i> sobre o aspecto superficial e o perfil de penetração	150
Figura 5.26 – Influência da <i>distância entre pulsos</i> sobre a microestrutura da zona fundida	151
Figura 5.27 – Efeito do <i>ciclo ativo térmico</i> sobre a granulometria apresentada pela zona fundida (AlMg)	152
Figura 5.28 – Efeito do <i>ciclo ativo térmico</i> sobre a variação do volume de	

microconstituintes da zona fundida (a), representação gráfica da variação volumétrica (b) microestrutura na região colunar para $C_t = 10\%$ e (c) microestrutura na região colunar para $C_t = 90\%$	152
Figura 5.29 – Efeito do <i>corrente média total</i> e do <i>desnível térmico</i> sobre a geometria e o aspecto superficial	154
Figura 5.30 – Efeito do <i>ciclo ativo térmico</i> sobre o aspecto superficial e o perfil de penetração	155
Figura 5.31 – Efeito da <i>corrente média total</i> e do <i>desnível térmico</i> sobre o aspecto superficial do cordão (AlMg)	155
Figura 5.32 – Influência da <i>corrente média total</i> sobre a microestrutura da zona fundida	156
Figura 5.33 – Efeito da <i>corrente média total</i> e do <i>desnível térmico</i> sobre a granulometria apresentada pela zona fundida (AlMg)	156
Figura 5.34 – Influência do <i>desnível térmico</i> sobre a microestrutura da zona fundida	157
Figura 5.35 – Efeito da Im_t e do D_t sobre a variação dos microconstituintes na ZF	157
Figura 5.36 – Detalhe do efeito da <i>pulsção térmica (onda I)</i> sobre o aspecto dos ramos dendríticos e a presença de porosidade interdendrítica, entre as fases de <i>pulso</i> e <i>base térmica</i> (vista longitudinal do cordão A25, liga AlMg)	160
Figura 5.37 – Seção longitudinal do cordão mostrando a localização do sítio preferencial à formação de porosidade na raiz do cordão	162
Figura 5.38 – Mecanismo de formação de porosidade tipo “túnel”	164
Figura 5.39 – Banda de porosidade esférica localizada na interface térmica (corpo-de-prova Dpt5; liga AlMg)	165
Figura 5.40 – Diagrama de Pareto mostrando os parâmetros influentes sobre o aspecto do cordão	169
Figura 5.41 – Gráfico dos efeitos normalizados comparando a relativa magnitude e a significância dos efeitos principais e suas interações sobre o aspecto superficial	169
Figura 5.42 – Evolução apresentada pelo aspecto superficial durante a mudança de nível dos fatores	169
Figura 5.43 – Evolução das interações de 2ª ordem em relação ao aspecto	

superficial do cordão, durante a mudança de nível dos fatores	170
Figura 5.44 – Aspecto apresentado pelos cordões na condição melhor e pior	170
Figura 5.45 – Diagrama de Pareto mostrando os parâmetros influentes sobre a largura média do cordão	172
Figura 5.46 – Gráfico dos efeitos normalizados comparando a relativa magnitude e a significância dos efeitos principais e suas interações sobre a largura média do cordão	172
Figura 5.47 – Evolução apresentada pela largura média do cordão durante a mudança de nível dos fatores	172
Figura 5.48 – Evolução das interações de 2ª ordem em relação à largura média do cordão, durante a mudança de nível dos fatores	173
Figura 5.49 – Diagrama de Pareto mostrando os parâmetros influentes sobre o reforço médio do cordão	174
Figura 5.50 – Gráfico dos efeitos normalizados comparando a relativa magnitude e a significância dos efeitos principais e suas interações sobre o reforço médio do cordão	175
Figura 5.51 – Evolução apresentada pelo reforço médio do cordão durante a mudança de nível dos fatores	175
Figura 5.52 – Evolução das interações de 2ª ordem em relação ao reforço médio do cordão, durante a mudança de nível dos fatores	176
Figura 5.53 – Diagrama de Pareto mostrando os parâmetros influentes sobre o reforço médio do cordão (aço carbono)	177
Figura 5.54 – Gráfico dos efeitos normalizados comparando a relativa magnitude e a significância dos efeitos principais e suas interações sobre a largura média do cordão (aço carbono)	178
Figura 5.55 – Evolução apresentada pela diferença na largura da ZTA , durante a mudança de nível dos fatores (aço carbono)	179
Figura 5.56 – Evolução das interações de 2ª ordem em relação à diferença de largura da ZTA , durante a mudança de nível dos fatores (aço carbono)	179
Figura 5.57 – Diagrama de Pareto mostrando os parâmetros influentes sobre o volume de vazios na ZF (liga AlMg)	181
Figura 5.58 – Gráfico dos efeitos normalizados comparando a relativa magnitude e a significância dos efeitos principais e suas interações sobre o	

volume de vazios na ZF (liga AlMg)	181
Figura 5.59 – Evolução apresentada pelo volume de vazios do cordão durante a mudança de nível dos fatores (liga AlMg)	182
Figura 5.60 – Evolução das interações de 2ª ordem em relação ao volume de vazios na ZF durante a mudança de nível dos fatores (liga AlMg)	182
Figura 5.61 – Seções transversais dos cordões mostrando o efeito da <i>pulsção térmica</i> sobre falta de fusão (formação de vazios)	184
Figura 5.62 – Diagramas de Pareto mostrando os parâmetros influentes sobre o diâmetro médio dos grãos (a) e sobre o valor de PMC (b)	185
Figura 5.63 – Gráfico dos efeitos normalizados comparando a relativa magnitude e a significância dos efeitos principais e suas interações sobre o diâmetro médio dos grãos (a) e PMC (b)	186
Figura 5.64 – Evolução apresentada pelo diâmetro médio do grão (a) e por PMC (b), durante a mudança de nível dos fatores	186
Figura 5.65 – Evolução das interações de 2ª ordem em relação ao diâmetro médio do grão (b) e PMC (b), durante a mudança de nível dos fatores	187
Figura 5.66 – Diagrama de Pareto mostrando os parâmetros influentes sobre a largura do grão austenítico (aço carbono)	188
Figura 5.67 – Gráfico dos efeitos normalizados comparando a relativa magnitude e a significância dos efeitos principais e suas interações sobre a largura do grão austenítico (aço carbono)	188
Figura 5.68 – Evolução apresentada pela largura do grão durante a mudança de nível dos fatores (aço carbono)	189
Figura 5.69 – Evolução das interações de 2ª ordem em relação à largura do grão primário, durante a mudança de nível dos fatores (aço carbono)	189
Figura 5.70 – Diagramas de Pareto mostrando os parâmetros influentes sobre os volumes de FA (a) e FP(G) (b) (aço carbono)	191
Figura 5.71 – Gráfico dos efeitos normalizados comparando a relativa magnitude e a significância dos efeitos principais e suas interações sobre os volumes de FA (a) e FP(G) (b) (Aço carbono)	191
Figura 5.72 – Evolução apresentada pelos volumes de FA (a) e FP(G) (b), durante a mudança de nível dos fatores (aço carbono)	192
Figura 5.73 – Evolução das interações de 2ª ordem em relação aos volumes	

de FA (a) e FP(G) (b), durante a mudança de nível dos fatores (aço carbono)	192
Figura 5.74 – Forças atuantes na agitação da poça de fusão	193
Figura 5.75 – Representação esquemática das características produzidas no cordão em decorrência da <i>pulsção térmica</i>	194
Figura 5.76 – Microscopia eletrônica mostrando o efeito da pulsção térmica sobre a diferença na subestrutura e a região de ligação do metal de solda com o metal de base (seção transversal; liga AlMg)	194
Figura 5.77 – Representação da complexidade apresentada na estrutura de solidificação da zona fundida pelo uso da pulsção térmica (seção longitudinal; AlMg)	195

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS

β	⇒ Constante da equação de consumo – efeito resistivo ($A^{-2}.s^{-1}$)
α	⇒ Constante da equação de consumo – reações no ânodo ($m.s^{-1}.A^{-1}$)
ρ	⇒ Densidade ($kg.m^{-3}$)
ρ_e	⇒ Resistência do eletrodo (Ω)
π	⇒ Pi (3,1416)
μ_0	⇒ Permeabilidade magnética do material
γ_s	⇒ Tensão superficial ($N.m^{-1}$)
ρ_v	⇒ Densidade do vapor ($kg.m^{-3}$)
a	⇒ Número de grãos contidos no quadrado com área igual a 1 μm^2 sob um aumento de 100x
A	⇒ Corpo-de-prova de alumínio soldado com a onda I
Ar	⇒ Argônio
ASME	⇒ American Society of Mechanical Engineers
ASTM	⇒ American Society for Testing and Materials
AY	⇒ Corpo-de-prova de alumínio soldado com a onda II
AWS	⇒ American Welding Society
B	⇒ Campo magnético
bt	⇒ Fase de base térmica
c_a	⇒ Coeficiente de arraste
CA	⇒ Corrente alternada
CC	⇒ Corrente contínua
CC+	⇒ Corrente contínua polaridade inversa
CC-	⇒ Corrente contínua polaridade direta
CCEN	⇒ Corrente contínua eletrodo negativo
CCEP	⇒ Corrente contínua eletrodo positivo
CO ₂	⇒ Gás carbônico
C_t	⇒ Ciclo ativo térmico ou ciclo de trabalho térmico (%)
D	⇒ Constante de destacamento ($A^a.s$), com a variando entre 1 e 2,3
d_a	⇒ Diâmetro do eletrodo (mm)
DCP	⇒ Distância entre o bico de contato e o metal de base (mm)

d_g	⇒ Diâmetro da gota (mm)
Dpt	⇒ Distância entre pulsos térmicos (mm)
D_t	⇒ Desnível térmico
F	⇒ Freqüência de pulsação convencional (Hz)
F_γ	⇒ Força devido à tensão superficial (N)
FA	⇒ Ferrita acicular
F_a	⇒ Força de arraste do plasma (N)
F_{em}	⇒ Força eletromagnética (N)
F_b	⇒ Força devido à convecção com fluxo líquido (buoyancy) (N)
F_g	⇒ Força gravitacional (N)
FP(C)	⇒ Ferrita de contorno de célula
FP(G)	⇒ Ferrita de contorno de grão
F_{pa}	⇒ Força devido à pressão do arco (N)
FS(A)	⇒ Ferrita com segunda fase alinhada
FS(SP)	⇒ Ferrita de placa lateral
F_t	⇒ Freqüência de pulsação térmica (Hz)
F_v	⇒ Força devido ao jato de vapor (N)
g	⇒ Aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$)
G	⇒ Gradiente térmico ($^{\circ}C/cm$)
$G(r, \theta, \Phi)$	⇒ Função geométrica dependente da forma da gota
GMAW	⇒ Gas Metal Arc Welding
GMAW-P	⇒ Gas Metal Arc Welding Pulsed
He	⇒ Hélio
I ou I_s	⇒ Corrente elétrica de soldagem (A)
I_b	⇒ Corrente de base (A)
I_{b-bt}	⇒ Corrente de base na fase de base térmica (A)
I_{b-pt}	⇒ Corrente de base na fase de pulso térmico (A)
I_{cc}	⇒ Corrente de curto-circuito (A)
IGBT	⇒ Insulated Gate Bipolar Transistor
IIW	⇒ International Institute of Welding
I_m	⇒ Corrente média (A)

$I_{m_{bt}}$	⇒ Corrente média na base térmica (A)
$I_{m_{pt}}$	⇒ Corrente média no pulso térmico (A)
I_{m_t}	⇒ Corrente média (A)
I_p	⇒ Corrente de pulso (A)
I_{p-bt}	⇒ Corrente de pulso na fase de base térmica (A)
I_{p-pt}	⇒ Corrente de pulso na fase de pulso térmico (A)
I_t	⇒ Corrente de transição (A)
J	⇒ Densidade de corrente elétrica ($A \cdot mm^{-2}$)
L	⇒ Largura do cordão (mm)
LF	⇒ Linha de fusão (mm)
MAG	⇒ Metal Active Gas
MEV	⇒ Microscópio eletrônico de varredura
m_g	⇒ Massa da gota (g)
MIG	⇒ Metal Inert Gas
n	⇒ Número ASTM
O_2	⇒ Gás oxigênio
P	⇒ Penetração do cordão (mm)
PMC	⇒ Parâmetro do modo de crescimento
pt	⇒ Fase de pulso térmico
Q	⇒ Calor aportado (J/cm)
R	⇒ Resistência elétrica (Ω)
R_a	⇒ Raio de entrada da corrente – eletrodo (mm)
r_a	⇒ Raio do arame (mm)
R_e	⇒ Reforço do cordão (mm)
r_g	⇒ Raio da gota (mm)
r_s	⇒ Raio de saída da corrente – gota metálica (mm)
R_s	⇒ Taxa de crescimento ou velocidade de solidificação (cm/s)
$SAMG$	⇒ Soldagem a Arco Metálico com Atmosfera Gasosa
$SAMGp$	⇒ Soldagem a Arco Metálico com Atmosfera Gasosa pulsada

SDP	⇒ Sistema de deslocamento da pistola
SRC	⇒ Silicon Controlled Rectifier
T	⇒ Período de pulsação (ms)
t_b	⇒ Tempo de base (ms)
t_{bt}	⇒ Tempo de base térmica (s)
TIG	⇒ Tungsten Inert Gas
T_m	⇒ Tempo modal (s)
t_p	⇒ Tempo de pulso (ms)
t_{pt}	⇒ Tempo de pulso térmico (s)
T_t	⇒ Período térmico (s)
T_{xa}	⇒ Taxa de alimentação do arame (m/min)
T_{xf}	⇒ Taxa de fusão do arame (m/min)
U ou U_s	⇒ Tensão de soldagem (V)
U_0 ou V_0	⇒ Tensão em vazio (V)
U_{cc}	⇒ Tensão de curto-circuito (V)
UGPP	⇒ Uma gota por pulso
v_a	⇒ Velocidade de alimentação do arame ($m \cdot min^{-1}$)
v_{a-bt}	⇒ Velocidade de alimentação do arame ($m \cdot min^{-1}$)
v_{a-pt}	⇒ Velocidade de alimentação do arame ($m \cdot min^{-1}$)
V_m	⇒ Volume modal (mm^3)
v_p	⇒ Velocidade do jato de plasma ($m \cdot s^{-1}$)
v_s	⇒ Velocidade de soldagem ($cm \cdot min^{-1}$)
X	⇒ Corpo-de-prova de aço carbono soldado com a onda I
Y	⇒ Corpo-de-prova de aço carbono soldado com a onda II
ZF	⇒ Zona fundida
ZTA	⇒ Zona termicamente afetada
ℓ	⇒ Projeção do eletrodo em relação ao bico de contato (stickout)
ℓ_o , ℓ_1 ou ℓ_2	⇒ Comprimento do arco elétrico (mm)

RESUMO

Esta Tese de Doutorado pretende contribuir para um melhor entendimento dos reais efeitos mecânico-metalúrgicos da “*pulsção térmica*”, explicitando as vantagens e limitações do uso dessa nova variante na soldagem de ligas metálicas de emprego comum em engenharia. O estudo enfoca as possíveis implicações, nos campos do processo (estabilidade na transferência metálica) e da metalurgia da soldagem (microestrutura da zona fundida), geradas na implementação do processo *MIG/MAG Térmico* em ligas susceptíveis ou não a transformações no estado sólido (Aço baixo carbono ABNT 1020 e liga AlMg AA 5052-H34). A pesquisa envolve a análise sistemática do uso de duas formas de onda de *pulsção térmica*, apresentando diferentes mecanismos de deposição, sobre as alterações na geometria (reforço, penetração, largura, etc..) e na microestrutura da zona fundida (tamanho e forma do grão, presença de vazios e fração volumétrica dos microconstituintes). Planejamento fatorial completo 2^k é utilizado como ferramenta estatística na avaliação e validação dos experimentos. Os resultados obtidos são interpretados através do cruzamento das informações operacionais (oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame) e da filmagem em alta velocidade do processo de transferência metálica (*shadowgrafia*) com a resposta metalúrgica apresentada na zona fundida. Como suporte na realização e análise dos experimentos foram utilizados: uma fonte eletrônica multi-processo, interfaceada com um sistema de aquisição e controle dos sinais elétricos, um sistema laser-ótico de filmagem em alta velocidade (**shadowgrafia**), microscopia ótica e eletrônica de varredura (**MEV**) e outros equipamentos necessários à caracterização do depósito. Como resultado foi observado que o processo de soldagem *MIG/MAG Térmico* influencia significativamente a geometria e o aspecto do cordão, a forma e o tamanho médio dos grãos e a fração volumétrica dos microconstituintes na zona fundida. Adicionalmente, detectou-se que a condição operacional pode induzir na quantidade de vazios (bandas de porosidade e falta de fusão) e na largura média da zona termicamente afetada.

ABSTRACT

This thesis intends to contribute to improve the understanding of *mechanical-metallurgic* effects of the *thermal pulsation*, bringing about the advantages and limitations on using this new variant in welding of metallic alloys of common employment in engineering. The study focuses the possible implications, in the fields of welding process (stability in the metal transfer) and welding metallurgy (microstructure of the fusion zone), generated in the use of variant *GMAW with thermal pulsation*, in materials with and without solid-state transformation (mild steel ASTM 1020 and aluminum alloy AA 5052-H34). The research involves the systematic analysis of the use in two wave configuration of *thermal pulsation*, showing different deposition mechanisms, upon the alterations in the surface aspect and geometry of weld bead and in the microstructure of fusion zone (size and grain shape, presence of void and phases distribution). Full 2^k factorial design is used as statistical tool in the evaluation and validation of the experiments. The obtained results are interpreted through the crossing of operational information (current, voltage and wire feeding speed signals) and the image of metal transfer behavior with the metallurgic answer presented in fusion zone. To support the accomplishment and analysis of the experiments an electronic power supply was used, coupled to electric signs acquisition and control systems, a laser shadowgraph (high-speed filming), optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) and other necessary equipments to the deposit characterization. As result were observed influences in the geometry and aspect of the weld bead, the form and size of grains and phase transformation in fusion zone with the implementation of the *GMAW with thermal pulsing*. In addition, it has been detected that the operational condition can affect the amount of voids (porosity bands and fusion lack), the cell size and the average width of heat-affected zone.

Key-Words: Welding; GMAW with thermal pulsation; Fusion zone; Surface aspect