



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 EXPLORATÓRIO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM DE
REVESTIMENTOS COM LIGAS DE NÍQUEL EMPREGANDO O
PROCESSO TIG COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME FRIO

Edvan Cordeiro de Miranda

Fortaleza – Ce

Janeiro de 2009



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 EXPLORATÓRIO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM DE
REVESTIMENTOS COM LIGAS DE NÍQUEL EMPREGANDO O
PROCESSO TIG COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME FRIO

Edvan Cordeiro de Miranda

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. Jesualdo Pereira Farias

Fortaleza – Ce

Janeiro de 2009

A Deus
A minha mãe Orquidea e ao meu falecido pai Hélio
Aos meus irmãos
À minha namorada Klébia

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

A minha mãe Orquidea, pelo amor, dedicação e apoio em minha educação.

A minha namorada Klébia, pelo amor, compreensão em todos os momentos.

Ao meu irmão e Professor Dr. Hélio Cordeiro de Miranda pela amizade e ensinamentos durante esta etapa de minha vida.

Aos meus irmãos (Gilson, Sérgio, José, Jaqueline e Orquidia) pela amizade e apoio em todos os momentos.

Ao Professor e Orientador Dr. Jesualdo Pereira Farias pela amizade e orientação deste trabalho.

Ao Professor Dr. Marcelo Ferreira Motta pela amizade e ensinamentos.

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

Aos demais professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais pelos ensinamentos.

Aos doutorandos e amigos Cleiton, Rodrigo e Willys, pela amizade e ensinamentos.

A todos os bolsistas e amigos do Laboratório de Engenharia de Soldagem - ENGESOLDA, em especial aos bolsistas de graduação Assis, Felipe, Igor e Thiago Ivo, pelas importantes contribuições na realização desse trabalho.

Aos amigos Cleyton, Daniel, Fabrício e Mathias pela amizade em todos estes anos.

Aos amigos de turma Everton, George Luiz, George Matos, Helton, Januário, Rodolfo, Sitônio e Wellison, pela ótima convivência ao longo desses anos.

A todos não citados que, de forma direta ou indireta, contribuíram para realização deste trabalho.

A FINEP, ao CENPES/PETROBRÁS e a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP pelo suporte financeiro.

Miranda, E. C., 2008, “Estudo Exploratório de Parâmetros de Soldagem de Revestimentos com Ligas de Níquel Empregando o Processo TIG com Alimentação de Arame Frio”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, CE.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo sistemático de parâmetros de soldagem TIG com alimentação de arame frio para aplicação de revestimento de ligas de níquel (UNS N06625, UNS N06686 e UNS N10276) em substratos de aço C-Mn considerando a análise das características geométricas, econômicas e operacionais dos depósitos, de forma a adequar estes revestimentos para as indústrias do Setor de Petróleo e Gás Natural. As soldagens foram realizadas utilizando um robô industrial e um alimentador automático de arame frio. Foi realizado um estudo preliminar para determinar as condições iniciais para exploração dos parâmetros, em seguida realizado a soldagem de um fatorial completo. Em uma última exploração dos parâmetros de soldagem foi aplicado o Método Taguchi para realizar a análise de diversos fatores de controle com um número reduzido de experimentos. O perfil geométrico do cordão de solda foi levantado na seção transversal dos corpos de prova. Após obtenção dos resultados, foram feitos alguns ajustes de modo a realizar soldagens dos revestimentos. Os resultados mostraram que, o correto ajuste da Distância da Ponta do Arame a Peça (DPAP) influenciou na geometria e diluição do cordão de solda e na estabilidade do arco. Foi visto também que para obter menores níveis de diluição, a Distância da Ponta do Eletrodo a Peça (DPEP) depende do nível de energia utilizado, para menores energias utiliza-se menores DPEPs e, para maiores energias, maiores DPEPs devem ser utilizadas. Os níveis de diluição e reforço foram reduzidos com o uso do tecimento. A técnica da energia influenciou de forma significativa na geometria e diluição do cordão de solda. Para uma mesma energia de soldagem e, conseqüentemente velocidade de resfriamento e aporte térmico semelhantes, podem haver níveis distintos de diluição sem alterações metalúrgicas. O gás de proteção influenciou na diluição e no índice de convexidade (R/L) do cordão de solda, de uma maneira geral, a mistura de argônio e óxido nitroso apresentou a melhor condição para soldagem dos revestimentos. O ajuste da energia pela corrente de soldagem (Tipo I) apresentou melhor eficiência de deposição para baixa

energia, já para alta energia, o melhor ajuste se dá pela velocidade de soldagem (Tipo V). Para baixos níveis de diluição, o uso do tecimento reduz de maneira significativa os tempos e custos associados a realização dos revestimentos. Com os resultados obtidos foi possível realizar revestimentos de qualidade com baixos níveis de diluição (<10 %) através do processo TIG com alimentação de arame frio.

Palavras chaves: TIG, ligas de níquel, revestimento, arame frio, diluição, energia de soldagem, comprimento de arco.

Miranda, E. C., 2008, "Exploratory study of coating welding parameters with nickel alloys using GTAW with cold wire feeding". M.Sc. Thesis, Federal University of Ceará, CE.

ABSTRACT

The aim of this work was to carry out a systematic study of GTAW welding parameters with feeding of cold wire for covering application of nickel alloys (UNS N06625, UNS N06686 and UNS N10276) in substrate of steel C-Mn considering the analysis of geometric, economic and operational characteristics of layers, form to adjust these coverings for the industries of the Sector of Oil and Natural Gas. The weldings were carried out employing an industrial robot and an automatic feeder of cold covered. A preliminary study was carried out to determine the initial conditions to exploration of the parameters, after that it was carried through the welding of a complete factorial. In a last exploration of welding parameters was applied the Taguchi Method to carry out to the analysis of diverse factories of control with a reduced number of experiments. The geometric profile of weld fillet was raised in the transversal section of the test specimen. After it obtained the results, some adjustments were made to carry out weldings of coverings. The results showed that the correct adjustments of the Distance of the Tip of the Wire Workpiece (DTWW) influenced in the geometry and dilution weld fillet and in the arc stability. It was also seen that to obtain minors levels of dilution, a Distance of the Tip of the Electrode Workpiece (DTEW) depends of the level of energy employed, for lesser energies use lesser DTEWs and, for higher energies, higher DTEWs must be used. The levels of dilution and reinforcement were reduced with the use of the weaving technique. The technique of the energy influenced of significant way in the geometry and dilution of the weld fillet. For the same energy welding and, consequently nearly equal cooling rate and heat in the sample, it can have diverse levels of the dilution without metallurgical alterations. The protection gas influenced in the dilution and the convexity index (R/L) of the weld metal, in a general way, the mixture of argon and nitrous oxide presented the best condition for welding of coverings. The adjustment of the energy for current welding (Type I) presented the best efficiency of for low energy, already for high energy, the best adjustment is for welding speed (Type V). For low levels of dilution, the use of weaving technique reduced of significant way the times and associates costs accomplishment of coverings. With the results obtained it was possible to carry out coverings of quality with low levels of dilution (<10 %) trough of GTAW process with feeding of cold wire.

Keywords: GTAW, Nickel alloys, coating, cold wire, dilution, welding energy, arc length.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	I
ÍNDICE DE TABELAS	IV
1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Ligas a Base de Níquel.....	4
3.1.1. Classificação	5
3.1.2. Efeito dos Elementos de Liga	8
3.1.3. Propriedades Físicas	9
3.1.4. Propriedades Mecânicas.....	9
3.1.5. Soldabilidade.....	10
3.1.6. Revestimentos	11
3.1.7. As ligas INCONEL 625 e 686, e Hastelloy 276.....	13
3.2. Soldagem TIG.....	14
3.2.1. Introdução	14
3.2.2. Variáveis do Processo	16
3.2.3. Equipamento	20
3.3. O Processo de Soldagem TIG com Alimentação Automática de Arame.....	24
3.3.1. Tipos de Alimentação Automática de Arame	24
3.3.2. Aplicações.....	25
3.3.3. Equipamentos	26
3.3.4. Alimentador Automático de Arame	27
3.3.5. Vantagens.....	28
3.4. Características operacionais	28
3.4.1. Características econômicas	28
3.4.2. Características geométricas do cordão de solda	29
3.5. Método Taguchi.....	32
3.5.1. Introdução	32
3.5.2. Arranjo Ortogonal.....	34

3.5.3.	Planejamento da matriz experimental pela utilização de um arranjo ortogonal	34
3.5.4.	Uso do modelo aditivo como uma aproximação	35
3.5.5.	Funções Objetivas (η)	37
3.5.5.1.	Sinal/ Ruído	37
3.5.6.	Experimentação e Análise	39
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1.	Materiais	40
4.1.1.	Metais de base e consumíveis de soldagem	40
4.1.2.	Equipamentos Utilizados	41
4.2.	Metodologia	42
4.2.1.	Etapa 1 – Ensaios preliminares	43
4.2.2.	Etapa 2 – Ensaios Definitivos	45
4.2.3.	Etapa 3 – Soldagem de revestimentos	52
4.2.3.1.	Avaliação dos resultados	53
5.	ETAPA 1 - ENSAIOS PRELIMINARES	54
5.1.	Posição de Alimentação de Arame	54
5.2.	Técnica da Energia de Soldagem (TE)	55
5.3.	Variação da DPEP	55
5.4.	Variação da DPAP e do ângulo de alimentação do arame	56
5.5.	Considerações Finais	56
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
6.1.	Etapa 2 – Ensaios Definitivos	57
6.1.1.	Soldagem Utilizando o Eletrodo ERNiCrMo-3 em um Fatorial Completo	57
6.1.2.	Aplicação do Método Taguchi	103
6.1.3.	Custos relacionados à soldagem do Fatorial Completo e Método Taguchi	121
6.2.	Etapa 3 - Soldagem de Revestimentos	124
7.	CONSIDERAÇÕES DOS PRINCIPAIS RESULTADOS	126
8.	CONCLUSÕES	128
9.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	129
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de soldabilidade ilustrando a região soldável do processo TIG em liga Inconel 718, segundo (Dye, 2001).....	11
Figura 2. Detalhe da região do arco (Modenesi, 2006).	15
Figura 3. Gráfico de tensão / corrente para fonte pulsada (Bracarense, 2000).	21
Figura 4. Direcionador do arame para o arco.....	26
Figura 5. Desenho esquemático da tocha TIG com suporte adaptador.	27
Figura 6. Seção transversal de um cordão de solda.	29
Figura 7: Medida da diluição na seção transversal de um cordão de (a) um cordão e (b) uma solda de topo (Modenesi, 2005).	31
Figura 8: Influência de diferentes fatores na diluição.	31
Figura 9. Curva sem interações.....	36
Figura 10. Curva com interações sinérgica.	36
Figura 11. Curvas com interação anti-sinérgica	36
Figura 12. Tocha de soldagem com sistema para ajuste do arame.....	42
Figura 13: Robô industrial.....	42
Figura 14. Fluxograma das etapas realizadas neste trabalho.....	43
Figura 15: Desenho esquemático de extração das amostras	44
Figura 16: Representação esquemática das dimensões geométricas das seções transversais dos cordões de solda.	45
Figura 17. Desenho esquemático do ângulo de alimentação.....	46
Figura 18. Desenho esquemático de sobreposição de camadas.....	52
Figura 19: Seção transversal das amostras soldadas na condição CC1, CC2, CC3 e CC4 com DPEP de 6 mm.	61
Figura 20. Seção transversal das amostras soldadas na condição CC5 e CC6 com DPEP de 6 mm.....	62
Figura 21. Seção transversal das amostras soldadas na condição CC2 com DPEP de 10 mm.....	62
Figura 22. Seção transversal das amostras soldadas nas condições CC3, CC4, CC5 e CC6 com DPEP de 10 mm.	63
Figura 23. Seção transversal das amostras soldadas nas condições CC2, CC3 e CC5 com DPEP de 14 mm; a) sem tecimento; b) com tecimento.....	64
Figura 24. Seção transversal das amostras soldadas na condição CC6 com DPEP de 14 mm.....	65
Figura 25. Influência do Tecimento sobre o Reforço do Cordão de Solda.....	66

Figura 26. Influência do Tecimento sobre a Largura do Cordão de Solda.	67
Figura 27. Influência do Tecimento sobre a Penetração.	67
Figura 28. Influência do Tecimento sobre a Diluição.	68
Figura 29. Influência do Tecimento sobre a razão Reforço/Largura.	68
Figura 30. Efeito do Tecimento sobre o produto da Diluição pela razão Reforço/Largura.	69
Figura 31. Influência da energia sobre o reforço do cordão de solda.	70
Figura 32. Influência da energia sobre a largura do cordão de solda.	71
Figura 33. Influência da energia sobre a penetração.	72
Figura 34. Influência da energia sobre a diluição.	72
Figura 35. Influência da energia na razão reforço/largura (R/L).	73
Figura 36. Influência da energia sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura.	73
Figura 37. Influência da técnica da energia sobre o reforço do cordão de solda.	75
Figura 38. Influência da técnica da energia sobre a largura do cordão de solda.	75
Figura 39. Influência da técnica da energia sobre a penetração.	76
Figura 40. Influência da técnica da energia sobre a diluição.	77
Figura 41. Influência da técnica da energia sobre a razão reforço/largura.	78
Figura 42. Influência da técnica da energia sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura.	78
Figura 43. Influência da DPEP sobre o reforço do cordão de solda.	80
Figura 44. Influência da DPEP sobre a largura do cordão de solda.	80
Figura 45. Influência da DPEP sobre a penetração.	81
Figura 46. Influência da DPEP sobre a diluição.	81
Figura 47. Influência da DPEP sobre a razão reforço/largura.	82
Figura 48. Influência da DPEP sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura.	83
Figura 49. Influência de alguns fatores de controle sobre o reforço do cordão de solda.	85
Figura 50. Influência de alguns fatores de controle sobre a largura do cordão de solda.	86
Figura 51. Influência de alguns fatores de controle sobre a penetração.	86
Figura 52. Influência de alguns fatores de controle sobre a diluição.	87
Figura 53. Influência de alguns fatores de controle sobre a razão reforço/largura.	88
Figura 54. Influência de alguns fatores de controle sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura.	88
Figura 55. Seção transversal cordões de solda com diferentes DPAPs utilizando energia de 9,6 kJ/cm.	91
Figura 56. Seção transversal cordões de solda com diferentes DPAPs utilizando energia de 12,8 kJ/cm.	92
Figura 57. Influência da DPAP sobre a largura do cordão de solda.	93
Figura 58. Influência da DPAP sobre a razão reforço/largura.	94

Figura 59. Influência da DPAP sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura.....	95
Figura 60. Influência de alguns fatores de controle sobre o reforço do cordão de solda.	96
Figura 61. Influência de alguns fatores de controle sobre a largura do cordão de solda.	96
Figura 62. Influência de alguns fatores de controle sobre a penetração.....	97
Figura 63. Influência de alguns fatores de controle sobre a diluição.....	98
Figura 64. Influência de alguns fatores de controle sobre a razão reforço/largura.	98
Figura 65. Influência de alguns fatores de controle sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura.	99
Figura 66. Influência da técnica da energia de soldagem sobre a taxa de fusão.....	101
Figura 67. Influência da técnica da energia de soldagem sobre a taxa de deposição.	101
Figura 68. Amostras soldadas utilizando corrente pulsada.....	102
Figura 69. Fotografia do ensaio no qual o cordão de solda não aderiu ao metal base.....	104
Figura 70. Influência dos fatores de controle analisados sobre a diluição.	108
Figura 71. Influência dos fatores de controle analisados sobre a razão R/L.....	108
Figura 72. Influência do tecimento sobre a diluição.	111
Figura 73. Influência da técnica da energia de soldagem sobre a diluição.	112
Figura 74. Influência da DPEP e da energia de soldagem sobre a diluição.....	112
Figura 75. Influência do gás de proteção e da energia de soldagem sobre a diluição.....	113
Figura 76. Influência do tecimento sobre a razão R/L.	114
Figura 77. Influência da técnica da energia sobre a razão R/L.	115
Figura 78. Influência da DPEP e da energia sobre a razão R/L.....	115
Figura 79. Influência do gás de proteção e da energia sobre a razão R/L.....	116
Figura 80. Influência da técnica da energia sobre a taxa de fusão de arame.	117
Figura 81. Influência do gás de proteção e da energia sobre a taxa de fusão do arame....	118
Figura 82. Influência da técnica da energia sobre a taxa de deposição de arame.	119
Figura 83. Influência do gás de proteção e da energia sobre a taxa de deposição do arame.	119
Figura 84. Influência da técnica da energia sobre a eficiência de deposição de arame.	120
Figura 85. Influência do gás de proteção e da energia sobre a eficiência de deposição de arame.....	120
Figura 86. Acabamento superficial da amostra soldada com a condição R1.....	124
Figura 87. Seção transversal das camadas soldadas com as condições: (a) R1; (b) R2; (c) R3.	125

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Composição química de ligas de níquel comerciais típicas (AWS v3, 1991).	6
Tabela 2. Sistemas usuais para ligas de níquel.	7
Tabela 3. Classificação dos eletrodos baseada em sua composição química. Adaptado do Welding Handbook, volume 2 (1991).	22
Tabela 4: Matriz ortogonal L8.	35
Tabela 5: Composição química do metal de base e arame eletrodo segundo o fabricante. .	40
Tabela 6. Designação dos níveis referente aos fatores de controle.	46
Tabela 7. Parâmetros para soldagem do fatorial completo utilizando o eletrodo ERNiCrMo-3 com DPAP constante.	47
Tabela 8. Parâmetros para soldagem do fatorial completo utilizando o eletrodo ERNiCrMo-3 com DPEP constante.	48
Tabela 9. Parâmetros de soldagem utilizando corrente pulsada.	49
Tabela 10: Designação dos fatores de controle para o método taguchi	50
Tabela 11: Parâmetros de soldagem referente a planilha L18 gerados pelo método taguchi	50
Tabela 12. Parâmetros de soldagem referente aos ensaios complementares do Método Taguchi.	50
Tabela 13: Parâmetros de soldagem utilizando corrente contínua	55
Tabela 14. Resultados obtidos durante os ensaios preliminares com a variação da DPAP. 56	
Tabela 15. Resultado das soldagens do fatorial completo com corrente contínua.	57
Tabela 16. Influência do tecimento sobre as variáveis de resposta.	65
Tabela 17. Influência da energia sobre as variáveis de resposta.	70
Tabela 18. Influência da técnica da energia sobre as variáveis de resposta.	74
Tabela 19. Influência da DPEP sobre os fatores de controle.	79
Tabela 20. Resultado das soldagens com variação da DPAP.	89
Tabela 21. Influência da DPAP sobre os fatores de controle.	93
Tabela 22. Influência dos fatores de controle sobre as características econômicas do processo.	100
Tabela 23: Designação dos fatores de controle para o método taguchi	104
Tabela 24. Resultados dos ensaios da planilha L18 utilizando o Método Taguchi.	104
Tabela 25. Influência dos fatores de controle sobre a diluição e a razão R/L.	106
Tabela 26. Condições indicadas pelo taguchi.	109
Tabela 27. Ensaios complementares do Taguchi com os respectivos resultados.	109
Tabela 28. Resultados de diluição e razão R/L previstos pelo Método Taguchi.	110
Tabela 29. Custos referentes à soldagem do fatorial completo.	122

Tabela 30. Custos referentes a soldagem empregando o Método Taguchi.....	123
Tabela 31. Parâmetros e resultados das soldagens de revestimento.....	124

Capítulo I

1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

As jazidas de petróleo leve no Brasil estão acabando e ao mesmo tempo cresce a descoberta de grandes jazidas de petróleo pesado. Torna-se portanto, atrativo o investimento da indústria de refino em poços de petróleo pesado, embora possuam altos níveis de ácidos naftênicos, enxofre e outros componentes corrosivos. Estas características contidas no petróleo pesado são um grande problema para as unidades de refino da PETROBRAS, pois anteriormente só trabalhavam com petróleos leves, ou seja, todos os seus equipamentos não foram desenvolvidos para receberem petróleo pesado. Por isto, as unidades de refino de petróleo começaram a apresentar sérios problemas de corrosão, devido ao contato dos equipamentos com substâncias corrosivas em temperaturas elevadas de operação. Portanto, isso implica em uma queda de resistência por parte dos equipamentos, fazendo com que os mesmos se desgastem mais rapidamente, causando paradas inesperadas, para manutenção. Além de desgastes causados nos equipamentos, estas paradas acarretam um grande prejuízo para a PETROBRAS além de atrasos no fornecimento de seus produtos.

Por estes motivos, a indústria do petróleo vem buscando cada vez mais soluções para minimizar o desgaste em seus equipamentos, o que resulta na necessidade cada vez maior de fabricar equipamentos que combinem ótimas propriedades mecânicas com excelente resistência à corrosão, principalmente em altas temperaturas. Alguns materiais apresentam estas características como os aços inoxidáveis ferríticos, aços inoxidáveis austeníticos, aços inoxidáveis martensíticos, aços inoxidáveis duplex, aços inoxidáveis endurecidos por precipitação e as ligas de níquel. Atualmente, os materiais mais utilizados são os aços inoxidáveis devido ao seu menor custo quando comparado com as ligas de níquel, todavia, as ligas de níquel apresentam uma excelente resistência à corrosão sob tensão e, por isso, são muito utilizadas na indústria petroquímica.

A fabricação de equipamentos empregando integralmente estas ligas é inviável devido ao seu elevado custo. Geralmente, os equipamentos são fabricados com materiais menos nobres como aços baixa liga e, em seguida, revestidos com ligas que apresentem uma combinação de excelentes propriedades mecânicas e alta resistência à corrosão para resistirem a alta corrosão naftênica.

A aplicação de revestimentos em equipamentos industriais pode ser na forma de “clad”, “lining” e “overlay”. Esta última é realizada através da deposição de uma camada de material com características desejáveis (resistência à corrosão e resistência ao desgaste)

sobre um substrato menos nobre. O revestimento destes equipamentos pode ser feito pelos principais processos de soldagem, tais como os processos MIG/MAG, arame tubular, arco submerso, TIG, dentre outros.

Um dos processos que pode ser empregado para soldagem de revestimento com ligas de níquel é o TIG com alimentação automática de arame frio. Este processo, além de garantir alta qualidade do depósito devido a alta estabilidade do arco, apresenta melhor controle de energia agregado com baixa diluição do depósito. Estas características do TIG com alimentação de arame frio viabilizam sua aplicação para revestimento de componentes ou peças das indústrias do Setor de Petróleo e Gás Natural.

A alta estabilidade do arco minimiza a possibilidade de defeitos entre passes e assegura um bom acabamento do revestimento.

O controle da energia do TIG possibilita a aplicação de revestimentos em substratos sujeitos a transformações metalúrgicas indesejáveis.

A baixa diluição é necessária para evitar a redução das propriedades dos revestimentos. Diluições superiores a 10 % na superfície do revestimento aumentam o teor de ferro e reduzem a resistência a corrosão das ligas de níquel.

É relevante acrescentar que a alimentação de arame frio no processo TIG possibilita uma maior liberdade de ajuste da taxa de depósito e da energia de soldagem.

Em função das características expostas, a soldagem TIG com alimentação de arame frio pode representar uma boa alternativa para aplicação de revestimento por soldagem “overlay” empregando ligas de níquel em componentes das indústrias do Setor de Petróleo e Gás Natural.

No entanto, para que este processo seja empregado adequadamente para atender as exigências das indústrias do Setor de Petróleo e Gás Natural é necessário um estudo voltado para exploração sistemática dos parâmetros de soldagem, haja vista a considerável escassez de pesquisas sobre o tema, principalmente quando se consideram diferentes ligas de níquel (UNS N06625, UNS N06686 e UNS N10276), gases de proteção e técnicas de depósitos.

O estudo adequado destes novos revestimentos torna-se necessário não só pelo fato de se revestir novos equipamentos, mas também com intuito de fazer reparos nos equipamentos já existentes e com isso prolongar um pouco mais sua vida útil.

Acredita-se que estes fatos apresentados sejam suficientes para justificar o desenvolvimento deste trabalho com intuito de analisar o revestimento através da técnica “weld overlay”.

Capítulo II

2. OBJETIVOS

Objetivo geral do trabalho é:

- Realizar um estudo sistemático de parâmetros de soldagem TIG com alimentação de arame frio para a aplicação de revestimento de ligas de níquel (UNS N06625, UNS N06686 e UNS N10276) em substratos de aço C-Mn, considerando a análise das características geométricas, econômicas e operacionais dos depósitos.

Especificando, pretende-se:

- Determinar os parâmetros mais adequados para a realização dos revestimentos com o processo TIG com alimentação de arame frio, considerando um limite de diluição de 10 % para adequar estes revestimentos para as indústrias do Setor de Petróleo e Gás Natural.

Capítulo III

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Ligas a Base de Níquel

O níquel é utilizado desde o início da civilização. Análises químicas de artefatos mostram que armas, ferramentas e moedas continham níquel em variadas proporções. No século XVIII, mineradores alemães descobriram que o material branco fundido por eles era muito duro para ser martelado para alguma utilidade e pensaram que o material era amaldiçoado, assim o apelidaram de “Old Nick Copper” ou “Kupfer Nickel”. Nesse período, Cronstedt, trabalhando para o departamento de minas da Suíça, separou e identificou esse novo elemento químico que chamou de níquel. O grande impulso para o processamento do níquel ocorreu com a descoberta dos aços ligados ao níquel para uso em baixas temperaturas e sua possível utilização em armaduras para navios, levando ao desenvolvimento de novos métodos de extração. Com o passar dos anos a tecnologia foi se renovando e, como consequência, uma série de novas ligas foram desenvolvidas. Algumas são destacadas pela ASM (v2, 1990), conforme breve resumo apresentado a seguir:

- Descoberta em 1905 da liga Monel cobre–níquel resistente a atmosferas altamente corrosivas, resistente à água do mar e várias soluções ácidas e alcalinas.
- Trabalho de Marsh que levou ao desenvolvimento das ligas Nimonic (Ni-Cr+Ti) utilizadas para resistência a fluência, resistência e estabilidade em alta temperatura.
- Trabalhos de Haynes em ligas binárias Ni-Cr e Co-Cr utilizadas para resistência à oxidação em alta temperatura e ao desgaste.
- Trabalho de Paul D. Merica, com a utilização do níquel em ferro fundido, bronze e aços, e que descobriu ainda que Al e Ti levam a formação de endurecimento por precipitação nas ligas de níquel.
- Adições de ferro-cromo (70Cr-30Fe) ao níquel para criar as ligas do tipo Inconel, utilizadas por sua resistência mecânica, a oxidação e carburização em alta temperatura.
- Desenvolvimento de trabalhos em 1920 com ligas Ni-Mo, que levaram ao desenvolvimento do Hastelloy, utilizado para resistência a corrosão.
- A introdução de nova família de ligas Fe-Ni-Cr (Incoloy) com teores menores de Ni(20-40).

- Uso da Metalurgia do Pó que levou à introdução das ligas endurecidas por dispersão de óxidos.
- Novas tecnologias de fundição que produziram uma solidificação direcional e desenvolvimento das superligas monocristalinas, utilizadas em paletas de turbinas.

As ligas de níquel são altamente resistentes à corrosão, e em muitas condições ambientais podem ser superiores aos aços inoxidáveis. Uma das razões é que diversos elementos químicos possuem uma maior solubilidade no níquel que no ferro. Por isso, várias ligas são desenvolvidas, com as mais diversas características. O limite de solubilidade do cromo no níquel é de 35 a 40 %, e por volta de 20 % para o molibdênio. A adição desses elementos, como cobre, cromo, molibdênio, ferro e cobalto não têm efeitos adversos a soldabilidade, e em muitos casos podem ser benéficos (AWS v3, 1996).

Uma característica importante é que as ligas de níquel em geral mantêm suas propriedades em temperaturas elevadas, ou até mesmo aumentam sua resistência. Desta forma, essas ligas são utilizadas na indústria petroquímica em fornos de destilação, vasos de pressão e tubos de processamento (Sims, 1972). O fator limitante, que impede o uso dessas ligas em larga escala é o custo, de forma que são aplicadas normalmente quando outros metais não fornecem as propriedades desejadas. No entanto, quando critérios de custos referentes à vida útil dos materiais são levados em consideração, a utilização das ligas de níquel de forma apropriada pode permitir uma melhor relação custo-benefício (Plant, 2000). Estas ligas podem também ser utilizadas como revestimento depositados sobre aço comum de menor custo.

3.1.1. Classificação

Para melhorar as propriedades mecânicas em altas temperaturas, os engenheiros de materiais escolhem vários tipos de mecanismos de aumento de resistência como o endurecimento por solução sólida, endurecimento por precipitação, endurecimento por dispersão de óxido e/ou endurecimento por carbonetos (Henderson, 2006; Agarwal, 2000 a). Dessa forma, de acordo com as características de fabricação das ligas, podem-se classificar as superligas de níquel em (AWS v3, 1996):

Endurecidas por solução sólida: adições de alumínio, cobalto, cobre, cromo, ferro, molibdênio, titânio, tungstênio e vanádio contribuem para o aumento de resistência da matriz γ através de solução sólida. Essas ligas geralmente não apresentam maiores problemas de soldabilidade, porém dependendo da liga e da forma de resfriamento, pode-se levar à

precipitação de compostos nos contornos de grão e na matriz, que em alguns casos são prejudiciais.

Endurecidas por precipitação: são reforçadas por um controle de temperatura, que resulta na precipitação de uma segunda fase conhecida como γ' . Cada liga possui um ciclo térmico ótimo para promover o máximo de resistência. Algumas ligas fundidas já apresentam essa fase após a solidificação.

Ligas fundidas: projetadas especificamente para o processo de fundição, podem apresentar ambos os mecanismos de endurecimento, por solução sólida e por precipitação. Porém, como geralmente possuem significativa quantidade de silício, para melhorar a fluidez do metal fundido, apresentam problemas de soldabilidade e normalmente não são soldadas por processo com arco elétrico.

Endurecidas por dispersão de óxido: podem ser enrijecidas a níveis elevados através da dispersão de partículas de finos óxidos refratários (ThO_2) pela matriz. Isto é feito pelas técnicas de metalurgia do pó durante a fabricação das ligas. A soldagem por fusão dessas ligas é evitada, sob pena de enfraquecer o metal de solda pela aglomeração das partículas de óxido. Essa classificação e as ligas que as compõe, com suas respectivas composições químicas, são mostradas na Tabela 1 (AWS v3, 1996).

Tabela 1. Composição química de ligas de níquel comerciais típicas (AWS v3, 1996).

Ligas	No UNS	Composição, peso %														
		Ni	C	Cr	Mo	Fe	Co	Cu	Al	Ti	Nbc	Mn	Si	W	B	Outros
Níquel puro comercial																
200	N02200	99,5	0,08	-	-	0,2	-	0,1	-	-	-	0,2	0,2	-	-	-
201	N02201	99,5	0,01	-	-	0,2	-	0,1	-	-	-	0,2	0,2	-	-	-
Ligas endurecidas por solução sólidas																
400	N04400	66,5	0,2	-	-	1,2	-	31,5	-	-	-	1	0,2	-	-	-
X	N06002	47	0,10	22	9	18	1,5	-	-	-	-	1	1	0,6	-	-
NICR80	N06003	76	0,1	20	-	1	-	-	-	-	-	2	1	-	-	-
NICR60	N06004	57	0,1	16	-	BAL.	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-
IN102	N06102	68	0,06	15	3	7	-	-	0,4	0,6	3	-	-	3	0,005	0,03Zr,0,02Mg
600	N06600	76	0,08	15,5	-	8	-	0,2	-	-	-	0,5	0,5	-	-	-
617	N06617	52	0,07	22	9	1,5	12,5	-	1,2	0,3	-	0,5	0,5	-	-	-
625	N06625	61	0,05	21,5	9	2,5	-	-	0,2	0,2	3,6	0,2	0,2	-	-	-
686	N06686	58	0,005	20,5	16,3	1,5	-	-	-	-	-	-	-	3,8	-	-
690	N06690	60	0,02	30	-	9	-	-	-	-	-	0,5d	0,5d	-	-	-
825	N08825	42	0,03	21,5	3	30	-	2,25	0,1	0,9	-	0,5	0,25	-	-	-
C-276	N10276	57	0,01d	15,5	16	5	2,5d	-	-	0,7d	-	1d	0,08d	4	-	0,35Vd
C-22	N06022	56	0,010d	22	13	3	2,5d	-	-	-	-	0,5d	0,08d	3	-	0,35Vd

Continuação da Tabela 1.

Ligas	No UNS	Composição, peso %															
		Ni _b	C	Cr	Mo	Fe	Co	Cu	Al	Ti	Nb _c	Mn	Si	W	B	Outros	
Ligas endurecidas por solução sólidas																	
G-30	N06030	43	0,03d	30	5,5	15	5d	2	-	-	1,5d	1,5d	1d	2,5	-	-	
Ligas endurecidas por precipitação																	
Waspalloy	N07001	58		0,08	19,5	4	-	13,5	-	1,3	3	-	-	-	-	0,006	0,06Zr
R-41	N07041	55		0,10	19	10	1	10	-	1,5	3	-	0,05	0,1	-	0,005	-
718	N07718	52,5		0,04	19	3	18,5	-	-	0,5	0,9	5,1	0,2	0,2	-	-	-
706	N09706	41,5		0,03	16	-	40	-	-	0,2	1,8	2,9	0,2	0,2	-	-	-
901	N09901	42,5		0,05	12,5	-	36	6	-	0,2	2,8	-	0,1	0,1	-	0,015	-
Ligas endurecidas por dispersão de óxidos																	
TD Nickel	N03260	98		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 Th 02
TD NICR	N07754	78		-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 Th 02
Ligas fundidas																	
HW	N08001	60		0,5	12	-	25	-	-	-	-	-	2,0	2,5	-	-	-
HX	N06006	66		0,5	17	-	15	-	-	-	-	-	2,0	2,5	-	-	-
CY-40	N06040	72		0,4d	16	-	11d	-	-	-	-	-	1,5	3,0	-	-	-
CZ-100	N02100	95		1,0d	-	-	3d	-	1,25d	-	-	-	1,5	2,0	-	-	-
M-35-1	N24135	68		0,35d	-	-	3,5d	-	30	-	-	-	1,5	1,25	-	-	-

- Algumas dessas ligas possuem nomes registrados, podendo possuir composições similares com outras designações.
- Incluída pequena quantidade de cobalto, se não for especificado.
- Incluído tântalo (Nb+Ta)
- Valor Máximo

Outra forma usual de classificação das superligas de níquel é quanto aos principais elementos que estão presentes, com propriedades e aplicações específicas, essas ligas são divididas segundo a Tabela 2 (Agarwal, 2000 b).

Tabela 2. Sistemas usuais para ligas de níquel.

Sistema da liga	Algumas das principais ligas do sistema
<ul style="list-style-type: none"> Ni Ni-Cu Ni-Mo Ni-Si Ni-Fe Ni-Cr-Fe Ni-Cr-Fe-Mo-Cu Ni-Cr-Mo Ligas de alta temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> Níquel puro comercial, ligas 200/201 400, K-500 B, B-2, B-3, B-4, B-10 Ligas Ni-Si para fundição, liga SX, Lewmet, D-205 Invar 600, 601, 800, 800H, 800HT, 690 825, G, G-3, G-30 625, C-276, C-4, 22, 686, C-2000, Mat 21, 59 602CA, 45TM, 230, 625, X, 160, 214, 718, 617, 690, séries Nimonic e Udimet

3.1.2. Efeito dos Elementos de Liga

O **níquel puro** apresenta elevada solubilidade de elementos de liga, devido à estrutura cúbica de face centrada (CFC), isso faz com que vários elementos de liga possam ser adicionados ao metal puro, variando seu comportamento quanto a propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, de acordo com a quantidade de cada elemento de liga acrescentado. Os principais elementos de liga comumente adicionados e seus respectivos efeitos são:

Cromo (Cr) – A adição de cromo melhora a resistência à oxidação-corrosão em alta temperatura, mediante a formação de uma camada passivante do óxido Cr_2O_3 , que sendo estável e aderente, funciona como uma verdadeira barreira que impede o avanço da corrosão. Em teores inferiores a 20 % o cromo não contribui efetivamente para o aumento da resistência à corrosão das superligas de níquel em altas temperaturas. Somente acima deste teor a camada passivante de Cr_2O_3 adquire a espessura, a aderência, a densidade e a consistência necessárias para impedir o avanço dos átomos de oxigênio em difusão. Na faixa de 20 a 30 % de cromo a taxa de oxidação é constante e equivale a cerca de 10 % da taxa encontrada no níquel puro submetido às mesmas condições de oxidação (Brooks, 1982). Outra característica importante é a aderência da camada protetora de óxido. O metal e a camada de óxido possuem diferentes coeficientes de expansão térmica, e assim haveria a possibilidade de fratura frágil da camada de óxido devido às tensões térmicas, levando à separação da camada, se as temperaturas se alterarem em relação à temperatura de formação do óxido. Esta separação da camada de óxido exporia o metal à oxidação (corrosão) mais intensa, eliminando o efeito de passivação. Entretanto, foi observado que a camada de Cr_2O_3 é extremamente aderente, e assim a resistência à oxidação permanece mesmo nessas condições cíclicas (Brooks, 1982). O cromo está presente em teor de 21,5 %, 20,5% e 15,5% respectivamente para as ligas UNS N06625, UNS N06686 e UNS N10276.

Ferro (Fe) – Atua diretamente no mecanismo de resistência por solução sólida. Aumenta a solubilidade do Carbono no Níquel, melhorando assim a resistência a altas temperaturas (ASM Handbook, 1993b).

Molibdênio (Mo) – Aumenta a resistência à atmosferas ácidas não oxidantes, à corrosão localizada e a resistência à altas temperaturas. Participa da formação de carbonetos (ASM Handbook, 1993b – 1993c). As ligas UNS N10276 e UNS N06686 apresentam por exemplo um maior teor de molibdênio quando comparada com a liga UNS N06625.

Tungstênio (W) – Apresenta um comportamento similar ao Molibdênio no aumento da resistência a atmosferas ácidas não oxidantes e à corrosão localizada. Também atua no mecanismo de resistência por solução sólida. Devido ao fato de apresentar uma densidade atômica quase duas vezes maior que a do Molibdênio e ser um elemento mais raro na natureza, não é utilizados em grandes quantidades (ASM Handbook, 1993b). O tungstênio está presente nas ligas UNS N10276 e UNS N06686 (aproximadamente 4%) e ausente na liga UNS N06625.

Silício (Si) – Nas ligas comerciais é mantido em teores abaixo de 0,4%, por problemas de soldabilidade, e quando presente tem efeito desoxidante (Tancret, 2003).

Carbono (C) – precipita nos contornos de grão e limitam o deslizamento, favorecendo um aumento de resistência, no entanto deve ser mantido em teores baixos para evitar a formação de filmes, que são prejudiciais à resistência em temperaturas elevadas. O boro tem efeito similar ao carbono (Tancret, 2003).

3.1.3. Propriedades Físicas

O níquel puro possui densidade de $8,9 \text{ g/cm}^3$, ponto de fusão $1455 \text{ }^\circ\text{C}$, estrutura cristalina CFC (cúbica de face centrada). A densidade da maioria das superligas de níquel fica entre $7,79$ e $9,32 \text{ g/cm}^3$. A condutividade térmica do níquel puro é da ordem de $0,089 \text{ (W/mm}^2\text{)/(}^\circ\text{C/mm)}$, portanto superior à do ferro puro (CCC: cúbico de corpo centrado), que atinge somente $0,072 \text{ (W/mm}^2\text{)/(}^\circ\text{C/mm)}$. Porém a condutividade térmica das superligas é muito inferior, da ordem de 10 % desses valores, devido à adição de muitos elementos de liga em elevados teores. O ideal seria obter superligas com maior condutividade térmica, já que isso seria importante para dissipar calor e assim minimizar os gradientes de temperatura, reduzindo então as tensões térmicas e assim a tendência de ocorrer falha por fadiga térmica.

A expansão térmica nas superligas de níquel é menor do que nas ligas ferrosas austeníticas, e isso é importante do ponto de vista da aplicação em componentes que exijam estreitas tolerâncias dimensionais em serviço, além de um baixo coeficiente de expansão térmica contribuir para minimizar as tensões térmicas, minimizando assim a ocorrência de empenamento e fadiga térmica (Sims, 1972).

3.1.4. Propriedades Mecânicas

O principal motivo para as várias composições químicas das ligas de níquel é devido sua alta resistência mecânica até mesmo em altas temperaturas. A estrutura cristalina

compacta cúbica de face centrada (CFC) da matriz austenítica das ligas de níquel, apresenta grande capacidade de manter resistência à tração, à ruptura e boas propriedades de fluência em temperaturas homólogas muito mais altas do que as ligas de matriz cúbica de corpo centrado (CCC) devido a vários fatores, incluindo o excelente módulo de elasticidade e a alta difusividade que os elementos secundários possuem nesse tipo de matriz.

A alta solubilidade de muitos elementos de ligas na matriz austenítica e a capacidade de controle de precipitação de fases intermetálicas como a gama linha são de grande importância para proporcionar uma excelente resistência mecânica. O endurecimento também pode ser aumentado pela formação de carbeto e também pela dissolução de alguns elementos na matriz (endurecimento por solução sólida). Essa capacidade de endurecimento dessas ligas austeníticas de níquel, de cobalto e de ferro as torna adequadas para aplicações em unidades de refino, que exigem alta resistência mecânica em média e alta temperatura.

Entretanto, não apenas a resistência mecânica e dureza são importantes nesse tipo de aplicações. A ductilidade nas condições de serviço também é importante, e a maioria das superligas apresenta boa ductilidade. As ligas em geral apresentam também boa resistência ao impacto, à fadiga de alto e de baixo ciclo e à fadiga térmica (Sims, 1972).

3.1.5. Soldabilidade

A soldabilidade de um material é definida como “Capacidade de união do material por soldagem em dadas condições de fabricação, de modo que este desempenhe satisfatoriamente a função pretendida”. O desenvolvimento de defeitos dentro do metal de solda e adjacente a ZAC (Zona Afetada pelo Calor) depende de uma série de fatores associados com a forma e a microestrutura do material base, forma e composição do metal de adição utilizado durante o processo de soldagem.

A soldabilidade das ligas de níquel é sensível a elementos residuais como enxofre, chumbo, zircônio, boro, fósforo e bismuto. Estes elementos são praticamente insolúveis nas ligas de níquel e pode submeter-se a reações eutéticas na qual podem causar fissuração a quente durante a solidificação das soldas. Todas as ligas de níquel comercialmente importantes têm especificações limitadas abrangendo alguns desses elementos que são difíceis de controlar. Boro e zircônio têm pequenas quantidades adicionadas em certas ligas para melhorar sua resistência a altas temperaturas, no entanto a soldabilidade é reduzida. Os efeitos nocivos do enxofre sobre a ductilidade são controlados por meio de adição de pequenas quantidades de magnésio em produtos forjados (AWS, vol. 3, 1996).

Metais de solda de ligas a base de níquel são facilmente aplicados como revestimento em aço carbono, aço baixa liga e outros materiais. Antes de ocorrer a soldagem, a limpeza da superfície a ser revestida é extremamente importante. Todos os óxidos de materiais estranhos como óleos, tintas e fluidos de corte devem ser removidos antes da soldagem para garantir resultados livres de trincas e minimizar a possibilidade de inclusão de óxidos no metal de solda depositado. Estes materiais estranhos podem trazer elementos nocivos como: enxofre, chumbo, zircônio, boro, fósforo e bismuto, que não se diluem na liga e geram eutéticos de baixo ponto de fusão (ASM v.6, 1993).

Diversos estudos experimentais dos parâmetros de soldagem podem ser realizados para identificar condições adequadas à soldagem. Ensaio de soldabilidade são realizados para comparar o grau de susceptibilidade das ligas a esses defeitos, como o comumente utilizado, teste Varestraint. Modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para simular e produzir gráficos para auxiliar a seleção de parâmetros, conforme Figura 1 (Magalhães, 2008).

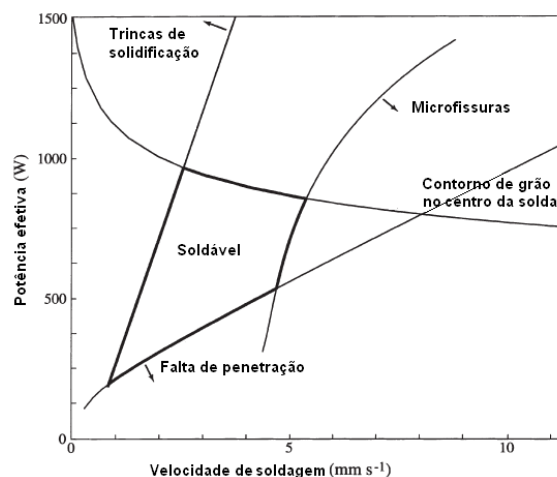


Figura 1. Mapa de soldabilidade ilustrando a região soldável do processo TIG em liga Inconel 718, segundo (Dye, 2001).

3.1.6. Revestimentos

Os revestimentos apresentam uma solução eficaz na busca de alternativas para solucionar o problema de resistência a corrosão. Os revestimentos metálicos foram desenvolvidos no começo da década de 1930 e uma das primeiras aplicações foi à utilização de níquel sobre aço carbono. Este composto era usado na construção de tanques de guerra. Outros produtos feitos de aço revestido foram então utilizados em fornos de destilação, vasos de processamento, ferramentas manuais, equipamentos de armazenamento e outros.

A maioria dos revestimentos metálicos são compostos de metais como aços inoxidáveis, ligas de níquel e ligas de cobre soldados sobre aços carbono e aços baixa liga. A espessura do revestimento geralmente varia entre 5 e 20% da espessura do substrato. A vantagem do revestimento é promover, a partir de um baixo custo relativo, os benefícios de materiais mais caros, que possuem características de resistência à corrosão, resistência à abrasão dentre outras.

O revestimento, geralmente, constitui-se de uma soldagem entre materiais dissimilares que exibem um fenômeno único de fissuração não observado em soldas entre materiais similares. De fato, trincas ou desprendimentos ao longo ou próximo da linha de fusão em soldas dissimilares ferrítico-austenítico vêm sendo um problema persistente por mais de 60 anos. Mesmo com persistentes e potenciais consequências, a evolução, a natureza e as regras da interface do metal de solda, em promover e propagar essas trincas, ainda não são bem compreendidas, assim como as implicações dos contornos de grãos e estruturas com respeito às taxas de propagação de trinca, fadiga, corrosão sob tensão, dentre outras (Nelson, 2000).

➤ **Revestimentos em Ligas de Níquel**

O Ni e suas ligas são aplicados como revestimentos soldados sobre aços carbono, aços ligas e outros materiais base. Todo óxido e materiais estranhos devem ser removidos da superfície antes de soldar o revestimento, para evitar reações eutéticas com elementos como S, P, Zr, Bo e Bi que levam a formação de trincas.

Ao se discutir as operações de revestimento com metais de adição de ligas de níquel frequentemente utilizados em tubos e vasos de pressão de refinarias, plantas químicas e geração de energia, começam-se com as soldagens de aço inoxidável autênico, da série 300, em ligas de aço baixo carbono. Inicialmente, os eletrodos do tipo E310 (25% Cr e 20% Ni) eram utilizados nestas aplicações. Eles eram fáceis de utilizar e o nível de diluição não era muito crítico. No entanto, muitas dessas soldas falhavam em serviços, pois microfissurações nesses depósitos completamente austeníticos se propagavam quando submetidos às tensões térmicas causadas por grandes diferenças entre os coeficientes de expansão térmica dos materiais dissimilares. Pela substituição do E310 pelo E309 (23% Cr e 13% Ni), um aço inoxidável com alguma ferrita, o problema da microfissuração foi resolvido, mas estas juntas são mais sensíveis à diluição. Como ainda continuam existindo grandes diferenças de coeficientes de expansão térmica, usuários têm concordado que grandes tensões e possivelmente fadiga térmica ao longo da interface da solda ocorrem quando são submetidos às operações de tratamento térmico ou às temperaturas de serviço da ordem de 320°C. Os metais de adição para a série Inconel 600 das ligas de níquel (72% Ni, 15% Cr e 8% Fe) possuem o coeficiente de expansão térmica mais próximo do substrato

ferrítico, reduzindo as tensões térmicas nas interfaces da solda. São também menos sensíveis a problemas de diluição e a microfissuração (Ebert, 2004).

➤ **Técnicas de Revestimentos**

As principais técnicas de revestimentos utilizadas são revestimentos na forma de clad, lining e overlay. Os revestimentos na forma de “clad” se devem a aplicação de uma fina camada sobre o material que está submetido ao ambiente corrosivo podendo ser de apenas um lado do equipamento ou de ambos os lados, esta última alternativa às vezes não é possível devido a limitações de dimensões e de acesso.

O revestimento por “lining” é utilizado apenas para reparos onde a corrosão já avançou de forma a comprometer o equipamento, fazendo então que seja efetuado o reparo naquele local com uma camada de material com melhor resistência a corrosão.

O revestimento por “overlay” é utilizado para revestir materiais, formando uma camada protetora contra corrosão. Geralmente esta camada é formada por ligas com excelente resistência a corrosão e ótimas propriedades mecânicas, sobre aços de baixo custo financeiro, como exemplo podemos citar os aços baixa liga.

A superposição de uma camada de ligas de níquel é facilmente aplicada na maioria dos aços estruturais. Para se obter um melhor resultado a diluição do ferro deve ser mínima. Quantidades excessivas de ferro durante a aplicação do revestimento pode comprometer a resistência a corrosão e causar fissuras na solda.

3.1.7. As ligas INCONEL 625 e 686, e Hastelloy 276

As principais limitações na soldagem das ligas de Ni estão relacionadas ao uso do elevado aporte térmico, pois podem produzir uma excessiva precipitação de carbonetos ou outros fenômenos metalúrgicos danosos que, algumas vezes, podem levar a formação de trincas ou perda de resistência à corrosão.

O desenvolvimento do Inconel 625 foi iniciado em 1950 com a finalidade de suprir a demanda de materiais de alta resistência para uso em plantas de energia super crítica e concluído com a venda comercial da liga em 1962 (EILSENTEIN et al, 1991).

Na soldagem do Inconel 625 podem ser utilizados praticamente todos os principais processos de soldagem a arco elétrico (TIG, eletrodo revestido, arco submerso, MIG etc).

As ligas a base de níquel, como INCONEL 625 são amplamente utilizadas em aplicações aeronáutica, aeroespacial, química, petroquímica e marítimas. O uso desta liga deve-se ao fato de sua boa combinação com a resistência ao escoamento, a tração, a

fluência, fácil fabricação, boa soldabilidade e boa resistência à corrosão quando submetida a altas temperaturas em ambientes agressivos (Eiselstein, 1991).

A Hastelloy C-276 é uma liga a base de níquel que, assim como a INCONEL 625 é amplamente utilizada na indústria aeroespacial, química e nuclear, devido sua alta resistência a corrosão e resistência em elevadas temperaturas (Cieslak et al., 1986).

A Liga C-276 a base de Ni-Cr-Mo-W apresenta excelente resistência à corrosão. Tem boa resistência e excelente ductilidade, boa soldabilidade e fácil fabricação. É altamente resistente a atmosferas oxidantes até 1040°C, e ao ataque a resistência a corrosão por pitting. A liga C-276 apresenta boa soldabilidade e geralmente não requer tratamento térmico posterior (Austral Wright Metals).

Depósitos de solda contendo altas razões Ni/Cr são mais susceptíveis à corrosão por compostos sulfurados quando submetidos à temperaturas acima de 370°C. Esta razão e o risco da corrosão tem sido diminuído pela seleção de metais de adição que contêm maior fração de Cr e algum Mo, como os eletrodos ERNiCrMo-3 e ERNiCrMo-4 usados respectivamente na união das ligas 625 (22% Cr e 9% Mo) e C-276 (15% Cr e 16% Mo) (Ebert, 2004).

A liga INCONEL 686 apresenta alto teor de níquel (Ni) e molibidênio (Mo) que oferece uma boa resistência em meios redutores. O molibidênio (Mo) e tungstênio (W) oferecem uma boa resistência a corrosão localizada por pitting. A quantidade de ferro (Fe) é controlada para garantir as propriedades do material. O baixo teor de carbono (C) ajuda a minimizar a precipitação nos contornos de grãos e manter a boa resistência a corrosão na Zona Afetada pelo Calor (ZAC) em juntas soldadas. A resistência em geral a corrosão por pitting e por frestas aumenta em ligas contendo Cr + Mo + W, e INCONEL 686 é bastante competitivo com estas ligas.

A liga INCONEL 686 oferece de uma forma geral uma excelente resistência a corrosão, como corrosão sob-tensão, corrosão por pitting, corrosão por frestas. Sua resistência a precipitação inergranular durante a soldagem mantém a resistência a corrosão na zona afetada pelo calor (ZAC) das juntas soldadas. (Special Metals)

3.2. Soldagem TIG

3.2.1. Introdução

O processo de soldagem Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) ou TIG, como é mais conhecido atualmente, é um processo de soldagem a arco elétrico que utiliza um arco entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a poça de soldagem. Conforme a Figura 2, a poça de fusão, o eletrodo e parte do cordão são protegidos pelo do gás de proteção que é

fornecido através do bocal da tocha. No processo, pode-se utilizar metal de adição ou não (solda autógena), e seu grande desenvolvimento deveu-se à necessidade de disponibilidade de processos eficientes de soldagem para materiais especiais, como o alumínio e magnésio, notadamente na indústria da aviação no começo da segunda Guerra Mundial. Assim, com o seu aperfeiçoamento, surgiu um processo de alta qualidade e relativo baixo custo, de uso em aplicações diversas (Bracarense, 2000).

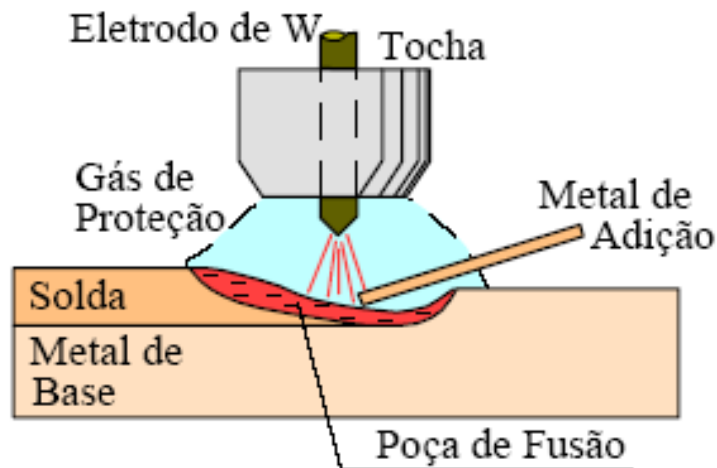


Figura 2. Detalhe da região do arco (Modenesi, 2006).

A soldagem TIG pode ser usada na forma manual ou mecanizada e é considerada um dos processos de soldagem a arco de melhor controle. Permite a execução de soldas de alta qualidade e excelente acabamento, particularmente em juntas de pequena espessura (inferior a 10 mm e mais comumente entre 0,2 e 3 mm). Seções de maior espessura podem ser soldadas, mas, neste caso, considerações econômicas tendem a favorecer processos com eletrodo consumível. A soldagem GTAW é mais utilizada para aços ligados, aços inoxidáveis e ligas não ferrosas. Um uso comum, para aços estruturais, é a execução de passes de raiz na soldagem de tubulações, com os outros passes sendo realizados com outro processo (SMAW ou GMAW) (Modenesi, 2006).

As principais vantagens e limitações do processo TIG são as seguintes:

- Produz soldas de qualidade superior, geralmente livres de defeitos;
- Está livre dos respingos que ocorrem em outros processos a arco;
- Pode ser utilizado com ou sem material de adição;
- Permite excelente controle na penetração de passes de raiz;
- Pode produzir excelentes soldas autógenas (sem metal de adição) a altas velocidades de soldagem;
- Permite um controle preciso das variáveis da soldagem;

- Pode ser usado em quase todos os materiais, inclusive materiais dissimilares;
- Permite um controle independente da fonte de calor e do material de adição.
- Taxas de deposição inferiores com processos de eletrodos consumíveis;
- Há necessidade de maior experiência do operador em relação ao SMAW e GMAW;
- Há dificuldade de manter a proteção gasosa em ambientes turbulentos;
- Pode haver inclusões de Tungstênio, no caso de haver contato do eletrodo com a poça de soldagem;
- Pode haver contaminação da solda, se o metal de adição não for adequadamente protegido;
- Há baixa tolerância a contaminantes no material de base ou adição;

3.2.2. Variáveis do Processo

As variáveis que determinam basicamente o processo são a tensão do arco, a corrente de soldagem, a velocidade de soldagem e o gás de proteção. Deve-se considerar que as variáveis não agem especificamente de forma independente, havendo forte interação entre elas (Bracarense, 2000).

➤ Tensão do arco

A tensão do arco, designação dada para a tensão entre o eletrodo e a peça, é fortemente influenciada por diversos fatores, como:

- Corrente do arco.
- Perfil da ponta do eletrodo.
- Distância da Ponta do Eletrodo a Peça (DPEP).
- Tipo de gás de proteção.

Existe uma relação direta entre a tensão e o comprimento do arco, a tensão é usada para controlar o processo, pois uma vez fixados diversos outros parâmetros, a tensão do arco possibilita o controle do comprimento do arco, que é mais difícil de monitorar. Por sua vez, o comprimento do arco afeta diretamente a largura da poça. Apesar disso, na maioria dos processos com chapas, o comprimento do arco desejado é o menor possível. Este controle do comprimento do arco pela tensão, entretanto, deve ser feito de maneira cuidadosa, observando-se outros parâmetros que também afetam a tensão como contaminação do eletrodo e do gás de proteção, alimentação imprópria do material de adição, mudanças de temperatura no eletrodo e erosão do eletrodo (Bracarense, 2000).

➤ **Corrente de Soldagem**

Em relação à corrente de soldagem pode-se considerar, de uma forma geral, que ela controla a penetração da solda, apresentando uma relação direta. Ainda assim, a corrente afeta também a tensão do arco, sendo que para um mesmo comprimento de arco, um aumento na corrente causará um aumento na tensão do arco. As soldagens com corrente contínua em eletrodo no pólo negativo oferecem elevada penetração e maiores velocidades de soldagem, enquanto a corrente alternada é especialmente eficaz quando na soldagem de materiais com óxidos refratários, como alumínio e magnésio, pois se pode realizar a chamada limpeza catódica, quando o eletrodo encontra-se no pólo positivo. A terceira opção, de corrente com eletrodo no pólo positivo, é pouco utilizada devido ao superaquecimento do eletrodo (Bracarense, 2000).

➤ **Velocidade de Soldagem**

A velocidade de soldagem afeta a penetração e principalmente a largura da solda. Sua grande importância reside no fato dela determinar o custo do processo por estar intimamente ligada à velocidade do processo. Entretanto, muitas vezes, a velocidade torna-se apenas uma consequência a partir da definição de padrões de qualidade e uniformidade (Bracarense, 2000).

Para soldagem de materiais sujeita a alterações metalúrgicas indesejáveis, a análise da velocidade de soldagem deve ser realizada em conjunto com a tensão e a corrente do arco para garantir uma energia de soldagem adequada para a aplicação.

➤ **Gás de Proteção**

Vários gases inertes poderiam ser usados na soldagem pelo processo TIG, mas somente o argônio e o hélio são usados comercialmente, porque são muito mais abundantes e muito mais baratos do que os outros gases inertes (Lucas 1990, Gerken 1995).

Argônio e hélio ou mistura destes dois gases são os tipos de gases inertes mais comuns utilizados para proteção. Misturas de argônio e hidrogênio são utilizadas para aplicações especiais. Dependendo do volume utilizado, esses gases podem ser fornecidos em cilindros ou como líquido em tanques isolados. O líquido é vaporizado e escoado para pontos dentro da planta, eliminando assim o uso de cilindros (AWS v2, 1991).

O argônio é um gás monoatômico inerte com peso molecular de 40. O argônio é obtido a partir da atmosfera pela separação de ar liquefeito. Argônio para soldagem de qualidade é refinado até uma pureza mínima de 99,95 %. Isso é aceitável para soldagem TIG da maioria dos metais, exceto os refratários e reativos, para esses a pureza mínima é

de 99,997 %. Frequentemente tais metais são fabricados em câmaras a partir dos quais qualquer vestígio de ar foi retirado, para que possa ser iniciada a operação de soldagem. O argônio é utilizado mais extensivamente que o hélio devido as seguintes vantagens (AWS v2, 1991).

- Ação de arco mais suave.
- Menor penetração.
- Ação de limpeza na soldagem de alguns materiais como alumínio e magnésio.
- Menor custo.
- Necessidade de menor quantidade de fluxo para uma boa soldagem.
- Início e manutenção do arco mais fáceis.

A menor penetração do arco protegido com argônio é particularmente escolhida em soldagem manual de chapas finas, devido a seu menor poder de penetração quando comparado com outros gases. Esta mesma característica é vantajosa em soldagem na posição vertical e sobrecabeça, devido à tendência do escorrimento de metal de solda (AWS v2, 1991).

O hélio é um gás monoatômico inerte, muito leve, com peso atômico de 4. Ele é obtido pela separação do gás natural. Hélio de qualidade para soldagem é refinado a uma pureza de pelo menos 99,99 % (AWS v2, 1991).

Para determinados valores de corrente de soldagem e comprimento de arco, o hélio transfere mais calor para a peça do que o argônio. O maior aporte térmico do arco utilizando hélio pode ser vantajoso para união de metais de alta condutividade térmica, e para aplicações com velocidades de soldagem elevadas. Também o gás hélio é utilizado mais frequentemente que o argônio para chapas de maior espessura. Misturas de argônio e hélio podem ser utilizadas quando um balanço entre as características de ambos é desejada (AWS v2, 1991).

O principal fator que influencia a eficácia da proteção é a densidade do gás. O argônio é aproximadamente quatro terços mais pesado que o ar, e dez vezes mais pesado que o hélio. Após o argônio deixar o bocal da tocha o mesmo forma uma camada sobre a área da solda. Como o hélio é mais leve o mesmo tende a subir ao redor do bocal. Trabalhos experimentais mostraram que para produzir uma proteção eficaz equivalente, o fluxo de hélio deve ser duas ou três vezes maior do que o de argônio. Essa mesma relação geral é verdadeira para misturas de argônio e hélio, particularmente para aquelas com elevado teor de hélio (AWS v2, 1991).

Uma característica importante desses gases é a relação corrente x voltagem do arco em argônio e em hélio. Em correntes elevadas para comprimentos de arcos equivalentes, a voltagem obtida pelo hélio é maior que a obtida pelo argônio (AWS v2, 1991).

Uma vez que tanto o hélio, quanto o argônio possam ser usados com sucesso para muitas aplicações de soldagem TIG. O argônio é escolhido mais frequentemente por causa da operação mais estável do arco voltaico e também do custo total menor.

○ **Vazão do Gás de Proteção**

O controle adequado da vazão do gás de proteção é muito importante, pois quando esta é excessivamente alta ou muito baixa pode resultar na formação de discontinuidades, além de elevar os custos de soldagem. A determinação correta da vazão do gás depende de pelo menos os seguintes fatores:

- Tipo de gás de proteção.
- Distância do bocal a peça.
- Geometria do bocal.
- Tipo de junta.
- Intensidade de corrente.
- Inclinação da tocha de soldagem.
- Comprimento do arco.
- Velocidade de soldagem;
- Posição de soldagem.
- Tipo de metal base.
- Existência de correntes de ar.

➤ **Velocidade de Alimentação do Metal de Adição**

A forma de alimentação do material de adição é outro parâmetro importante. Em processos manuais, a maneira como o material é adicionado influencia no número de passes e na aparência da solda acabada. Já no caso de soldas mecanizadas e automatizadas, a variação na velocidade irá significar variação na quantidade de adição por unidade de comprimento. Aumentando-se a velocidade de alimentação do arame produz-se soldas com menor penetração e perfis convexos Diminuindo-se a velocidade aumentam-se a penetração e tem-se perfis mais achatados (Bracarense, 2000).

3.2.3. Equipamento

O equipamento básico para a soldagem TIG consiste de uma fonte de energia (CC e/ou CA), tocha com eletrodo de tungstênio, fonte de gás de proteção (Ar ou He) e um sistema para a abertura do arco (geralmente um ignitor de alta frequência). Este ignitor ioniza o meio gasoso, dispensando a necessidade de tocar o eletrodo na peça para a abertura do arco. O equipamento para GTAW é mais caro e mais complexo do que o usado em SMAW (Modenesi, 2006).

➤ Fonte de Energia

A fonte de energia é similar à utilizada em SMAW, mas, devido às características do processo TIG, deve apresentar uma melhor precisão no ajuste da corrente e permitir a soldagem com menores níveis de corrente (até cerca de 5A). (Modenesi, 2006)

As fontes usadas nos processos TIG são do tipo Corrente Constante, por ser um processo tipicamente manual, quando ocorre variação no comprimento do arco e conseqüentemente na tensão, a variação na corrente (que garante maior uniformidade do arco, conserva mais o eletrodo e reduz a possibilidade de inclusão de tungstênio na solda) será mínima. As fontes para GTAW apresentam tanto uma resposta em queda (“drooping output”), para fontes do tipo com controle magnético, quanto resposta de saídas aproximadamente de corrente constante, para fontes controladas eletronicamente (Bracarense, 2000).

A escolha da fonte para GTAW dependerá fortemente do tipo de corrente que será usada no processo, incluindo-se correntes senoidais, correntes de onda quadrada, corrente contínua e corrente contínua pulsada.

○ Corrente Contínua

O processo de soldagem TIG utiliza com mais frequência corrente contínua, na maioria dos casos utiliza-se DCEN (corrente contínua com eletrodo no pólo negativo) com os elétrons fluindo do eletrodo para a peça. Assim sendo, 70 % do calor estará na peça e somente 30 % no eletrodo. Desta forma, além de preservar o eletrodo a DCEN também provê maior penetração. Quando, entretanto, for importante o efeito de limpeza catódica, propiciada pela saída de elétrons da peça, a DCEP pode ser utilizada. Esta limpeza catódica é particularmente importante na soldagem de materiais que tem óxidos refratários, como alumínio e magnésio, que são retirados desta maneira. Esta forma de operação, entretanto, por manter o eletrodo extremamente aquecido, necessita de eletrodos de diâmetro sensivelmente maiores, ficando a capacidade do eletrodo neste processo em cerca de um décimo do que quando operando em DCEN (Bracarense, 2000).

○ Corrente Contínua Pulsada

A corrente contínua pulsada envolve a variação repetitiva da corrente do arco entre um valor mínimo e um máximo, controlando-se o tempo do pulso, o tempo no valor mínimo, nível de corrente máximo e nível de corrente mínimo (Figura 3).

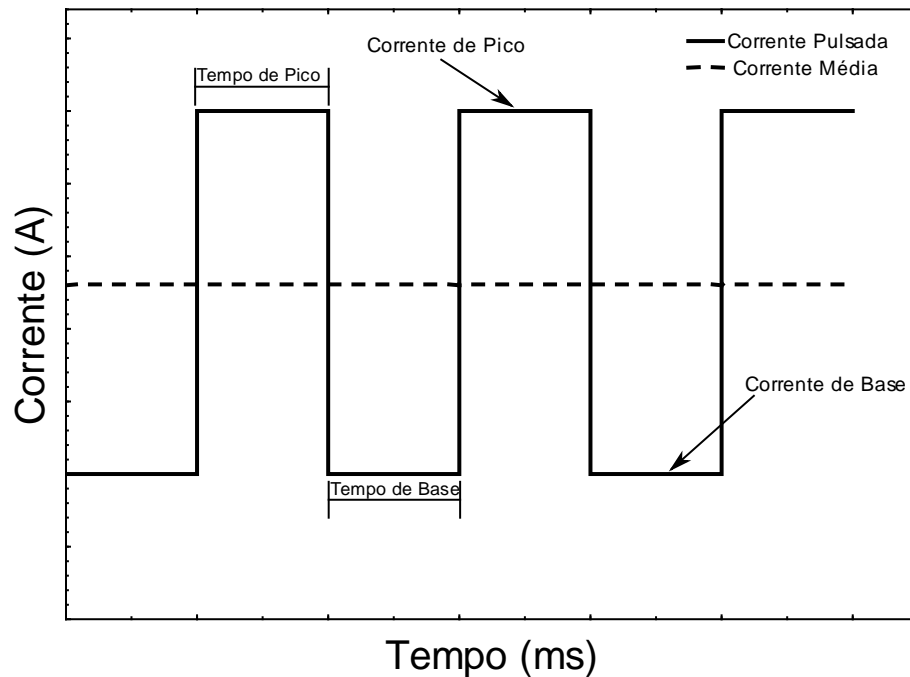


Figura 3. Gráfico de corrente / tempo para fonte pulsada.

A principal vantagem da corrente pulsada é permitir uma combinação de baixa penetração e boa fusão durante o tempo de pulso, enquanto mantém a área de soldagem relativamente fria. Assim, é possível obter maiores penetrações que em corrente contínua constante e trabalhar com materiais mais sensíveis à imposição de calor com minimização das distorções. Por esses motivos, o processo também é particularmente útil na soldagem de materiais muito finos. Apesar de muito utilizada nos processos automatizados, a corrente pulsada oferece vantagens também para a soldagem manual. Os soldadores mais inexperientes podem aumentar a sua habilidade através da contagem dos pulsos para controlar a velocidade da tocha e do arame frio de alimentação. Para os soldadores mais experientes, permite a soldagem de materiais mais finos e ligas não similares com maior facilidade (Bracarense, 2000)

A corrente pulsada pode ser aplicada ainda com uma alta frequência, de aproximadamente 20 Hz, que permite uma maior pressão de arco. Este aumento significa um arco mais firme, particularmente úteis em máquinas de precisão, onde características excepcionais de direção e estabilidade são requeridas. Entretanto, além de caros, estes

equipamentos podem ser bastante incômodos se estiverem em uma frequência dentro da faixa de frequência audível (Bracarense, 2000).

➤ Eletrodos

No processo de soldagem TIG os eletrodos não são consumíveis e funcionam como um dos terminais do arco que irá gerar o calor para o processo. Ao aproximar-se da sua temperatura de fusão (3410 °C), o tungstênio torna-se termoiônico, como uma fonte disponível de elétrons. Ele alcança esta temperatura através de aquecimento por resistência e, caso não houvesse um forte efeito de resfriamento pela saída dos elétrons de sua extremidade, esta ponta poderia fundir-se. Os eletrodos são classificados com base em sua composição química (Tabela 3) (Bracarense, 2000).

Tabela 3. Classificação dos eletrodos baseada em sua composição química. Adaptado do Welding Handbook, volume 2 (1991).

Classificação AWS	Cor	Elemento de Liga
EWP	Verde	-
EWCe-2	Laranja	Cério
EWLa-1	Preto	Lantânio
EWTh-1	Amarelo	Tório
EWTh-2	Vermelho	Tório
EWZr-1	Marrom	Zircônio
EWG	Cinza	Não especificado

A fabricação dos eletrodos é realizada através de acabamento químico ou mecânico para remoção de imperfeições e impurezas na sua superfície. A faixa de corrente suportada pelos eletrodos devem ser respeitadas e a sua utilização acima de seu limite causará erosão ou fundição do eletrodo. Correntes muito baixas haverá instabilidade no arco. Quando ocorre superaquecimento devido a utilização de eletrodo como pólo positivo em CC (corrente contínua), isto implica no uso de eletrodos com diâmetros maiores para uma mesma corrente, comparativamente com DCEN (corrente contínua com eletrodo no pólo negativo). DCEP (corrente contínua com eletrodo no pólo positivo), desta forma, permite uma corrente de apenas aproximadamente 10 % da utilizada para um mesmo eletrodo em DCEN. A corrente para CA (corrente alternada) é da ordem de 50 % da corrente em DCEN, para um mesmo eletrodo (Bracarense, 2000).

○ Eletrodos de Tungstênio Puro

Os eletrodos de tungstênio puro (EWP) possuem, no mínimo, 99,5 % de W e tem uma capacidade de corrente inferior que os eletrodos de liga de tungstênio. Entretanto, são

muito utilizados em soldagem com CA, pois mantém uma extremidade limpa e arredondada, que provê boa estabilidade ao arco neste processo (Bracarense, 2000).

○ **Eletrodos Ligados**

Os eletrodos com óxido de tório, a tória, possuem 1% ou 2% deste material, sendo classificados respectivamente, como EWTh-1 e EWTh-2. A tória incrementa a emissividade termoiônica do tungstênio, permitindo a operação em correntes mais elevadas (aproximadamente 20 % de acréscimo). Os eletrodos torinados mantêm um fino perfil da ponta durante a soldagem, o que é desejável na soldagem de aços. Por outro lado, na soldagem CA tornam-se deficientes, pois tem dificuldade de manter a extremidade arredondada (Bracarense, 2000).

Os eletrodos com óxido de cério (EWCe-2), a céria, possuem características muito semelhantes aos torinados com a vantagem de não trabalhar com um elemento radioativo. Estas mesmas características são mantidas nos eletrodos com óxido de lantânio. Já os eletrodos com óxido de zircônio (EWZr) tem características intermediárias para soldagem entre os eletrodos puros e os torinados. Eles são muito utilizados em soldagem CA pois combinam a estabilidade e ponta arredondada do eletrodo puro e a capacidade de corrente e partida dos eletrodos torinados. Ainda assim, eles possuem resistência à contaminação mais alta que os eletrodos puros. Os eletrodos que não se classifiquem nas designações acima são classificados como EWG, contendo quantidade não especificadas de uma adição não especificada ou uma combinação de óxidos (Bracarense, 2000).

○ **Tamanho do Eletrodo e Ângulo da ponta**

O diâmetro do eletrodo e o ângulo da ponta depende da aplicação, do material, da espessura, do tipo de junção e da quantidade a ser soldada (Lucas 1990, Gerken 1995, Savage 1965). Os eletrodos usados em corrente alternada ou em polaridade positiva, são de diâmetro maior do que aqueles usados para a polaridade negativa.

O comprimento total de um eletrodo é limitado pelo comprimento que pode ser acomodado pela tocha TIG. Comprimentos mais longos permitem um número maior de afiações da ponta do que comprimentos curtos e são, assim, mais econômicos.

A extensão da ponta do eletrodo para fora do suporte de fixação determina uma perda de calor e uma queda de tensão no eletrodo (Key, 1980). Embora este calor não seja aparentemente gerado no arco voltaico, a extensão do eletrodo deve ser o suficiente para manter uma determinada temperatura na ponta do mesmo.

A ponta bem afiada promove uma abertura mais fácil do arco voltaico, porém esta condição não é mantida por muito tempo porque com o calor gerado, a ponta ao se fundir, dará rapidamente forma a uma esfera pequena em sua extremidade. Todavia, o ângulo da

ponta pode manter sua forma por um tempo de uso prolongado, desde que a soldagem seja realizada dentro de certos limites de corrente. Porém, nem sempre é possível adotar esta condição de soldagem, principalmente em chapas de maior espessura. Neste caso, se o diâmetro do eletrodo não for adequado, a corrente elevada pode causar o superaquecimento de sua extremidade e até fundi-lo. Entretanto, o uso de uma corrente de soldagem demasiadamente baixa resulta numa instabilidade do arco voltaico.

Para a soldagem com o eletrodo positivo, a forma desejável da ponta do eletrodo é um hemisfério do mesmo diâmetro que o eletrodo. Esta forma da ponta fornece uma superfície estável dentro dos valores usuais de corrente (Key 1980, Savage 1965). Os eletrodos do tipo Zircônio são indicados para polaridade positiva do eletrodo porque têm uma capacidade maior ao bombardeio de elétrons do que os eletrodos puros de tungstênio, contudo dão forma prontamente a uma esfera sob circunstâncias normais de operação. Os outros eletrodos não possuem esta característica e, conseqüentemente, não são recomendados para soldagem com polaridade positiva (Savage, 1965).

O grau de afilamento na ponta do eletrodo afeta a geometria da solda, onde os ângulos maiores da ponta tendem a reduzir a largura do cordão e a aumentar assim a penetração (Savage, 1965).

3.3. O Processo de Soldagem TIG com Alimentação Automática de Arame

Cada processo de soldagem apresenta características próprias que, geralmente, não conseguem atender às necessidades de qualidade e produtividade simultaneamente. Tradicionalmente, o processo MIG/MAG detém uma boa parcela do mercado mundial, uma vez que seu nível de produtividade é elevado, se comparado à outros processos de soldagem tradicionais.

O processo TIG possui características típicas que lhe confere um elevado nível de qualidade, em comparação à outros processos de soldagem convencionais. Entretanto, quando se faz necessário a adição de material, tem-se uma soldagem tradicionalmente conseguida de maneira muito lenta, por ser realizada manualmente pelo soldador. Por esta razão é que existe a grande motivação ao estudo e desenvolvimento do processo TIG com alimentação automática de arame (Delgado, 2000).

3.3.1. Tipos de Alimentação Automática de Arame

O estudo deste processo iniciou-se durante a década de 60 (Lucas 1990, Gerken 1995). Atualmente existem dois tipos distintos de alimentação automática de arame,

denominados: “Cold Wire” (Arame Frio) e “Hot Wire” (Arame Pré-aquecido). Além, de seu uso no processo TIG, esta técnica também pode ser estendida aos processos Plasma e Arco Submerso.

➤ **Arame Frio**

Quando a alimentação do arame é feita a temperatura ambiente e sem energização do mesmo, esta se classifica como soldagem com Arame Frio ou “Cold Wire”, a velocidade com que este arame é alimentado está associada basicamente a corrente de soldagem utilizada.

Para soldagem de revestimentos é importante conservar as propriedades mecânicas e resistência a corrosão do metal de adição. Para isso, devem-se buscar menores valores de diluição, de modo a minimizar a quantidade de Ferro (Fe) diluído no revestimento, pois uma quantidade excessiva deste elemento comprometeria a resistência a corrosão do revestimento. A utilização de arame frio na soldagem de revestimento pode ser benéfica pelo fato do arame não receber nenhum pré-aquecimento antes de entrar em contato com a poça de fusão. Fato este, que faz com que o arame retire um pouco do calor do arco de soldagem e, conseqüentemente, reduz o nível de diluição. Condição esta, buscada para soldagem de revestimentos.

➤ **Arame Quente**

A princípio, este processo pode reunir todas as características encontradas no processo Arame Frio, porém, possui a peculiaridade de se estabelecer um pré-aquecimento do arame, antes deste entrar em contato com o arco voltaico, com o objetivo de possibilitar um aumento da taxa de fusão do arame e, conseqüentemente, um aumento de sua taxa de deposição. Condição indicada para situações onde deseja-se alta taxa de deposição.

3.3.2. Aplicações

O processo TIG com alimentação automática de arame é indicado para uma ampla variedade de aplicações, tais como soldas críticas em vasos de pressão à alta temperatura e soldas de fabricação em equipamentos para serviço criogênico (à baixas temperaturas). Ele serve também à aplicações como passe de raiz em soldas de membros estruturais altamente críticos e soldagem de tubos de aço carbono na construção de plataformas de petróleo “Offshore”.

O processo “Arame Quente” pode ser aplicado em soldagem de tubos de parede espessa no sentido circunferencial e principalmente quando se desejar uma elevada taxa de deposição com a mesma qualidade obtida pelo processo “Arame Frio” (Richardson, 1995).

Uma aplicação específica do processo “Arame Frio” é a soldagem de chapas finas de aço inoxidável para a indústria de alimentos (Richardson 1995, Sun et al. 1999). Atualmente sua aplicação vem sendo direcionada para soldagem de materiais dissimilares, como a soldagem de revestimentos.

Também já se estuda o processo “Arame Frio” em soldagem submarina pela técnica hiperbárica a seco. Entretanto, pela redução obtida na largura do arco voltaico, torna-se difícil a manutenção correta da posição do arame durante a soldagem, proporcionando, assim, uma susceptibilidade a falhas decorrentes de falta de fusão do arame (Lambert, 1990).

Outra aplicação do processo “Arame Frio” (objetivo principal deste trabalho) é soldagem de revestimentos de chapas de aço C-Mn de equipamentos submetidos a ambientes corrosivos, para aplicação na indústria do Setor de Petróleo e Gás Natural.

3.3.3. Equipamentos

A alimentação automática do arame é uma solução eficaz que alia, qualidade com a taxa de deposição no processo TIG. O arame em forma de bobina é alimentado até a tocha de soldagem através de um cabeçote responsável por tracionar o arame, ao chegar à tocha o arame é guiado por um condute de teflon até chegar ao arco voltaico por meio de um direcionador (Figura 4), a alimentação do arame pode ser contínua ou pulsada, em ambos os casos com velocidade controlada.



Figura 4. Direcionador do arame para o arco.

3.3.4. Alimentador Automático de Arame

Os cabeçotes alimentadores de arame para o processo TIG automático ou semi-automático devem ser capazes de alimentar o arame, com uma velocidade controlada, a partir de uma bobina e, através de um condute, conduzi-lo até o arco de soldagem.

Uma das grandes vantagens do processo TIG com alimentação de arame frio sobre o processo tradicional, se deve a possibilidade de conseguir, uma boa produtividade, juntamente com baixa diluição e boas características geométricas do cordão de solda. Condição satisfatória para soldagem de revestimentos.

O sistema completo de alimentação do arame consiste basicamente de uma sustentação para a bobina de arame, de um mecanismo de tracionamento do arame, de um controle da velocidade de alimentação e de um condute para guiar o arame desde o mecanismo tracionador até a poça da solda.

Os alimentadores de arame são usados, quase que exclusivamente, em soldagens TIG automáticas, embora os alimentadores portáteis de arame possam ser usados para a soldagem TIG manual (Gerken, 1995).

Para possibilitar ao usuário uma flexibilidade quanto ao correto posicionamento do arame na poça de fusão, existe um suporte preso à tocha que fornece o necessário ajuste da posição e do ângulo, através de ajuste manual em dois fusos contido no suporte alimentador montado sobre a tocha e próximo à extremidade do bocal (Figura 5), estes ajustes possuem influência direta sobre a qualidade do cordão de solda e conseqüentemente sobre o nível de diluição.

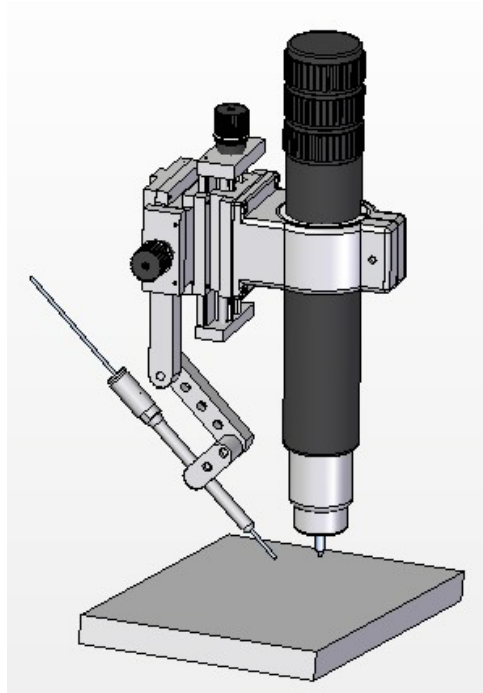


Figura 5. Desenho esquemático da tocha TIG com suporte adaptador.

Se um alimentador automático de arame for usado para a soldagem TIG manual, o soldador possui a opção de segurar a extremidade do bocal do tubo guia em uma das mãos e a tocha TIG na outra. Um botão interruptor no tubo guia ou um pedal pode controlar o início e o fim da alimentação do arame (Gerken 1995, Richardson 1995).

3.3.5. Vantagens

Comparado a outros processos automáticos e semi-automáticos de soldagem, o processo TIG com alimentação automática de arame oferece vantagens ao usuário não encontradas em outros processos. Todas as vantagens associadas ao processo TIG convencional também estão disponíveis aos usuários do processo TIG com alimentação automática de arame.

Devido à alimentação contínua e automática do arame, se podem produzir cordões uniformes ao longo de toda a sua extensão. Esta uniformidade do cordão é difícil de conseguir com a alimentação manual do arame, além do que, sendo fixo o comprimento da vareta utilizada pelo soldador, obriga-o a substituí-la regularmente e, assim, é interrompida a continuidade do processo.

Ao contrário dos processos de soldagem que utilizam um eletrodo consumível, o metal de enchimento não está energizado eletricamente. Isto simplifica sobremaneira, tanto o equipamento requerido, quanto a operação do processo.

O processo TIG com alimentação automática de arame é aplicável à diversas condições de soldagem em campo, obtendo-se elevadas taxas de deposição, sem a necessidade de automação total do processo (Delgado, 2000).

3.4. Características operacionais

3.4.1. Características econômicas

As características econômicas são de grande importância no processo de soldagem, pois, estão diretamente ligadas aos custos do processo. Estas características são avaliadas pela:

- Taxa de fusão de arame (TF) que significa a quantidade de arame que foi fundida, na qual pode ser calculada pela Equação 1;

$$TF = 3,6 \times \frac{\rho_a \times L_a}{t} \quad \left[\frac{kg}{h} \right] \quad (\text{Equação 1})$$

Onde,

- ρ_a é a densidade linear do arame (g/m)
- L_a é o comprimento do arame consumido (m)
- t é o tempo de soldagem (s)

- Taxa de deposição (TD) significa a quantidade de material fundido que foi depositado no corpo de prova, onde pode ser calculada pela Equação 2:

$$TD = 3,6 \times \frac{(M_f - M_i)}{t} \left[\frac{kg}{h} \right] \quad (\text{Equação 2})$$

Onde,

- M_i é peso inicial da chapa (g)
- M_f é peso final da chapa (g)
- t é o tempo de soldagem (s)

- Eficiência de deposição (ED) significa a relação entre a quantidade de material fundido e a quantidade de material depositado, conforme Equação 3;

$$ED = \frac{TD}{TF} \times 100 \quad [\%] \quad (\text{Equação 3})$$

3.4.2. Características geométricas do cordão de solda

A geometria do cordão de solda é de fundamental importância para soldagem de revestimentos, pois ela apresenta influência sobre as propriedades mecânicas. No caso do TIG com alimentação automática de arame frio, vários fatores influenciam na geometria do cordão de solda, como velocidade de soldagem, corrente, tipo de onda, posição de alimentação de arame, entre outros. A largura (b), o reforço (r), e a penetração (p) medidos a partir da seção transversal da solda, definem as características geométricas do cordão de solda conforme a Figura 6.

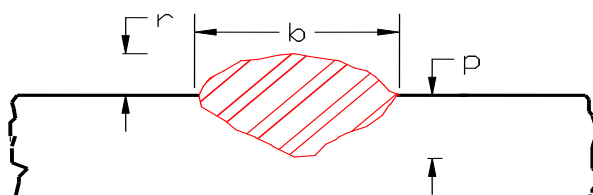


Figura 6. Seção transversal de um cordão de solda.

Motta (1998) mostrou que ao aumentar corrente de soldagem a largura, reforço e penetração também aumentam. A largura do cordão de solda é diretamente proporcional à tensão do arco e ao diâmetro do consumível e é inversamente proporcional à velocidade de soldagem. Já a penetração é diretamente proporcional à concentração de energia e à ação de escavação do arco voltaico ao material de base. A concentração de energia é função direta da corrente e/ou da redução da velocidade de soldagem, e função inversa do diâmetro do arco voltaico, do seu comprimento e do diâmetro consumível (Ziedas et al., 1997).

O processo de fusão do metal de base e, conseqüentemente, o controle de quantidade de metal fundido, são influenciados, principalmente, pelo calor gerado nas zonas de queda do catodo ou do anodo, pelo calor gerado na coluna do arco e pelo superaquecimento das gotas metálicas durante a transferência através do arco.

A penetração da solda é determinada diretamente pela concentração de energia, que é função do diâmetro do arco, e é tanto menor quanto for seu comprimento, tanto menor o diâmetro do eletrodo, e tanto maior a sua condutividade térmica, e pela intensidade de energia, que aumenta proporcionalmente com o aumento de corrente e a redução da velocidade de soldagem para a mesma atmosfera do arco.

➤ Diluição

Na soldagem por fusão chama-se diluição a parcela de metal de base que entra na composição da zona fundida (metal de solda). Para a maioria das aplicações (em aços de baixo carbono) a diluição apresenta pequena importância no que diz respeito ao comportamento da junta em serviço, porém em algumas aplicações "especiais" como a soldagem de revestimentos esta característica pode ser determinante na performance do componente, podendo inclusive favorecer falhas durante a operação do equipamento quando se tem elevada diluição.

A zona fundida é formada por contribuições do metal base e do metal de adição, que são misturados, no estado líquido, na poça de fusão. Define-se como coeficiente de diluição (δ), ou simplesmente diluição, a proporção com que o metal base participa da zona fundida, conforme Equação 4:

$$\delta = \frac{\text{Massa fundida do metal de base}}{\text{Massa total do cordão de solda}} \times 100 (\%) \quad (\text{Equação 4})$$

O controle da diluição é importante na soldagem de metais dissimilares, na deposição de revestimentos especiais sobre uma superfície metálica, na soldagem de metais de composição química. Valores baixos de diluição são desejáveis para manter a

composição química do metal de adição e, conseqüentemente sua resistência a corrosão (Dupont et. al., 1995).

A diluição pode ser obtida pela medida, em uma macrografia da seção transversal da solda, das áreas proporcionais às quantidades de metal base (B) e de adição (A) fundidos (Figura 7). Na soldagem multipasse, a diluição assim obtida é apenas um valor médio, pois a diluição varia com os passes, tendendo a ser maior no passe de raiz e menor nos passes de acabamento.

O coeficiente de diluição pode variar entre 100% (soldagem autógena) e 0% (brasagem) e o seu valor depende, além do processo de soldagem, das condições de operação, da espessura de peça e do tipo de junta (Figura 8).

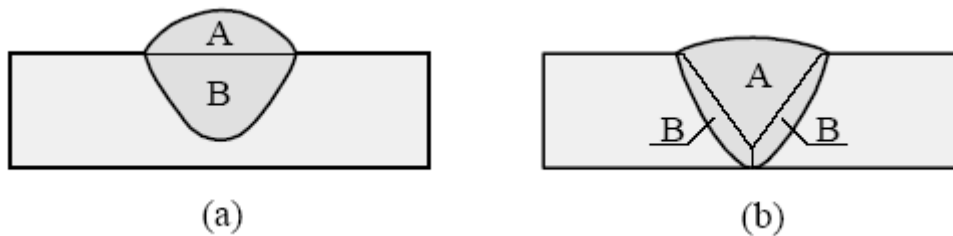


Figura 7: Medida da diluição na seção transversal de um cordão de (a) um cordão e (b) uma solda de topo (Modenesi, 2005).

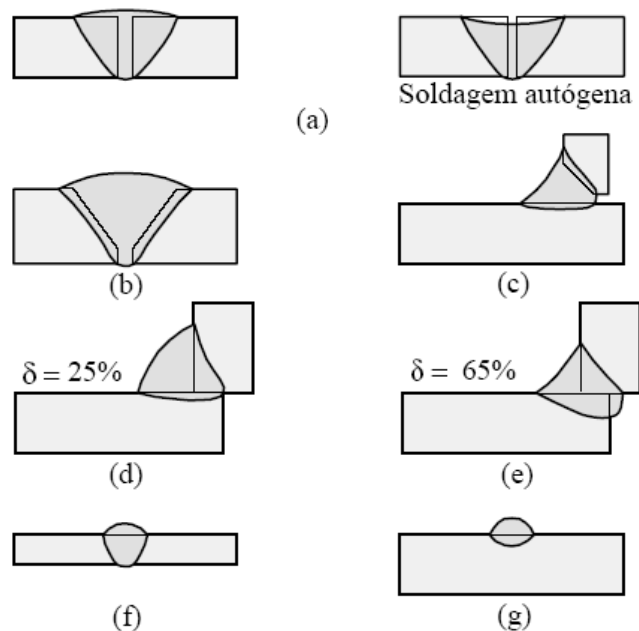


Figura 8: Influência de diferentes fatores na diluição: (a) soldas de topo, com penetração total e sem chanfro apresentam alta diluição; (b) e (c) soldas em juntas chanfradas e com vários passes apresentam menor diluição ($\delta \cong 20\%$); (d) e (e) juntas idênticas soldadas por processos ou condições de soldagem diferentes e (f) e (g) soldas realizadas em chapas de espessuras diferentes (Modenesi, 2005).

O conceito de diluição é importante quando se deseja controlar a participação do metal base na formação da solda como, por exemplo, na soldagem de metais dissimilares, em processos de recobrimento por soldagem e na soldagem de um metal base cuja composição seja desconhecida ou apresente elevados teores de impurezas ou elementos prejudiciais à solda (Modenesi, 2005). Como exemplo de um destes elementos prejudiciais, podemos citar o Ferro (Fe), uma quantidade excessiva deste elemento diluído no revestimento, reduz a resistência a corrosão. Baseado nisso o teor de ferro permitido no revestimento é de 5 a 10 % de sua composição química (ISSO 10423, 2003).

Algumas aplicações óbvias de soldagem dissimilar são os revestimentos contra corrosão. No caso da soldagem de revestimentos o consumível é quase sempre de composição diferente do metal de base e os elementos de liga presentes são bem balanceados para garantir o efeito desejado. Considerando que o metal de base normalmente é de aço ao carbono (cujo elemento em abundância é o ferro) fica claro que se houver uma diluição elevada do metal de base o depósito pode não favorecer a resistência necessária.

Na soldagem de ligas de níquel tipo AWS E Ni-Cr-Mo, sobre equipamentos de aço ao carbono para trabalho em meios agressivos é necessário obter a composição do metal de solda igual à composição do consumível, ou seja, sem que possa haver elevada diluição com o ferro do substrato. Isto raramente é obtido na primeira camada de revestimento, sendo usual qualificar na segunda camada, se os níveis de diluição tiverem sido adequados. O problema é que nem sempre os fabricantes conferem se o equipamento se apresenta com espessuras de revestimento superiores às qualificadas após a usinagem final, e caso isto não ocorra pode-se esperar corrosão no revestimento, pois sua composição está muito diluída com o ferro (Zeemann, 2003).

A potência do arco e a velocidade de alimentação têm influência direta sobre a diluição resultante do metal de solda. Alterar estes parâmetros de soldagem levam a mudanças nas taxas de fusão do metal de adição e do substrato, resultando em diferentes níveis de diluição. Os níveis de diluição diminuem com a diminuição da potência do arco e/ou com aumento da velocidade de alimentação (Banovic, 2001).

3.5. Método Taguchi

3.5.1. Introdução

A técnica denominada Projeto Robusto, desenvolvida por Taguchi, é uma ferramenta poderosa na otimização de produtos ou processos. Ela visa determinar as variáveis (denominadas de fatores de controle) que mais influenciam a “variabilidade” do processo ou

produto. O controle destes fatores garante a qualidade do processo/produto (menor variabilidade), além da otimização do seu desempenho (Ross, 1991).

A metodologia do Projeto Robusto visa obter economicamente os melhores ajustes dos fatores de controle, de forma a tornar o processo/produto insensível aos fatores de ruídos, fatores estes considerado por Taguchi indesejáveis e muitas vezes que não podem ser controlados.

O método Taguchi pertence a uma classe de abordagens que assegura a qualidade através do projeto, neste caso através da identificação e controle de variáveis críticas (ou ruídos) que provocam desvios na qualidade do produto ou do processo (Vieira, 1996).

Os fatores de ruído são as que causam a variabilidade da função do produto. Segundo Taguchi, a idéia não é exatamente ter que eliminar as causas do problema (isto pode ser inviável economicamente e muitas vezes impossível), e sim encontrar soluções para reduzir os efeitos dos ruídos. Os principais tipos de ruídos são:

- **Ruídos externos:** decorre tanto das condições de utilização do produto quanto do ambiente em que o produto é utilizado, ou seja, são provenientes de fatores externos.
- **Ruídos internos ou degenerativos;** causam variações no interior do produto, tais como envelhecimento e desgaste físico.
- **Ruídos entre produtos:** são ocasionados durante a fabricação, mudando uma determinada característica entre dois ou mais produtos.

A proposta do método Taguchi é a de determinar a função perda do produto e otimizá-la empregando técnicas estatísticas. Estas análises permitem identificar os parâmetros ótimos de projeto que minimizam ou mesmo eliminam as influências dos fatores ruído no desempenho do produto. Assim, em lugar da tendência tradicional de isolar o produto dos fatores ruído, o que pode ser de difícil execução ou encarecer o processo produtivo, o método de Taguchi ambiciona realizar projetos que eliminem ou reduzam os efeitos dos fatores ruído no produto. A técnica estatística mais empregada para interpretação dos dados experimentais é ANOVA (análise de variância).

O trabalho do Dr. Taguchi, além de uma nova abordagem para a área de qualidade, serviu também para consolidar o conceito de Projeto Robusto, ou seja, o de projetar produtos que minimizem os fatores ambientais. Assim, Projeto Robusto consolidou-se como o conceito/filosofia de projetar produtos minimizando a influência dos fatores ruído, o que pode ser alcançado com diversas outras técnicas ou mesmo a partir da experiência e bom senso dos projetistas.

3.5.2. Arranjo Ortogonal

O novo conceito de Taguchi simplifica a análise de dados, reduz a quantidade de experimentos (em relação ao método tradicional multifatorial) para avaliação de um mesmo número de fatores de controle, sem prejudicar significativamente a qualidade das informações retiradas. Os efeitos dos fatores de controle são relativamente estimados em poucos experimentos e, as condições ótimas de ajustes são determinadas pela avaliação do efeito de cada fator separadamente devido a três motivos (Phadke, 1989):

- Planejamento da matriz experimental pela utilização de um arranjo ortogonal.
- Uso do modelo aditivo como uma aproximação.
- Emprego das funções objetivas.

3.5.3. Planejamento da matriz experimental pela utilização de um arranjo ortogonal

O arranjo ortogonal (AO) facilita e reduz o número de experimentos. As colunas da matriz representam os fatores a serem estudados e as linhas os experimentos que serão realizados (Phadke, 1989). Na matriz ortogonal, colunas podem ser deixadas vazias (que correspondem às variáveis a serem estudadas) sem prejuízo na análise. Por sua vez, linhas vazias, que corresponde deixar de realizar algum experimento, prejudica a ortogonalidade e compromete a análise e a confiabilidade dos experimentos (Vieira, 1996).

A seleção do arranjo ortogonal a ser utilizada depende do número de fatores, das interações de interesse e do número de níveis para estes fatores de interesse. Estes três itens determinam os graus totais de liberdade exigidos para todos os experimentos. Os graus de liberdade são definidos como o número total de comparações independentes que podem ser realizadas dentro de um conjunto de dados. Os graus de liberdade para cada fator consistem no número de níveis menos um ($u_A = \kappa_A - 1$, onde κ é o número de níveis do fator A e u_A , o grau de liberdade do fator A). O número de graus de liberdade para uma interação é o produto dos graus de liberdade dos fatores nessa interação ($u_{AXB} = u_A \cdot u_B$). Graus de liberdade mínimos exigidos em série de experimentos consistem na somatória de todos os graus de liberdade de fator e interação.

O número na designação do arranjo indica o número de graus de ensaios contidos no mesmo, sendo o número de graus de liberdade disponíveis num certo arranjo equivalente ao número de ensaios menos um por exemplo (o arranjo L8 possui 7 graus de liberdade disponíveis) (Ross, 1991).

A título de exemplificação, é apresentada a Tabela 4, que mostra um arranjo ortogonal L8.

Tabela 4: Matriz ortogonal L8.

Projeto Robusto							
Experimento	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

De acordo com a Tabela 4 o número à esquerda de cada fila é chamado de número do experimento ou número da distribuição, e vai de 1 a 8. Os alinhamentos verticais são chamados de colunas do arranjo ortogonal, e todas as colunas contêm quatro vezes os numerais 1 e 2. Quando cada uma das duas colunas consiste de numerais 1 e 2 e as quatro combinações (11), (12), (21) e (22) aparecem com a mesma freqüência, diz-se que estas duas colunas estão balanceadas ou são ortogonais.

3.5.4. Uso do modelo aditivo como uma aproximação

O modelo aditivo pode ser empregado quando o efeito de dois fatores em conjunto, é igual a soma de seus efeitos individuais. O mesmo é usado para aproximar a relação entre as respostas e os níveis dos fatores. As interações são consideradas erros no modelo aditivo (Phadke, 1989).

A interação entre os fatores ocorrem quando dois destes produzem um efeito diferente da soma de seus efeitos individuais. Ocorrendo esta interação, a aplicação do modelo aditivo pode resultar em uma previsão errada dos ótimos ajustes e do efeito de cada fator sobre η (Eta), logo este modelo aditivo é mais adequado para situações onde não existam interações entre os fatores (Miranda, 1999).

A Figura 9 até a Figura 11 mostram três exemplos de interação, a Figura 9 mostra que não ocorreu interações entre os fatores, onde as curvas apresentadas são paralelas entre si, isto implica em alterações da mesma natureza em η nas mudanças de níveis entre A1, A2 e A3 em cada ajuste de B.

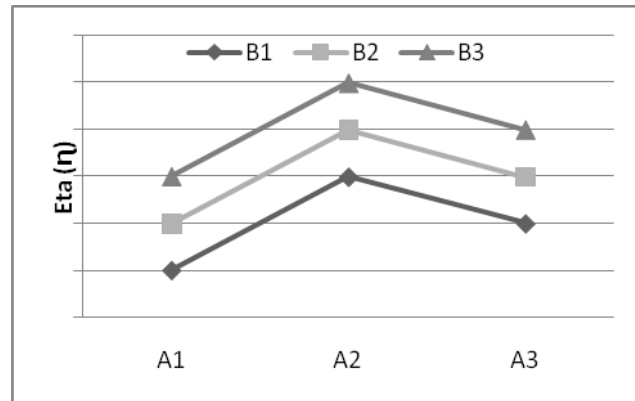


Figura 9. Curva sem interações.

A Figura 10 mostra curvas que apesar de não ser em paralelas apresentam uma mesma tendência, com isso os ajustes previstos pelo modelo aditivo podem ser empregados neste tipo de interação, também conhecida como sinérgica.

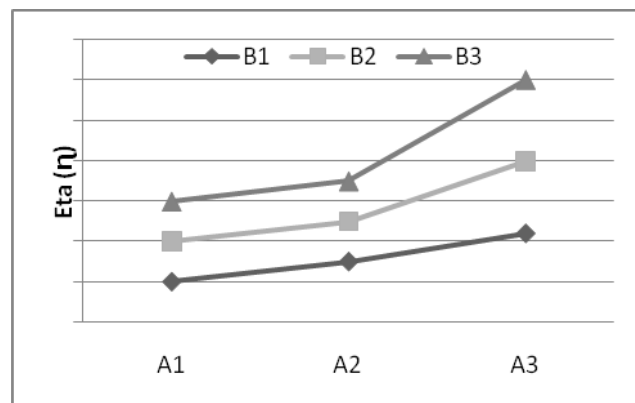


Figura 10. Curva com interações sinérgica.

A Figura 11 mostra curvas com forte interação entre si, sem nenhum paralelismo e não apresentando uma tendência específica, a aplicação do modelo aditivo nesta situação seria de maneira inconsistente, ou seja, os ajustes previstos pelos maiores valores de η podem estar errados (Phadke, 1989).

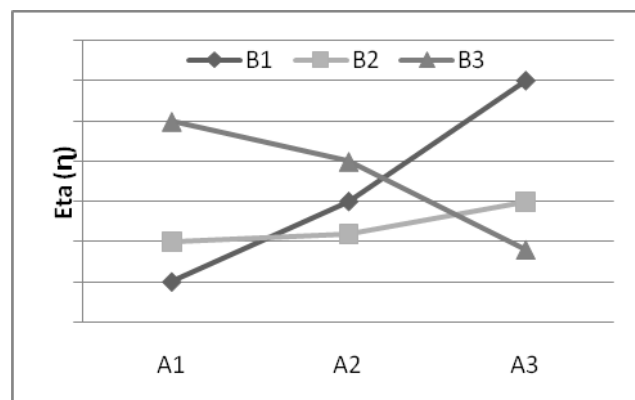


Figura 11. Curvas com interação anti-sinérgica

A presença de interação entre os fatores pode ser estudada pelo método Taguchi. Neste caso, existe a necessidade de mais parâmetros no modelo aditivo, aumentando com isso o número de experimentos para estimar essa quantidade maior de parâmetros. Em algumas situações, pela avaliação técnica, o estudo de interações pode ser muito importante (Phadke, 1989).

3.5.5. Funções Objetivas (η)

Funções objetivas (η) são razões S/R (sinal/ruído) empregada no Método Taguchi. O uso da razão S/R para obter o melhor ajuste que minimize a sensibilidade ao ruído para um dado valor médio de um parâmetro estudado, tem a vantagem deste ajuste também ser válido para outro valor médio do parâmetro (Miranda, 1999).

3.5.5.1. Sinal/ Ruído

Os parâmetros de controle que contribuem na redução de variação (aperfeiçoamento da qualidade) podem ser rapidamente identificados observando o quanto de variação aparece como resposta. A metodologia Taguchi idealiza uma transformação dos dados da repetição em outro valor, que representa a variação da medição existente. Designa-se a transformação como relação sinal-ruído (S/R) ou função objetiva. A função objetiva para ser maximizada, nas resoluções dos problemas estatísticos de projeto de processo/produto, tem que ser escolhida corretamente (Gomes, 2006). As diversas relações S/R disponíveis, de acordo com o tipo de característica são:

- Menor é melhor;
- Maior é melhor;
- Nominal é melhor.

Cada característica tem a equação específica para o cálculo da taxa S/R, a seguir são apresentadas algumas destas equações (Phadke, 1991).

- **Problema do tipo Menor é melhor:** usado quando se deseja minimizar os resultados, conforme Equação 5:

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (\text{Equação 5})$$

onde n_i = número de repetições num ensaio (número de repetições independente dos níveis de ruído), y_i é a característica da qualidade (resposta observada). Como exemplo de menor é melhor pode-se citar o número de defeitos de uma peça, os índices de convexidade e diluição em revestimentos por soldagem.

- **Problema do tipo Maior é melhor:** usado quando se deseja maximizar os resultados, conforme Equação 6:

$$\eta = -10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n} \right) \quad (\text{Equação 6})$$

Como exemplo de aplicação da função maior é melhor pode-se citar o rendimento de um equipamento, as taxas de fusão e deposição, o índice de penetração, a diluição e a qualidade do cordão de solda na soldagem.

Assim, os níveis ótimos das variáveis de influência são aqueles que maximizam o S/R apropriado para cada análise estatística específica.

- **Problema do tipo Nominal é melhor:** exige-se este tipo de tolerância para muitos produtos, peças, elementos e componentes quando se prefere um tamanho (ou característica) nominal, conforme Equação 7:

$$\eta = 10 \log_{10} \frac{u^2}{\sigma^2} \quad (\text{Equação 7})$$

onde:

$$\mu = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} y_i \quad (\text{Equação 8})$$

$$\sigma = \left[\frac{1}{n_i - 1} \sum_{i=1}^{n_i} (y_i - \mu)^2 \right] \quad (\text{Equação 9})$$

A otimização destes dois tipos de problemas pode ser feito em duas etapas:

- Maximizar η ou minimizar a sensibilidade ao ruído. Nesta etapa a média é ignorada e os níveis dos fatores de controle são ajustados para maximizar η .
- Ajustar a média no valor alvo. Os fatores de ajuste são utilizados para se obter o valor da média desejada sem no entanto modificar η .

3.5.6. Experimentação e Análise

A metodologia do Delineamento Robusto permite ao engenheiro gerar as informações necessárias para tomar decisões com pouco esforço experimental. O mensuramento da qualidade durante o projeto e desenvolvimento e a experimentação eficiente para encontrar informações confiáveis sobre os parâmetros de projeto são duas importantes questões para serem desenvolvidas no Delineamento Robusto (Vieira, 1996). A aplicação do Método Taguchi se divide em várias etapas, são elas:

- **Objetivo/ meta do experimento:** procura-se nesta etapa determinar os fatores mais importantes que afetam as características da qualidade (ou respostas) e, conseqüentemente, reduzir a variabilidade nas respostas (Gomes, 2006).
- **Seleção das características de qualidade:** identificado o objetivo do experimento, nesta etapa é selecionada as respostas apropriadas para o experimento. As respostas de interesse mostram as características que se quer obter do produto ou processo analisado (Gomes, 2006).
- **Identificação dos fatores de controle e S/R:** seleção de fatores que podem influenciar as características da qualidade bem como a seleção dos níveis dos fatores. Fatores de controle são aqueles que podem ser controlados sob condições normais de produção. Seleção de fatores ruídos: fatores ruídos são aqueles que causam variação no desempenho funcional do produto/ processo. Seleção de fator sinal: fator sinal é aquele que afeta somente a média do processo/produto (Gomes, 2006).
- **Escolha do arranjo ortogonal (AO):** seleção apropriada do AO de acordo com o número de fatores e seus níveis que encaixe perfeitamente com o pretendido para o estudo, com economia de tempo, trabalho e número de ensaios (Gomes, 2006).
- **Preparação experimental:** nesta etapa são elaboradas as matrizes de projeto codificadas e decodificadas para o experimento e análise dos resultados respectivamente (Gomes, 2006).
- **Análise estatística e interpretação dos resultados:** na metodologia Taguchi o objetivo sempre é reduzir a variabilidade nas respostas. O S/R é uma medida do desempenho da variabilidade do produto ou processo na presença dos fatores ruídos. A idéia é maximizar o S/R e, desse modo, minimizar os efeitos dos fatores ruídos (Gomes, 2006).
- **Confirmação experimental:** alguns ensaios são feitos para a condição ótima e comparados com os resultados previstos por Taguchi, para concluir se são satisfatórios e válidos (Gomes, 2006).

Capítulo IV

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Com intuito de atender os objetivos desta dissertação foram executadas três etapas de trabalho. A primeira, foi um estudo exploratório visando buscar os melhores parâmetros de soldagem com corrente contínua e contínua pulsada, com intuito de se obter bons resultados de geometria e diluição das amostras soldadas. A segunda etapa consistiu em realizar as soldagens com os parâmetros pré-estabelecidos na etapa exploratória, com análise posterior das características econômicas, geometria do cordão de solda e valores de diluição. A terceira etapa consistiu na soldagem de revestimentos baseado nos resultados da segunda etapa com análise das características geométricas do cordão de solda e dos valores de diluição.

4.1. Materiais

4.1.1. Metais de base e consumíveis de soldagem

A seguir está descrito o metal de base e os consumíveis de soldagem utilizados, bem como sua composição química (Tabela 5).

- Placas de aço ASTM A516 grau 60.
- Arames eletrodo ERNiCrMo-3 (UNSN06625), ERNiCrMo-4 (UNSN10276) e ERNiCrMo-14 (UNSN06686), todos com diâmetro de 1,2 mm.
- Gases de proteção: Argônio puro, 99,97% de argônio + 0,03% de óxido nítrico, e 70% de argônio + 30% de hélio.

Tabela 5: Composição química do metal de base e arame eletrodo, segundo os fabricantes.

Item	Composição, peso %							
	Ni	C	Cr	Mo	Fe	Al	Mn	Si
ASTM A516 Gr60	0,01	0,15	0,02	0,01	Bal.	0,02	0,95	0,2
	Composição, peso %							
Hastelloy C-276 (ERNiCrMo-4)	Ni	C	Cr	Mo	Fe	Co	Cu	Mn
	56,80	0,002	16,13	16,28	6,07	0,13	0,06	0,52
	Si	W	P	S	V	N		
	0,03	3,38	0,07	0,002	0,17	0,009		
INCONEL 625 (ERNiCrMo-3)	Composição, peso %							
	Ni	C	Cr	Mo	Fe	Cu	Al	Ti
	61	0,05	21,5	9	2,5	-	0,2	0,2
	Nb	Mn	Si					
3,6	0,2	0,2						

continuação da Tabela 5.

Item	Composição, peso %							
	Ni	C	Cr	Mo	Fe	Cu	Al	Ti
INCONEL 686 (ERNiCrMo-14)	58,22	0,01	20,53	16,39	0,29	0,01	0,26	0,04
	Mn	Si	W	P	S	Outros		
	0,23	0,059	3,97	0,002	0,001	0,50		

4.1.2. Equipamentos Utilizados

4.1.2.1. Soldagens dos corpos de prova

Segue descrição dos equipamentos e acessórios empregados durante as soldagens com suas respectivas características.

- Fonte eletrônica multiprocesso para soldagem TIG com corrente máxima de 450 A.
- Cabeçote para alimentação automática de arame frio com sistema de refrigeração.
- Tocha especial TIG para uso em robô (Figura 12).
- Sistema para ajuste de alimentação do arame (Figura 12).
- Sistema de aquisição de dados dos sinais de tensão e corrente operando em frequência de 9600 Hz.
- Alicates amperímetro para calibração do sistema de aquisição com precisão de (1,5% da leitura + 5x número de dígitos).
- Robô industrial para deslocamento automático da tocha de soldagem com bancada integrada (Figura 13).
- Balança digital.
- Esmeril.

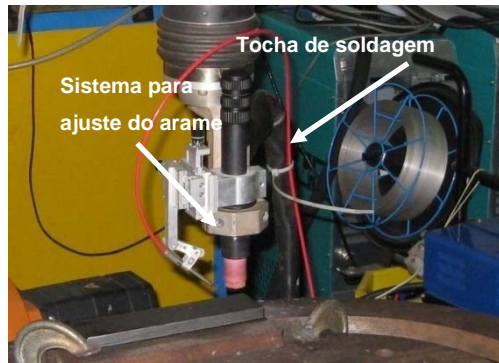


Figura 12. Tocha de soldagem com sistema para ajuste do arame.

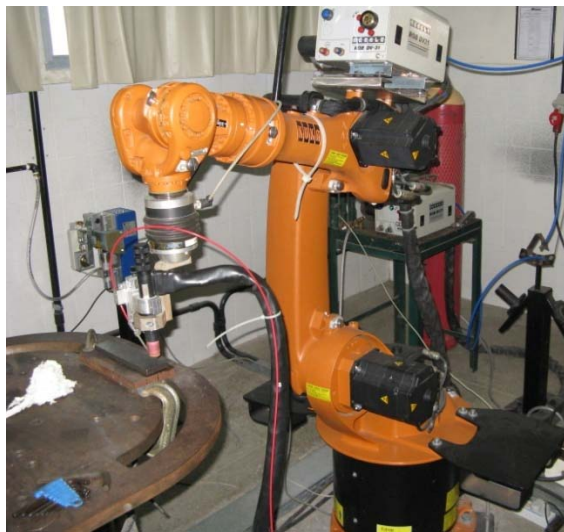


Figura 13: Robô industrial

4.1.2.2. Ensaio Metalográficos

A seguir são listados os equipamentos utilizados para preparação dos corpos de provas soldados, para análises metalográficas.

- Equipamento para corte das amostras.
- Lixadeira e poltriz.
- Máquina fotográfica digital.
- Régua metálica.
- Microscópio óptico.
- Paquímetro digital.

4.2. Metodologia

A metodologia empregada neste trabalho foi dividida em três etapas, conforme Figura 14.

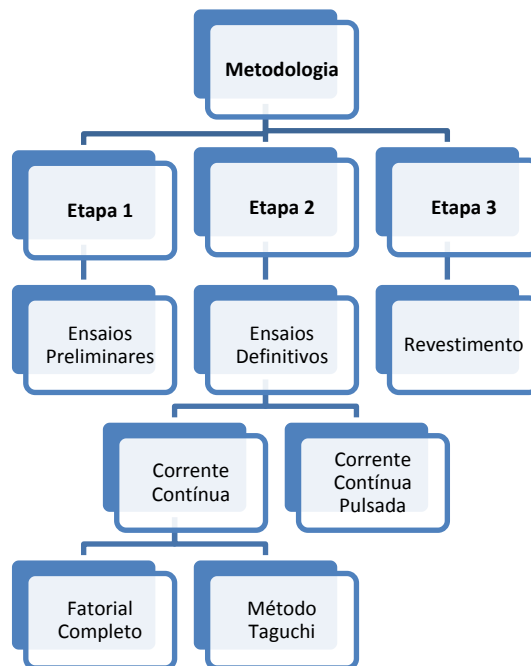


Figura 14. Fluxograma das etapas realizadas neste trabalho.

4.2.1. Etapa 1 – Ensaio preliminares

➤ Realização dos ensaios

A realização dos ensaios preliminares se fez necessária devido a dificuldade de se obter informações sobre a soldagem TIG com alimentação de arame frio para realização de revestimento com ligas de níquel. Esta etapa teve como objetivo explorar o processo para definir as condições de soldagem (fatores de controle), tais como comprimento do arco, vazão de gás, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação de arame, níveis de corrente de soldagem, ângulo de afiação do eletrodo, distância da ponta do arame para a peça (DPAP), ângulo com que é feita a alimentação do arame, posição de alimentação do arame em relação ao arco de soldagem, etc. Com os ajustes adequados das condições de soldagens é possível conseguir uma maior produtividade aliada com a geometria e diluição (variáveis de respostas) adequadas para o cordão de solda, além de minimizar a ocorrência de defeitos.

Neste sentido, foram realizadas soldagens com simples deposição de arame eletrodo ERNiCrMo-3 (UNSN06625) em chapas de aço carbono ASTM A516 Gr60 nas dimensões de 200 x 50 x 12,5 mm. Durante a realização das soldagens foi utilizado um sistema de aquisição dos sinais de tensão e de corrente em 12 bits e a uma taxa de 9,6 kHz. O tempo de aquisição de cada ensaio foi de 5 segundos. O início da aquisição dos dados de cada

ensaio ocorreu no momento em que o arco estivesse mais estabilizado, aproximadamente após 10 segundos da abertura do arco.

Após as soldagens, os corpos de prova foram submetidos à preparação metalográfica para obtenção das características geométricas (reforço, largura e penetração) e dos valores de diluição para as condições avaliadas.

É importante destacar que para revestimento de aço com ligas de níquel (função principal deste trabalho), procura-se obter as menores razões entre reforço e largura e os menores valores de diluição, de preferência abaixo de 10 % (sendo que o valor ótimo foi estipulado como sendo igual ou menor que 5 %).

➤ **Procedimento metalográfico para determinação das características geométricas**

O comprimento total do cordão de solda foi de 180 mm. Para a análise metalográfica foram retiradas três seções do corpo de prova, de 10 mm cada, no início, meio e fim, descartando 15 mm em cada borda do cordão, conforme Figura 15.

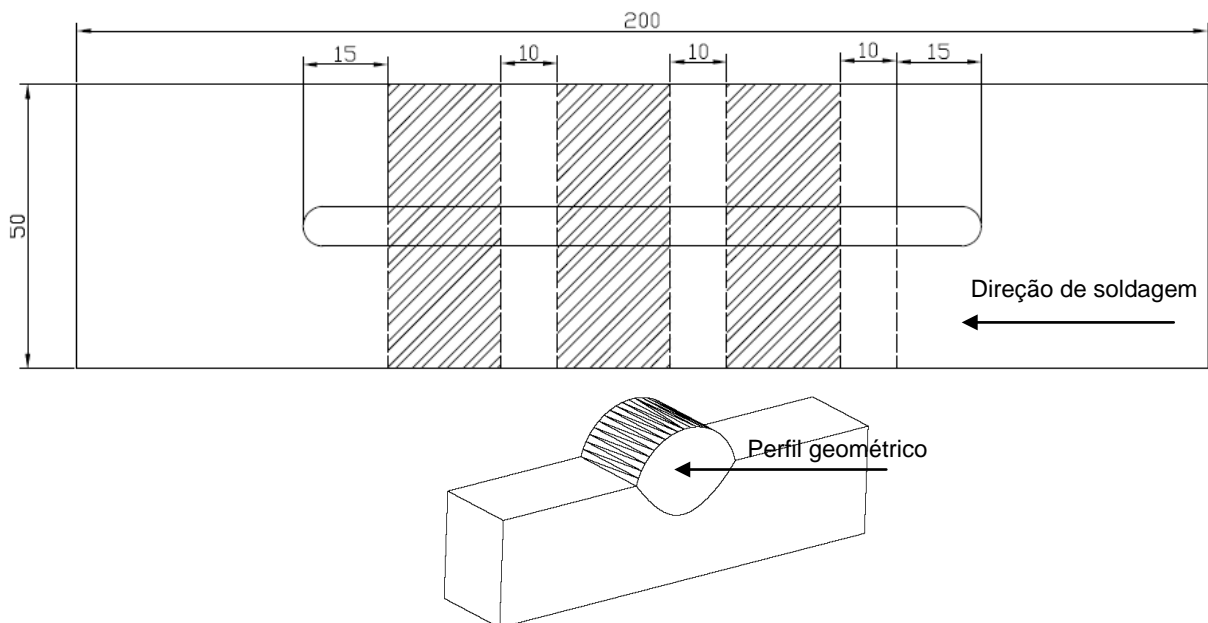


Figura 15: Desenho esquemático de extração das amostras

A preparação das amostras consistiu em um lixamento usando uma lixadeira rotativa com lixas de granulação de 80, 100, 220, 320, 400, 600 e 1200. A etapa de lixamento foi seguida pelo uso de uma politriz para polimento com pasta de diamante de 3 μm , seguido de um ataque químico com nital 2% e tempo de ataque de 20 s, para revelação do perfil geométrico do cordão de solda.

Para análise da geometria e diluição foi utilizado um programa de desenho por computador. Este programa consiste em realizar a medida da largura, reforço e penetração, a partir da foto de uma macografia da amostra, com uma escala em milímetros servindo como referência para uso no programa de computador. A diluição foi medida através da relação entre as áreas adicionada e diluída (Equação 4) A Figura 16 mostra as características geométrica medidas (largura – L; reforço – R e penetração – P). A referida Figura mostra também a área adicionada (AA) e a área diluída (AD).

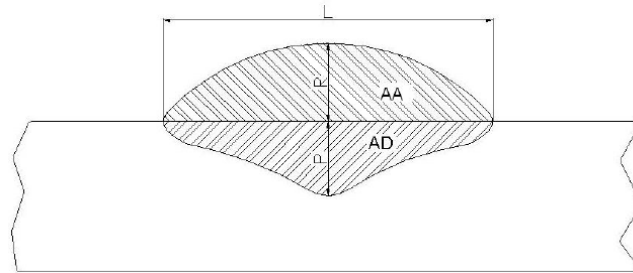


Figura 16: Representação esquemática das dimensões geométricas das seções transversais dos cordões de solda.

➤ Avaliação dos Resultados

Os resultados obtidos referente às características geométricas do cordão de solda serão apresentados e analisados no capítulo referente aos ensaios preliminares.

4.2.2. Etapa 2 – Ensaios Definitivos

Após os ensaios preliminares, foram definidas as condições de soldagem para realização dos ensaios definitivos com intuito de analisar a influência dos fatores de controle sobre a geometria e diluição do cordão de solda através de um programa de tratamento estatístico.

Para realização desta etapa foram mantidas constantes: a vazão do gás de proteção em 15 l/min; a velocidade de alimentação em aproximadamente 6 m/min; e o ângulo de alimentação do arame em 50° (Figura 17). As dimensões dos corpos de prova são similares aos da Etapa 1.

A alimentação de arame foi realizada na frente do arco de soldagem e as dimensões dos corpos de prova foram os mesmos estabelecidos nos ensaios preliminares (Figura 15).

Ainda para esta etapa foi realizado um levantamento das características econômicas do metal adição, onde foram analisadas a Taxa de Fusão de arame (TF), Taxa de Deposição do arame (TD) e conseqüentemente a Eficiência de Deposição (ED). Estas informações são de fundamental importância para conseguir um melhor aproveitamento do

processo de soldagem, uma vez que trata-se do uso de metais de adição de elevado valor de mercado.

As soldagens dos ensaios definitivos dividiram-se em duas fases, soldagem do fatorial completo utilizando o arame eletrodo ERNiCrMo-3 (UNSN06625) e aplicação do Método Taguchi.

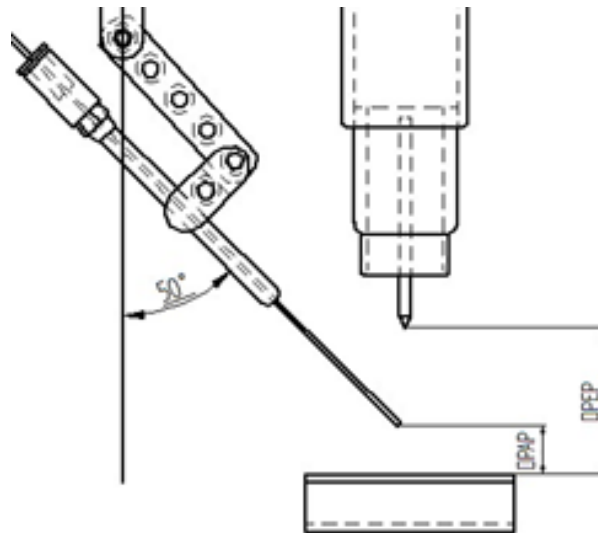


Figura 17. Desenho esquemático do ângulo de alimentação.

a) Fatorial completo utilizando o arame eletrodo ERNiCrMo-3

Para soldagem do fatorial completo foram utilizadas corrente contínua e corrente contínua pulsada. O gás de proteção utilizado foi o argônio puro.

➤ Corrente Contínua

○ Realização dos ensaios

Para a soldagem dos ensaios definitivos desta fase, a mesma foi dividida em duas subfases. A primeira subfase foi realizada conforme Tabela 7, onde a distância ponta do arame a peça (DPAP) foi mantida constante em 3 mm. A segunda subfase foi realizada conforme Tabela 8, onde a distância ponta do eletrodo a peça (DPEP) foi mantida constante em 10 mm. Para um melhor entendimento da Tabela 7 e da Tabela 8, a designação dos níveis referentes aos fatores de controle são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Designação dos níveis referente aos fatores de controle.

Nível	TE (Vs/le)	DPEP (mm)	Tecimento (TC)	Energia (kJ/cm)
1	25 cm/min	6	Sem Tecimento	9,6
2	285 A	10	Tecimento Triangular	12,3
3	-	14	-	14,8

Onde: TE – Técnica da Energia; Vs – velocidade de soldagem; le – Corrente eficaz.

Tabela 7. Parâmetros para soldagem do fatorial completo utilizando o eletrodo ERNiCrMo-3 com DPAP constante.

Ensaio	Condição	Tipo de Tecimento (TC)	DPEP (mm)	Técnica da Energia (TE)	Energia - E (kJ/cm)	Corrente Eficaz - I _e (A)	Velocidade de soldagem - V _s (cm/min)
1	CC1	1	1	1	1	223	25
2	CC1T	2	1	1	1	223	25
3	CC2	1	1	1	2	285	25
4	CC2T	2	1	1	2	285	25
5	CC3	1	1	1	3	343	25
6	CC3T	2	1	1	3	343	25
7	CC4	1	1	2	1	285	32
8	CC4T	2	1	2	1	285	32
9	CC5	1	1	2	2	285	25
10	CC5T	2	1	2	2	285	25
11	CC6	1	1	2	3	285	21
12	CC6T	2	1	2	3	285	21
13	CC1	1	2	1	1	223	25
14	CC1T	2	2	1	1	223	25
15	CC2	1	2	1	2	285	25
16	CC2T	2	2	1	2	285	25
17	CC3	1	2	1	3	343	25
18	CC3T	2	2	1	3	343	25
19	CC4	1	2	2	1	285	32
20	CC4T	2	2	2	1	285	32
21	CC5	1	2	2	2	285	25
22	CC5T	2	2	2	2	285	25
23	CC6	1	2	2	3	285	21
24	CC6T	2	2	2	3	285	21
25	CC1	1	3	1	1	223	25
26	CC1T	2	3	1	1	223	25
27	CC2	1	3	1	2	285	25
28	CC2T	2	3	1	2	285	25
29	CC3	1	3	1	3	343	25
30	CC3T	2	3	1	3	343	25
31	CC4	1	3	2	1	285	32
32	CC4T	2	3	2	1	285	32
33	CC5	1	3	2	2	285	25
34	CC5T	2	3	2	2	285	25
35	CC6	1	3	2	3	285	21
36	CC6T	2	3	2	3	285	21

Tabela 8. Parâmetros para soldagem do fatorial completo utilizando o eletrodo ERNiCrMo-3 com DPEP constante.

Ensaio	Condição	Tipo de Tecimento	DPAP (mm)	Técnica da Energia (TE)	Energia (kJ/cm)	Corrente Eficaz – I _e (A)	Velocidade de soldagem – v _s (cm/min)
1	CC3	1	3	1	3	343	25
2	CC3T	2	3	1	3	343	25
3	CC4	1	3	2	1	285	32
4	CC4T	2	3	2	1	285	32
5	CC3	1	2	1	3	343	25
6	CC3T	2	2	1	3	343	25
7	CC4	1	2	2	1	285	32
8	CC4T	2	2	2	1	285	32
9	CC3	1	1	1	3	343	25
10	CC3T	2	1	1	3	343	25
11	CC4	1	1	2	1	285	32
12	CC4T	2	1	2	1	285	32

○ **Procedimento metalográfico para determinação das características geométricas**

O procedimento metalográfico utilizado nesta fase segue a mesma seqüência descrita na Etapa 1 (ensaios preliminares). No entanto, de forma a verificar a influência dos fatores de controle sobre as variáveis de resposta foi realizada uma avaliação estatística empregando análise de variância (ANOVA) através de um programa de computador.

○ **Avaliação dos resultados**

Os resultados obtidos referente às características geométricas do cordão de solda serão apresentados e analisados no capítulo referente aos resultados desta etapa.

➤ **Corrente Pulsada**

○ **Realização dos ensaios**

Para realização dos ensaios definitivos desta fase, as soldagens foram realizadas conforme Tabela 9. Onde foram mantidos constantes: a corrente de base (I_b) em 60 A e o tempo de base (T_b) em 0,3 segundos.

Tabela 9. Parâmetros de soldagem utilizando corrente pulsada.

Ensaio	I _{ef} (A)	I _p (A)	t _p (s)	I _m (A)	V _s (cm/min)	TE	E (kJ/cm)
1	224	330	0,24	180,0	25,0	I	8,1
2	284	330	0,82	257,7	25,0	I	12,3
3	315	330	3,00	305,5	23,7	I	14,4
4	225	390	0,14	165,0	25,0	I	8,1
5	283	390	0,32	230,3	25,0	I	12,2
6	343	390	1,00	313,8	25,0	I	14,8
7	222	450	0,09	150,0	25,0	I	8,0
8	284	450	0,19	211,2	25,0	I	12,3
9	342	450	0,40	282,9	25,0	I	14,8
10	194	390	0,09	136,2	21,0	V	8,3
11	225	390	0,14	165,0	20,0	V	12,2
12	274	390	0,28	219,3	20,0	V	14,8
13	266	390	0,25	210,0	30,0	V	8,0
14	340	390	0,93	309,5	30,0	V	12,3
15	376	390	4,00	367,0	29,0	V	14,0
16	318	390	0,58	277,5	23,0	V	15,0
17	318	390	0,58	277,5	28,0	V	12,3
18	318	390	0,58	277,5	35,0	V	9,8

Onde: I_{ef} – corrente eficaz; I_p – corrente de pico; I_b – corrente de base; t_b – tempo na corrente de base; t_p – tempo na corrente de pico; I_m – corrente média e V_s – velocidade de soldagem.

b) Aplicação do Método Taguchi

O emprego do Método Taguchi foi adotado neste trabalho com intuito principal de se reduzir o número de ensaios realizados para avaliar um número elevado de fatores de controle e de seus níveis, e ainda garantir a análise estatística dos resultados ou o levantamento do efeito de cada fator de controle sobre as respostas analisadas.

Paralelo ao objetivo principal da aplicação do Método Taguchi, procura-se identificar a melhor condição de ajuste de parâmetros que resultem em menores diluições e menores razões entre reforço e largura. Nestas situações foram realizados ensaios de confirmação.

➤ Realização dos ensaios

Para realização dos ensaios desta fase, os fatores de controle e seus respectivos níveis são apresentados na Tabela 10. O valor da DPAP foi mantida constante em 3 mm.

A inclusão de uma mistura de gás com um pouco de gás ativo (99,97% de argônio + 0,03 de óxido nítrico) foi realizada para verificar o possível efeito do gás ativo sobre a soldabilidade do metal de adição na superfície do substrato. O intuito é verificar possíveis benefícios nas características geométricas do cordão de solda.

A aplicação do Método Taguchi baseado na quantidade de fatores de controle que se deseja estudar, definiu a soldagem da planilha L18 conforme Tabela 11. Baseado nos resultados obtidos após a soldagem da planilha L18 (Tabela 11) com aplicação do Método Taguchi foram realizados ensaios complementares conforme Tabela 12.

Tabela 10: Designação dos fatores de controle para o Método Taguchi

Nível	TE (Vs/le)	DPEP (mm)	Arame Eletrodo (Ar)	Gás de Proteção (GP)	Tecimento (TC)	Energia (kJ/cm)
1	25 cm/min (Tipo I)	6	UNSN06625	Argônio	Sem Tecimento	9,6
2	285 A (Tipo V)	10	UNSN10276	Argônio + Hélio	Tecimento Triangular	12,3
3	-	14	UNSN06686	Argônio + NO	Tecimento Duplo 8	14,8

Tabela 11: Parâmetros de soldagem referente a planilha L18 gerados pelo Método Taguchi

Ensaio	TE	DPEP	Ar	GP	TC	E	Corrente Eficaz – le (A)	Velocidade de soldagem – vs (cm/min)
1	1	1	1	1	1	1	223	25
2	1	1	2	2	2	2	285	25
3	1	1	3	3	3	3	343	25
4	1	2	1	1	2	2	285	25
5	1	2	2	2	3	3	343	25
6	1	2	3	3	1	1	223	25
7	1	3	1	2	1	3	343	25
8	1	3	2	3	2	1	223	25
9	1	3	3	1	3	2	285	25
10	2	1	1	3	3	2	285	25
11	2	1	2	1	1	3	285	21
12	2	1	3	2	2	1	285	32
13	2	2	1	2	3	1	285	32
14	2	2	2	3	1	2	285	25
15	2	2	3	1	2	3	285	21
16	2	3	1	3	2	3	285	21
17	2	3	2	1	3	1	285	32
18	2	3	3	2	1	2	285	25

Tabela 12. Parâmetros de soldagem referente aos ensaios complementares do Método Taguchi.

Ensaio	TE	DPEP	Ar	GP	TC	E	Corrente Eficaz – le (A)	Velocidade de soldagem – vs (cm/min)
19	1	1	2	3	2	1	223	25
20	1	1	2	3	3	1	223	25
21	1	3	2	3	2	3	343	25
22	2	3	3	2	3	3	285	21
23	1	3	2	2	2	3	343	25

➤ **Procedimento metalográfico para determinação das características geométricas**

O procedimento metalográfico utilizado nesta fase segue a mesma seqüência descrita na Etapa 1 (ensaios preliminares). No entanto, diferente do realizado na fase anterior, a influência dos fatores de controle sobre as variáveis de resposta foi realizada através de uma avaliação estatística empregando o Método Taguchi com uso de um programa de computador.

➤ **Avaliação dos resultados**

Os resultados obtidos referente às características geométricas do cordão de solda serão apresentados e analisados no capítulo referente aos resultados desta etapa

c) Custos associados à soldagem do Fatorial Completo e Método Taguchi

Para realização de uma estimativa dos cálculos referente aos custos associados ao revestimento, foi tomado como base um comprimento de cordão equivalente a 120 mm, e o preço comercial do quilo de arame eletrodo em R\$ 400,00. As equações utilizadas são as seguintes:

$$n = \frac{[(3xL_t) - L]}{2xL} \quad \text{(Equação 10)}$$

$$t_1 = \left(\frac{l}{V_s}\right) x n \quad \text{(Equação 11)}$$

$$\text{Custo 1 (R\$)} = \left[\frac{(TF x t_1)}{60}\right] x 400 \quad \text{(Equação 12)}$$

$$t_2 = 2 x t_1 \quad \text{(Equação 13)}$$

$$\text{Custo 2 (R\$)} = \left[\frac{(TF x t_2)}{60}\right] x 400 \quad \text{(Equação 14)}$$

Onde,

n – número de passes;

l – comprimento do cordão de solda;

L_t – largura total do revestimento

L – largura de um cordão de solda;

t₁ – tempo necessário para soldagem da primeira camada;

Custo 1 – custo para realização da primeira camada;

t₂ – tempo necessário para soldagem da primeira e segunda camada, respectivamente;

Custo 2 – custo para realização da primeira e segunda camada, respectivamente.

4.2.3. Etapa 3 – Soldagem de revestimentos

Para realização desta etapa as soldagens foram realizadas com corrente contínua. A vazão do gás de proteção, ângulo de alimentação do arame foram os mesmo utilizados na Etapa 2 (Ensaio Definitivos).

➤ Realização dos Ensaio

Foram escolhidas três condições para soldagem de revestimentos, conforme Tabela 13. Cada condição utilizou um arame eletrodo diferente. Estas condições foram baseadas nos resultados obtidos pelo fatorial completo e pela aplicação do Método Taguchi com realização de alguns ajustes. Os corpos de prova para realização dos ensaios foram de 200 x 150 x 12,5 mm, a sobreposição dos passes foi de 1/3 da largura do primeiro cordão, conforme Figura 18. A velocidade de soldagem foi mantida constante em 21 cm/min, o valor da DPAP e DPEP foram de 3 mm e 10 mm, respectivamente.

A temperatura de interpasse, segundo os fabricantes, deve ser inferior a 100 °C, para evitar uma segregação excessiva de elementos e precipitações de carbonetos e fases intermetálicas. Esta temperatura foi monitorada por meio de um termopar digital de contato.

Tabela 13: Parâmetros para soldagem de revestimentos.

Cond.	Arame	Tecimento	Gás de Proteção	le (A)	E (kJ/cm)
R1	UNSN625	Triangular	Argônio	316	18,7
R2	UNSN10276	Duplo oito	Argônio + NO	334	18,9
R3	UNSN06686	Triangular	Argônio	333,2	18,9

➤ Procedimento metalográfico para determinação das características geométricas

O comprimento total do cordão de solda foi de 200 mm, para análise metalográfica foi retirada uma seção de 10 mm no centro do corpo de prova. A partir desta amostra o procedimento para determinação das características geométricas do revestimento segue a mesma seqüência descrita na Etapa 1 (ensaio preliminares).

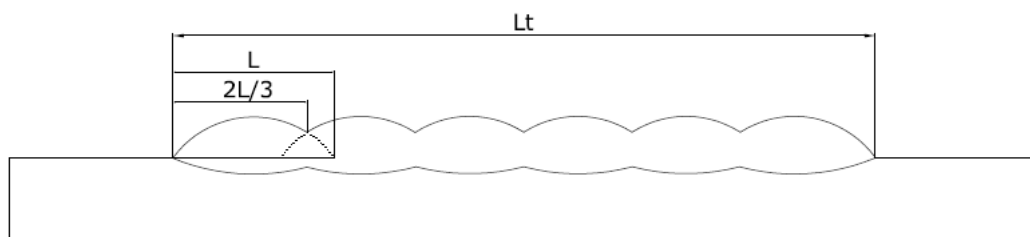


Figura 18. Desenho esquemático de sobreposição de camadas.

4.2.3.1. Avaliação dos resultados

Os resultados obtidos referente às características geométricas do cordão de solda e da microestrutura serão apresentados e analisados no capítulo referente aos resultados desta etapa.

Capítulo V

5. ETAPA 1 - ENSAIOS PRELIMINARES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados na primeira etapa. A utilização do processo TIG com alimentação automática de arame frio pode ser uma boa alternativa para aplicação de revestimentos voltados para aumentar a resistência a corrosão de diversos componentes ou peças das indústrias do setor de petróleo e gás natural. Este processo com adição de arame frio ainda é pouco estudado, e a literatura ainda é escassa sobre o tema, no entanto faz-se necessário um estudo cauteloso sobre este processo, sendo necessária uma observação do comportamento das principais variáveis tais como, corrente contínua e corrente pulsada, velocidade de soldagem, distância ponta do eletrodo a peça (DPEP), além das variáveis relacionadas diretamente com o processo TIG. É necessário também o estudo das variáveis relacionadas com a alimentação automática de arame frio como o ângulo em que o arame entra na poça de fusão, a distância da ponta do arame a peça (DPAP), direção de alimentação podendo ser na frente do arco ou por trás do arco e a velocidade de alimentação do arame.

A realização dos ensaios preliminares teve como objetivo encontrar a faixa operacional do processo TIG com alimentação automática de arame com simples deposição para soldagem posterior de revestimentos com ligas de níquel com o intuito de se conseguir um cordão com bom acabamento superficial e baixa diluição com o máximo possível de material depositado.

5.1. Posição de Alimentação de Arame

Inicialmente as soldagens foram realizadas em chapas de aço carbono com metal de adição em aço carbono com intuito de estabelecer os primeiros parâmetros de soldagem. Foram realizadas soldagens com alimentação automática de arame frio na frente da poça de fusão e por trás da poça de fusão e foi constatado que quando a alimentação é feita na frente do arco se tem cordões com melhor acabamento superficial e maior taxa de fusão. O aumento da velocidade de alimentação do arame (taxa de deposição) provoca uma maior retirada de calor da região do arco e da poça de fusão em função da maior quantidade de material que deverá ser aquecido e fundido. Este fenômeno provoca alterações nos valores de diluição (além da mudança em outros parâmetros). Desta forma pode-se concluir que a melhor condição na soldagem TIG com alimentação automática de arame frio se dá quando a alimentação é feita na frente do arco de soldagem.

5.2. Técnica da Energia de Soldagem (TE)

A Técnica da Energia foi utilizada com intuito de verificar sua influência sobre as características geométricas do cordão de solda, esta se aplica de duas maneiras: a primeira foi realizada mantendo a velocidade de soldagem constante em um valor intermediário e variando a corrente eficaz (Tipo I); a segunda maneira foi realizada mantendo a corrente constante em um valor intermediário e o ajuste da energia foi realizado pela mudança na velocidade de soldagem (Tipo V). A aplicação desta técnica já foi estudada em outros trabalhos, Magalhães (2008) mostrou a influência da Técnica da Energia sobre as características do cordão de solda.

Durante a realização desta etapa na busca por boas condições de soldagens, foram estabelecidos os parâmetros de soldagem conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14: Parâmetros de soldagem utilizando corrente contínua

Corrente (A)	Vel. de Sold. (cm/min)	Técnica da Energia (TE)	Energia (KJ/cm)
223	25	I	9,6
285	25	I	12,3
343	25	I	14,8
285	32	V	9,6
285	25	V	12,3
285	21	V	14,7

5.3. Variação da DPEP

A seleção da distância entre a ponta do eletrodo e a peça (DPEP) foi feita baseada na estabilidade do arco e no perfil do cordão de solda. Inicialmente foram realizadas soldagens com DPEP igual a 4 mm utilizando corrente contínua. O perfil do cordão de solda destas soldagens foi analisado, apresentando valores de diluição acima de 10 %. Com o intuito de reduzir ainda mais os valores de diluição buscou-se uma condição com menor penetração, maior estabilidade no arco. Isto foi conseguido com a redução da concentração de calor sobre a peça através do aumento da DPEP, já que os níveis de correntes eficazes já haviam sido estabelecidos. O aumento da DPEP provoca uma redução na concentração do arco (arco mais largo e maior área de concentração na peça) fazendo com que a pressão do arco sobre a peça sofra uma redução, e conseqüentemente, menor quantidade de calor é transferido para a peça acarretando em uma menor diluição. Com este aumento também foi verificado uma melhor estabilidade do arco. Desta forma os menores valores de DPEP encontrados estão no intervalo de 6 a 14 mm.

5.4. Variação da DPAP e do ângulo de alimentação do arame

O ângulo de alimentação de arame e a distância da ponta do arame a peça (DPAP) tomando como referência o centro do eletrodo são muito importantes quando se consideram as características geométricas do cordão de solda e a estabilidade do processo, uma vez que estas variáveis influenciam, dentre vários fatores, no nível de diluição obtido. Para medição dos ângulos foi tomado como referência o eixo vertical. Ângulos muito pequenos restringem-se a baixas velocidades de alimentação, pois velocidades altas acarretam em interrupção da alimentação devido aos toques do arame sobre a peça, já ângulos muito grandes geram problemas com altas taxas de alimentação, ou seja, a velocidade de alimentação é maior do que o arco pode fundir, fazendo com que o arame atravesse o arco sem se fundir. Com isso, os ensaios preliminares mostraram que se deveria encontrar um meio termo no ângulo de posicionamento da alimentação de arame. Neste sentido, a partir dos testes exploratórios, foi constatado que o ângulo de alimentação em torno de 50° em relação a tocha de soldagem pode ser um bom parâmetro para soldagem de revestimento.

Definido o ângulo de alimentação, o ajuste realizado foi na DPAP, pois esta altura influencia diretamente nos valores de diluição. Foi constatado que grandes DPAP geram um alto nível de diluição (Tabela 15), fazendo com isso a necessidade de um ajuste fino na busca de melhores níveis de diluição. Foram verificados que os melhores valores de DPAP estão no intervalo de 1 a 3 mm com alimentação no centro do arco.

Tabela 15. Resultados obtidos durante os ensaios preliminares com a variação da DPAP.

Ensaio	DPAP (mm)	Diluição (%)
1	5	11,3
2	4	6,28
3	3	1,02

5.5. Considerações Finais

Observando os dados adquiridos durante as soldagens, constatou-se que os parâmetros ajustados nas fontes de soldagens correspondiam aos parâmetros adquiridos, validando com isso os ensaios realizados neste trabalho.

Os ensaios preliminares foram realizados afim de se estabelecer as melhores condições possíveis para realização dos ensaios definitivos.

Os níveis de corrente empregados apresentaram um arco estável, com boa taxa de fusão, logo serão mantidos os três níveis de correntes eficazes para realização dos ensaios definitivos.

Capítulo VI

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios definitivos. Os resultados obtidos serão analisados de forma quantitativa de modo a avaliar o efeito das variáveis estudadas na geometria do cordão de solda, na diluição, nos custos associados ao revestimento, nas características econômicas e operacionais.

Busca-se de uma maneira geral menores valores para o produto da diluição (D) pela razão entre o reforço e largura (R/L), haja vista, que baixos níveis de diluição (D) com baixo índice de convexidade (R/L) combina com melhores características geométricas.

Primeiramente serão mostradas e discutidas as soldagens realizadas variando distância ponta do eletrodo peça (DPEP), distância ponta do arame peça (DPAP) e o tipo de tecimento. A primeira para três níveis de correntes eficaz e três velocidades de soldagem. Na segunda utilizou-se dois níveis de corrente eficaz e dois níveis de velocidades de soldagem. Em uma segunda etapa, serão apresentados e discutidos os ensaios realizados utilizando o Método Taguchi, variando-se três DPEP, três gases de proteção, três metais de adição, três tipos de tecimentos, três velocidades de soldagem e três níveis de correntes eficazes.

6.1. Etapa 2 – Ensaios Definitivos

6.1.1. Soldagem Utilizando o Eletrodo ERNiCrMo-3 em um Fatorial Completo

a) Soldagem com Corrente Contínua

Primeiramente foram realizadas as soldagens com corrente contínua mantendo a DPAP constante, variando-se: os valores de corrente eficaz ; velocidade de soldagem e a utilização ou não do tecimento, salientando que algumas das amostras não soldaram. A Tabela 16 mostra os resultados relacionados a geometria do cordão de solda.

Tabela 16. Resultado das soldagens do fatorial completo com corrente contínua.

Ens.	Cond.	Tec.	Pos.	DPEP (mm)	DPAP (mm)	E (kJ/cm)	TE	D (%)	Média. D (%)	Ref. (mm)	Larg. (mm)	Pen. (mm)	Ref. /Larg.	D*(Ref. /Larg.)
1	CC1	1	Início	6	3	1	I	4,94	5,37	4,68	3,92	0,55	1,19	5,9
1	CC1	1	Meio	6	3	1	I	4,44		4,52	4,48	0,43	1,01	4,48
1	CC1	1	Fim	6	3	1	I	6,73		4,4	3,78	0,71	1,16	7,83
2	CC1	2	Início	6	3	1	I	1,71	1,52	3,91	8,97	0,13	0,44	0,74
2	CC1	2	Meio	6	3	1	I	1,67		3,87	8	0,12	0,48	0,81
2	CC1	2	Fim	6	3	1	I	1,18		3,89	8,15	0,08	0,48	0,56

continuação da Tabela 16

Ens.	Cond.	Tec.	Pos.	DPEP (mm)	DPAP (mm)	E (kJ/cm)	TE	D (%)	Média. D (%)	Ref. (mm)	Larg. (mm)	Pen. (mm)	Ref. /Larg.	D*(Ref. /Larg.)
3	CC2	1	Início	6	3	2	I	14,75	13,13	4,33	6,23	1,30	0,70	10,26
3	CC2	1	Meio	6	3	2	I	13,25		4,13	6,78	1,08	0,61	8,06
3	CC2	1	Fim	6	3	2	I	11,4		4,31	6,12	1,10	0,71	8,04
4	CC2	2	Início	6	3	2	I	8,54	8,28	3,48	8,70	0,35	0,40	3,42
4	CC2	2	Meio	6	3	2	I	8,71		3,74	7,89	0,50	0,47	4,13
4	CC2	2	Fim	6	3	2	I	7,58		3,50	8,12	0,40	0,43	3,27
5	CC3	1	Início	6	3	3	I	29,4	28,79	3,46	10,35	1,86	0,33	9,82
5	CC3	1	Meio	6	3	3	I	28,45		3,09	10,02	1,71	0,31	8,79
5	CC3	1	Fim	6	3	3	I	28,53		3,14	10,71	1,64	0,29	8,37
6	CC3	2	Início	6	3	3	I	20,16	18,87	2,98	11,89	0,76	0,25	5,05
6	CC3	2	Meio	6	3	3	I	19,81		2,81	11,81	0,67	0,24	4,71
6	CC3	2	Fim	6	3	3	I	16,64		3,01	11,74	0,65	0,26	4,27
7	CC4	1	Início	6	3	1	V	20,81	19,11	3,45	6,08	1,46	0,57	11,81
7	CC4	1	Meio	6	3	1	V	17,97		3,65	5,83	1,41	0,63	11,27
7	CC4	1	Fim	6	3	1	V	18,55		3,06	5,93	1,28	0,52	9,59
8	CC4	2	Início	6	3	1	V	13,73	12,65	3,25	7,51	0,65	0,43	5,95
8	CC4	2	Meio	6	3	1	V	11,19		3,38	6,38	0,59	0,53	5,94
8	CC4	2	Fim	6	3	1	V	13,03		3,25	6,80	0,65	0,48	6,23
9	CC2	1	Início	6	3	2	V	14,75	13,13	4,33	6,23	1,30	0,70	10,26
9	CC2	1	Meio	6	3	2	V	13,25		4,13	6,78	1,08	0,61	8,06
9	CC2	1	Fim	6	3	2	V	11,4		4,31	6,12	1,10	0,71	8,04
10	CC2	2	Início	6	3	2	V	8,54	8,28	3,48	8,7	0,35	0,4	3,42
10	CC2	2	Meio	6	3	2	V	8,71		3,74	7,89	0,5	0,47	4,13
10	CC2	2	Fim	6	3	2	V	7,58		3,5	8,12	0,4	0,43	3,27
11	CC5	1	Início	6	3	3	V	19,25	17	3,99	8,23	1,40	0,49	9,34
11	CC5	1	Meio	6	3	3	V	16,6		4,29	7,44	1,49	0,58	9,57
11	CC5	1	Fim	6	3	3	V	15,16		4,48	7,99	1,40	0,56	8,50
12	CC5	2	Início	6	3	3	V	10,83	11,84	3,45	10,43	0,5	0,33	3,59
12	CC5	2	Meio	6	3	3	V	12,45		3,38	10,90	0,58	0,31	3,86
12	CC5	2	Fim	6	3	3	V	12,23		3,28	11,53	0,58	0,28	3,48
13*	CC1	1	Início	10	3	1	I	0,01	0,01	5,00	6,50	0,01	0,77	0,01
13*	CC1	1	Meio	10	3	1	I	0,01		5,00	6,50	0,01	0,77	0,01
13*	CC1	1	Fim	10	3	1	I	0,01		5,00	6,50	0,01	0,77	0,01
14*	CC1	2	Início	10	3	1	I	0,01	0,01	3,60	7,90	0,01	0,46	0,00
14*	CC1	2	Meio	10	3	1	I	0,01		3,60	7,90	0,01	0,46	0,00
14*	CC1	2	Fim	10	3	1	I	0,01		3,60	7,90	0,01	0,46	0,00
15	CC2	1	Início	10	3	2	I	9,07	8,40	4,38	5,58	0,62	0,78	7,11
15	CC2	1	Meio	10	3	2	I	8,59		3,90	7,11	0,6	0,55	4,72
15	CC2	1	Fim	10	3	2	I	7,55		3,99	7,13	0,62	0,56	4,22
16	CC2	2	Início	10	3	2	I	3,97	3,78	3,53	9,75	0,31	0,36	1,44
16	CC2	2	Meio	10	3	2	I	3,64		3,86	7,22	0,17	0,53	1,95
16	CC2	2	Fim	10	3	2	I	3,74		3,71	7,75	0,15	0,48	1,79

continuação da Tabela 16

Ens.	Cond.	Tec.	Pos.	DPEP (mm)	DPAP (mm)	E (kJ/cm)	TE	D (%)	Média D (%)	Ref. (mm)	Larg. (mm)	Pen. (mm)	Ref. /Larg.	D*(Ref. /Larg.)
17	CC3	1	Início	10	3	3	I	23,27	24,29	3,30	10,68	1,24	0,31	7,19
17	CC3	1	Meio	10	3	3	I	23,75		3,20	10,94	1,74	0,29	6,95
17	CC3	1	Fim	10	3	3	I	25,84		3,06	10,56	1,48	0,29	7,49
18	CC3	2	Início	10	3	3	I	14,75	13,84	2,78	12,06	0,45	0,23	3,4
18	CC3	2	Meio	10	3	3	I	13,95		2,9	11,83	0,46	0,24	3,41
18	CC3	2	Fim	10	3	3	I	12,82		2,84	11,73	0,39	0,24	3,10
19	CC4	1	Início	10	3	1	V	5,34	4,66	3,53	5,45	0,37	0,65	3,46
19	CC4	1	Meio	10	3	1	V	4,79		3,50	5,65	0,35	0,62	2,96
19	CC4	1	Fim	10	3	1	V	3,86		3,76	5,97	0,31	0,63	2,44
20	CC4	2	Início	10	3	1	V	2,59	3,08	3,40	6,98	0,10	0,49	1,26
20	CC4	2	Meio	10	3	1	V	2,77		3,63	7,18	0,14	0,51	1,40
20	CC4	2	Fim	10	3	1	V	3,87		3,33	6,42	0,19	0,52	2,01
21	CC2	1	Início	10	3	2	V	9,07	8,40	4,38	5,58	0,62	0,78	7,11
21	CC2	1	Meio	10	3	2	V	8,59		3,90	7,11	0,60	0,55	4,72
21	CC2	1	Fim	10	3	2	V	7,55		3,99	7,13	0,62	0,56	4,22
22	CC2	2	Início	10	3	2	V	3,97	3,78	3,53	9,75	0,31	0,36	1,44
22	CC2	2	Meio	10	3	2	V	3,64		3,86	7,22	0,17	0,53	1,95
22	CC2	2	Fim	10	3	2	V	3,74		3,71	7,75	0,15	0,48	1,79
23	CC5	1	Início	10	3	3	V	9,38	6,74	4,25	8,01	0,85	0,53	4,98
23	CC5	1	Meio	10	3	3	V	4,38		4,22	6,71	0,37	0,63	2,76
23	CC5	1	Fim	10	3	3	V	6,45		4,36	6,83	0,56	0,64	4,12
24	CC5	2	Início	10	3	3	V	2,5	3,02	3,53	10,6	0,23	0,33	0,83
24	CC5	2	Meio	10	3	3	V	4,04		3,48	11,53	0,25	0,30	1,22
24	CC5	2	Fim	10	3	3	V	2,51		3,52	10,46	0,15	0,34	0,85
25*	CC1	1	Início	14	3	1	I	0,01	0,01	4,00	3,00	0,01	1,33	0,01
25*	CC1	1	Meio	14	3	1	I	0,01		4,00	3,00	0,01	1,33	0,01
25*	CC1	1	Fim	14	3	1	I	0,01		4,00	3,00	0,01	1,33	0,01
26*	CC1	2	Início	14	3	1	I	0,01	0,01	3,00	8	0,01	0,38	0,00
26*	CC1	2	Meio	14	3	1	I	0,01		3,00	8	0,01	0,38	0,00
26*	CC1	2	Fim	14	3	1	I	0,01		3,00	8	0,01	0,38	0,00
27	CC2	1	Início	14	3	2	I	9,13	9,56	3,85	6,10	0,65	0,63	5,76
27	CC2	1	Meio	14	3	2	I	10,58		4,02	5,78	0,78	0,69	7,35
27	CC2	1	Fim	14	3	2	I	8,98		4,18	5,45	0,72	0,77	6,89
28	CC2	2	Início	14	3	2	I	3,91	2,28	2,95	7,98	0,27	0,37	1,44
28	CC2	2	Meio	14	3	2	I	1,57		3,11	5,72	0,08	0,54	0,86
28	CC2	2	Fim	14	3	2	I	1,36		3,45	9,61	0,08	0,36	0,49
29	CC3	1	Início	14	3	3	I	19,52	21,79	3,57	8,15	1,08	0,44	8,55
29	CC3	1	Meio	14	3	3	I	23,38		3,28	9,95	1,25	0,33	7,71
29	CC3	1	Fim	14	3	3	I	22,47		3,28	9,66	1,23	0,34	7,63
30	CC3	2	Início	14	3	3	I	9,36	13,06	2,81	10,19	0,52	0,28	2,58
30	CC3	2	Meio	14	3	3	I	16,93		3,06	11,55	0,91	0,27	4,49
30	CC3	2	Fim	14	3	3	I	12,88		2,85	11,04	0,62	0,26	3,32

continuação da Tabela 16

Ens.	Cond.	Tec.	Pos.	DPEP (mm)	DPAP (mm)	E (kJ/cm)	TE	D (%)	Média D (%)	Ref. (mm)	Larg. (mm)	Pen. (mm)	Ref. /Larg.	D*(Ref. /Larg.)
31*	CC4	1	Início	14	3	1	V	0,01	0,01	4,000	3,00	0,01	1,33	0,01
31*	CC4	1	Meio	14	3	1	V	0,01		4,00	3,00	0,01	1,33	0,01
31*	CC4	1	Fim	14	3	1	V	0,01		4,00	3,00	0,01	1,33	0,01
32*	CC4	2	Início	14	3	1	V	0,01	0,01	3,00	8,00	0,01	0,38	0,00
32*	CC4	2	Meio	14	3	1	V	0,01		3,00	8,00	0,01	0,38	0,00
32*	CC4	2	Fim	14	3	1	V	0,01		3,00	8,00	0,01	0,38	0,00
33	CC2	1	Início	14	3	2	V	9,13	9,56	3,85	6,10	0,65	0,63	5,76
33	CC2	1	Meio	14	3	2	V	10,58		4,02	5,78	0,78	0,69	7,35
33	CC2	1	Fim	14	3	2	V	8,98		4,18	5,45	0,72	0,77	6,89
34	CC2	2	Início	14	3	2	V	3,91	2,28	2,95	7,98	0,27	0,37	1,44
34	CC2	2	Meio	14	3	2	V	1,57		3,11	5,72	0,08	0,54	0,86
34	CC2	2	Fim	14	3	2	V	1,36		3,45	9,61	0,08	0,36	0,49
35	CC5	1	Início	14	3	3	V	7,80	7,48	4,92	4,43	0,91	1,11	8,66
35	CC5	1	Meio	14	3	3	V	7,13		4,87	4,11	0,79	1,18	8,45
35	CC5	1	Fim	14	3	3	V	7,51		4,6	4,75	0,81	0,97	7,27
36	CC5	2	Início	14	3	3	V	2,62	3,09	3,57	10,24	0,10	0,35	0,91
36	CC5	2	Meio	14	3	3	V	3,46		3,43	10,72	0,12	0,32	1,11
36	CC5	2	Fim	14	3	3	V	3,20		3,33	10,17	0,1	0,33	1,05

(*) Ensaios que não soldaram.

Onde Ens. – nº do ensaio; Cond. – condição; Tec. – tipo de tecimento; Pos. – posição de onde foi retirada a amostra; DPEP – distância da ponta do eletrodo a peça; DPAP – distância da ponta do arame a peça; E – Energia; TE – técnica da energia; D – diluição; Média D. – média da diluição; Ref.- reforço; Larg.- largura; Pen.- penetração; D*(R/L) – produto da diluição (D) pela razão entre o reforço e largura (R/L).

A Figura 19 até a Figura 24 mostram as seções transversais dos cordões soldados com e sem tecimento para DPEP de 6, 10 e 14 respectivamente. Verificou-se que as amostras com DPAP de 6 mm na condição sem tecimento apresentam uma penetração acentuada, denominada de efeito taça. Com o aumento da DPEP, este efeito vai sendo atenuado.

Também é possível constatar visualmente que o uso do tecimento reduziu consideravelmente a diluição, independente da DPEP. Constatou-se também que a variação da DPEP influencia na diluição de acordo com a energia utilizada.

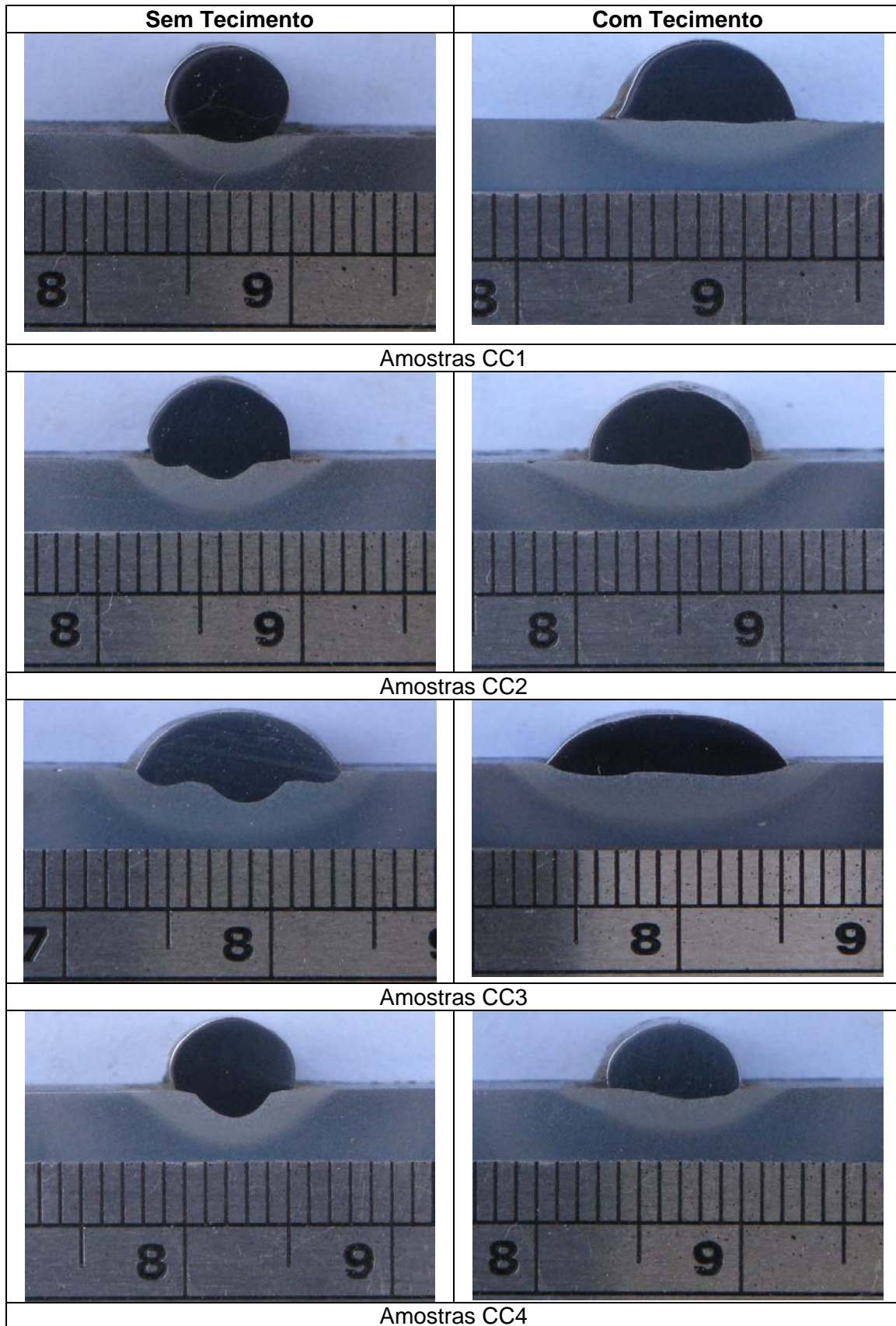


Figura 19: Seção transversal das amostras soldadas na condição CC1, CC2, CC3 e CC4 com DPEP de 6 mm.

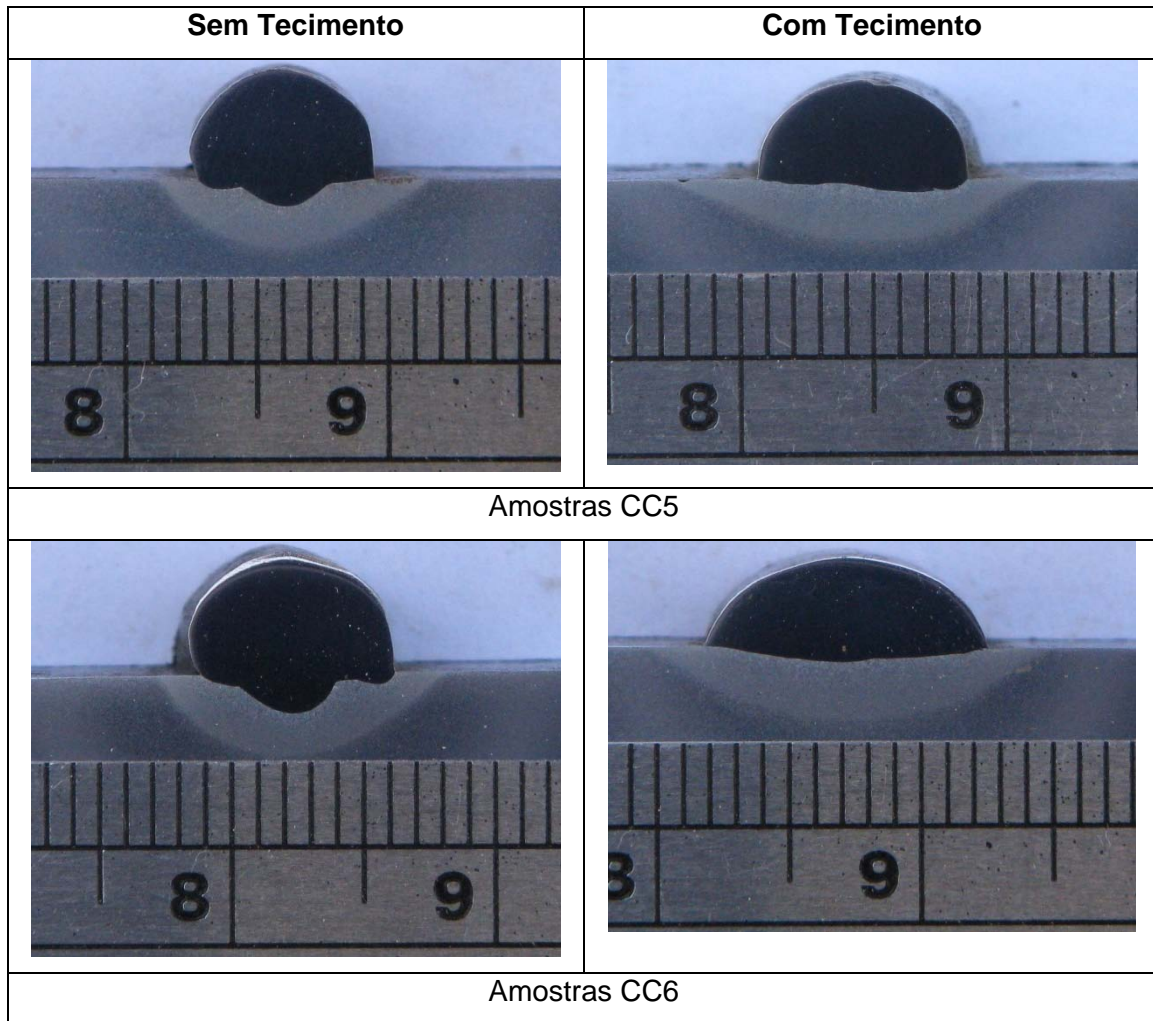


Figura 20. Seção transversal das amostras soldadas na condição CC5 e CC6 com DPEP de 6 mm.

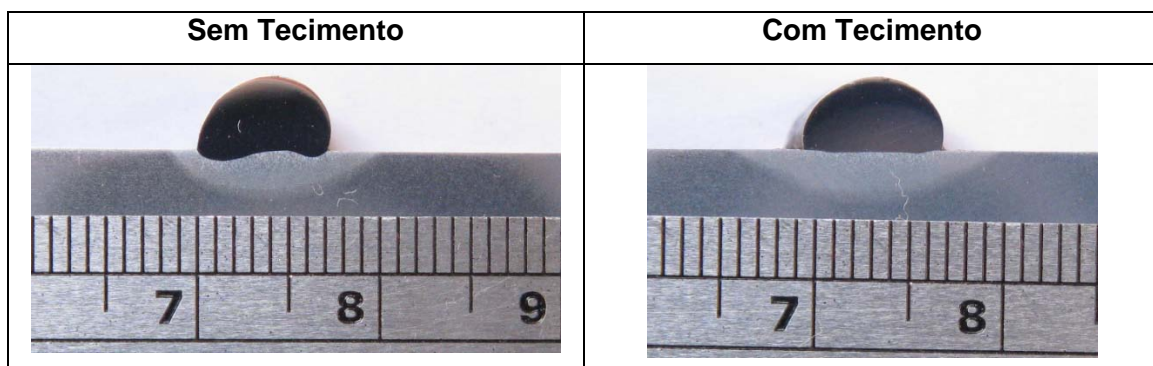


Figura 21. Seção transversal das amostras soldadas na condição CC2 com DPEP de 10 mm.

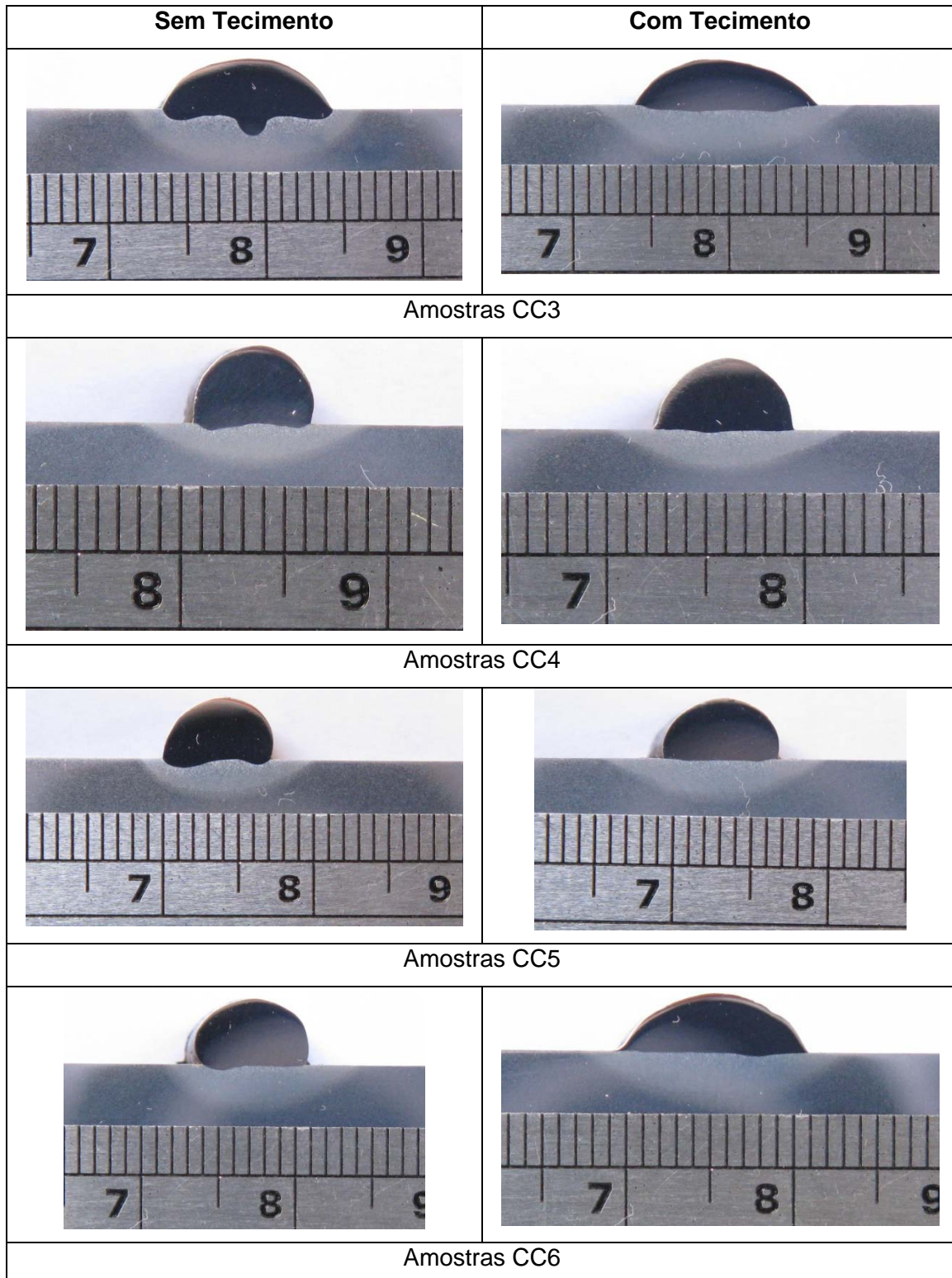


Figura 22. Seção transversal das amostras soldadas nas condições CC3, CC4, CC5 e CC6 com DPEP de 10 mm.

Na Figura 23 verifica-se falta de fusão nas amostras CC2 e CC5, mesmo apresentando baixa diluição, este tipo de cordão não é aconselhável para soldagem de revestimentos, devido sua alta convexidade, podendo causar formação de vazios entre os passes.

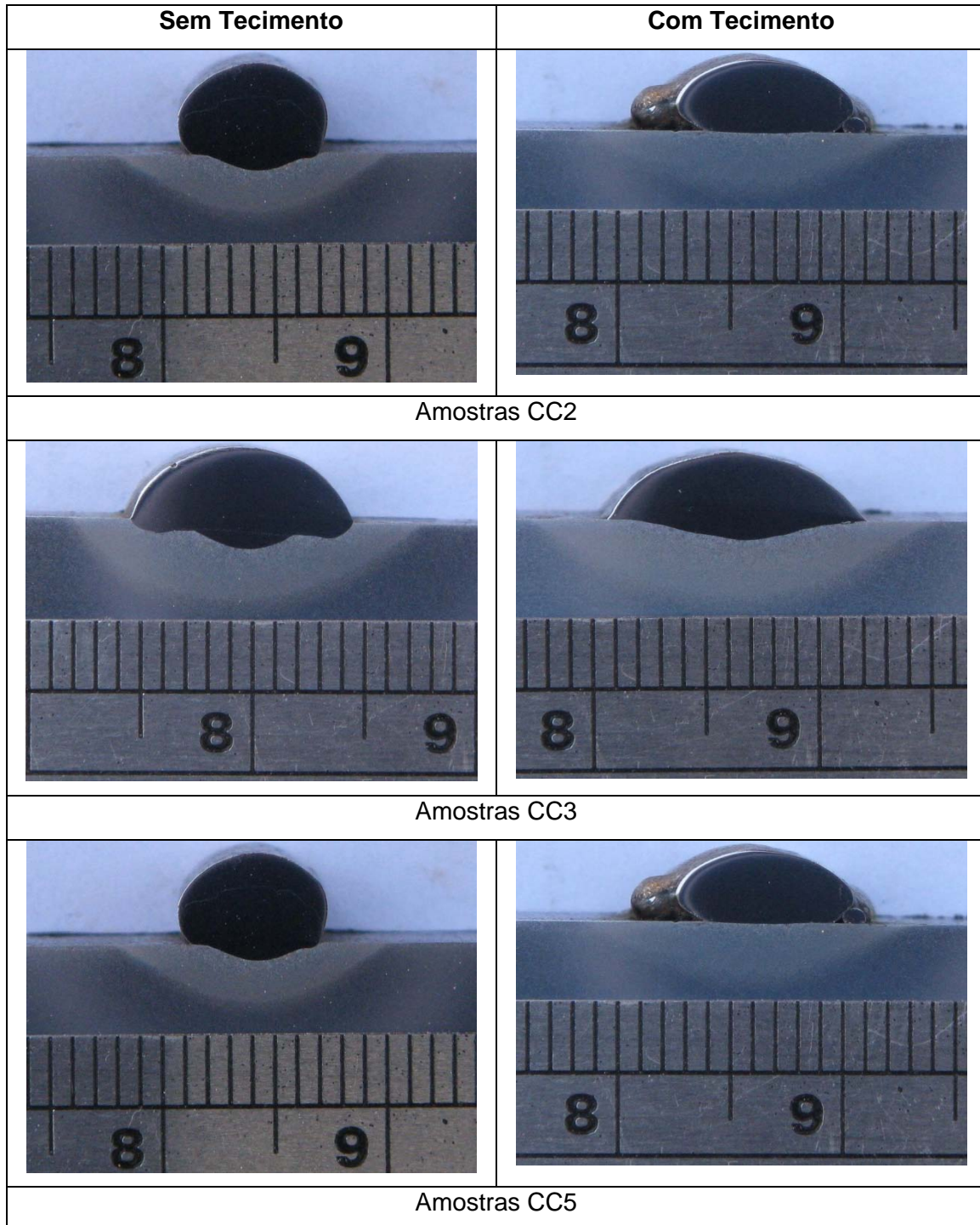


Figura 23. Seção transversal das amostras soldadas nas condições CC2, CC3 e CC5 com DPEP de 14 mm; a) sem tecimento; b) com tecimento.

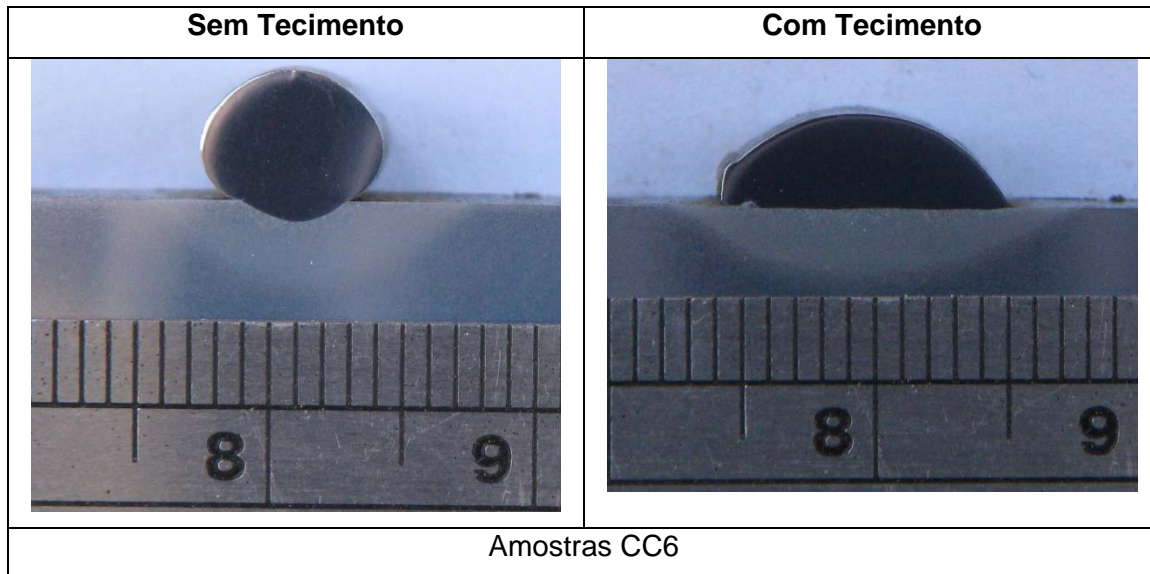


Figura 24. Seção transversal das amostras soldadas na condição CC6 com DPEP de 14 mm.

O que foi constatado através das figuras será validado graficamente a seguir através de uma análise de variância, onde verifica-se a influência dos fatores de controle sobre as variáveis de resposta. Os níveis de significância “ α ” menores que 0,05 indicam que os fatores de controle tiveram influência estatisticamente significativa sobre as variáveis de resposta, com confiabilidade de 95%.

➤ **Influência do tecimento sobre a geometria do cordão de solda;**

Os valores de “ α ” calculados a partir da análise de variância considerando a influência do tecimento sobre as variáveis de resposta, são mostrados na Tabela 17.

Tabela 17. Influência do tecimento sobre as variáveis de resposta.

Variáveis de Resposta	Nível de Significância “ α ”
Reforço	0,000
Largura	0,000
Penetração	0,000
Diluição	0,000
Reforço / Largura	0,000
Diluição*(Reforço/Largura)	0,000

A Tabela 17 mostra que houve influência significativa do tecimento sobre todas as variáveis de resposta analisadas. A Figura 25 mostra o efeito do tipo de tecimento sobre o reforço do cordão de solda.

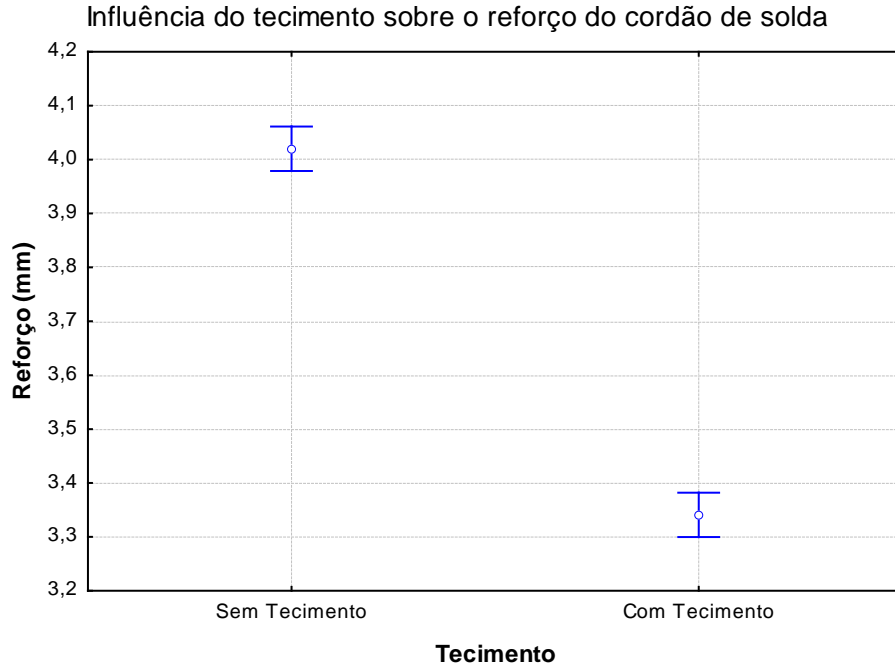


Figura 25. Influência do Tecimento sobre o Reforço do Cordão de Solda.

Analisando a Figura 25, foi possível verificar uma redução no reforço do cordão de solda quando utiliza o tecimento, confirmando o que já era esperado, pois o uso do tecimento proporciona uma melhor distribuição de material sobre a peça, o que implica na redução do reforço e, conseqüentemente, no aumento da largura do cordão de solda (Figura 26).

Da Figura 26 a Figura 30 são apresentados os efeitos do tecimento sobre os fatores comentados. O grande benefício do tecimento é garantir ao mesmo tempo uma menor diluição e uma baixa razão entre reforço e largura.

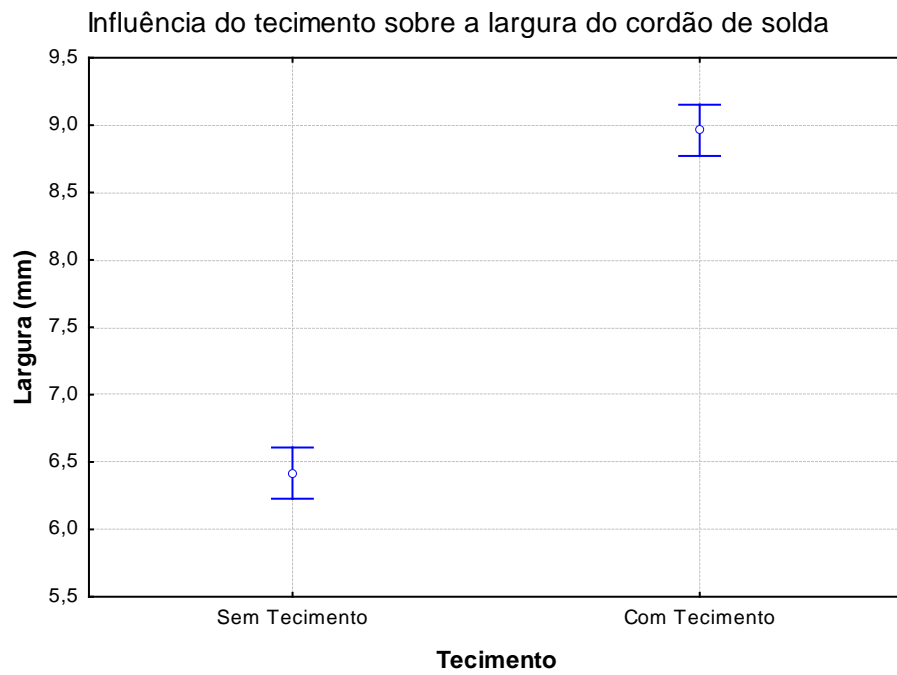


Figura 26. Influência do Tecimento sobre a Largura do Cordão de Solda.

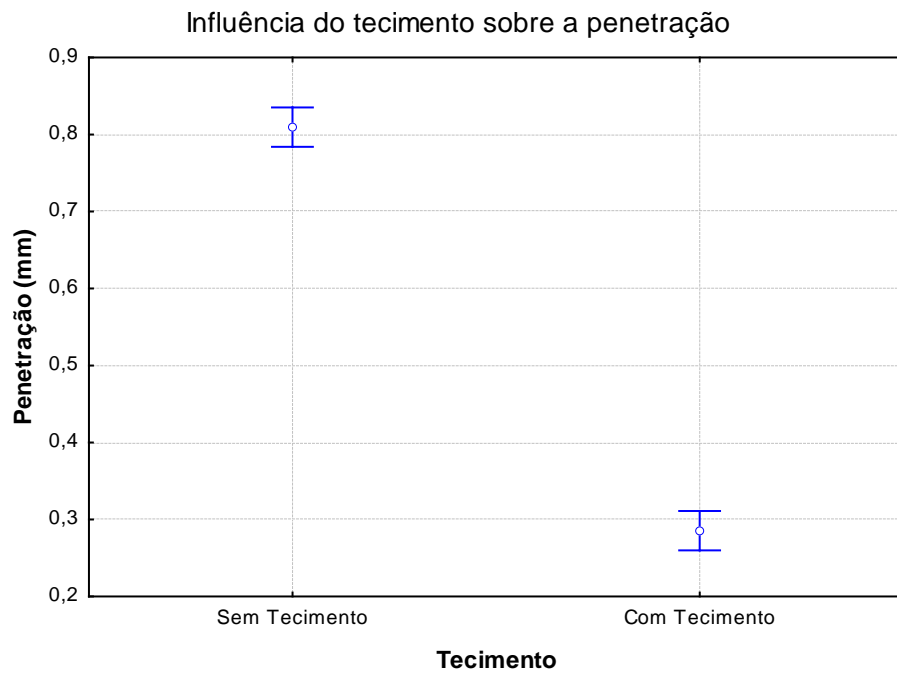


Figura 27. Influência do Tecimento sobre a Penetração.

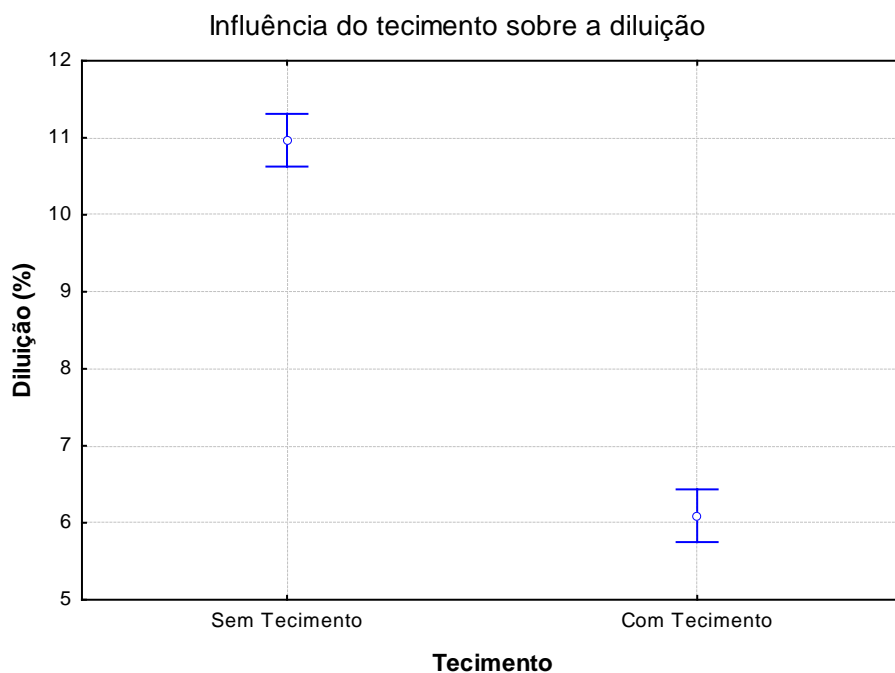


Figura 28. Influência do Tecimento sobre a Diluição.

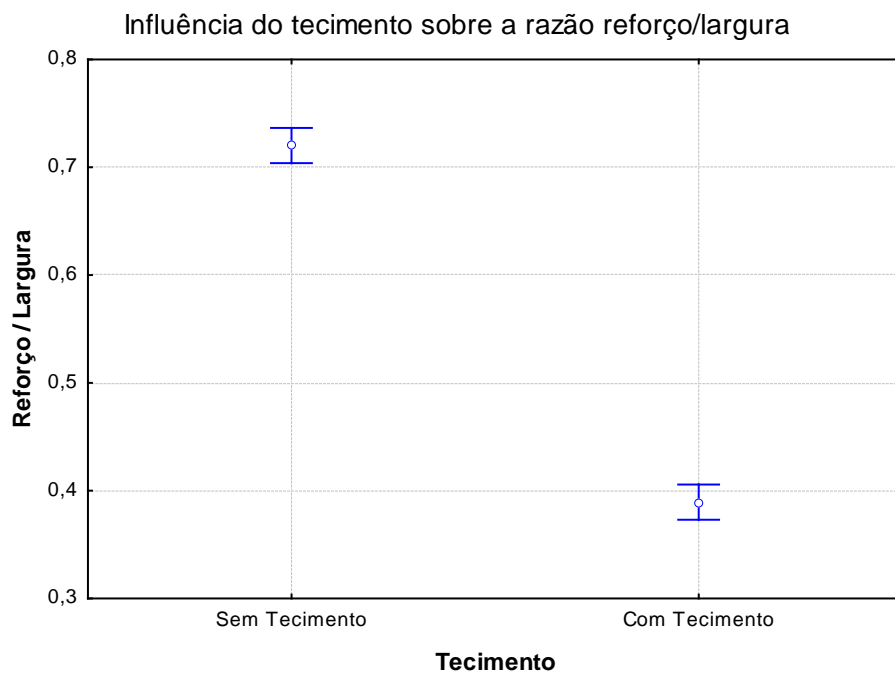


Figura 29. Influência do Tecimento sobre a razão Reforço/Largura.

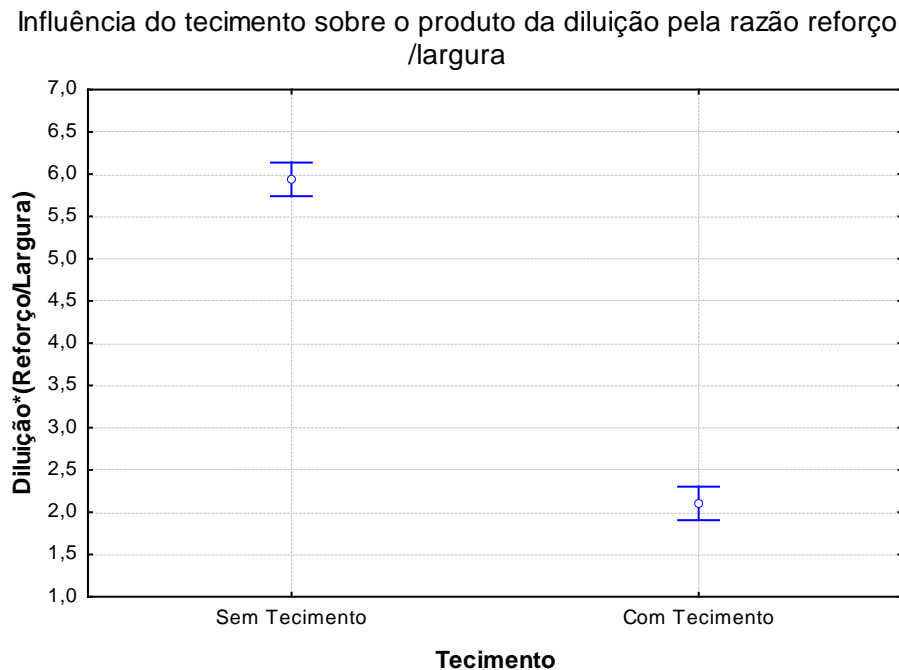


Figura 30. Efeito do Tecimento sobre o produto da Diluição pela razão Reforço/Largura.

Conforme apresentado na Figura 28, a redução nos valores de diluição é importante porque quanto menor este valor, mais próximo estará a composição química e as propriedades do revestimento das condições desejadas, ressaltando que altos níveis de diluição podem produzir efeitos indesejáveis no cordão de solda.

Como foi verificado na Figura 29, a redução da razão reforço/largura (R/L) é bastante significativo com o uso do tecimento, este parâmetro é importante, pois indica o grau de convexidade do cordão de solda. Quando se tem uma razão R/L alta indica que o grau de convexidade é excessivo, dificultando com isso uma adequada sobreposição entre passes para soldagem de revestimentos com a possibilidade de geração de vazios.

➤ **Influência da energia de soldagem sobre a geometria do cordão de solda**

A análise de variância indica que a energia afeta estatisticamente ($\alpha < 5\%$) todas as respostas analisadas (Tabela 18).

A Figura 31 apresenta a variação do reforço com a energia, onde pode ser constatado que apesar de não apresentar um comportamento definido com a mudança de energia, pode-se observar, de uma maneira geral, uma redução no reforço do cordão de solda para maior energia.

Tabela 18. Influência da energia sobre as variáveis de resposta.

Variáveis de Resposta	Nível de Significância “ α ”
Reforço	0,000
Largura	0,000
Penetração	0,000
Diluição	0,000
Reforço / Largura	0,000
Diluição*(Reforço/Largura)	0,000

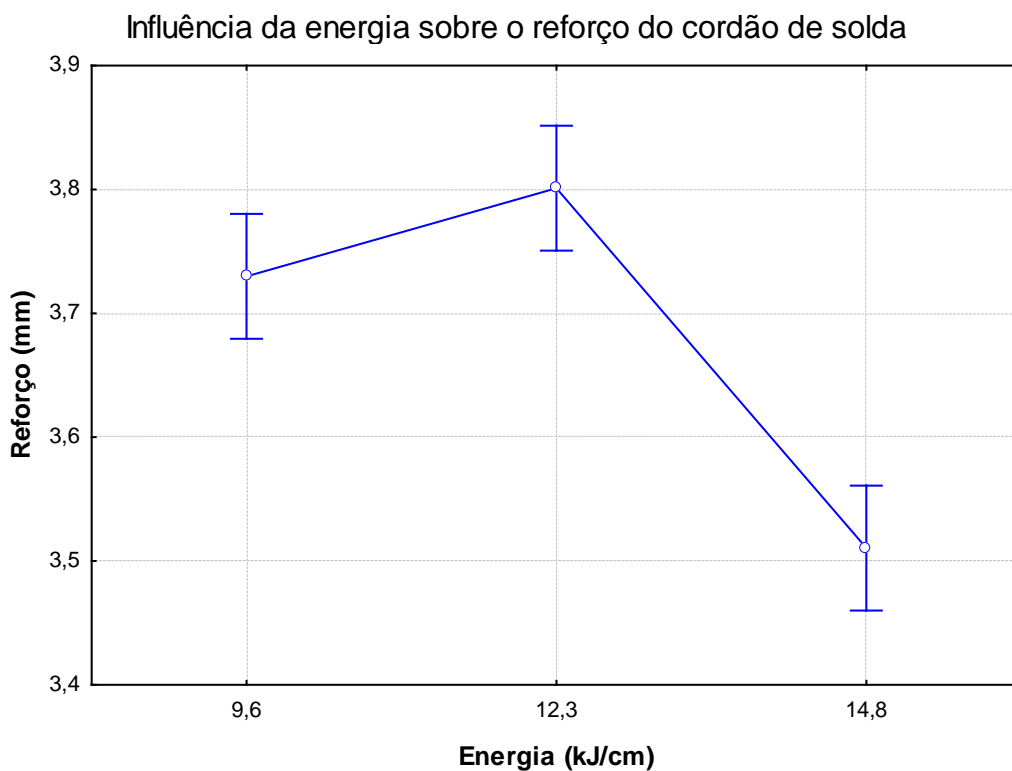


Figura 31. Influência da energia sobre o reforço do cordão de solda.

A Figura 32, a Figura 33 e a Figura 34 mostram os comportamentos da largura, penetração e diluição com a variação da energia. Comportamentos estes que tiveram efeitos similares, ou seja, com o aumento da energia, a largura, a penetração e a diluição aumentaram. Este comportamento pode ser explicado pelo fato do aumento da energia acarretar um aumento na quantidade de calor imposto a peça e conseqüentemente em uma maior poça de fusão, aumentando a largura e a penetração do cordão de solda e por conseqüência aumentando a diluição. Situação a qual já era esperada, devido à maior quantidade de calor imposta a peça.

A energia tem influência direta na diluição. Os níveis de diluição diminuem com a redução do nível de energia no arco. (Dupont, 2001)

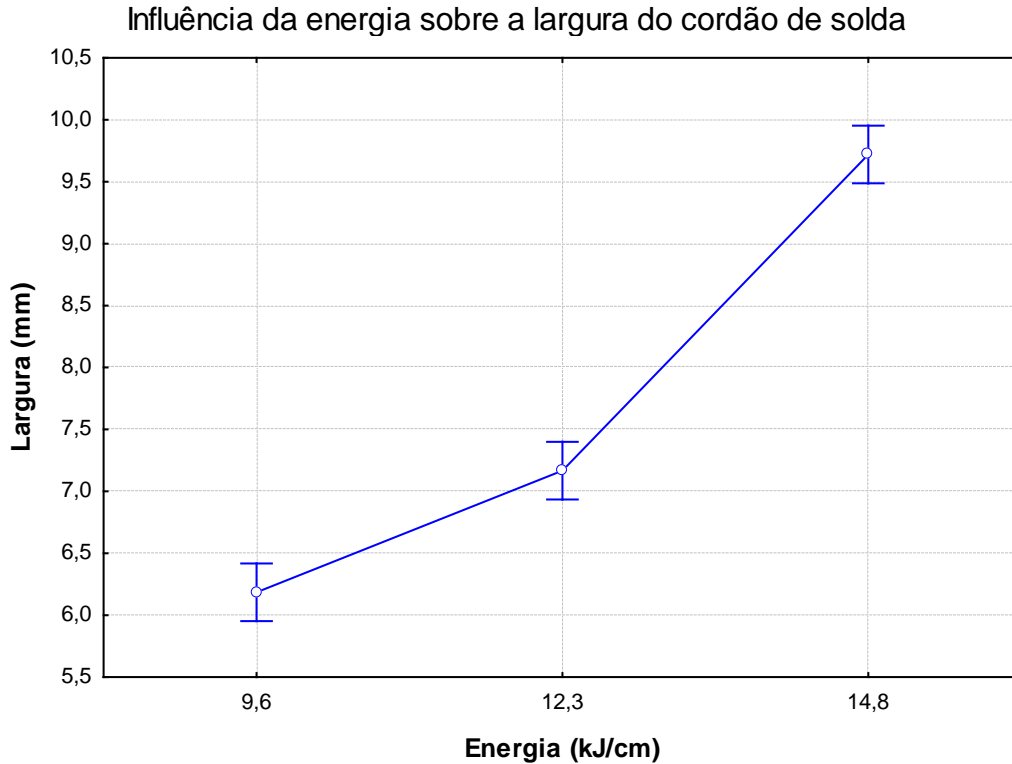


Figura 32. Influência da energia sobre a largura do cordão de solda.

A Figura 35 apresenta o efeito da variação da energia de soldagem sobre a razão reforço/largura (R/L). É possível constatar que o aumento da energia causa uma significativa redução na razão R/L , evitando assim uma convexidade excessiva, fato este que é benéfico para soldagem de vários passes, como a aplicação de revestimentos, evitando assim possíveis vazios que podem surgir entre os passes.

A Figura 36 apresenta o resultado do efeito da energia sobre o produto da diluição pela razão entre reforço e largura - $D^*(R/L)$. Quanto menor este parâmetro, melhor as características para obtenção de um bom revestimento, haja vista, que combina a baixa diluição com as melhores características geométricas. Em função do exposto, a menor energia representa o melhor ajuste, considerando este parâmetro.

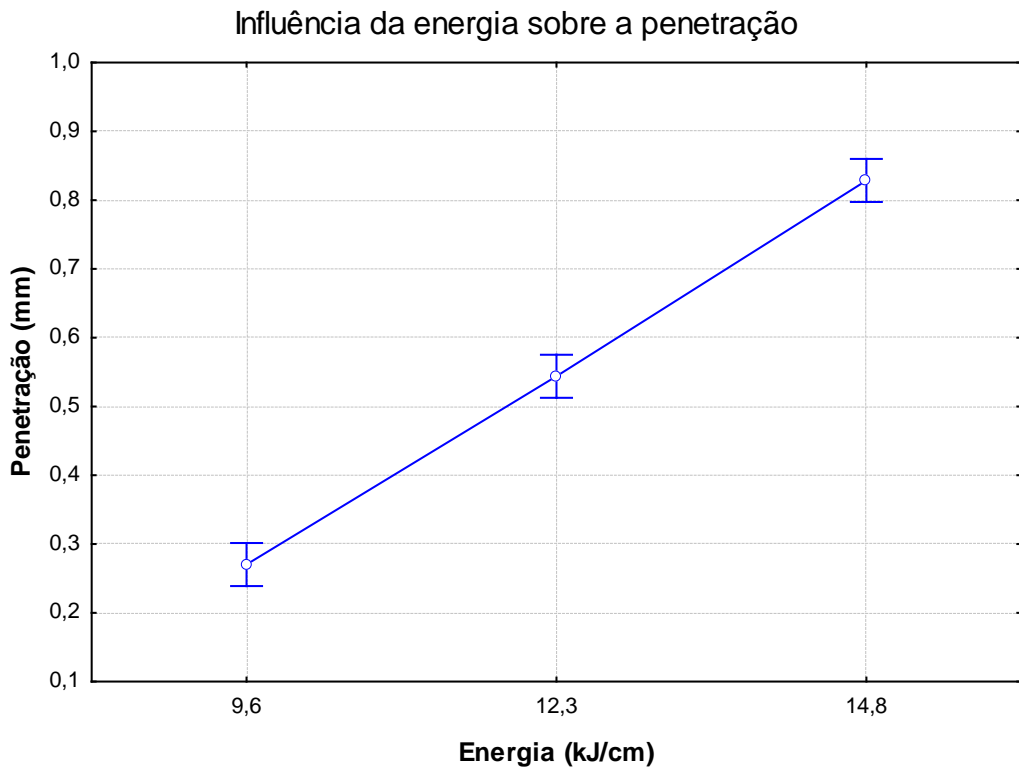


Figura 33. Influência da energia sobre a penetração.

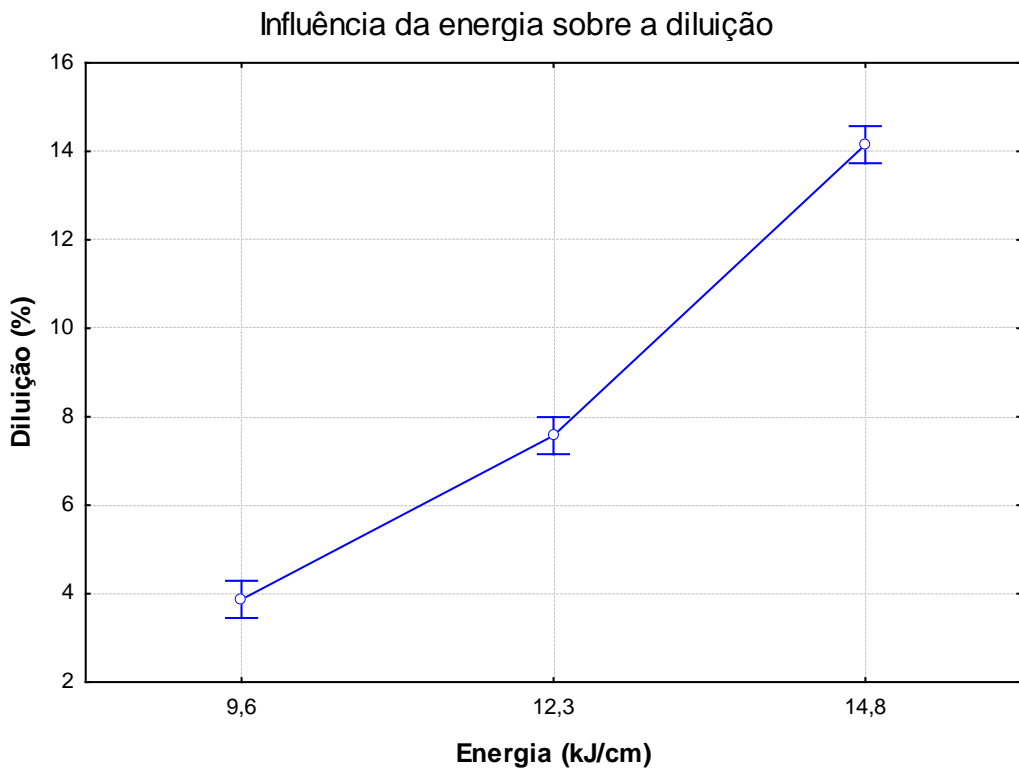


Figura 34. Influência da energia sobre a diluição.

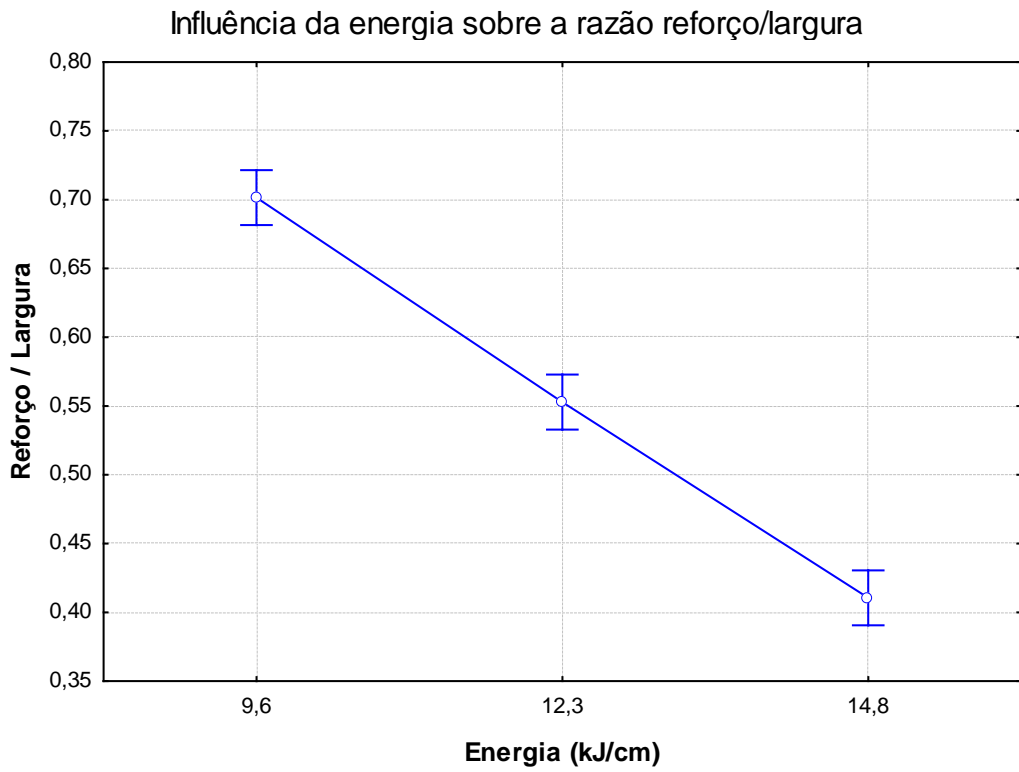


Figura 35. Influência da energia na razão reforço/largura (R/L).

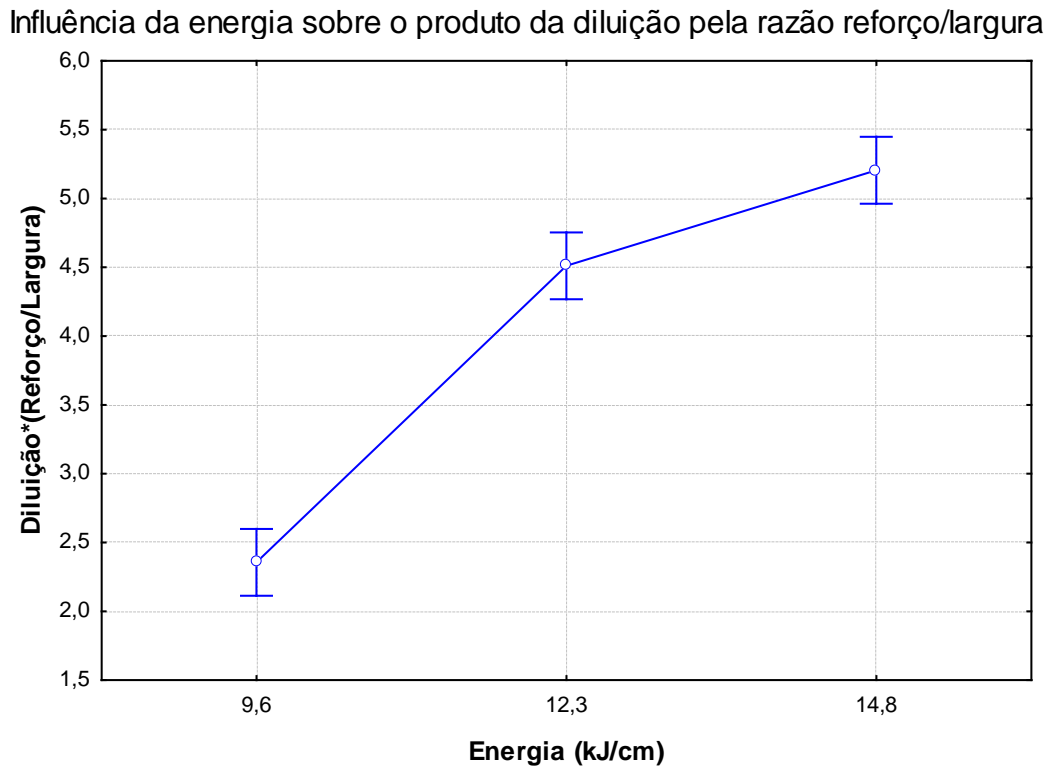


Figura 36. Influência da energia sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura (R/L).

➤ **Influência da técnica da energia sobre a geometria do cordão de solda**

A técnica da energia se divide em dois tipos, são eles: energia tipo I e energia tipo V. A energia tipo I indica que a mudança no nível de energia foi realizada mantendo a velocidade de soldagem constante e alterando apenas a corrente de soldagem. A energia tipo V significa que a mudança no nível de energia foi realizada mantendo a corrente de soldagem constante e alterando apenas a velocidade de soldagem.

Após obtenção dos resultados, foi feita uma análise estatística de variância para verificar a influência da técnica da energia de maneira isolada sobre as características geométricas do cordão de solda.

Os valores do nível de significância “ α ”, calculados a partir da análise de variância feita para verificar a influência da técnica da energia sobre as variáveis de resposta, são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19. Influência da técnica da energia sobre as variáveis de resposta.

Variáveis de Resposta	Nível de Significância “α”
Reforço	0,000
Largura	0,000
Penetração	0,000
Diluição	0,000
Reforço / Largura	0,000
Diluição*(Reforço/Largura)	0,000

De acordo com a Tabela 19 todas as variáveis de resposta sofreram influência significativa. A Figura 37 mostra a influência da técnica da energia sobre o reforço do cordão de solda. Por esta figura, observa-se um aumento do reforço com aumento da energia empregando a técnica da energia Tipo V (alteração da velocidade de soldagem). Por sua vez, ocorre um comportamento inverso para a técnica da energia Tipo I (alteração da corrente eficaz), uma redução do reforço com aumento da energia de soldagem.

A Figura 38 apresenta a influência da técnica da energia sobre a largura do cordão de solda, pode ser visto que para ambos os tipos de energia o comportamento é similar, ou seja, a largura tende a aumentar de acordo com o nível de energia, apresentando apenas uma alteração no comportamento da energia tipo I em relação ao tipo V. A energia Tipo I apresenta uma maior largura quando comparada com alteração de energia Tipo V (na menor e na maior energia).

Influência da técnica da energia sobre o reforço do cordão de solda

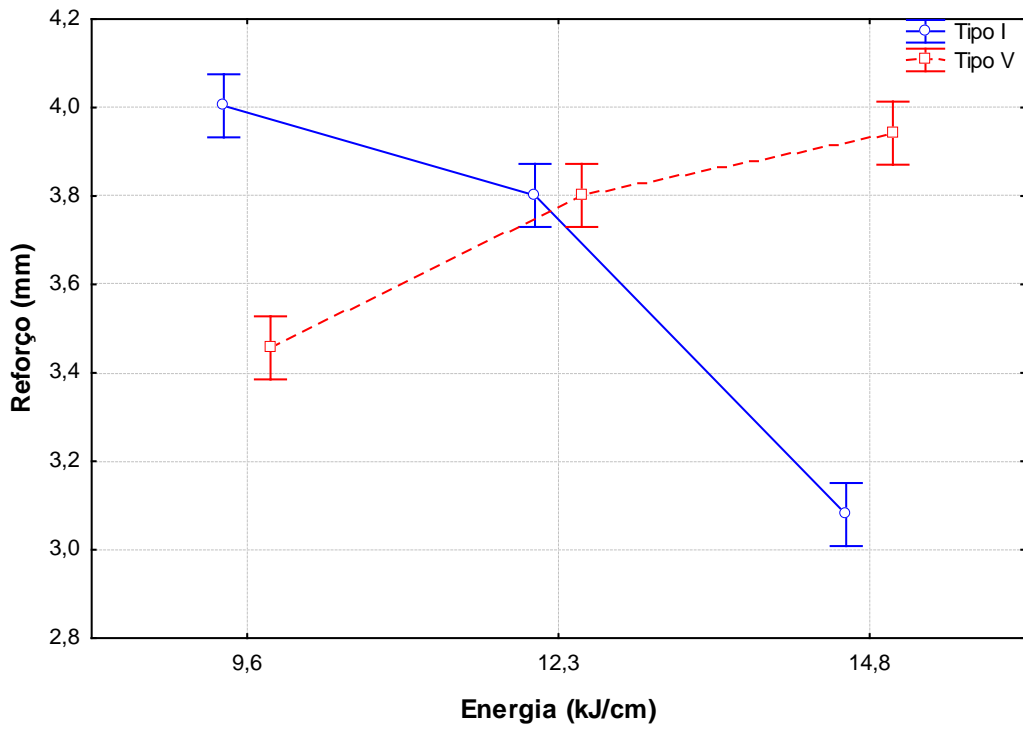


Figura 37. Influência da técnica da energia sobre o reforço do cordão de solda.

Influência da técnica da energia sobre a largura do cordão de solda

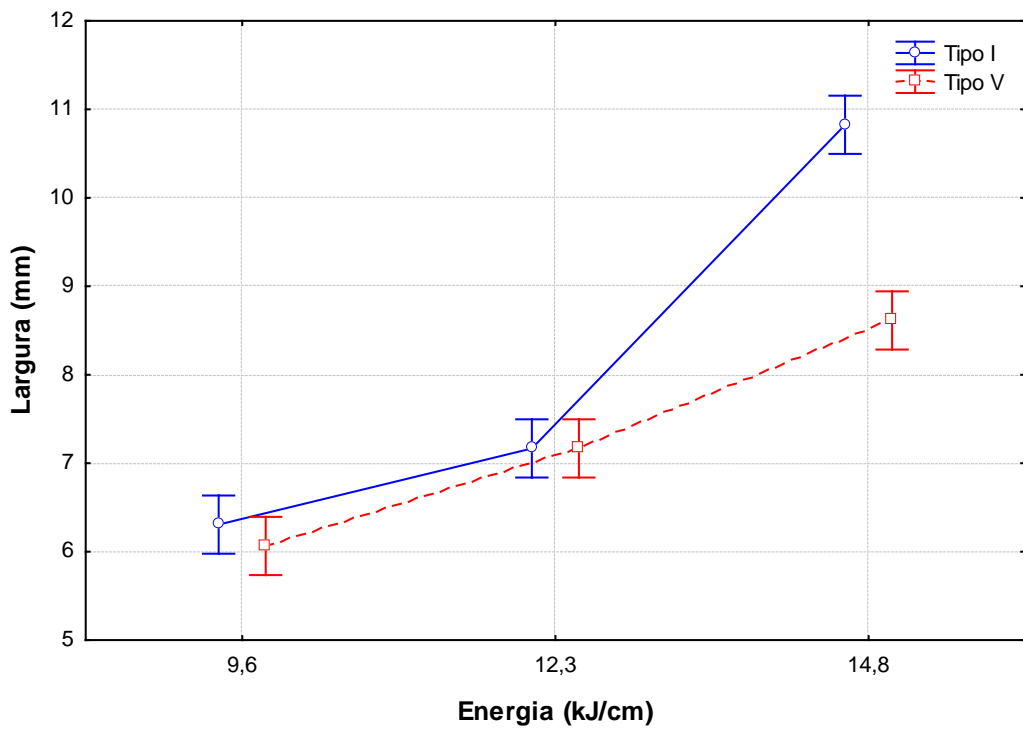


Figura 38. Influência da técnica da energia sobre a largura do cordão de solda.

A Figura 39 e a Figura 40 mostram o efeito da técnica da energia sobre a penetração e diluição respectivamente, ambos com comportamento similar. Para a energia tipo I foi verificado um aumento considerável na penetração e diluição com o aumento do nível de energia. Já para a energia tipo V, o comportamento apesar de ser significativo, não é relevante, pois é praticamente constante quanto a penetração e diluição, sem grandes mudanças independente do nível de energia.

Este resultado está de acordo com os obtidos por Magalhães (2008) e mostra que o efeito de alteração da energia com a mudança de corrente (Tipo I) é bem mais significativa sobre a penetração e a diluição do que a mudança de velocidade de soldagem (Tipo V).

A explicação para este fenômeno pode ser baseada no fato de que a potência do arco é muito mais relevante sobre a geometria da solda que a velocidade de soldagem.

A tensão afeta a largura do arco e conseqüentemente, a pressão que o mesmo exerce sobre a poça de fusão. Da mesma forma, é o comportamento da corrente, porém com um efeito bem superior (quadrático) sobre a penetração.

A partir da Figura 40, pode-se observar que para as diferentes técnicas de energia empregadas, níveis distintos de diluição foram encontrados. Desta forma, verifica-se que para um mesmo nível de energia e aporte térmico semelhante, têm-se níveis de diluição distintos, ou seja, para uma mesma energia uma escolha correta da técnica de energia empregada pode gerar níveis distintos de diluição e de ZAC.

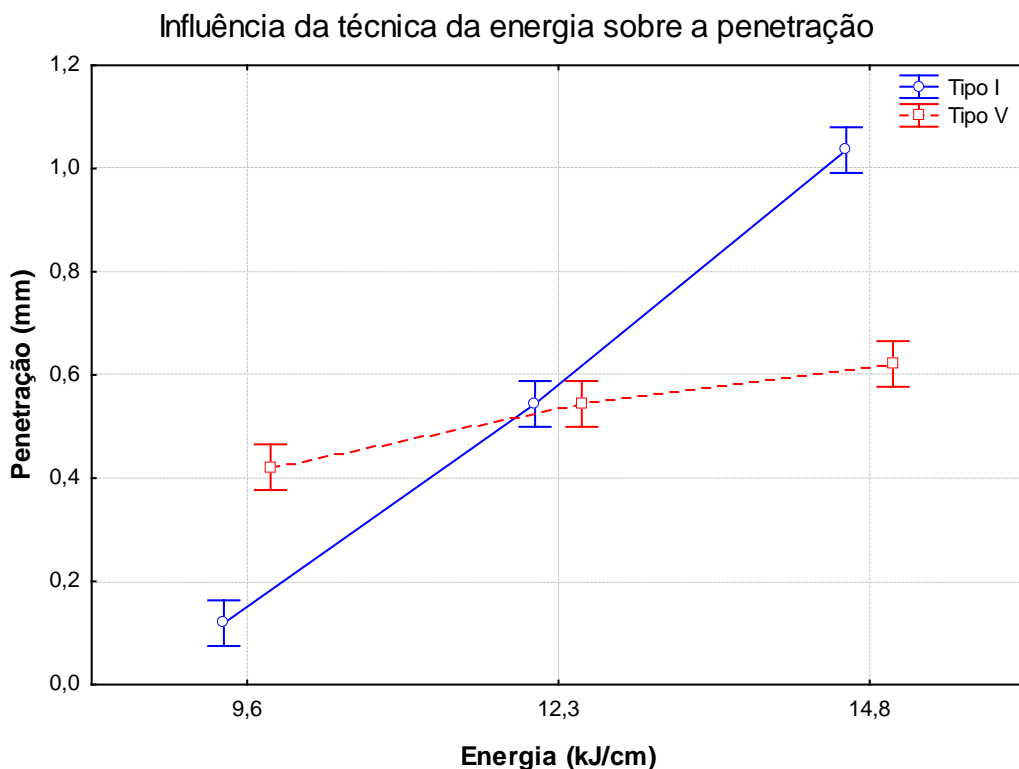


Figura 39. Influência da técnica da energia sobre a penetração.

A Figura 41 apresenta a influência da técnica da energia sobre a razão reforço/largura onde é possível verificar que ao alterar a corrente de soldagem para aumentar a energia (Tipo I) a redução desta razão foi brusca, diminuindo com isso o grau de convexidade do cordão de solda, o que é bastante interessante para soldagem de revestimentos, contudo, a alteração de energia pela velocidade de soldagem (tipo V) não provoca alterações consideráveis na relação reforço/largura, mantendo seu comportamento praticamente constante.

A Figura 42 apresenta a influência da técnica da energia sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura. Por esta figura, é possível verificar um aumento deste produto com o aumento da energia com alteração da corrente eficaz (tipo I). A mudança da energia pela velocidade de soldagem (tipo V) não provoca mudanças consideráveis no parâmetro analisado.

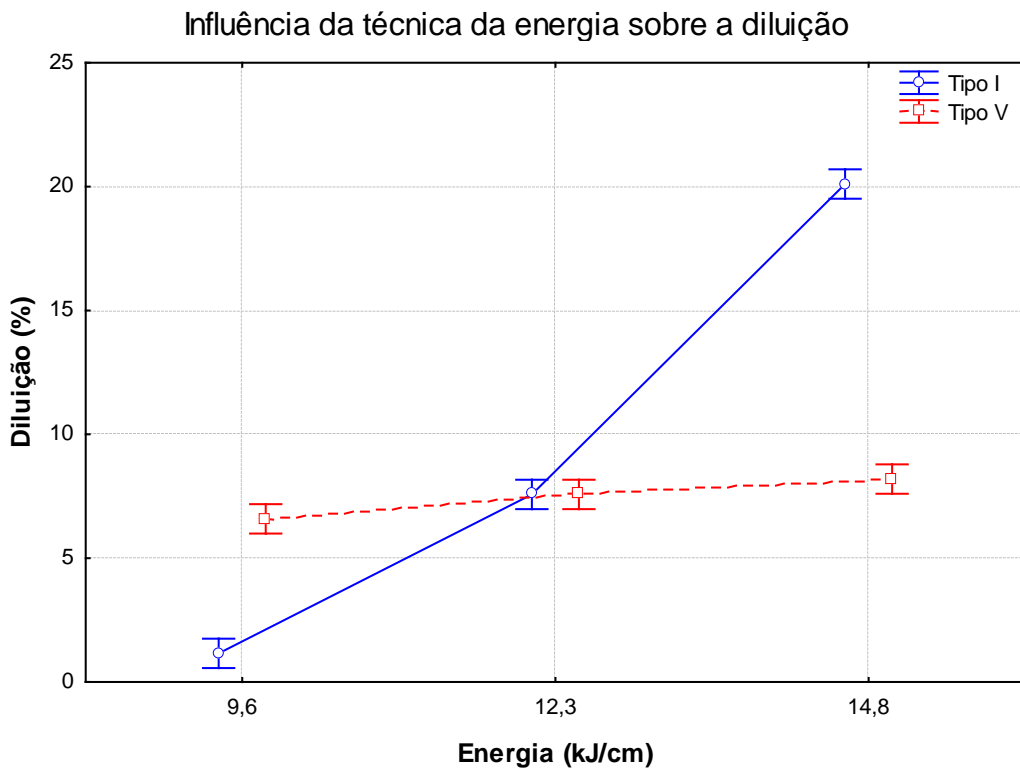


Figura 40. Influência da técnica da energia sobre a diluição.

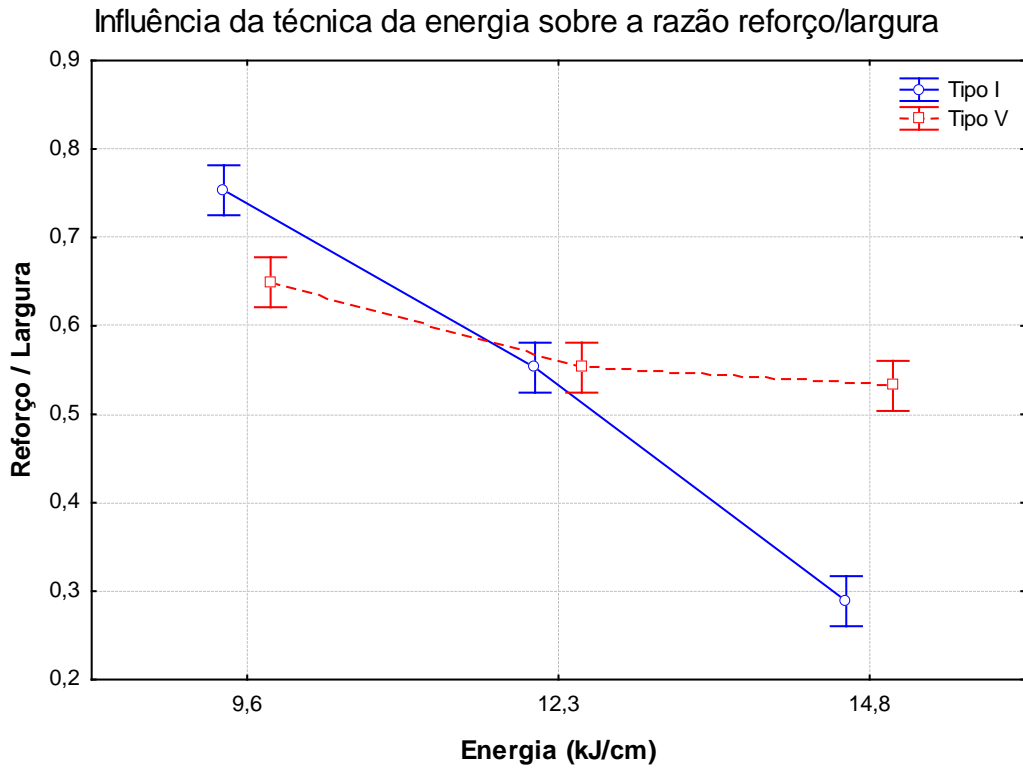


Figura 41. Influência da técnica da energia sobre a razão reforço/largura.

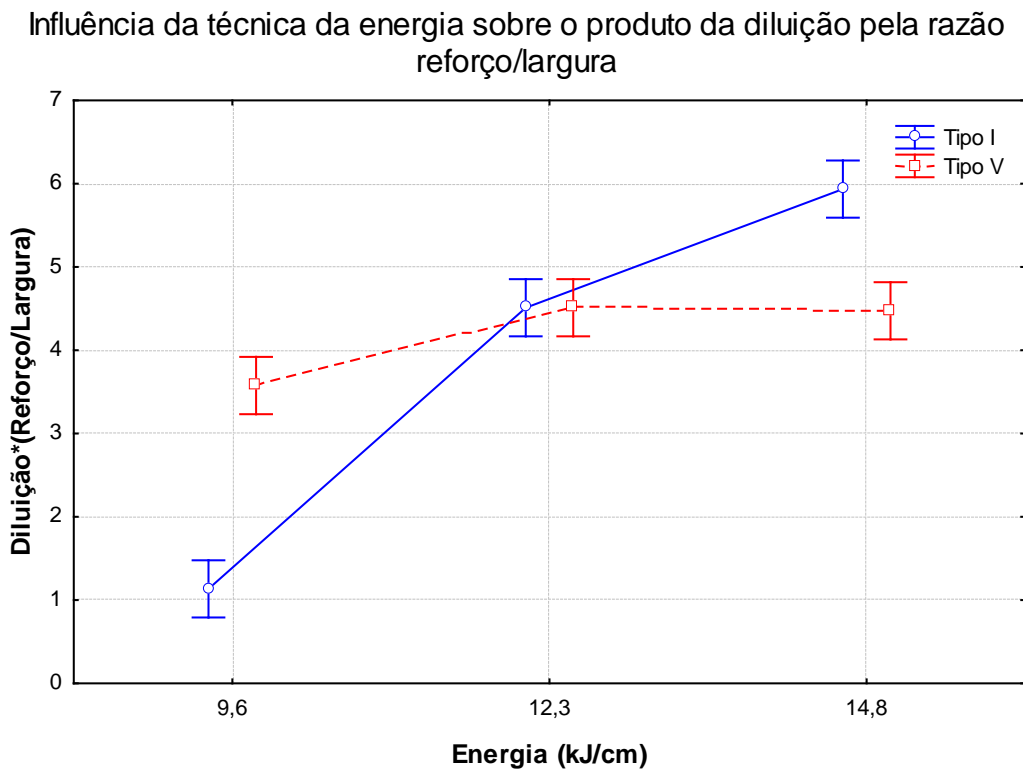


Figura 42. Influência da técnica da energia sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura.

➤ **Influência da DPEP sobre a geometria do cordão de solda.**

A variação da DPEP afeta a geometria do arco (maior comprimento implica em maior largura) e provoca alterações no cordão de solda.

Após realização das soldagens e obtenção dos resultados em três níveis de DPEP, foi feita uma análise estatística de variância para verificar a influência da DPEP sobre as características geométricas do cordão de solda.

Os valores do nível do nível de significância “ α ” são mostrados na Tabela 20.

Tabela 20. Influência da DPEP sobre os fatores de controle.

Variáveis de Resposta	Nível de Significância “α”
Reforço	0,759
Largura	0,007
Penetração	0,000
Diluição	0,000
Reforço / Largura	0,002
Diluição*(Reforço/Largura)	0,000

De acordo com a Tabela 20, somente o reforço não sofreu influência significativa, da DPEP. A Figura 43 mostra um comportamento constante no reforço do cordão de solda com aumento da DPEP. A Figura 44 mostra uma redução da largura do cordão de solda para alta DPEP.

A princípio, o aumento da DPEP provoca um aumento da largura do arco e, conseqüentemente, do cordão de solda. Porém, a alimentação de arame frio no arco de soldagem interfere neste comportamento e proporciona o resultado apresentado na Figura 44.

A Figura 45 e Figura 46 apresentam o efeito da DPEP sobre a penetração e diluição respectivamente. É possível verificar a redução da penetração e da diluição com o aumento da DPEP. Este comportamento pode ser justificado pelo fato de que ao se aumentar a DPEP, aumenta-se o comprimento do arco e a largura do mesmo, reduzindo a densidade do arco sobre a poça de fusão e conseqüentemente a penetração.

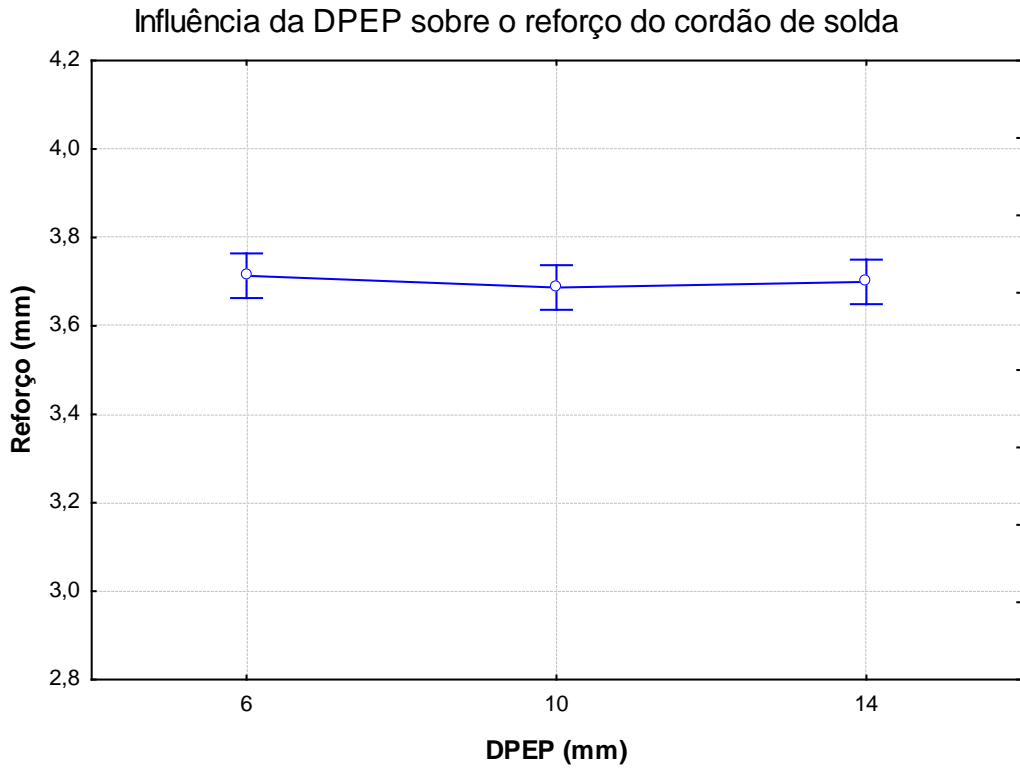


Figura 43. Influência da DPEP sobre o reforço do cordão de solda.

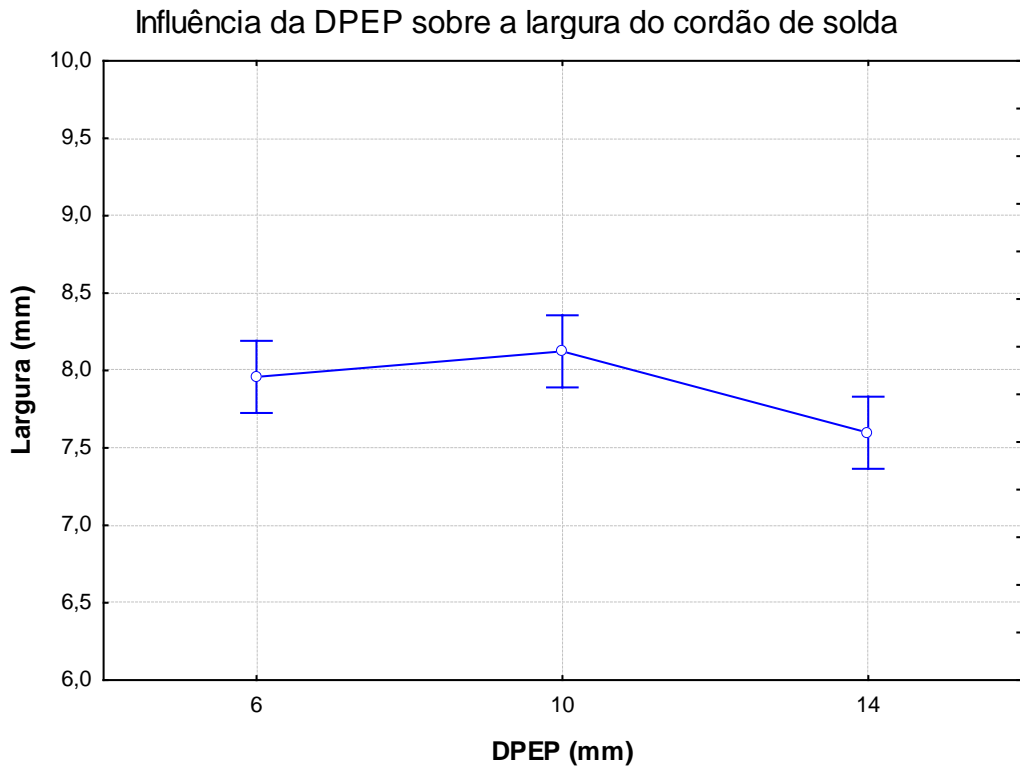


Figura 44. Influência da DPEP sobre a largura do cordão de solda.

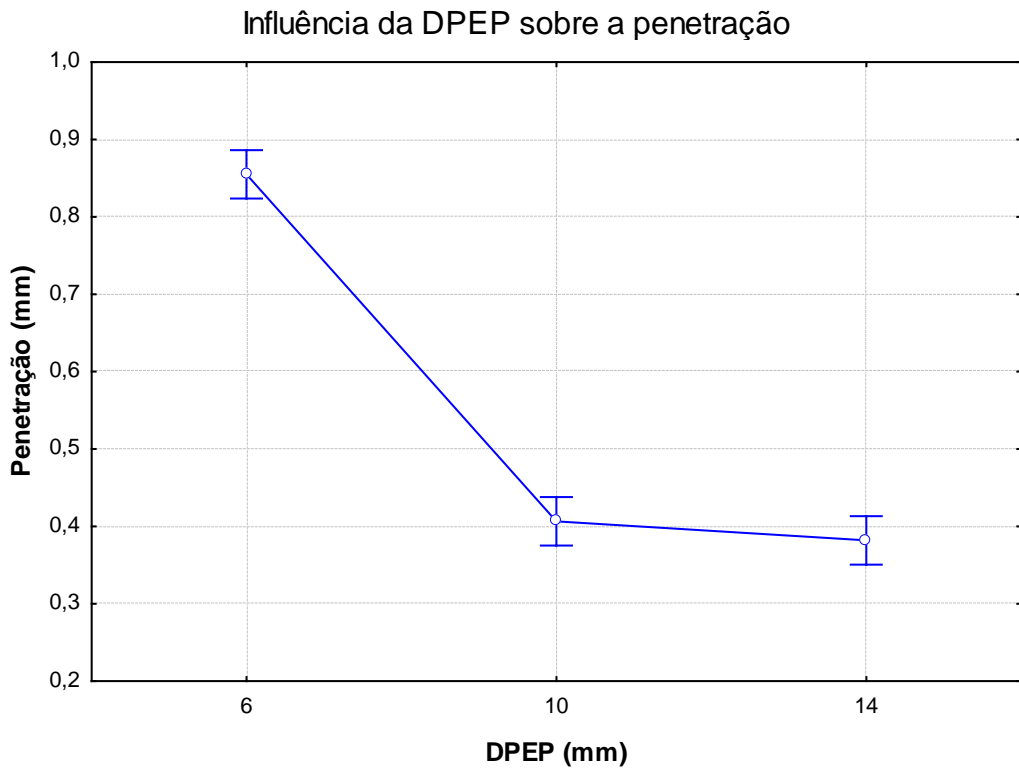


Figura 45. Influência da DPEP sobre a penetração.

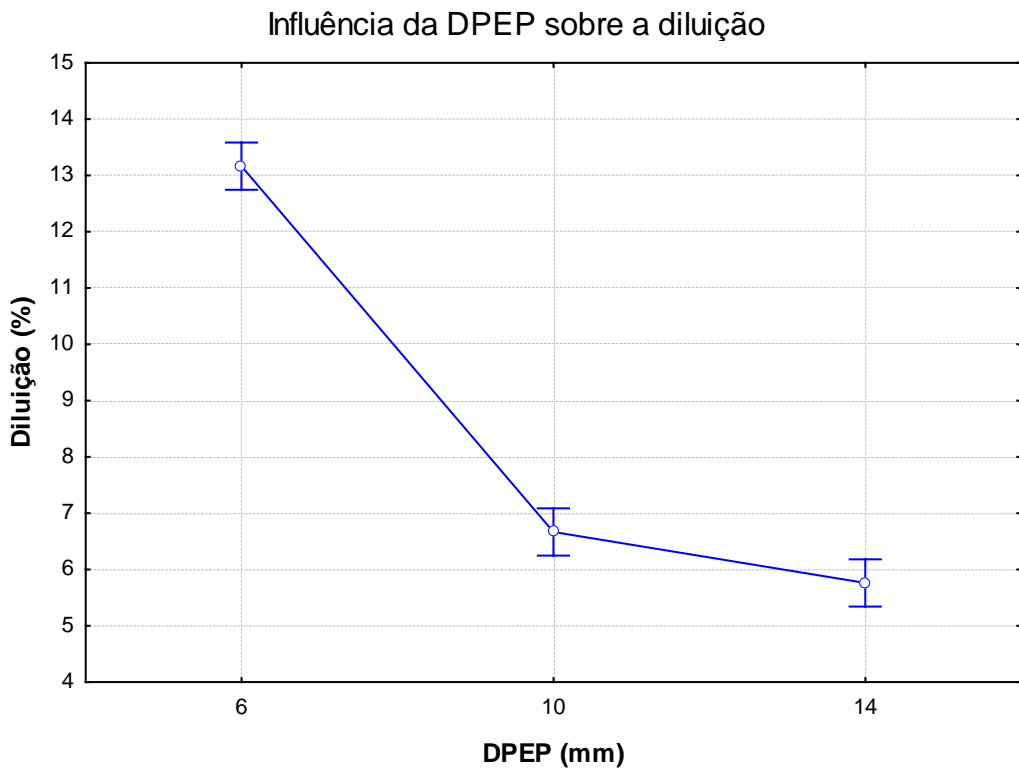


Figura 46. Influência da DPEP sobre a diluição.

A Figura 47 apresenta o efeito da DPEP sobre a razão reforço/largura (R/L). Pode-se notar que a DPEP afetou de forma significativa a razão reforço/largura, mas não de forma relevante, apresentando apenas uma leve tendência de redução desta resposta para o nível intermediário de DPEP.

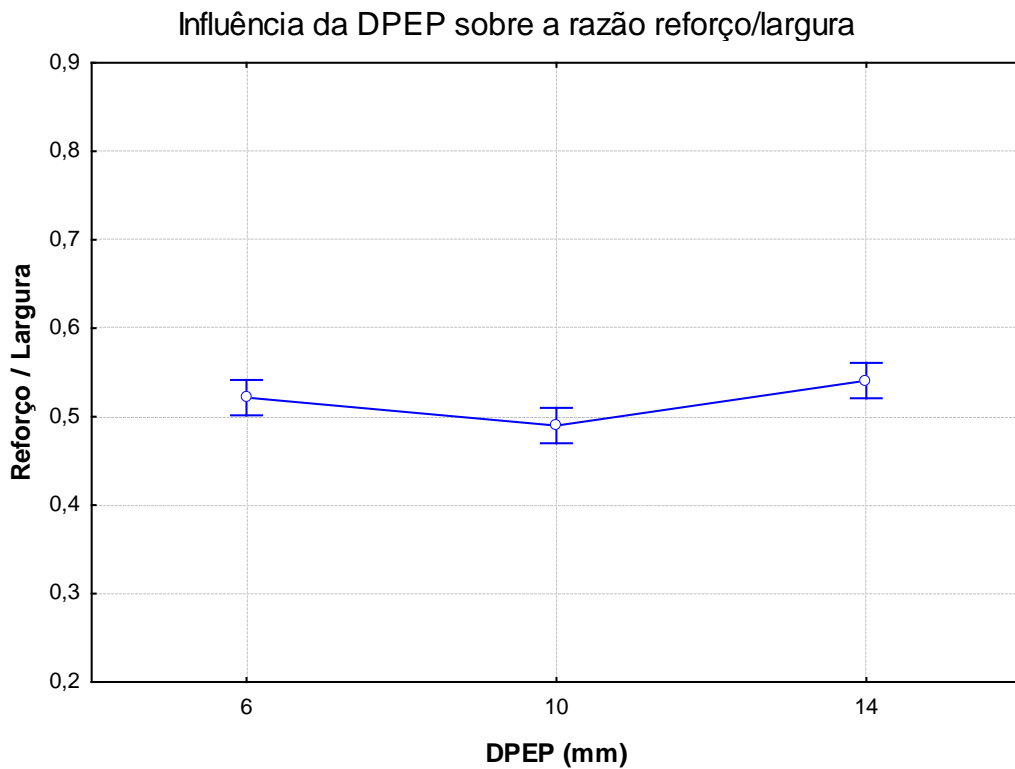


Figura 47. Influência da DPEP sobre a razão reforço/largura.

A Figura 48 mostra a influência da DPEP sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura (R/L). É possível perceber uma redução considerável com o aumento da DPEP. Este comportamento foi consequência básica do efeito da DPEP sobre a diluição, uma vez que não se observou um efeito bem definido para a razão reforço/largura.

Influência da DPEP sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura

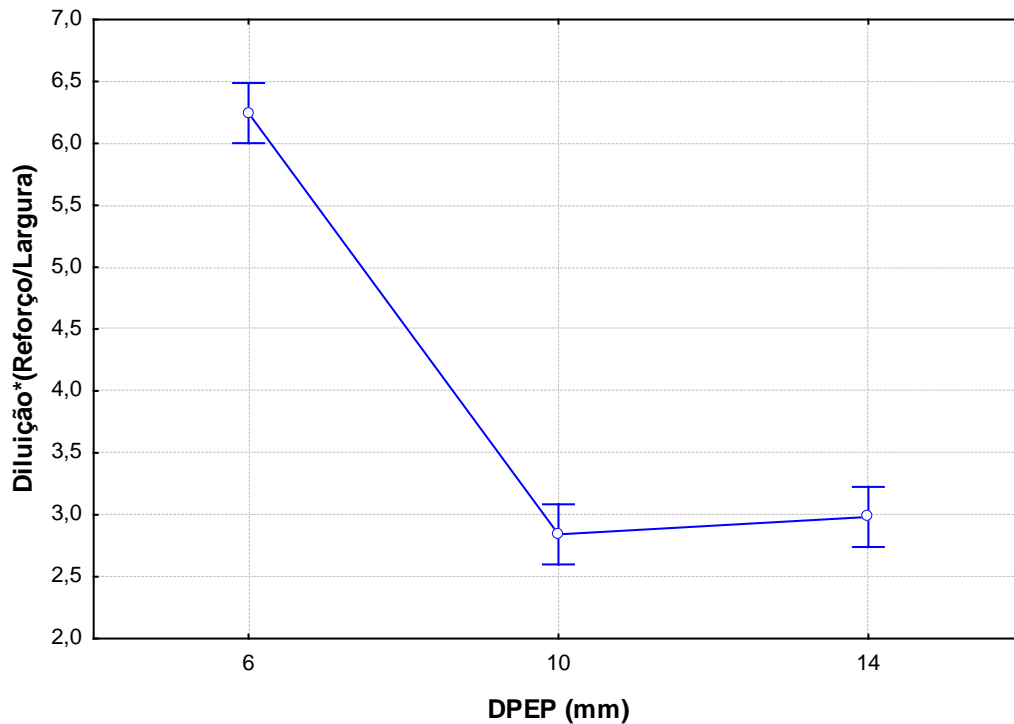


Figura 48. Influência da DPEP sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura.

➤ Efeito geral dos fatores de controle sobre as variáveis de resposta

Depois de feita a análise de forma individual dos fatores de controle sobre as variáveis de resposta, será feita análise de forma conjunta de alguns fatores de controle sobre as variáveis de resposta.

A Figura 49 mostra a influência de alguns fatores de controle sobre o reforço do cordão de solda. Através desta figura, é possível observar que para baixas energias, o reforço é menor para energia Tipo V. Comportamento inverso é observado para o maior nível de energia, na qual se observa que a energia Tipo I produz os menores reforços.

Estes resultados podem ser explicados da seguinte forma:

- Energia baixa para Tipo V significa corrente intermediária de soldagem (285 A) e maior velocidade de soldagem (32 cm/min) o que provoca baixo reforço em função desta alta velocidade (velocidade de alimentação foi mantida constante).
- Energia alta para Tipo I significa velocidade intermediária de soldagem (25 cm/min) e alta corrente de soldagem (343 A) o que implica em maior molhabilidade da poça de fusão e a maior área transversal do arco, uma vez que para mesmo comprimento de arco, a seção do arco aumenta, pois ocorre um aumento de ionização (redução de resistência elétrica com aumento de área transversal).

- Energia alta para Tipo V significa corrente intermediária (285 A) com menor velocidade de soldagem (21 cm/min), provoca altíssimo reforço em virtude da potência do arco intermediária aplicada (corrente intermediária) e alta taxa de deposição de metal por unidade de comprimento (baixa velocidade de soldagem).

Outra observação importante que pode ser constatada pela Figura 49 é a interação existente entre DPEP e a técnica da energia para menores energias de soldagem.

Verifica-se que para baixas energias ocorre um aumento do reforço com o aumento da DPEP considerando a técnica Tipo V (maior velocidade de soldagem). Uma possível explicação para este fenômeno é o fato de que para arcos de maiores comprimentos, sua largura aumenta, o que reduz sua densidade de energia aplicada sobre o arame frio e sobre a poça de fusão. Esta redução de densidade de energia aliada com alta velocidade de soldagem faz com que se observe o aumento do reforço com aumento da DPEP para a faixa estudada neste trabalho, pois não há alteração relevante na largura do cordão de solda (Figura 50).

Por outro lado, baixa energia com a técnica Tipo I (baixa corrente e velocidade de soldagem intermediária) produz por si só altos reforços (baixa potência aplicada e menor molhabilidade da poça de fusão). O aumento da DPEP provoca uma pequena redução do reforço pelo aumento da largura do arco e, conseqüentemente, da largura do cordão de solda (Figura 50).

Uma última observação da Figura 49 é que, como existe uma interação já constatada, o emprego do Método Taguchi, conforme será apresentado adiante, deverá apresentar algumas restrições.

A Figura 50 mostra a influência de alguns fatores de controle sobre a largura do cordão de solda. Foi verificado que a técnica da energia Tipo I apresentou valores de largura do cordão de solda maiores quando comparado as alterações de energias pela velocidade de soldagem (tipo V) para maiores energias.

O aumento da largura para maior energia da técnica Tipo I, quando comparado a técnica Tipo V, pode ser explicado pelos maiores valores de corrente de soldagem que tendem a aumentar a seção do arco voltaico e, principalmente, pelo efeito mais eficiente da potência do arco sobre a fluidez da poça de fusão quando comparado com as alterações de velocidade de soldagem.

A Figura 51 e a Figura 52 apresentam a influência de alguns fatores de controle sobre a penetração e diluição respectivamente. Constatou-se um comportamento similar ao reforço (Figura 49), quando se considera o efeito da inversão de valores para as técnicas Tipo I e Tipo V para baixa e alta energia de soldagem. Para se conseguir baixas penetrações e diluições, a alteração da energia para níveis baixos deve ser feita pela

alteração da corrente eficaz (Tipo I), já a alteração da energia para níveis altos deve ser realizada pela alteração da velocidade de soldagem (Tipo V). Com estes ajustes é possível ter uma condição bastante interessante para soldagem de revestimentos.

As explicações para este comportamento seguem as mesmas análises realizadas para o reforço, pois quanto maior o reforço menor tende a ser o valor da penetração (para seções transversais de cordões de solda semelhantes). Neste sentido, a penetração tende a ser menor para a técnica Tipo I para baixa energia e menor para a técnica Tipo V para maiores energias.

A diluição seguiu a mesma tendência da penetração, o que indica que, para os casos estudados, este fator afeta mais a diluição do que o reforço e largura.

Influência de alguns fatores de controle sobre o reforço do cordão de solda

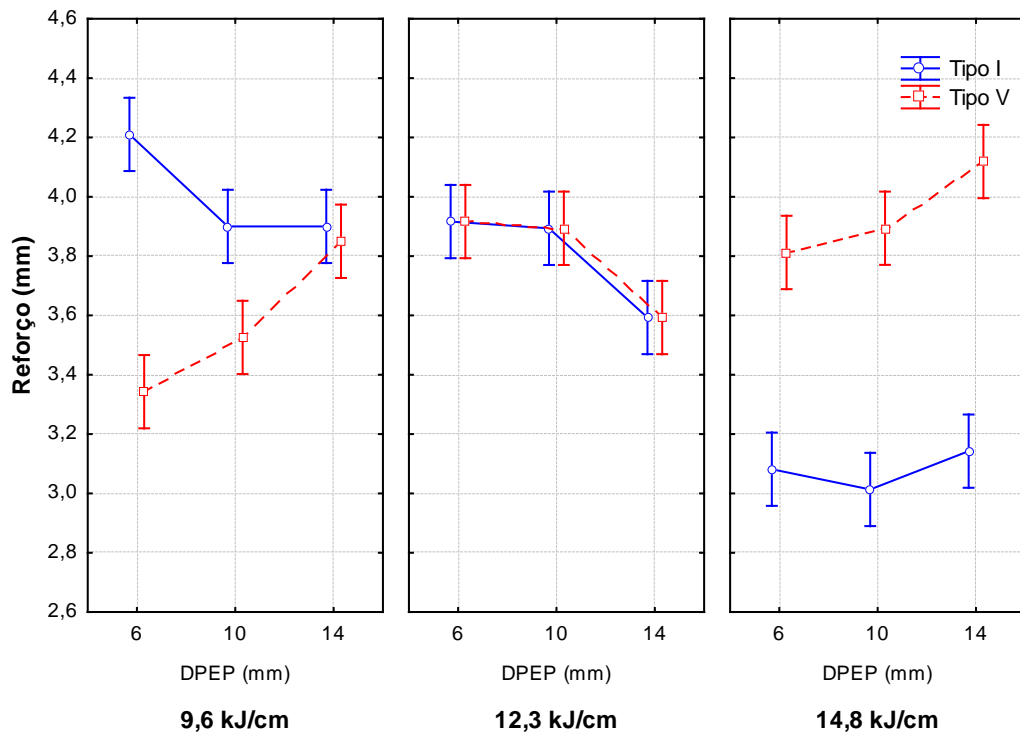


Figura 49. Influência de alguns fatores de controle sobre o reforço do cordão de solda.

Influência de alguns fatores de controle sobre a largura do cordão de solda

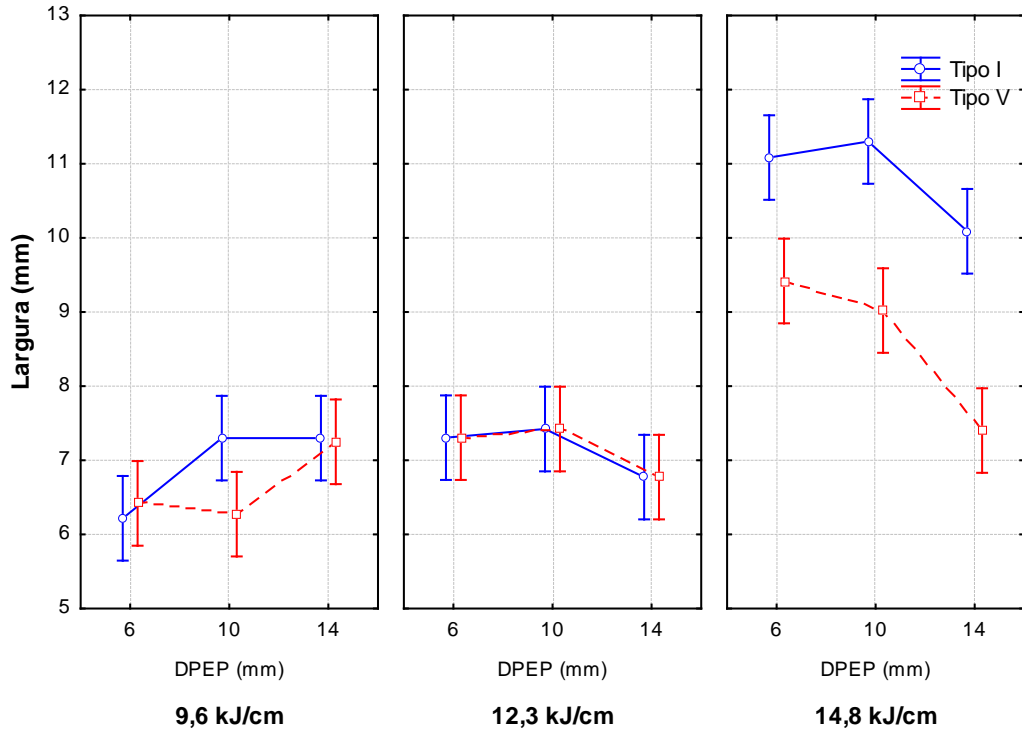


Figura 50. Influência de alguns fatores de controle sobre a largura do cordão de solda.

Influência de alguns fatores de controle sobre a penetração

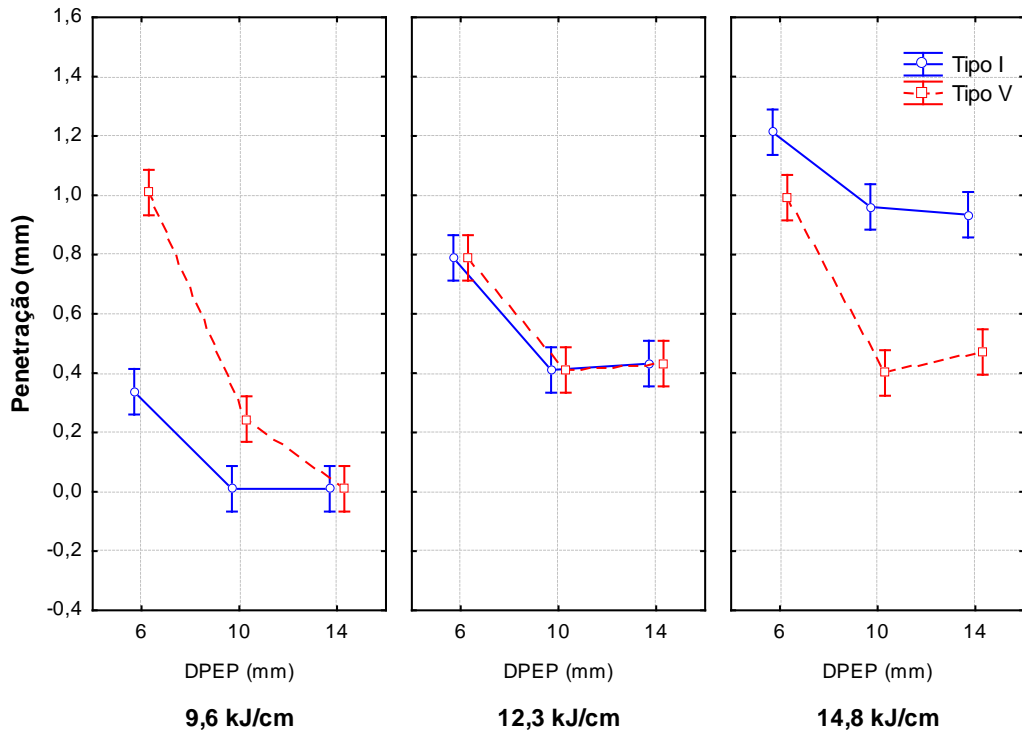


Figura 51. Influência de alguns fatores de controle sobre a penetração.

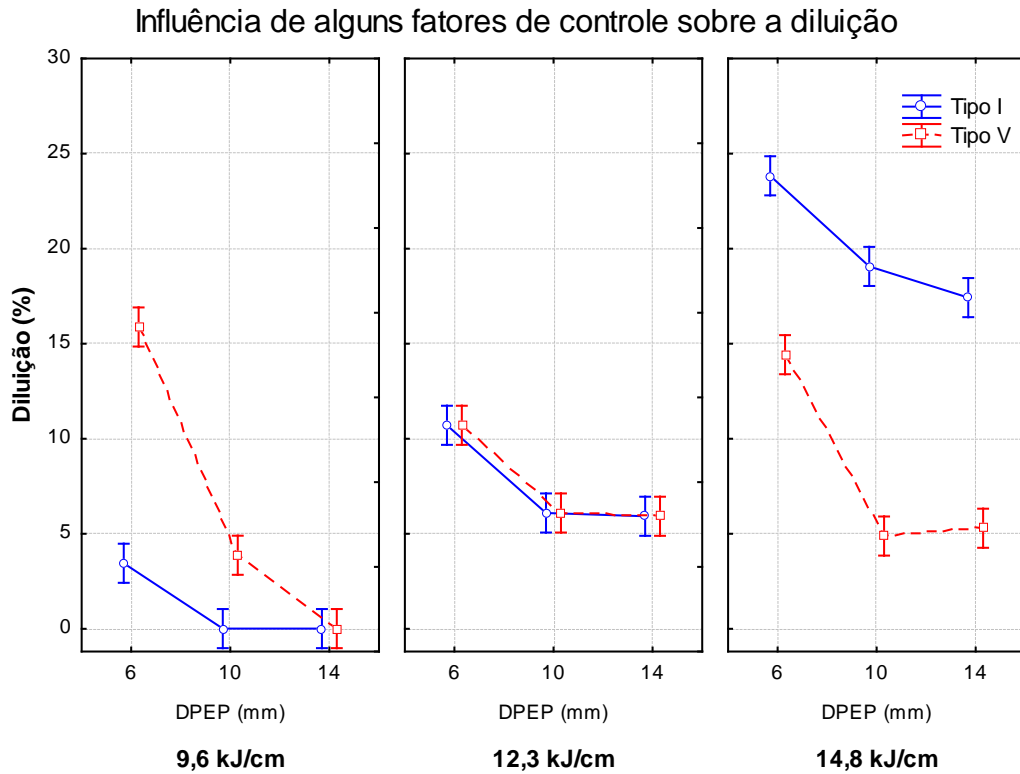


Figura 52. Influência de alguns fatores de controle sobre a diluição.

A Figura 53 apresenta a influência de alguns fatores de controle sobre a razão reforço/largura. Por esta figura, observa-se um efeito relevante entre as técnicas Tipo I e Tipo V somente para maior valor de energia de soldagem, com as menores relações entre reforço e largura encontradas para a técnica Tipo I.

A Figura 54 apresenta a influência de alguns fatores de controle sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura. Considerando que o desejado para revestimento, são menores valores do produto da diluição pela razão entre reforço e largura – $D(R/L)$, constatou-se que a combinação de menor energia, com maiores DPEP e com a técnica Tipo I representa as melhores condições para revestimento.

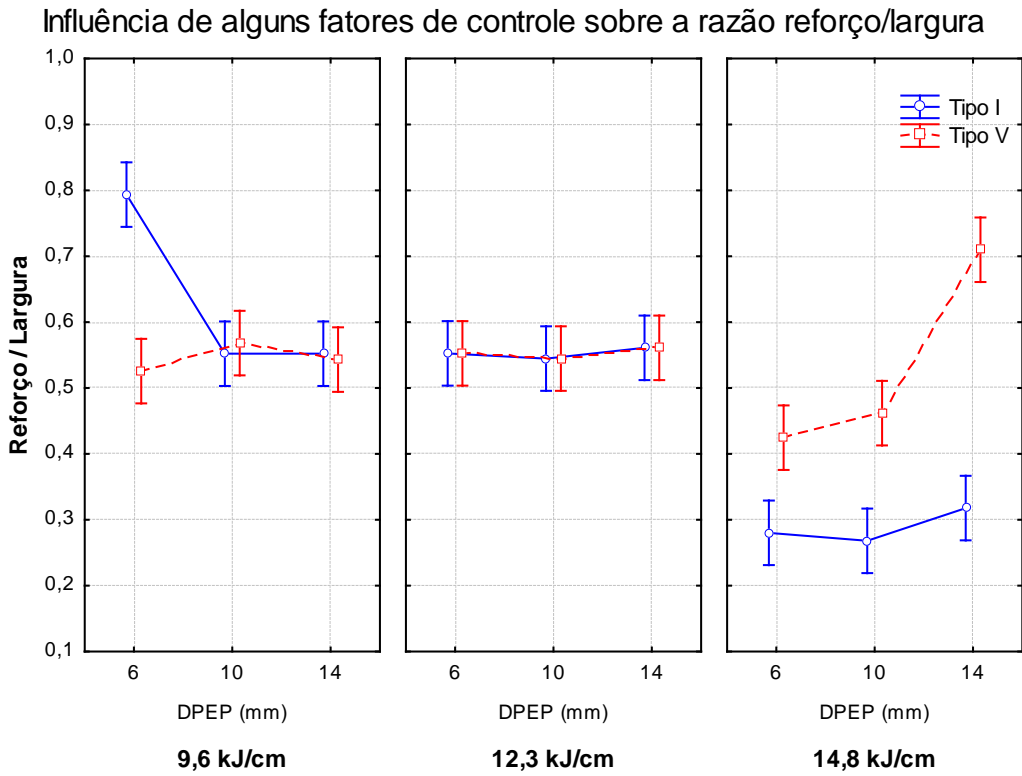


Figura 53. Influência de alguns fatores de controle sobre a razão reforço/largura.

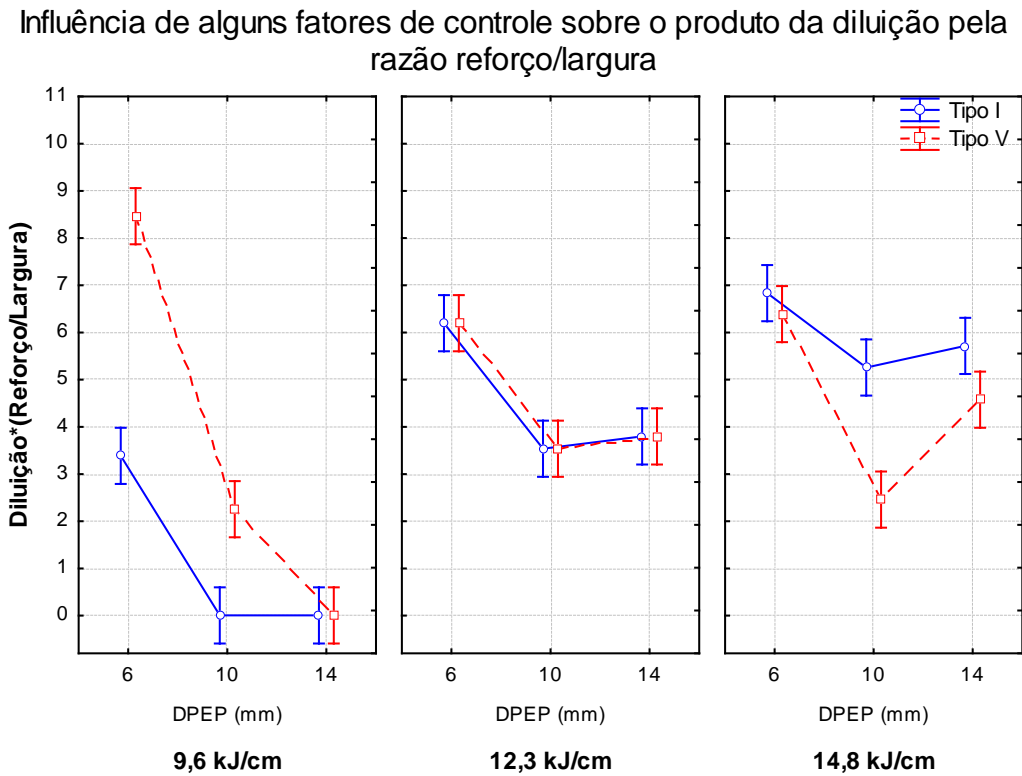


Figura 54. Influência de alguns fatores de controle sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura.

➤ **Influência da distância da ponta do arame a peça (DPAP)**

Conforme já comentado, durante a realização dos ensaios preliminares foi constatado a grande influência em que a distância da ponta do arame a peça (DPAP) exerce sobre as características econômicas do arco.

Baseado nisso foi realizado um estudo complementar com variação da DPAP, utilizando uma DPEP de 10 mm, conforme a Tabela 21.

Tabela 21. Resultado das soldagens com variação da DPAP (para DPEP= 10 mm).

Ens.	Cond.	Tec.	Pos.	DPAP (mm)	E (kJ/cm)	TE	Dil. (%)	Méd. D(%)	Ref. (mm)	Larg. (mm)	Pen. (mm)	Ref. /Larg.	D*(Ref. /Larg.)
19	CC3	1	Início	3	3	I	23,27	24,29	3,30	10,68	1,24	0,31	7,19
19	CC3	1	Meio	3	3	I	23,75		3,20	10,94	1,74	0,29	6,95
19	CC3	1	Fim	3	3	I	25,84		3,06	10,56	1,48	0,29	7,49
19	CC3T	2	Início	3	3	I	14,75	13,84	2,78	12,06	0,45	0,23	3,40
19	CC3T	2	Meio	3	3	I	13,95		2,90	11,83	0,46	0,24	3,41
19	CC3T	2	Fim	3	3	I	12,82		2,84	11,73	0,39	0,24	3,10
20	CC4	1	Início	3	1	V	5,34	4,66	3,53	5,45	0,37	0,65	3,46
20	CC4	1	Meio	3	1	V	4,79		3,50	5,65	0,35	0,62	2,96
20	CC4	1	Fim	3	1	V	3,86		3,76	5,97	0,31	0,63	2,44
20	CC4T	2	Início	3	1	V	2,59	3,08	3,40	6,98	0,10	0,49	1,26
20	CC4T	2	Meio	3	1	V	2,77		3,63	7,18	0,14	0,51	1,40
20	CC4T	2	Fim	3	1	V	3,87		3,33	6,42	0,19	0,52	2,01
21	CC3	1	Início	2	3	I	18,94	21,49	3,40	9,45	1,15	0,36	6,82
21	CC3	1	Meio	2	3	I	22,25		3,35	9,83	1,26	0,34	7,57
21	CC3	1	Fim	2	3	I	23,30		3,25	9,94	1,33	0,33	7,62
21	CC3T	2	Início	2	3	I	12,44	18,59	3,12	10,91	0,56	0,29	3,56
21	CC3T	2	Meio	2	3	I	21,22		2,86	11,41	0,74	0,25	5,32
21	CC3T	2	Fim	2	3	I	22,11		2,77	11,10	0,80	0,25	5,52
22	CC4	1	Início	2	1	V	8,89	7,49	3,96	4,67	0,56	0,85	7,54
22	CC4	1	Meio	2	1	V	6,78		3,98	4,98	0,45	0,80	5,42
22	CC4	1	Fim	2	1	V	6,79		3,96	3,53	0,48	1,12	7,61
22	CC4T	2	Início	2	1	V	3,16	3,89	3,22	8,18	0,13	0,39	1,24
22	CC4T	2	Meio	2	1	V	5,46		2,88	8,66	0,19	0,33	1,82
22	CC4T	2	Fim	2	1	V	3,05		3,33	7,53	0,13	0,44	1,35
23	CC3	1	Início	1	3	I	19,47	17,34	3,48	8,74	1,33	0,40	7,74
23	CC3	1	Meio	1	3	I	16,03		3,27	8,61	0,65	0,38	6,09
23	CC3	1	Fim	1	3	I	16,51		3,36	9,59	0,68	0,35	5,78
23	CC3T	2	Início	1	3	I	15,94	17,80	3,01	10,70	0,59	0,28	4,49
23	CC3T	2	Meio	1	3	I	17,00		2,90	11,00	0,63	0,26	4,49
23	CC3T	2	Fim	1	3	I	20,45		2,88	11,15	0,74	0,26	5,29
24	CC4	1	Início	1	1	V	9,36	9,72	3,74	5,02	0,58	0,74	6,97
24	CC4	1	Meio	1	1	V	10,50		3,90	4,85	0,59	0,80	8,45
24	CC4	1	Fim	1	1	V	9,30		3,72	4,65	0,59	0,80	7,44

continuação da Tabela 21.

Ens.	Cond.	Tec.	Pos.	DPAP (mm)	E (kJ/cm)	TE	Dil. (%)	Méd. D(%)	Ref. (mm)	Larg. (mm)	Pen. (mm)	Ref./Larg.	D*(Ref./Larg.)
24	CC4T	2	Início	1	1	V	2,50	1,98	3,25	7,94	0,09	0,41	1,03
24	CC4T	2	Meio	1	1	V	1,61		3,25	7,66	0,74	0,42	0,69
24	CC4T	2	Fim	1	1	V	1,83		3,27	7,30	0,09	0,45	0,82

Onde Ens. – nº do ensaio; Cond. – condição; Tec. – tipo de tecimento; Pos. – posição de onde foi retirado o corpo de prova; DPEP – distância da ponta do eletrodo a peça; DPAP – distância da ponta do arame a peça; E – Energia; TE – técnica da energia; Dil. – diluição; Méd. D. – média da diluição; Ref.- reforço; Larg.- largura; Pen- penetração.

A Figura 55 e a Figura 56 mostram a seção das amostras soldadas para diferentes DPAPs com energias baixa e alta. Pode-se observar que para baixas energias na condição com tecimento o uso de DPAPs iguais a 1 e 2 mm respectivamente apresentam melhores condições para soldagem de revestimento quanto a diluição e razão R/L.

Pode-se observar que para energias altas na condição sem tecimento tem-se o efeito tipo taça para DPAP de 3 mm (Figura 56). Na medida que o valor da DPAP diminui, este efeito vai sendo atenuado. Para a condição com tecimento, verificam-se efeitos similares para os três níveis de DPAPs.

Após realização das soldagens e obtenção dos resultados, para os três valores de DPAP, foi feita uma análise estatística de variância para verificar a influência da DPAP sobre as características geométricas do cordão de solda.

Os valores do nível de significância calculados a partir da análise de variância feita para verificar a influência da DPAP sobre as variáveis de resposta são mostrados na Tabela 22.

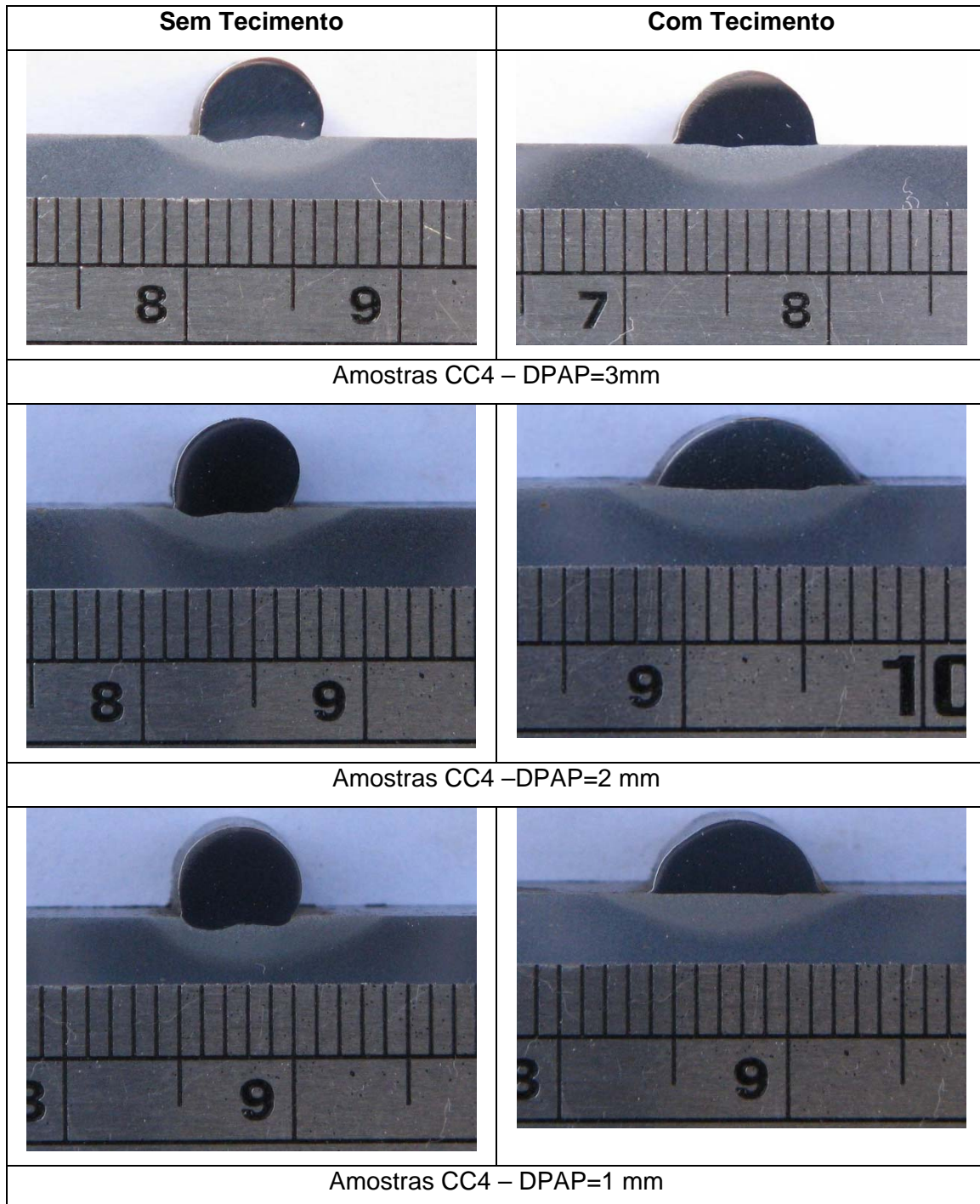


Figura 55. Seção transversal cordões de solda com diferentes DPAPs utilizando energia de 9,6 kJ/cm.

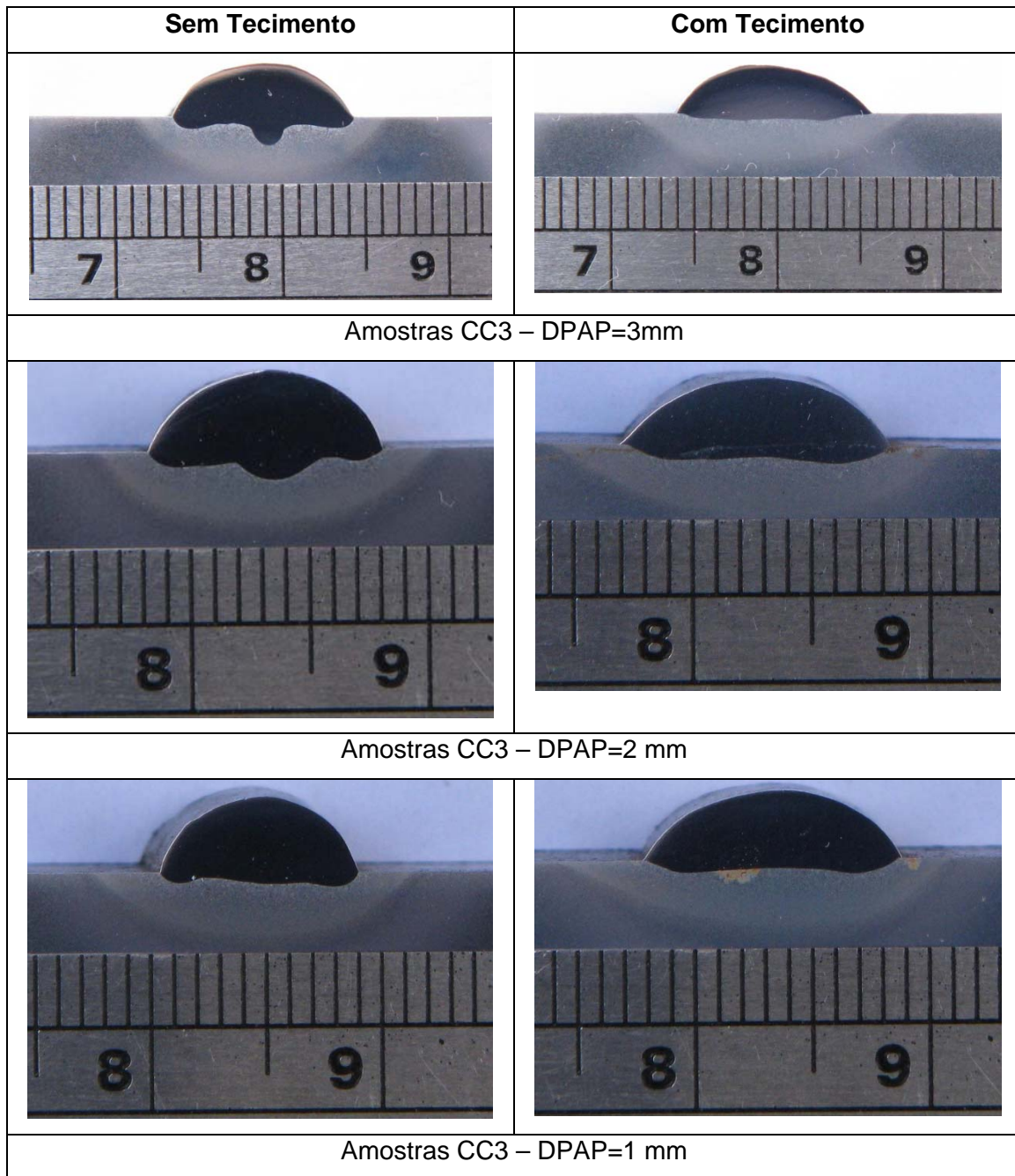


Figura 56. Seção transversal cordões de solda com diferentes DPAPs utilizando energia de 12,8 kJ/cm.

Tabela 22. Influência da DPAP sobre os fatores de controle.

Variáveis de Resposta	Nível de Significância “ α ”
Reforço	0,306
Largura	0,000
Penetração	0,810
Diluição	0,224
Reforço / Largura	0,033
Diluição*(Reforço/Largura)	0,000

De acordo com a Tabela 22, que mostra o nível de significância α da DPAP sobre as variáveis de resposta, algumas variáveis como reforço, penetração e diluição não sofreram influência significativa através da variação da DPAP.

A Figura 57 mostra a influência da variação da DPAP sobre a largura do cordão de solda. Conforme pode ser visto, ao aumentar o valor da DPEP a largura do cordão de solda tende a aumentar.

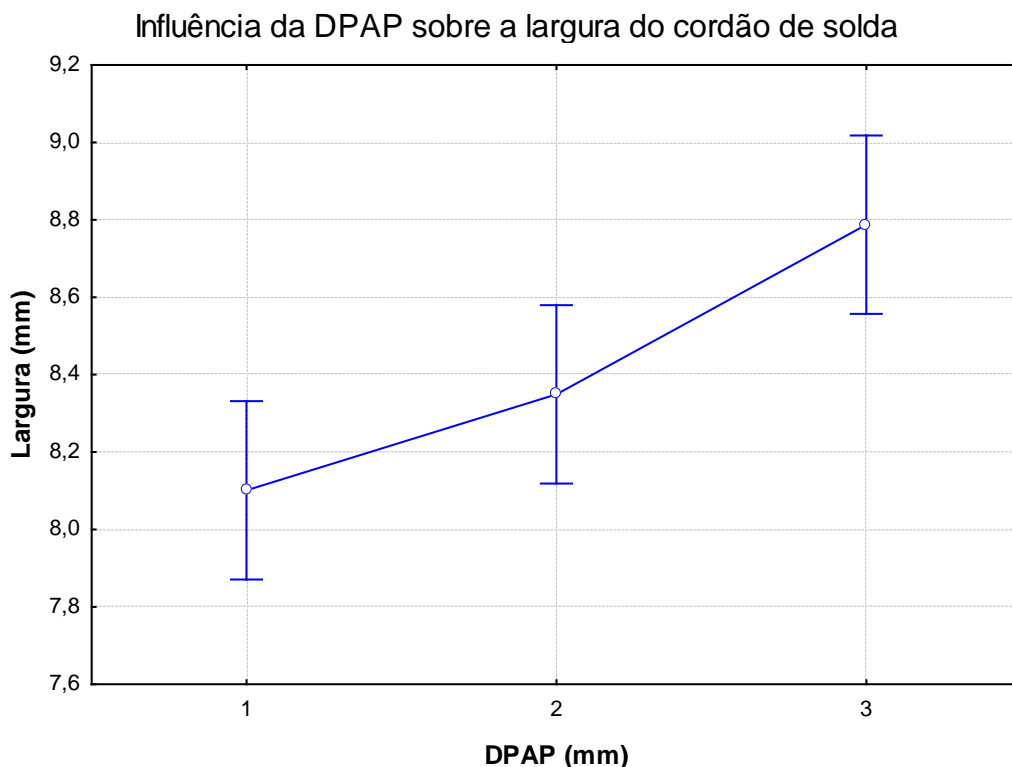


Figura 57. Influência da DPAP sobre a largura do cordão de solda.

A Figura 58 mostra que, apesar de estatisticamente significante, não há alteração relevante na razão entre reforço e largura.

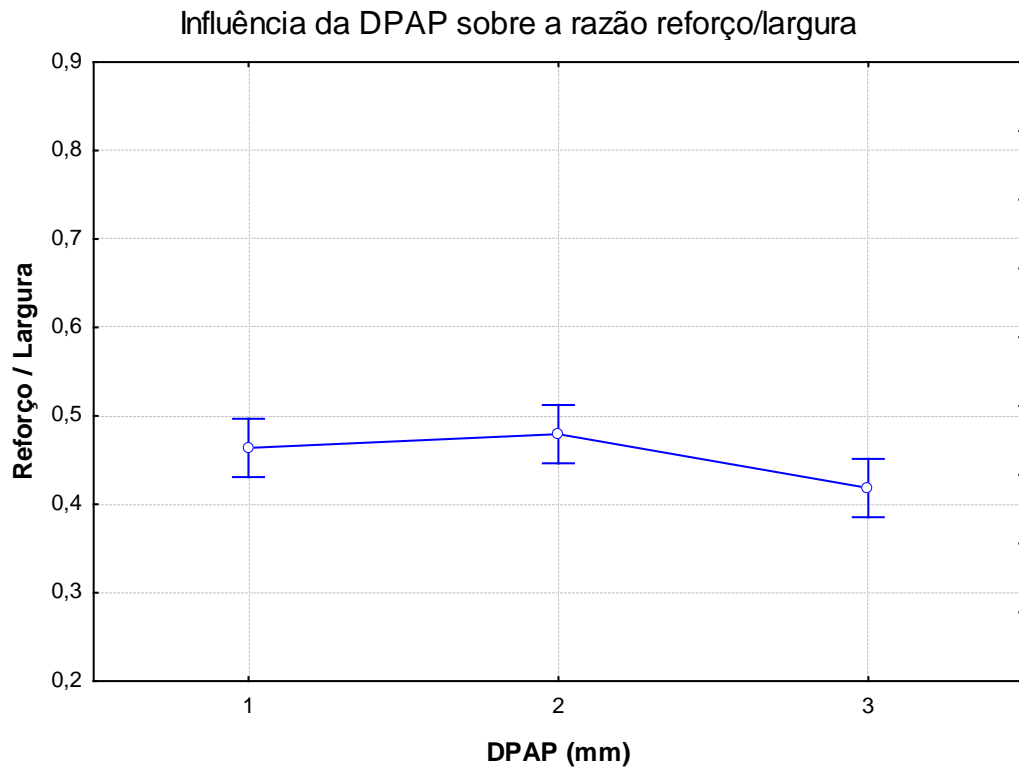


Figura 58. Influência da DPAP sobre a razão reforço/largura.

A Figura 59 mostra que a maior DPAP proporciona o menor valor para o produto da diluição pela razão entre o reforço e largura – $D(R/L)$, o que representa a melhor escolha, analisando de forma isolada, para aplicação de revestimento.

Influência da DPAP sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura

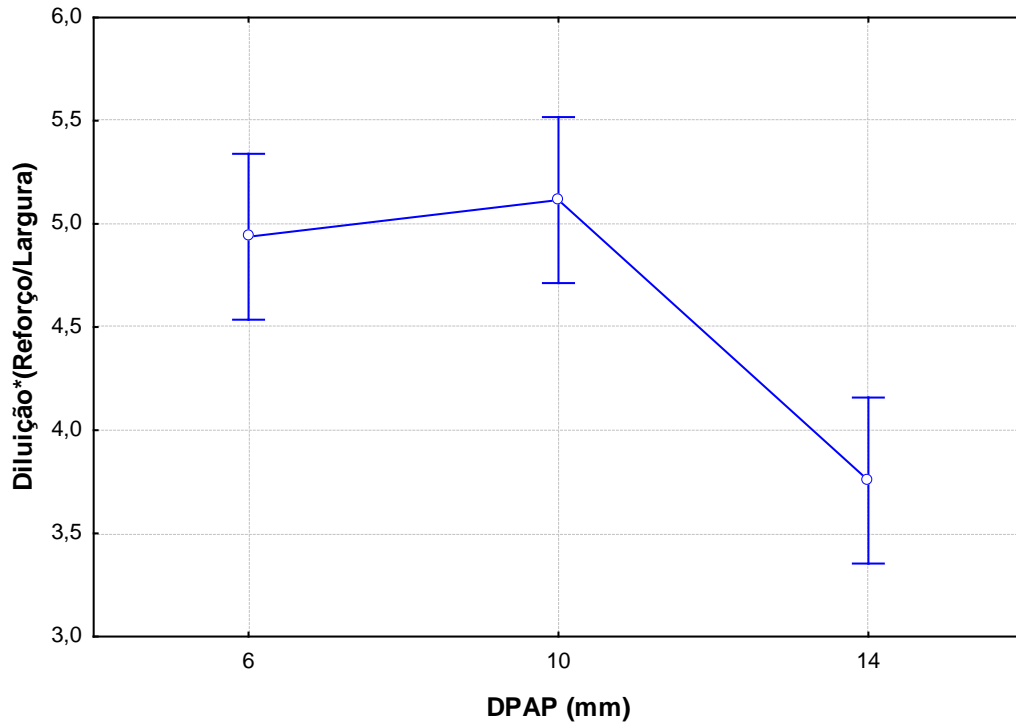


Figura 59. Influência da DPAP sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura.

Após análise individual da DPAP sobre as características geométricas do cordão de solda foi realizada uma análise conjunta para verificar a influência da DPAP juntamente com outros fatores de controle sobre as características geométricas do cordão de solda.

A Figura 60 mostra a influência de alguns fatores de controle sobre o reforço do cordão de solda. Por esta figura, observa-se que a aplicação do tecimento tende a reduzir o reforço tanto para energia baixa quanto para energia alta.

A Figura 61 mostra a influência de alguns fatores de controle sobre a largura do cordão de solda. Por esta figura, observa-se que para baixas energias com o aumento da DPAP a largura do cordão de solda tende a aumentar na condição sem tecimento e diminuir na condição com tecimento, já para altas energias com aumento da DPAP a largura do cordão de solda tende a aumentar na condição sem tecimento e permanecer praticamente constante na condição com tecimento.

Influência de alguns fatores de controle sobre o reforço do cordão de solda

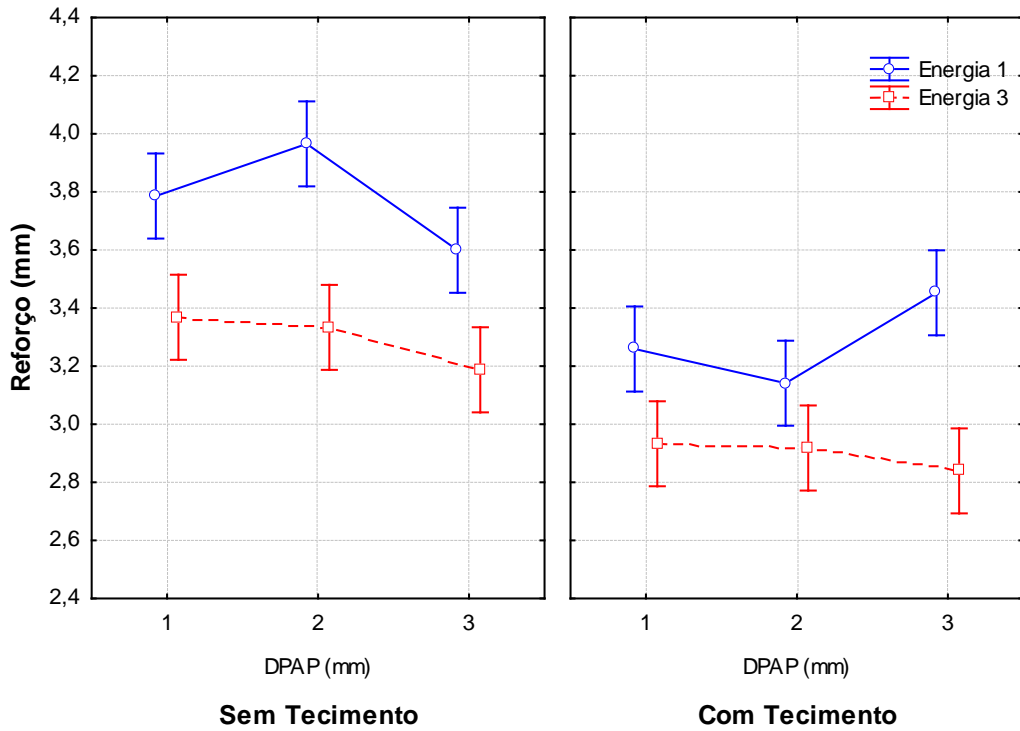


Figura 60. Influência de alguns fatores de controle sobre o reforço do cordão de solda.

Influência de alguns fatores de controle sobre a largura do cordão de solda

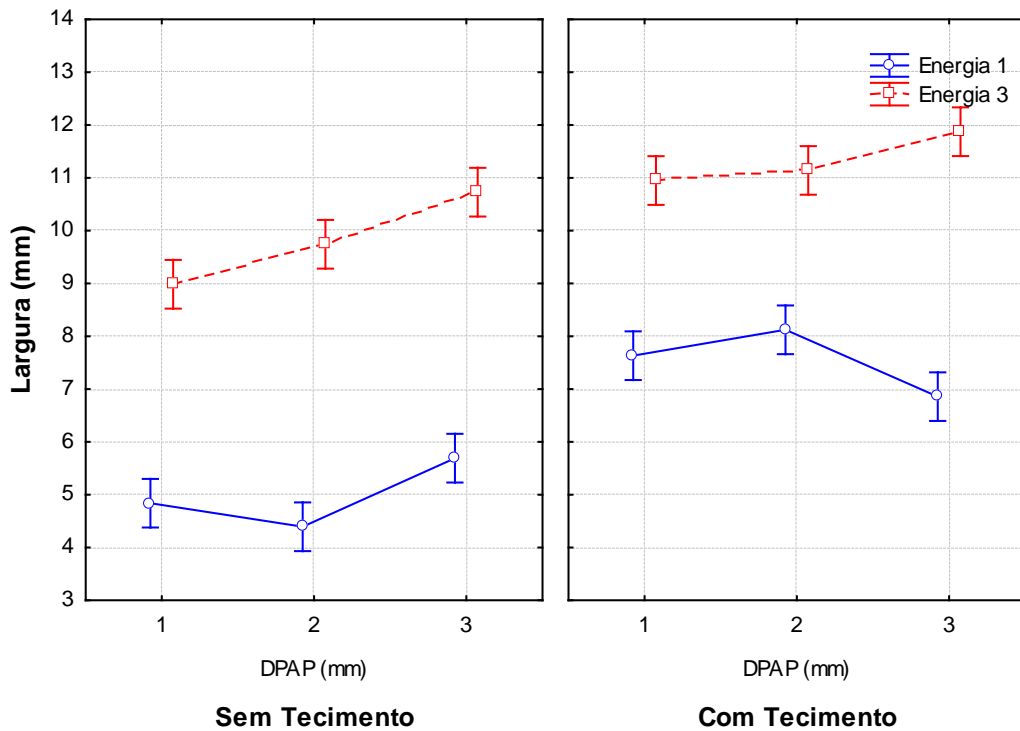


Figura 61. Influência de alguns fatores de controle sobre a largura do cordão de solda.

A Figura 62 e a Figura 63 apresentam a influência de alguns fatores de controle sobre a penetração e diluição respectivamente. Observa-se pela Figura 62, que existe uma interação relevante entre o nível de energia e a DPAP para condição sem tecimento considerando a penetração como resposta. A Figura 63 indica mais uma vez que a penetração teve efeito considerável sobre a diluição, haja vista a semelhança de comportamento entre as duas variáveis.

A Figura 64 e a Figura 65 apresentam a influência de alguns fatores de controle sobre a razão reforço/largura (R/L) e sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura, respectivamente. Foi possível constatar pela Figura 64 que a maior energia (energia 3) produz as menores relações R/L independente da DPAP e da condição de tecimento. Este comportamento já era esperado, uma vez que, com maior energia, maior tende a ser a molhabilidade da poça de fusão, aumentando a largura e reduzindo o reforço.

Por sua vez, quando se considera o produto da diluição pela razão entre reforço e largura – D(R/L), constatou-se um comportamento na qual se observa um menor produto D(R/L) para menores energias, principalmente na condição com tecimento e também para maiores DPAP (Figura 65).

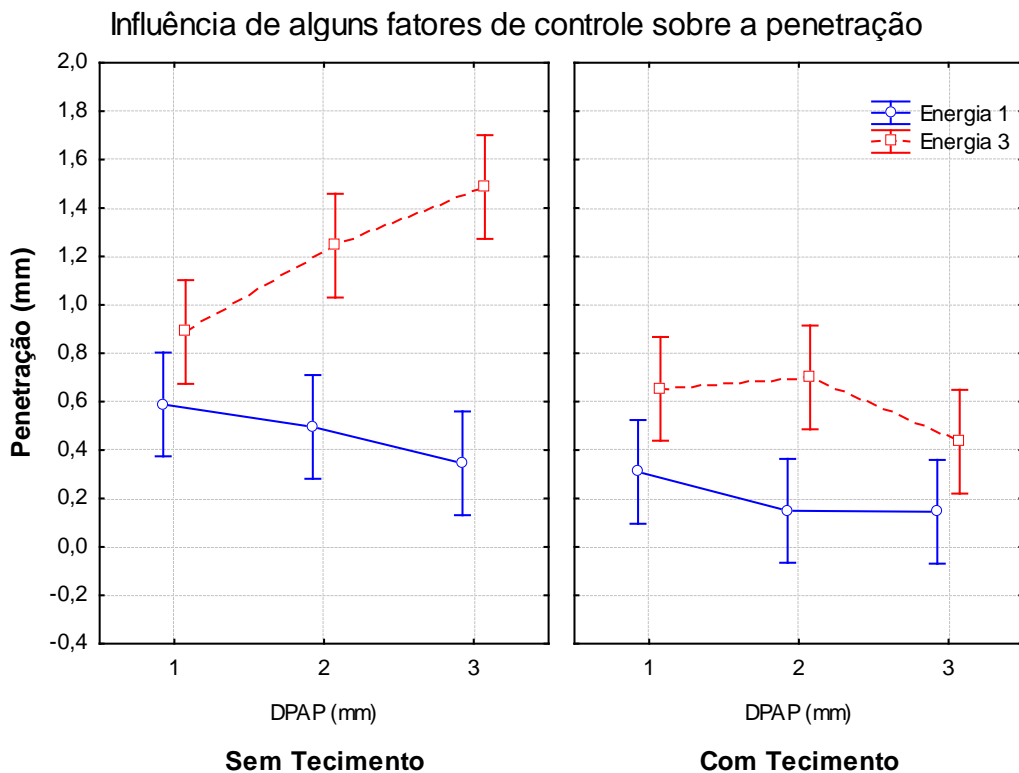


Figura 62. Influência de alguns fatores de controle sobre a penetração.

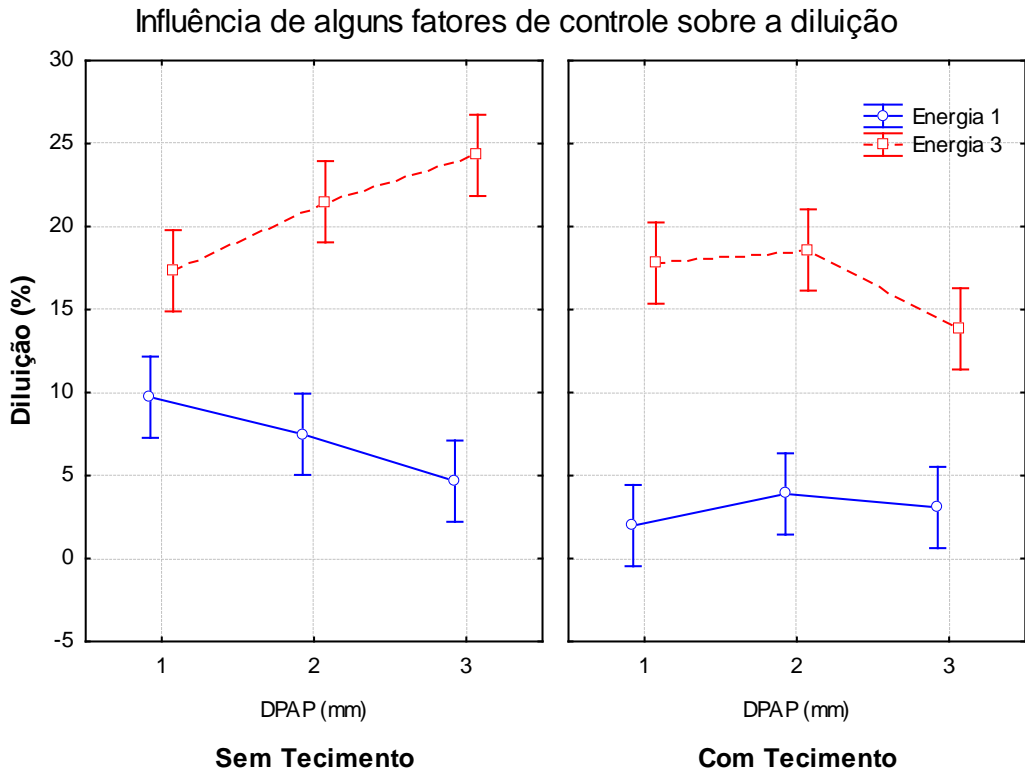


Figura 63. Influência de alguns fatores de controle sobre a diluição.

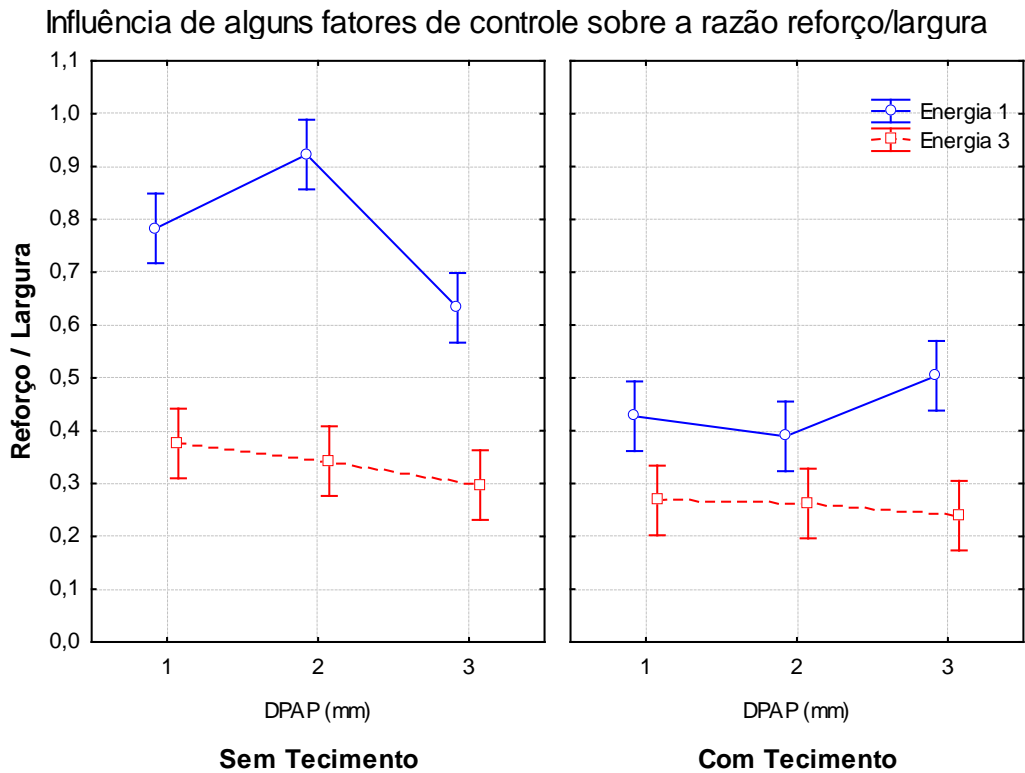


Figura 64. Influência de alguns fatores de controle sobre a razão reforço/largura.

Influência de alguns fatores de controle sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura

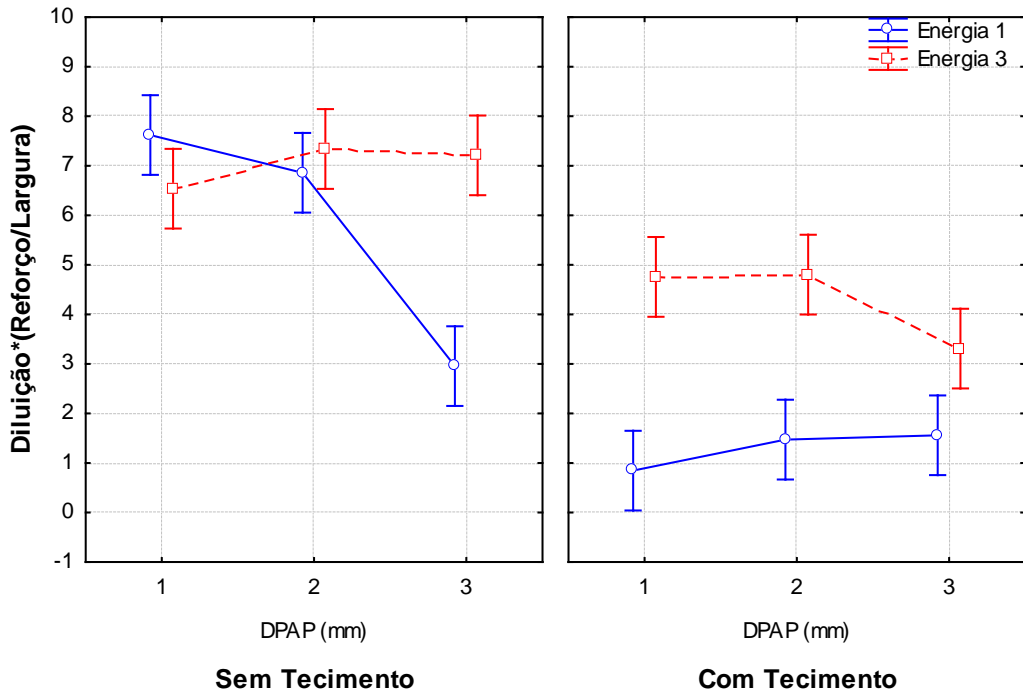


Figura 65. Influência de alguns fatores de controle sobre o produto da diluição pela razão reforço/largura.

De uma maneira geral, foi possível constatar que, na soldagem de revestimento sem uso de tecimento e na condição de baixa energia, o melhor resultado será utilizando DPAP de 3 mm. Por sua vez, na condição com tecimento, as energias baixas e altas apresentaram um comportamento praticamente constante independente da DPAP, mas com melhores resultados (menor produto D(R/L)) para menor energia.

➤ **Análise das características econômicas usando a liga de níquel Inconel 625 como metal de adição**

O melhor aproveitamento do processo de soldagem é de fundamental importância para aplicações comerciais, pois trata-se do uso de um metal de adição de elevado valor de mercado. Por este fato, é de grande importância o estudo das variáveis de respostas como taxa de fusão, de deposição e eficiência de deposição para um melhor ajuste do processo.

Após realização das soldagens foi realizado uma análise de variância pra verificar o nível de influência dos fatores de controle sobre as variáveis de respostas, os resultados são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23. Influência dos fatores de controle sobre as características econômicas do processo.

Fatores de Controle	Nível de Significância “ α ”		
	TF	TD	ED
Tecimento	0,034	0,078	0,577
DPEP	0,031	0,194	0,420
Energia	0,000	0,000	0,122
Técnica da Energia	0,000	0,000	0,999
Energia * Técnica da Energia	0,000	0,000	0,266

De acordo com os resultados relacionados aos níveis de significância conclui-se que a taxa de fusão (TF) foi afetada de forma significativa por todos os fatores de controle analisados. A taxa de deposição (TD) não sofreu influência com uso do tecimento e alteração na DPEP e a eficiência de deposição (ED) não sofreu influência de nenhum dos fatores de controle analisados.

A Figura 66 e Figura 67 apresentam a influência da técnica da energia sobre a taxa de fusão e deposição respectivamente. Comparando as curvas, é possível notar que não há grandes variações nas taxas de fusão e deposição de arame, independente da forma que a energia foi variada, seja ela pelo ajuste da corrente (Tipo I) ou pelo ajuste da velocidade de soldagem (Tipo V). Este comportamento já era esperado devido ao fato da velocidade de alimentação permanecer constante.

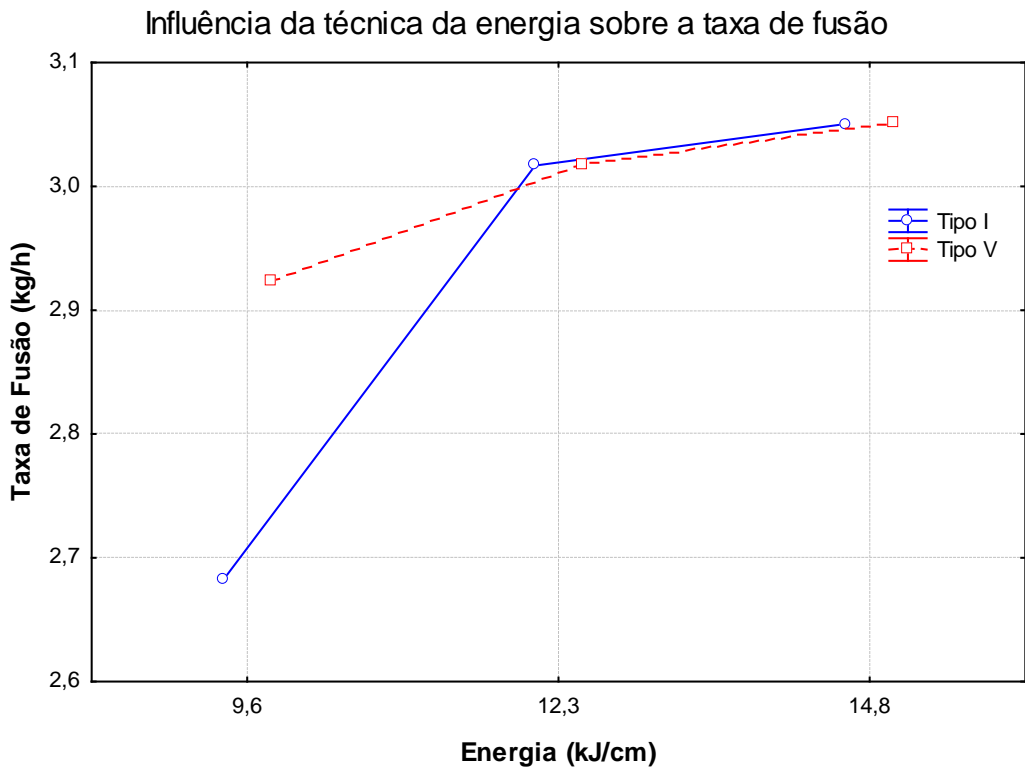


Figura 66. Influência da técnica da energia de soldagem sobre a taxa de fusão.

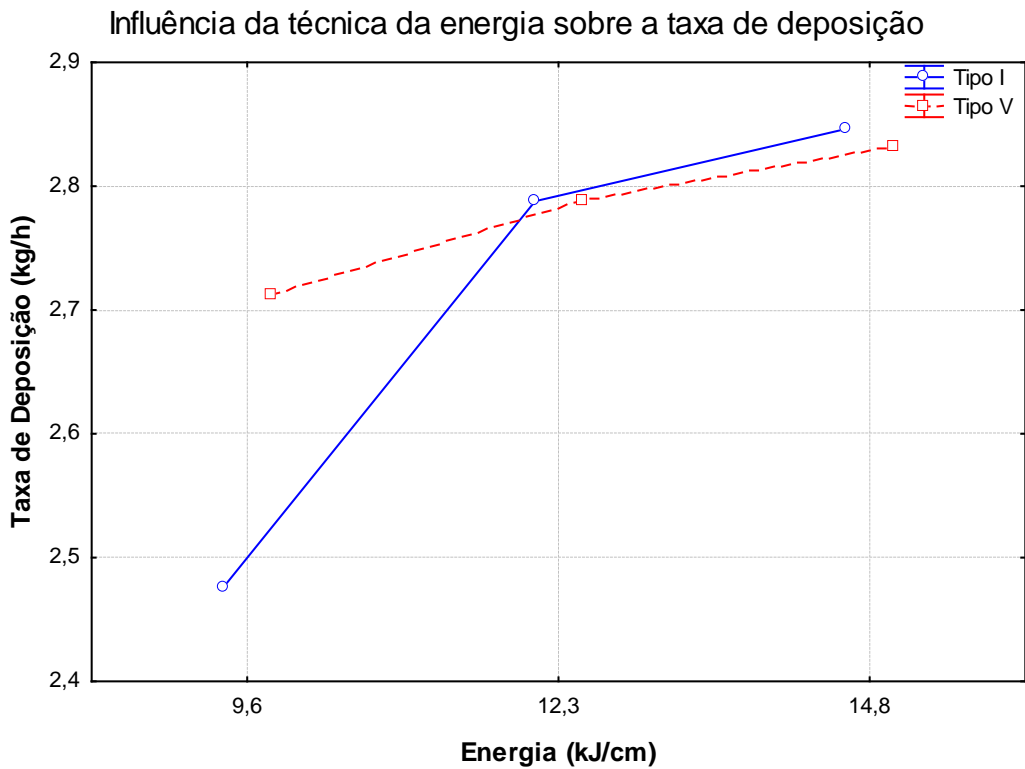


Figura 67. Influência da técnica da energia de soldagem sobre a taxa de deposição.

b) Soldagem com corrente contínua pulsada

As soldagens com corrente pulsada foram realizadas com base nos parâmetros apresentados na Tabela 9, onde se buscou-se realizar as soldagens com as mesmas energias empregadas na corrente contínua convencional, porém com nível de corrente média menor quando comparado com a corrente contínua.

Durante as soldagens, foi encontrada bastante instabilidade no processo resultando em cordões com péssimo acabamento superficial, sem continuidade e com bastante respingos. Algumas destas soldagens podem ser visualizadas na Figura 68.



Figura 68. Amostras soldadas utilizando corrente pulsada.

Atribui-se a dificuldade encontrada na soldagem em corrente pulsada ao baixo tempo de pulso da corrente, onde ocorre a fusão do arame com formação da poça de fusão. Em seguida, a corrente cai para sua base fazendo com que o arame, sem corrente suficiente

para fundi-lo, choque-se com a poça fundida, gerando uma explosão da poça, causando bastante respingos e cortes de arames não fundidos.

Uma solução para a soldagem com corrente pulsada seria aumentar o tempo de pico. Esta solução não seria justificada devido ao fato de se aproximar demais de uma condição de soldagem com corrente contínua convencional, deixando assim a corrente pulsada sem justificativa de uso.

Dessa forma, a soldagem de corrente pulsada com alimentação automática de arame frio pelo processo de soldagem TIG não foi satisfatória quando se considera as exigências da soldagem de revestimento.

6.1.2. Aplicação do Método Taguchi

➤ Resultados dos ensaios utilizando o método Taguchi

O Método Taguchi foi empregado principalmente para garantir a exploração de um maior número de parâmetros e seus níveis empregando menor número de experimentos. Adicionalmente, o Taguchi permitirá a utilização da análise de variância e da estimação do efeito de cada parâmetro sobre a resposta analisada. Obviamente, a estimação dos melhores ajustes de parâmetros que resultem nas melhores condições para revestimento apresentará um maior erro em virtude de algumas interações já observadas (compromete o modelo aditivo considerado no Taguchi).

Para realização dos ensaios utilizando o Método Taguchi, os fatores de controle foram designados conforme mostra a Tabela 10 e os resultados obtidos após realização das soldagens são mostrados na Tabela 25.

Durante a realização das soldagens, o Ensaio 8 apresentou um resultado inesperado, o cordão de solda soltou do metal base por completo mostrando que não ocorreu coalescência (Figura 69). Este fato pode ser justificado pela atuação de três fatores em conjunto: uso de baixa energia, grande comprimento de arco e o baixo nível de calor gerado pela mistura “argônio + óxido nítrico” quando comparado com um dos outros gases utilizados.



Figura 69. Fotografia do ensaio no qual o cordão de solda não aderiu ao metal base.

Para preenchimento da tabela de ensaios do Taguchi referente a condição que não conseguiu adesão com o metal base, a diluição foi dada com um valor mínimo de 1%, o reforço e a penetração deste ensaio foram medidas com um paquímetro digital com um resolução de 0,01 mm, devido ao fato de não ser possível usar o programa de computador para estas medidas especificamente.

A Tabela 24 mostra a designação dos fatores de controle para um melhor entendimento da Tabela 25.

Tabela 24: Designação dos fatores de controle para o método taguchi para melhor entendimento da Tabela 25.

Nível	TE (Vs/le)	DPEP (mm)	Arame Eletrodo (Ar)	Gás de Proteção (GP)	Tecimento (TC)	Energia (kJ/cm)
1	25 cm/min (Tipo I)	6	UNSN06625	Argônio	Sem Tecimento	9,6
2	285 A (Tipo V)	10	UNSN10276	Argônio + Hélio	Tecimento Triangular	12,3
3	-	14	UNSN06686	Argônio + NO	Tecimento Duplo 8	14,8

Tabela 25. Resultados dos ensaios da planilha L18 utilizando o Método Taguchi.

Ensaio	TE	DPEP	Ar	GP	TC	E	Posição	Diluição	Ref./Larg.	Dilui.*(Ref./Larg.)
1	1	1	1	1	1	1	Início	4,94	1,19	5,90
1	1	1	1	1	1	1	Meio	4,44	1,01	4,48
1	1	1	1	1	1	1	Fim	6,73	1,16	7,83
2	1	1	2	2	2	2	Início	15,69	0,37	5,82
2	1	1	2	2	2	2	Meio	13,80	0,36	4,95
2	1	1	2	2	2	2	Fim	10,82	0,39	4,20
3	1	1	3	3	3	3	Início	28,51	0,23	6,46
3	1	1	3	3	3	3	Meio	26,71	0,24	6,51
3	1	1	3	3	3	3	Fim	25,24	0,24	6,05
4	1	2	1	1	2	2	Início	3,97	0,36	1,44
4	1	2	1	1	2	2	Meio	3,64	0,53	1,95
4	1	2	1	1	2	2	Fim	3,74	0,48	1,79

continuação da Tabela 25.

Ensaio	TE	DPEP	Ar	GP	TC	E	Posição	Diluição	Ref./Larg.	Dilui.*(Ref./Larg.)
5	1	2	2	2	3	3	Início	23,90	0,24	5,66
5	1	2	2	2	3	3	Meio	21,89	0,21	4,67
5	1	2	2	2	3	3	Fim	26,70	0,21	5,56
6	1	2	3	3	1	1	Início	4,52	1,57	7,08
6	1	2	3	3	1	1	Meio	1,06	1,50	1,60
6	1	2	3	3	1	1	Fim	1,16	1,34	1,55
7	1	3	1	2	1	3	Início	26,90	0,29	7,76
7	1	3	1	2	1	3	Meio	30,69	0,25	7,57
7	1	3	1	2	1	3	Fim	29,99	0,27	8,21
8	1	3	2	3	2	1	Início	1,00*	0,31	0,31
8	1	3	2	3	2	1	Meio	1,00*	0,31	0,31
8	1	3	2	3	2	1	Fim	1,00*	0,31	0,31
9	1	3	3	1	3	2	Início	1,97	0,32	0,63
9	1	3	3	1	3	2	Meio	3,77	0,28	1,07
9	1	3	3	1	3	2	Fim	2,17	0,28	0,61
10	2	1	1	3	3	2	Início	16,42	0,30	5,00
10	2	1	1	3	3	2	Meio	17,31	0,29	5,10
10	2	1	1	3	3	2	Fim	16,83	0,29	4,88
11	2	1	2	1	1	3	Início	22,24	0,36	7,90
11	2	1	2	1	1	3	Meio	18,12	0,38	6,85
11	2	1	2	1	1	3	Fim	17,82	0,39	6,97
12	2	1	3	2	2	1	Início	27,83	0,28	7,83
12	2	1	3	2	2	1	Meio	24,59	0,28	6,99
12	2	1	3	2	2	1	Fim	26,21	0,26	6,83
13	2	2	1	2	3	1	Início	20,76	0,36	7,42
13	2	2	1	2	3	1	Meio	14,59	0,37	5,34
13	2	2	1	2	3	1	Fim	14,04	0,37	5,26
14	2	2	2	3	1	2	Início	21,58	0,51	11,03
14	2	2	2	3	1	2	Meio	15,56	0,54	8,43
14	2	2	2	3	1	2	Fim	15,72	0,63	9,86
15	2	2	3	1	2	3	Início	5,95	0,27	1,63
15	2	2	3	1	2	3	Meio	5,54	0,30	1,65
15	2	2	3	1	2	3	Fim	5,93	0,30	1,76
16	2	3	1	3	2	3	Início	2,49	0,30	0,74
16	2	3	1	3	2	3	Meio	1,46	0,31	0,45
16	2	3	1	3	2	3	Fim	1,21	0,35	0,42
17	2	3	2	1	3	1	Início	1,00	0,81	0,81
17	2	3	2	1	3	1	Meio	1,00	0,82	0,82
17	2	3	2	1	3	1	Fim	1,00	0,74	0,74
18	2	3	3	2	1	2	Início	23,11	0,38	8,73
18	2	3	3	2	1	2	Meio	17,67	0,35	6,17
18	2	3	3	2	1	2	Fim	19,28	0,33	6,39

(*) Valor de referência, uma vez que não houve coalescência.

Após obtenção dos resultados referentes às soldagens, foi realizado um tratamento estatístico baseado no Método de Taguchi na condição de quanto menor melhor, com isso foi extraído o nível de significância “ α ” dos fatores de controle sobre a diluição e a razão R/L

(Tabela 26). Pode ser observado que o arame não afeta de forma significativa nenhuma das variáveis de respostas analisadas, ou seja, o efeito do tipo de arame é neutro sobre as características geométricas do cordão de solda.

Quanto à diluição foi observado que todos os outros fatores de controle afetam de forma significativa as características geométricas do cordão de solda.

Para a razão R/L, além do arame, a técnica da energia também não afeta.

Tabela 26. Influência dos fatores de controle sobre a diluição e a razão R/L.

Fatores de Controle	Nível de Significância “ α ”	
	Diluição	R/L
TE	0,015	0,243
DPEP	0,000	0,042
Arame	0,566	0,637
GP	0,000	0,000
TC	0,000	0,000
Energia	0,000	0,000

➤ Validação do Método Taguchi

Após aplicação do Método Taguchi, os resultados obtidos quanto à diluição e razão R/L são mostrados na Figura 70 e na Figura 71, respectivamente. Por meio destas figuras é possível identificar a melhor condição estabelecida pelo Método Taguchi considerando baixas diluição e razão R/L.

Esta escolha é realizada por meio dos maiores valores obtidos pela resposta do Taguchi [$Eta = -10\log(\text{diluição})^2$] e [$Eta = -10\log(R/L)^2$]. As condições escolhidas são mostradas na Tabela 27.

A condição escolhida pelo método relacionado à diluição foi uma condição na qual não se conseguiu realizar a soldagem devido à escolha de uma alta DPEP junto com uma baixa energia e um gás com baixo nível de geração de calor.

Esta seleção mostra que o Método Taguchi fez corretamente a precisão para diluição, pois apontou para uma condição já realizada, porém esta condição apresentou diluição “zero” sem coalescência.

De qualquer forma, por meio do Taguchi é possível identificar outras condições adequadas baseado na interpretação dos gráficos da Figura 70 e Figura 71.

Pela Figura 70, para se obter a menor diluição, deve-se selecionar o nível de cada fator que produza o maior valor de Eta da diluição ($Eta = -10\log(\text{diluição})^2$). No caso da diluição, deve-se selecionar o nível “1” da técnica da energia (Tipo I), o nível “3” da DPEP

(14 mm), o nível “2” do arame (UNSN10276), o nível “1” do gás de proteção (argônio), o nível “2” do tipo de tecimento (tecimento triangular) e o nível “1” da energia de soldagem (9,6 kJ/cm).

Deve-se notar que a variável arame somente foi empregada para avaliar possíveis efeitos de viscosidade da liga ou do elemento químico sobre a convecção da poça de fusão sobre as características geométricas e da diluição do cordão de solda. Na prática, o que vai definir a aplicação de determinado material são suas propriedades mecânicas, sua resistência a corrosão e o custo associado para o revestimento.

Outra informação relevante é que além do arame, outra variável que tem pouco efeito sobre a diluição (segundo a Figura 70) é a técnica da energia (TE). Acrescenta-se ainda que para o gás de proteção, apesar do nível “1” (argônio) apresentar melhor resposta sobre a diluição, o nível “3” (99,97% argônio + 0,03 óxido nítrico) é muito semelhante ao argônio, de maneira que se pode empregar tanto o argônio puro quanto a mistura “argônio e NO” para se obter boas respostas sobre a diluição.

Baseado nestes fatores foram realizadas algumas soldagens complementares com pequenos ajustes sobre a configuração do ensaio indicado pelo Método Taguchi (Tabela 28). O método indica a soldagem utilizando uma alta DPEP para baixa energia (Tabela 27).

Uma primeira aproximação, com alteração somente da DPEP do nível “3” (14 mm) para o nível “2” (10 mm) acarretou em um cordão inviável (sem coalescência). Desta forma, foi selecionado o nível “1” (6 mm) da DPEP. Trocou-se também o gás de proteção de argônio para a mistura “argônio + NO” uma vez que não há grandes alterações na diluição e se tem menor quantidade de informação desta mistura em aplicação de revestimento. A partir desta nova condição (19 na Tabela 28) foi alterado o fator de controle tecimento (TC) de triangular (2) para o duplo oito (3) (20 na Tabela 28).

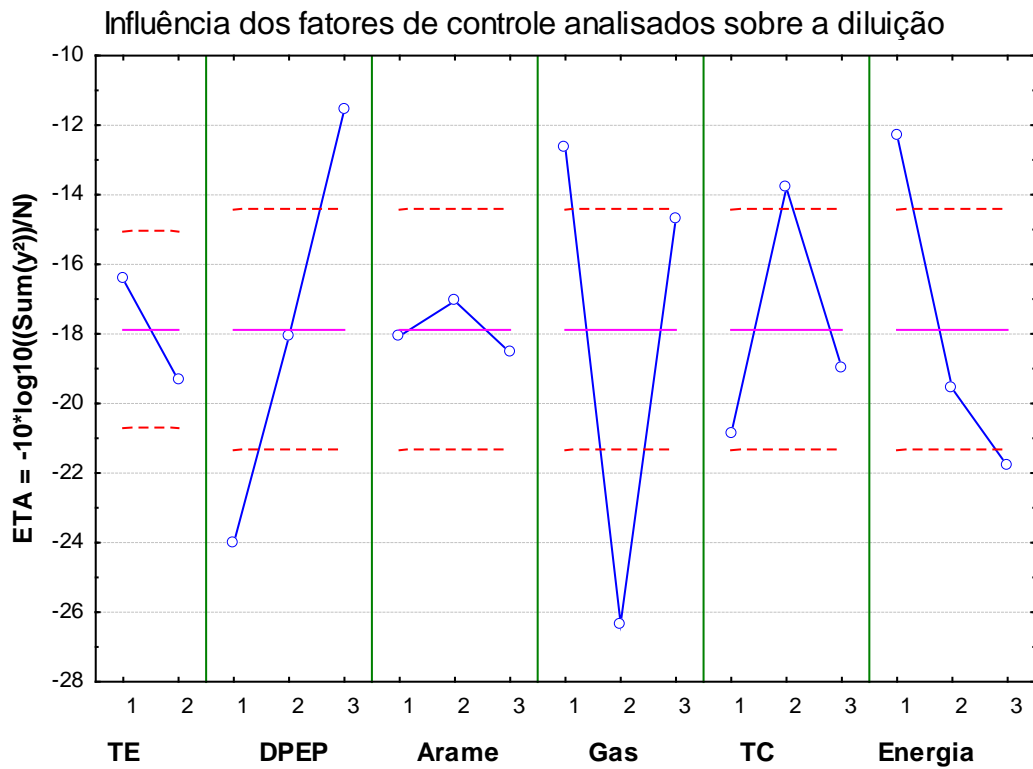


Figura 70. Influência dos fatores de controle analisados sobre a diluição.

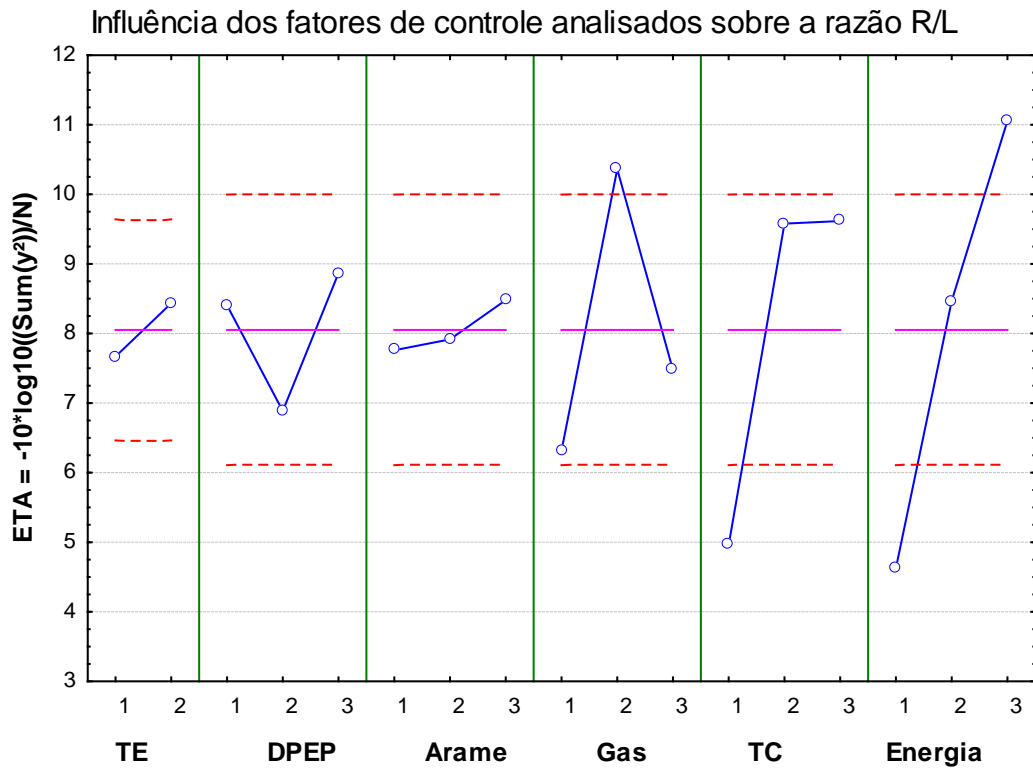


Figura 71. Influência dos fatores de controle analisados sobre a razão R/L.

Quanto à soldagem do ensaio indicado pelo Taguchi referente à razão R/L foi realizado com êxito e também foram feitos mais dois ensaios complementares. De acordo com a Figura 71, observa-se que fatores de controle como técnica da energia, tipo de arame e tipo de tecimento nas condições triangular e duplo oito, podem ser alterados que mesmo assim não influenciam sobre as características geométricas do cordão de solda. A partir desta alteração e com intuito de se fazer uma exploração mais abrangente, foram realizadas alterações nos níveis destes fatores de controle para novos ensaios de confirmação (ver Tabela 27 e ensaios 21,22 e 23 da Tabela 28). De acordo com esta análise, as configurações destes ensaios adicionais foram modificadas de modo a se tentar otimizar ainda mais o processo. As condições de ensaios e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 28.

Tabela 27. Condições indicadas pelo taguchi.

Parâmetro	TE	DPEP	Ar	GP	TC	E
Diluição	1	3	2	1	2	1
R/L	2	3	3	2	3	3

Tabela 28. Ensaios complementares do Taguchi com os respectivos resultados.

Ensaio	TE	DPEP	Ar	GP	TC	E	Posição	Diluição	Ref./Larg.	Dilui.*(Ref./Larg.)
19	1	1	2	3	2	1	Início	6,76	0,47	3,17
19	1	1	2	3	2	1	Meio	6,83	0,44	3,03
19	1	1	2	3	2	1	Fim	4,04	0,48	1,96
20	1	1	2	3	3	1	Início	5,18	0,38	1,98
20	1	1	2	3	3	1	Meio	2,89	0,41	1,20
20	1	1	2	3	3	1	Fim	3,17	0,54	1,70
21	1	3	2	3	2	3	Início	31,09	0,19	5,93
21	1	3	2	3	2	3	Meio	23,77	0,25	6,01
21	1	3	2	3	2	3	Fim	22,26	0,23	5,22
22	2	3	3	2	3	3	Início	11,03	0,36	3,93
22	2	3	3	2	3	3	Meio	11,76	0,39	4,55
22	2	3	3	2	3	3	Fim	10,67	0,37	3,96
23	1	3	2	2	2	3	Início	25,97	0,19	4,89
23	1	3	2	2	2	3	Meio	28,08	0,18	5,08
23	1	3	2	2	2	3	Fim	25,96	0,18	4,69

Com os resultados dos ensaios de confirmação e complementares (Tabela 28) verificou-se que melhores níveis de diluição já haviam sido encontrados durante a soldagem da planilha inicial do Taguchi (Tabela 25). O mesmo aconteceu no ensaio de confirmação da razão R/L (22 na Tabela 28) quando já haviam sido obtidos valores menores ao encontrado neste ensaio (Tabela 25), porém com a adaptação deste ensaio de confirmação para outras

condições (21 e 23 na Tabela 28) foi possível encontrar a melhor condição entre as já apresentadas para a razão R/L.

Os resultados de confirmação e complementares foram adicionados aos obtidos na planilha L18 (Tabela 25) para realizar novamente uma análise através do Método Taguchi, já que o método realiza uma análise individual para cada ensaio e gera um valor de Eta para a diluição e razão R/L dos ensaios adicionados a planilha L18. A partir deste Eta é possível calcular o valor de diluição e de R/L que o método prevê. Estes resultados são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29. Resultados de diluição e razão R/L previstos pelo Método Taguchi.

Ensaio	TE	DPEP	Ar	GP	TC	E	N	Diluição	R/L	Previsto		Medido	
								Eta	Eta	Diluição	R/L	Diluição	R/L
19	1	1	2	3	2	1	1	8,83207	-	2,764417	-	5,87	-
20	1	1	2	3	3	1	1	14,0038	-	5,014065	-	3,86	-
21	1	3	2	3	2	3	1	-	12,3034	-	0,242566	-	0,22
22	2	3	3	2	3	3	1	-	16,5592	-	0,148607	-	0,37
23	1	3	2	2	2	3	1	-	15,19133	-	0,173954	-	0,18

De acordo com os valores de diluição e razão R/L previstos pelo Método Taguchi, verifica-se que há uma grande diferença quando comparado com os medidos, esta grande diferença pode ser justificada pela variação inerente nas medidas de posição (Início, meio e fim) que pode ser de até 50%, por se tratar de medidas com baixos níveis de diluição, a própria variação humana nas medidas por mínima que seja, pode acarretar em uma grande alteração no percentual das medidas, fato este que não invalida a aplicação do método. A partir da planilha gerada pelo método e dos resultados encontrados foi possível chegar a excelentes parâmetros de soldagem no que diz respeito à baixa diluição e baixa razão R/L, o grande prejuízo relacionado ao uso do Método Taguchi foi devido a condição que não houve coalescência.

➤ **Análise do comportamento dos fatores de controle utilizado no Método Taguchi sobre a diluição e razão R/L**

Conforme a Tabela 26, serão apresentados a seguir o comportamento dos fatores de controle que afetaram de forma significativa as variáveis de resposta analisadas.

○ **Efeito dos fatores de controle sobre a diluição**

A Figura 72 mostra a influência do tipo de tecimento sobre a diluição. Pode ser observado que o uso do tecimento, seja ele triangular ou duplo oito, reduz

consideravelmente o valor da diluição quando comparado com a condição sem tecimento. Percebe-se também um comportamento similar para os dois tipos de tecimento, apresentando uma diluição praticamente constante. Este comportamento confirma o que já foi encontrado comparando a condição sem tecimento com a condição com tecimento (Figura 28).

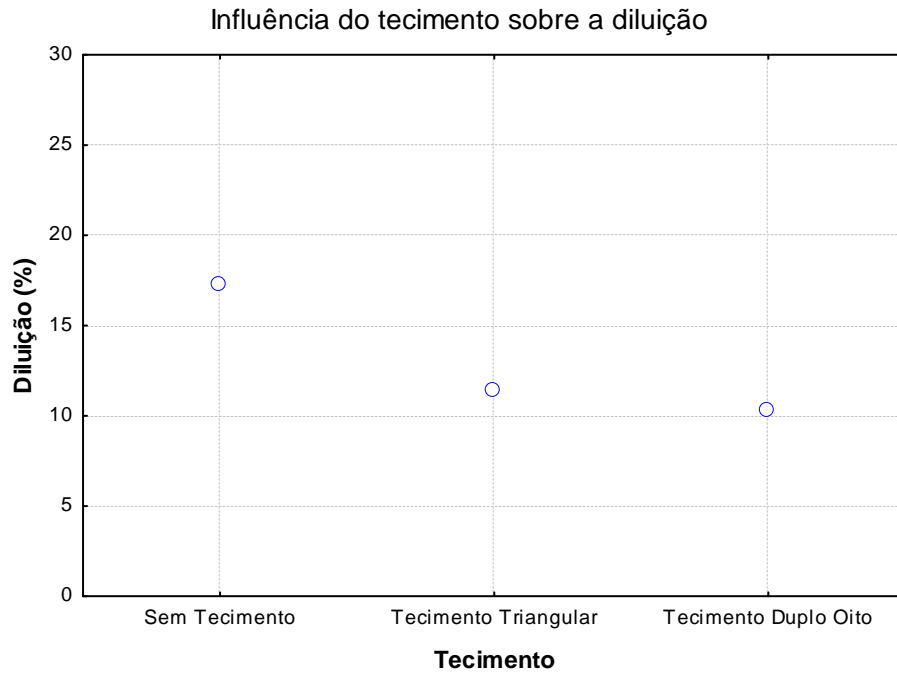


Figura 72. Influência do tecimento sobre a diluição.

A Figura 73 mostra a influência da técnica da energia sobre a diluição. O resultado confirma o que já foi analisado nos resultados do fatorial completo (Figura 40), ou seja, a condição com ajuste da energia pela corrente eficaz apresenta um comportamento que aumenta a diluição com o aumento do nível de energia. Todavia, a condição com ajuste da energia pela velocidade de soldagem apresenta um comportamento praticamente constante, sendo esta última condição (Tipo V) ideal para soldagens com altos níveis de energias. O Tipo I (com variação da corrente) é aconselhável para soldagens com baixos níveis de energias, situações estas onde serão encontradas os menores níveis de diluição para cada situação.

A Figura 74 mostra a influência da DPEP e da energia sobre a diluição. Pode ser observado que quanto maior a energia maior é a diluição e quanto maior for a DPEP menor será a diluição. Este comportamento já foi mostrado durante a análise do fatorial completo através da Figura 34 e Figura 46.

Pode-se observar que o argônio e a mistura argônio + NO (Figura 75) apresentam comportamentos similares quanto ao valor de diluição. A mistura de argônio + Hélio

apresenta valores de diluição maior que os outros dois gases, comportamento este já esperado devido ao gás hélio proporcionar maior quantidade de calor ao arco de soldagem por unidade de comprimento.

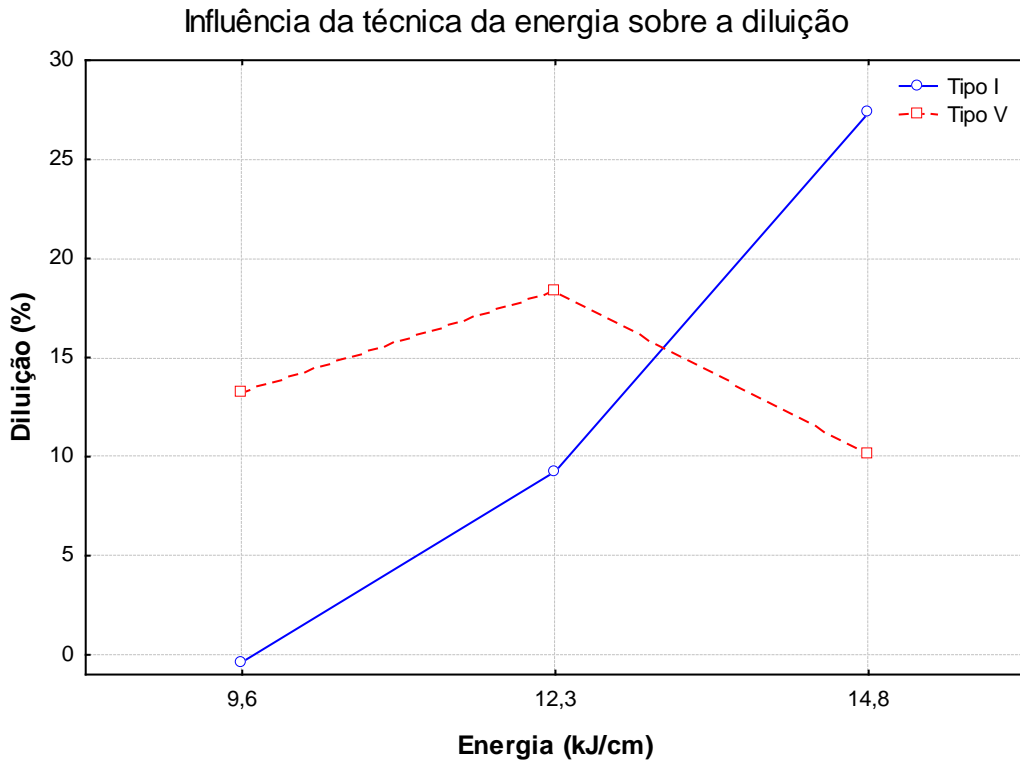


Figura 73. Influência da técnica da energia de soldagem sobre a diluição.

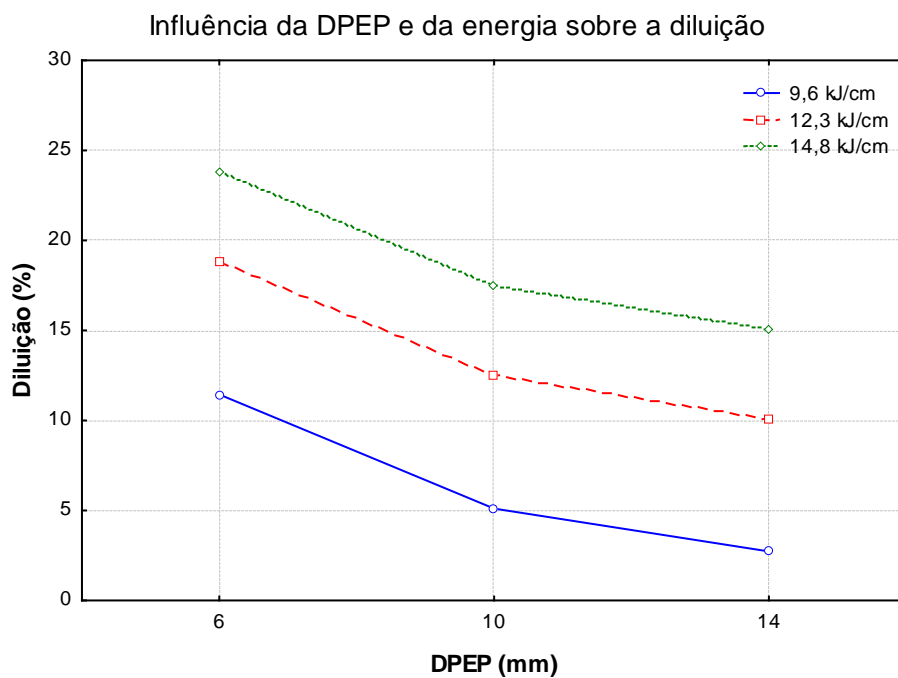


Figura 74. Influência da DPEP e da energia de soldagem sobre a diluição.

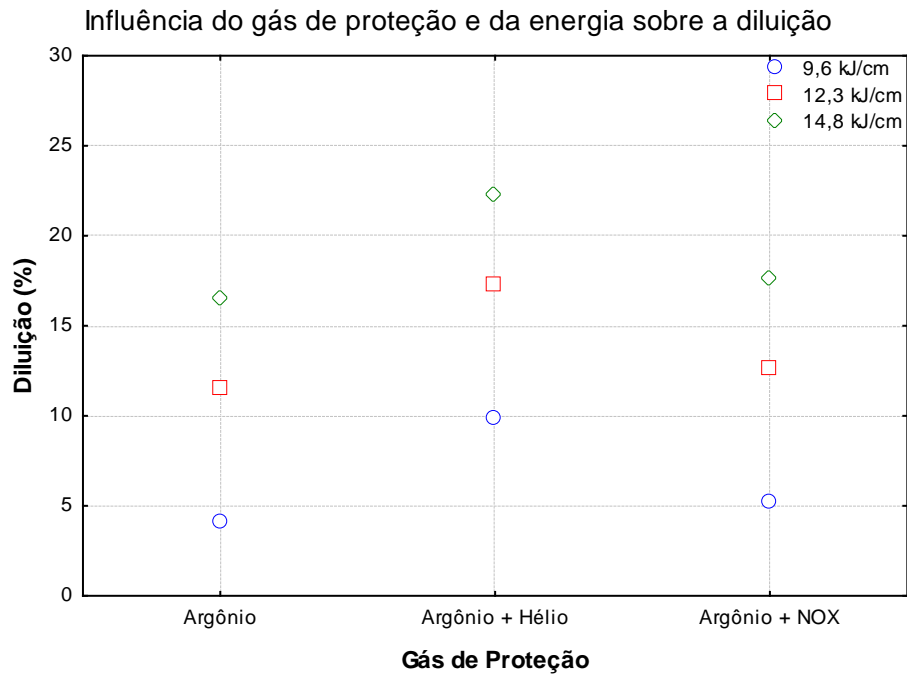


Figura 75. Influência do gás de proteção e da energia de soldagem sobre a diluição.

○ **Efeito dos fatores de controle sobre a razão R/L**

Observa-se que o uso do tecimento reduz consideravelmente o valor da razão R/L (Figura 76). Este comportamento já foi verificado por meio da Figura 29 e confirma o benefício do emprego do tecimento sobre esta relação, fato este desejável para soldagens de revestimentos. Verifica-se também que o tecimento triangular e duplo oito apresentam comportamentos similares ao que foi observado para a diluição (Figura 72).

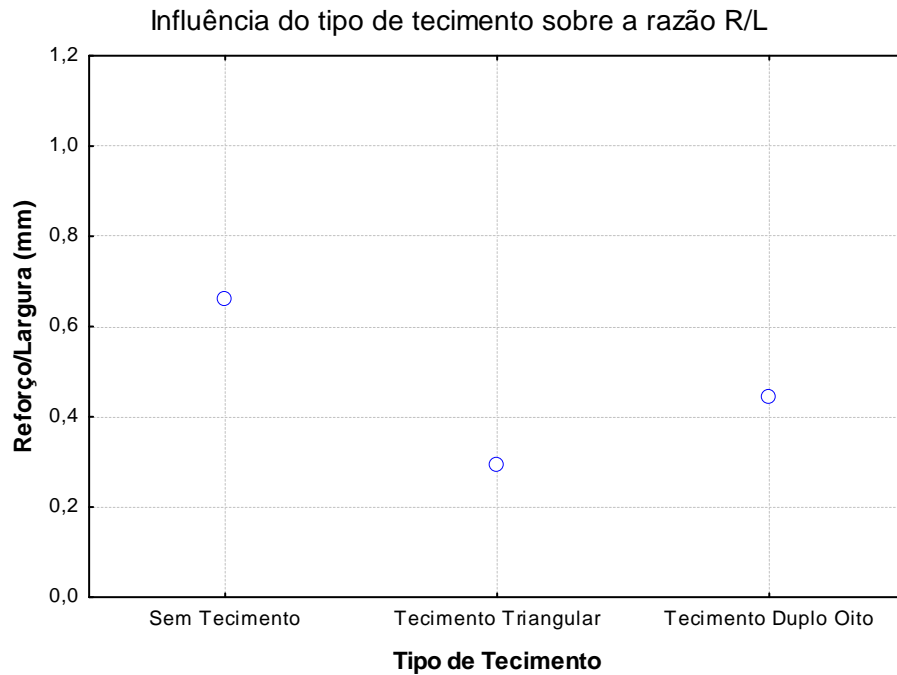


Figura 76. Influência do tecimento sobre a razão R/L.

A Figura 77 mostra a influência da técnica da energia sobre a razão R/L. Constatou-se que o valor desta razão tende a diminuir com o aumento da energia através do ajuste da corrente eficaz (Tipo I). Para alteração da energia com a técnica Tipo V, ocorre uma redução seguido do aumento da razão entre reforço e largura, a medida que se aumenta a energia de soldagem. Este comportamento difere um pouco do apresentado anteriormente (Figura 41) durante a discussão dos resultados do fatorial completo, no que diz respeito ao comportamento da energia pelo ajuste da velocidade de soldagem (Tipo V), em níveis intermediários. Esta diferença de comportamento pode estar associada as variações inerentes nas medidas de posição (início, meio e fim) conforme já comentado.

A Figura 78 mostra a influência da DPEP e da energia de soldagem sobre a razão R/L. Verifica-se que com aumento da energia, a razão R/L tende a diminuir conforme já apresentado anteriormente (Figura 35), e com aumento da DPEP estes valores tendem a apresentar um comportamento sem muita variação similar ao apresentado na Figura 47 para o estudo do Fatorial Completo.

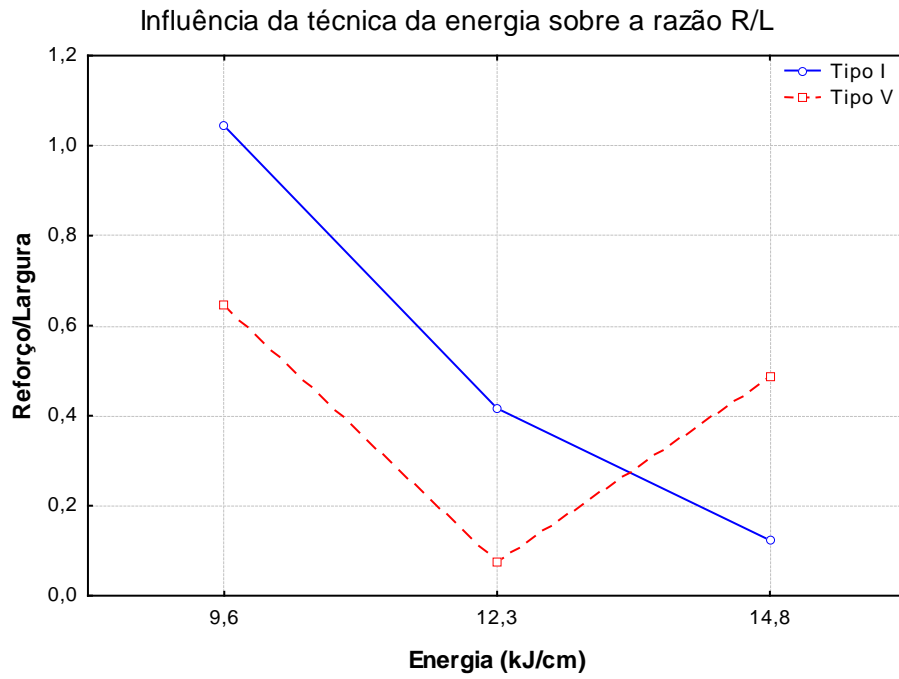


Figura 77. Influência da técnica da energia sobre a razão R/L.

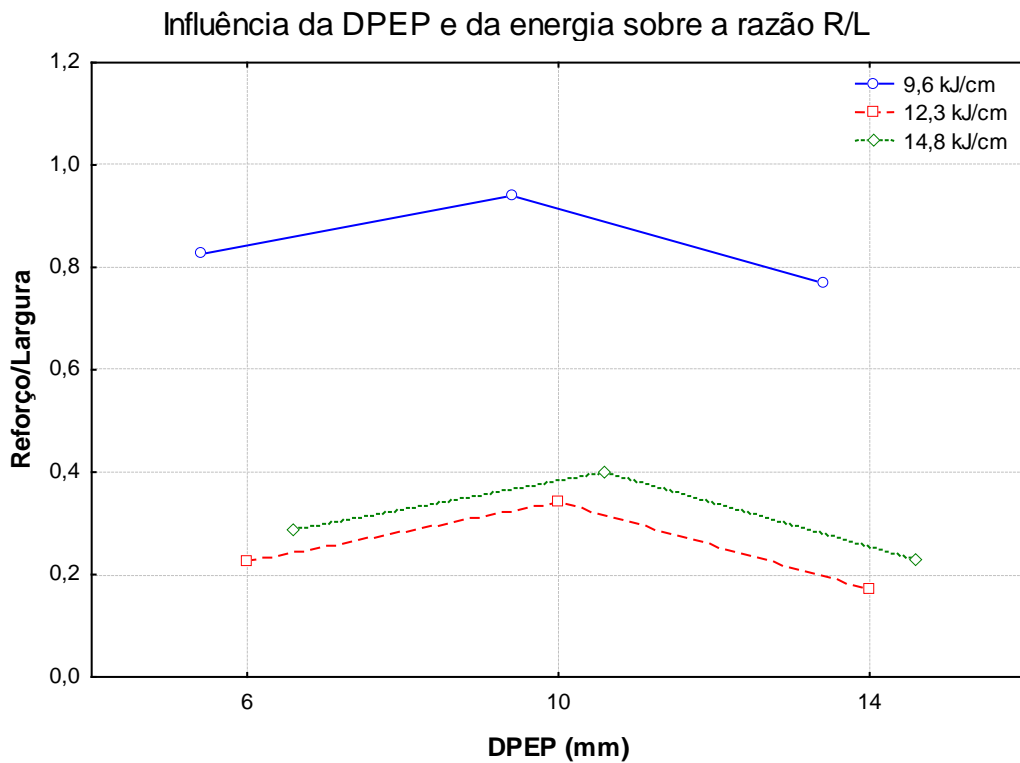


Figura 78. Influência da DPEP e da energia sobre a razão R/L.

A Figura 79 mostra a influência do gás de proteção e da energia sobre a razão R/L. Observa-se que a mistura de argônio + hélio apresenta menores níveis da razão R/L. Este

resultado confirma o esperado, maior quantidade de calor ao arco e, conseqüentemente, aumenta a molhabilidade da poça de fusão, reduzindo o reforço e aumentando a largura.

Resultado bastante interessante foi o obtido para a mistura “argônio + NO”, pois a mesma apresentou resultados semelhantes ao obtido para a mistura “argônio + hélio” com pequena oscilação para a maior energia.

Como foi comentado anteriormente, o emprego da mistura “argônio + NO” teve o objetivo de verificar o efeito da pequena adição de gás ativo sobre a molhabilidade da poça de fusão e, com isso, garantir cordões adequados para o revestimento com ligas de níquel. Estas ligas, comprovadamente apresentam uma menor molhabilidade/viscosidade que os aços carbonos e aços inoxidáveis (ASM v2, 1997).

O resultado da Figura 79 indica que existe realmente este benefício, todavia, ainda há a necessidade de se avaliar o efeito da adição de gás ativo sobre a resistência ao desgaste e a corrosão dos revestimentos com ligas de níquel. Esta avaliação não fará parte deste trabalho.

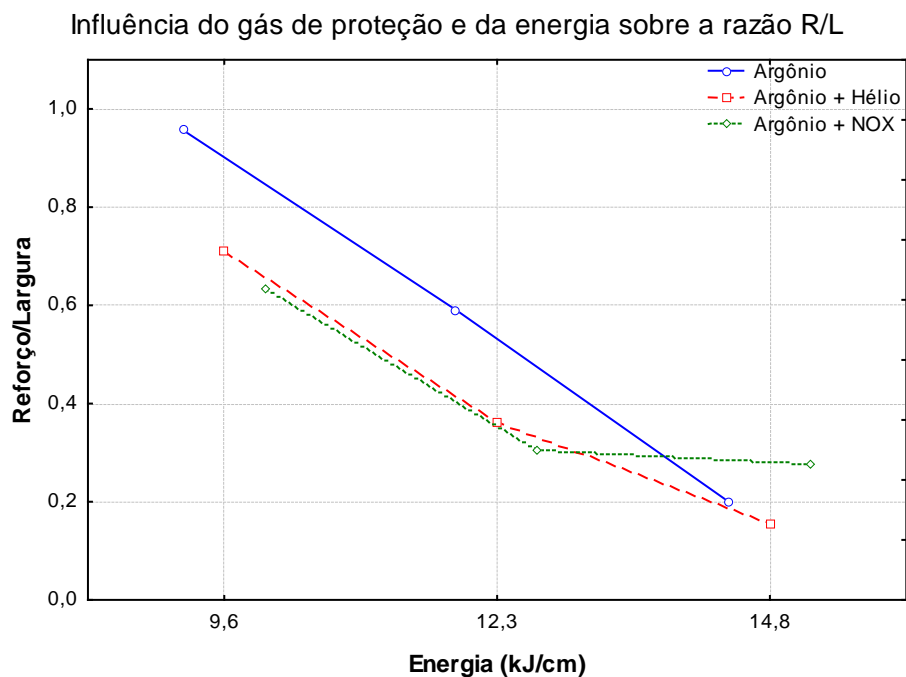


Figura 79. Influência do gás de proteção e da energia sobre a razão R/L.

➤ **Análise das características econômicas das soldagens realizadas para aplicação do Método Taguchi**

Após realização das soldagens para aplicação do Método Taguchi, foi feito um levantamento das características econômicas para verificar a tendência dos fatores de controle sobre as variáveis de respostas como diluição e razão reforço /largura.

A Figura 80 mostra a influência da técnica da energia sobre a taxa de fusão de arame. É possível constatar que a taxa de fusão de arame tende a ser maior quando o ajuste da energia é feito pela corrente (Tipo I) quando comparado com ajuste de energia feito pela velocidade de soldagem (Tipo V). Este mesmo comportamento se repete para a taxa de deposição (Figura 82).

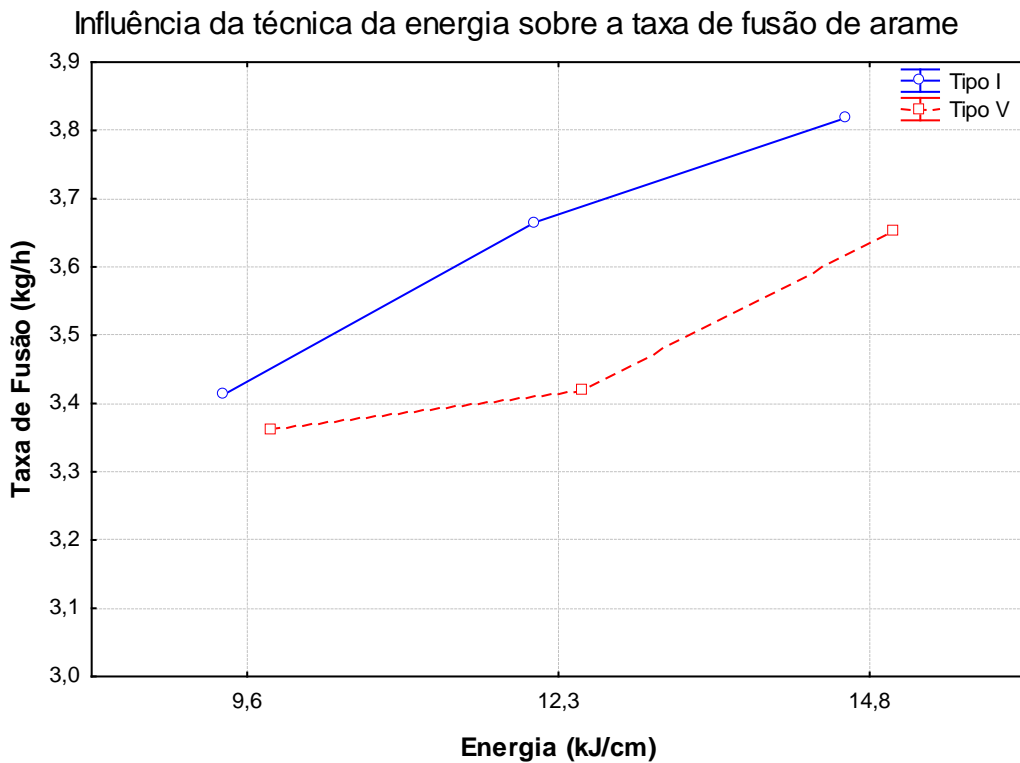


Figura 80. Influência da técnica da energia sobre a taxa de fusão de arame.

A Figura 81 mostra a influência do gás de proteção e da energia sobre a taxa de fusão de arame. Por esta figura, verifica-se que quanto maior a energia maior a taxa de fusão de arame. Observa-se também, quanto ao gás de proteção, que a mistura de argônio com hélio apresentou maior taxa de fusão, seguida pela mistura de argônio com NO. O argônio puro apresentou a menor taxa de fusão entre os gases estudados. Resultado este já esperado devido ao fato do argônio fornecer menor quantidade de calor ao arco por unidade de comprimento (menor capacidade de ionização e menor resistência elétrica do arco, o que reduz seu aquecimento por unidade de comprimento). Comportamento que se repete para a taxa de deposição de arame (Figura 83).

A Figura 84 mostra a influência da técnica da energia sobre a eficiência de deposição. Pode-se observar que o ajuste da energia pela corrente eficaz (tipo I) apresenta um comportamento praticamente constante, enquanto que o ajuste da energia pela

velocidade de soldagem (tipo V) apresenta uma maior eficiência de deposição com o aumento da energia.

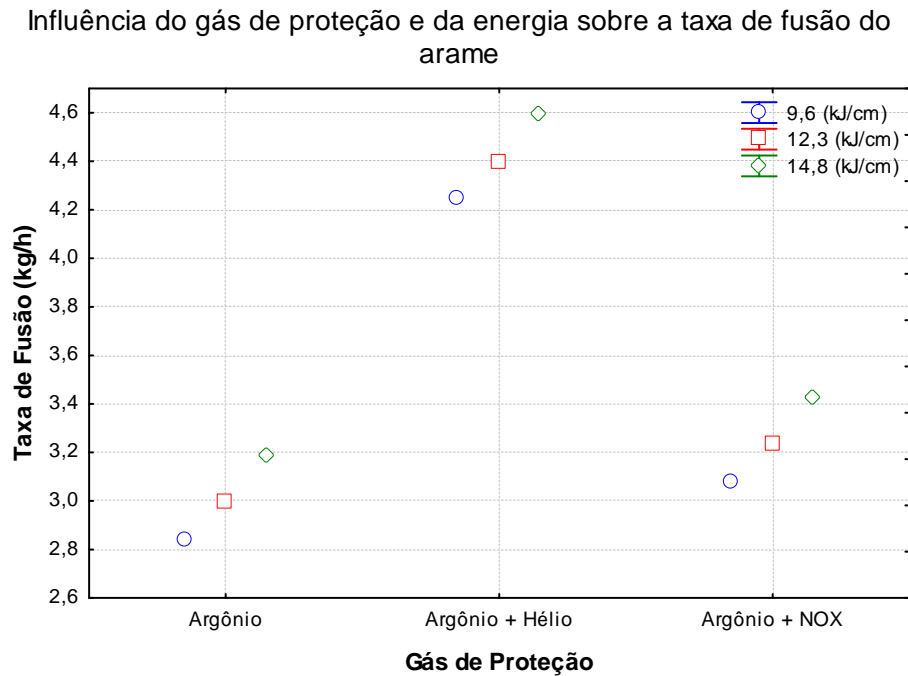


Figura 81. Influência do gás de proteção e da energia sobre a taxa de fusão do arame.

Por meio da Figura 85 é possível verificar que quanto maior a energia maior a eficiência de deposição. Com relação ao gás de proteção, a mistura de argônio com hélio apresenta maior eficiência de deposição seguida pela mistura com NO e pelo argônio puro. Comportamento similar ao acontecido com relação a taxa de deposição (Figura 81).

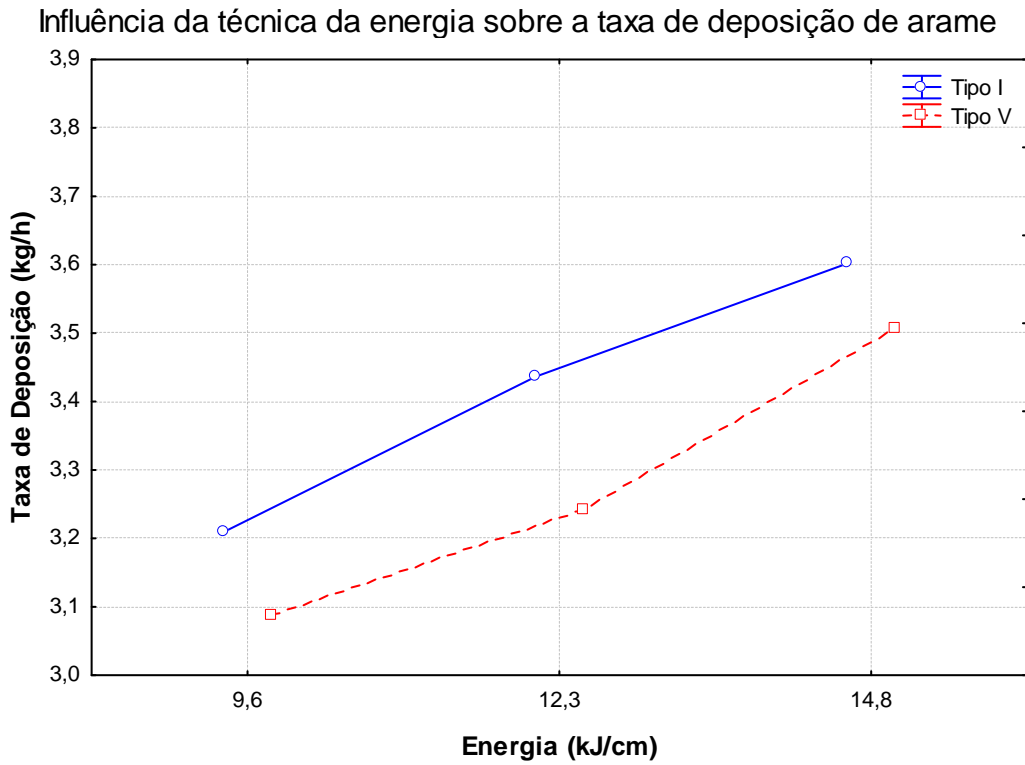


Figura 82. Influência da técnica da energia sobre a taxa de deposição de arame.

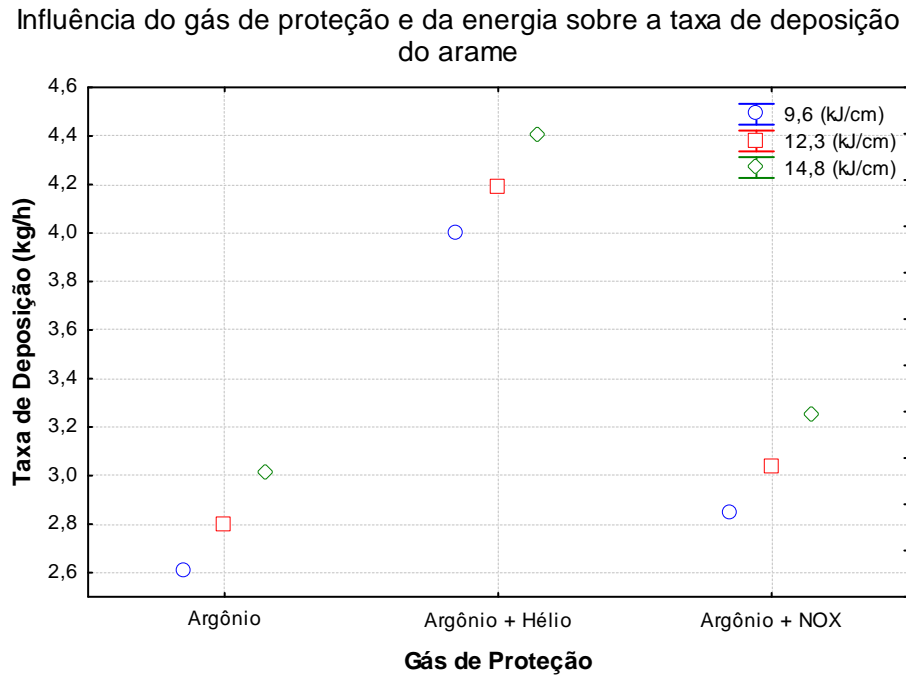


Figura 83. Influência do gás de proteção e da energia sobre a taxa de deposição do arame.

Influência da técnica da energia sobre a eficiência de deposição de arame

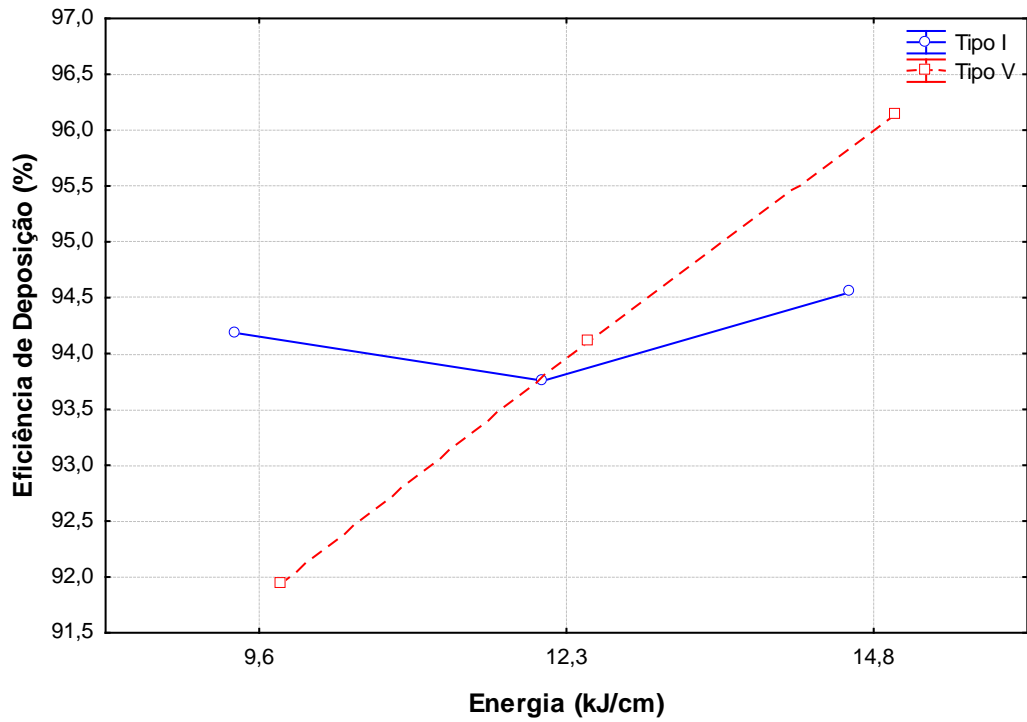


Figura 84. Influência da técnica da energia sobre a eficiência de deposição de arame.

Influência do gás de proteção e da energia sobre a eficiência de deposição de arame

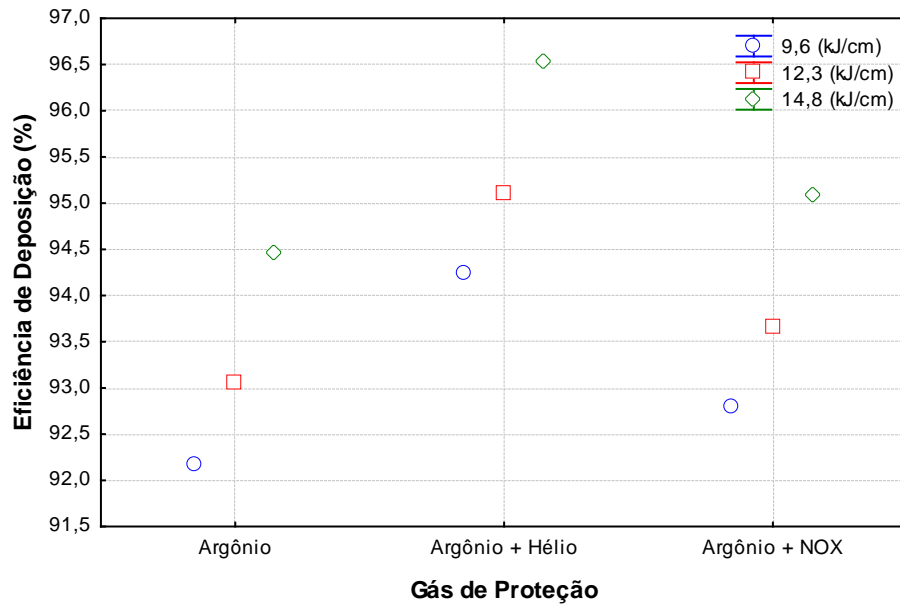


Figura 85. Influência do gás de proteção e da energia sobre a eficiência de deposição de arame.

6.1.3. Custos relacionados à soldagem do Fatorial Completo e Método Taguchi

A Tabela 30 e Tabela 31 mostram os custos relacionados às soldagens empregando o fatorial completo e o Método Taguchi, respectivamente. A partir destas tabelas é observado que além dos custos, uma estimativa de tempo, diluição e reforço para uma possível aplicação de segunda camada no revestimento pode ser realizada.

Para cálculo do tempo de soldagem, só foi levado em consideração o tempo necessário para realização dos cordões de solda, descartando neste momento o tempo de resfriamento entre os passes.

As indústrias do Setor de Petróleo e Gás Natural exigem para seus equipamentos revestidos, um reforço de no mínimo 3 mm, baseado nisso foi tomado como referência para o reforço o valor de 4 mm, pois a diferença entre o exigido e o tomado como referência é suficiente para uma possível usinagem, caso necessite melhorar o acabamento superficial do revestimento. A velocidade de resfriamento pode ser maior na soldagem em campo, conseqüentemente maiores reforços serão obtidos.

As condições 2, 16, 19, 20, 22, 24, 28, 34 e 36 (Tabela 30) e condições 4, 6, 8, 9, 16, 17 e 20 (Tabela 31) apresentam níveis de diluição menores que 5 %, o que é excelente comparado com o considerado neste trabalho (< 10 %). As condições 4, 10, 15, 21, 23, 27, 33 e 35 (Tabela 30) e condições 1, 15 e 19 (Tabela 31) apresentam níveis de diluição entre 5 e 10 %. Pode-se observar que a grande maioria destas condições foi realizada com uso do tecimento. As condições mencionadas não apresentam reforço suficiente para uma possível usinagem, porém é importante salientar que estas condições foram realizadas em passe único, acredita-se que durante a realização do revestimento o reforço tende a aumentar e a diluição diminuir, devido à sobreposição entre as camadas. Com este aumento acredita-se na possibilidade de aplicação de apenas uma camada para estas condições. Para isto é necessário um estudo complementar para soldagem de revestimentos com estas condições. Foi observado também que as condições mencionadas que utilizaram tecimento apresentaram menores custos e menores tempos para realização do revestimento, comparadas com as condições sem tecimento com baixas diluições, porém estas condições apresentaram um maior reforço.

Pode-se observar ainda por estas tabelas que as condições estimadas para aplicação da segunda camada, apresentam um baixo nível de diluição e um bom reforço, logo, o diferencial na escolha das melhores condições com aplicação de duas camadas será o tempo e o custo associados para o revestimento. Baseado nesta análise é possível verificar que as condições 6, 18, 29 e 30 (Tabela 30) e condições 3, 9, 10, 12, 21 e 23 (Tabela 31), apresentam tempos e custos moderados comparado com as demais condições.

Tabela 30. Custos referentes à soldagem do fatorial completo.

CP	1º Camada														2º Camada			
	Vs (m/min)	Valim (m/min)	D (%)	R (mm)	L (mm)	P (mm)	R/L	Dx (R/L)	LT (mm)	n	t (min)	TD (kg/h)	TF (kg/h)	Custo 1(R\$)	R2 (mm)	D2 (%)	t2 (min)	Custo 2 (R\$)
1	0,25	5,5	5,4	4,53	4,06	0,56	1,12	6,07	100	36	17,5	2,5	2,7	317,7	9,06	0,29	34,98	635,43
2	0,25	5,5	1,5	3,89	8,38	0,11	0,47	0,71	100	17	8,4	2,6	2,8	154,3	7,78	0,02	16,71	308,60
3	0,25	6	13,1	4,26	6,38	1,16	0,67	8,79	100	23	11,1	2,8	3,0	223,2	8,51	1,73	22,11	446,46
4	0,25	6	8,3	3,58	8,24	0,42	0,44	3,61	100	18	8,5	2,7	2,9	164,3	7,15	0,68	17,00	328,67
5	0,25	6	28,8	3,23	10,36	1,73	0,31	8,99	100	14	6,7	2,8	3,0	136,4	6,46	8,29	13,42	272,85
6	0,25	6	18,9	2,93	11,81	0,69	0,25	4,68	100	12	5,9	2,8	3,0	118,3	5,87	3,56	11,71	236,52
7	0,32	6	19,1	3,39	5,94	1,39	0,57	10,89	100	25	9,3	2,7	3,0	183,1	6,78	3,65	18,55	366,26
8	0,32	6	12,6	3,30	6,90	0,63	0,48	6,04	100	21	8,0	2,7	2,9	155,4	6,59	1,60	15,94	310,74
9	0,25	6	13,1	4,26	6,38	1,16	0,67	8,79	100	23	11,1	2,8	3,0	223,2	8,51	1,73	22,11	446,46
10	0,25	6	8,3	3,58	8,24	0,42	0,44	3,61	100	18	8,5	2,7	2,9	164,3	7,15	0,68	17,00	328,67
11	0,21	6	17,0	4,25	7,89	1,43	0,54	9,14	100	19	10,6	2,8	3,0	214,1	8,51	2,89	21,17	428,22
12	0,21	6	11,8	3,37	10,95	0,55	0,31	3,64	100	13	7,5	2,9	3,1	153,7	6,74	1,40	15,08	307,32
13*	0,25	5	0,0	4,30	6,30	0,01	0,68	0,01	100	23	11,2	2,4	2,6	191,3	8,60	0,00	22,38	382,51
14*	0,25	5	0,0	3,50	8,30	0,01	0,42	0,00	100	18	8,4	2,3	2,5	143,1	7,00	0,00	16,87	286,14
15	0,25	6	8,4	4,09	6,61	0,61	0,63	5,35	100	22	10,7	2,8	3,0	213,6	8,18	0,71	21,32	427,10
16	0,25	6	3,8	3,70	8,24	0,21	0,46	1,72	100	18	8,5	2,8	3,1	173,3	7,40	0,14	17,00	346,63
17	0,25	6	24,3	3,19	10,73	1,49	0,30	7,21	100	13	6,5	2,9	3,0	131,1	6,37	5,90	12,94	262,22
18	0,25	6	13,8	2,84	11,87	0,43	0,24	3,31	100	12	5,8	2,9	3,1	120,2	5,68	1,91	11,65	240,45
19	0,32	6	4,7	3,60	5,69	0,35	0,63	2,95	100	26	9,7	2,9	3,1	201,5	7,20	0,22	19,39	403,01
20	0,32	6	3,1	3,45	6,86	0,14	0,50	1,56	100	21	8,0	2,8	3,0	162,8	6,91	0,09	16,03	325,57
21	0,25	6	8,4	4,09	6,61	0,61	0,63	5,35	100	22	10,7	2,8	3,0	213,6	8,18	0,71	21,32	427,10
22	0,25	6	3,8	3,70	8,24	0,21	0,46	1,72	100	18	8,5	2,8	3,1	173,3	7,40	0,14	17,00	346,63
23	0,21	6	6,7	4,28	7,18	0,59	0,60	3,95	100	20	11,7	2,8	3,1	238,3	8,56	0,45	23,30	476,63
24	0,21	6	3,0	3,51	10,86	0,21	0,32	0,97	101	13	7,7	2,9	3,1	158,3	7,02	0,09	15,37	316,70
25*	0,25	5,5	0,0	3,50	8,30	0,01	0,42	0,00	102	18	8,6	2,5	2,7	156,4	7,00	0,00	17,22	312,70
26*	0,25	5,5	0,0	3,50	8,30	0,01	0,42	0,00	103	18	8,7	2,6	2,8	160,6	7,00	0,00	17,39	321,10
27	0,25	6	9,6	4,02	5,77	0,72	0,70	6,67	104	27	12,7	2,8	3,1	262,1	8,03	0,91	25,45	524,15
28	0,25	6	2,3	3,17	7,77	0,15	0,42	0,93	105	20	9,5	2,8	3,0	191,0	6,34	0,05	18,97	381,94
29	0,25	6	13,1	2,91	10,93	0,68	0,27	3,46	106	14	6,7	2,8	3,1	138,4	5,81	1,71	13,49	276,90
30	0,25	6	13,1	2,91	10,93	0,68	0,27	3,46	107	14	6,8	2,8	3,0	136,7	5,81	1,71	13,62	273,31
31*	0,32	5,5	0,0	3,70	8,20	0,01	0,45	0,00	108	19	7,2	2,5	2,7	131,2	7,40	0,00	14,44	262,31
32*	0,32	5,5	0,0	3,70	8,20	0,01	0,45	0,00	109	19	7,3	2,6	2,8	134,6	7,40	0,00	14,58	269,20
33	0,25	6	9,6	4,02	5,77	0,72	0,70	6,67	110	28	13,5	2,8	3,1	277,5	8,03	0,91	26,95	554,96
34	0,25	6	2,3	3,17	7,77	0,15	0,42	0,93	111	21	10,0	2,8	3,0	202,2	6,34	0,05	20,09	404,32
35	0,21	6	7,5	4,79	4,43	0,84	1,09	8,13	112	37	21,4	2,8	3,1	436,4	9,58	0,56	42,79	872,83
36	0,21	6	3,1	3,45	10,38	0,11	0,33	1,02	113	16	9,0	2,8	3,0	181,1	6,89	0,10	18,10	362,11

(*) condições em que não ocorreu coalescência.

Tabela 31. Custos referentes a soldagem empregando o Método Taguchi.

CP	1º Camada														2º Camada			
	Vs (m/min)	Valim (m/min)	D (%)	R (mm)	L (mm)	P (mm)	R/L	Dx (R/L)	LT (mm)	n	t (min)	TD (kg/h)	TF (kg/h)	Custo 1 (R\$)	R2 (mm)	D2 (%)	t2 (min)	Custo 2 (R\$)
1	0,25	5,5	5,4	4,53	4,06	0,56	1,12	6,07	100	36	17,5	2,5	2,7	317,7	9,06	0,29	34,98	635,43
2	0,25	9	13,4	4,17	11,21	0,77	0,37	4,99	100	13	6,2	4,3	4,5	186,6	8,34	1,81	12,36	373,12
3	0,25	7	26,8	3,12	13,19	1,18	0,24	6,34	100	11	5,2	3,4	3,5	122,0	6,24	7,19	10,44	243,91
4	0,25	6	3,8	3,70	8,24	0,21	0,46	1,72	100	18	8,5	2,8	3,1	173,3	7,40	0,14	17,00	346,63
5	0,25	10	24,2	3,35	15,31	1,14	0,22	5,30	100	9	4,5	4,5	4,8	144,1	6,71	5,84	8,93	288,14
6	0,25	6	2,2	4,77	3,24	0,25	1,47	3,41	100	46	22,0	3,0	3,1	453,2	9,53	0,05	43,91	906,35
7	0,25	10	28,8	3,96	14,26	2,26	0,28	7,98	100	10	4,8	4,6	5,0	158,7	7,92	8,29	9,62	317,32
8	0,25	6	1,0	3,10	9,90	0,00	0,31	0,31	100	15	7,0	2,8	3,0	140,2	6,20	0,01	14,07	280,35
9	0,25	6	2,6	3,13	10,68	0,08	0,29	0,77	100	14	6,5	2,8	3,0	130,1	6,26	0,07	13,01	260,14
10	0,25	6	16,9	3,19	10,76	0,75	0,30	5,00	100	13	6,5	2,8	3,1	132,3	6,38	2,84	12,90	264,59
11	0,21	6	19,4	3,63	9,69	1,05	0,37	7,24	100	15	8,6	2,9	3,1	174,6	7,26	3,76	17,12	349,25
12	0,32	8	26,2	3,05	11,06	1,07	0,28	7,22	100	13	4,9	3,7	3,8	124,5	6,09	6,87	9,79	248,99
13	0,32	8	16,5	3,41	9,33	0,69	0,37	6,00	100	16	5,8	3,8	4,0	155,5	6,82	2,71	11,69	311,06
14	0,25	6	17,6	4,12	7,41	1,42	0,56	9,77	100	20	9,5	2,9	3,1	195,4	8,24	3,10	18,97	390,84
15	0,21	6	5,8	3,35	11,57	0,25	0,29	1,68	100	12	7,1	3,0	3,2	150,0	6,70	0,34	14,24	299,94
16	0,21	7	1,7	3,72	11,67	0,08	0,32	0,54	100	12	7,1	3,3	3,5	166,1	7,44	0,03	14,12	332,13
17	0,32	6	0,8	3,87	4,90	0,04	0,79	0,64	100	30	11,3	2,9	3,1	234,5	7,73	0,01	22,57	469,02
18	0,25	9	20,0	4,19	11,87	1,76	0,35	7,09	100	12	5,8	4,3	4,5	173,4	8,37	4,01	11,65	346,71
19	0,25	6	5,9	3,79	8,15	0,32	0,47	2,72	100	18	8,6	2,7	3,0	171,4	7,57	0,35	17,20	342,80
20	0,25	6	3,7	3,63	8,27	0,16	0,44	1,62	100	18	8,5	2,9	3,1	174,2	7,26	0,14	16,93	348,42
21	0,25	6	25,7	2,74	12,24	1,05	0,23	5,72	100	12	5,6	2,8	3,0	112,9	5,49	6,61	11,29	225,72
22	0,21	9	11,2	4,62	12,45	0,72	0,37	4,15	100	12	6,6	4,4	4,6	201,3	9,23	1,24	13,20	402,66
23	0,25	9	26,7	2,89	15,78	1,05	0,18	4,89	100	9	4,3	4,1	4,3	124,4	5,78	7,11	8,65	248,80

(*) condições em que não ocorreu coalescência.

6.2. Etapa 3 - Soldagem de Revestimentos

Após realização da etapa de exploração de parâmetros com simples deposição, foi realizada soldagens de revestimentos com base inicial nos resultados obtidos. Foram realizadas três soldagens dissimilares entre o metal de base ASTM A516 Gr. 60 e as três ligas de níquel utilizadas neste trabalho, todas para um mesmo nível de energia. Nestas soldagens foram mantidas constante a DPEP em 10 mm, DPAP em 3 mm e velocidade de alimentação em 6 m/min. A Tabela 32 mostra os parâmetros e resultados obtidos nas soldagens de revestimento. Por esta tabela, pode-se observar baixos valores de diluição, onde a melhor condição dentre as realizadas foi com uso do arame eletrodo UNS N06625 utilizando o argônio puro como gás de proteção, e uso de tecimento triangular.

Tabela 32. Parâmetros e resultados das soldagens de revestimento.

Cond.	Arame	Tec.	Gás	E (kJ/cm)	N	Dil. (%)	Ref. (mm)	Larg. Total (mm)	Pen. (mm)	Larg. T. /N.
R1	625	Triangular	Ar	18,7	8	6,7	3,9	61,2	0,4	7,6
R2	C-276	Duplo oito	Ar + NO	18,9	6	8,6	3,2	58,7	0,5	9,8
R3	686	Triangular	Ar	18,9	6	9,4	3,5	56,2	0,5	9,4

Onde, Cond.: ensaio; Arame: metal de adição; Tec. Tipo de tecimento; Gás: gás de proteção utilizado (Ar- argônio puro, Ar + NO – mistura de argônio com óxido nítrico); E: energia; N: número de passes; Dil.; diluição; Ref.: reforço; Larg. Total: largura total do revestimento; Pen.: penetração; Larg. T./N.: largura total do revestimento dividido pelo n.

A Figura 86 apresenta a fotografia do revestimento, onde é possível visualizar o excelente acabamento superficial.

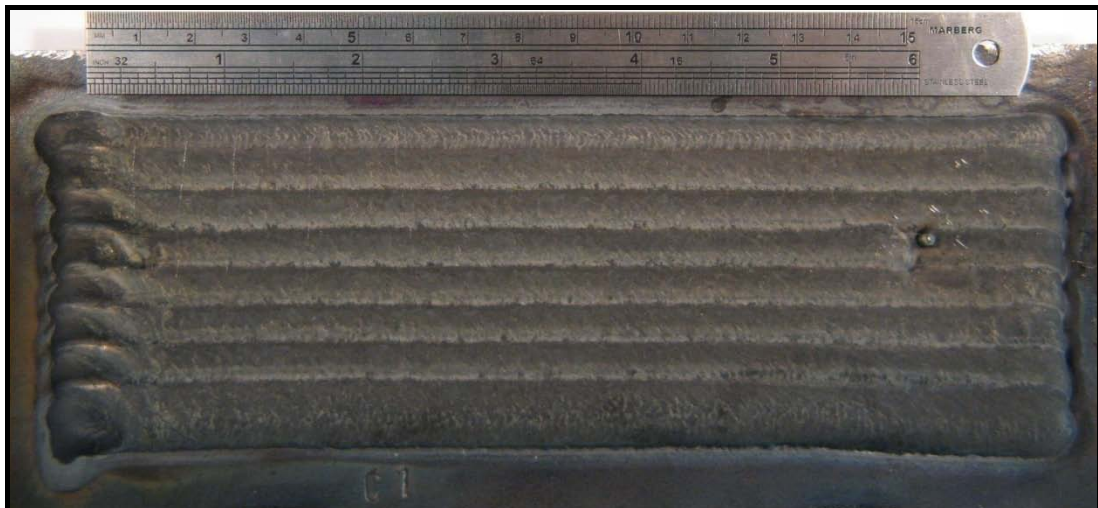


Figura 86. Acabamento superficial da amostra soldada com a condição R1.

A Figura 87 mostra a seção transversal das camadas soldadas. A Tabela 32 apresenta os resultados obtidos referente às características geométricas das camadas soldadas.

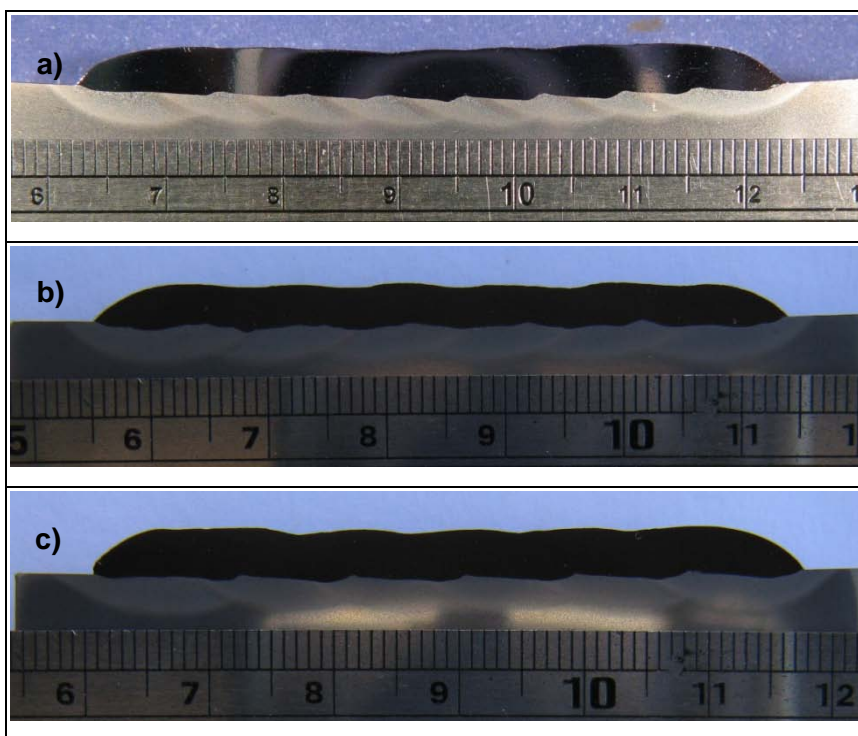


Figura 87. Seção transversal das camadas soldadas com as condições: (a) R1; (b) R2; (c) R3.

Capítulo VII

7. CONSIDERAÇÕES DOS PRINCIPAIS RESULTADOS

- O posicionamento correto da alimentação do arame tem grande influência na estabilidade do processo, podendo variar de uma condição com excelente acabamento superficial para uma condição bastante instável com alto índice de respingos e até interrupções no cordão de solda.
- Para se conseguir menores diluições a alimentação de arame deve ser realizada na frente do arco de soldagem.
- O uso do tecimento reduz de maneira considerável a diluição;
- O ajuste da energia pela corrente de soldagem (Tipo I) para uso de baixa energia implica em menores níveis de diluição, já para uso de alta energia este ajuste deve ser realizado pela velocidade de soldagem (Tipo V), para menores razões de R/L este efeito se inverte, ou seja, para baixa energia o melhor ajuste será do Tipo V e para alta energia o melhor ajuste se dá pelo Tipo I. Para níveis intermediários de energia os dois tipos são adequados.
- A distância da ponta do eletrodo a peça (DPEP) influencia diretamente nos níveis de diluição e razão R/L, onde para menores energias devem-se utilizar menores DPEPs, para maiores energias deve-se utilizar maiores DPEPs.
- O correto ajuste da distância da ponta do arame a peça (DPAP) afeta significativamente o nível de diluição.
- Para soldagem com baixa energia menores diluições serão encontradas com baixas DPAP, para alta energia devem-se usar maiores DPAP.
- O uso da corrente contínua pulsada para soldagem de revestimento (com alimentação de arame frio) não é indicada com uso dos parâmetros estudados neste trabalho, devido apresentar falhas nos cordões com péssimo acabamento.
- A mistura de argônio + óxido nítrico (NO) foi a que apresentou, de uma maneira geral, a melhor condição para soldagem de revestimentos, pois mostrou menores níveis de diluição e melhor eficiência de deposição juntamente com o argônio puro e menores níveis da razão R/L juntamente com a mistura de argônio + hélio.
- O ajuste da energia pela corrente de soldagem apresenta melhor eficiência de soldagem para baixa energia, já para alta energia, o melhor ajuste se dá pela velocidade de soldagem.
- Para baixos níveis de diluição, o uso do tecimento reduz de maneira significativa os tempos e custos associados a realização dos revestimentos.

- A soldagem de revestimento com ótima qualidade e baixos níveis de diluição é possível através do processo TIG com alimentação automática de arame frio.

Capítulo VIII

8. CONCLUSÕES

- A aplicação do processo TIG com alimentação de arame frio para soldagem de revestimentos é viável e apresenta bons resultados para os parâmetros estudados quanto às características geométricas.
- A aplicação do processo TIG com alimentação de arame frio apresentou revestimentos com níveis de diluição dentro do limite de 10 % especificado neste trabalho, além de bons resultados referentes à razão entre reforço e largura e ótimo acabamento superficial.
- Para uma mesma energia de soldagem e aporte térmico semelhantes, podem haver níveis distintos de diluição e ZAC.

Capítulo IX

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Emprego da soldagem TIG com alimentação de arame quente.
- Avaliar a resistência ao desgaste e a resistência a corrosão dos revestimentos.
- Realizar análise de custos envolvendo os revestimentos para as ligas UNS N06625, UNS N06686 e UNS N10276.
- Avaliar o efeito da adição de gás ativo sobre a resistência ao desgaste e a corrosão dos revestimentos com ligas de níquel.
- Realizar estudo aprofundado envolvendo a caracterização metalúrgica através de microscopia óptica e eletrônica (MEV e MET) com auxílio de EBSD e EDS.

Capítulo X

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, D. C., BRILL U. High-temperature-strength Nickel Alloy. *Advanced Materials & Process.* pp. 31-34. v158. no 4. 2000 a.

AGARWAL, D. C., KLOEWER J. Nickel Base Alloys: Corrosion Challenges In The New Millennium. *Corrosion 2000.* NACE International. Paper 01325. 2000 b.

ASM HANDBOOK – “Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special – Purpose Materials”, Vol. 2, 2th Edition, ASM Metals Park, Ohio, 1990.

ASM HANDBOOK – Casting, “Nickel and Nickel Alloys”, Vol. 15, 10th Edition, ASM Metals Park, Ohio, p. 815-823, 1993b.

ASM HANDBOOK – Welding, Brazing and Soldering, “Selection of Nickel, Nickel Cooper, Nickel-Chromium, and Nickel-Chromium-Iron Alloys”, Vol. 6, 10th Edition, ASM Metals Park, Ohio, p. 586-592, 1993c.

AWS WELDING HANDBOOK. *Materials and Applications.* 8ed. USA: American Welding Society (AWS). 1991. V2.

AUSTRAL WRIGHT METAL, *At the Cutting Edge.* Alloy C-276. 2002.

AWS WELDING HANDBOOK. *Materials and Applications.* 8ed. USA: American Welding Society (AWS). 1996. v3.

BANOVIC, S. W., DUPONT, J.N. MARDER, A. R., *Dilution Control in Gas-Tungsten-Arc Welds Involving Superaustenitic Stainless Steels and Nickel-Based Alloys*”. *Metallurgical and Material Transaction A.* pp 1171-1176. 2001.

BRACARENSE, A. Q., “Processo de Soldagem TIG – GTAW”, 2000.

BROOKS, C.R., “Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys”, ASM, Metals Park, Ohio, USA, 1982, p. 139 – 227.

CIESLAK, M.J. KNOROVSKY, G.A. HEADLEY, T.J., ROMIG JR., A.D., *Metall. Trans.* 17A (1986) 2107–2116.

DELGADO, L. C., “Estudo e Desenvolvimento do Processo TIG com Alimentação Automática de Arame”, 2000. *Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis.*

DYE, D., HUNZIKER, O., REED, R. C. Numerical Analysis Of The Weldability Of Superalloys. *Acta Materialia* 49. pp. 683–697. 2001.

DUPONT, J.N. MARDER, A. R., Dilution in Single Pass Arc Welds”. *Metallurgical and Material Transaction A*. pp 481-489. 1996.

EBERT, H. W. Nickel Alloy Filler Metal Review. *Welding Journal* 83. pp. 60-61. 2004.

EISELSTEIN, H.L., Tillack D.J. Ed. *Loria Superalloy 718, 625, and Various Derivates*, TMS Warrendale PA pag 1,1991.

GERKEN J. M., “Gas Tungsten Arc Welding”, The Lincoln Electric Company, 1995, p.1-21.

GOMES, E. B., “Análise do Comportamento da Soldagem por Curto-Circuito aplicado ao Processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi”. 2006. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá.

HENDERSON, M.B., ARRELL, D., HEOBEL, M. R., MARCHANT G. Nickel-Based Superalloy Welding Practices for Industrial Gas Turbine Applications. Disponível em <<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2002/papers/APNickelWeldv2.pdf>> acesso em set. 2006.

ISO 10423, (2003) “Petroleum and natural gas industries – Drilling and production equipment – Wellhead and Christmas tree equipment”

KEY J. F., “Anode/Cathode Geometry and Shielding Gas Interrelationships in GTAW”, U.S.A., *Welding Journal*, Dez. 1980, p. 364-370.

LAMBERT J. A. And GILSTON P. F., “Hot-Wire GTAW for Nuclear Repairs”, *Welding Journal*, Set. 1990, p. 45-52

LUCAS W., “TIG and Plasma Welding”, 1ed, Cambridge – England, Abington Publishing, 1990, p. 3-25.

MAGALHÃES, S. G., “Avaliação do Revestimento a Base de Liga de Níquel em Aço Estrutural Empregando o Metal de Adição ERNiCrMo-3 Através da Soldagem MIG/MAG”. 2008. Dissertação de Mestrado, UFC, Fortaleza.

MIRANDA, H.C., “Influencia da Indutância na Soldagem MIG/MAG na Posição Sobre-Cabeça”. 1999. Dissertação de Mestrado; UFU; Uberlândia.

MODENESI, P. J., “Introdução a Metalurgia da Soldagem”, 2005.

MODENESI, P. J., Introdução aos Processos de Soldagem, 2006.

MOTA, C. A. M., Níquel e Manganês como Controladores da Tenacidade na Soldagem com Arames Tubulares Autoprotégidos, 1998

NELSON, T. W., LIPPOLD, J. C., MILLS, M. J. Nature and Evolution of the Fusion Boundary in Ferritic Austenitic Dissimilar Metal Welds - Part 2: On-Cooling Transformations. Welding Journal Supplement. AWS. pp. 267-277. 2000.

PHADKE, M. S., 1989, "Quality Engineering Using Robust Design", Printice Hall, USA.

PLANT, W. H. D. The Cost-Effective Use Of Nickel Alloys And Stainless Steels For Chimneys (Stacks) In Air Pollution Control Systems. Corrosion 2000. NACE International. Paper 00577. 2000.

RICHARDSON M., "Semiautomatic Cold Wire Feeder Systems Increase GTA Productivity", Welding Journal, Jan. 1995, p. 51-54.

ROSS, P. J., "Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade". 1991.

Makros Books do Brasil Editora Ltda, 333p.

SAVAGE W. F., STRUNCK S. S., ISHIKAWA Y., "The Effect of Electrode Geometry in Gas Tungsten Arc Welding", U.S.A., Welding Journal, Nov. 1965, p. 1-8.

SIMS, C.T.; HAGEL, W.C.; "The Superalloys", John Wiley & Sons, New York, 1972, p. 1-565.

SMITH.W.F, "Nickel and Cobalt Alloys " , Structure and Properties of Engineering Alloy, Ed Mc Graw Hill 2ed, Series Materials Science and engineering Series, pp487-536, 1993.

SPECIAL METALS. Disponível em: < www.specialmetalswelding.com>

SUN Z., KUO M. and PAN D., "Twin-Wire Gas Tungsten Arc Cladding Offers Increased Deposition Rates", Welding Journal, Out. 1999, p. 61-64.

TANCRET F., BHADESHIA, H. K. D. H., MACKAY D. J. C. Design Of A Creep Resistant Nickel Base Superalloy For Power Plant Applications Part 1 – Mechanical Properties Modeling. Materials Science and Technology. v19. pp. 283-290. 2003.

VIEIRA, S.R.B., "Capítulo 4 – O Método Taguchi". 1996. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis.

ZEEMANN, A., Diluição. Infosolda. 2003. Disponível em:
<<http://www.infosolda.com.br/artigos/metsol06.pdf>>

ZIEDAS, S. E TATINI, I., Coleção Tecnologia de Soldagem, SENAI, São Paulo 1997.