

AVALIAÇÃO DE CICLOS TÉRMICOS EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇOS ARBL

Theophilo Moura Maciel

Cássia Maria Farias Lopes

Alex Aires de Souza

Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 58109-970, Campina Grande, PB, E-mail: theo@dem.ufpb.br

Resumo

Neste trabalho foram determinadas, por método direto, as temperaturas máximas em diferentes regiões da zona termicamente afetada de juntas soldadas de aços de alta resistência e baixa liga, variando-se os parâmetros e processos de soldagem, comparando-se em seguida os valores desta variável do ciclo térmico obtidos experimentalmente com aqueles obtidos através da expressão teórica de fluxo de calor utilizada para este fim, considerando-se o valor do calor específico do metal de base a diferentes temperaturas. Para tanto utilizou-se um sistema de aquisição de dados com termopares localizados em diferentes locais da ZTA de juntas soldadas por processo ao Arco Elétrico com Eletrodo Revestido e ao Arco Elétrico com Arame Tubular, sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento de 100 °C, utilizando-se diferentes energias de soldagem. Os resultados obtidos apresentaram diferenças significativas entre os valores teóricos e experimentais.

Palavras chaves: ciclos térmicos; juntas soldadas; temperatura máxima; zona termicamente afetada

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais fatores que afetam as propriedades mecânicas de uma junta soldada é a sua microestrutura, que por sua vez, depende da composição química dos materiais de base e da taxa de resfriamento. Portanto, o controle do ciclo térmico torna-se de fundamental importância para obtenção de uma junta soldada de qualidade (Demchenko et al, 1986) (Wang, G.R et al, 1989)

O ciclo térmico pode ser descrito ou definido através das seguintes variáveis: taxa de aquecimento, temperatura máxima atingida, tempo de permanência acima de 1000 °C e do tempo de resfriamento em determinada faixa de temperatura. Dentre estas, a temperatura máxima e o

tempo de resfriamento são as mais importante, pois são as que definem a microestrutura resultante na junta soldada (Barlow & Percival,1983) (Alcântara, 1983)

Os ciclos térmicos em juntas soldadas podem ser obtidos por métodos experimentais os quais podem ser diretos ou simulado. O método direto consiste em coletar as curvas temperaturas *versus* tempo com um sistema de aquisição de dados que utiliza termopares para captar as referidas curvas tanto no metal de solda como na Zona Termicamente Afetada (ZTA) da junta sob soldagem (Phillip, 1983) (Granjon, 1970) (Granjon, 1969). Este método, também denominado “In Situ”, por representar as condições reais de soldagem, proporciona diagnósticos mais eficientes com relação à qualidade da junta soldada

Além dos métodos experimentais os ciclos térmicos em juntas soldadas podem ser estimados através de expressões matemáticas baseadas em equações de fluxo de calor, conhecidas como equações de Rosenthal (Rosenthal, 1941) (Rosenthal, 1946). Os principais parâmetros de soldagem utilizados nestas expressões para cálculo das variáveis do ciclo térmico são a energia de soldagem, a temperatura inicial ou temperatura de pré-aquecimento da chapa e as propriedades físicas dos materiais envolvidos .

Entretanto, devido a algumas considerações utilizadas na dedução destas expressões, tais como invariabilidade das propriedades térmicas dos metais de base com a temperatura, além da não consideração dos efeitos dos calores latentes das transformações microestruturais dos materiais, os valores obtidos podem se distanciar significativamente dos valores reais

Uma das expressões muito utilizada para estimar o valor da temperatura máxima a uma determinada distância da linha de fusão de solda é apresentada à seguir (Campos, Marques e Martins,1991):

$$\frac{1}{T_{m\acute{a}x} - T_0} = \frac{4,13 ce \gamma \rho}{H} - \frac{1}{T_f - T_0} \quad (1)$$

Sendo $T_{m\acute{a}x}$ a temperatura máxima em °C atingida por um ponto no metal de base situado a uma distância γ (em mm) da poça de fusão, T_f a temperatura de fusão do metal ou liga que está sendo soldado, enquanto c (em $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$), e (em m), ρ (em kg/mm^3) e T_0 (°C)), representam, respectivamente, o calor específico, a espessura, a densidade e a temperatura de pré-aquecimento da chapa que está sendo soldada, e H (em kJ/mm) a energia de soldagem utilizada.

Neste trabalho foram obtidos por método direto as temperaturas máximas em diferentes pontos da ZTA de juntas soldadas de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) variando-se a energia de soldagem e a temperatura de pré-aquecimento com diferentes processos de soldagem. E em seguida comparados os valores destas variáveis com aqueles obtidos através da expressão I utilizada para avaliar as temperatura máximas a diferentes distâncias da poça de fusão de solda.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para obtenção das curvas de temperatura *versus* tempo, utilizou-se um sistema de aquisição de dados cujo esboço é mostrado na figura 1.

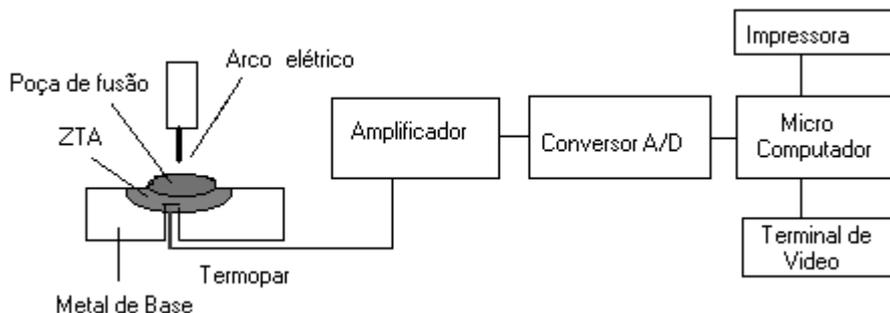


Figura 1. Esquema do sistema utilizado para obtenção dos ciclos térmicos.

Neste sistema uma placa composta de um amplificador e de um conversor Analógico/Digital recebe a milivoltagem gerada pelos termopares durante processo de soldagem. Em seguida, o sinal que representa a milivoltagem, é amplificado até um patamar máximo de 5 volts e decodificado em sinal digital de 12 bits, para que possa ser inteligível pelo microcomputador e pelo software de aquisição de dados, aonde as curvas temperatura *versus* tempo são processadas e armazenadas.

O termopar utilizado foi do tipo Cromel-Alumel com 0,5 mm de diâmetro

Para a calibração do sistema, utilizou-se um termopar previamente calibrado o qual foi conectado ao sistema de aquisição de dados, verificando-se em seguida a leitura do termopar padrão e a do sistema, apresentando o sistema uma diferença em torno de 10 °C superior ao termopar padrão.

Os processos de soldagem utilizados foram do Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SAER) e ao arco elétrico com Arame Tubular (SAT). Os metais de base utilizados foram chapas de aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), SAR100T e SAR 80T com 11 mm de espessura. Como consumíveis, foram utilizados os eletrodos AWS E8018 para o processo SAER e o arame AWS E 81 T1 para o processo SAT.

Para a obtenção dos ciclos em diferentes pontos da ZTA, foram usinados furos no metal de base a distâncias de 1 a 2,5 mm do chanfro da junta a se soldada, da forma ilustrada na figura 2. Apesar dos furos para a inserção dos termopares terem sido executados a distâncias ilustradas na figura, as que foram consideradas foram aquelas medidas após o corte das amostras nos locais dos furos após as soldagens, os quais ficaram a 1, 1,2, 1,8 e 2,3 mm da linha de fusão de solda.

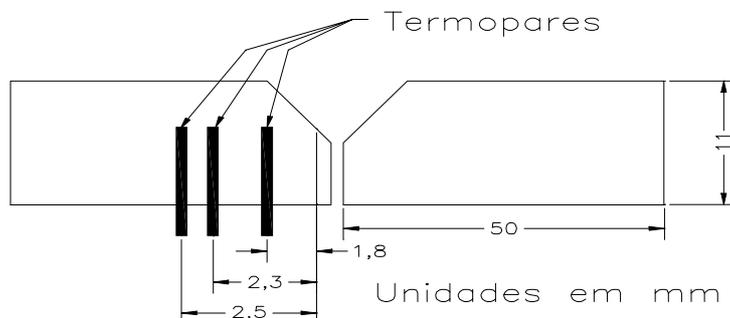


Figura 2 – Posição dos furos para a colocação dos termopares

Para avaliar o efeito da não consideração da variabilidade do calor específico com a temperatura na expressão utilizada para o cálculo da temperatura máxima, foram obtidos os valores desta variável do ciclo térmico utilizando-se valores daquela propriedade física a temperaturas de 30 °C, 500 °C, 650 °C e 800 °C, segundo a expressão abaixo referenciada por Blodgett (1984). A qual segundo o referido autor foi retirada do “Handbook of Thermophysical Properties of Solid Materials”, Vol.2

$$c = (0,094487 + 2,7894 \cdot 10^{-4} \cdot T - 1,6885 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 4,7829 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 1,478 \cdot 10^{-11} \cdot T^4 - 1,0946 \cdot 10^{-14} \cdot T^5) \cdot 4,186 \cdot 10^3 \quad (2)$$

Os valores das temperaturas considerados foram utilizados por ser nesta faixa de temperatura onde ocorrem as maiores variação desta propriedade com a temperatura, conforme pode ser observado através da figura 3 que apresenta a variação do calor específico com a temperatura segundo a expressão 2

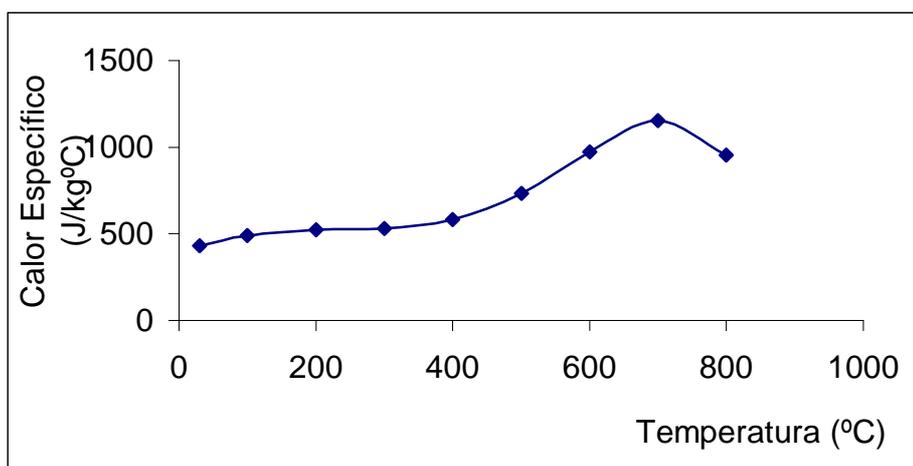


Figura 3 – Variação do calor específico dos aços com a temperatura segundo a expressão 2

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 4 apresenta a variação da temperatura máxima (T_{max}) com a energia de soldagem (H) para os valores teóricos e experimentais uma distância de 1,8 mm da linha de fusão de solda utilizando-se o processo SAER sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento de 100 °C, respectivamente. Percebe-se pela figura que houve uma significativa variação da temperatura máxima com o aumento da energia de soldagem,. Para esta condição, um aumento de 0,29 kJ/mm no valor de H proporcionou um aumento de 301 °C no valor de T_{max} com relação aos valores obtidos experimentalmente. Com relação aos valores obtidos teoricamente os aumentos em T_{max} utilizando-se os valores de c a 30, 500 650 e 800 °C foram respectivamente de 250, 320, 355 e 346 °C apresentando assim uma diferença em torno de 50 °C com relação ao valor obtido experimentalmente, à exceção dos valores teóricos obtidos com c a 500 °C cuja diferença foi de 20 °C. Com relação aos valores absolutos de T_{max} os valores teóricos mais próximos dos experimentais foram aqueles obtidos com c a 650 °C e a 800 °C, principalmente para baixos valores de H (0,71 e 0,76 kJ/mm), em que esta diferença ficou em torno de 50 °C (valor médio

para as duas energias) e utilizando-se c a $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ e em torno de $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ para c a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para H igual a 1 kJ/mm estas diferenças foram respectivamente de $184\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $223\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os valores mais distantes dos valores experimentais foram aqueles calculados com c à temperatura ambiente cuja diferença média para as três energias utilizadas foi de $371\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para soldagens executadas com pré-aquecimento de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figura 5) não ocorreu variação nos valores experimentais de T_{max} devido à pequena alteração no valor de H ($0,03\text{ kJ/mm}$). Embora nos valores calculados tenha-se verificado um aumento em torno de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Entretanto, verificou-se mais uma vez que os valores teóricos mais próximos dos experimentais foram aqueles calculados utilizando-se c a 650 e $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, cujas diferenças ficaram respectivamente em torno de $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ (valores médios para as duas energias). Estes resultados condizem com aqueles obtidos por Suzuki (1998) que obteve um bom acordo entre os valores teóricos e experimentais de ciclos térmicos em juntas soldadas de aços ARBL utilizando as propriedades físicas a uma temperatura de $800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A figura 5 apresenta os valores de T_{max} em função da variação de H utilizando-se o processo SAT sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a uma distância de $1,8\text{ mm}$ da linha de fusão. Verifica-se que para ambas as condições os valores experimentais de T_{max} não sofreram alterações significativas mesmo para um aumento de $0,1\text{ kJ/mm}$ no valor de H (soldagem com pré-aquecimento) cujo efeito em T_{max} foi de apenas $16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Entretanto, verificou-se uma maior sensibilidade dos valores teóricos de T_{max} com relação ao aumento de H ao se utilizar valores de c para temperaturas mais altas, verificando-se um aumento de até $72\text{ }^{\circ}\text{C}$ para T_{max} obtido com c a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Com relação aos valores absolutos de T_{max} verifica-se da mesma forma que no processo SAER que os valores teóricos que mais se aproximaram dos experimentais foram aqueles obtidos com c a 800 e $650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Entretanto, ao se utilizar este processo de soldagem os valores ficaram mais próximos, principalmente aqueles com c a $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, cuja diferença ficou em torno de $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ para soldagens com e sem pré-aquecimento.

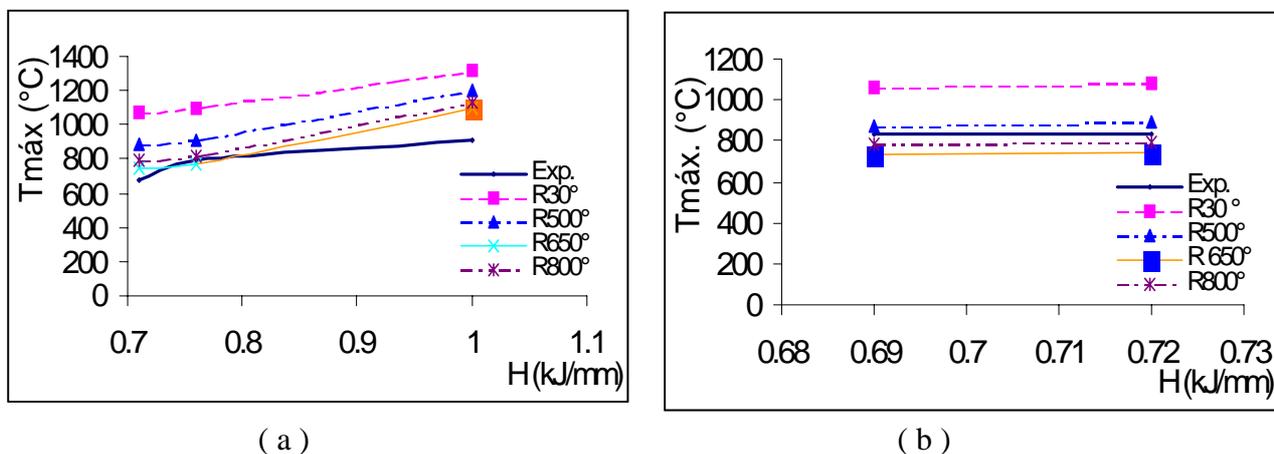
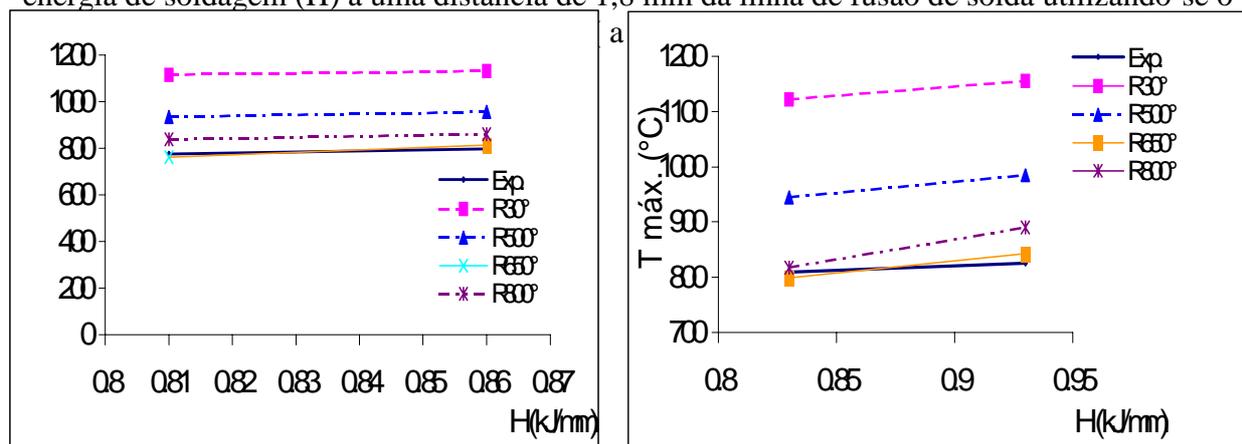


Figura 4 –Valores teóricos e experimentais da temperatura máxima (T_{max}) em função da energia de soldagem (H) a uma distância de $1,8\text{ mm}$ da linha de fusão de solda utilizando-se o

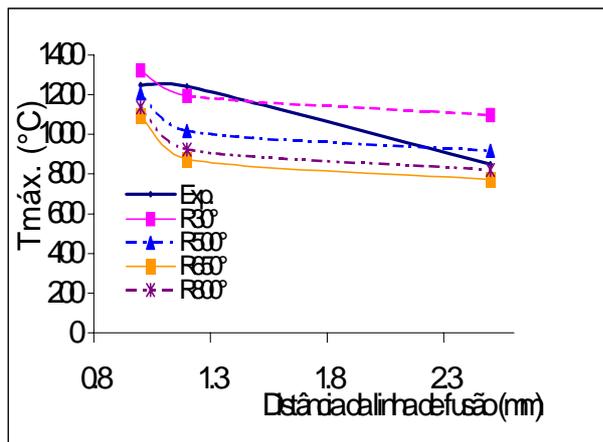


(a)

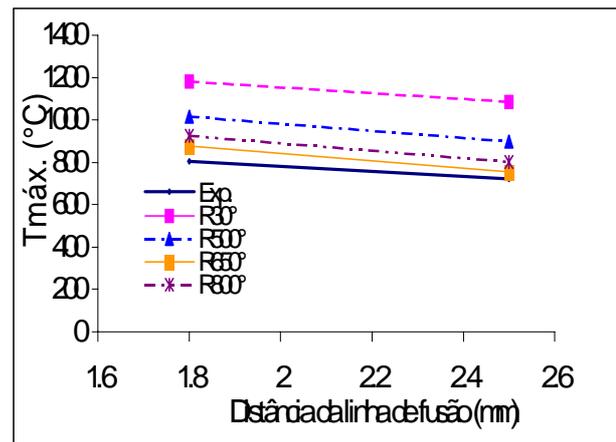
(b)

Figura 5 - Valores teóricos e experimentais da temperatura máxima (T_{max}) em função da energia de soldagem (H) a uma distância de 1,8 mm da linha de fusão de solda utilizando-se o processo SAT sem pré-aquecimento (a) e com pré-aquecimento de 100 °C

A figura 6 apresenta os valores de T_{max} a diferentes distâncias da linha de fusão de solda para soldagens sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento de 100 °C, utilizando-se o processo SAER com uma energia de soldagem de 1,0.kJ/mm. Verificou-se um decréscimo de 401 °C no valor de T_{max} obtido experimentalmente ao se distanciar de 1 para 2,5 mm da linha de fusão de solda na soldagem sem pré-aquecimento e um decréscimo de 83 °C ao se distanciar de 1,8 para 2,5 mm na soldagem com pré-aquecimento de 100 °C. Com relação aos valores calculados de T_{max} estes decréscimos variaram de 225 a 324 °C para o primeiro caso e de 97 a 123 °C no segundo caso. Com relação aos valores absolutos de T_{max} os valores calculados mais próximos dos experimentais foram aqueles obtidos com c a 650 °C e a 800 °C, principalmente no primeiro caso onde na soldagem com pré-aquecimento a diferença média entre os valores experimentais e teóricos foi de 53 °C.



(a)



(b)

Figura 6 – Valores teóricos e experimentais de T_{max} a diferentes distâncias da linha de fusão de solda para soldagens executadas por processo SAER sem pré-aquecimento (a) e com pré-aquecimento de 100 °C (b).

A figura 7 apresenta os valores de T_{max} em função da distância à linha de fusão de solda para soldagens executadas por processo SAT sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento de 100 °C, utilizando-se uma energia de soldagem de 0,8 kJ/mm. Verificou-se um decréscimo de 116 °C nos valores experimentais de T_{max} ao se distanciar de 0,5 mm da linha de fusão. Com relação aos valores calculados estes decréscimos variaram de 88 a 94 °C, sendo este último, o mais próximo do valor experimental, calculado com c a 800 °C. Com relação aos valores absolutos de T_{max} os que mais se aproximaram dos valores experimentais, mais uma vez, foram aqueles calculados com c a 650 e 800 °C, principalmente estes últimos que apresentaram diferenças de 24 °C na distância de 1,8 mm e de apenas 2 °C na distância de 2,3mm da linha de fusão de solda com relação aos valores experimentais. Com relação às soldagens executadas com

pré-aquecimento os valores mais próximos dos experimentais também foram aqueles calculados com c a 650 e 800 °C. Entretanto, neste caso, para a distância mais próxima da linha de fusão (1,8 mm) valores mais próximos dos experimentais foram aqueles calculados com c a 650 °C, cuja diferença foi de apenas 4 °C. Esta compatibilidade entre os valores teóricos e experimentais de T_{\max} já foi identificada por outros autores (Myhr e Grong, 1990) (Londoño e Brandi, 1998)

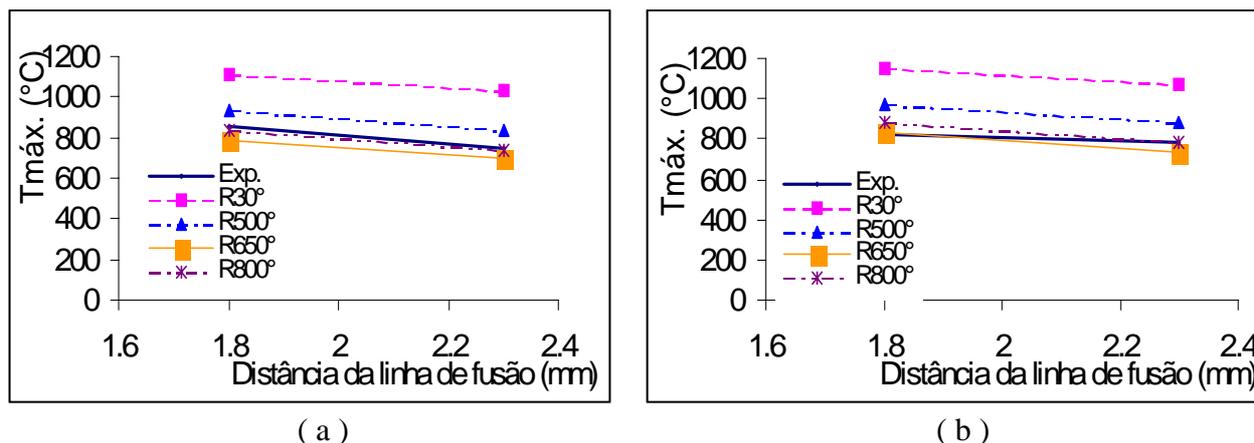


Figura 7 - – Valores teóricos e experimentais de T_{\max} a diferentes distâncias da linha de fusão de solda para soldagens executadas por processo SAT sem pré-aquecimento (a) e com pré-aquecimento de 100 °C (b).

4. CONCLUSÕES

-As diferenças significativas de até 333 °C entre os valores de T_{\max} calculados com valores do calor específico a diferentes temperaturas demonstra a necessidade da consideração da variação desta propriedade física com a temperatura na estimativa da temperatura máxima atingida em diferentes pontos da ZTA da junta soldada

-Os valores calculados de T_{\max} mais próximos dos valores experimentais em ambos os processos de soldagem com e sem pré-aqueciemnto foram aqueles calculados com c às temperaturas de 650 °C e 800 °C, indicando assim que a utilização desta propriedade física nesta faixa de temperatura é a mais adequada para a estimativa dos valores desta variável do ciclo térmico na junta soldada.

-A significativa variação de T_{\max} , em torno de 300 °C para os valores experimentais e em média de 320 °C para os valores calculados, para variações da energia de soldagem em torno de 0,3 kJ/mm no processo SAER, demonstra a importância do controle deste parâmetro na soldagem.

-A significativa variação de T_{\max} de 401 °C nos valores experimentais e em média de 280 °C nos calculados, ao se variar a distância de 1,5 mm da linha de fusão de solda, demonstra a significativa variação do ciclo térmico em função da distância à poça de fusão de solda

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à USIMINAS pela doação das chapas, à ESAB pela doação dos eletrodos e à CAPES a ao CNPq pelo suporte financeiro e à doação de Bolsas de Mestrado e de Iniciação Científica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcântara, N.G., 1983 “ Influência do Ciclo Térmico nas Trincas a Frio Causadas pelo Hidrogênio” Metalurgia – ABM, Vol.39(311), pp 545-550

Barlow, J.A and Percival D.F., 1983, “An Initial Study of Thermal Cycle Prediction in Submerged-Arc Welds” The Welding Institute Research Report 218 – 20 p.

Blodgett, O.W., 1984, “Calculating Cooling Rates by Computer Programming” Welding Journal pp 19-34

Campos, W.R.C., Marques, P.V. e Martins, G.P. 1991, “ Ciclos Térmicos de Soldagem” Anais XVII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Recife, pp 497-513

Demchenko, V. et al, 1986 “Effects of the Thermal Cycle on the Structure and Toughness of Metal in the Heat Affected Zone in Quenched and Tempered 09G2S Steel” Automatic Welding Vol 11 pp 12-14

Granjon, H., 1969, “The ‘Implants’ Method for Studying the Weldability of High Strength Steels” Metal Construction and British Welding Journal Vol 1(11) pp 509-515

Granjon, H., Debiez, S. et Gaillard R., 1970, “Etude de la Soudabilité des Aciers par la Méthode des Implants: Résultats Actuels et Perspectives Nouvelles” Soudage et Techniques Connexes (3/4) pp 103-124.

Londoño, A.J. R e Brandi, S.D., 1998 “Modificação da Solução de Rosenthal para a Equação de Fluxo de Calor para Simulação de Soldas Multipasse” Anais do XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Fortaleza, pp 1-13

Myhr, O. R. and Grong, O., 1990, “Dimensionless Maps for Heat Flow Analyses in Fusion Welding” Acta Metallurgical Materials Vol 38 (3) pp 449-460.

Phillip, R.H., 1983 “‘In Situ’ Determination of Transformation Temperatures in the Weld Heat-Affected Zone” Welding Journal (January) pp 12- 18

Rosenthal, D., 1941, “Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting” Welding Journal Vol 20 pp 220-234

Rosenthal, D., 1946, “The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments” Welding Journal Vol.68 pp 849-866

Suzuki R.N. et al, 1998, “Ciclos Térmicos na Soldagem Multipasse de um Aço Alta Resistência e Baixa Liga” Anais do XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Fortaleza, pp 1-11.

Wang, G.R., et al, 1989 “Weld Thermal Cycles and Precipitation Effects in Ti-V-Containing HSLA Steels” Metallurgical Transaction A Vol. 20A pp 2093-2100