

ANÁLISE DOS CICLOS TÉRMICOS OBTIDOS NA ZONA AFETADA TERMICAMENTE DA JUNTA SOLDADA DE UM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA

José Francisco dos REIS SOBRINHO (1); Nelson Guedes de ALCÂNTARA (2)

(1) Centro Federal de Educação Tecnológica do Piauí – CEFET-PI, Rua Álvaro Mendes, 1597 –

Centro – Teresina – PI, 8632155208, fax: 32155206, e-mail: reissobrinho@gmail.com

(2) Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, e-mail: nelson@power.ufscar.br

RESUMO

O controle do ciclo térmico tem importância fundamental com relação às propriedades da junta soldada e particularmente na zona afetada termicamente – ZAT. Altas taxas de resfriamento proporcionam formação de microestruturas de baixa temperatura de transformação e de alta dureza que levam a formação das indesejáveis trincas induzidas pelo hidrogênio. Neste trabalho, utilizou-se uma metodologia para soldabilidade de aço de alta resistência, ensaio Tekken, cujo corpo de prova foi soldado pelo processo a arco elétrico com proteção gasosa – SAMG(MAG) – semi-automatizado, onde, através do estudo dos ciclos térmicos, determinou-se parâmetros que proporcionassem melhores propriedades estruturais e mecânicas para a ZAT e, com isso, eliminam-se a ocorrência de trincas induzidas pelo hidrogênio nesta região. Variando-se a energia de soldagem, a espessura da chapa e a temperatura de pré-aquecimento foram medidos tempos e taxas de resfriamento ($\Delta t_{800-500}$ e $R_{800-500}$), temperatura de pico (T_p), tempo de permanência acima de 1000 oC (Δt_{1000}) e extensão da ZAT (h). Com a elevação da energia de soldagem e temperatura de pré-aquecimento, observou-se aumento nos valores de $\Delta t_{800-500}$ e redução nos valores de $R_{800-500}$. Conseqüentemente, a elevação do $\Delta t_{800-500}$ e a redução da $R_{800-500}$ provocaram variação microestrutural, de martensita a ferrita na junta soldada.

Palavras-chave: Ciclos Térmicos, Soldabilidade, Aços ARBL .

1. INTRODUÇÃO

Os aços de alta resistência foram desenvolvidos principalmente para obter uma melhor relação entre a resistência e peso através da elevação da tensão nominal, possibilitando-se, assim, uma redução da seção. A demanda por essa classe de aço provém da necessidade de reduzir o peso em equipamentos de transportes e estruturas(1). Estes aços são destinados a aplicações de alta responsabilidade tais como vasos de pressão, oleodutos, gasoduto, plataformas “offshore” etc. São possuidores de temperabilidade elevada; portanto, devem-se tomar os cuidados necessários, quando da sua soldagem, devido à fragilização na ZAT (zona afetada Termicamente) proporcionada pela presença de microconstituíntes frágeis, do tipo martensita(2).

Durante a soldagem dos aços de alta resistência, a ZAT sofre aquecimento acima da temperatura crítica de austenitização, alterando com isto as propriedades mecânicas e estruturais já existentes. Portanto, esta região deverá ser resfriada de modo que se evite a formação de microconstituíntes frágeis, minimizando-se, assim, as alterações das propriedades mecânicas originais. A transformação de fase ocorrida durante o resfriamento conduzirá a uma estrutura ferrítica com regiões de martensita, ou a uma bainita grosseira, caso a taxa de resfriamento seja lenta, o que afetará adversamente a resistência e tenacidade desta região(2).

A resistência mecânica dos aços de alta resistência é elevada devido a tratamentos térmicos de têmpera e revenido, que são facilitados pelos elementos de liga neles contidos, mas que dificultam, em contrapartida, sua soldagem(3). Dentre os possíveis processos utilizados na soldagem destes materiais, destacam-se os processos de soldagem a arco elétrico. Neste trabalho optou-se pelo processo de soldagem a arco metálico com atmosfera gasosa – SAMG (MIG/MAG), por apresentar pouca escória, poder ser automatizado ou semi-automatizado e soldar uma ampla faixa de materiais em várias espessuras. Durante a soldagem por quaisquer processos a arco elétrico, podem ocorrer defeitos como trinca a frio, que dependendo das características do processo, ocorrem com maior ou menor intensidade, podendo até ser evitada quando utilizada uma metodologia adequada.

Nos processos de soldagem ao arco elétrico, uma fonte pontual de calor de grande intensidade aquece e funde parte do MB e o metal de adição que, em seguida, se solidificam e constituem o MS(2,4). Durante esta operação, o estudo dos gradientes de temperatura e o conhecimento dos ciclos térmicos e da taxa de resfriamento permite prever e controlar os fenômenos metalúrgicos que afetam as propriedades finais da junta soldada, tais como crescimento de grão, transformações no estado sólido, microestrutura resultante no MS e ZAT, além de diferentes níveis de tensões residuais envolvidas no resfriamento da junta. A forma e a intensidade com que estes fenômenos metalúrgicos ocorrem dependem, principalmente, da composição química dos materiais envolvidos e, acima de tudo, do ciclo térmico a que se submete a junta soldada durante a soldagem. Portanto, é importante o conhecimento e o controle desse ciclo térmico para a obtenção de uma junta soldada de boa qualidade(4,5).

As variáveis do ciclo térmico podem ser determinadas teoricamente através de cálculos, utilizando-se expressões matemáticas baseadas em equações de fluxos de calor ou, experimentalmente, por medidas realizadas com termopares posicionados na junta soldada(6). Embora a avaliação teórica de ciclos térmicos na ZAT feita por alguns autores(6,7,8), tenha conduzido a resultados razoáveis, a determinação experimental leva a resultados mais realísticos e possibilita a identificação das temperaturas de transformação microestruturais no resfriamento. Isso permite, em conjunto com a análise microestrutural das amostras a diferentes taxas, a elaboração das curvas de transformação com resfriamento contínuo ou curvas CCT da junta soldada(9-11).

A determinação das curvas CCT pela técnica de análise térmica pode ser aplicada utilizando-se o método direto ou “in situ” dispensando assim, a necessidade de austenitização e resfriamento simulado de amostras. O estudo é feito no instante da soldagem com a implantação do termopar no MB próximo à linha de fusão da solda, com o objetivo de determinar curvas de resfriamento no MS ou na ZAT(9).

Os métodos diretos proporcionam estudos nas condições reais, possibilitando a análise dos ciclos térmicos durante a operação de soldagem, o que torna possível a obtenção de ciclos térmicos que refletem as condições reais a que foram submetida a junta soldada durante tal operação, caracterizadas por altas taxas de aquecimento, resfriamento gradual, além de restrições mecânicas, condições cuja reprodução pelos métodos simulados é relativamente difícil(9).

Este trabalho teve como propósito determinar os ciclos térmicos aplicando – se o método direto “in situ” sofrido pela ZAT da junta soldada do aço em estudo soldado pelo processo SAMG através de um

sistema de análise térmica, pelo qual foi possível determinar os tempos e taxas de resfriamento ($\Delta t_{800-500}$, $R_{800-500}$), temperatura de pico T_p , tempo de permanência acima de 1000°C (Δt_{1000}) e a extensão da ZAT, variando-se energia de soldagem, a espessura da chapa e a temperatura de pré-aquecimento, com a finalidade de obter a soldabilidade do citado aço.

2. CONTEÚDO

2.1. MATERIAIS E MÉTODOS

O processo utilizado foi o processo SAMG com energias de soldagem de $0,8\text{ kJ/cm}^2$ e $1,3\text{ kJ/cm}^2$. Como metal de base utilizou-se chapas de aço ASTM 514 com ligeiras variações na composição química e nas propriedades mecânicas, nas espessuras de 8,3 e 16mm e pré-aquecimento de 25°C e 100°C , composição química 0,153C; 1,105Mn; 0,023P; 0,010S; 0,251Si; 0,042Al; $\leq 0,005\text{Nb}$; $\leq 0,005\text{V}$; $\leq 0,005\text{Ti}$; 0,009Cu; 0,015Cr; $\leq 0,005\text{Mo}$; 0,0004B; 0,022Ni em peso percentual, Carbono Equivalente 0,34, arame de classificação AWS ER 70S-6 com diâmetro de 1,2 mm. Foram confeccionadas oito juntas soldadas tipo tekken com um cordão de solda (cordão de raiz) de boa penetração e sem provocar a fusão da abertura da raiz do corpo de prova, na qual foi feito um furo preestabelecido onde foi introduzido um termopar do tipo B Pt-Rh (6%)/Pt-Rh (30%), com 0,5 mm de diâmetro, protegido com tubo capilar cerâmico na ZAT, para determinação das curvas de resfriamento. A figura 1 apresenta o fluxograma do sistema de análise térmica utilizado na aquisição e processamento dos dados e a Figura 2 uma macrografia da junta soldada onde pode ser observado os detalhes acima citados.

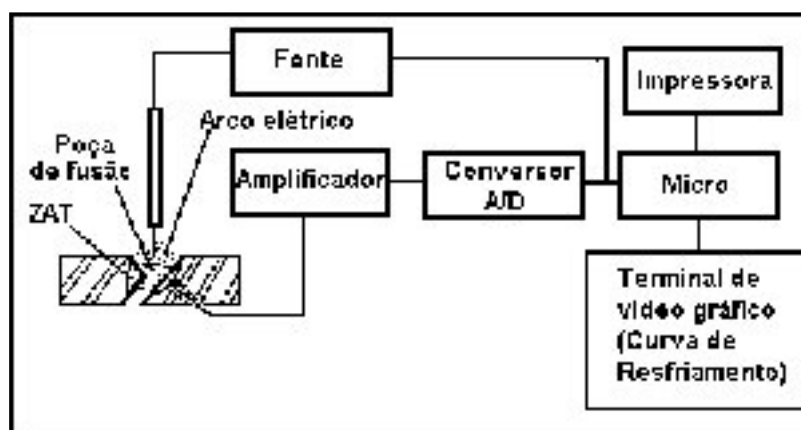


Figura 1 – Fluxograma do sistema de análise técnica.

Amostras foram retiradas para análise química via espectrometria do plasma num aparelho ICP OPTIMA 300, com exceção do C e S, que foram determinados através de um aparelho LECO CS 444LS. Os microconstituintes presentes foram observados via microscopia ótica, com aumentos de 500X vezes, e se apresentaram em todas as formas, ou seja, desde martensita a ferrita acicular de acordo com a variação dos parâmetros de soldagem acima citados. Foram realizadas também medidas de dureza vickers empregando – se carga de 5 kgf e um penetrador piramidal, seguindo orientações da norma ASTM E 92-82.

Os ciclos térmicos foram obtidos através do termopar calibrado juntamente com o sistema de aquisição de dados, inserido na ZATRGG, perpendicular à linha de fusão e conectado a um sistema computacional, constituído de placas para ampliação e/ou conversão analógico-digital dos sinais em mV, oriundo do termopar durante a execução da solda, para um microcomputador, no qual foram registrados, armazenados e convertidos para temperatura em função do tempo dados relativos às curvas de resfriamento. A figura 1 apresenta o fluxograma do sistema de análise térmica utilizado na aquisição e processamento dos dados da soldagem.

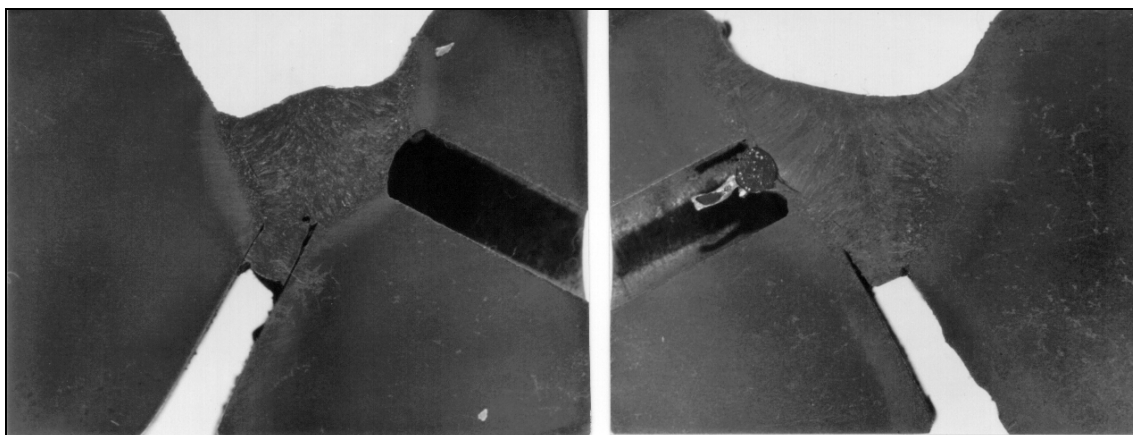


Figura 2 –Macrografia do perfil da junta soldada com furo para implante do termopar na ZAT.

3 . RESULTADOS E DISCUSSÕES

Medidas dos Ciclos Térmicos “In Situ”

As medidas de ciclos térmicos para cada condição estabelecida no procedimento experimental foram feitas na ZAT região de grão grosso (ZATRGG). A tabela.1, apresenta os resultados obtidos para a taxa de resfriamento e o tempo de resfriamento entre 800-500 °C ($R_{800-500}$; $\Delta t_{800-500}$), temperatura de pico (T_p), tempo de permanência acima de 1000 °C (Δt_{1000}) e extensão da ZAT (h). Os ciclos térmicos para cada condição estabelecida no procedimento supra citado estão apresentados nas figuras de 3 a 6, obtido nas condições com $H = 0,87$ kJ/mm (com e sem pré-aquecimento); e nas figuras 7 a 10 os ciclos térmicos obtidos com $H = 1,23$ kJ/mm (com e sem pré-aquecimento).

Através das análises macrográficas realizadas em cada amostra, pode-se verificar que os termopares foram posicionados corretamente na ZATRGG e próximo da linha de fusão, o que também pode ser observado na figura 2, que também apresenta a macrografia das amostras com o furo para inserção do termopar.

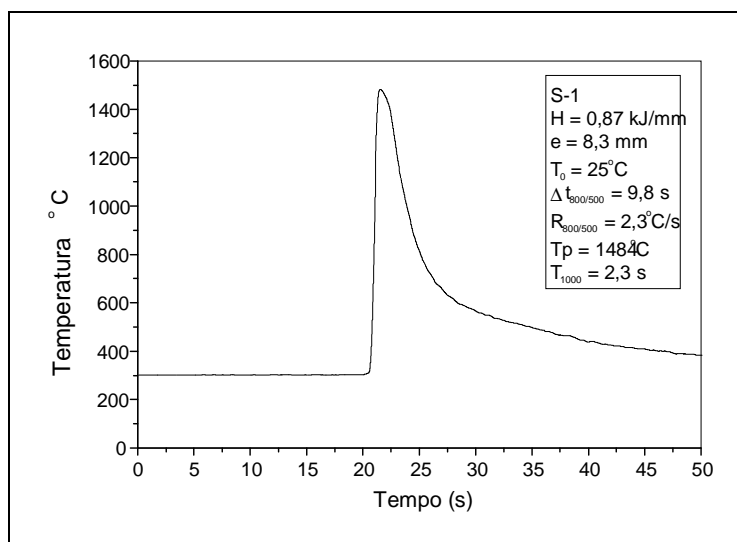


Figura 3 – Ciclo térmico medido na ZATRGG para ensaio realizado com $H = 0,87$ kJ/mm, $e = 8,3$ mm e $T_0 = 25$ °C.

Vários trabalhos avaliam a temperatura máxima na ZATRGG, pelo método “In Situ” em diferentes tipos de aços(9,12-15). Dos resultados obtidos neste trabalho, verificou-se que as temperaturas máximas variaram de 1186 a 1485 °C enquadrando-se na faixa de temperaturas correspondentes à ZATRGG comparado com os resultados de outros pesquisadores(9,12-15) Phillip(9) mediu em aço CMn, soldado pelo processo SAER, a temperatura de pico de 1300 °C, a 0,38mm da linha de fusão, com energia de soldagem de 1,4 kJ/mm. Coward e Apps(12), detectaram temperatura de pico de 1250 °C a 0,38mm da linha de fusão em aço C, soldado pelo processo SAS, com energia de soldagem de 2,4 kJ/mm, Andrade(13) obteve em aço C pelo processo SAS 1100 a 1120 °C, a 1,58mm e 0,5mm da linha de fusão, com energia de soldagem de 1,5 e 2 kJ/mm respectivamente, Araújo(14) obteve em aço aços estruturais pelo processo SAS 1022 a 1498 °C, com energia de soldagem de 8,3 a 3,5 kJ/mm, sendo que a ultima medida foi obtida na linha de fusão. Entretanto, observou-se diferenças entre os valores das temperaturas máximas, tabela 1, obtidas no presente trabalho em relação aos obtidos pelos pesquisadores citados.

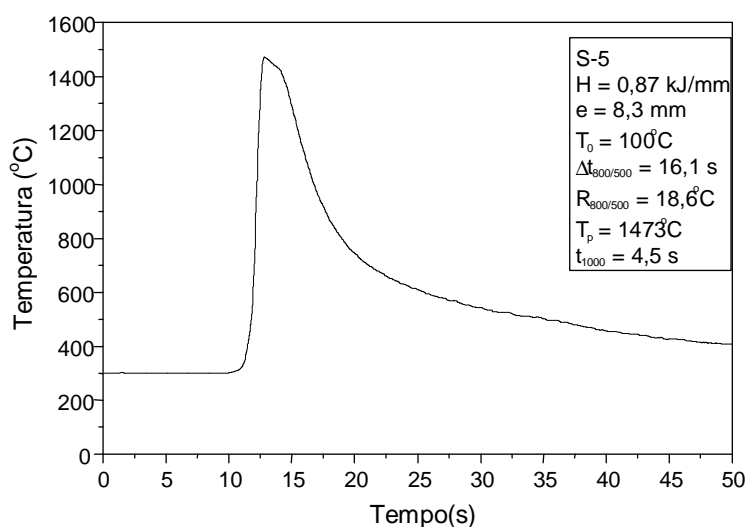


Figura 4 – Ciclo térmico medido na ZATRGG para ensaio realizado com $H = 0,87$ kJ/mm,
 $e = 8,3$ mm e $T_0 = 100$ °C.

Com temperaturas, em ambos os casos, obtidos a iguais distâncias da linha de fusão. Isto se deve aos diferentes processos de soldagem (SAMG, SAS, SAER, etc) utilizados, às diferentes energias de soldagem a que foram submetidos e as composições químicas dos aços estudados neste trabalho e nos trabalhos realizados pelos pesquisadores citados acima.

As macrografias das amostras, figura 1 e os ciclos térmicas obtidos durante à soldagem apresentam claras tendências para aumento da largura da ZAT, do tempo de resfriamento ($\Delta t_{800-500}$) e do tempo de retenção acima 1000 °C (Δt_{1000}), com o aumento da energia de soldagem e da temperatura de pré-aquecimento, como mostram as tabelas 1 e 2. Resultados semelhantes foram observados por vários pesquisadores, como exemplo, Thaulow e colaboradores(16), estudando a tenacidade da ZAT em aços microligados, observaram aumento no tempo de resfriamento ($\Delta t_{800-500}$) e na largura da ZAT, Coward e Apps(12), Andrade(13) e Araújo(14) também observaram aumento no tempo de resfriamento ($\Delta t_{800-500}$) com a elevação da energia de soldagem Loureiro e Fernandes(15), tanto observaram aumento no tempo de resfriamento ($\Delta t_{800-500}$) quanto no tempo de retenção acima de 1000 °C (Δt_{1000}), com o aumento da energia de soldagem e do pré-aquecimento. Gillard e colaboradores(17), também, obtiveram aumento no tempo de resfriamento, com aumentos na energia de soldagem e no pré-aquecimento.

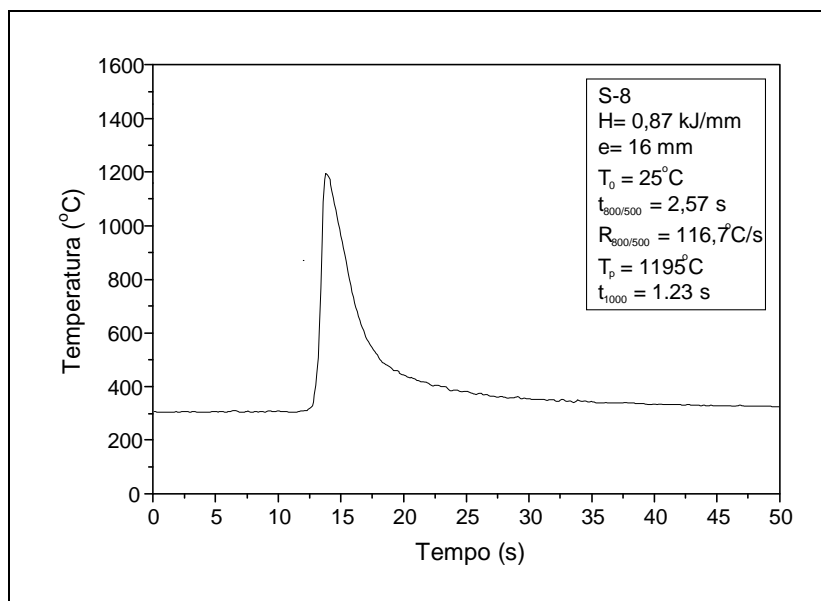


Figura 5 – Ciclo térmico medido na ZATRGG para ensaio realizado com $H = 0,87 \text{ kJ/mm}$, $e = 16\text{mm}$ e $T_0 = 25^\circ\text{C}$.

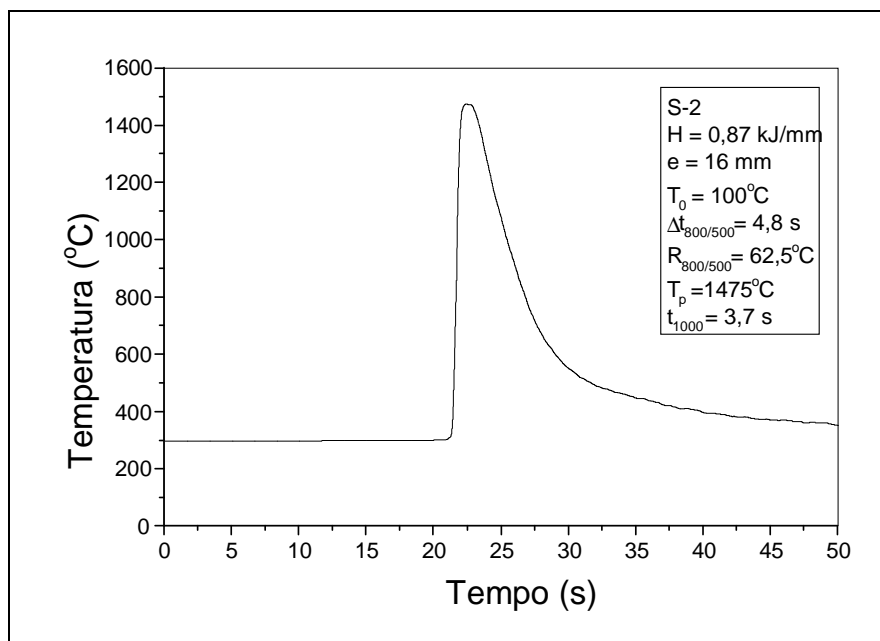


Figura 6 – Ciclo térmico medido na ZATRGG para ensaio realizado com $H = 0,87 \text{ kJ/mm}$, $e = 16\text{mm}$ e $T_0 = 100^\circ\text{C}$.

Leal(18), também observou aumento da largura da ZAT, do tempo de resfriamento e do tempo de retenção acima de 1000°C com o aumento da energia de soldagem e da temperatura de pré-aquecimento em aços microligados com o processo de soldagem a arco submerso.

Todos esses pesquisadores observaram pelo menos uma das tendências observadas no presente trabalho, e Leal(18) também observou a influência da temperatura de pré-aquecimento na largura da ZAT. A ocorrência dos fenômenos anteriormente citados reside no fato de que, quanto maior for a energia de soldagem, maior será a extensão do MB abrangida pelo calor e mais lento será o fluxo de calor através desta região, em virtude da redução no seu gradiente térmico, o que aumenta a largura da ZAT e o tempo de resfriamento. Se o MB se encontra pré-aquecido, o calor induzido neste, durante a operação de soldagem, fluirá lentamente

devido à redução causada pelo pré-aquecimento no gradiente térmico, aumentando assim o tempo de resfriamento ($\Delta t_{800-500}$) e a largura da ZAT, que crescem juntamente com o pré-aquecimento.

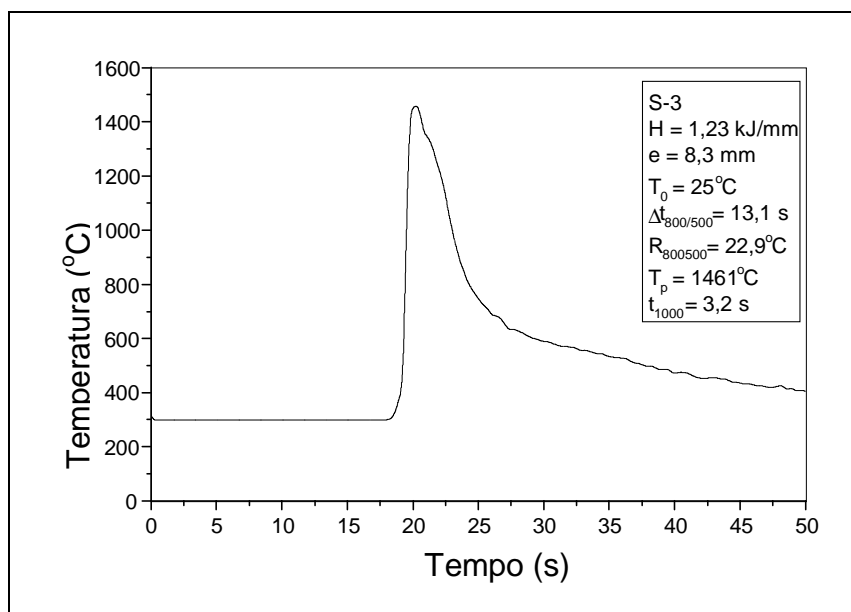


Figura 7 -- Ciclo térmico medido na ZATRGG para ensaio realizado com H = 1,23 kJ/mm, e = 8,3 mm e T₀ = 25 °C.

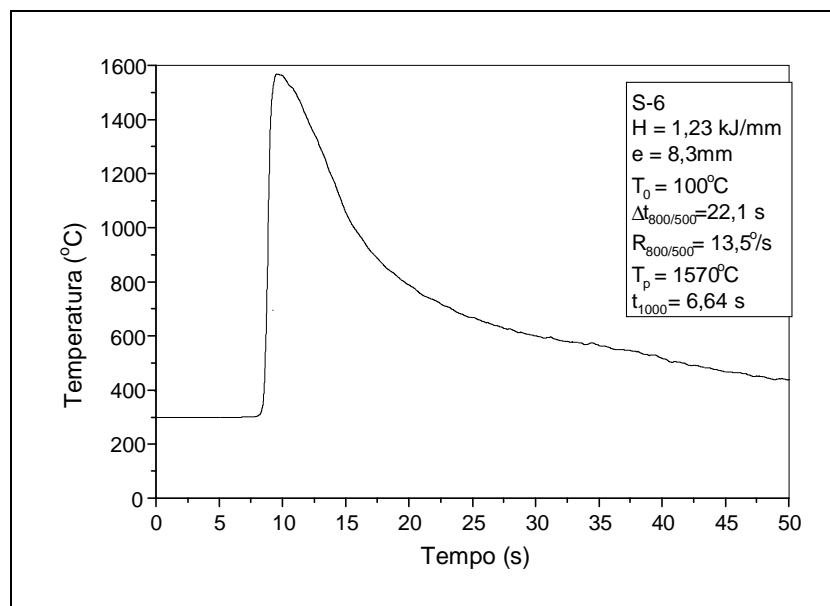


Figura 8 - Ciclo térmico medido na ZATRGG para ensaio realizado com H = 1,23 kJ/mm, e = 8,3mm e T₀ = 1000 °C.

O tempo de retenção acima de 1000 °C (Δt_{1000}) é o tempo total gasto para passar da temperatura de 1000 °C à temperatura de pico, no aquecimento, e desta à temperatura de 1000 °C no resfriamento. Quanto maior for a energia de soldagem, ou a temperatura de pré-aquecimento para uma dada energia de soldagem, menor será o gradiente térmico na região soldada e, por conseguinte, mais lento será o fluxo de calor, tendo como consequência um maior tempo de retenção acima de 1000 °C, o que se traduz em uma estrutura com maior tamanho de grão.

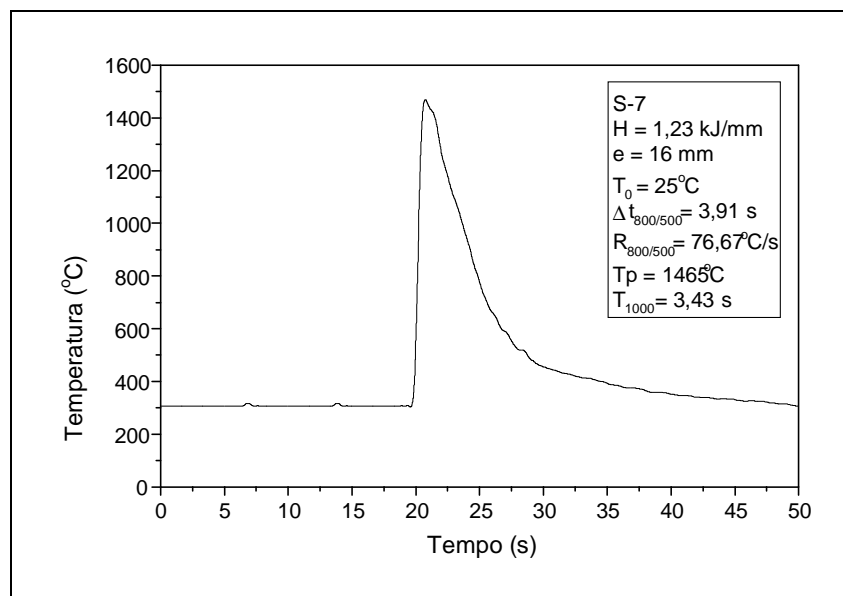


Figura 9 - Ciclo térmico medido na ZATRGG para ensaio realizado com H = 1,23 kJ/mm, e = 16mm e T₀ = 25 °C.

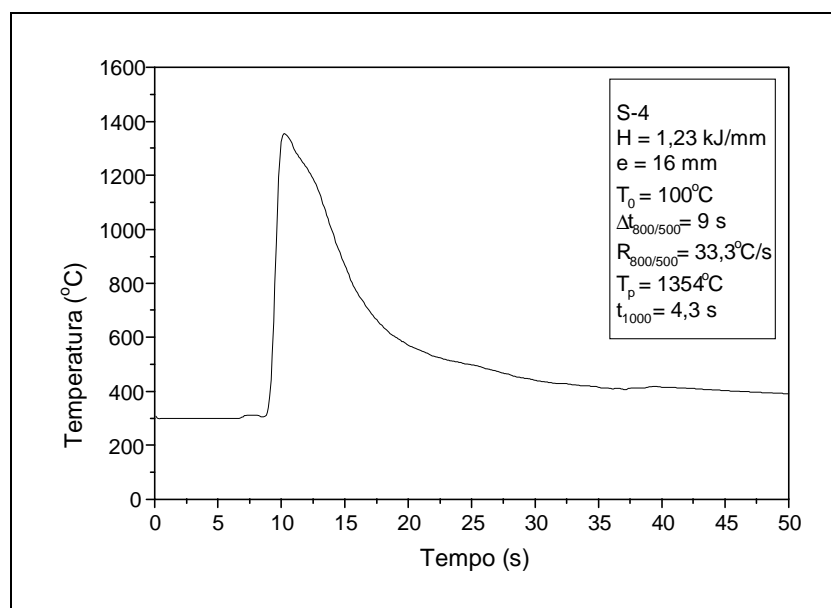


Figura 10 - Ciclo térmico medido na ZATRGG para ensaio realizado com H = 1,23 kJ/mm e T₀ = 100 °C.

A técnica adotada para a medida dos ciclos térmicos na ZATRGG próxima da raiz do MS, aparentemente, não causou distúrbios excessivos no fluxo de calor devido à presença dos furos nas chapas. Isso foi confirmado através de macrografias das amostras ensaiadas, que revelaram uniformidade no perfil do MS e linha de fusão, como pode ser observado na figura 2. Caso tivesse ocorrido interferência do furo no fluxo de calor, teria havido deslocamento localizado da linha de fusão em direção à extremidade do furo, o que poderia levar o termopar a entrar em contato com o MS ou a conseqüente alteração no crescimento de grão da região adjacente ao furo, o que não foi observado na microscopia ótica. Assim, adotou-se o procedimento de usinagem para a execução do furo perpendicular à face de chanfro simples da amostra Tekken, de modo que o termopar ficasse soldado no fundo do mesmo, na posição normal à linha de fusão. O pequeno diâmetro de 3 mm, adotado para estes furos, seguiu procedimento semelhante ao da literatura(14,18,19) e, mostrou-se adequado.

Tabela 1 - Valores obtidos experimentalmente para a taxa de resfriamento, tempo de resfriamento, temperatura de pico, tempo de permanência acima de 1000 °C e a extensão da ZAT.

| H kJ/mm | E Mm | T °C | Ensaio Nº | R _{800/500} °C/s | Δt _{800/500} s | T _p °C | Δt ₁₀₀₀ s | H mm |
|------------|---------|---------|--------------|------------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|---------|
| 0,87 | 8,3 | 30 | S-1 | 30,6 | 9,8 | 1484 | 2,3 | 2,35 |
| | | 100 | S-5 | 18,6 | 16,1 | 1473 | 4,5 | 2,5 |
| | 16 | 30 | S-8 | 116,7 | 2,57 | 1186 | 1,23 | 1,9 |
| | | 100 | S-2 | 62,5 | 4,8 | 1475 | 3,7 | 2,4 |
| 1,23 | 8,3 | 30 | S-3 | 22,5 | 13,3 | 1461 | 3,4 | 2,6 |
| | | 100 | S-6 | 13,5 | 22,1 | 1570 | 6,64 | 2,8 |
| | 16 | 30 | S-7 | 76,67 | 3,91 | 1485 | 3,43 | 3,0 |
| | | 100 | S-4 | 33,3 | 9 | 1354 | 4,3 | 3,5 |

Tabela 2 - Resultados de dureza, Δt₈₀₀₋₅₀₀ da junta soldada em relação aos parâmetros de soldagem.

| Variáveis | | | Ensaio/am ostra | Dureza (HV) | | Tempo de Resfriamento |
|------------|---------|---------|--------------------|---------------------------------|------------|----------------------------|
| H kJ/mm | e mm | T °C | nº | ZAT <u>Min.-Max.</u> Méd. | MB Med. | Δt _{800/500} s |
| 0,87 | 8,3 | 30 | S-1 | <u>224-243</u> 233 | 153 | 9,8 |
| | | 100 | S-5 | <u>214-230</u> 221 | | 16,1 |
| | 16 | 30 | S-8 | <u>303-347</u> 328 | 172 | 2,57 |
| | | 100 | S-2 | <u>294-326</u> 310 | | 4,8 |
| 1,23 | 8,3 | 30 | S-3 | <u>202-232</u> 216 | 153 | 13,3 |
| | | 100 | S-6 | <u>194-222</u> 209 | | 22,1 |
| | 16 | 30 | S-7 | <u>236-261</u> 251 | 172 | 3,91 |
| | | 100 | S-4 | <u>223-246</u> 234 | | 9 |

4. CONCLUSÕES

O aumento na extensão da ZAT, do tempo de retenção acima de 1000 °C Δt₁₀₀₀ e tempo de resfriamento Δt₈₀₀₋₅₀₀ foram observados com a elevação da energia de soldagem e da temperatura de pré-aquecimento.

O método “in situ” utilizado para determinar os ciclos térmicos na ZAT em conjunto com o sistema de análise térmica foi viável, pois os resultados de temperatura máxima ficaram dentro da faixa esperada bem como os valores de tempo de resfriamento e tempo de permanência acima de 1000 °C, confirmando assim não só a eficiência do método como também a do sistema de análise térmica.

5 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - POOLE, S. W. and FRANKLIN, J. E. -High-Strength Structural and High-Strength Low-Alloy Steels. Metals Handbook, V.4 p403-420.
- 2- LINERT, G. E. - WELDING METALLURGY. 3rd. New York, American Welding Society, 1967, p.631.
- 3 - ANDRADE, V. R., PERDIGÃO, S. C., JOELE, R., SIMONE - Soldabilidade de Aço de Alta Resistência. Soldagem & Materiais 1(1): 46-49, jan/mar. 1989.
- 4 - EASTERLING, K. E. - Introducion to the Physical Metallurgy of Welding. London, Butterworths & Co. Ltd. 1983, 232p.
- 5 - LANCASTER, J. F. - Metallurgy of Welding. 3.ed. London, George Allen & Unwin Ltd. .1980, 254p.
- 6 - CONNOR, L. P. - Welding Tecnology. Welding Handbook. V.1, ed 8, p66-87, 1987.
- 7 - CAMPOS, W.R.C; MARQUES, P.V.; MARTINS, G. Ciclos Térmicos de Soldagem. In: Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem, XVII, Recife, PE, 497-513, Setembro, 1991, Anais.
- 8 - BARLOW, J. A.; PERCIVAL, D. F. - An Initial Study of Thermal Cycle Prediction in Submerged-arc Welds. The Welding Institute Research Report 218/1983, 20p., June 1983.
- 9 - PHILLIP, R. H. - “In Situ” Determination of Transformation Temperature in the Weld Heat-Affected-Zone. Welding Journal 62(1): 12-18, 1983.
- 10 - ASKESEN, O. M.; SIMOSEN, T. - Techniques to Examaning Transformation Behaviour in Weld Metal and HAZ, a State of Art Review, Welding in the World 25(1/2): 26-34, 1987.
- 11 - GRAJON, H.; GAILLARD, R. - Possibilitities Offerts par L’Analyse Thermique “In Situ”pour des Transformations de L’acier au Cours du Soudage. Revue de Metalurgie 64(4): 335-349, 1967.
- 12 - COWARD, D. & APPS, R. L. - Mensurement of Cycles in the Weld Heat Affected Zone of Mild Steel. The College of Aeronautics, Institute of Technology, Cranfield, September, 1967.
- 13 - ANDRADE, V. R., PERDIGÃO, S. C., JOELE, R., SIMONE - Soldabilidade de Aço de Alta Resistência. Soldagem & Materiais 1(1): 46-49, jan/mar. 1989.
- 14 - ARAÚJO, C. L. D. - A Study of Coarse Grain Heat Affected Zone of Accelerated Cooled Structural Steels. Cranfield Institute of Technology, School of Industrial science, 260p., Cranfield, November, 1990 (Ph.D. Thesis).
- 15 – LOUREIRO, A. J. R. and FERNANDES, A. A. – Thougness of CGHAZ of Welds in Q & T Steels. Welding Journal, 73(9): 225-232, september, 1994.
- 16 - THAULOW, C.; PAUW, A.; GUTTORMSEN, K. - The Heat Affected Zone Toughness of Low Carbon Microalloyed Steel. Welding Journal 66(9): 266s-279s, September, 1987.
- 17 – GAILLLARD, R.& DEBIEZ, S.& HUBERT, H.& DEFOURNY, J. – Methods for the Optimization of the Preheat Temperature in Welding. IIW – Doc. IX – 1495. 1987, 27p.
- 18 - LEAL, V. S. Ciclos Térmicos na Zona Afetada Termicamente de um Aço de Alta Resistência Soldado pelo Processo SAT. São Carlos-SP, abril 1995, 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos.
- 19 - KOHNO, R. & JONES, S. B. - An Initial Study of Arc Energy and Thermal Cycles in the Submerged-Arc Welding of Steel. The Welding Institute Research Report 81/1978/PE, December, 1978.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq, COSIPA, CEFET-PI, PPG-CEM-DEMa-UFSCar.