

ANÁLISE DA GEOMETRIA DE CORPOS DE PROVA ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA ESTUDO DA ZAC

Douglas Bezerra de Araújo

Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila 2121, Santa Mônica, Uberlândia- MG - CEP 38400-902
– Bloco O – Laprosolda
douglas_ba@yahoo.com.br

Louriel Oliveira Vilarinho

Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila 2121, Santa Mônica, Uberlândia- MG - CEP 38400-902
– Bloco O – Laprosolda
vilarinho@mecanica.ufu.br

Resumo: Frequentemente, a união de materiais metálicos está associada a problemas metalúrgicos, como por exemplo, a soldagem de aços inoxidáveis. Especificamente, podem ocorrer modificações metalúrgicas na ZAC (zona afetada pelo calor), levando a alterações microestruturais. Contudo esta é uma região de difícil estudo devido a sua pequena dimensão. Assim, a fim de superar esta limitação com relação ao estudo da ZAC, existem na literatura proposições de máquinas de simulação de ZAC, que fazem uso do efeito Joule para o aquecimento de determinados corpos de prova, que se resfriam por condução e convecção, de forma a simular o ciclo térmico em uma ZAC obtida por soldagem real. Entretanto, o uso de corpos de provas cilíndrico apresenta restrições em retratar o caso real. Nesta opção de geometria cilíndrica, os ciclos térmicos não apresentam gradientes de temperatura que sejam fiéis àqueles encontrados em uma soldagem. Desta forma, foram realizadas simulações em elementos finitos, variando-se a geometria dos corpos de prova, de forma a obter ciclos térmicos o mais próximos da realidade. Após isso se faz o modelamento para várias geometrias e uma subsequente otimização a fim de encontrar as melhores variáveis da geometria para um dado tempo de resfriamento ($\Delta t_{800/500}$).

Palavras-chave: ZAC; Simulação; Elementos Finitos

1. INTRODUÇÃO

A união dos metais apresenta alguns problemas em sua metalurgia, isto por causa da composição e do ciclo térmico do material no momento da soldagem segundo Modenesi (1992). Podemos citar crescimento de grão (Akselsen, O. M., Grong, O., Ryum, N., Christensen, N., 1986), aparecimento de estruturas frágeis (Liao, J., Ikeuchi, K., Matsuda, F., 1998), fissurações (Tsai, M. C., 2003), entre outros problemas principalmente nos aços inoxidáveis.

Para um melhor estudo destes problemas, foi proposta pela literatura a construção de uma máquina que faz a simulação da zona afetada pelo calor (ZAC) (Scotti, A., 1987), já que é uma região de dimensões muito pequenas e de difícil verificação das propriedades mecânicas. Estas simulações consistem em aplicar uma corrente num corpo de prova (CP) de material pré-estabelecido, fazendo este aquecer-se por efeito Joule, e após o aquecimento há o resfriamento tanto por condução quanto por convecção.

Com o objetivo de fazer um estudo da taxa de resfriamento (Maciel, T. M., 1995) adequado, partiu-se para a simulação em elementos finitos do problema acima citado, variando a geometria do corpo de prova a ser testada. A simulação tem a vantagem de ter custos muito baixos, tanto financeiros quanto de tempo.

Para os primeiros testes, encontraram-se dificuldades em atingir uma taxa de resfriamento necessária para chegar na microestrutura parecida com a de uma soldagem real.

Primeiramente foram analisados corpos de prova cilíndricos de seção transversal constante para a verificação do simulador térmico e depois com seções diferentes ao longo do corpo de prova. Utilizaram-se para as primeiras análises o aço ABNT 1045 pela fácil obtenção e baixo custo. Posteriores estudos serão realizados com outros tipos de aço, incluindo os inoxidáveis.

A análise mais importante deste tipo de experimento seria o tempo de aquecimento até a faixa de temperatura de 1350°C , onde ocorre o crescimento dos grãos na ZAC e o tempo de resfriamento entre as temperaturas de 800°C e 500°C , faixa pela qual ocorre a transformação de fase nos aços.

Fazendo-se uma análise estatística e um processo de otimização das análises numéricas, é possível saber antecipadamente a geometria do corpo de prova a ser utilizada no simulador de ZAC para um dado $\Delta t_{800/500}$ que se deseje.

2. ANÁLISE NUMÉRICA DO PROBLEMA

As simulações foram realizadas por meio de um software de elementos finitos com corpos de provas sem rebaixo, com rebaixo de diâmetro e comprimento variados. Já o diâmetro restante é fixado em 0.01m. A geometria utilizada pode ser vista na Figura 1.

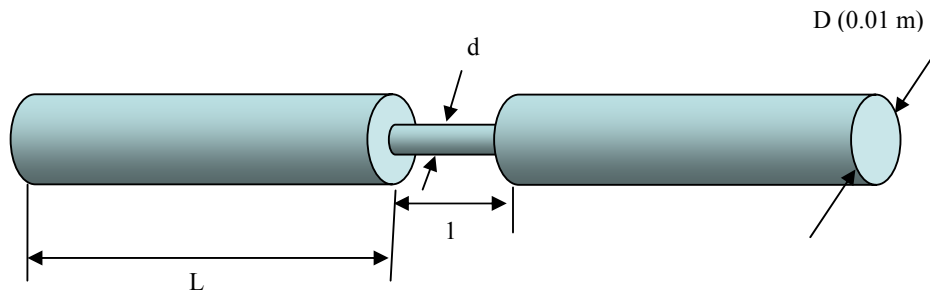


Figura 1. Geometria do corpo de prova.

2.1. Propriedades do Material

O primeiro material a ser utilizado é o aço ABNT 1045 com uma condutividade térmica média de 40 W/m.K , um calor específico médio de 800 J/Kg K , uma resistividade elétrica média de $12 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ e uma densidade de 7800 Kg/m^3 .

2.2. Condições de Contorno

As condições de contornos no corpo de prova são compostas de uma diferença de potencial nas suas extremidades num valor de 3V , um coeficiente de convecção de $170 \text{ W/m}^2\text{K}$ com uma temperatura do ambiente de 300K nas extremidades radiais. As condições de contornos podem ser verificadas na Figura 2.

As análises foram feitas por elementos axissimétricos (Plane67) a fim de simplificar o processamento do problema.

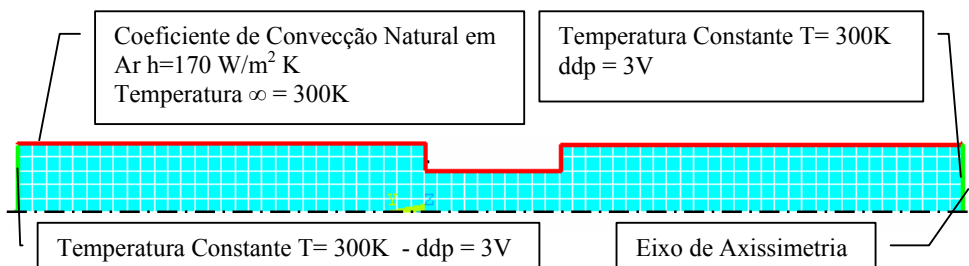


Figura 2. Condições de contorno

2.3. Solução

A análise será do tipo transiente através de dois passos. O primeiro será a aplicação de uma diferença de potencial do tipo “stepped” (são carregamentos aplicados e/ou modificados de forma instantânea no tempo e permanece constante até o fim do carregamento) nas extremidades do corpo de prova e o segundo onde a ddp será desligada para um resfriamento por convecção natural.

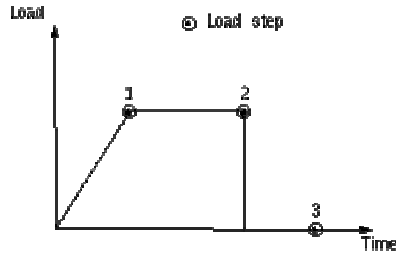


Figura 3. Carregamento tipo Stepped

2.4. Resultados

Foram realizadas simulações variando todas as variáveis de geometria, conseguindo desta forma todos os resultados possíveis para estas análises. Primeiramente foram feitas simulações com corpos de prova de seção constante ao longo de seu comprimento.

Para a aquisição da temperatura ao longo do tempo foi escolhido um ponto no centro do CP na superfície externa, local onde ficará posicionado o termopar para a prática experimental que validará a simulação por elementos finitos.

Como já sabido o CP de seção constante não apresentou uma taxa de aquecimento e resfriamento de acordo com a ocorrida na ZAC.

Com o objetivo de aumentar-se a taxa de fluxo de calor que o centro do CP perde, optou-se pela variação da seção central de forma que, por apresentar uma maior resistência a seção central irá aquecer de forma muito rápida em comparação ao resto do CP, chegando a um pico de temperatura no momento em que a ddp é desligada. A partir daí, além da perda de calor para o ambiente, o centro irá perder calor também para o resto do CP que estará numa temperatura menor.

Como resultado das simulações, o corpo de prova de menor seção apresentou um maior aquecimento e um maior resfriamento como era de se esperar. Uma amostra disto é visto na Figura 4.

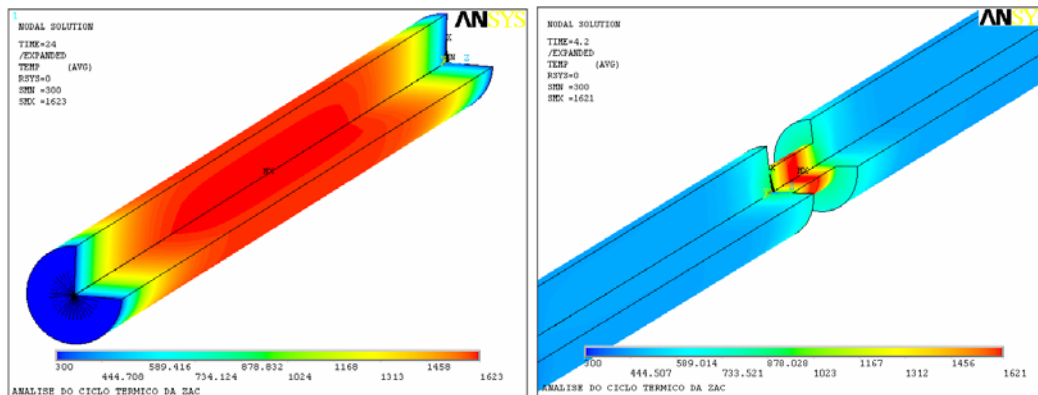


Figura 4. Aquecimento do corpo de prova sem e com entalhe [K].

A variação do diâmetro da seção central (d) apresentou resultados bastante satisfatórios, isto porque para diâmetro muito pequeno a variação da temperatura foi muito grande, à medida que ia aumentando o diâmetro a variação de temperatura ia caindo até chegar num corpo de prova de seção constante. Estas diferenças nos resultados devem-se à resistência elétrica no momento do

aquecimento, quanto menor a seção maior será a resistência chegando a temperaturas maiores. E a capacitância térmica no momento do resfriamento, quanto menor o diâmetro da seção central menor será a capacitância com isso maior será a taxa de resfriamento do corpo de prova.

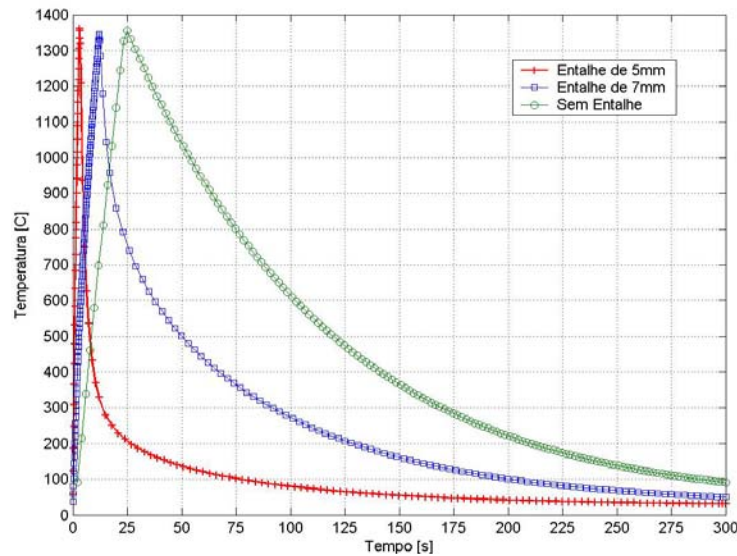


Figura 5. Variação da temperatura ao longo do tempo para diferentes diâmetros do rebaiço.

Esta diferença deve-se a um maior fluxo de calor da seção central para o resto do CP. Quanto maior for o comprimento da seção central menor vai ser o calor perdido por condução.

Fazendo uma comparação entre os corpos de provas com e sem rebaiço pode-se verificar que a taxa de resfriamento no centro do CP é maior para os que apresentam rebaiço. Estes resultados foram mostrados na Figura 5 e para complementar foram plotados também os gráficos de fluxo de calor ao longo do CP.

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Esta análise consta no aquecimento do corpo de prova por meio de uma fonte de soldagem a ponto, que fornecerá a energia elétrica, que por efeito Joule aquecerá o corpo de prova até a temperatura necessária. Serão realizadas as aquisições de temperatura, de corrente e de tensão. A aquisição da temperatura será por meio de um termopar tipo K, que depois de amplificado o sinal irá para o computador e para o controlador, este o qual fará o controle da temperatura de pico, desligando a fonte quando chegar à temperatura pré-determinada.

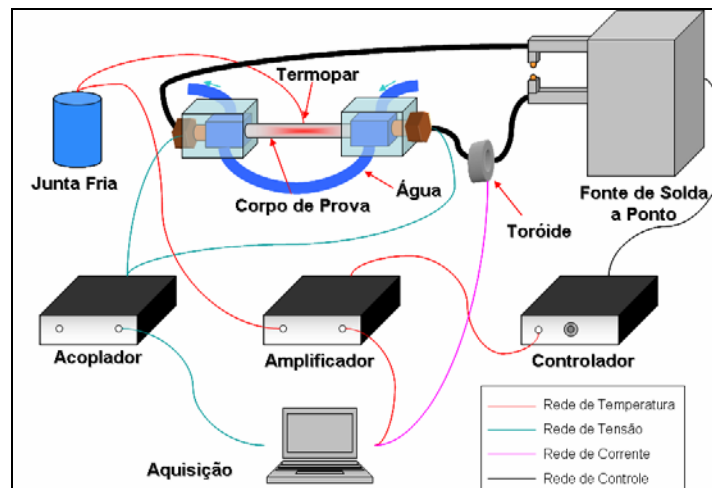


Figura 6. Croqui da montagem dos equipamentos.

A corrente será adquirida por meio de um toróide, que mandará o sinal até um computador no qual será realizada a aquisição. Já a voltagem será adquirida nas extremidades do corpo de prova.

O experimento apresenta um sistema de resfriamento por meio de água corrente nas extremidades do corpo de prova conforme mostra a Figura 6.

3.1. Geometria dos CPs utilizados no experimento

Foram três os corpos de prova utilizados no experimento, o primeiro de seção constante, o segundo com um rebaixo para 7 mm de diâmetro e um terceiro para 5 mm de diâmetro como pode ser visto na Figura 7. Geometrias que foram analisadas numericamente.

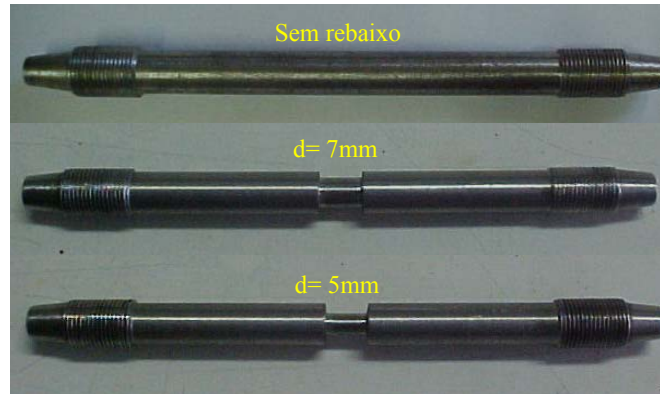


Figura 7. Diferentes geometrias de corpos de prova utilizados no experimento

3.2. Resultados

Depois de realizados os experimentos com o simulador de ZAC e feita a aquisição da temperatura, tensão e corrente, podemos verificar a diferença no ciclo térmico entre os corpos de prova com e sem rebaixo. Podemos verificar a diferença no tempo de aquecimento até 1350°C e o tempo de resfriamento entre 800°C e 500°C (Figura 9).

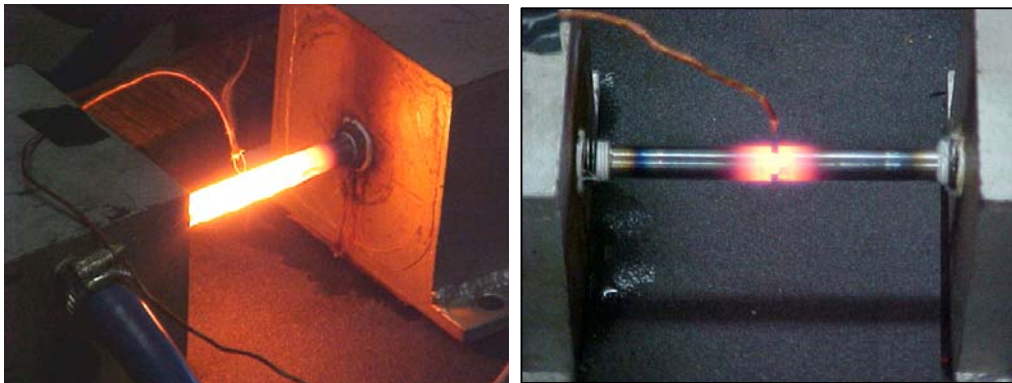


Figura 8. Corpos de prova sem e com rebaixo no momento do aquecimento

Através do gráfico abaixo pode ser verificado de forma bem nítida a transformação de fase ocorrida na microestrutura do aço. Porém no corpo de prova de rebaixo até 5mm de diâmetro não apresentou esta transformação. Isto se deve à velocidade de resfriamento que, neste caso, foi com uma velocidade muito alta, com uma taxa de resfriamento na faixa de 150°C/s entre 800 e 500°C.

Depois de realizadas as análises numéricas e análises experimentais, podemos fazer as comparações entre as análises, tanto no aquecimento quanto no resfriamento. Obtendo desta forma curvas muito parecidas com forme pode-se ver na figura 9.

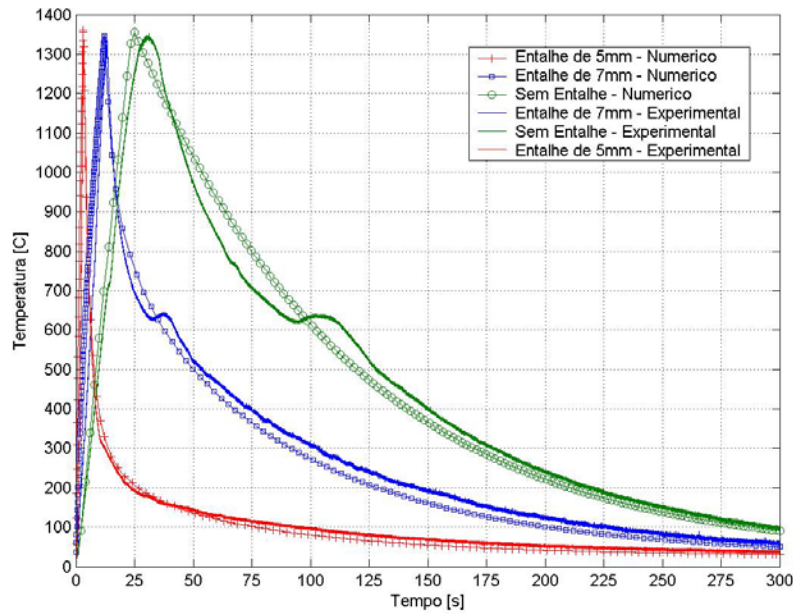


Figura 9. Comparação entre a simulação numérica e a simulação experimental da ZAC

4. MODELAMENTO

Depois de realizadas análises numéricas para diversas geometrias do corpo de prova obteve-se os valores de tempo de resfriamento entre 800°C e 500°C da tabela abaixo:

Tabela 1. Tempo de Resfriamento entre 800°C e 500°C para diversas geometrias de corpo de prova

Tempo de Resfriamento [s]				
l [mm] \ d[mm]	5	6	7	8
3	34.11	38.3	38.72	40.29
5	17.35	34.06	38.41	39.88
7	6.44	26.51	36.35	39.31
10	3.09	13.89	31.25	38.14
15	3.84	8.20	22.25	35.12
20	5.39	8.51	18.43	32.04
25	6.92	10.15	17.72	29.90
30	8.54	11.79	18.3	28.77

Através de uma análise estatística realizados com os dados acima se pode descobrir o grau de significância de cada variáveis e se há alguma influência de uma variável em outra (Tabela 2). Com isso achou-se a equação de modelamento para o tempo de resfriamento ($\Delta t_{800/500}$)(Figura 10). Através desta equação é possível fazer a otimização do modelo conseguindo as geometrias ótimas do corpo de prova para um tempo de resfriamento ($\Delta t_{800/500}$) necessário. Foi verificado também através da figura 11 os dados observado verso os preditos.

Tabela 2. Tabela dos coeficientes de regressão, desvio padrão e grau de significância

	Regressn	Std.Err.	p
Mean/Interc.	16.32174	3.802341	0.000191
L (Linear)	-2.65276	0.435218	0.000001
L (Quadratico)	0.05969	0.013156	0.000098
D (Quadratico)	0.63427	0.059567	0.000000

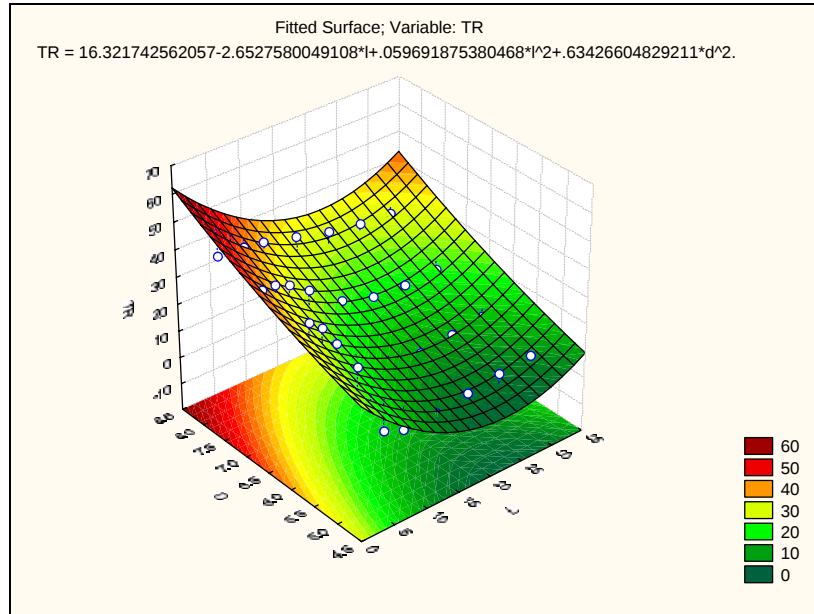


Figura 10. Gráfico do modelo de tempo de resfriamento numérico entre 800°C e 500°C para os vários valores de variáveis da geometria.

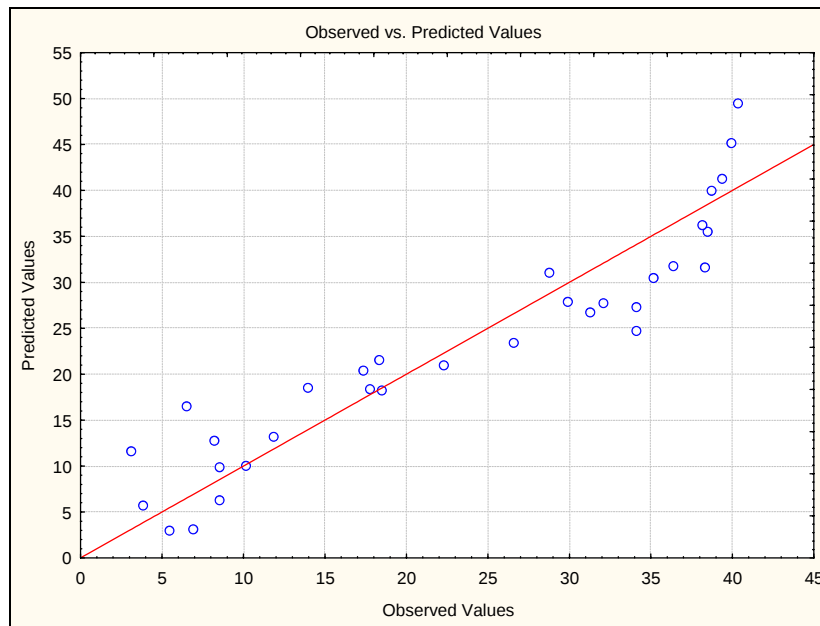


Figura 11. Gráfico de observado vs. Predito.

Através do processo de otimização foi possível conseguir geometrias de corpos de prova muito próximo das geometrias experimentais com tempo de resfriamento exatos (Tabela 3).

Tabela 3. Tabela de teste para três valores de $\Delta t_{800/500}$

$\Delta t_{800/500}$ Otimização [s]	l[mm]	d[mm]	$\Delta t_{800/500}$ Experimental [s]	l[mm]	d[mm]	Erro l	Erro d
2	11.93	5	2	10	5	1.93	0
33	10	7.89	33	10	7	0	0.89
36.92	5	6.98	36.92	5	6	0	0.98

5. CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos nas análises numéricas e comprovadas posteriormente através das análises experimentais, foi possível concluir que apenas com a variação da geometria do corpo de prova é possível alcançar uma ampla faixa de taxa de resfriamento e conseqüentemente conseguirem as microestruturas ocorridas numa soldagem. Estes resultados mostram que os corpos de prova com o rebaixo central com diâmetro de menor dimensão apresentam uma maior taxa de resfriamento e com o aumento deste diâmetro a taxa de resfriamento começa a cair até chegar no corpo de prova sem rebaixo. E através do modelamento realizado e otimização é possível conseguir a geometria ótima do corpo de prova para um dado tempo de resfriamento ($\Delta t_{800/500}$) que se queira.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro e ao LAPROSOLDA.

7. REFERÊNCIAS

- MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B., 1992, “Curso de Metalurgia da Soldagem”, Laboratório de Soldagem e ensaios não destrutivos, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- AKSELSEN, O. M., GRONG, O., RYUM, N., CHRISTENSEN, N., 1986, “HAZ grain growth mechanisms in welding of low carbon microalloyed steels”, Pergamon Journals Ltd.
- LIAO, J., IKEUCHI, K., MATSUDA, F., 1998, “Toughness investigation on weld HAZs of SQV-2A pressure vessel steel”, Nuclear Engineering and Design 183 (1998) 9-20.
- TSAI, M. C., 2003, “Microstructural degeneration of simulated heat affected zone in 2.25Cr-1Mo steel during high temperature exposure”, Materials Chemistry and Physics A340 (2003) 15-32.
- SCOTTI, A., 1987, “Simulador Térmico de Soldagem”, Universidade Federal de Uberlândia
- MACIEL, T. M., 1995, “Influencia da taxa de resfriamento e do nível de tensão sobre trincas a frio em metais de solda de aços ARBL.” XXI ENTS.

ANALYSES OF GEOMETRY OF WORKPIECES THROUGH NUMERICAL SIMULATION FOR HAZ STUDIES

Douglas Bezerra de Araújo

Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila 2121, Santa Mônica, Uberlândia- MG - CEP 38400-902
– Bloco O – Laprosolda
douglas_ba@yahoo.com.br

Louriel Oliveira Vilarinho

Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila 2121, Santa Mônica, Uberlândia- MG - CEP 38400-902
– Bloco O – Laprosolda
vilarinho@mecanica.ufu.br

Abstract: *The joining of metals is often associated to metallurgical problems, for instance, in the stainless steel weldments, what demands a dedicated study for each material. Specifically, metallurgical transformations in the HAZ (Heat Affected Zone) can occur, what lead to microestructural changes such as grain growth, fragile structures appearance, fissures, among others. The HAZ is a difficult region for studying due to its small dimensions (placed between the melted zoned and base material), where its properties are defined basically by the base metal characteristics and the factors that affect the thermal cycle of the process. Thus, in order to overcome this limitation of the HAZ study, there are in the literature different proposes of HAZ-simulator machines, which uses the Joule effect for heating specific coupons that cool down by conduction and convection. This approach intends to simulate the thermal cycle in a “real” HAZ obtained in a “real” welding. However, the use of traditional coupons with cylindrical geometry presents restrictions of portraying the “real” case, i.e., the welding. In the cylindrical geometry option, the obtained thermal cycles do not present temperature gradients closer to the ones in “real” weldments. Hence, to overcome this limitation, finite elements modeling was carried out and different coupon geometries were simulated. The objective is to reach thermal cycles as close as possible to the ones obtained in a “real” situation. After that the modeling is carried out for different geometries and a subsequent optimization is done in order to search for the best geometrical variables for a given cooling time ($\Delta t_{800/500}$).*

Keywords: *HAZ, Simulation, Finite Elements*