

# SISTEMA COMPUTACIONAL PARA DETERMINAÇÃO DA TAXA DE DILUIÇÃO EM SOLDADURA

Pedro Pedrosa R. Filho<sup>1</sup>, Tarique da Silveira Cavalcante<sup>1</sup>, Victor Hugo C. de Albuquerque<sup>2</sup>, Cleiton Carvalho da Silva<sup>3</sup>, João Manuel R. S. Tavares<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará (UFC), Departamento de Engenharia de Teleinformática (DETI), Laboratório de Sistemas de Computação (LESC), Campus do Pici, S/N - 60455-970- Fortaleza/CE, BRASIL

Emails: [pedrosa\\_rf@deti.ufc.br](mailto:pedrosa_rf@deti.ufc.br), [tariquesc@deti.ufc.br](mailto:tariquesc@deti.ufc.br)

<sup>2</sup>Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental (LOME), INEGI

Departamento de Mecânica e Gestão Industrial, FEUP, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, PORTUGAL

Email: [victor.albuquerque@fe.up.pt](mailto:victor.albuquerque@fe.up.pt), [tavares@fe.up.pt](mailto:tavares@fe.up.pt),

<sup>3</sup>Universidade Federal do Ceará (UFC), Depto de Engenharia Mecânica e Produção (DEMP), Laboratório de Engenharia de Soldadura (ENGESOLDA), Campus do Pici, S/N -60455-760 – Fortaleza/CE, BRASIL

Email: [cleitonufc@yahoo.com.br](mailto:cleitonufc@yahoo.com.br)

## RESUMO

*Diluição da solda é a modificação da composição química do metal de adição, causada pela parcela do metal de base que sofreu fusão e passou a compor a zona fundida. Sendo dada pela percentagem do metal de base que participa na formação do cordão de solda. A sua medição, em geral, é obtida manualmente utilizando-se softwares genéricos de desenho ou de processamento e análise de imagem. Neste sentido, o presente trabalho teve como objectivo desenvolver e analisar um sistema computacional para determinar a taxa de diluição. Através dos resultados experimentais obtidos, pode-se concluir que o sistema proposto é rápido e preciso, além de eliminar a subjectividade do operador.*

## 1 - INTRODUÇÃO

A zona fundida e a zona afectada pelo calor gerado durante o processo de soldadura, constituem as duas principais regiões da solda. Esta região é considerada de grande importância, pois em alguns casos o seu comportamento durante e após a soldadura implica o sucesso do processo de união ou revestimento. As propriedades da zona fundida são dependentes de inúmeros processos metalúrgicos decorrentes da alta temperatura e das grandes velocidades de resfriamentos experimentados por esta região. Embora inúmeros factores possam actuar conjuntamente sobre esta região, uma das suas características fundamentais é a sua composição química, que pode actuar no modo de solidificação do metal líquido, na

morfologia de solidificação, na microestrutura resultante, entre outras, acarretando propriedades específicas.

A zona fundida pode ser constituída unicamente pelo metal de base, como no caso da soldadura denominada de autógena, ou constituída por uma mistura entre o metal de base e um material adicionado intencionalmente. Assim, a composição química da zona fundida depende das composições do metal de base e do metal de adição conjuntamente, podendo ser ainda influenciada pelas reacções entre a poça de fusão no estado líquido e o seu envoltório gasoso e/ou escorificante, bem como a quantidade e tamanho de inclusões não metálicas presentes no material (Banovic et al., 2001; Albuquerque et al., 2009). Dentre

os principais agentes que afectam as características e propriedades do metal de solda podemos destacar a diluição.

A maioria das aplicações de soldadura de união em aços estruturais e de construção mecânica de baixo carbono não apresenta qualquer tipo de problema relacionado como grau de diluição da junta, pois os consumíveis utilizados, sejam varetas, arames ou eléctrodos, são desenvolvidos para apresentarem características similares aos metais de base. Porém, quando a soldadura é dissimilar, ou seja, quando pelo menos um dos materiais, quer de adição ou de base, apresenta uma composição diferente dos demais, podem ocorrer problemas devido à elevada diluição (Ryuichi e Hiroshige, 2005; Crook, 1993). Dependendo dos materiais a serem soldados, a participação de determinados elementos de liga na formação do metal de solda pode contribuir para a redução da solubilidade de elementos secundários, favorecendo sua segregação para o líquido interdendrítico e ocasionando a precipitação de novas fases ou eutéticos com baixo ponto de fusão, podendo ter efeitos catastróficos (Nadezhdin e Davison, 2004; Callister, 2006; Silva et al., 2009).

Na soldadura de revestimento a diluição é um aspecto fundamental a ser controlado através da escolha adequada dos parâmetros de soldadura, uma vez que em muitos casos o material do revestimento possui características bem mais nobres do que o substrato sobre o qual será depositado. Isso é devido a uma composição química mais elaborada, constituída por elevados teores de elementos de liga como Cr, Mo, Ni, Nb, W, e variações significativas nos teores de alguns destes elementos podem, por exemplo, reduzir a resistência à corrosão do cordão de solda (Banovic et al., 2001).

Em geral a diluição é avaliada para se determinar a composição química do metal de solda e posteriormente tentar prever a microestrutura resultante e as suas propriedades, visto que de uma forma geral, a composição química do metal de adição e do metal de base são conhecidas. Embora seja mais confiável realizar directamente a análise química da liga, na prática os resultados

obtidos pela avaliação das características geométricas da solda apresentam bons resultados e constituem uma forma simples e rápida de estimar a composição química da solda, até porque nem sempre é possível contar com um equipamento de análise química.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objectivo principal desenvolver, analisar e comparar um novo sistema computacional capaz de determinar a área do metal de base fundida (região de penetração do metal de solda) e da área total do cordão de solda para determinação do grau de diluição do metal de solda sobre o metal de base a partir de imagens. Para tal, foi considerado o método de contornos activos, comumente conhecido por snakes em Processamento e Análise de Imagem.

## **2 - DILUIÇÃO DA SOLDA**

Chama-se diluição da solda à quantidade do metal de base que se funde e participa da formação do metal de solda. A participação do metal de base na composição química do metal de solda ocorre sempre nos processos de soldadura por fusão, pois esta é a única forma de assegurar que haja a continuidade no conjunto soldado (Nadezhdin e Davison, 2004). Contudo, é possível reduzir a valores mínimos este nível de participação (diluição) em algumas aplicações.

A diluição depende do tipo de junta, tipo de processo e parâmetros utilizados. Pode variar desde poucos percentuais, indicado para a soldadura de revestimento, até 100%, na soldadura autógena (sem adição de consumível), sendo o seu valor usual na faixa de 20 a 40% para os processos de soldadura por fusão convencionais (Ryuichi e Hiroshige, 2005).

O efeito da diluição nas transformações que podem ocorrer durante a soldadura é maior quando se solda materiais dissimilares (Silva et al., 2009). A mistura das composições entre o metal de adição e o metal de base pode favorecer uma composição intermediária e propriedades totalmente diferentes daquelas que se esperaria para a solda (Callister, 2006).

Na soldadura de metais dissimilares, a diluição é um dado indispensável para a previsão dos constituintes e propriedades da solda. Um exemplo clássico é o emprego do diagrama de Schaeffler na soldadura dos aços inoxidáveis (Beres, 1998). Matematicamente, o grau de diluição é definido pelo quociente entre a área da penetração do metal de solda e a área total do metal de solda, Figura 1.

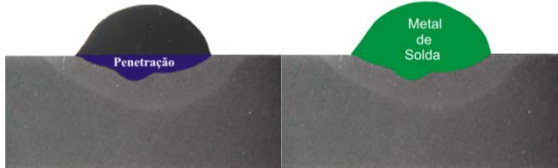


Fig 1: Identificação das regiões envolvidas no cálculo da diluição.

### 3 - CONTORNOS ACTIVOS

O método de contornos activos consiste em definir um contorno inicial em torno do objecto de interesse na imagem original. Posteriormente, este contorno deforma-se pela acção de forças que actuam sobre o mesmo, deslocando-o até às fronteiras do objecto, permitindo a detecção dos seus contornos.

Os contornos activos são baseados em métodos variacionais, cujo objectivo é minimizar a energia do contorno descrito por um conjunto de pontos ordenados. Este contorno evolui então, de tal modo que, a sua energia diminui a cada nova iteração (Beres, 1998).

O modelo do contorno activo utilizado neste trabalho é o MCA Greedy, que descreve uma curva suave controlada por energia interna, ajustando a sua elasticidade e rigidez, e a energia gradiente da imagem (energia externa). Neste modelo, a curva é ajustada através de sucessivas minimizações locais de energia (Lee et al., 2007; Pisa, 1999).

Assim, seja  $c(s)=(x(s),y(s))$  a posição paramétrica do contorno e a sua função de energia dada por:

$$E = \int_0^1 E_{int}(c(s))d_s + \int_0^1 E_{img}(c(s))d_s,$$

em que  $E_{int}$  e  $E_{img}$  representam a energia interna da curva e a energia relativa à imagem, respectivamente. Esta formulação pode ser reescrita para o caso discreto, isto é, quando há um número finito de pontos representando os contornos a serem ajustados. Assim, alterando esta formulação para caso discreto, a energia interna da curva é descrita como:

$$E_{int} = \alpha(s) \left| \frac{d}{d_s} c(s) \right|^2 + \beta(s) \left| \frac{d^2}{d_s^2} c(s) \right|^2,$$

em que  $\alpha(s)$  e  $\beta(s)$  representam os pesos associados a cada energia. O segundo termo influencia a curva a se comportar como uma “corda” resistente à extensão e está relacionado com a tensão da curva, denominada de energia de curvatura. O primeiro termo possibilita a curva a agir como uma “haste” resistente à flexão e está relacionada com a rigidez da curva, chamada de energia de continuidade (Pisa, 1999).

Este método possui algumas limitações, dentre estas a definição dos valores dos seus parâmetros (pesos), pois estes são próprios para cada aplicação devendo ser testados e ajustados para obter-se resultados satisfatórios.

### 4 - SISTEMA COMPUTACIONAL DESENVOLVIDO

Visando tornar mais rápida e precisa a determinação do grau de diluição, o método de segmentação adoptado foi implementado num sistema computacional dedicado desenvolvido em linguagem de programação C++ e com uma interface amigável.

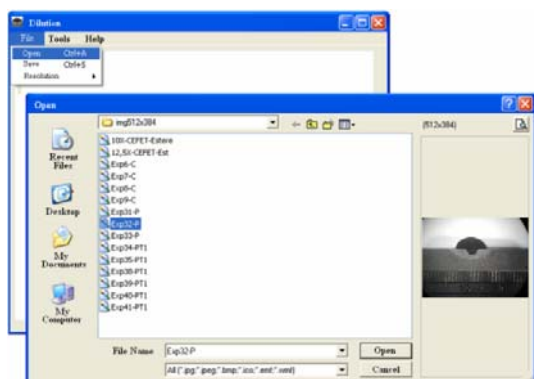
As imagens a analisar foram obtidas a partir de um estereoscópico sobre uma amostra soldada com simples depósito, nas quais as características dos parâmetros de soldadura eram conhecidas.

Os resultados obtidos pelo sistema computacional desenvolvido foram comparados com os obtidos pelo sistema comercial considerado que possibilita obter a taxa de diluição de forma semi-automática ou manual. A análise dos resultados obtidos por estes meios foi

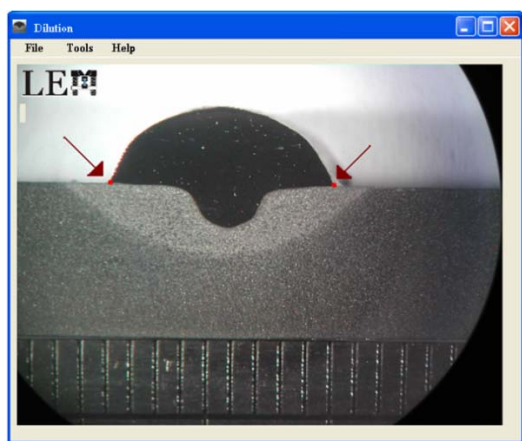
realizada por profissionais da área da soldadura, metalúrgica e de materiais. Desta forma, foi possível avaliar a eficiência e eficácia do sistema desenvolvido, tendo-se verificado resultados de boa qualidade.

Para iniciar a aplicação do sistema desenvolvido, deve-se começar por abrir a imagem a analisar, Figura 2. De seguida, o operador deve seleccionar os dois extremos do metal de solda, Figura 3.

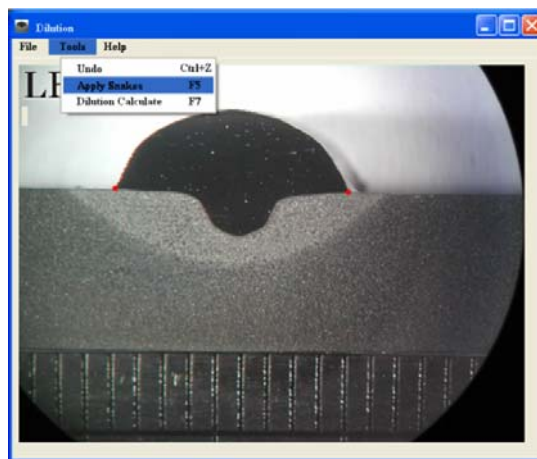
Depois de realizada a selecção dos pontos nas extremidades do metal de solda, o operador deve iniciar o método de contornos activos, Figura 4. O contorno activo desenvolve-se automaticamente até contornar toda a região do metal de solda. Estando a segmentação finalizada pode-se obter o valor da taxa de diluição da amostra em análise, Figura 5. O sistema computacional proposto oferece ainda a opção de guardar a imagem processada de forma que possa ser analisada numa fase posterior.



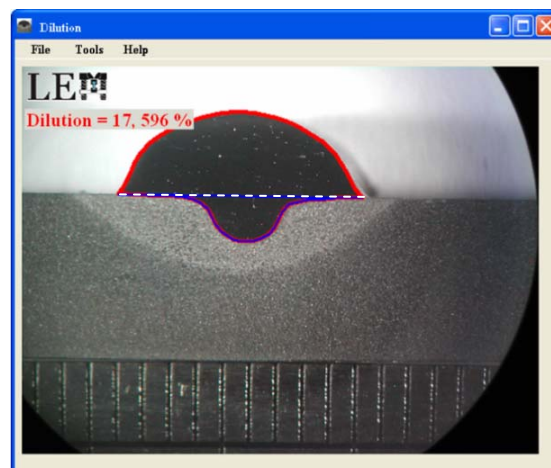
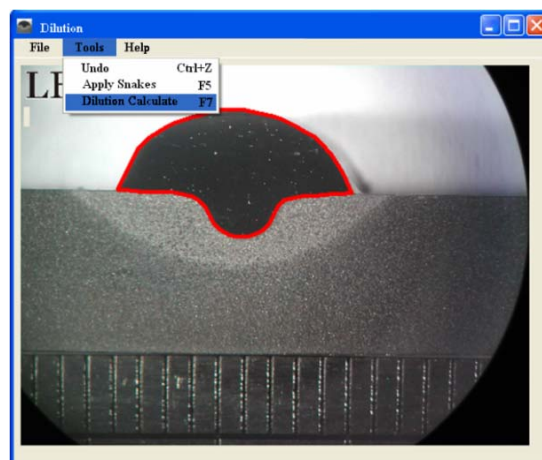
**Fig 2:** Selecção de uma imagem a analisar no sistema desenvolvido.



**Fig 3:** Selecção dos pontos nas extremidades do metal de solda.



**Fig 4:** Iniciação do método de contornos activos.



**Fig 5:** Obtenção do valor da taxa de diluição (a partir da área de penetração do metal de solda abaixo da linha a tracejado) usando o sistema desenvolvido.

## 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

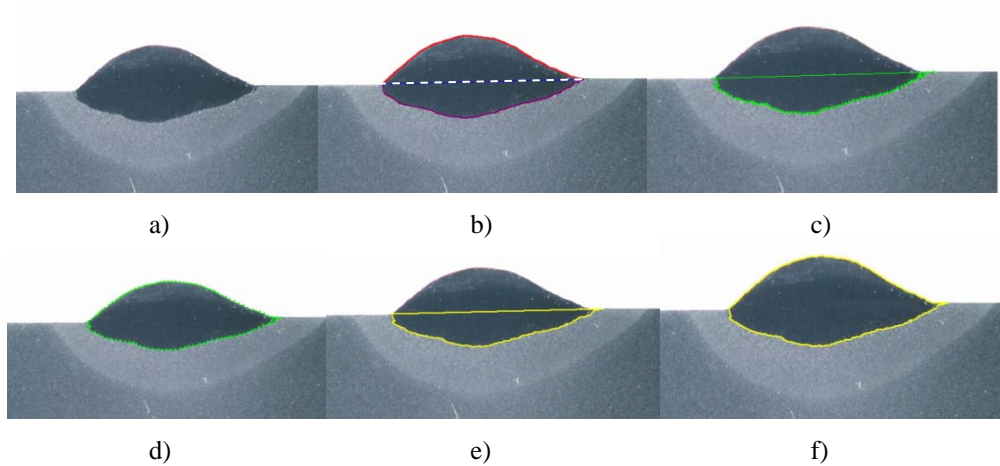
A análise da diluição utilizando o sistema comercial de forma semi-automática apresenta valores próximos das medidas obtidas pelo mesmo sistema quando aplicado de forma manual.



Entretanto, frequentemente a forma semi-automática não é capaz de segmentar correctamente a região total do metal de solda nas imagens em análise, obrigando o operador a mensurar de forma independente as áreas da penetração e do reforço e

realizar os cálculos necessários manualmente.

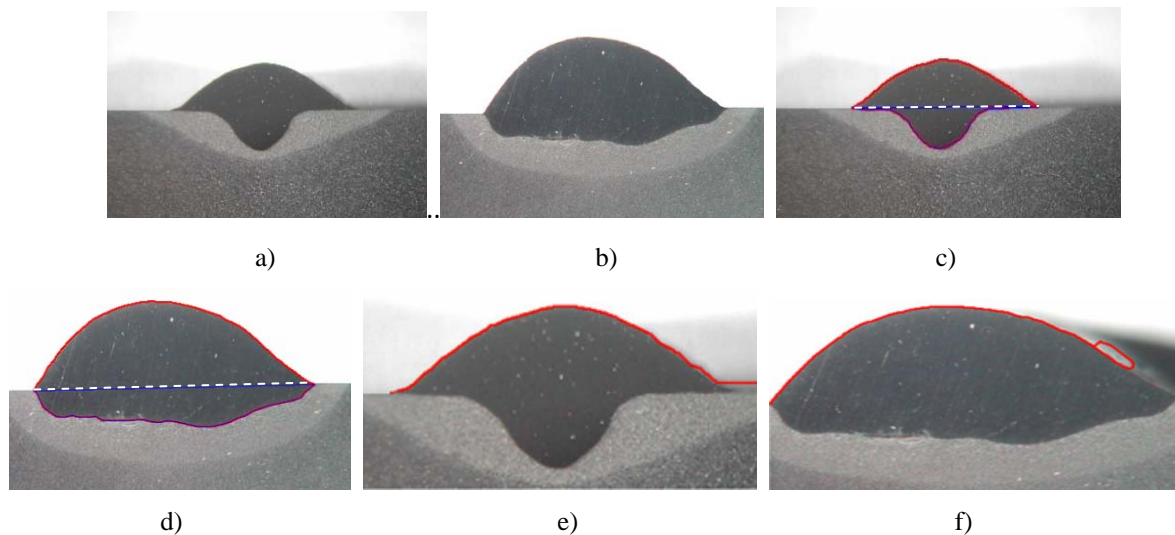
A Figuras 6 apresenta um exemplo de uma imagem original e as segmentações obtidas pelos três meios de medição discutidos neste trabalho.



**Fig 6:** a) Imagem original de um cordão de solda, b) segmentação da área total do metal de solda e da penetração pelo sistema proposto, c) e d) segmentação da área da penetração e da área total do metal de solda pelo sistema comercial com a abordagem manual, e) e f) segmentação da área da penetração e da área total do metal de solda pelo sistema comercial com a abordagem semi-automática.

Como já referido, mesmo seguindo os procedimentos de medição recomendados de forma cautelosa, frequentemente a segmentação usando o sistema comercial

falha, sendo necessário que o operador refaça o processo de análise ou até mesmo segmente manualmente as secções que apresentam erro, Figura 7.



**Fig 7:** Imagens exemplo de cordões de solda a) e b), resultados das segmentações obtidas utilizando o sistema computacional proposto c) e d), e falhas típicas de segmentação obtidas pelo sistema comercial considerado e) e f).

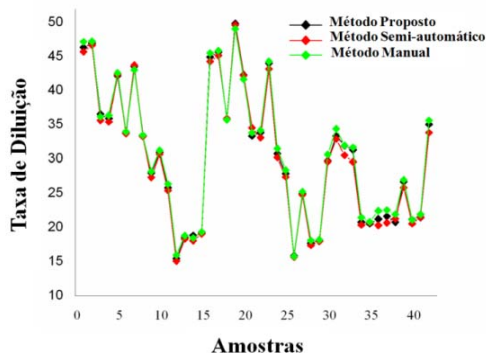
Na Figura 8 é apresentado, para fins de comparação, um gráfico com os resultados obtidos para as 42 amostras consideradas, utilizando o sistema proposto e as

abordagens semi-automática e manual do sistema comercial considerado.

Analisando os resultados obtidos, nota-se que as curvas do gráfico são bastante

semelhantes, com diferenças mínimas para o sistema proposto e o sistema comercial, que actualmente é usado exhaustivamente por pesquisadores, cientistas, entre outros, para calcular a taxa de diluição a partir de imagens.

Entretanto, deve-se notar que além da grande semelhança nos resultados obtidos pelas abordagens citadas, o tempo médio que um técnico experimental necessita para realizar uma medição da taxa de diluição usando o sistema computacional proposto é de aproximadamente 10 segundos, enquanto usando o sistema comercial para a mesma medição esse tempo se eleva para aproximadamente 15 minutos na abordagem semi-automática, e cerca de 30 minutos na abordagem manual.



**Fig 8:** Resultados da taxa de diluição obtidos para as 42 amostras analisadas.

## 6 - CONCLUSÕES

A medição convencional da diluição exige demasiada atenção, perícia e precisão do operador, além de se tornar, quando realizado em série, um processo bastante cansativo e fastidioso, sendo por isso propício à obtenção de erros. O software comercial bastante utilizado por profissionais da área, considerado neste trabalho para efeitos de comparação, apresenta resultados em intervalos de tempo mais reduzidos, porém possui procedimentos complexos, além de não fornecer automaticamente o valor da diluição e falhar frequentemente na segmentação das amostras a analisar.

A fim de tornar a medição da diluição mais fácil, rápida, precisa e robusta a falhas de segmentação das imagens das amostras relativamente ao sistema comercial considerado, além de tornar o mesmo processo mais eficiente e menos enfadonho e dependente do operador em relação ao método convencional, desenvolveu-se neste trabalho um novo sistema computacional baseado no método de contornos activos bastante usado em Processamento e Análise de Imagens. Este método de segmentação de imagem foi assim integrado no sistema computacional desenvolvido de forma dedicada para a obtenção da diluição da solda de forma semi-automática a partir de imagens, obtendo excelentes resultados.

## REFERÊNCIAS

- S.W. Banovic, J.N. DuPont, A.R. Marder, Dilution Control in Gas-Tungsten-Arc Welds Involving Superaustenitic Stainless Steels and Nickel-Based Alloys, Metallurgical and Materials Transactions 32(6):1171-1176, 2001.
- V.H.C. Albuquerque, C.C. Silva, C.R. Moura, W.M. Aguiar, J.P. Farias, Effect of Nonmetallic Inclusion and Banding on the Success of the Two-Layer Temper Bead Welding Technique, Materials and Design 30:1068-1074, 2009.
- H. Ryuichi, I. Hiroshige, Effects of Base Material Dilution on the Corrosion Resistance of the Weld Joint of Super GAMMA System Stainless Steel, Current Advances in Materials and Processes 18(2):604, 2005.
- P. Crook, The Effects of Dilution Upon the Corrosion and Wear Properties of Cobalt-based Weld Overlays, Corrosion Science 35(1-4):647-653, 1993.
- A.D. Nadezhdin, T. Davison, Effects of Weld Dilution on Digester Weld Overlay, 11th International Symposium on Corrosion in the Pulp and Paper Industry, 2004.
- W. Callister, Materials Science and Engineering: An Introduction, John Wiley and Sons, 2006.
- C.C. Silva, V.H.C. Albuquerque, C.R. Moura, W.M. Aguiar, J.P. Farias, Evaluation of AISI 4140 Steel Repair without Post-Weld

- Heat Treatment, Journal of Materials Engineering and Performance 18(3):324-331, 2009.
- L. Beres, Proposed modification to Schaeffler diagram for chrome Equivalents and Carbon for more Accurate Prediction of Martensite Content, Welding Journal 77(7):273-276, 1998.
- M.E. Lee, S.Y. Park, W.H. Cho, S.H. Kim, Medical Image Segmentation using a Geometric Active Contour Model based on Level Set Method, Proceeding IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, 577-580, 2007.
- I.T. Pisa, Análise do Movimento da Parede do Ventrículo Esquerdo usando Modelo de Contorno Ativo em Imagens Ecocardiográficas com Color Kinesis, Dissertação de Mestrado apresentada na Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.