

INFLUÊNCIA DA ENERGIA DO PULSO LASER NA SOLDAGEM DE LIGA DE ZIRCÔNIO

Rubens Fernando Rezende
Centro tecnológico da Marinha em São Paulo – CTMSP
Fone: 3817-7272
e-mail: rf-rezende@uol.com.br

José Roberto Berretta
Centro tecnológico da Marinha em São Paulo – CTMSP
Fone: 3816-9307
berretta@ipen.br

Maurício David Martins das Neves
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN
Fone: 3816-9354
mdneves@ipen.br

Wagner de Rossi
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN
Fone: 3816-9307
wderossi@ipen.br

Nilson Dias Vieira Junior
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN
Fone: 3816-9301
nilsondv@ipen.br

Resumo. Ligas de zircônio são amplamente empregadas na indústria nuclear como material estrutural no núcleo de reatores nucleares. Atualmente, o zircaloy-4 é a liga de zircônio mais aplicada em componentes do elemento combustível de reatores nucleares refrigerados a água pressurizada, como os da usina nuclear de Angra dos Reis. Neste estudo, com o intuito de ampliar estes conhecimentos em soldagem a laser de ligas de zircônio, investigou a influência da variação da energia do pulso laser na solda ponto dos cruzamentos da grade espaçadora. Foram observados também os efeitos da contaminação da atmosfera protetora de soldagem pelo oxigênio no ponto de solda. As uniões geradas neste experimento foram investigadas por inspeção dimensional dos pontos de solda nos cruzamentos e a seção transversal destes pontos por microscopia óptica. Foram também realizadas medidas de microdureza Vickers. Os resultados revelaram que a variação da energia do pulso laser influencia nas dimensões do ponto de solda no cruzamento da grade espaçadora. O aumento da quantidade de oxigênio na atmosfera de proteção dá indícios de redução na eficiência do processo de soldagem.

Palavras-chave: soldagem laser, zircaloy, laser Nd:YAG.

1. INTRODUÇÃO

Ligas de zircônio são amplamente empregadas na indústria nuclear como material estrutural no núcleo de reatores nucleares ⁽¹⁾. Este fato se dá pelas características deste material: boas propriedades mecânicas, como resistência e ductilidade, boa condutividade térmica e elevada resistência à corrosão ⁽²⁾⁽³⁾. Sua característica mais importante, contudo, é a baixa seção de choque de absorção de nêutrons. Isto possibilita a manutenção por um longo período da estabilidade das propriedades físicas e químicas de materiais expostos à radiação no núcleo de um reator nuclear.

Atualmente, o zircaloy-4 é a liga de zircônio mais aplicada em componentes do elemento combustível de reatores nucleares refrigerados a água pressurizada, como os da usina nuclear de Angra dos Reis. Entre os principais componentes estão a vareta combustível e as grades espaçadoras. A usina de Angra II, a título de exemplo, tem o núcleo de seu reator formado por 193 elementos combustíveis constituídos de 256 varetas combustíveis e 7 grades espaçadoras ambas feitas de zircaloy-4.

Na fabricação de um elemento combustível existem, aproximadamente, 4100 juntas a serem soldadas. Na montagem das grades espaçadoras, figura 1, as juntas de cruzamento concentram aproximadamente 76% destas uniões. Este é o tipo de junta que será abordado neste trabalho.

Hoje, as Indústrias Nucleares do Brasil (INB) vêm fabricando o elemento combustível de Angra II utilizando a tecnologia repassada pelo acordo Brasil-Alemanha. A técnica utilizada especialmente na soldagem laser das grades espaçadoras, apenas reproduz o conhecimento transmitido pelos técnicos alemães. Elas são realizadas no Laboratório de Desenvolvimento e Instrumentação de Combustível Nuclear (LADICON) do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP).

O presente estudo, com o intuito de ampliar estes conhecimentos em soldagem a laser de ligas de zircônio, investigou a influência da variação da energia do pulso laser na solda ponto dos cruzamentos da grade espaçadora. Foram observados também os efeitos da contaminação da atmosfera protetora de soldagem pelo oxigênio no ponto de solda.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material utilizado para a investigação foi o zircaloy-4 com a composição química ⁽⁴⁾ apresentada na tabela 1. Este material em chapas de 0,5 mm de espessura foi fornecido pela INB, montado na geometria da grade espaçadora, conforme mostrado na figura 1.

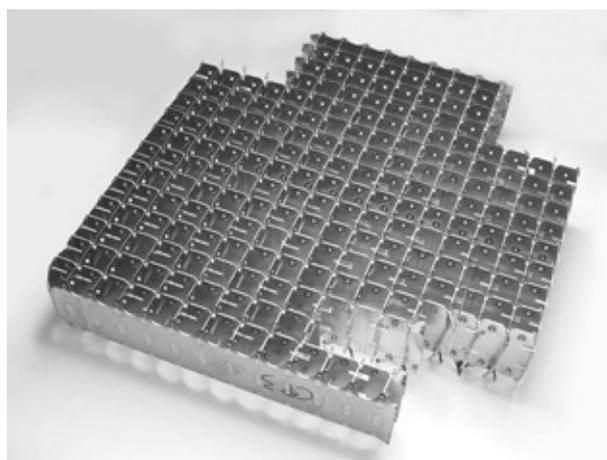


Figura 1 - Grade espaçadora fornecida pela INB

Tabela 1 - Composição química em % peso do Zircaloy-4

Zr	Sn	Fe	Cr	O	Hf	Fe+Cr
balanço	1,20-1,70	0,18-0,24	0,07-0,13	0,09-0,16	0,01 (max)	0,26-0,37

O laser utilizado foi o de Nd:YAG pulsado, marca Lasag, modelo KLS-322, acoplado a um sistema de deslocamento com 4 eixos programáveis, contendo uma câmara de soldagem com sistema de injeção e exaustão de gás e um sistema de monitoramento de oxigênio no interior da câmara. As soldas foram realizadas nos cruzamentos da grade espaçadora. O parâmetro investigado foi a energia do pulso laser e a contaminação da atmosfera de proteção no ponto de solda. Para se medir a influência deste parâmetro foram unidos 10 pontos por solda laser autógena para cada uma das três condições de energias escolhidas para o estudo. Os demais parâmetros foram mantidos constantes. Para se avaliar a contaminação da atmosfera por oxigênio utilizou-se a condição da amostra 2 e variou-se a quantidade de oxigênio na atmosfera de proteção, conforme mostra a tabela 2.

As uniões geradas neste experimento foram investigadas por inspeção dimensional dos pontos de solda nos cruzamentos e a seção transversal destes pontos por microscopia óptica. Foram também realizadas medidas de microdureza Vickers.

A inspeção dimensional foi realizada medindo-se as duas diagonais dos pontos de solda nos cruzamentos com um paquímetro com precisão de 0,02 mm.

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem utilizados no experimento

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
<u>Parâmetros do laser</u>				
Energia do pulso (J)	10,8	11,3	11,8	11,3
Tempo do pulso (ms)	7	7	7	7
Taxa de repetição (Hz)	18	18	18	18
<u>Parâmetros do processo</u>				
Tempo de exposição ao feixe laser (s) (tempo de soldagem)	1,5	1,5	1,5	1,5
Atmosfera de proteção	Ar (puro)	Ar (puro)	Ar (puro)	Ar (puro)
Contaminação da atmosfera de proteção por Oxigênio (ppm)	< 20	< 20	< 20	>100
Lente de focalização com 150 mm de comprimento focal				
O foco do feixe laser foi posicionado na superfície do material				

As seções transversais dos pontos de solda foram obtidas em duas posições diferentes de cruzamento para cada tipo de amostra, figura 2. Estas seções foram preparadas por processo metalográfico e sua estrutura metalúrgica foi revelada por ataque químico. A solução utilizada foi: 45% de água, 45% de ácido nítrico e 10% de ácido fluorídrico. As amostras foram imersas nesta solução por 25 segundos e posteriormente lavadas.

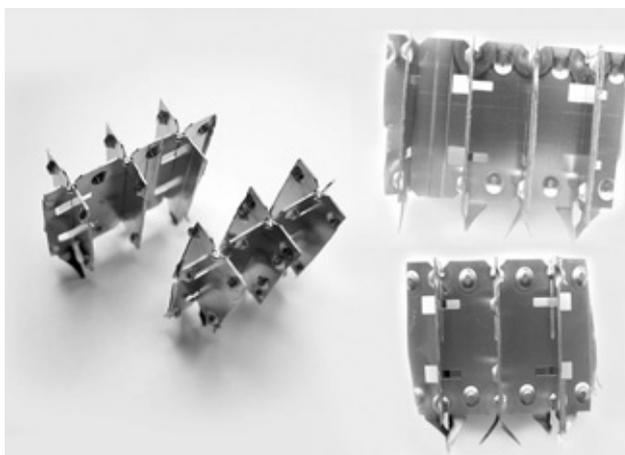


Figura 2 - Amostras de cruzamentos retiradas da grade para análise do ponto de solda

Na observação por meio de microscópio óptico da seção transversal investigou-se a geometria e dimensões da zona de fusão (ZF) e da zona termicamente afetada (ZTA), conforme apresentado esquematicamente na figura 3. A microestrutura também foi observada, com o auxílio de luz polarizada. Os equipamentos utilizados foram um microscópio óptico marca Leica, modelo MDLP e uma lupa estereoscópica marca Nikon, modelo SMZ-2.

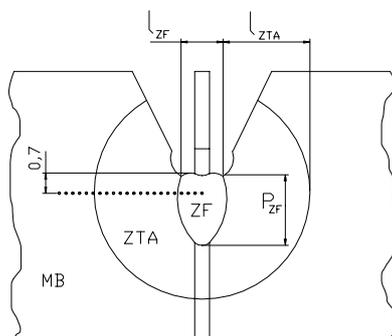


Figura 3 - Desenho esquemático mostrando as dimensões medidas na seção transversal das amostras e a localização das medidas de microdureza.

A microdureza Vickers, para avaliação do ponto de solda e da zona termicamente afetada, foi feita com uma carga de 50 gramas a uma profundidade de 0,7 mm e passo de 0,2 mm conforme mostrado esquematicamente na figura 3.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foi realizada a inspeção dimensional dos pontos de solda pela medida das duas diagonais. Na tabela 3 é apresentada a média das medições de 10 pontos para cada condição de soldagem. Observou-se que, com o aumento de energia de pulso, ocorreu um aumento nas dimensões do ponto. Notou-se também que a contaminação por oxigênio da atmosfera de proteção reduziu as dimensões do ponto de solda indicando uma possível influência negativa no processo.

Tabela 3 - Dimensão média da diagonal dos pontos de solda

	Am 01	Am 02	Am 03	Am 04
Dimensão do ponto (mm)	$2,00 \pm 0,02$	$2,09 \pm 0,02$	$2,17 \pm 0,02$	$1,99 \pm 0,02$

Na figura 4 é mostrada a seção transversal dos pontos de solda para cada condição de soldagem obtidas em lupa estereoscópica. A zona termicamente afetada apresentou geometria circular, típica de propagação de calor gerada por uma fonte pontual.

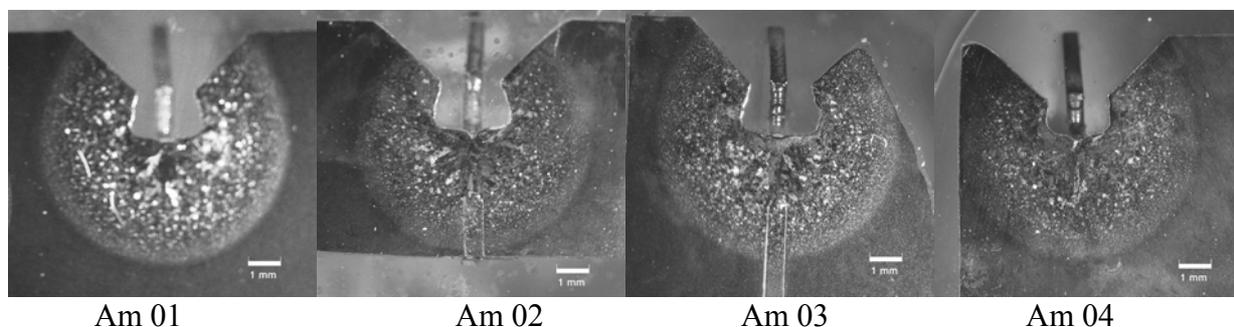


Figura 4 - Macrografia da seção transversal dos pontos de solda

Na inspeção dimensional feita na seção transversal foi observado novamente o mesmo fenômeno: aumento nas dimensões da ZF e ZTA gerado pelo aumento de energia de pulso. A

profundidade de penetração não apresentou uma tendência clara. Os valores obtidos são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Dimensões da ZF e ZTA obtidas na seção transversal do ponto de solda

	Am 01	Am 02	Am 03	Am 04
P_{zf} (mm)	2,01	2,01	2,23	2,12
l_{zf} (mm)	2,23	2,33	2,49	2,01
l_{zta} (mm)	2,01	2,17	2,65	2,07

A observação no microscópio óptico revelou uma ZF com grãos grosseiros típicos de zona bruta de fusão, com grãos orientados na direção de maior extração de calor. A zona termicamente afetada possui dimensões de aproximadamente 2,3 mm. Nesta região ocorreu o crescimento dos grãos. Acredita-se que este fato ocorreu principalmente pelo tempo de soldagem (tempo de exposição à fonte laser). No material de base, produzido por laminação a frio seguida por tratamento térmico de recozimento, foi observado uma estrutura de grãos refinados, como mostra a figura 5.

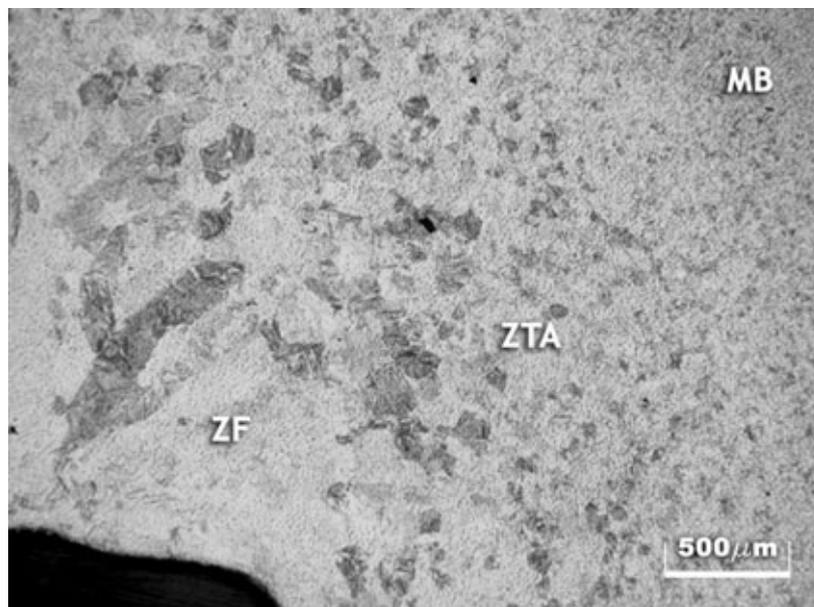


Figura 5 - Microscopia óptica da seção transversal da amostra Am 01.

O zircaloy-4 quando soldado é aquecido localmente a uma temperatura superior a 975°C. Isto induz as transformações de fase durante o ciclo de aquecimento e de resfriamento. A estrutura formada, como resultado deste ciclo térmico, depende das taxas de resfriamento. Em altas taxas de resfriamento a fase beta do zircaloy transforma-se em uma microestrutura do tipo de widmanstätten, mais finas do que uma estrutura martensítica⁽⁵⁾. Esta ocorrência pode ser observada na figura 6, tanto na amostra Am 02 como na Am 04. Na amostra Am 04, que possui uma maior quantidade de oxigênio na atmosfera, deve conter maior quantidade de precipitados, que não foram detectados pelas técnicas de análise microestrutural utilizadas. Na literatura^{(6) (7)} é comum a presença de precipitados da fase ferro-cromo no Zircaloy-4.

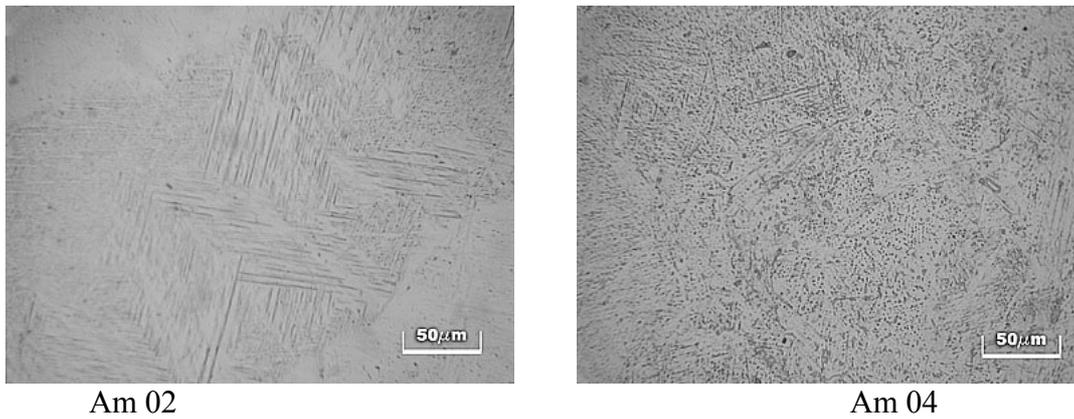


Figura 6 – Micrografia óptica da zona de fusão

As medidas de microdureza feitas nas amostras com atmosfera controlada (oxigênio < 20 ppm), figura 7, mostram que a energia do pulso laser não influencia no perfil de dureza do ponto de solda. Observou-se também que o processo de solda laser, dentro das condições utilizadas, não interfere na dureza do material, que mantém seus valores dentro de uma faixa de dispersão, entre 200 e 250 Hv, em todas as regiões que compõe a união (ZF, ZTA e MB).

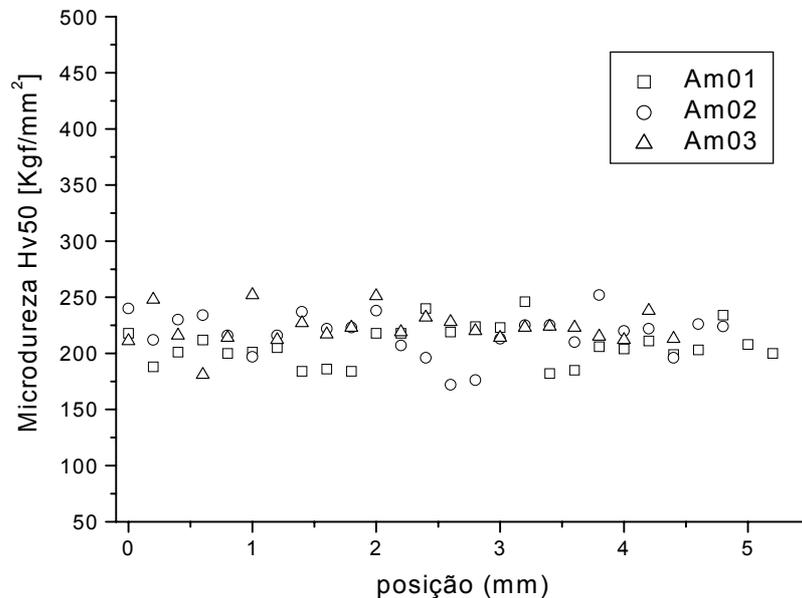


Figura 7 - Microdureza Vickers nas amostras soldadas com atmosfera controlada (oxigênio <20 ppm)

No comparativo entre as medidas de microdureza das amostras soldadas em condições diferentes de atmosfera de proteção, como mostra a figura 8, ocorreu um aumento na dureza na amostra Am 04 até valores de 300 Hv. A amostra 04 foi soldada com mais 100 ppm de oxigênio na atmosfera de proteção, o que reforça os indícios de uma influência negativa desta condição de contaminação no processo.

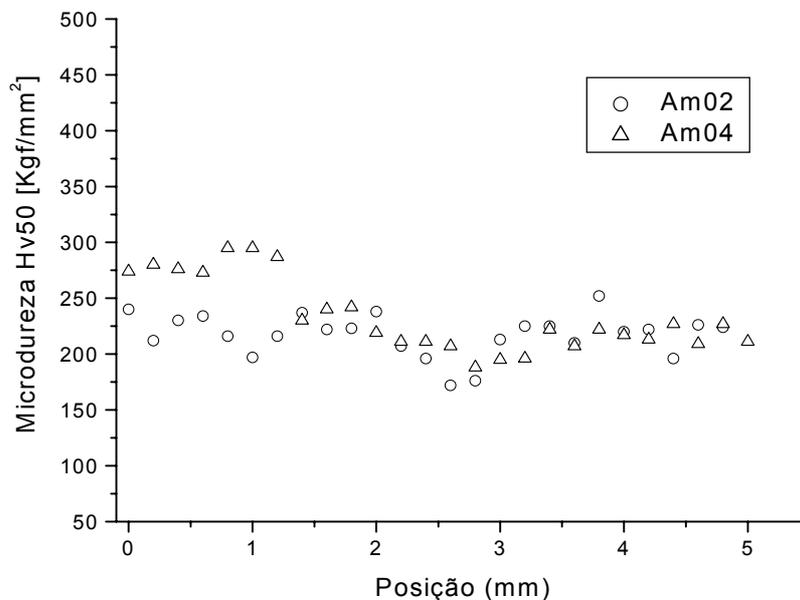


Figura 8 – Microdureza Vickers de amostras soldadas em diferentes condições de atmosfera

4. CONCLUSÕES

A variação da energia do pulso laser influencia nas dimensões do ponto de solda no cruzamento da grade espaçadora. O aumento da energia gera aumento nas dimensões da zona de fusão e da zona termicamente afetada.

Nas condições analisadas observa-se que a variação da energia de soldagem não altera os valores de microdureza Vickers.

O aumento da quantidade de oxigênio na atmosfera de proteção dá indícios de redução na eficiência do processo de soldagem. Oxigênio em quantidade acima de 100 ppm reduz as dimensões do ponto de solda e aumenta os valores de microdureza na zona de fusão.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Indústrias Nucleares do Brasil, em especial ao Sr. Erwin Beck, pelo fornecimento do material, ao CNPq e ao Instituto Fábrica do Milênio pelo aporte financeiro, ao Laboratório de Fenômenos da Superfície – USP por permitir o uso de sua infraestrutura para as medidas de dureza, ao IPEN e CTMSP por permitir a realização deste trabalho em suas dependências.

6. REFERÊNCIAS

- GUTSMIEDL, E.; SCHEUER, A. Use of Zircaloy 4 material for the pressure vessels of hot and cold neutron sources and beam tubes for research reactors. **Physica B**. n. 311, p. 182–190, 2002.
- COX, B. Some thoughts on the mechanisms of in reactor corrosion of zirconium alloys. . **J. Nuclear Materials**. n. 336, p. 331-368. 2005.
- WAN, Q.; BAI, X.; ZHANG, X. Impact of high dose krypton ion irradiation on corrosion behavior of laser beam welded zircaloy-4. **Materials Research Bulletin**. n. 41, p. 387-395, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B 352-97**. Standard specification for zirconium and zirconium alloy sheet, strip and plate for nuclear application. United States, 1997. 6 p.
- OLMEDO, A. M. Microstruture of the weld region in resistance welded zircaloy 4. **J. Materials Science Letters**. n. 15, p. 1050-1051, 1980.

- 6 **Metals Handbook**, Metallographic Techniques and Microstructures. ASM. ed. 9, v. 9, p. 496-502. 1993.
- 7 MASSIH, A. R.; ANDERSSON, T., et al. Effect of quenching rate on the b to a phase transformation structure in zirconium alloy. **J. Nuclear Materials**. n. 322, p. 138-151. 2003.

INFLUENCE OF LASER PULSE ENERGY IN WELDING OF ZIRCONIUM ALLOY

Rubens Fernando Rezende
Centro tecnológico da Marinha em São Paulo – CTMSP
Fone: 3817-7272
e-mail: rf-rezende@uol.com.br

José Roberto Berretta
Centro tecnológico da Marinha em São Paulo – CTMSP
Fone: 3816-9307
berretta@ipen.br

Maurício David Martins das Neves
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN
Fone: 3816-9354
mdneves@ipen.br

Wagner de Rossi
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN
Fone: 3816-9307
wderossi@ipen.br

Nilson Dias Vieira Junior
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN
Fone: 3816-9301
nilsondv@ipen.br

Abstract: *Zirconium alloys have been widely used as structural element in the core of nuclear reactors. Nowadays, zircaloy-4 is the main zirconium alloy used in components of the fuel elements used in nuclear reactors cooled by pressurized water, like Angra nuclear plant. The aim of this work was to study laser welding of zircaloy-4 by investigating the influence of laser pulse energy variation in spot weld of crossing parts of the spacing grating. It was also observed the effect of oxygen contamination in the protective atmosphere on the spot weld. The weld junctions were dimensionally measured in the crossing points and their cross sections were examined by optical microscopy and hardness measurements. The results showed that the laser pulse energy variation play an important role in the spot-weld dimensions. The increase in the oxygen content in the protective atmosphere apparently reduces the welding process efficiency.*

Keywords: *laser welding, zircaloy, Nd:YAG laser.*