

INFLUÊNCIA DE CARREGAMENTOS CÍCLICOS NAS TENSÕES RESIDUAIS INTRODUZIDAS POR SHOT PEENING EM JUNTAS SOLDADAS DE TUBULAÇÃO

Maria da Penha Cindra Fonseca (cindra@metalmat.ufrj.br)¹

Joel Regueira Teodósio (teodosio@metalmat.ufrj.br)¹

João Marcos Alcoforado Rebelo (jmarcos@metalmat.ufrj.br)¹

António Barata Correia da Cruz (accruz@isq.pt)²

- 1- Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ - Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, C.P. 68505 – CEP21945-970 – Rio de Janeiro – Brasil
- 2- Instituto de Soldadura e Qualidade – ISQ, Taguspark, Apartado 119, 2781 Oeiras Codex, Portugal

Resumo

Foi estudado o comportamento das tensões residuais de compressão introduzidas por shot peening em juntas soldadas de tubulação de aço API 5L X-70, durante ciclos de fadiga. Foram analisados os encontros dos cordões de solda de fabricação do tubo com os cordões de solda circunferenciais de montagem da tubulação. Os ensaios de fadiga controlada por tensão foram feitos com cargas equivalentes a 60%, 70% e 80% do limite de escoamento do metal de base. As tensões residuais foram medidas por difração de raios-X, com os métodos de $\sin^2\psi$ e o de dupla exposição. Verificou-se que para carga de 60% do limite de escoamento, as tensões de compressão permanecem estáveis para um elevado número de ciclos até a fratura, enquanto que para 80% são aliviadas e tornam-se de tração para um baixo número de ciclos. Para cargas de 70% do limite de escoamento houve alívio parcial das tensões de compressão.

Palavras-chave: tensões residuais, fadiga, shot peening.

1. Introdução

A resistência mecânica, particularmente a resistência à fadiga das estruturas e equipamentos, depende entre outros fatores, do estado de tensões residuais nas camadas superficiais do material.

A falha por fadiga não era um problema usualmente associado às tubulações de gasodutos e oleodutos. Entretanto, a utilização dos aços de alta resistência, tem levado a um aumento dos níveis de tensão em operação e, conseqüentemente, a uma necessidade de maiores estudos nesta área (James *et Al.*, 1971).

Geralmente considera-se que, os campos de tensões residuais de tração facilitam o surgimento e a propagação de trincas de fadiga, enquanto que os campos de tensões residuais de compressão dificultam o surgimento destas trincas (Wanab & Nguyen, 1994 e Gurney, 1977).

As tensões residuais são tensões auto-equilibradas existentes nos materiais em condições de temperatura uniforme e sem carregamento externo. Tais tensões são sempre produzidas, se regiões de um material sofrem deformação plástica ou elástica heterogêneas [4]. As tensões residuais existem em praticamente todas as peças rígidas, metálicas ou não. Elas são o produto da história metalúrgica e mecânica de cada ponto da peça ou da peça como um todo e, geralmente, surgem durante os tratamentos mecânicos, termomecânicos e térmicos dos processos de fabricação (Lu *et Al.*, 1994 e Benning, 1989).

O método de shot peening de tratamento superficial dos metais é largamente utilizado para aumentar a resistência à fadiga. Este aumento da resistência à fadiga é explicado considerando que na camada superficial do material, durante o jateamento, surgem tensões residuais de compressão. As tensões residuais diminuem o nível das tensões de tração aplicadas e, conseqüentemente aumentam o limite de resistência à fadiga do material (Esterman *et Al.*, 1996). Considerando que as trincas de fadiga não se iniciam ou se propagam em uma zona de tensões de compressão, o tratamento superficial por shot peening produziria considerável aumento na sobrevida em fadiga da estrutura ou do componente (Diepart, 1994).

Neste trabalho, analisa-se a evolução de estado de tensões residuais compressivas, introduzidas por shot peening, em juntas soldadas de tubulação de aço API5LX-70, durante o desenvolvimento de ciclos de fadiga. Foram analisados os encontros das juntas soldadas de fabricação do tubo com as juntas soldadas circunferenciais de montagem da tubulação.

2. Materiais e Métodos

No presente trabalho foi usado o aço de alta resistência e baixa liga (ARBL), fabricado conforme a norma API 5L X-70, por laminação a quente, usado em tubulação de gasodutos. A composição química e as propriedades mecânicas do aço são apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Composição química, especificada e analisada, do aço (% em peso).

Máximo	C	Mn	P	S	Nb	Ti	V	Ni
Chapa – Norma API 5L X70	0,076	1,512	0,016	0,002	0,048	0,018	0,046	-
Chapa – analisada	0,07	1,54	0,010	0,002	0,048	0,019	0,042	0,025
Metal de Solda Longitudinal	0,06	1,71	0,028	0,010	0,030	0,010	0,029	0,026
Metal de Solda Circunferencial	0,06	1,19	0,009	0,009	0,010	0,008	0,014	0,024

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço.

	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
Norma API 5L X70	575	637	40

A soldagem longitudinal dos tubos foi feita pelo processo de arco submerso, com três arames e três fontes em um passe interno e outro externo. A soldagem circunferencial da tubulação foi executada com parâmetros qualificados, semelhantes aos usualmente utilizados na montagem de campo de gasodutos, compreendendo um passe de raiz executado pelo processo TIG e subsequentes passes de enchimento realizados pelo processo de soldagem com eletrodo revestido.

Antes do tratamento de shot peening, foi realizado um tratamento térmico de alívio de tensões a 620°C, por 2 horas, em forno a vácuo, com posterior arrefecimento no forno. O processo de shot peening foi realizado utilizando uma intensidade Almen de 0,016A e cobertura de 200%.

Após o shot peening as tensões residuais foram medidas para verificação do estado inicial, antes dos carregamentos em fadiga e estes valores equívalem a N=0 nos gráficos apresentados.

Os ensaios de fadiga foram realizados a tração-tração. Utilizou-se uma máquina servo-hidráulica, com capacidade dinâmica de 250kN, à temperatura ambiente, em atmosfera normal de laboratório, em carregamento controlado com onda em forma senoidal, razão de carga de 0,1,

com frequência de 10Hz e interrompidos para a medição das tensões, conforme os parâmetros apresentados na Tabela 3.

As tensões residuais foram medidas por difração de raios-X, pelos métodos de $\text{sen}^2\psi$ e de dupla exposição, utilizando radiação $\text{CrK}\alpha$. A figura 1 mostra os pontos, no metal de base (MB), na zona termicamente afetada (ZTA), no metal de solda (MS) e as direções de medição das tensões residuais (L - direção longitudinal e T - direção transversal ao corpo de prova). As medições de tensões foram sempre realizadas com o corpo de prova descarregado, após a aplicação do número correspondente de ciclos.

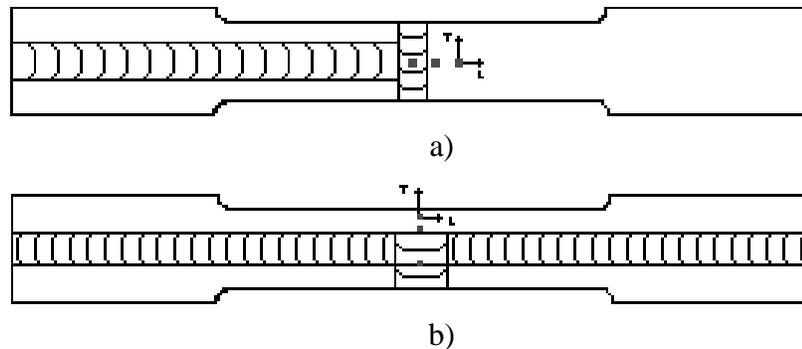


Figura 1 – Esquema dos corpos de prova contendo encontros de cordões de solda.

- a) encontro do cordão de solda de fabricação do tubo longitudinal, com o cordão de solda circunferencial de montagem da tubulação, transversal ao corpo de prova.
- b) encontro do cordão de solda de montagem da tubulação longitudinal, com o cordão de solda de fabricação do tubo, transversal ao corpo de prova.

Tabela 3 – Parâmetros dos ensaios de fadiga.

Corpo de prova	Tensão (MPa) - %LE	$F_{\text{máx}}$ (kN)	F_{min} (kN)	$F_{\text{méd}}$ (kN)	F_{alt} (kN)	Frequência f (Hz)
A (b)	322 – 56%	57	5,7	31	27	10
	345 – 60%	62	6,2	34	28	10
B (b)	403 – 70%	47	4,7	26	21	10
	460 – 80%	53	5,3	29	24	10
C (a)	247 – 43%	45	4,5	25	20	10
	345 – 60%	62	6,2	34	28	10
D (a)	460 – 80%	72	7,2	40	32	10
E (a)	403 – 70%	59	5,9	32	26	10

3. Resultados e Discussões

O primeiro corpo de prova testado, CpC, foi inicialmente submetido à fadiga até 2.000.000 de ciclos, usando um nível de carga equivalente à 43% do limite de escoamento do material de base. Os ensaios de fadiga foram interrompidos para medição das tensões residuais superficiais. As tensões residuais não apresentaram nenhuma variação significativa em nenhum dos pontos medidos (fig.2), razão pela qual a tensão usada para cálculo do carregamento foi aumentada para 60% do limite de escoamento do material, permanecendo inalterados os demais parâmetros de ensaio.

Os ensaios continuaram e verificou-se que as tensões começaram a sofrer algumas alterações consideráveis quando atingiu 3.000.000 de ciclos e somente na direção longitudinal (fig.3).

A fratura ocorreu na região do encontro dos cordões de solda. O corpo de prova fraturou com 3.380.500 ciclos de fadiga.

Simultaneamente ao CpC, foi testado o CpA. Foi utilizado um nível de carga maior e equivalente a 56% do limite de escoamento do material. Os ensaios de fadiga foram interrompidos para medição das tensões residuais superficiais. Entretanto, verificou-se após 2.000.000 de ciclos de fadiga que as tensões residuais não sofreram alterações relevantes, (fig. 4). Então, o nível de carga foi ajustado para 60% do limite de escoamento do material, permanecendo os demais parâmetros inalterados.

O corpo de prova CpA rompeu a 2.716.000 ciclos fora da zona útil. As tensões, que estavam sendo medidas na região do encontro dos cordões, permaneceram nos mesmos níveis, isto é, não se modificaram (fig. 5).

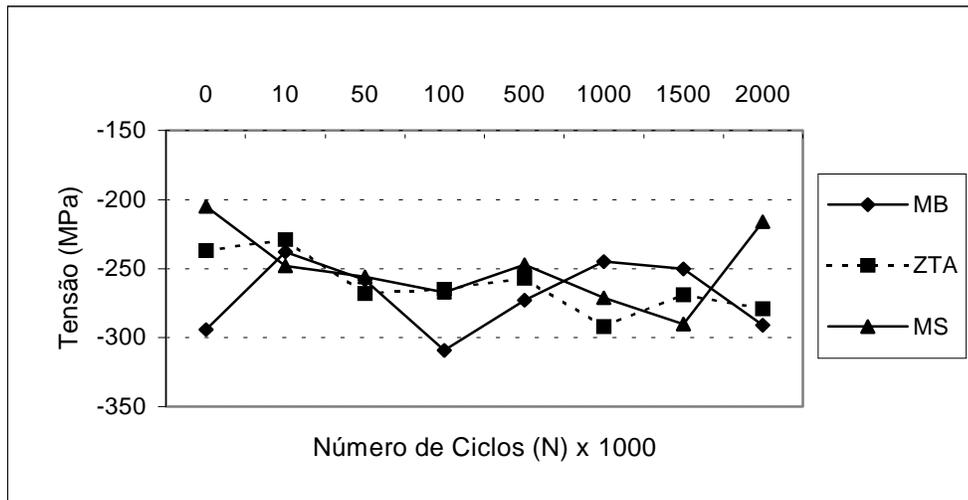


Figura 2 – Evolução das tensões residuais longitudinais, no corpo de prova CpC, com carga equivalente a 43% do limite de escoamento do material de base.

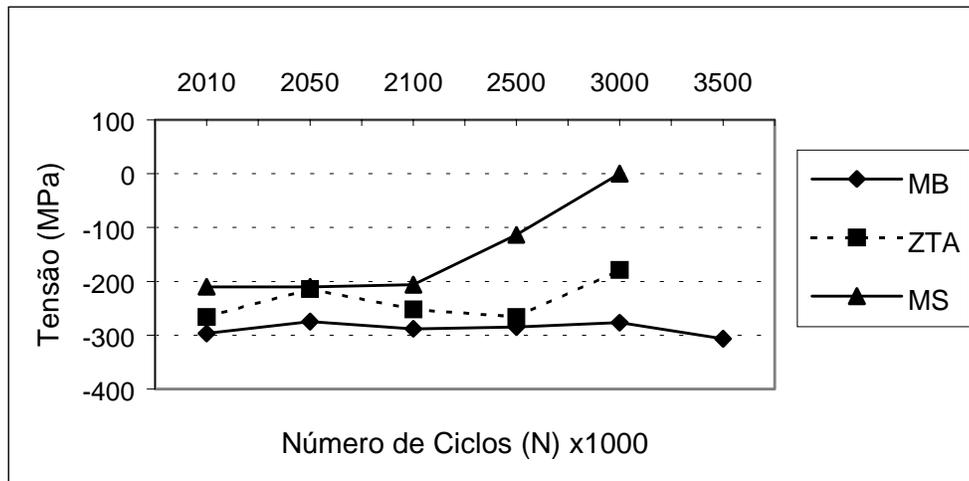


Figura 3 – Evolução das tensões residuais longitudinais no corpo de prova CpC, com carga equivalente a 60% do limite de escoamento do material de base, até a fratura.

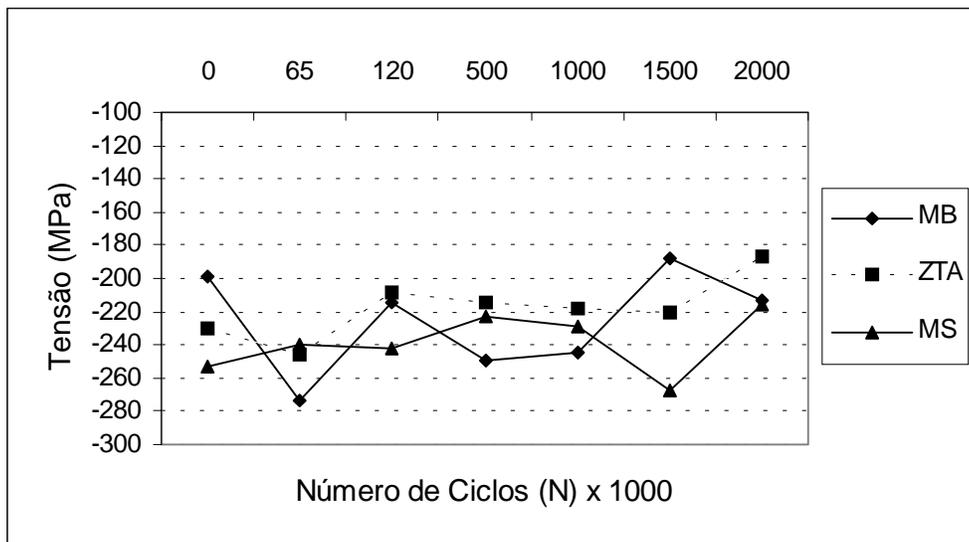


Figura 4 – Evolução das tensões residuais longitudinais, no corpo de prova CpA, com carga equivalente a 54% do limite de escoamento do material de base.

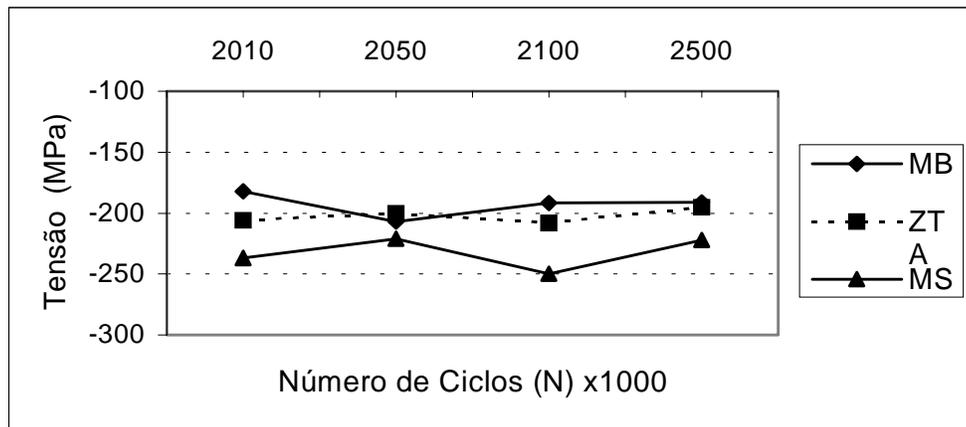


Figura 5 – Evolução das tensões residuais longitudinais, no corpo de prova CpA, com carga equivalente a 60% do limite de escoamento do material de base, até a fratura.

Após estes resultados e usando como referência os valores de tensão usados nos testes dos gasodutos, optou-se por usar cargas equivalentes a 80% do limite de escoamento do material. As tensões residuais modificaram-se abruptamente e o corpo de prova fraturou na região do encontro dos cordões, onde as tensões estavam sendo medidas, com apenas 69.000 ciclos de fadiga (corpo de prova CpD, fig 6).

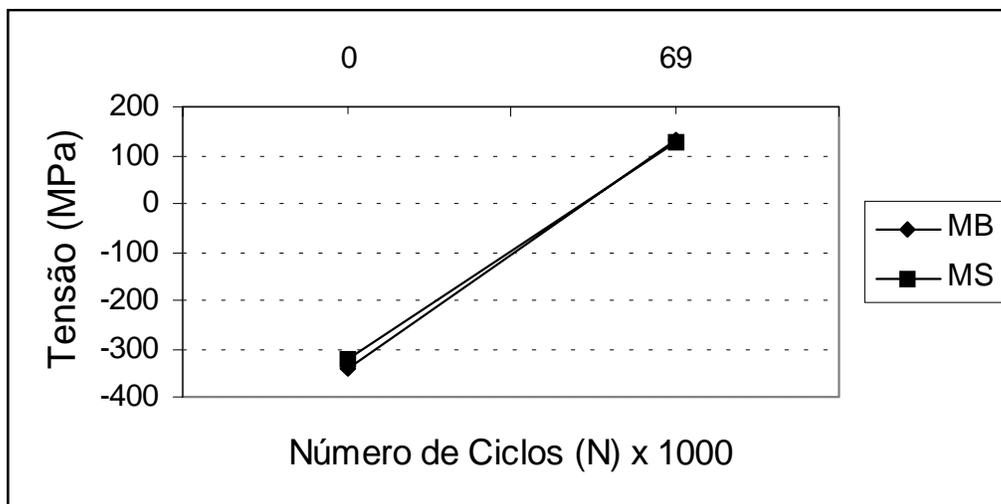


Figura 6 – Evolução das tensões residuais no corpo de prova CpD com carga equivalente a 80% do limite de escoamento do material de base, até a fratura.

Dois novos corpos de prova foram então testados utilizando-se um nível de carga intermediário e equivalente a 70% do limite de escoamento do material, a fim de possibilitar uma variação não tão lenta quanto a 60% do LE utilizada inicialmente, e menos lenta que os 80%. Estes corpos de prova (CpB e CpE - fig.7 e fig.8), tiveram um comportamento completamente diferentes entre si. O primeiro resistiu a cerca de 3.000.000 de ciclos de fadiga, enquanto que o

segundo suportou apenas 450.000 ciclos, fraturando na zona dos encontro dos cordões, onde as tensões residuais estavam sendo medidas.

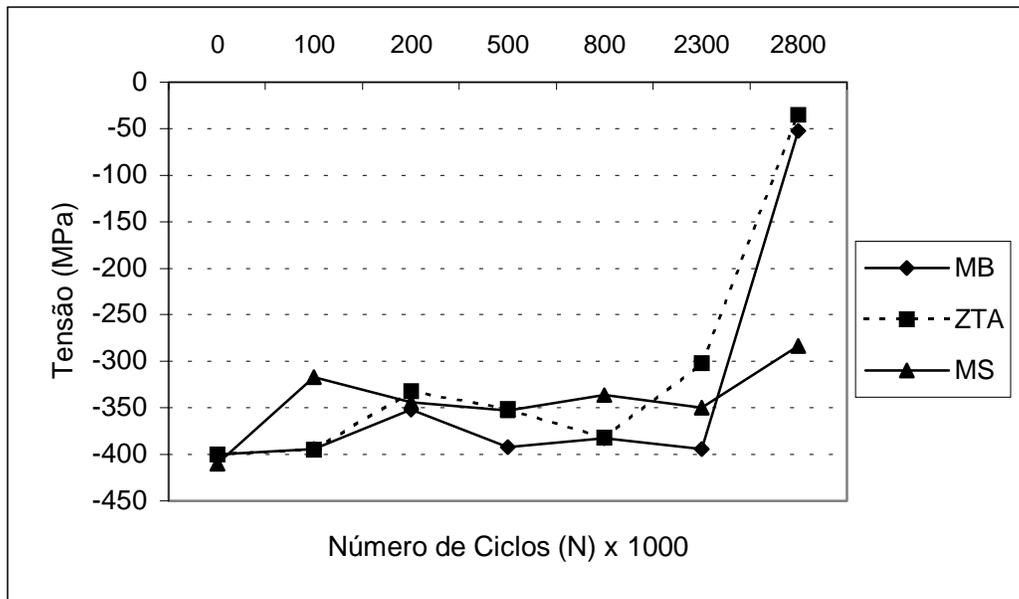


Figura 7 – Evolução das tensões residuais no corpo de prova CpB, com carga equivalente a 70% do limite de escoamento do material de base, até a fratura.

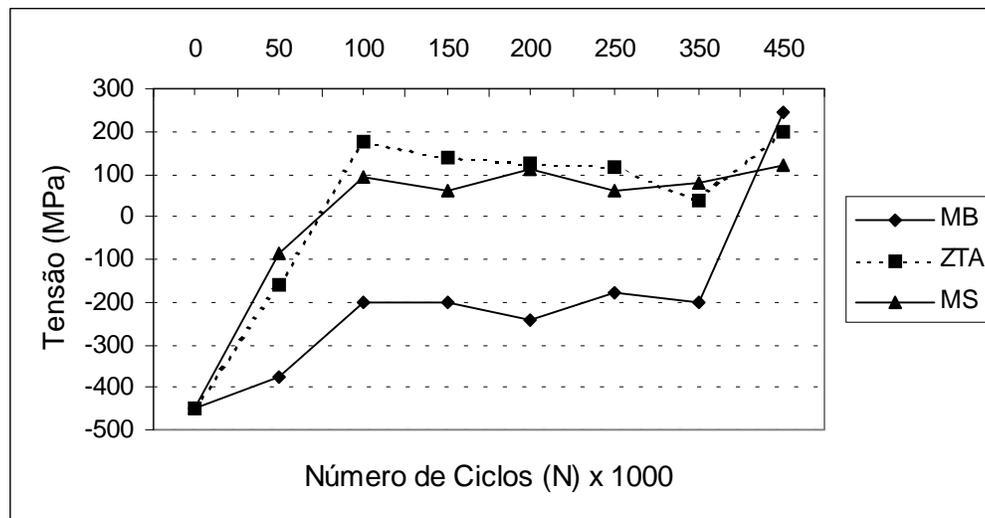


Figura 8 – Evolução das tensões residuais no corpo de prova CpE, com carga equivalente a 70% do limite de escoamento do material de base, até a fratura.

4. Conclusões

Foi analisado o comportamento das tensões residuais de compressão introduzidas por shot peening em juntas soldadas de tubulação de aço API5LX-70, durante o desenvolvimento de ciclos de fadiga, em corpos de prova contendo o encontro de cordões de solda de fabricação do tubo com os cordões de solda circunferenciais de montagem da tubulação. Os resultados indicam que:

1. Para cargas tração-tração equivalentes a 60% do limite de escoamento do metal de base, as tensões residuais permanecem compressivas e estáveis para um elevado número de ciclos, até a fratura;
2. Para cargas tração-tração equivalentes a 80% do limite de escoamento do metal de base, as tensões residuais compressivas tornam-se de tração, para um pequeno número de ciclos;
3. Para cargas tração-tração equivalentes a 70% do limite de escoamento do metal de base, as tensões residuais permanecem compressivas, mas diminuem de valor absoluto durante o desenvolvimento dos ciclos de fadiga.

6. Referências Bibliográficas

- 1) Benning, I.O. 1989, "Non-destructive determination of Load and Residual Stresses by the X-ray stress method", The Rigaku Journal, v. 6, n. 2.
- 2) Diepart, C.P., 1994, "Modelling of Shot Peening Residual Stresses - Practical Applications", Materials Science Forum v. 163-165, pp. 457-464.
- 3) Esterman, M., Navares, I.M., Ishii, K., Nelson, D.V., 1996, "Robust Design for Fatigue Performance: Shot Peening". In: Proceedings of the 1990 ASME Engineering Technical Conference and Computers on Experimental Mechanics Engineering, Irvine, USA.
- 4) Gurney, T.R., 1977, "Some Recent Work relating to the Influence of Residual Stresses on Fatigue Strength", International Conference on Residual Stress in Welded Construction and their Effect, v. 1, pp.151-164, London.
- 5) James, D.P., Edward, D.C., Christian, J.R., 1971, Proc. Conf. "Improving Welded Product Design" The Welding Institute, 16-18 Nov, v.1.
- 6) Lu, J., Bouhelier, C., Lieurade, H.P., et al., 1994, "Study of Welding Residual Stress Using The Step-by-Step Hole Drilling and X-Ray Diffraction Method", Welding in the World, v. 33, n. 2, pp. 16- 26.
- 7) Macherauch, E., Kloos, K. H., 1987, "Origin, Measurements and Evaluation of Residual Stress in Science and Technology" Ed. By E. Macherauch, V. Hauk, DGM Verlag.
- 8) Wanab, M. A., Nguyen, T. N., 1994, "Effect of Residual Stresses Produced by Mechanical Means on the Fatigue Life of Welded Structures". Second Australian International Conference on Surface Engineering, Coatings and Surface Treatments in Manufacturing, Adelaide, Austrália.