

# O Processo de Jateamento como Via para Melhorar a Resistência à Fadiga e à Corrosão de Juntas Soldadas: uma Revisão (Parte I: ligas de alumínio e outros materiais)

(Peening Process as a Way to Improve Welded Joint Fatigue and Corrosion Strengths: a Review (Part I: Aluminum alloys and other materials))

Daniel Benítez Barrios<sup>1</sup>, Miguel Angel Calle Gonzales<sup>2</sup>, Edvaldo Angelo<sup>1</sup>, Edison Gonçalves<sup>2</sup>, Arnaldo H. Paes de Andrade<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Presbiteriana Mackenzie, Depto de Engenharia Mecânica, Grupo de Simulação Numérica (GSN), São Paulo, SP, Brasil, danielbb@mackenzie.com.br

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo, Depto de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Centro de Estruturas Navais e Oceânicas (CENO), São Paulo, SP, Brasil, mcallegonzales@gmail.com

<sup>3</sup>Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM) São Paulo, SP, Brasil, aandrade@ipen.br

## Resumo

*As juntas soldadas, devido à existência de tensões residuais e uma microestrutura heterogênea, são consideradas pontos críticos para a resistência estrutural, principalmente quando há presença de carregamentos cíclicos. Depois de concluído o processo de união das peças, aparecem tensões residuais de tração na região da solda, fazendo com que as tensões resultantes nesta região sejam somente de tração, ainda que o carregamento cíclico aplicado seja parcialmente de compressão. A resistência à fadiga das juntas soldadas pode ser consideravelmente melhorada se as tensões residuais de tração são eliminadas ou pelo menos reduzidas. Isto pode ser alcançado pela introdução de um campo de tensões residuais de compressão na região da solda. Existem vários métodos para conseguir isto. Uma das técnicas mais empregadas na prática da engenharia é a do jateamento, um processo de trabalho à frio que deforma plasticamente a superfície, impactando-a com uma ferramenta ou com um jato de pequenas esferas. Este método é capaz de introduzir elevadas tensões residuais de compressão da ordem da tensão limite de escoamento do material, o que leva a uma melhora significativa na resistência à fadiga para diferentes materiais. Este trabalho menciona, em primeiro lugar, as diversas técnicas de introdução de tensões residuais de compressão por meio do jateamento. A continuação é abordada, de forma mais detalhada, numa revisão de trabalhos dos últimos 30 anos acerca do aumento nas resistências à fadiga e à corrosão de juntas soldadas quando empregada a técnica do jateamento, sendo que, esta primeira parte compreende a sua aplicação para ligas de alumínio e outros materiais não ferrosos enquanto a segunda parte compreende a sua aplicação para aços e suas ligas.*

**Palavras-chave:** juntas soldadas; jateamento; resistência à fadiga; resistência à corrosão.

**Abstract:** *Welded joints are often critical points for structural strength under cyclic loading because of their high stresses and heterogeneous microstructure. As a result of the welding process, high tensile residual stresses exist in as-welded joints in the region of the weld. Therefore, the applied stresses become wholly tensile in the weld region, caused by the superposition effect, even if the applied stress cycles are partly compressive. Improvement in the fatigue strength of the welded joint can be obtained if these tensile residual stresses are removed. However, greater benefit can be reached if compressive residual stresses are introduced at the weld region. There are several methods to do this. In the engineering practice, one of the most employed is a peening method, a cold working process which plastically deforms the surface by impacting it with a tool or small balls. This mean introduces large compressive stresses of same order of the material yield stress. For this reason it is expected that larger improvements in fatigue strength are obtained for different materials. This paper indicates initially the various peening techniques to introduce compression residual stresses. To conclude is presented a review, related to the last 30 years, about weld fatigue life and corrosion improvements by peening techniques. In this first part it was considered these applications for aluminum alloys and others non-ferrous materials, while in the second part of this work, steel and steel alloys will be considered.*

**Key-words:** welded joint, peening, fatigue strength; corrosion strength.

## 1. Introdução

É essencial assegurar a integridade das juntas soldadas

(Recebido em 20/12/2006; Texto Final em 08/02/2007).

durante o tempo de serviço, contra as possíveis falhas por fadiga ou corrosão. As juntas soldadas estão presentes em estruturas utilizadas em máquinas industriais, veículos de transporte em geral, plataformas oceânicas, navios, usinas hidroelétricas, etc. Os fatores que geralmente afetam a resistência à fadiga das soldas são: as tensões residuais, defeitos concentradores de tensões, as propriedades

mecânicas do material e a macro e micro-estrutura dos materiais [1].

A presença de tensões residuais de tração e a corrosão é um dos fatores mais prejudiciais, sendo que elas estão estreitamente relacionadas com a ocorrência de fadiga de alto ciclo. Quando não é possível a seleção de um material diferente ou alterar as condições ambientais e de carregamento externo durante o tempo de serviço, a modificação da distribuição de tensões residuais se converte em um fator extremamente importante para evitar o fissuramento por corrosão sob tensão [2]. Pode-se afirmar que a diminuição das tensões residuais de tração nas uniões soldadas significa um ganho na prevenção de fadiga de alto ciclo e de fissuramento por corrosão sob tensão. Assim, é de extrema importância controlar a grandeza das tensões residuais durante o processo de soldagem ou depois de finalizado o mesmo, para garantir a integridade das estruturas soldadas [1].

O jateamento é um tratamento mecânico que foi descoberto no final do século 19 e que conta com parâmetros de processo padronizados em função da variante utilizada (JCG, martelamento, ultra-sônico, laser, JAAP). Estes parâmetros estão bem definidos por instituições científicas reconhecidas internacionalmente [3]. Entre as principais normas disponíveis estão as Especificações Militares dos EEUU, as normas da SAE e as normas da ASTM. Porém, estes padrões criados só têm a finalidade de lograr a repetitividade do processo na sua implementação na área industrial [4]. Não existem normas técnicas que recomendem os valores dos parâmetros mais adequados para determinadas aplicações de engenharia, seja em molas, engrenagens, próteses ou, juntas soldadas, por exemplo. Assim, embora seja um tema de extrema importância na área científica e tecnológica, não existe ainda a divulgação necessária para a sua implementação nas diferentes aplicações das juntas soldadas. Isto constitui a principal motivação deste trabalho de revisão sendo o objetivo principal do mesmo, mostrar a eficiência das técnicas de jateamento no melhoramento da resistência à fadiga e à corrosão das juntas soldadas. Devido à grande quantidade de informação encontrada e visando apresentá-la de forma organizada, esta revisão foi desenvolvida em duas partes. A primeira compreende a aplicação das técnicas de jateamento como tratamento de pós-soldagem para melhorar a resistência à fadiga e à corrosão de juntas soldadas para ligas de alumínio e outros materiais, enquanto a segunda parte [5] compreende sua aplicação para juntas soldadas de aços e suas ligas.

## 2. Técnicas para melhorar as resistências à fadiga e à corrosão de juntas soldadas

Em geral, os métodos para melhorar as resistências à fadiga e à corrosão das juntas soldadas podem ser divididos em dois grandes grupos: aqueles que modificam a geometria da união soldada e os que introduzem tensões residuais. Os primeiros eliminam os defeitos no cordão de solda, reduzindo com isto, fundamentalmente, a concentração de tensões, enquanto que os pertencentes ao segundo grupo, são capazes de introduzir tensões residuais de compressão na área da solda mais propensa à iniciação e propagação

de fissuras. Um sumário das técnicas mais importantes a serem consideradas é apresentado na Figura 1, de acordo com Kirkhope *et al.* [6].

Neste trabalho são abordadas as técnicas correspondentes ao segundo grupo e, mais especificamente, àquelas relacionadas com o jateamento.

### 2.1. Técnicas de jateamento

O jateamento é um processo de trabalho a frio que deforma plasticamente a superfície da peça. Este trabalho a frio é obtido através do impacto da superfície da peça com uma ferramenta ou um jato de pequenas partículas de metal ou outro material, dependendo da aplicação. O procedimento origina uma distribuição uniforme de tensões residuais de compressão na superfície tratada e ao longo de uma determinada profundidade embaixo dela. Os valores destas tensões são da ordem do valor limite da tensão de escoamento do material. Além de introduzir tensões residuais de compressão, a deformação plástica provocada pelo processo melhora o acabamento superficial do cordão de solda, eliminando possíveis imperfeições que dão lugar ao efeito da concentração de tensões [4]. Tudo isto vai trazer como consequência benéfica o retardamento da iniciação e propagação de trincas, levando em determinadas situações ao aumento da vida útil à fadiga e, em outros ao aumento da resistência à corrosão sob tensão. Alguns métodos desenvolvidos para introduzir tensões residuais de compressão empregando a técnica de jateamento são descritos a seguir.

#### 2.1.1. Jateamento com granalha

O jateamento com granalha (seja esta de aço, vidro, material cerâmico, etc) (JCG), Figura 2, semelhante ao jateamento com areia (sand blasting), é um processo de trabalho a frio, que consiste em lançar pequenas esferas metálicas em alta velocidade contra a superfície externa de elementos de máquinas e estruturas provocando deformação plástica. Desta forma são geradas tensões residuais de compressão na superfície da peça e a uma pequena distância abaixo dela com valores que variam entre 70-80 % do limite de escoamento do material. Este processo é amplamente utilizado na indústria para melhorar as propriedades mecânicas de peças metálicas, particularmente, a vida à fadiga. A efetividade do jateamento com granalha é afetada por muitas variáveis como, por exemplo, a velocidade e as dimensões das partículas, a espessura da peça e as propriedades mecânicas dos materiais em contacto e o tempo de jateamento [4]. O controle de todas essas variáveis, de uma forma eficiente é muito difícil de ser realizado na indústria.

Para fins industriais, o controle do processo é realizado indiretamente dos parâmetros conhecidos como intensidade Almen e cobertura de jateamento. A intensidade Almen está relacionada à curvatura de uma lâmina depois de aplicado o jateamento com granalhas. A lâmina é fabricada em aço SAE 1070 sob múltiplas especificações. As dimensões da lâmina são padronizadas, sendo que existem três diferentes espessuras que estão em função da aplicação (lâminas N, A

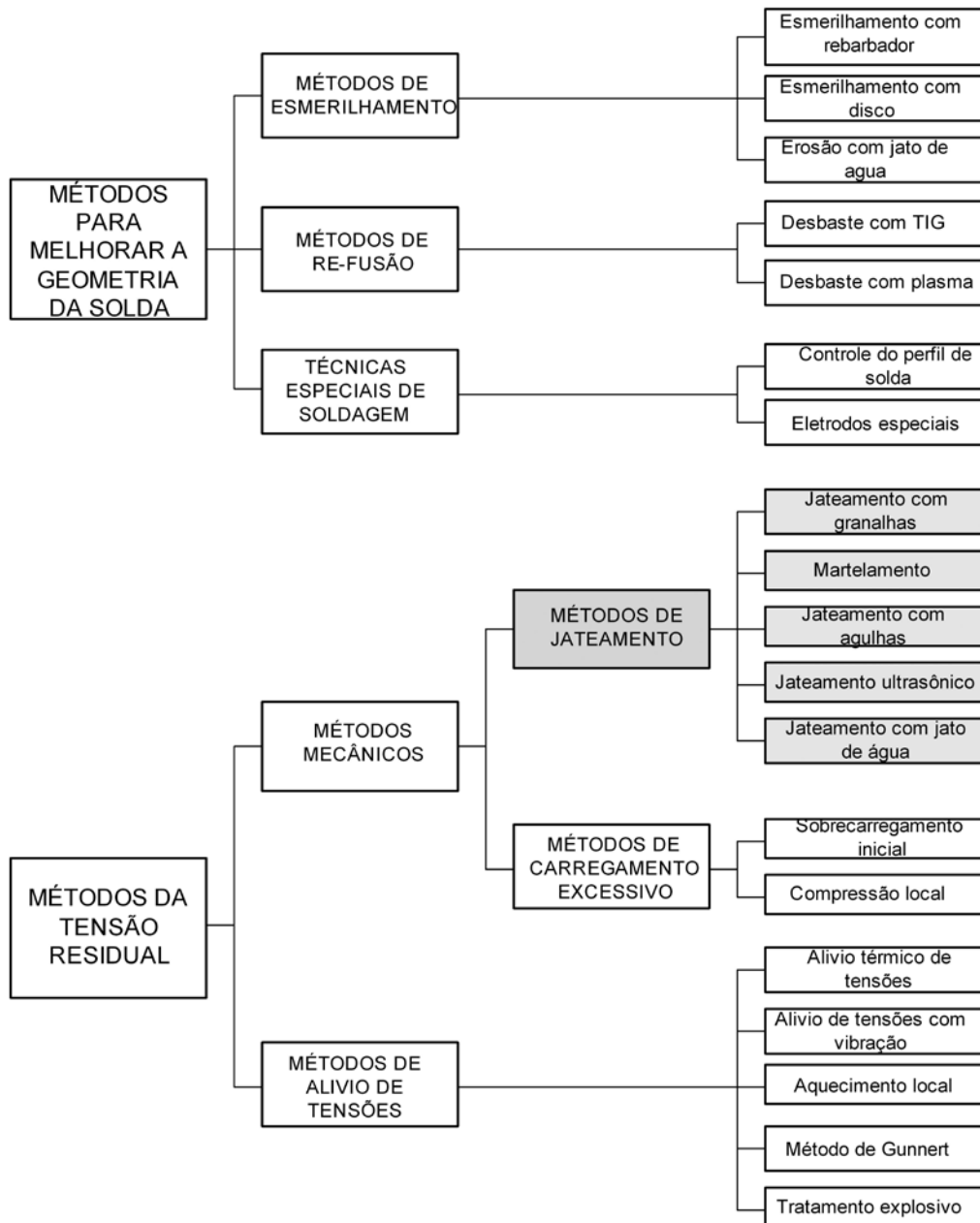


Figura 1. Diferentes técnicas para melhorar a resistência à fadiga e à corrosão de juntas soldadas [6].

ou C). Estas lâminas são fixadas em blocos especiais ou na própria peça que se pretende tratar. As lâminas identificadas com a letra N representam as de menor intensidade, sendo as de menor espessura e, portanto, mais sensíveis a finos ajustes de intensidades. As outras lâminas (referenciadas com a letra A e C) são empregadas quando é requerida uma maior intensidade do tratamento.

O parâmetro da intensidade Almen é bastante utilizado, industrialmente, para obter repetitividade da aplicação do processo, considerando o mesmo tipo de granalha. Esta intensidade é consequência direta da velocidade com que a granalha atinge a lâmina, a qual é difícil de estimar fazendo inviável ser um parâmetro de controle do processo JCG. O controle da velocidade, que afeta de forma direta a intensidade Almen, é obtido através da regulagem, dependendo da máquina, da pressão de ar (no caso de serem impelidas as granalhas pneumáticamente) ou da velocidade



Figura 2. Exemplo de aplicação do processo de jateamento com granalha [7].

da hélice (no caso de serem impelidas por força centrífuga). A cobertura está ligada à área coberta pelas endentações provocadas pelos impactos das esferas. A cobertura é considerada integral (100%) quando é constatado por exame visual (com aumento de 10×), que a superfície foi coberta totalmente pelas endentações. Em relação às granalhas, aquelas identificadas com a letra S correspondem a granalhas esféricas, enquanto que as identificadas com a letra G correspondem às granalhas com formato angular (àquelas providas de fio de aço cortado e arredondado). Para se conseguir uma cobertura de 200% basta empregar o dobro do tempo necessário para atingir os 100 % e assim por diante.

A maior vantagem do jateamento com granalha é que ele pode cobrir grandes áreas com baixo custo, entretanto, o tamanho dos projéteis deve ser suficientemente pequeno para poder atingir as regiões de concentração de tensões na união soldada. As dimensões dos projéteis oscilam entre 0,2 e 1 mm, sendo o valor da velocidade de impacto entre 40 e 100 m/s [4]. Resultados obtidos a partir de ensaios experimentais em juntas soldadas submetidas ao tratamento de JCG demonstram o incremento da resistência à fadiga para todos os tipos de juntas, com a grandeza deste incremento variando segundo o tipo de união e a tensão de escoamento do material.

### 2.1.2. Martelamento

O martelamento é um processo executado manualmente, empregando-se um martelo elétrico ou pneumático, que opera a aproximadamente 5000 impactos/min. A ferramenta, de aço com elevada dureza, possui uma ponta hemisférica com diâmetro que varia entre 6 e 18 mm, devendo ser orientada com uma direção aproximadamente normal à face da solda e a 45° da superfície da chapa do metal base [6], sendo movimentada ao longo do cordão de solda a uma taxa de velocidade de 25 mm/s. Este tipo de tratamento consegue introduzir uma distribuição significativa de tensões residuais de compressão, assim como possibilita uma redução na concentração de tensões no cordão de solda ao modificar o ângulo e o raio do cordão. Resultados experimentais relatam que após quatro passes ao longo do cordão de solda, foi conseguida uma indentação de aproximadamente 0,6 mm para um aço dúctil e de 0,5 mm em um aço de alta resistência, o que representa um ótimo tratamento [6]. Em determinadas situações este tratamento mostra-se mais efetivo que o jateamento com granalhas, mas uma desvantagem é o elevado ruído durante a aplicação do procedimento.

### 2.1.3. Jateamento com pinos ou agulhas

O jateamento com pinos ou agulhas é uma técnica semelhante ao martelamento, com a diferença fundamental de que a ferramenta sólida é substituída por um feixe de arames, pinos, ou agulhas de aço de aproximadamente 2 mm de diâmetro com pontas arredondadas. Este processo tem um desempenho superior ao jateamento com granalha mas apresenta um desempenho ligeiramente inferior ao conseguido com a técnica de martelamento.

### 2.1.4. Jateamento com impacto ultra-sônico

O jateamento com impacto ultra-sônico é uma técnica para

introduzir tensões residuais de compressão (desenvolvimento mais recente do que as outras referidas anteriormente). Neste processo, uma região do cordão de solda, com largura entre 4 e 7 mm, é tratada com um martelo ultra-sônico. O equipamento consiste em um transdutor de magneto-construção, um transmissor de ondas ultra-sônicas e a ferramenta de jateamento, ver Figura 3. Esta ferramenta pode ser tanto constituída de um único elemento com ponta esférica de diâmetro de 16 mm ou múltiplos pinos ou agulhas os quais vibram a 27 kHz. O procedimento é completado em um único passe movimentando a ferramenta ao longo do cordão de solda com uma velocidade de 0,5 m/s. O cabo da ferramenta isola o operário da vibração, existindo somente um pequeno ruído durante a aplicação do tratamento. O mecanismo através do qual o melhoramento é obtido é o mesmo que no caso do martelamento. A área ao longo do cordão de solda é deformada até uma profundidade entre 0,5-0,7 mm, originando-se uma distribuição de tensões residuais de compressão. O efeito da concentração de tensões no cordão de solda é também diminuído com a utilização deste procedimento [6].



Figura 3. Equipamento para jateamento ultra-sônico [8].

### 2.1.5. Jateamento com jato de água a altíssima pressão

O jateamento com jato de água a altíssima pressão, como o próprio nome indica, consiste em bombardear a superfície da peça, depois do processo de soldagem, nas regiões correspondentes aos cordões de solda, com um jato de água com pressão superior a 150 Mpa [9]. A principal

desvantagem deste tratamento na atualidade é o elevado custo do equipamento necessário para executá-lo. Entretanto, para algumas aplicações, como por exemplo, a introdução de tensões residuais de compressão em componentes mecânicos empregados em usinas de energia nuclear seria o tratamento mais eficiente, pelo fato de usar a água como elemento fundamental no processo, proporcionando limpeza e evitando a contaminação com elementos indesejáveis.

### 3. Aplicação das técnicas de jateamento no aumento da resistência à fadiga e à corrosão de juntas soldadas

Como já foi mencionado, o jateamento é um processo que induz tensões residuais de compressão na superfície dos metais com a finalidade principal de alongar sua vida à fadiga, além de outros benefícios. As aplicações deste tratamento em cordões de solda se iniciaram pouco depois que o jateamento com granalha (JCG) começava a ser empregado de maneira bem empírica, como tratamento pós-soldagem. No início, a pesquisa foi integralmente experimental, estabelecendo, em trabalhos mais avançados, formulações empíricas para estimar a vida à fadiga.

A seguir, são apresentados os resultados de várias pesquisas que empregaram as diferentes técnicas de jateamento discutidas anteriormente, com a finalidade de melhorar significativamente as resistências à fadiga e à corrosão de juntas soldadas para diferentes aços, ligas de alumínio e outros materiais.

#### 3.1 Aplicações em juntas soldadas de ligas de alumínio e outros materiais

Embora na década de 40 e 50 fossem reportadas aplicações da técnica de jateamento, é principalmente a partir da década de 60 quando as pesquisas em relação ao emprego destas técnicas em ligas de alumínio apresentam um caráter mais científico. A escolha de um ou outro método irá depender da capacidade do mesmo de atingir todos os pontos da solda onde exista a possibilidade de iniciação de trincas. A seguir são mostrados brevemente os principais resultados de vários trabalhos de pesquisa desenvolvidos desde os anos 60 até os dias de hoje, na área de jateamento aplicado em juntas soldadas de ligas de alumínio.

No trabalho desenvolvido por Nordmark [10], foi analisado o efeito de várias técnicas pós-soldagem no comportamento à fadiga de juntas soldadas de topo longitudinais para liga de alumínio 5456 H321. Corpos de prova foram submetidos a carregamento axial de fadiga com razões de tensão de 0 e -0,5. Certo número de corpos de prova foi submetido ao tratamento de jateamento com granalha (JCG), outros receberam tratamento de martelamento enquanto que num terceiro grupo foi aplicado um tratamento térmico de alívio de tensões. Para todos os casos foram medidas as tensões residuais. Os tratamentos de jateamento com granalhas e martelamento, aplicados na região da solda e na zona afetada termicamente, mostraram-se mais eficientes no melhoramento da vida à fadiga quando comparados seus efeitos aos do tratamento térmico de alívio de tensões.

No trabalho desenvolvido por Webber [11], foi feito um estudo sobre a influência de vários métodos no

melhoramento da vida à fadiga de juntas sobrepostas de filete, orientadas longitudinal e transversalmente em relação à direção do carregamento aplicado, para ligas de alumínio-zinco-magnésio. Os tratamentos mais efetivos foram os de jateamento com granalha e o martelamento, devido à capacidade de introduzir tensões residuais de compressão elevadas até uma determinada profundidade abaixo da superfície da peça. Já a pesquisa realizada por Polmeart [12] ressaltou o efeito benéfico do jateamento com agulhas ou pinos no tratamento de juntas soldadas de filetes, carregadas longitudinal ou transversalmente. O tratamento revelou-se mais eficiente quando aplicado depois de efetuar um pré-carregamento dos corpos de prova.

No final da década de 70 e começo de 80, a pesquisa desenvolvida por Montemarano e Wells [13, 14] ressaltava as vantagens do jateamento empregando uma ferramenta rotatória em forma de pincel com fios de aço fundido ou tungstênio, para melhorar a resistência à fadiga de juntas soldadas de topo e sobrepostas em ligas de alumínio 5086-H116 empregadas na construção naval. Corpos de prova de uniões soldadas de topo e sobrepostas foram ensaiados à fadiga com uma razão de tensão de  $R = -1$  depois de submetidas ao tratamento referido anteriormente. Os resultados mostraram que para as juntas de topo a resistência à fadiga foi melhorada até o nível do metal base sem solda, enquanto que no caso das juntas sobrepostas a resistência à fadiga foi incrementada de 38 até 69 MPa para  $10^7$  ciclos. Os autores destacaram a importância do tratamento escolhido para reparar soldas que apresentem fissuras de fadiga e para melhorar a qualidade da superfície em juntas de acesso limitado, assim como a sua potencialidade para ser usado em construções navais de alumínio como procedimento padrão pós-soldagem em áreas submetidas a carregamentos cíclicos localizados.

Já no trabalho realizado por Kazimirov *et al.* [15] na década de 80, foi demonstrado o efeito benéfico do jateamento ultra-sônico em juntas soldadas de liga de alumínio Al-Mg6. A redução nas tensões residuais de tração originadas pelo processo de soldagem é causada pela deformação plástica da superfície do metal e a reorganização da estrutura atômica. Os resultados desta pesquisa mostraram a eficiência do tratamento de impacto ultra-sônico na redução das tensões residuais de tração decorrentes do processo de solda, assim como em lograr uma estrutura do material mais homogênea nas camadas superficiais. Uma das vantagens mais interessantes deste tratamento é a possibilidade da sua automação parcial ou completa no caso de componentes soldados de grandes dimensões.

O fenômeno de corrosão sob tensão em soldas de ligas de alumínio Al-Zn-Mg, segundo Birley [16], é originado pela combinação de tensões de tração, um ambiente corrosivo e uma estrutura metalúrgica susceptível. Em seu trabalho, o objetivo fundamental de Birley foi prever a corrosão sob tensão nas uniões, diminuindo as tensões residuais de tração nas soldas através da aplicação de várias técnicas pós-soldagem como o jateamento. Foram medidas as profundidades das camadas de tensões residuais de compressão originadas e comparados os resultados com outros métodos, dentre eles o tratamento térmico e o alívio de tensões por vibrações. Os valores das tensões residuais

foram determinados com o auxílio das técnicas do furo cego (extensometria) e difração por raios X. Na pesquisa é destacada a importância de se lograr uma camada de tensões residuais de compressão constante em todo o componente e entre os componentes. Isto significa que os parâmetros do processo de jateamento, principalmente a intensidade Almen e a cobertura, devem ser cuidadosamente controlados. O material dos projéteis, seu tipo e tamanho devem ser bem selecionados por constituir um aspecto muito influente no tratamento de ligas de alumínio em relação à profundidade da zona plástica atingida.

Birley destaca também que na prática existem muitas ocasiões onde o método do jateamento não poderia ser empregado, por exemplo, em áreas de difícil acesso ou quando é requerido um acabamento superficial de alta qualidade. Nestes casos é preciso recorrer a uma outra técnica para prevenir da corrosão sob tensão. As conclusões fundamentais de sua pesquisa mostraram que os tratamentos de jateamento, seja com granalhas, de agulhas ou pinos, martelamento ou roleteamento, trazem um efeito benéfico em relação ao aumento de resistência à corrosão de juntas soldadas para a liga de alumínio estudada. A escolha de cada tratamento vai depender de vários fatores dentre os quais podem ser destacados a localização da parte a ser tratada, número de peças, tamanho, acabamento superficial requerido, etc. O tratamento deverá ser aplicado depois de finalizado o processo de soldagem. O tratamento térmico de alívio de tensões neste caso mostrou-se pouco ou nada eficaz no melhoramento da resistência à corrosão.

Na investigação feita por Koelher [17], foi testada a influência de diferentes materiais de projéteis empregados no tratamento de jateamento com granalhas, na resistência à corrosão sob tensão e à fadiga por corrosão para juntas soldadas de liga de alumínio AlZn4.5Mg2. Foram empregados como materiais para as granalhas aço, vidro, cerâmica e granulado de alumínio. Embora o tratamento com aço proporcione o maior incremento na resistência à fadiga por corrosão, ele contamina a superfície da junta de liga de alumínio, sendo necessário um tratamento posterior com jateamento de partículas de vidro molhadas. Os materiais mais adequados para os projéteis, segundo esta pesquisa, foram o vidro e o alumínio granulado, embora no caso deste

último seja impossível quantificar a intensidade Almen, devido, segundo o autor, à baixa dureza do material. Os efeitos benéficos do jateamento com granalha na melhora da resistência à fadiga por corrosão irão depender da tensão de escoamento do material impactado, da dureza dos projéteis e da velocidade e diâmetro dos mesmos, como aspectos fundamentais.

Vários outros trabalhos sobre a aplicação das técnicas de jateamento em juntas soldadas foram desenvolvidos na década de 90. Na pesquisa de Bertini *et al.* [18], foi discutida a influência na vida à fadiga de vários tratamentos depois de concluído o processo de soldagem. Corpos de prova de fadiga, Figura 4, foram testados analisando-se os resultados com ajuda de um modelo implementado através do método dos elementos finitos. Os corpos de prova foram usinados a partir de chapas de liga de alumínio 6063, com 5 mm de espessura e soldados de topo empregando soldagem a arco com proteção gasosa e utilizando liga de alumínio 4043 como metal de solda. As juntas analisadas, empregadas em estruturas automotivas, foram submetidas ao processo de jateamento com granalha. A distribuição de tensões residuais foi calculada utilizando-se a técnica de difração por raios X medindo nos pontos ilustrados na Figura 4. Os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciam a potencialidade da aplicação do jateamento por granalha no melhoramento da resistência à fadiga, sobretudo no comportamento à fadiga para alto número de ciclos ( $10^6$  ou mais). O jateamento com granalhas mostrou-se como o tratamento mais eficaz neste trabalho, quando comparado aos tratamentos térmicos de alívio de tensões e solubilização.

A influência do tratamento de jateamento com granalha sobre o fissuramento por corrosão sob tensão para liga de alumínio 7075-T6 foi analisada por Rahmatalla *et al.* [19]. Corpos de prova de  $140 \times 25,4 \times 2,3$  mm foram preparados a partir de uma placa de 25,4 mm de espessura. O JCG foi aplicado utilizando intensidades Almen de 6, 8 e 10 A, respectivamente com projéteis de aço fundido padronizados (S230). Após cada jateamento com granalha de aço foi feito um jateamento adicional com granalhas de vidro, a fim de remover da superfície os resíduos das granalhas de aço, prevenindo desta forma um possível efeito de corrosão galvânica. Os corpos de prova jateados e não jateados foram

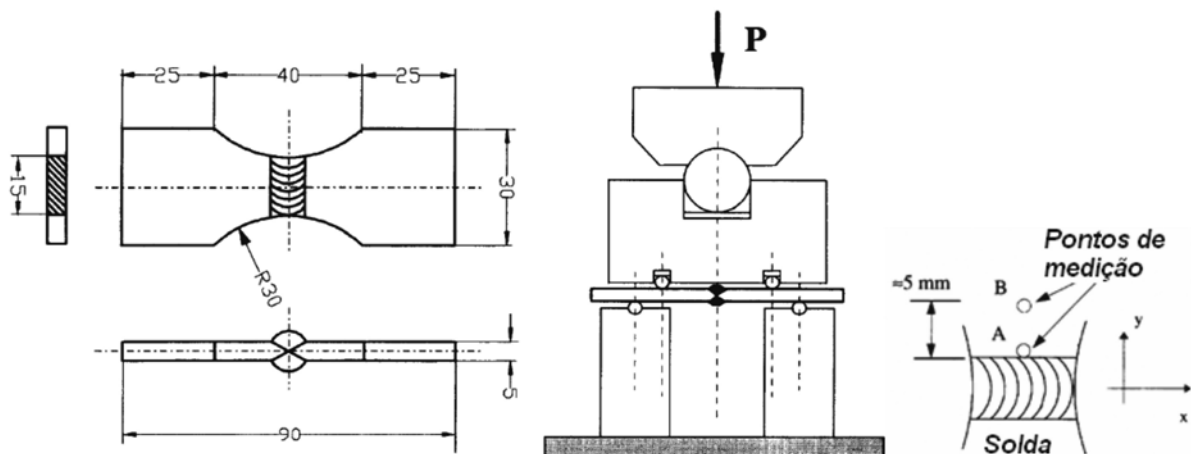


Figura 4. Geometria dos corpos de prova, configuração do ensaio de fadiga e pontos de medição das tensões residuais empregando a técnica de difração por raios X [18].

testados em flexão com três pontos de apoio segundo a norma ASTM G39-90. O limite de tensão imposto foi de 95 % da tensão de escoamento nas fibras mais afastadas da linha neutra. As condições para simular o ambiente corrosivo consistiram em uma solução contendo 3,5 % de NaCl + 0,5 % Na<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> a uma temperatura de 40 °C e pH = 3. O critério de falha foi baseado na primeira detecção de trinca. Para as três intensidades de jateamento foi observada uma melhora significativa na resistência à corrosão sob tensão avaliada na direção longitudinal dos corpos de prova. Entretanto, a avaliação na direção transversal, para a intensidade intermediária (8A), não mostrou os efeitos benéficos das outras duas intensidades de jateamento empregadas. Como conclusão fundamental deste trabalho cabe ressaltar o efeito positivo do jateamento com granalhas quando aplicado a toda a superfície exposta (cobertura total) no melhoramento da resistência à corrosão sob tensão para este tipo de ligas de alumínio.

Na década atual, a pesquisa desenvolvida por Nitschke-Pagel e Wohlfahrt [20] destaca a importância de substituir aços de elevada resistência por ligas de alumínio, por exemplo, na área de transporte, seja automotivo, aeronáutico ou naval, devido ao aumento dos custos em relação ao peso do veículo. Para isso é preciso dispor da facilidade de aplicação de técnicas de manufatura, dentre as quais os processos de soldagem possuem um papel extremamente importante. No trabalho são discutidos vários métodos pós-soldagem que melhoram a resistência à fadiga das juntas soldadas. O procedimento de jateamento, nas suas várias aplicações, se apresenta como um tratamento capaz de introduzir elevadas tensões residuais de compressão, isto poderia melhorar a resistência à fadiga até o nível do metal base.

O trabalho realizado por Zickovic e Anzulovic [21] parte do critério de que é possível, completa ou parcialmente, evitar a influência dos vários tipos de defeitos originados no processo de solda a partir de soluções construtivas ou tratamentos adicionais. Corpos de prova fabricados de chapa de liga de alumínio 5083 foram soldados empregando

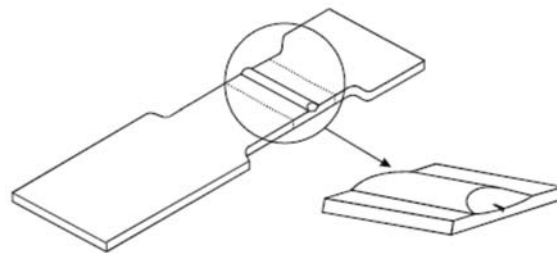


Figura 5. Localização da trinca e da área submetida ao processo de JCG [21].

o método TIG e originando propositalmente uma fissura a quente. Os corpos de prova foram divididos em quatro grupos, o primeiro sem nenhum tratamento adicional, os restantes submetidos ao processo de JCG em uma área selecionada (Figura 5), com três intensidades Almen diferentes, 0,5, 0,7 e 0,9 N2 e respeitando os parâmetros do tratamento segundo a norma SAE J422/J433. Os testes de fadiga empregaram carregamento de flexão, com faixa de tensão entre 50 e 65 MPa com uma razão de tensão  $R = -1$ . Dentre as principais conclusões deste trabalho se destacam a influência significativa do tratamento de JCG no aumento da resistência à fadiga para o material estudado com a presença de trinca no cordão de solda. A Figura 6 mostra o comportamento dos diferentes corpos de prova em relação à tensão aplicada e o número de ciclos de fadiga até a ruptura. É enfatizada a importância do processo de jateamento com granalhas (JCG) no melhoramento da vida à fadiga de juntas soldadas para ligas de alumínio.

Na investigação desenvolvida por Sidhom [22] foi avaliado o comportamento à fadiga de alto ciclo de juntas soldadas em T, Figura 7, de liga de alumínio 5083 H11 empregando o método MIG (gás inerte de metal) e utilizando para soldar arame de liga de alumínio 5183, depois de aplicada a técnica de jateamento com granalhas (JCG). Os experimentos foram realizados com corpos de

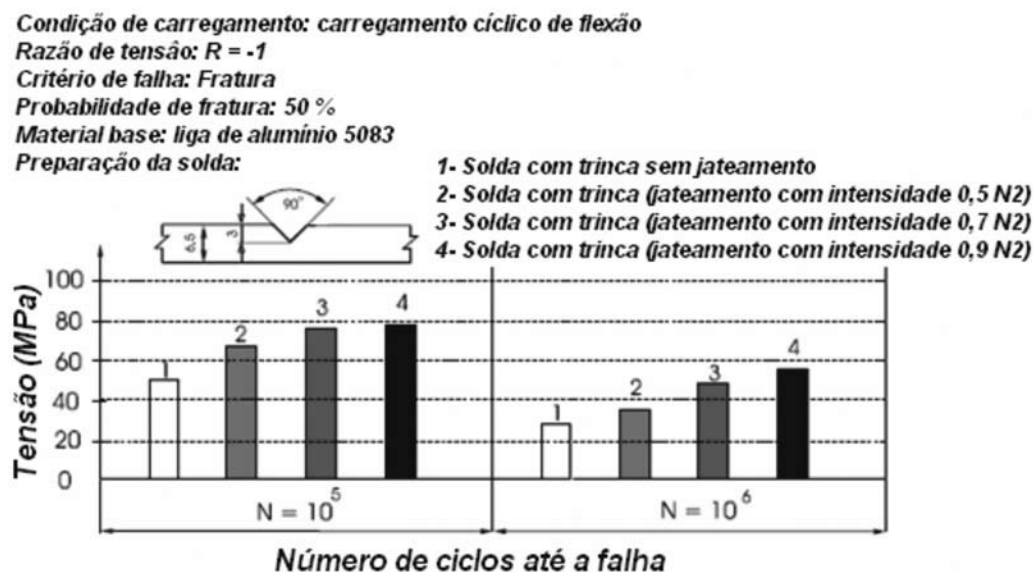


Figura 6. Comportamento da resistência à fadiga dos corpos de prova ensaiados [21].

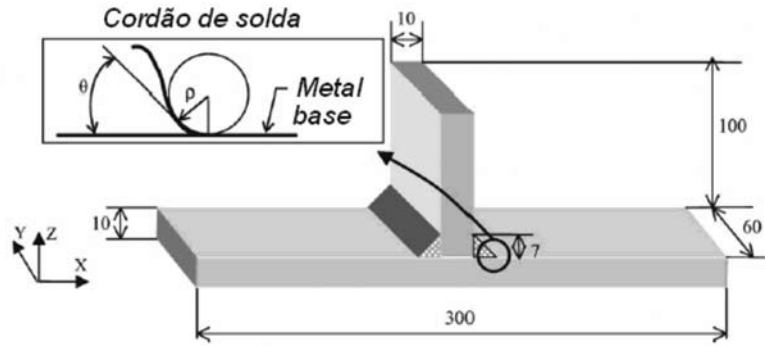


Figura 7. Geometria das juntas soldadas em T (mm) [22]

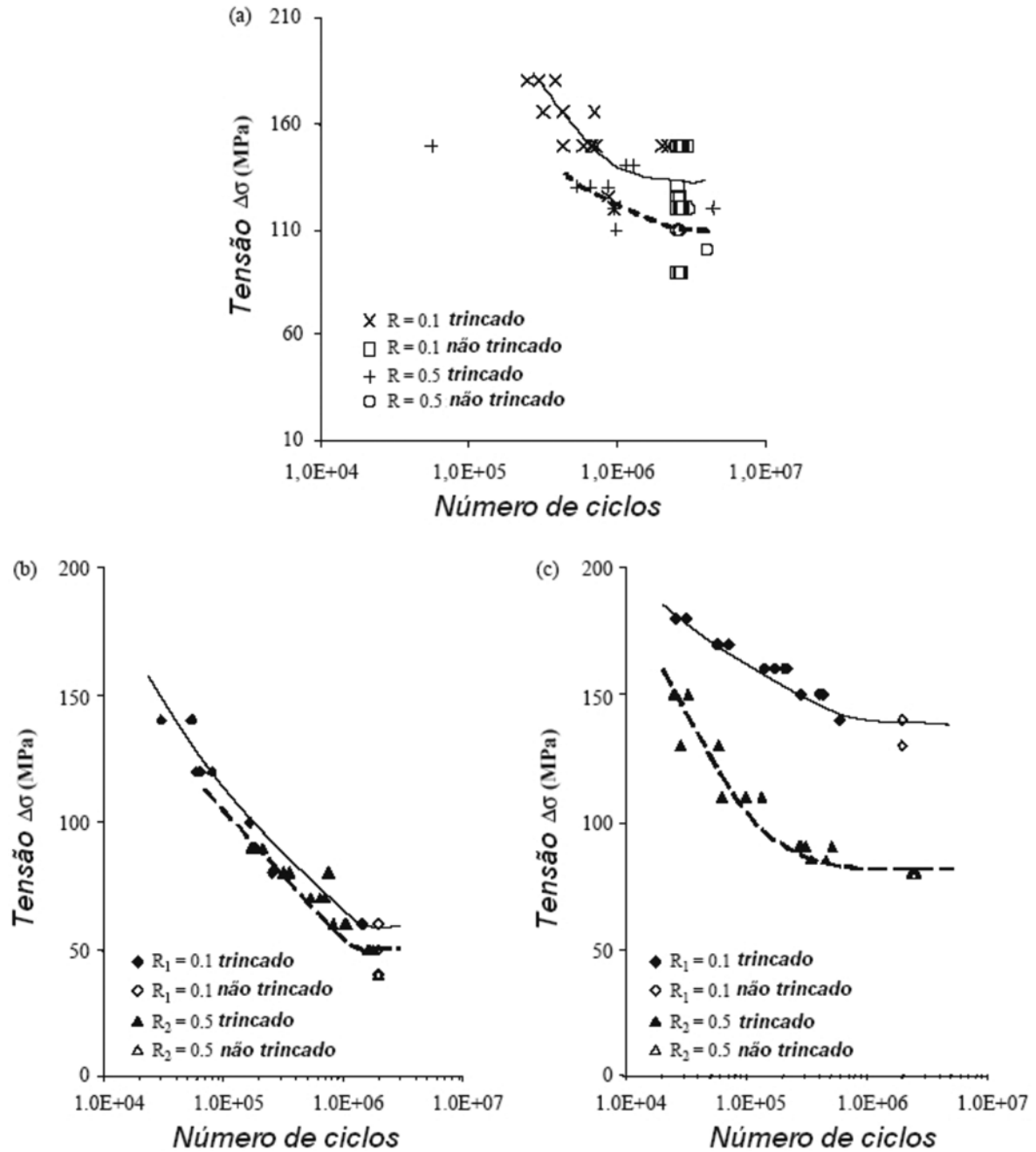


Figura 8. Curvas S-N do (a) material base, (b) juntas soldadas em T sem JCG, e (c) com tratamento de JCG, obtidas para duas cargas com razão de tensão de  $R_1 = 0,1$  e  $R_2 = 0,5$  [22].

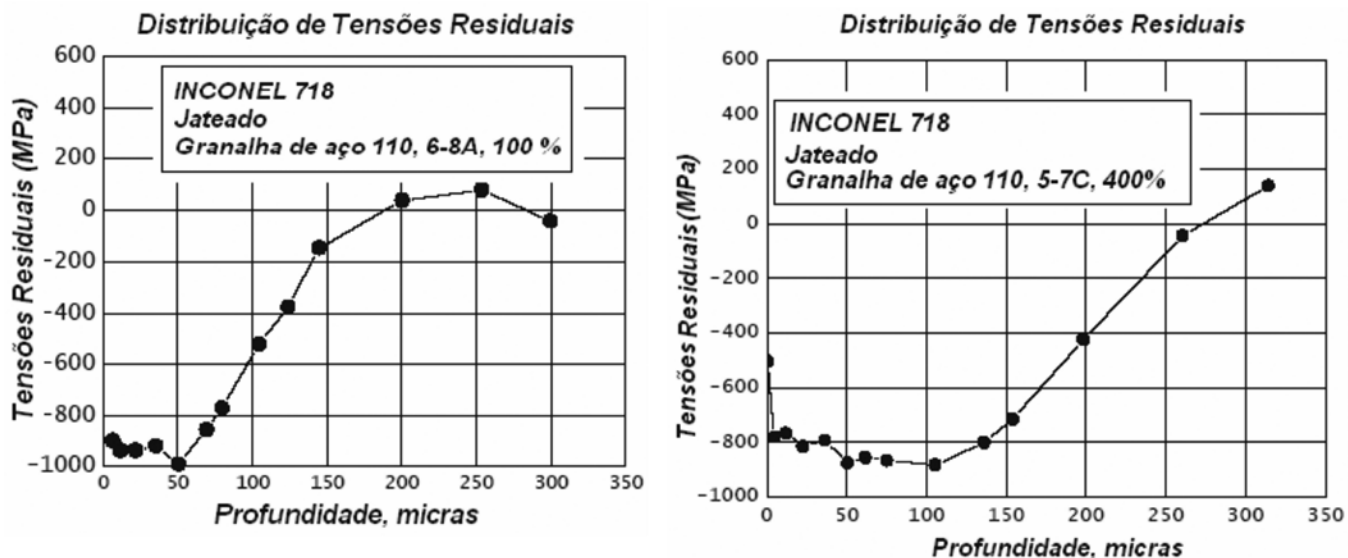


Figura 9. Distribuição de tensões residuais para diferentes condições de JCG em Inconel 718 [24].

prova para fadiga em flexão (sistema de apoio de quatro pontos). A melhora obtida no limite de fadiga para  $2 \times 10^6$  ciclos foi de 135 e 59 % para razões de tensão nos corpos de prova de 0,1 e 0,5 respectivamente. As propriedades da superfície na vizinhança do cordão de solda, onde ocorre a nucleação de micro-trincas, foram caracterizadas antes e depois da aplicação do tratamento de JCG. As modificações metalúrgicas foram monitoradas através de medições de micro-dureza e a distribuição de tensões residuais na profundidade empregando a técnica de furo incremental (hole drilling). A integridade superficial foi examinada usando a técnica de microscopia eletrônica de varredura. Finalmente foi realizada uma aproximação preditiva local empregando o critério multi-axial de Sines [23] para fadiga de alto ciclo levando em consideração as diferentes propriedades da superfície. Isto permite correlacionar quantitativamente a influência do processo de soldagem MIG e do tratamento de JCG no desempenho à fadiga de alto ciclo da liga de alumínio 5083 H11. Uma das conclusões mais importantes deste trabalho é que o emprego da técnica de JCG introduz dois benefícios fundamentais, a melhora nas propriedades da superfície e a introdução de uma camada de tensões residuais de compressão que proporciona o aumento da vida à fadiga da solda. A Figura 8 apresenta as curvas S-N em função da razão de tensão para o metal base e as juntas soldadas em T (sem tratamento de JCG e com tratamento de JCG).

Uma outra aplicação do jateamento pode ser observada na Figura 9, que apresenta os resultados das tensões residuais obtidas depois de aplicado o tratamento de jateamento com granalha (JCG) em Inconel 718 segundo Prevý [24]. Na figura, pode ser observado que para uma cobertura de 400 % a camada de tensões residuais de compressão atinge uma profundidade maior, embora a tensão residual máxima alcançada seja ligeiramente menor que para uma cobertura de 100 %. Em ambos os casos, entretanto, esta distribuição de tensões residuais poderia ser responsável pelo aumento

da resistência à fadiga. Acerca desta última observação, nada é reportado na pesquisa referenciada.

Na pesquisa realizada por Bugayev *et al.* [25], em 2006, foram apresentados resultados obtidos por jateamento com laser em liga Inconel 600. O jateamento por laser consiste em irradiar a superfície com um pulso curto e intenso proveniente de um laser para gerar, através de plasma a alta pressão, deformações plásticas e endurecimento superficial. A pesquisa, de caráter experimental, mostrou, empregando a técnica de difração por raios X para medir as tensões residuais, que nos corpos de prova do material analisado apareceram valores de tensões residuais de compressão dentre 400 e 600 MPa provocadas pelo processo de jateamento com laser.

#### 4. Conclusões

A técnica de jateamento com granalha apresenta resultados significativos na quase totalidade das pesquisas referenciadas, sendo a sua principal vantagem a possibilidade de atingir grandes áreas da peça e o baixo custo em relação aos outros procedimentos. Um outro aspecto importante a ser concluído é que, para juntas soldadas de ligas de alumínio submetidas à corrosão sob tensão, o jateamento não deverá ser feito empregando granalhas de aço. Caso for indispensável o seu emprego, terá que ser aplicado posteriormente um jateamento com granalhas de vidro em ambiente úmido, a fim de se eliminar a contaminação provocada pelas partículas de aço.

#### 5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao aluno de Engenharia Mecânica da FEI Gabriel Angelo pelo excelente trabalho realizado na melhoria da qualidade das figuras apresentadas no artigo.

## 6. Referências Bibliográficas

- [1] BENÍTEZ, D. Metodologia de análise da influência das tensões residuais no comportamento à fratura. 158p. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Brasil, 2002.
- [2] GONÇALVES, E. Investigation of Welding Heat Flow and Thermal Strain in Restraint Steel Plates, M.S. Thesis, MIT, 1980.
- [3] THE SHOT PEENING & BLAST CLEANING UNIVERSE. No sitio: <http://www.shotpeener.com>, acessado em: 13 de novembro de 2006.
- [4] CALLE, M.A. Análise numérico-computacional das tensões residuais induzidas pelo jateamento com granalha. 96p. Tese de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Brasil, 2004.
- [5] BENÍTEZ, D.; CALLE, M.A.; ANGELO, E.; GONÇALVES, E.; ANDRADE, A. O Processo de Jateamento como via para melhorar a Resistência à Fadiga e à Corrosão de Juntas Soldadas: uma Revisão (Parte II: aços e suas ligas). Inspeção e Soldagem, artigo em processo de revisão, 2007.
- [6] KIRKHOPE, K.J.; BELL, R.; CARON, L.; BASU, R.I.; MA, K.-T. Weld detail fatigue life improvement techniques. Part I: review. *Marine Structures*, v12, 1999, p. 447-474.
- [7] AEROSPACE-TECHNOLOGY. No sitio: <http://www.aerospace-technology.com>, acessado em: 4 de dezembro de 2006.
- [8] INTEGRITY TESTING LABORATORY. No sitio: <http://www.itlinc.com/index.html>, acessado em: 4 de dezembro de 2006.
- [9] KUNAPORN S.; RAMULU M. Ultra High Pressure Waterjet Peening Part I: Surface Texture. WJTA American Waterjet Conference. August 18-21. Minneapolis, Minnesota, 2001.
- [10] NORDMARK, G.E. Peening Increases Fatigue Strength of Welded Aluminum. *Metal Improvement Co.* 1963.
- [11] D. WEBBER. Evaluation of Possible Life Improvement Methods for Aluminum-Zinc-Magnesium Fillet-Welded Details. *Fatigue Testing of Weldments*, ASTM STP 648, D. W. Hoepfner, Ed., American Society for Testing and Materials, 1978, p. 73-88.
- [12] POLMEART, I.J. Effects of peening on the fatigue performance of aluminium alloy fillet welds. *Metals Forum*, 1979, v2, n1, p. 20-29.
- [13] MONTEMARANO, T.W.; WELLS, M.E. Improving the fatigue performance of welded aluminum alloys. Ship materials engineering department research and development report, 1979, SME-78/66.
- [14] MONTEMARANO, T.W.; WELLS, M.E. Improving the fatigue performance of welded aluminum alloys. *Welding Journal*, June 1980, p. 21-28.
- [15] KAZIMIROV, A.A.; GRUZD, A.A.; PROKOPENKO, G.I. The effect of ultrasonic treatment on the structure and properties of welded joints in the AMg6 alloy. *Avt. Svarka*, 1980, n7, p. 38-40 and p. 48.
- [16] BIRLEY, S.S. Shot Peening as a stress corrosion preventive in Al-Zn-Mg welded joints. Controller HMSO, London, 1981, p. 529-537.
- [17] KOELHER, W. Influence of Shot Peening with Different Peening Materials on the Stress Corrosion and Corrosion Fatigue Behavior of a welded AlZnMg-Alloy. ICSP-2, Chicago, 1984, p. 126-132.
- [18] BERTINI, L.; FONTANARI, V.; STRAFFELINI, G. Influence of post weld treatments on the fatigue behaviour of Al-alloy welded joints. *International Journal of Fatigue*, v20, n10, 1998, p. 749-755.
- [19] RAHMATALLA, H.; AL-RIMAWI, M.; AL-HADID, T. Effect of Shot Peening on Stress Corrosion Cracking (SCC) of 7075-T6 Aluminium Alloy. ICSP-6, 1996, p. 184-191.
- [20] NITSCHKE-PAGEL, T.; WOHLFAHRT, H. Fatigue Strength Improvement of Welded Aluminium Alloys by Different Post Weld Treatment Methods. ICSP-8, 2002, p. 360-366.
- [21] ZICKOVIC, D.; ANZULOVIC, B. The fatigue of 5083 aluminium alloy welds with the shot-peened crater hot-cracks. *Materials and Design*, v26, 2005, p. 247-250.
- [22] SIDHOM, N.; LAAMOURI, A.; FATHALLAH, R.; BRAHAM, C.; LIEURADE, H.P. Fatigue strength improvement of 5083 H11 Al-alloy T-welded joints by shot peening: experimental characterization and predictive approach. *International Journal of Fatigue*, v27, 2005, p. 729-745.
- [23] SINES, G. Behavior of metals under complex static and alternating stresses. Sines, G & Waisman, eds: *Metal Fatigue*, Mc Graw-Hill, New York, pp. 145-169, 1955.
- [24] PREVÉY, P.S. X-Ray Diffraction characterization of Residual Stresses produced by Shot Peening. *Shot Peening Theory and Application*, series ed. A. Niku-Lari, IITT-International, Gournay-Sur-Marne, France, 1990, p. 81-93.
- [25] BUGAYEV, A.A.; GUPTA, M.C.; PAYNE, R. Laser processing of Inconel 600 and surface structure. *Optics and Lasers in Engineering*, v4, p.102-111, 2006.