

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)

(Peening Process as a Way to Improve Welded Joint Fatigue and Corrosion Strengths: a Review (Part II: steels and steel alloys))

Daniel Benítez Barrios¹, Miguel Angel Calle Gonzales², Edvaldo Angelo¹, Edison Gonçalves², Arnaldo H. Paes de Andrade³

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

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

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

Resumo

Este trabalho compreende a segunda parte de uma revisão de pesquisas, referente aos últimos 30 anos, acerca do aumento nas resistências à fadiga e à corrosão de juntas soldadas quando empregada diversas técnicas de jateamento (jateamento com granalha, martelamento, ultra-sônico, laser e jateamento de água a alta pressão). No presente caso, os dados são exclusivamente para aços e suas ligas. Na primeira parte deste trabalho, foi descrita a aplicação destas técnicas para ligas de alumínio e outros materiais não ferrosos. As pesquisas revisadas demonstram a efetividade das técnicas de jateamento quando aplicadas como tratamento pós-soldagem. Da mesma forma, são apresentadas várias recomendações e observações, extraídas destas pesquisas, consideradas úteis para esta aplicação.

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

Abstract: *This paper represents the second part of a review, referred to the last 30 years, about weld fatigue life and corrosion improvements by various peening techniques (shot peening, hammer peening, ultrasonic peening, laser peening and water jet peening). In the present case, data are exclusively for steels and steel alloys materials. In the first part of this work, it was described the application of these techniques for aluminum alloys and other materials. The reviewed investigations demonstrate the effectiveness of the peening techniques when they are applied as a post-welding treatment. In the same way, some observations and suggestions, extracted from the reviewed investigations and considered useful for this application, are presented.*

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

1. Introdução

Este trabalho compreende a segunda parte de uma revisão sobre a aplicação das técnicas de jateamento como tratamento pós-soldagem em uniões soldadas de aço e suas ligas, sendo que a primeira parte abordou as de ligas de alumínio e outros materiais [1]. A maior parte dos artigos revisados sobre este tema aponta, como alvo de estudo, o aço estrutural, especialmente, nas primeiras pesquisas.

O jateamento é um processo que induz tensões residuais

de compressão na superfície dos metais, e atualmente de outros materiais, com a finalidade principal de alongar sua vida à fadiga, além de outros benefícios [1]. 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 finalidade deste trabalho foi extrair principalmente a partir das pesquisas revisadas, além das características e considerações mais relevantes dos ensaios experimentais desenvolvidos e os materiais envolvidos, as conclusões mais importantes encontradas pelos autores das pesquisas em

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

relação ao aumento da vida à fadiga e à corrosão das juntas soldadas de aço e suas ligas quando aplicadas as técnicas de jateamento descritas em [1].

2. Aplicação em juntas soldadas de aço e suas ligas

Os primeiros trabalhos revisados são de relatórios técnicos elaborados por grandes centros de pesquisa ligados à área naval e militar, os quais constataram a grande vantagem da aplicação do JCG como tratamento pós-soldagem. Estes trabalhos, embora importantes e relevantes para sua época, possuem pouca fundamentação científica, entretanto são registrados neste trabalho como uma amostra do desenvolvimento deste tema ao longo dos anos. Neles são expostas as descobertas sobre o aumento da vida à fadiga pela aplicação do jateamento com areia na limpeza de juntas soldadas, e a posterior implementação deste processo, mas já utilizando granalhas de aço ou outros materiais. Posteriormente são apresentados trabalhos desenvolvidos com um maior rigor científico e que abordam a aplicação de diferentes técnicas de jateamento.

No relatório de Foster *et al.* [2], desenvolvido no Laboratório de Ciência Aplicada da Marinha dos EEUU em 1964, foi constatado o uso benéfico do jateamento com granalha para a melhora das propriedades mecânicas das soldas do aço HY80, especialmente da vida à fadiga. Desenvolveram-se experimentos com corpos de prova com junta de filete em T para o aço temperado e revenido HY80, onde se confirmou o incremento da vida à fadiga entre 3 a 40 vezes, dependendo do nível de carga, sendo maior o benefício quando submetido a um nível mais baixo de carregamento cíclico. A Tabela 1 apresenta os principais resultados alcançados no estudo de Foster *et al.* [2].

Tabela 1. Resultados de aumento da vida à fadiga para juntas soldadas de filete em T do aço HY80 [2].

Tensão nominal (MPa)	Incremento da vida à fadiga na solda	Comparação com o material base
414	40 vezes	Equivalente
552	10 vezes	Equivalente
690	3 vezes	Informação não disponível

Em um outro relatório, desenvolvido pelo Instituto de pesquisa IIT em 1964 [3], é investigada a aplicação do JCG para aumentar a vida à fadiga das juntas soldadas em vasos de pressão. Como principal resultado é relatado uma melhora na resistência à fadiga, em até 50%, para vasos fabricados em aço AISI 4142. O maior benefício foi identificado nas paredes internas dos vasos de pressão, nas quais, normalmente, têm início as fissuras. De forma adicional, esta pesquisa comenta que a propagação das fissuras foi fortemente retardada após a aplicação do processo, dando a entender com isto que o JCG, além de poder ser usado para tratamento pós-soldagem, pode ser utilizado como tratamento de recuperação de peças ou estruturas metálicas durante o serviço.

Só no ano 1978, na qualidade de pesquisa científica, Knight [4] desenvolveu uma técnica para otimizar o tratamento pós-soldagem para o aumento da vida à fadiga, empregando o processo de martelamento para a introdução de tensões residuais de compressão. Para isso, esse autor investigou qual foi o aumento da resistência à fadiga de juntas soldadas de filete, para aços de baixa e alta resistência, empregando três técnicas de esmerilhamento e uma de martelamento, como tratamentos pós-soldagem. Constatou que todas as técnicas mostraram um grau semelhante no quesito relacionado ao aumento da resistência à fadiga da junta soldada, sendo mais evidente no caso de fadiga de alto ciclo. Porém, para aços de alta resistência, esta melhora é mais acentuada, sendo o benefício quase três vezes do que para os aços de baixa resistência. O tratamento por martelamento se mostrou ótimo quando executado quatro vezes (quatro passes ao longo da região da solda), mas para um número maior de passes o benefício se mostrou irrelevante e a um custo maior do ponto de vista operacional. Contudo, o martelamento demonstrou ter eficiência equivalente a das outras técnicas, e a um custo menor.

No final da década dos 70, o JCG como tratamento pós-soldagem começou a ser pesquisado cientificamente, mas somente no ano de 1981 é que houve uma grande demanda do seu emprego em inúmeras aplicações mecânicas e, para dar suporte à comunidade científica que atendia este ramo (comunidades ligadas à área de engenharia mecânica, na sua maioria), é que foi levada a cabo a Primeira Conferência Internacional sobre Jateamento com Granalha, que até o presente vem ocorrendo a cada três anos. Neste sentido, a maioria dos trabalhos realizados até os anos 90, foi publicada nessas conferências. Um destes trabalhos foi desenvolvido em 1981 por Chang e Lawrence [5], que desenvolveram formulações empíricas para estimar a vida à fadiga de juntas soldadas após serem tratadas pelo JCG. Chang e Lawrence utilizaram, na parte experimental, corpos de prova, fabricados em aço ASTM 4514, contendo juntas soldadas de topo. O modelo analítico desenvolvido considerou na estimativa o valor das tensões residuais e o período de iniciação de trinca pelo fenômeno de fadiga, mas não o período de propagação. Esta pesquisa constatou que o alto grau de deformação plástica e as tensões residuais de compressão alteram as propriedades do material em questão, empregando para suas formulações o modelo de Basquin, o fator de concentração de tensão do entalhe estimado pela equação de Peterson (Basquin *apud* Chang e Lawrence [6]) e o fator de concentrador de tensão elástico estimado por métodos numéricos. Ainda assim obtiveram resultados satisfatórios para essa época.

Atualmente, as pesquisas para desenvolver estas estimativas são mais precisas, pois contam com o auxílio das ferramentas de modelagem numérica para a simulação de eventos mecânicos. Em outro trabalho de Chang e Lawrence [7], agora de 1984, continuação de seu trabalho prévio [5], são comparadas as resistências à fadiga de juntas soldadas submetidas a diferentes tratamentos pós-soldagem, obtidas todas elas por formulações e por ensaios experimentais. O

mais interessante apresentado neste artigo é o desenvolvimento de algumas formulações desenvolvidas para calcular a resistência à fadiga das soldas, incluindo as extraídas do seu trabalho anterior [5]. Tais formulações corroboram dados experimentais para juntas soldadas de topo de aço estrutural ASTM A36, para diversas técnicas, conforme pode ser constatado na Figura 1.

Em outra pesquisa, datada de 1981, Koibuchi *et al.* [8] avaliaram a resistência e a vida à fadiga resultantes em juntas soldadas depois de aplicar o tratamento de JCG. Utilizaram, para fins experimentais, soldas de filete em T e em cruz, às quais lhes é aplicada um carregamento alternado. Assim concluíram que, dependendo da carga de serviço e do tipo de solda a ser tratada, é difícil mencionar um tratamento padrão de aplicação. Por isso, se faz necessário fazer um estudo mais minucioso do caso para cada situação prática, já que não se pode correr o risco de obter um efeito ínfimo e irrelevante no aumento da resistência à fadiga.

Alguns trabalhos mostram uma adaptação da técnica de JCG para poder implementá-la em aplicações específicas. Por exemplo, em 1984, Takemoto *et al.* [9] desenvolveram uma forma de poder aplicar o JCG em situação úmida, a qual eles chamaram de jateamento com granalha úmida, para aumentar a resistência à corrosão em juntas soldadas de plantas químicas. À diferença para o processo tradicional é que as granalha são impelidas utilizando água a alta pressão, formando uma espécie de pasta líquida. Usando esta modificação, evitou-se a poeira apresentada no JCG tradicional, considerando-se que a limpeza, para esta aplicação, era um fator essencial. No mesmo ano, Bignonnet *et al.* [10] mostraram como o JCG pode ser eficientemente aplicado em conexões soldadas de plataformas oceânicas. Para essa finalidade eles testaram corpos de prova com juntas soldadas de filete em T feitos em tubulações, fabricados em aços

estruturais de alta resistência típicos de instalações desse tipo, nos quais se avaliou a resistência à fadiga. Demonstrou-se que tanto o JCG (pós-soldagem) como o controle da geometria da junta soldada (concentradores de tensões) são fatores importantes a serem considerados na avaliação da qualidade da solda no que se refere a garantir um ótimo desempenho à fadiga. Entretanto, a introdução de tensões residuais de compressão é mais relevante, especialmente na resistência à fadiga de alto ciclo, Figura 2.

Um ano depois, em 1985, Maddox [11] e Floyd [12] comentaram sobre os mecanismos benéficos de introdução de tensões residuais para entender a vida à fadiga e a resistência à corrosão. Entretanto, Floyd [12] comentou, adicionalmente, da superioridade do martelamento sobre o jateamento com granalha na aplicação em juntas soldadas no referente à maior profundidade de camada com tensões residuais de compressão e, portanto, maior resistência à fadiga obtida.

Numa Conferência de Engenharia Mecânica de 1986, em Londres, Reynolds *et al.* [13] fizeram uma revisão de trabalhos, entre 1983 e 1985, que utilizam os métodos de JCG como tratamento pós-soldagem como parte do 'Programa de Fadiga Coesiva' para a sua implementação em estruturas navais e oceânicas. O trabalho apresenta, na sua maior parte, linhas básicas de consideração para análise da resistência estrutural, mas sem nenhuma análise quantitativa ou cálculo envolvido sobre os temas. Dentre os tópicos ressaltados que precisam ser considerados tem-se, por exemplo, as cargas de serviço aplicadas de distribuição aleatória, o desenvolvimento de soluções em mecânica da fratura para conexões tubulares, o estudo de novos tipos de juntas, o estudo de distintas geometrias de soldas e a influência da distribuição de tensões residuais sobre a fadiga, etc., considerando, para todos os pontos, o efeito de corrosão em ambiente marinho. Reynolds *et al.* admitiram, de forma conclusiva, que ainda

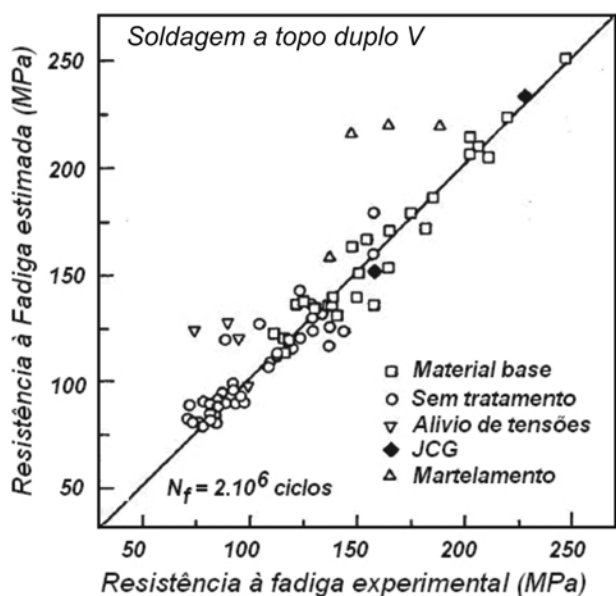


Figura 1. Comparação entre as resistências à fadiga de juntas soldadas submetidas a diferentes tratamentos pós-soldagem, Chang e Lawrence [7].

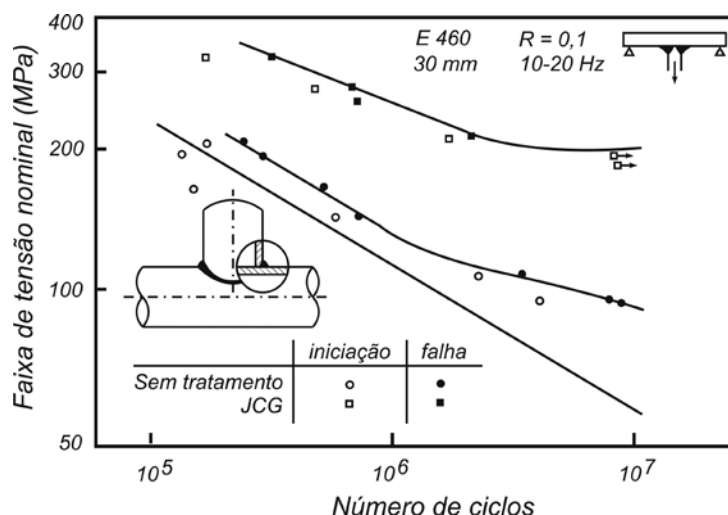


Figura 2. Vida à fadiga avaliada experimentalmente para conexões tubulares soldadas [10].

ficavam muitos fenômenos para estudo e que o campo para aplicação destas técnicas é bastante amplo. Ainda assim, este trabalho é bastante valioso, devido ao fato de que através dele tem-se uma idéia da complexidade de variáveis e fatores a serem considerados para um estudo de caso válido para implementação do JCG como tratamento pós-soldagem.

Nesse mesmo ano, Wohlfahrt e Heesch [14] avaliaram, qualitativamente, a melhora na resistência à fadiga em juntas soldadas de topo submetidas à flexão para dois tipos de tratamentos pós-soldagem. Testes foram aplicados para os aços estruturais DIN StE690 e DIN St52-3. Neste estudo foram aplicadas duas séries de processos pós-soldagem; na primeira, unicamente o desbaste TIG, e na segunda, a mesma técnica seguida do JCG, Figura 3. A conclusão mais importante deste trabalho foi a comprovação de que essas duas técnicas são complementares para tratar adequadamente as juntas soldadas. O desbaste TIG age, majoritariamente, corrigindo a geometria da solda e eliminando os concentradores de tensões críticos. Já o JCG aumenta uniformemente a vida à fadiga da solda na sua totalidade pela introdução de tensões residuais de compressão.

Em 1987, Banas *et al.* [15] avaliaram o incremento da resistência à fadiga em juntas soldadas de topo quando submetidas ao JCG. O material base escolhido foi o aço DIN 18Ni(250). Os corpos de prova foram submetidos ao JCG (para quatro tipos diferentes de granalha), Tabela 2 e, em seguida, testadas as respectivas resistências à fadiga por flexão em três pontos. Em todos os casos, onde a severidade do entalhe da solda foi diminuída, foi favorecido o aumento da resistência à fadiga da junta soldada. Porém, o benefício foi mais substancial quando submetidas ao JCG, particularmente para o JCG-4, no qual as granalhas usadas foram fabricadas a partir de cabos de aço cortados e arredondados. Banas *et al.* fizeram uma estimativa da resistência à fadiga para os corpos de prova ensaiados usando o modelo de Basquin modificado por Morrow (modificado para tensão média diferente de zero), Tabela 2. Nesta estimativa foram empregados dois valores diferentes para o fator de concentração de tensão de entalhe ($K_f = 2,0$ e $K_f = 2,6$). Adicionalmente, foi apresentada outra estimativa para a resistência à fadiga de juntas soldadas desenvolvida por Yung *et al.* [16]. Os resultados destas estimativas são apresentados na Tabela 2.

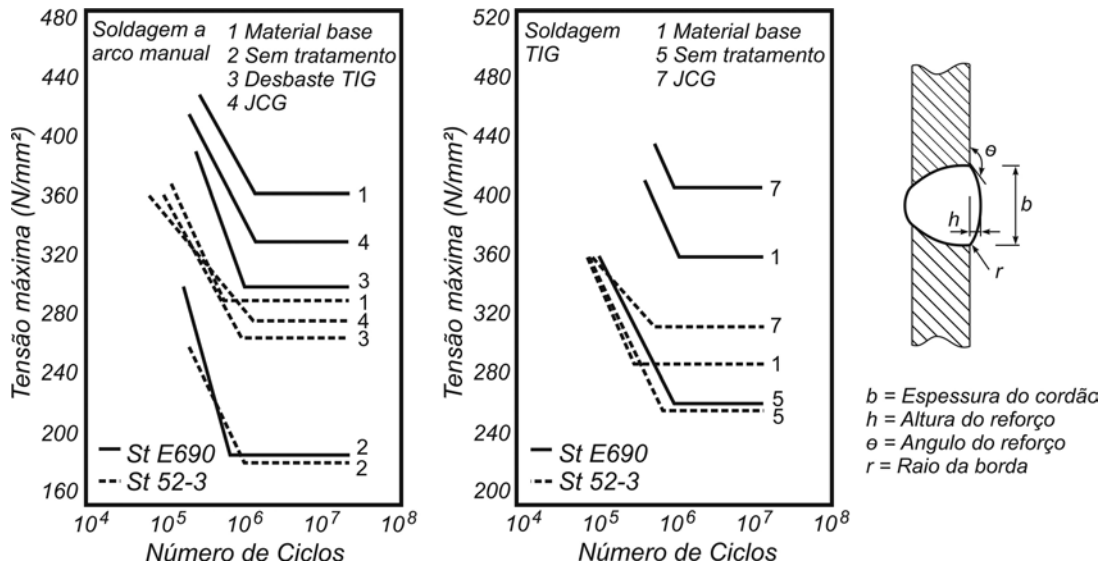


Figura 3. Vida à fadiga para corpos de prova fabricados por soldagem à arco elétrico manual e TIG, submetidos a diferentes tratamentos pós-soldagem, Wohlfahrt e Heesch [14].

Tabela 2. Limites de fadiga para juntas soldadas no aço 18Ni(250) [15][16].

Tratamento	Tensão residual superficial (MPa)	Limite de Fadiga (MPa)	Limites de Fadiga estimados (MPa)		
			Banas <i>et al.</i> $K_f = 2,6$	Banas <i>et al.</i> $K_f = 2,0$	Yung <i>et al.</i>
Sem tratamento	-67	337	333	427	333
JCG-1	-89	344	336	431	336
JCG-2	-776	356	439	564	440
JCG-3	-332	341	373	478	373
JCG-4	-893	478	456	587	457

Onde: JCG-1 = Granalhas de vidro ($\varnothing 0,1$ mm) impelidas com ar a pressão; JCG-2 = Granalhas de aço ($\varnothing 1$ mm) impelidas com ar a pressão; JCG-3 = Granalhas de aço ($\varnothing 1$ mm) impelidas com óleo a pressão; JCG-4 = Granalhas de cabo cortado de aço arredondado ($\varnothing 0,5$ mm) impelidas com ar a pressão

Em uma nova pesquisa, Bignonnet *et al.* [17] tentaram, em 1987, discernir todos os aspectos ligados à melhora da resistência à fadiga em juntas soldadas de filete em T para dois aços estruturais de alta resistência, DIN E460 e DIN E550. Por este motivo, foram testados corpos de prova com procedimentos de soldagem otimizados e aplicando o tratamento de pós-soldagem de JCG. Para tal, foi desenvolvido um estudo preliminar muito importante, que até então não tinha sido feito em pesquisas de anos anteriores. Foi feita a escolha dos parâmetros tecnológicos ótimos do JCG (intensidade Almen, tamanho da granalha etc.) baseados nos valores de tensões residuais de compressão e suas respectivas profundidades. Este ponto, com certeza, é uma das mais importantes contribuições que traz implícita a pesquisa de Bignonnet *et al.* Devido ao desenvolvimento deste estudo prévio, constatou-se que a resistência à fadiga aumenta consideravelmente, Figura 4. Também constataram que, para um carregamento alternado, com razão de tensão de $R = 0,1$ e amplitude de tensão constante, o relaxamento das tensões residuais induzidas por JCG é quase nulo. Porém, isto somente acontece na fase da propagação das fissuras. Do mesmo modo, observaram que as tensões residuais induzidas pelo JCG nos corpos de prova, quando estes eram submetidos a altos picos de carga de tração, não eram modificadas. En-

tretanto, altos picos de carga de compressão, que provocam tensões no corpo abaixo de -250 MPa, alteram, de forma considerável, as tensões residuais. Esta alteração diminui o efeito benéfico do JCG sobre a resistência à fadiga.

Um ano depois, O'Hara [18] mostrou uma revisão de alguns dos benefícios do JCG em aços estruturais para melhorar a resistência à corrosão e, especialmente, a sua vida à fadiga. E, como em outras pesquisas, se observa claramente que o JCG, acompanhado de algum outro tratamento para corrigir as imperfeições geométricas da solda, como no caso do desbaste TIG, apresenta-se como uma combinação adequada para fornecer um ótimo tratamento pós-soldagem para estender a vida útil das peças mecânicas, Tabela 3. Isto já tinha sido mencionado por outros autores [14], sendo um processo usualmente utilizado na fabricação de vasos de pressão. Desta maneira, dado o efeito benéfico singular do JCG, O'Hara estudou os parâmetros adequados deste processo para cada aplicação individual, em concordância com o sugerido no trabalho de Bignonnet *et al.* [17]. Também faz menção de considerar o JCG como um dos tratamentos mecânicos mais econômicos a nível industrial para minimizar os mecanismos de falha por fadiga, fadiga por corrosão e corrosão sob tensão.

Em 1990, Lunarski [19] efetuou testes de fadiga em

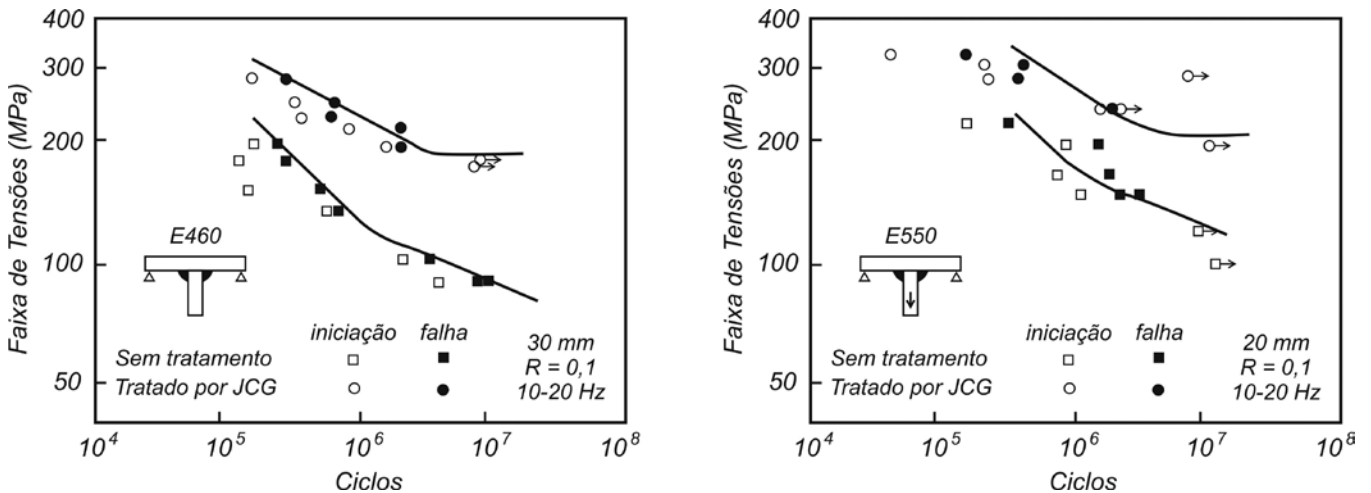


Figura 4. Resistência à fadiga de soldas nos aços E460 e E550 sem e com tratamento pós-soldagem [17].

Tabela 3. Comparação de aumento do limite de fadiga após a aplicação de diversos tratamentos [18].

Condição de Soldagem	Limite de fadiga (MPa)	Melhora (%)	Limite de fadiga estimado (MPa)
Sem tratamento	102	-	112
Soldagem otimizada	130	27	129
Retificado do pé da solda	153	50	147
Desbaste TIG	147	44	147
JCG	161	58	165
Retificado do pé da solda + JCG	261	156	250
Material base	290	-	-

juntas soldadas com tratamento posterior à soldagem. Foram fabricados corpos de prova soldados de topo (com processo de soldagem TIG) em ligas de aço de alta resistência (DIN N18K9M5T) e em aço resistente a ácidos (DIN 12H18N10T), utilizado na indústria química. Os testes avaliaram a fadiga à flexão. Após o tratamento de JCG, constatou-se, como era esperado, um aumento da resistência à fadiga dos aços. Foi sugerido o uso deste tratamento de forma especial para materiais de baixa dureza e grande plasticidade, já que a deformação provocada para estes casos é maior. Lunarski concluiu pela importância do estudo da influência da intensidade de JCG sobre a profundidade da camada encruada, isto é, sobre a distribuição das tensões residuais geradas, para melhor avaliação da combinação mais eficiente de parâmetros de JCG em cada aplicação. Isto quer dizer, em outras palavras, que os parâmetros ótimos para a aplicação do JCG não dependem, unicamente, do tipo de material, senão também da geometria, tipo de carregamento, etc.

No ano seguinte, Welsch [20] apresentou um estudo de caso particular onde o JCG é utilizado como tratamento pós-soldagem em juntas de estruturas civis, particularmente de pontes. Além de abordar aspectos concernentes aos benefícios próprios do processo de JCG, foram tratados também, de forma simplificada, a metodologia que deve ser levada em consideração para a implementação do JCG (que considera a avaliação das partes críticas a serem tratadas), a escolha dos parâmetros adequados de JCG, a preparação dos detalhes críticos para a fadiga nos cordões de solda, a aplicação do JCG e o controle de qualidade. Também ofereceu recomendações para se saber como aplicar o JCG no reparo de estruturas soldadas, após longos períodos de

uso (re-jateamento para corrigir possível relaxamento das tensões benéficas induzidas) ou depois de ter passado por algum evento imprevisto ou exigente do projeto (incêndio, sobrecarga, etc).

Já o objetivo de um trabalho de Lieurade *et al.* [21], em 1993, foi o de medir a eficiência dos tratamentos pós-soldagem em juntas soldadas de filete de tipo T e em cruz na melhora da sua resistência à fadiga. Constatou-se que o limite de fadiga para os diferentes casos varia na ordem de 50 %, sendo que estas discrepâncias se devem a vários fatores, tais como a qualidade da solda, o tipo de carregamento (uniaxial de tração ou flexão) e a localização da iniciação da trinca, Tabela 4. Descobriu-se também que, no referente aos diferentes tratamentos pós-soldagem testados, o tratamento térmico na solda não gerou efeito de melhora aparente, o desbaste TIG na solda melhorou a resistência à fadiga em 65% e o JCG melhorou a mesma em 95%, este último se apresentando como o mais efetivo para melhorar o desempenho à fadiga. Contudo, a melhor forma de prever a falha por fadiga, sem dúvida nenhuma, é garantir a qualidade da solda, uma vez que por inadequado procedimento de soldagem a raiz pode ser um ponto de iniciação de trinca, trazendo como consequência a redução de sua vida útil. Também se observou que as tensões residuais introduzidas pelo JCG podem ser usadas como tensão média para predição da vida à fadiga a partir das correlações empíricas em tabelas ou gráficos de tensão alternada versus número de ciclos.

Em 1996, Dubey e Tokhi [22] apresentaram uma pesquisa classificando as geometrias das soldas existentes nas estruturas tubulares utilizadas em plataformas marítimas e correlacionando cada uma delas com as respectivas curvas

Tabela 4. Melhora obtida para vários tratamentos pós-soldagem em diferentes geometrias de junta soldada [15].

Tipo de junta	Condição de ensaio	$\Delta\sigma$ (MPa)	Melhora (%)	Zona de início da trinca
	Sem tratamento	207	-	Unha da solda
	Tratamento térmico	207	0	
	Desbaste TIG	360	74	
	JCG	392	89	
	Sem tratamento	136	-	Unha da solda
	Tratamento térmico	133	-2	
	Desbaste TIG	220	62	
	JCG	288	112	
	Sem tratamento	178	-	Unha da solda
	Tratamento térmico	135	-24	
	Desbaste TIG	171	-4	
	Sem tratamento	132	-	Unha da solda
	Tratamento térmico e jateamento com areia	223	69	
	Desbaste TIG	218	65	
	Sem tratamento	139	-	Unha da solda
	Tratamento térmico	151	9	
	Desbaste TIG	230	65	
	JCG	240	73	

Tabela 5. Classificação de geometria de solda para estruturas tubulares por Dubey e Tokhi [22].

Categoria	Situação	Classe de tensão
A	Tubo sem solda	Tração, compressão, flexão e alternante
B	De topo, sem mudança na seção, penetração até a raiz da solda, inspecionado com raios-X ou ultra-som.	Tração, compressão, flexão e alternante
C	De topo, penetração até a raiz	Tração, compressão, flexão e alternante
D'	Conexão simples T, Y e K com penetração até a raiz da solda.	Tração, compressão, flexão e alternante em membros secundários
E'	Conexão simples T, Y e K com penetração parcial, conexões tubulares complexas	Tração, compressão, flexão e alternante em membros secundários
X	Membro principal, conexões simples T, Y e K	Ponto quente (hot point) de tensão ou deformação na superfície externa do membro principal no pé da solda da união com o membro secundário
X	Interseção cilindro-cone não reforçado	Ponto quente de tensão na mudança de ângulo
X	Conexões onde sua aplicação é testada em modelos em escala precisos	Pior ponto quente de deformação
K	Conexão tubular simples K onde a razão γ R/T do membro principal não excede 24	Carregamento de cisalhamento ou área de cisalhamento em membro principal
T	Conexão tubular simples T e Y onde a razão γ R/T do membro principal não excede 24	Carregamento de cisalhamento ou área de cisalhamento em membro principal

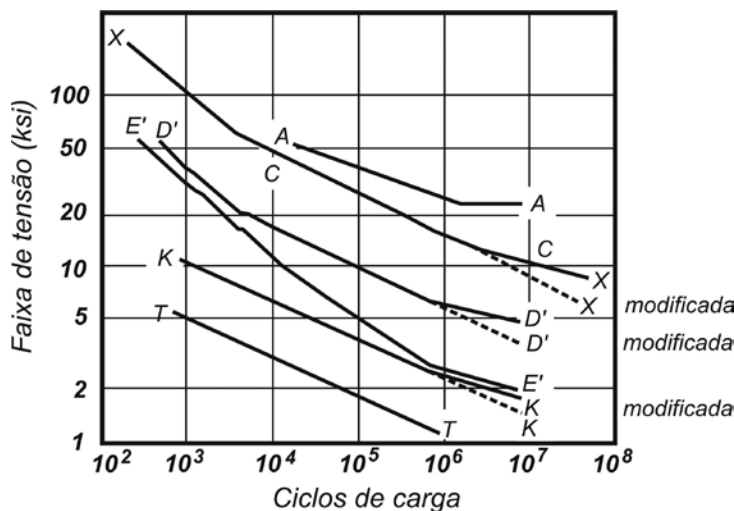


Figura 5. Curvas S-N para os diferentes tipos de geometria de solda classificados na Tabela 5 segundo Dubey e Tokhi [22]

S-N publicadas pela AWS (American Welding Society) em 1972, Figura 5. Esta classificação é feita em função da geometria, do tipo de concentrador de tensões, do carregamento aplicado e do tipo de solda, Tabela 5. Através desta resenha sugere-se ou não a necessidade da aplicação do JCG como tratamento pós-soldagem.

No mesmo ano, Ojha *et al.* [23] mostraram uma metodologia experimental de otimização, sugerido por pesquisadores anteriores (Bignonnet *et al.* [17] e O'Hara [18]), para o uso do JCG em juntas soldadas com o intuito de elevar a resistência à fadiga. Nesta metodologia é apresentado um procedimento de otimização dos parâmetros do JCG para encontrar a combinação que mostre ser a melhor em função do aumento da vida à fadiga, Figura 6. Corpos de prova cilíndricos fabricados em aço de baixo carbono foram soldados de topo numa junta do tipo V para depois serem tratados com JCG sob 22 diferentes combinações de parâmetros do JCG, sendo as variáveis a intensidade Almen, a pressão de ar e o fluxo e tamanho da granalha. Após os testes de resistência à fadiga serem executados, observou-se que para uma determinada combinação de parâmetros de material, Tabela 6, a resistência à fadiga do corpo de prova se mostra superior que para os outros ajustes de parâmetros, Figura 6. Também se concluiu que a maior resistência à fadiga para os corpos de prova soldados obtida após a otimização corresponde a uns 43% da máxima resistência do material base.

Tabela 6. Parâmetros otimizados da aplicação de JCG em junta soldada [23].

No	Parâmetro	Valor ótimo	Faixa ótima
1.	Intensidade de JCG	0,38A	0,3 – 0,5A
2.	Tamanho da granalha	S-330	S-330 – 460
3.	Fluxo de granalha	0,160 kg/s	0,1 – 0,16 kg/s

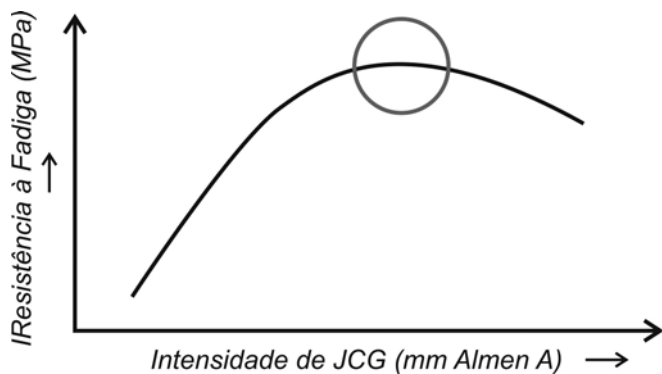


Figura 6. Resistência à fadiga em função da intensidade Almen para uma junta soldada, [23].

Ainda no mesmo ano, Hamidi *et al.* [24] avaliaram a resistência à fadiga de uma junta soldada TIG, em aço DIN 15CrMo, após a aplicação do JCG, para 3 diferentes intensidades Almen de JCG. A avaliação da resistência à fadiga do material foi testada através de ensaios experimentais e o coeficiente de concentração de tensões foi avaliado através de simulação numérica, usando o método dos elementos finitos (MEF). Foram executados testes de raios-X para encontrar a distribuição de tensões residuais no material base, na zona termicamente afetada (ZTA) e no cordão de solda. Finalmente, de forma complementar, foram executados ensaios de microdureza. Como se pode observar na Figura 7, o maior efeito da aplicação do JCG, resultando o maior nível de tensões residuais de compressão ocorre na ZTA, por outra parte, é no cordão de solda que é menos. Outra observação encontrada neste trabalho é que nos testes de fadiga os corpos de prova fraturaram, na maior parte dos casos, no limite entre a ZTA e o cordão de solda, devido ao concentrador de tensões geométrico e à interfase entre materiais dissimilares.

Também no ano 1996, Nadkarni e Sharma [25] apresentaram um estudo feito na indústria de carvão onde o JCG é empregado como tratamento para manutenção das instalações. Como primeiro passo foi detectada a zona crítica de possível falha por fratura devido aos carregamentos cíclicos de serviço. Esta zona crítica é a interface entre a carvoeira e o alimentador que lhe fornece carvão. Após um estudo detalhado do caso e execução de ensaios de fadiga em corpos de prova, foi proposta como solução a aplicação periódica do JCG, a cada meio ano, para aumentar a resistência à fadiga e à corrosão da estrutura em questão. Isto se deve ao relaxamento das tensões pelo grau de vibrações causadas pelo transportador do carvão sobre a estrutura, que mesmo sendo superdimensionada, já apresentou fraturas nas soldas por sobrecargas.

Em 1996, Nguyen e Wahab [26] investigaram, através de simulação numérica, como é alterada a resistência e a vida

à fadiga em juntas em X soldadas de topo, submetidas a carregamento de tração pulsante, devido às tensões residuais induzidas e a descontinuidades como mordeduras e desalinhamento da junta. Consideraram como tratamentos pós-soldagem válidos para a introdução das tensões residuais de compressão o JCG e o martelamento. Foram utilizadas para esta modelagem uma combinação e superposição da análise pelo método dos elementos finitos, com as formulações do mecanismo linear-elástico da teoria da fratura. Descobriu-se neste trabalho que existe um grande efeito prejudicial das mordeduras e o desalinhamento das juntas soldadas e que ambas as descontinuidades da solda podem ser melhoradas através da diminuição das tensões residuais de tração ou quando transformadas para tensões residuais de compressão através dos tratamentos de pós-soldagem mencionados. O benefício se mostra mais preponderante para melhorar as propriedades dos corpos que apresentam descontinuidade de desalinhamento.

Em 1999, Nadkarni e Sharma [27] apresentaram um estudo com aço inoxidável onde o corpo de prova era soldado por feixe de elétrons (EBW, Electron Beam Welding) e tratado com o JCG, como único tratamento pós-soldagem. Foi ensaiada a resistência à fadiga aplicando um carregamento cíclico de flexão e torção em um equipamento especial desenvolvido para este propósito. Da mesma forma que para soldagem de arco elétrico ou TIG, o aço apresentou uma melhora na suas propriedades mecânicas. Mostrou um aumento na resistência à fadiga do material de 54%. Já em 2003, Cheng *et al.* [28] compararam, através da caracterização da distribuição de tensões residuais geradas, os tratamentos de jateamento ultra-sônico e o JCG, ambos como tratamentos pós-soldagem, com a finalidade de avaliar os seus efeitos na resistência à fadiga do material. A medição é feita através das técnicas de difração de nêutrons e raios X. Para isso se desenvolveram testes empregando aço estrutural ASTM A572, material típico para construção de estruturas navais e pontes metálicas soldadas. Comprovou-se neste trabalho

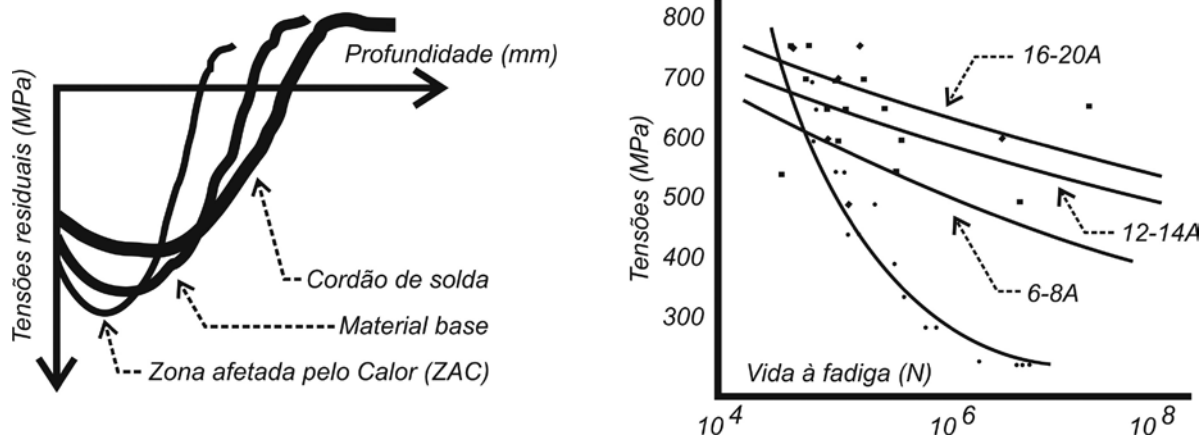


Figura 7. Distribuição de tensões residuais para diferentes zonas da junta soldada e resultados de teste de fadiga para 3 valores de intensidade Almen de JCG [24].

que, ainda que ambos os tratamentos gerem tensões residuais de compressão próximas à superfície que ultrapassam o limite de escoamento do material tratado, a profundidade da camada que as contém, para o caso do jateamento ultra-sônico, é quase o dobro que a gerada pelo JCG. Porém, as magnitudes das tensões originadas, para as duas técnicas, são semelhantes. Também, para ambos os processos, é notado que a inserção da camada fina de tensões residuais de compressão na superfície beneficia mais a primeira etapa de iniciação de trincas que a segunda etapa de propagação, sendo como era esperado, o benefício em ambas as etapas maior no jateamento ultra-sônico, Figura 8.

No mesmo ano, Roy *et al.* [29] mostraram que para encontrar as tensões residuais, por extensometria, em juntas soldadas de aços submetidas ao processo de jateamento com granalha, não é suficiente o uso da teoria da elasticidade acoplada à técnica do furo incremental. É importante considerar também a existência de deformação plástica (deformação plástica acima de 50% do limite de escoamento). Mas esta imperfeição na técnica é corrigida através da utilização de modelagem numérica da técnica do furo incremental, usando o MEF. Os resultados foram corroborados para o aço estrutural ao carbono-manganês.

Em 2004, Branco *et al.* [30] apresentaram os resultados do uso do martelamento para reabilitação de cordões de solda que apresentam trincas, em um estudo de resistência à fadiga. São ensaiados à flexão corpos de prova com solda de filete em T, com e sem trincas na margem da solda. Logo depois de serem tratados com martelamento, foi constatado mediante análise de tensões residuais por difração de raios-X, que as tensões residuais ao longo da solda são maiores que as transversais à ela, sendo que ambas ultrapassaram o limite de escoamento em compressão, o que indica a eficiência da aplicação. Uma análise de dureza demonstrou os exemplares possuírem uma camada encruada na superfície de 2,5 mm, profundidade das tensões residuais compressivas. Como esperado, o martelamento produziu, nos espécimes tratados,

um benefício substancial na vida à fadiga, especialmente naqueles que continham trincas pequenas, Figura 9. Por outro lado, o benefício foi mínimo para corpos de prova re-martelados após o aparecimento da trinca, produto das cargas cíclicas, o que recomendaria, neste caso particular, uma única aplicação do tratamento.

Ainda em 2004, Wahab e Alam [31] descreveram a influência de várias imperfeições nas juntas soldadas de aços estruturais ao carbono-manganês, como porosidade, fissuramento na solidificação, etc., sobre o tempo de propagação de trincas submetidas a distintas combinações de cargas axiais, fletoras e torsionais cíclicas. Foram calculados os fatores de intensificações de tensão usando simulação numérica e o tempo de propagação das trincas usando formulações de mecanismos de fratura. Encontraram que mesmo que a melhoria da geometria da junta soldada pelo JCG faça diminuir o fator concentrador de tensões e, assim, incrementar a resistência à fadiga, o benefício sobre a vida à fadiga é limitado, dependendo do tipo de carregamento aplicado, o qual chega até eliminar o benefício obtido. Por isso, como comentado por artigos anteriores, é importante o desenvolvimento do estudo de caso antes da aplicação do JCG para garantir o máximo benefício na vida do componente.

Em 2005 Huo *et al.* [32] avaliaram a vida à fadiga, de forma experimental, de soldas em ângulo perpendicular de filete para duas condições diferentes, a primeira tratando a junta soldada por desbaste TIG e a segunda, adicionalmente ao desbaste TIG, foi tratada com jateamento ultra-sônico. Em geral os corpos de prova do segundo grupo mostraram melhores resultados na resistência à fadiga (2,2 vezes maiores) e na vida à fadiga (entre 2 e 10 vezes maior). Também, encontrou-se nos testes que os corpos de prova submetidos a carregamentos de amplitude constante mostraram um aumento da vida à fadiga maior que aqueles submetidos a carregamentos equivalentes de amplitudes variáveis. Este aumento é de aproximadamente 50%. Por outra parte, o incremento da resistência à fadiga para ambos os casos são

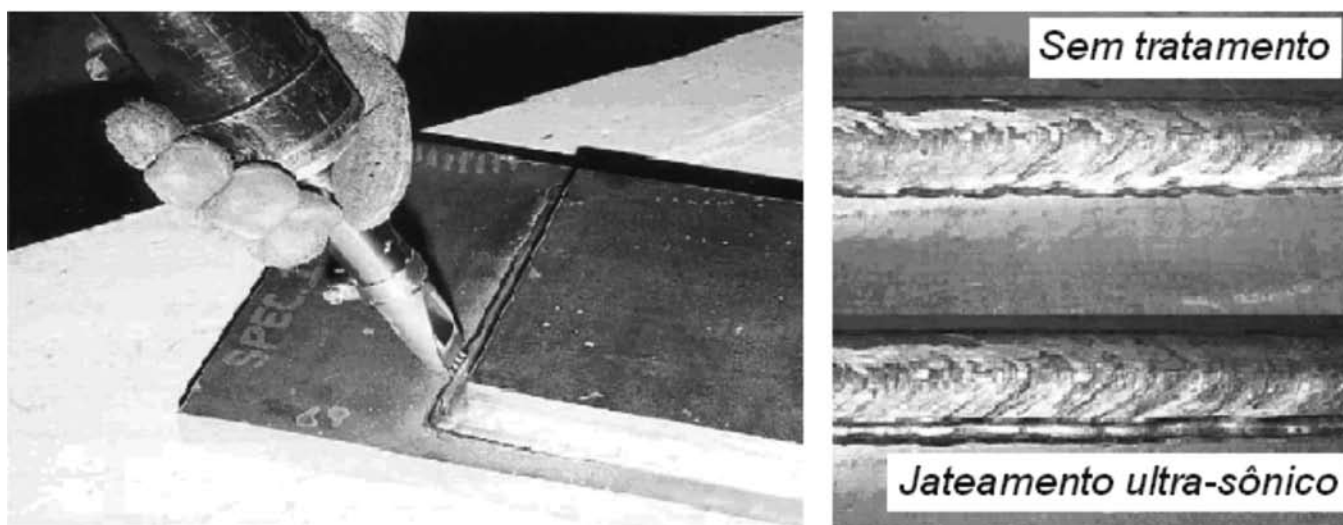


Figura 8. Operação de jateamento ultra-sônico e resultado superficial [28].

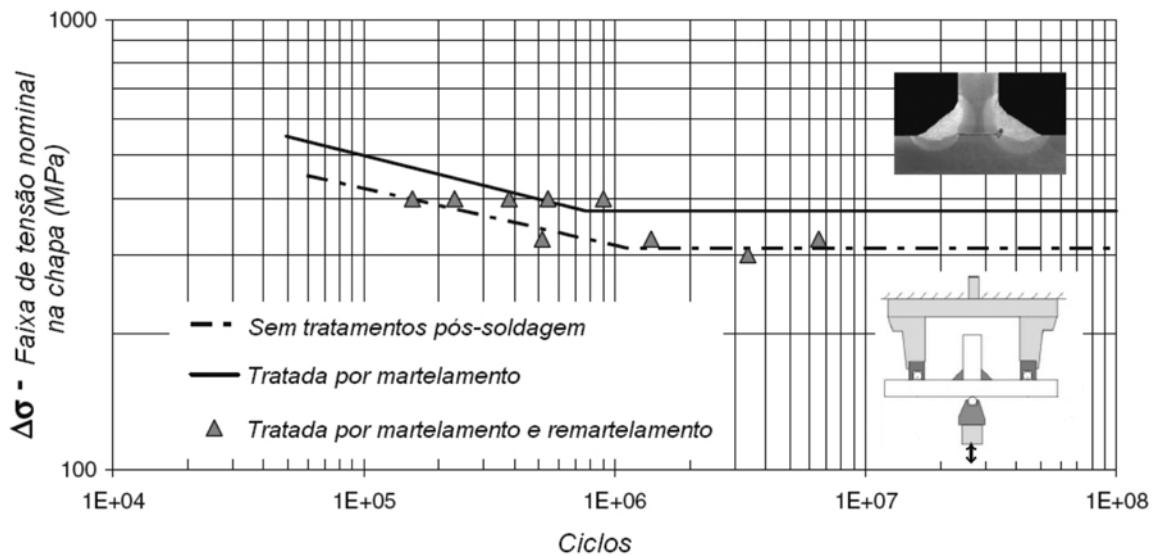


Figura 9. Curvas S-N resultantes para cordões de solda submetidos a distintos tratamentos pós-soldagem e de reparo [30].

similares. Porém, independente do carregamento aplicado ser constante ou variável, para fadiga de alto ciclo, o jateamento com ultra-som mostra melhor desempenho que uma única aplicação do desbaste TIG.

Finalmente, em 2006, Mochizuki [33] discutiu as diversas técnicas pós-soldagem para o controle e redução das tensões residuais de tração depois da soldagem, particularmente, as técnicas de jateamento com água à alta pressão (JAAP) e recobrimento TIG, para proteção contra fadiga e corrosão sob tensão. Foram testados corpos de prova soldados e submetidos a ambos os tratamentos de pós-soldagem experimentalmente. Foram usados dois tipos de geometrias

de solda, a saber, filete duplo em cruz e junta de topo em X, ambas de vários passes e efetuadas em seqüências de deposição otimizadas. Ambas as técnicas se mostraram eficientes para aumentar a resistência à fadiga do material e a resistência à corrosão sob tensão Figura 10. No caso do JAAP foram obtidos os valores das tensões residuais induzidas com mais precisão por meio de uma análise de simulação numérica usando o método dos elementos finitos, Figura 10. A precisão de cálculo destas tensões residuais é importante, já que conhecendo o valor delas, assim como o valor das tensões induzidas pelo carregamento de serviço, pode-se estimar o tempo de vida de estruturas soldadas.

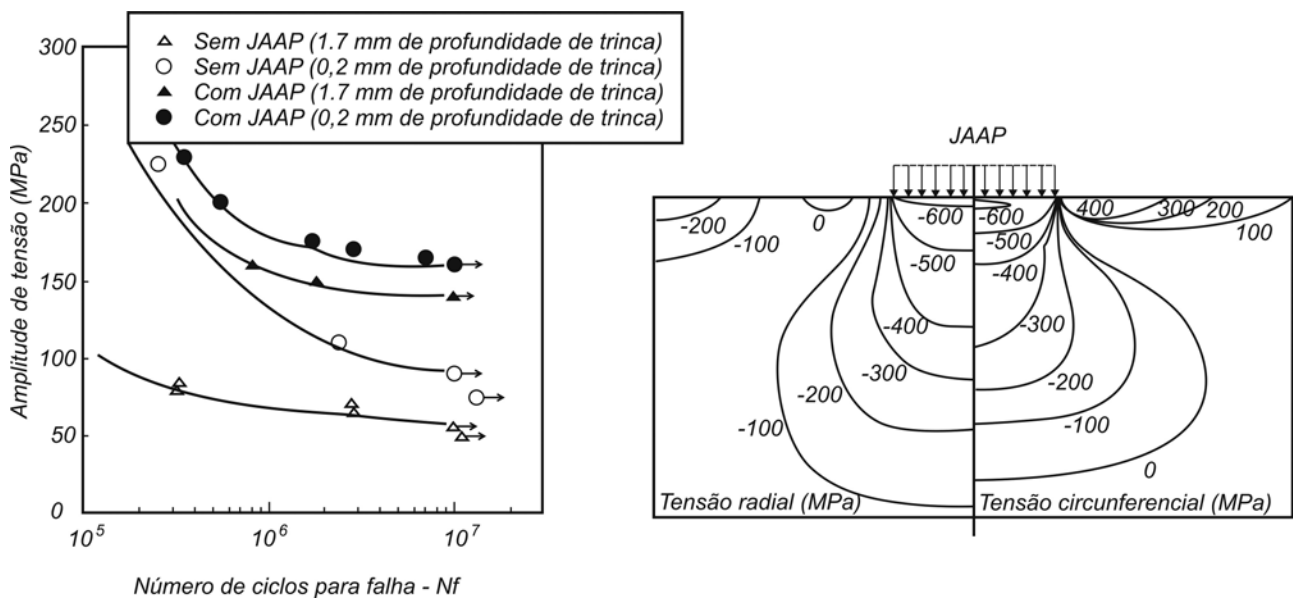


Figura 10. Resultados do teste de fadiga dos corpos de prova submetidos e não submetidos ao JAAP; distribuição de tensões residuais gerado pelo JAAP utilizando uma pressão de 2000 MPa [33].

3. Conclusões

Demonstrou-se, a partir das pesquisas revisadas, que as técnicas de jateamento são adequadas para serem usadas como tratamento pós-soldagem, visando o aumento da vida à fadiga e da resistência à corrosão sob tensão. Porém, o aumento da resistência à fadiga é mais relevante para fadiga de alto ciclo. Como foi constatado nos artigos revisados, existem correlações empíricas para estimar a vida à fadiga de juntas soldadas submetidas a tratamentos pós-soldagem como de alívio de tensões ou de jateamento. Porém, para seu emprego é indispensável conhecer o coeficiente de concentração de tensão.

Conclui-se ainda pela recomendação do JCG como processo para, também, reparação de estruturas com fissuras para retardar o seu crescimento ou re-introduzir tensões residuais de compressão quando estas relaxam com o tempo. Antes de introduzir tensões residuais de compressão usando quaisquer dos processos mencionados anteriormente, na maioria dos casos, é desejável corrigir as irregularidades geométricas do cordão de solda, utilizando processos de remoção de material, como o desbaste TIG ou o esmerilhamento. Na grande parte das pesquisas revisadas, esta combinação de processos apresenta um aumento da vida à fadiga superior em relação a quando é aplicado apenas um deles.

As pesquisas revisadas mostram que a efetividade do emprego de tratamentos pós-soldagem na junta soldada está relacionada à região na qual é aplicado. O tratamento por jateamento favorece mais a vida à fadiga da solda quando aplicado na ZTA. Ao mesmo tempo, ficou demonstrado que para garantir a eficácia do procedimento pós-soldagem a ser aplicado na junta, visando estender a vida à fadiga ou aumentar a resistência à corrosão sob tensão, é necessário desenvolver um estudo prévio do caso que envolva, principalmente, os tipos de junta soldada, materiais envolvidos, carregamentos de serviço, condições ambientais e requerimentos de segurança.

Cabe destacar que a técnica de martelamento, quando possível de aplicação, proporciona a maior profundidade de camada de tensões residuais de compressão e as maiores resistências à fadiga e corrosão sob tensão. Paralelamente as técnicas de jateamento ultra-sônico e a laser proporcionam também excelentes resultados, sendo a principal desvantagem o custo do equipamento.

4. Avaliação Final

A partir das pesquisas revisadas neste trabalho, dividido em duas partes, pode-se afirmar que, na maioria dos casos, a técnica mais adequada como tratamento pós-soldagem, visando o aumento da vida à fadiga e da resistência à corrosão sob tensão seria a de jateamento. Isto vai se cumprir tanto em aços quanto em ligas de alumínio, devido ao valor das tensões residuais de compressão introduzidas (próximas ao limite do escoamento do material base) e à grande profundidade que estas tensões atingem. Não obstante, existem algumas configurações de juntas soldadas que são mais ou

menos sensíveis ao benefício destes tratamentos.

O procedimento pós-soldagem deve contemplar, necessariamente, o levantamento e análise das tensões residuais geradas no processo de soldagem e as induzidas no processo de jateamento. Da mesma maneira, é preciso conhecer ou pelo menos estimar os fatores de concentração de tensão. As grandezas anteriormente mencionadas podem ser obtidas através de métodos experimentais (extensometria, difração, microscopia eletrônica, etc.) ou por simulação numérica computacional (método dos elementos finitos, por exemplo).

Em síntese, recomenda-se que cada situação prática deva ser analisada criteriosamente, com o objetivo de escolher a técnica e os parâmetros mais adequados para a sua aplicação. É evidente que as vantagens de um determinado tratamento podem se tornar desvantagens em determinadas situações e vice-versa.

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.; 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 I: ligas de alumínio e outros materiais). *Revista Soldagem e Inspeção*, ISSN 0104-9224, Vol. 12, Nº 1, Jan/Mar 2007, pp 63-72, 2007.
- [2] FOSTER, M.L.; ABRAMOV, P. Development of Navaplsienlab Mechanical Peen Procedure for Improvement of Fatigue properties of HY-80 Welds, U.S. Naval Applied Science Laboratory Brooklyn NY, Project 9300-1. Report n. 1, 34 p., Abr. 1964.
- [3] SHEEHAN, J.P. Shot Peening of Pressure Vessels, IIT Research Institute, Report n. 4, 7 p., Jul. 1964.
- [4] KNIGHT, J.W. Improving the fatigue strength of fillet welded joints by grinding and peening, *Welding Research International*, v. 8, n. 6, p. 519-540, 1978.
- [5] CHANG, S-T.; LAWRENCE Jr., F.V. Predicting The Effect Of Shot Peening On Weld Fatigue Life, 1º International Conference of Shot-Peening, p. 461-478, 1981.
- [6] BASQUIN, H.O. The exponential law of endurance tests. *ASTM Proceedings* 10, p. 625, 1910.
- [7] CHANG, S-T.; LAWRENCE Jr., F.V. An empirical model for weld fatigue resistance, 2º International Conference of Shot-Peening, p. 297-305, 1984.
- [8] KOIBUCHI, K.; HAYAMA, T.; KAWAI, S. Residual stress and fatigue strength of surface hardened components, 1º International Conference of Shot-Peening, p. 413-422, 1981.
- [9] TAKEMOTO, M.; SHINOHARA, T.; SHIRAI, M. Prevention of stress corrosion cracking of weldment by wet shot peening, 2º International Conference of Shot-Peening,

p. 39-42, 1984

[10] BIGNONNET, A.; LIEURADE, H.P.; PICOUE, L. Improvement of the fatigue life for offshore welded connections, Conference of Welding of Tubular Structures, p. 63-71, Jul. 1984.

[11] MADDOX, S.J. Improving the fatigue strength of welded joints by peening, *Metal Construction*, v. 17(4), p. 220-224, Abr. 1985.

[12] FLOYD, T. Use shot peening to toughen welds, *Welding design & fabrication*, p. 88-70, Sep. 1985.

[13] REYNOLDS, A.C.; LOADER, D.J.; WALKER, E.S.; DOVER, W.D. Review paper – a summary of the 1983-85 Cohesive fatigue Programme. 1° Mechanical Engineering Conference, Londres, Institute of Mechanical Engineering, n. 139, p. 213-220, 1986.

[14] WOHLFAHRT, H.; HEESCHEN, J. Possibilities for the improvement of the fatigue strength of butt welded joints of high strength structural steels. *Fatigue of engineering materials and structures*, v. 2, n. 263, 8 p., Sep. 1986.

[15] BANAS, G.; LAWRENCE, Jr., F.V. Improvement of Ni 18 (250) maraging steel weldment fatigue strength through shot peening, 3° International Conference of Shot-Peening, p. 675-680, 1987.

[16] YUNG, J.-Y.; LAWRENCE, F.V. analytical and graphical aids for the fatigue design of weldments, *Fatigue and fracture engineering materials structures*, v. 8, n. 3, p. 223-241, 1985.

[17] BIGNONNET, A.; LIEURADE, H.P.; PICOUE, L.; CASTEX, L. Shot peening of welded joints and residual stress relaxation during fatigue, 3° International Conference of Shot-Peening, p. 585-594, 1987.

[18] O'HARA, P. Surface pre-stressing to reduce the incidence of stress corrosion cracking and corrosion fatigue of welded joints, *Metal Improvement Company*, 11 p., 1988.

[19] LUNARSKI, J. Fatigue strength of welded joints after pneumatic shot peening, 4° International Conference of Shot-Peening, p. 273-280, 1990.

[20] WELSCH, W.H. A concept for preventing repeated weld repairs of bridge structures, *Shot-peening theory and applications*, IIT Research Institute, 20 p., 1991.

[21] LIEURADE, H.P.; CASTELUCCI, P.; FLAVENOT, J.F.; LU, J.; BEL, G. Efficiency of fatigue improvement techniques as a function of the type of welded joint, 5° International Conference of Shot-Peening, p. 359-370, 1993.

[22] DUBEY, S.K.; TOKHI, V.K. Shot Peening for tubular welded joints of offshore structures, 6° International Conference on Shot-Peening and Blast Cleaning, Índia, 1996.

[23] OJHA, L.N.; SHARMA, M.C.; JANARDANAN, P.N. Optimum shot peening parameters to improve fatigue strength of welded structural steels, 6° International Conference on Shot-Peening and Blast Cleaning, Bopthal, Índia, 1996.

[24] HAMIDI, T.; FATHALLAH, R.; BARRALLIER, L.; SHIDHOM, H.; CASTEX, L. Behaviour of Shot Peened

Welded Steel Under Cyclic Loading, 6° International Conference of Shot-Peening, p.130-141, 1996.

[25] NADKARNI, V.S.; SHARMA, M.C. Shot peening in preventing coal bunker failure, 6° International Conference on Shot-Peening and Blast Cleaning, Bopthal, Índia, 1996.

[26] NGUYEN, N.T.; WAHAB, M.A. The effect of undercut and residual stresses on fatigue behaviour of misaligned butt joints, *Engineering Fracture Mechanics*, USA, v.55, n. 3, p.453-469, 1996.

[27] NADKARNI, V.S.; SHARMA, M.C. Behaviour of shot peened electron beam welded s. S. Plate samples under combined reverse torsional & bending cyclic stress, 7° International Conference of Shot-Peening, p. 161-166, 1999.

[28] CHENG, X.; FISHER, J.W.; PRASK, H.J.; GNÄUPEL-HEROLD, T.; YEN, B.T.; ROY, S. Residual stress modification by post-weld treatment and its beneficial effect on fatigue strength of welded structures, *International Journal of Fatigue*, USA, n.25, p.1259-1269, 2003.

[29] ROY, G.; BRAID, M.; SHEN, G. Application of ADINA and hole drilling method to residual stress determination in weldments, *Computers and Structures*, USA, n.81, p.929-935, 2003.

[30] BRANCO, C.M.; INFANTE, V.; BAPTISTA, R. Fatigue behaviour of welded joints with cracks, repaired by hammer peening, *Fatigue and fracture engineering materials structures*, v. 27, p. 785-798, 2004.

[31] WAHAB, M.A.; ALAM, M.S. The significance of weld imperfections and surface peening on fatigue crack propagation life of butt-welded joints, *Journal of Materials Processing Technology*, USA, n.153-154, p.931-937, 2004.

[32] HUO, L.; WANG, D.; ZHANG, Y. Investigation of the fatigue behaviour of the welded joints treated by TIG dressing and ultrasonic peening under variable-amplitude load, *International Journal of Fatigue*, USA, n.27, p.95-101, 2005.

[33] MOCHIZUKI, M. Control of welding residual stress for ensuring integrity against fatigue and stress-corrosion cracking, *Nuclear Engineering and Design*, artigo em processo de publicação, 2006.