

# CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE DESEMPENO UTILIZANDO FLAP PEENING, EM PEÇAS COM APLICAÇÃO DE JUNTA POR FSW.

Clodoaldo Gomes da Silva\*  
Elton George Coelho de Araújo\*

**Resumo.** Este trabalho tem o objetivo de caracterizar o processo de desempenho, utilizando o processo de Flap Peening em peças com aplicação de FSW (Friction Stir Welding), processo de solda por fricção. Após a soldagem as peças podem apresentar empenamento, o que prejudica seu desempenho sendo portanto descartadas. Para caracterização do processo de desempenho foi utilizado o método de tentativa, que foi alternado entre *Flap Peening* e pré-tensionamento mais *Flap Peening*. O limite de tolerância do empenamento é de 0,3mm para que a peça não seja rejeitada. Com o *Flap Peening* e pré-tensionamento foi obtido resultados satisfatórios.

**Palavras-chaves:** Desempeno, Flap Peening, Friction Stir Welding e Pré-tensionamento

**Abstract.** This research aims to characterize the straightening process, using the process of Flap Peening on parts with application of FSW (Friction Stir Welding) welding process for friction. After welding the pieces present warping, which affect the parts and many of them are discarded for use. To characterize the straightening process out, was used the attempt, which was alternated between Flap Peening and pre-tensioning plus Flap Peening. The tolerance limit of twist is 0.3mm so that the piece is not rejected. With Flap Peening and pre-tensioning were achieved satisfactory results.

**Keywords:** straightening out, Flap Peening, Friction Stir Welding and Pre-tensioning

## Introdução

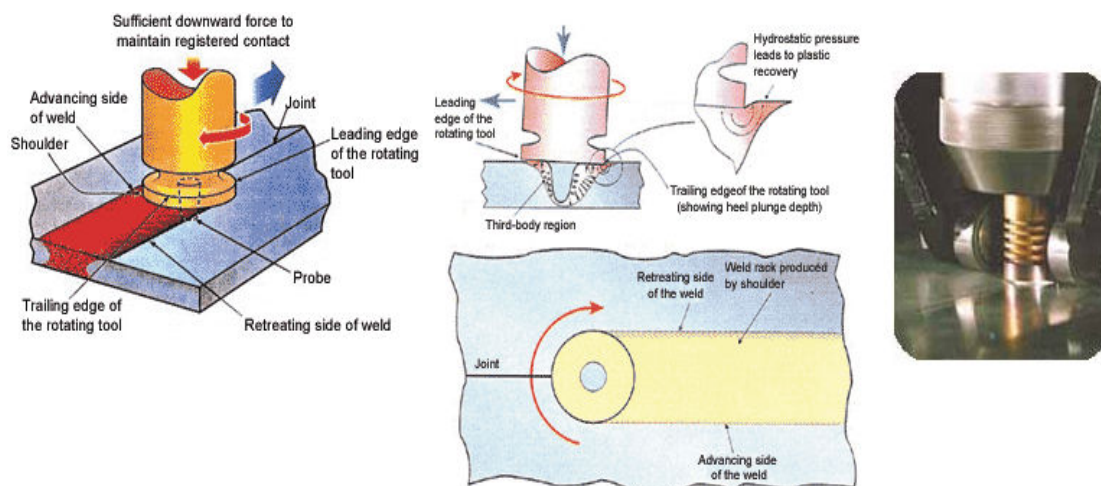
Hoje em dia a nova geração de aeronaves civis, tem como requisito básico de projeto um período de vida útil mínima de 20 anos ou 90000 vôos. Portanto as estruturas aeronáuticas devem possuir uma combinação de baixo peso e altas resistências estrutural e à fadiga. Além destas características básicas, uma aeronave em projeto também deverá apresentar um baixo custo de aquisição e de manutenção aliada a um alto desempenho de vôo. Em uma estatística informal cada quilograma a menos numa aeronave gera uma economia anual operacional para o cliente de até US\$ 1000,00. Na compra de uma aeronave é levado em consideração o baixo preço de aquisição, custos operacionais e peso estrutural. O peso estrutural é levado em consideração na hora da aquisição de uma aeronave, já que quanto maior o peso maior será o consumo de combustível e mais elevado os custos das viagens. [3-4] As empresas aeronáuticas estão em desenvolvimento constante para alcançar a redução do peso estrutural, através da utilização de novos materiais com maior relação resistência mecânica/massa específica, materiais compostos e principalmente são alcançados resultados significativos pela substituição dos prendedores mecânicos por novas tecnologias de junção, tal como soldagem por atrito, conhecida como “Friction Stir Welding”.

\* Universidade do Vale do Paraíba- UNIVAP

\*\* Orientadora Kátia Regina Cardoso

FSW– *Friction Stir Welding* é um processo de soldagem por atrito, no qual a união se estabelece no estado sólido sem ocorrência de fusão, em função do aumento da fluidez do material decorrente da interação da ferramenta de soldagem com a superfície externa da junta. Esta técnica apresenta uma série de vantagens quando comparada à soldagem convencional, entre as quais se podem citar a ausência das microestruturas típicas de fusão, tais como dendritas, segregações e porosidades. Para a indústria aeronáutica se torna um processo extremamente viável, por que além de poder ser utilizada na soldagem de ligas de alumínio que são difíceis de serem soldadas por processos de fusão, apresenta vantagens adicionais como diminuição de peso devido a substituição das juntas tradicionais, como os rebites e parafusos, e também o aumento da resistência a fadiga, compressão e tração de peças e revestimentos. No processo FSW, uma ferramenta rotativa se aproxima e penetra nas partes a serem unidas. A ferramenta é composta basicamente de duas partes: o ombro que exerce uma força de forjamento (força vertical) forçando um fluxo de material para baixo e gerando parte do calor necessário à mistura dos materiais e o pino que também gera calor e promove a mistura mecânica propriamente dita. A figura 1 ilustra o processo FSW.[1,2,5 e 9].

A tecnologia de junção FSW possibilita uma redução de custos em painéis integrais reforçados quando comparado com os esculpido por usinagem cujo aproveitamento de matéria prima é em torno de apenas 5%. Também na substituição da rebiteagem em painéis finos reforçados, que são abundantes em construções aeronáuticas, processos de soldagem podem ser considerados vantajosos em relação ao custo e também ao peso. Comparando-se com os processos automáticos de rebiteagem, as juntas por soldas podem apresentar velocidades de 2 a 10 vezes superiores.[11]



**Fig.1- Ilustração do Processo de FSW- Friction Stir Welding [1]**

Com a utilização de novas tecnologias como o FSW, surgem novos desafios. Os materiais sujeitos a FSW podem sofrer alguns tipos de reações adversas como o empenamento da peça após a junção. Na soldagem *FSW* ocorre um atrito do ferramental com o material levando a um acréscimo da temperatura na faixa de 218 a 358°C, que não é suficiente para atingir a temperatura de fusão do material, mais é suficiente para causar empenamento nas peças. Para a utilização dessas peças nas aeronaves é necessário que esteja dentro do padrão de 0,30mm de empenamento exigido pela norma NE-03-076, para que a peça não seja rejeitada

*Shot Peening* é um processo que tem como finalidade aumentar a resistência a fadiga e prevenção contra corrosão por tensão, também é muito utilizado para desempenho e conformação de peças e revestimentos, é um tratamento superficial a frio em peças acabadas, um processo de jateamento com micro esferas de aço.[7]

*Flap Peening* é um processo de *Shot Peening* manual que utiliza uma pequena e resistente malha com 32 esferas de tungstênio fixas por uma resina. Este processo além de ser utilizado para pequenos trabalhos de aplicação de *Shot Peening*, como cobertura superficial com o objetivo de aumentar à resistência a fadiga e prevenção contra corrosão por tensão, também é muito utilizado para desempenho e conformação de peças e revestimentos Figura 2.

Como *Flap Peening* é um procedimento manual que depende da habilidade do operador, é exigido por norma [ número da norma] que as peças sujeitas a este processo de jateamento tenham uma cobertura de 200%, ou seja, o tempo de aplicação encontrado na cobertura de 100% é dobrado. O tempo para aplicação do *Flap Peening* em função da área para uma cobertura de 200% é calculado pela fórmula mostrada na Fórmula 1.[8] Essa cobertura corresponde a porcentagem de impressões de esferas, ocorridas na superfície da região onde *Flap Peening* foi aplicado. Uma lupa de 10x de aumento é usada para inspecionar e garantir a cobertura. O processo de *Flap Peening* possui três faixas de intensidade: N, C, e A. Essas escalas estão relacionadas com a reação do material ao impacto causado pelas esferas durante a aplicação de *Flap Peening*, ou seja, a intensidade do jateamento. Para cada escala utiliza-se como padrão três tipos de lâminas de aço com dimensões de 70 x 20 mm, de igual dureza, planicidade e acabamento superficial, porém de espessura variável: Tipo “N” de  $0,032 \pm 0,001$  ; tipo “C” de  $0,051 \pm 0,001$  e tipo “A” de  $0,094 \pm 0,001$  [10]. Neste trabalho utilizamos a intensidade “N”, por se tratar de peças de pequena espessura. Para a medição da intensidade de jateamento após a aplicação de *Flap Peening*, utiliza-se um relógio apalpador, capaz de especificar o valor em milímetros ou polegadas da curvatura da lâmina após o jateamento.

No entanto, o uso de *Flap Peening* em processos de desempenho ainda não está padronizado. Para isso é necessário um grande número de ensaios em diferentes condições do processo até se obter um resultado satisfatório. Esse trabalho tem como objetivo caracterizar o desempenho utilizando as técnicas de *Flap Peening* ou pré-tensionamento mais *Flap Peening* em peças que após sofreram aplicação de FSW (*Friction Stir Welding*) sofreram qualquer tipo de empenamento.



**Fig.2- Ilustração do Processo de Flap Peening [8]**

$$T_{(\text{retrabalho})} = T_{(\text{lâmina almen})} \cdot \frac{A_{(\text{retrabalho})}}{A_{(\text{lâmina almen})}} = \dots \text{ minutos}$$

$$T_{(\text{retrabalho})} = \dots \text{ minutos (tempo para aplicação de Flap Peening)}$$

$$T_{(\text{lâmina almen})} = 10 \text{ minutos (tempo para a área da lâmina almen)}$$

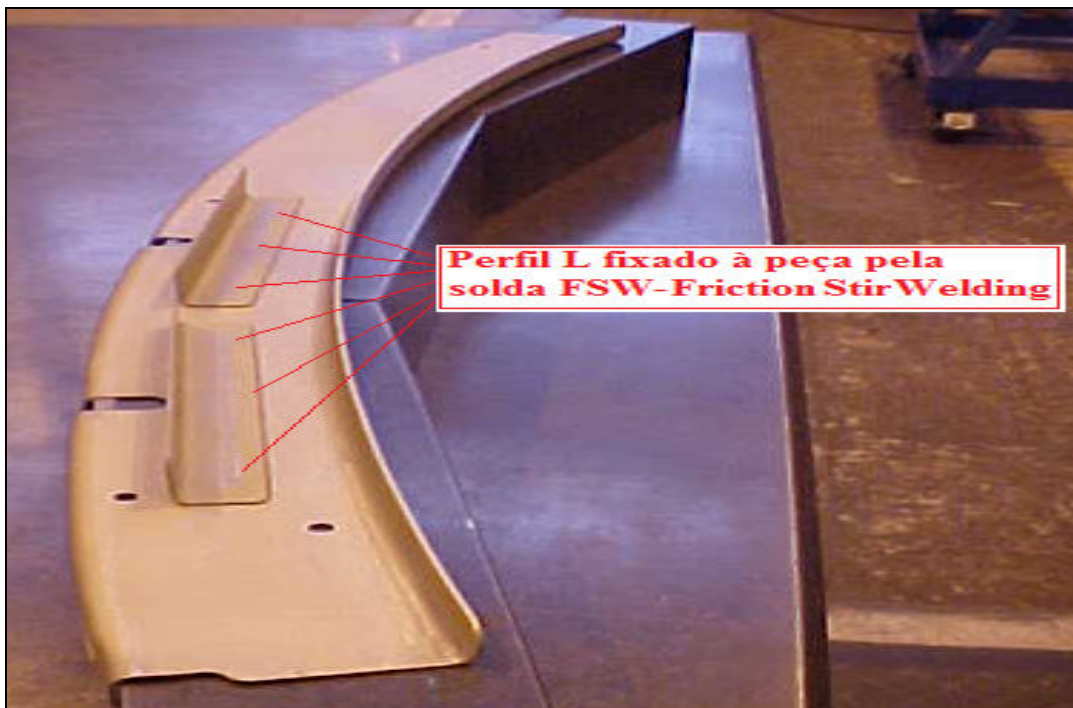
$$A_{(\text{retrabalho})} = \text{área em mm}^2 \text{ da região da peça a ser retrabalhada}$$

$$A_{(\text{lâmina almen})} = \text{área da lâmina almen, } 1395 \text{ mm}^2$$

**Formula1 – Fórmula para achar o tempo de aplicação de Flap Peening**

### **Materiais e Métodos**

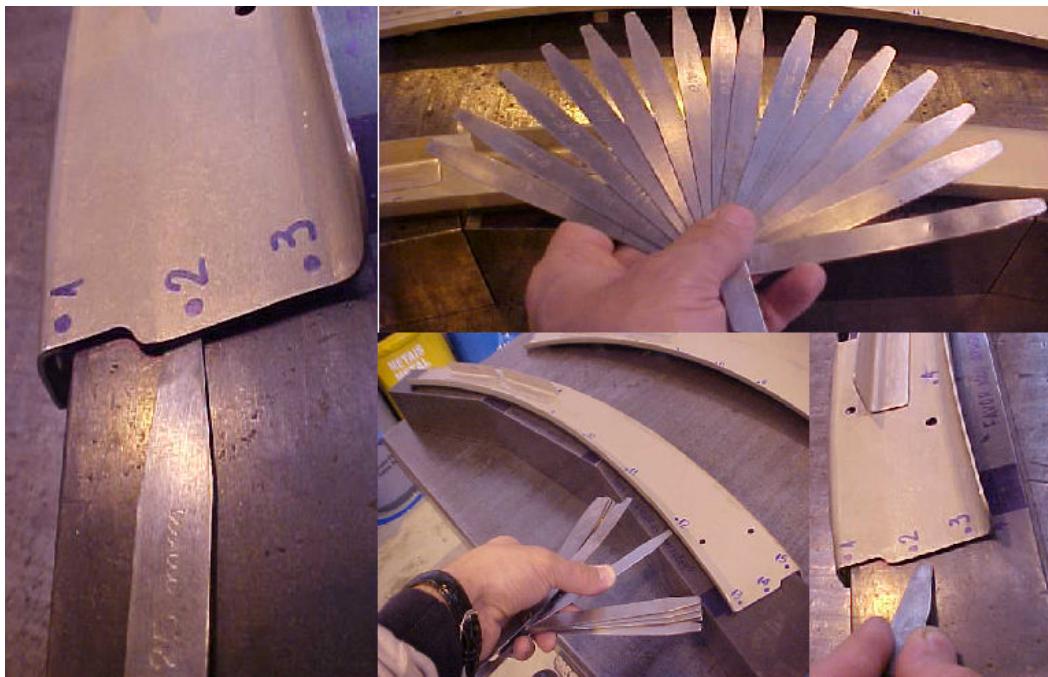
Foram fabricadas quatro peças de alumínio 7075 e nelas aplicado um reforço pelo processo de FSW (*Friction Stir Welding*). Após aplicação foi feita análise das medidas de empenamento e linha de sistema das peças ocasionado pela exposição a temperatura ocorrida no processo de aplicação do reforço por FSW Figura 3.



**Fig.3 – Peça com aplicação da solda FSW.**

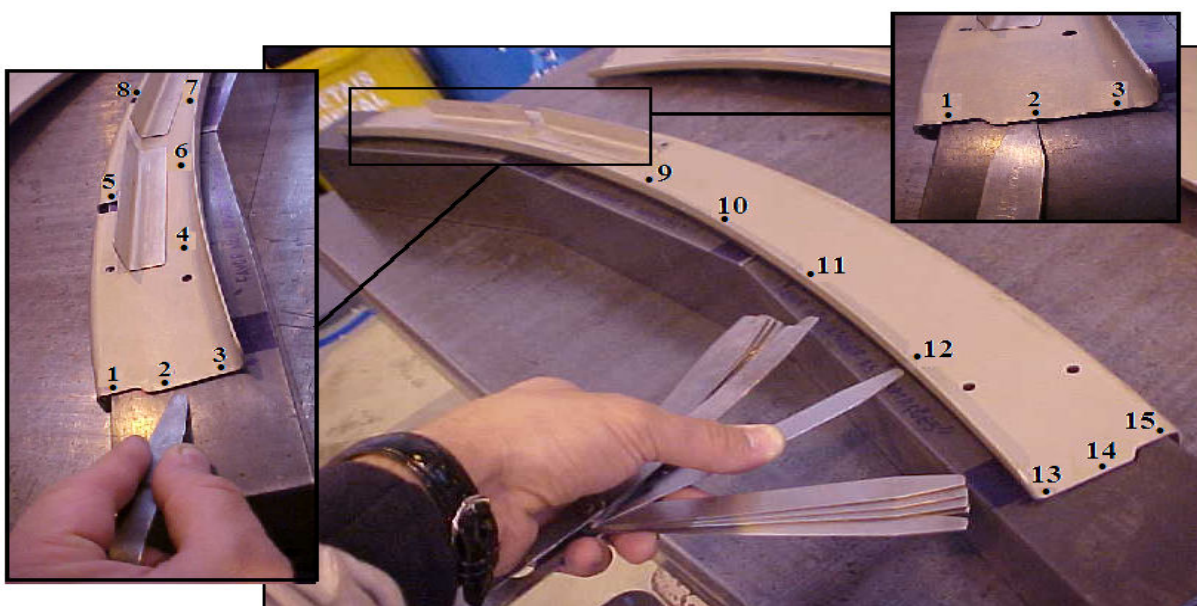
Para medir o empenamento ocasionado pela aplicação da FSW (*Friction Stir Welding*) foi usado uma mesa de desempenho calibrada, blocos padrões calibrados e calibrador de folga, que são lâminas

calibradas de espessura variada de 0,05mm a 2,0mm que possibilitam a medição do gaps de empenamento conforme mostra a Figura 4.



**Fig.4 – Medições dos gaps de empenamento**

Para que as medições sejam sempre padronizadas antes e depois do desempenho, foram definidas as posições para realizar inspeções utilizando uma mesa calibrada livre de qualquer empenamento e desnível, conforme mostra a Figura 5. Foi utilizado também a aplicação de peso de 2 kg para cada 250mm de peça partindo da extremidade conforme norma NE-07-030 [10]. Os valores das folgas seguem anotados na tabela 1.



**Fig.5– Posições inspecionadas**

**Tabela.1 – Medidas dos gaps de empenamento das peças após a solda FSW.**

MEDIDAS DO EMPENAMENTO DAS PEÇAS											
PEÇA 1			PEÇA 2			PEÇA 3			PEÇA 4		
	SEM PESO	COM PESO		SEM PESO	COM PESO		SEM PESO	COM PESO		SEM PESO	COM PESO
1	0,30	0,00	1	0,10	0,00	1	0,30	0,20	1	1,35	0,20
2	0,30	0,15	2	0,10	0,00	2	0,65	0,20	2	0,55	0,00
3	0,25	0,00	3	0,00	0,00	3	0,85	0,00	3	0,00	0,00
4	0,30	0,10	4	0,55	0,35	4	0,65	0,20	4	0,20	0,15
5	0,20	0,15	5	0,20	0,30	5	0,55	0,50	5	0,45	0,45
6	0,20	0,15	6	0,65	0,55	6	0,85	0,35	6	0,10	0,15
7	0,15	0,00	7	0,60	0,45	7	0,75	0,50	7	0,10	0,15
8	0,35	0,15	8	0,25	0,25	8	0,55	0,50	8	0,35	0,45
9	0,00	0,00	9	0,35	0,30	9	0,35	0,30	9	0,00	0,15
10	0,00	0,00	10	0,15	0,00	10	0,15	0,00	10	0,00	0,00
11	0,35	0,00	11	0,10	0,00	11	0,35	0,00	11	0,00	0,00
12	0,75	0,30	12	0,35	0,15	12	0,65	0,15	12	0,55	0,35
13	1,00	0,25	13	0,95	0,50	13	1,55	0,50	13	0,55	0,65
14	0,95	0,15	14	0,90	0,35	14	1,60	0,35	14	1,00	0,55
15	0,85	0,00	15	0,75	0,15	15	1,45	0,00	15	1,45	0,20

**Nota:** Das medidas do ponto 4 até o ponto 9 trata-se da área onde foi aplicado a solda FSW e os números que estão em vermelhos são referentes às medidas acima de 0,3mm.

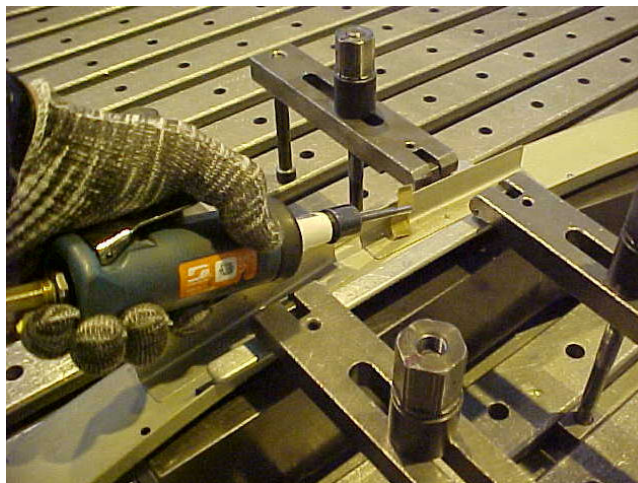
Após determinado os valores de gaps de empenamento listados na Tabela 1, iniciaram-se os trabalhos para a tentativa de diminuir o empenamento das peças, utilizando o processo de *Flap Peening* e de pré-tensionamento mais *Flap Peening*. Para iniciar a utilização do *Flap Peening* foram necessários ajustes iniciais para utilização. Foi determinado diâmetro de impressão máxima de 0,35mm, a verificação do diâmetro de impressão e necessária para certificar a qualidade de aplicação. A rugosidade atingida após aplicação do *Flap Peening* foi de aproximadamente 5,3RA. Essa rugosidade cujo máximo permitido é de 6,8RA foi controlada através de um rugosímetro. [10] No pré-tensionamento tem utilização de calços de apoio sob a base da peça, que atua como uma alavanca, fazendo sofrer uma força inversamente proporcional a aplicada. As tensões de pré-tensionamento aplicadas devem ser medidas para não ultrapassem os limites de flecha estabelecida pela norma NE-07-030[10] desenvolvida pela Engenharia de Materiais conforme podemos observar na Tabela 2. O limite de flecha indica o limite do regime elástico para o regime plástico do material, para cada altura de nervura há um limite máximo de flecha, no caso da peça estudada a nervura é de 20mm, o valor de limite máximo de flecha usado foi de 0,26. Caso o material ultrapasse o limite de flecha estabelecido, o material pré-tensionado passara do regime elástico para o plástico, onde a peça se deformará e terá que ser inutilizada.

**Tabela 2 – Valores de limites para pré-tensionamento.[10]**

Altura-H (mm)	Limite Máximo (Flecha)	Altura-H (mm)	Limite Máximo (Flecha)	Altura-H (mm)	Limite Máximo (Flecha)
5	1,06	22	0,24	43	0,12
6	0,88	23	0,23	45	0,12
7	0,75	24	0,22	47	0,11
8	0,66	25	0,21	50	0,11
9	0,59	26	0,20	53	0,1
10	0,53	27	0,20	56	0,09
11	0,48	28	0,19	60	0,09
12	0,44	29	0,18	65	0,08
13	0,41	30	0,18	70	0,08
14	0,38	31	0,17	76	0,07
15	0,35	32	0,17	83	0,06
16	0,33	33	0,16	92	0,06
17	0,31	34	0,16	100	0,05
18	0,29	35	0,15	110	0,05
19	0,28	37	0,14	120	0,04
20	0,26	39	0,14	140	0,04
21	0,25	41	0,13		

**A Altura (mm) é referente a nervura da peça e Limite Máximo é o limite de força máxima que a nervura suporta**

Como podemos ver na Figura 6, a peça foi pré-tencionada utilizando calço como apoio e grampos de aperto sempre respeitando os valores de limite da Tabela 2. Para utilização do processo de *Flap Peening*, utilizou-se uma intensidade de 0,005N-0,018N, padronizando o equipamento como uma rotação de 3000 e 4000 rpm ( $\pm 100$  rpm).



**Fig.6 – Aplicação de Pré-tensionamento mais Flap Peening**

Os locais de aplicação do *Flap Peening* estão identificados por pontos numéricos, na Figura 5.

As Tabelas 3, 4, 5 e 6 apresentam um resumo das condições de retrabalho aplicadas a cada uma das peças.

A peça número 1 foi a primeira a ser trabalhada e devido ao desconhecimento inicial do processo, essa amostra foi a que sofreu o maior número de etapas. No primeiro retrabalho da peça 1 foi aplicado *Flap Peening* com finalidade de alívio de tensões na área em que foi aplicada a solda FSW. Foi utilizada uma cobertura de 200%, na faixa de intensidade de 0,005N – 0,018N, com uma rotação de 3000 rpm e um tempo de aplicação de 43 minutos determinada pela fórmula da Figura 3. Esse tempo foi usado para cada lado da alma da peça. A mesma faixa de carga foi usada para todas as outras etapas inclusive nas demais peças, no entanto a rotação foi aumentada para 4000 rpm e mantida neste valor para todos os demais retrabalhos. O tempo e local de aplicação, bem como o uso de pré-tensionamento está descrito nas tabelas de 3 a 6 para cada uma das amostras.

### Peça 1

**Tabela 3- Representação do Processo na peça 1**

Retrabalho	Pontos da aplicação	Tempo de aplicação	Pré-tencionamento	Calço
1	Total	43'	Não	Não
2	Total	6'	Não	Não
3	4,5,6,7,8 e 9	3'	Sim	200x15x15
4	9,10 e 11	3'	Não	Não
5	3,4,6,7 e 9	1'	Não	Não
6	6 e 7	1'30"	sim	200x15x15

### Peça 2

**Tabela 4- Representação do Processo na peça 2**

Retrabalho	Pontos da aplicação	Tempo de aplicação	Pré-tencionamento	Calço
1	9,10,11 e 12	1'20"	Sim	200x15x15
2	9,10,11 e 12	1'45"	Sim	30x30x25
3	4,5,6,7,8,9,10 e 11	1'	Sim	200x15x15
4	4,5,6,7,8 e 9	2'	Sim	200x15x15
5	4,5 e 6	40"	Sim	200x15x15

### Peça 3

**Tabela 5- Representação do Processo na peça 3**

Retrabalho	Pontos da aplicação	Tempo de aplicação	Pré-tencionamento	Calço
1	9,10,11 e 12	1'	Sim	200x15x15
2	9,10,11 e 12	2'	Não	Não
3	4,5,6,7,8 e 9	1'	Não	Não
4	4,5,6,7,8 e 9	20"	Sim	200x15x15
5	Ponto zero	-	-	-

**Nota:** Ponto Zero é quando á um ponto tocando na régua



#### Peça 4

**Tabela 6- Representação do Processo na peça 4**

Retrabalho	Pontos da aplicação	Tempo de aplicação	Pré-tencionamento	Calço
1	9,10,11 e 12	1'20"	Não	Não
2	Ponto Zero	-	-	-

Nota: Ponto Zero é quando á um ponto tocando na régua

#### Resultados:

A peça 1 teve bastante retrabalho devido ao não conhecimento da reação do material com os procedimentos de desempenho aplicados na peça e também por se tratar de o início do processo de caracterização. O primeiro retrabalho da peça 1 teve a finalidade de alívio de tensões na região da solda, porem foi observado que esse processo aumentou significativamente os valores de empenamento da peça como podemos observar na Tabela 7. Os valores que estão em azul representam o aumento de empenamento em relação à etapa anterior. No terceiro retrabalho quando foi adotado o uso de pré-tensionamento mais Flap Peening e utilização de calço de 200x15x15, foi obtida uma diminuição considerável em relação ao retrabalho anterior. O pré-tensionamento e o calço 200x15x15 mais *Flap Peening* foi usado novamente somente no sexto retrabalho quando se conseguiu chegar no empeno mínimo tolerado.

**Tabela 7 Medidas de retrabalho da peça 1**

PEÇA 1														
Peça Início		1° Retrabalho		2° Retrabalho		3° Retrabalho		4° Retrabalho		5° Retrabalho		6° Retrabalho		
Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso	
1	0,30	0,00	1,70	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
2	0,30	0,15	1,80	0,25	1,20	0,35	0,35	0,25	0,35	0,20	0,35	0,25	0,30	0,20
3	0,25	0,00	1,80	0,35	1,15	0,50	0,40	0,00	0,50	0,00	0,35	0,20	0,25	0,00
4	0,30	0,10	1,30	0,15	0,80	0,25	0,40	0,00	0,45	0,00	0,20	0,00	0,25	0,00
5	0,20	0,15	0,80	0,50	0,40	0,40	0,15	0,00	0,00	0,20	0,30	0,20	0,25	0,25
6	0,20	0,15	0,55	0,00	0,25	0,10	0,25	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00
7	0,15	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00
8	0,35	0,15	0,55	0,50	0,80	0,50	0,35	0,00	0,30	0,25	0,40	0,30	0,25	0,20
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	0,10	0,25	0,20	0,25	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,75	0,30	0,20	0,00	0,25	0,00	0,35	0,30	0,30	0,00	0,20	0,00	0,25	0,00
13	1,00	0,25	0,25	0,00	0,25	0,00	0,50	0,55	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,95	0,15	0,25	0,00	0,35	0,00	0,45	0,35	0,00	0,00	0,10	0,00	0,20	0,00
15	0,85	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

bs: Os numerais em vermelho 4,5,6,7,8 e 9 indicam a região onde foi aplicada a solda FSW. A cor Verde representa a melhora do material e a Cor Azul representa a piora

Na segunda peça foi adotado o uso de pré-tensionamento mais Flap Peening, nos 5 retrabalhos realizados. No retrabalho 1 foi utilizado o calço 200x15x5 e conseguiu bons resultados. Já no segundo retrabalho foi utilizado um calço de 30x30x25 com o intuito de obter maior desempenho, assim diminuindo as quantidades de retrabalhos das peças. Mas como podemos ver na Tabela 8 o retrabalho 2 aumentou os valores de empeno na maioria dos pontos da peça, então esse calço já foi descartado para os outros retrabalhos. O retrabalho 3 teve maior aplicação em quantidade de pontos para corrigir o aumento causado pela tentativa anterior. Os retrabalhos 4 e 5 foram realizados no mesmo padrão do retrabalho 1 até atingir no empeno mínimo tolerado.

**Tabela 8 Medidas de retrabalho da peça 2**

PEÇA 2												
Peça Início		1° Retrabalho		2° Retrabalho		3° Retrabalho		4 Retrabalho		5° Retrabalho		
Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso	
1	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	
2	0,10	0,00	0,00	0,10	0,00	0,50	0,00	0,20	0,00	0,25	0,00	
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,25	0,00	0,20	0,00	
4	0,55	0,35	0,50	0,25	0,60	0,25	0,45	0,25	0,65	0,30	0,25	0,15
5	0,20	0,30	0,00	0,00	0,25	0,00	0,50	0,40	0,35	0,20	0,30	0,30
6	0,65	0,55	0,70	0,40	0,85	0,50	0,30	0,00	0,50	0,00	0,15	0,00
7	0,60	0,45	0,70	0,35	1,00	0,55	0,12	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00
8	0,25	0,25	0,15	0,00	0,30	0,00	0,40	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,35	0,30	0,35	0,20	1,00	0,60	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00
10	0,15	0,00	0,10	0,00	1,00	0,65	0,30	0,10	0,20	0,00	0,00	0,00
11	0,10	0,00	0,00	0,00	0,80	0,45	0,30	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
12	0,35	0,15	0,25	0,00	0,60	0,35	0,40	0,30	0,55	0,30	0,26	0,20
13	0,95	0,50	0,60	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55	0,15	0,00	0,00
14	0,90	0,35	0,55	0,25	0,25	0,00	0,35	0,10	0,30	0,20	0,20	0,00
15	0,75	0,15	0,55	0,00	0,25	0,00	0,60	0,10	0,20	0,15	0,00	0,00

**Obs: Os numerais em vermelho 4,5,6,7,8 e 9 indicam a região onde foi aplicada a solda FSW.**

**A cor Verde representa a melhora do material e a Cor Azul representa a piora**

A peça 3 foi a que mais apresentou empenamento após a aplicação de FSW, foi iniciado o primeiro retrabalho já com o uso de pré-tensionamento com calço de 200x15x15 mais Flap Peening, com bons resultados como podemos ver na Tabela 9. Nos retrabalhos 2 e 3 foi usado somente Flap Peening em pontos diferentes, os pontos que tiveram aumento do empenamento, estavam fora da região onde teve a aplicação de FSW. No retrabalho 4 foi aplicado pré-tensionamento com calço de 200x15x15 mais Flap Peening e já obteve o empeno bem próximo do mínimo tolerado. Para o retrabalho 5 foi utilizada uma régua de apoio calibrada com zero de empenamento e foi aplicado Flap Peening nos pontos em que tocavam a régua (denominados ponto Zero) até atingir o mínimo de empeno tolerado.

**Tabela 9 Medidas de retrabalho da peça 3**

PEÇA 3												
Peça Início		1° Retrabalho		2° Retrabalho		3° Retrabalho		4 Retrabalho		5° Retrabalho		
	Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso
1	0,30	0,20	0,25	0,15	0,20	0,00	1,00	0,20	0,10	0,00	0,00	0,00
2	0,65	0,20	0,50	0,20	0,35	0,00	1,50	0,50	0,45	0,25	0,10	0,00
3	0,85	0,00	0,55	0,00	0,45	0,00	1,90	0,80	0,55	0,30	0,10	0,00
4	0,65	0,20	0,65	0,10	0,60	0,25	0,70	0,15	0,30	0,00	0,00	0,00
5	0,55	0,50	0,80	0,40	0,55	0,00	0,30	0,30	0,50	0,00	0,25	0,20
6	0,85	0,35	0,85	0,35	0,80	0,50	0,30	0,00	0,40	0,30	0,00	0,00
7	0,75	0,50	0,90	0,40	0,85	0,55	0,00	0,00	0,45	0,00	0,20	0,00
8	0,55	0,50	0,80	0,40	0,65	0,00	0,40	0,00	0,55	0,00	0,30	0,20
9	0,35	0,30	0,60	0,30	0,65	0,60	0,20	0,00	0,35	0,00	0,25	0,00
10	0,15	0,00	0,00	0,00	0,35	0,65	0,00	0,00	0,30	0,00	0,20	0,00
11	0,35	0,00	0,00	0,00	0,30	0,45	0,20	0,00	0,25	0,00	0,25	0,00
12	0,65	0,15	0,10	0,00	0,25	0,35	0,00	0,00	0,20	0,00	0,25	0,20
13	0,16	0,50	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,10	0,00
14	1,60	0,35	0,60	0,10	0,30	0,00	0,15	0,00	0,15	0,00	0,10	0,00
15	1,45	0,00	0,50	0,00	0,35	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00

**Obs: Os numerais em vermelho 4,5,6,7,8 e 9 indicam a região onde foi aplicada a solda FSW.**

**A cor Verde representa a melhora do material e a Cor Azul representa a piora.**

Para a peça 4, como a caracterização do processo já estava completa, foram utilizados os métodos mais eficazes de acordo com a necessidade da peça. Como a peça não apresentou um grande empenamento após a aplicação de FSW, foram feitos apenas 2 retrabalhos na peça. No primeiro retrabalho foi usado Flap Peening nos pontos da região da solda que foram os mais afetado e no retrabalho 2 foi utilizado a régua de apoio calibrada e foi aplicado Flap Peening nos pontos em que tocavam a régua até atingir o mínimo de empeno tolerado.

**Tabela 10 Medidas de retrabalho da peça 4**

	PEÇA 4					
	Peça Início		1º Retrabalho		2º Retrabalho	
	Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso	Sem peso	Com peso
1	1,35	0,20	1,30	0,20	0,20	0,00
2	0,55	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,20	0,15	0,25	0,00	0,30	0,00
5	0,45	0,45	0,40	0,30	0,30	0,25
6	0,10	0,15	0,10	0,00	0,20	0,00
7	0,10	0,15	0,00	0,00	0,25	0,00
8	0,35	0,45	0,20	0,30	0,10	0,00
9	0,00	0,15	0,00	0,00	0,30	0,15
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00
12	0,55	0,35	0,30	0,20	0,10	0,10
13	0,55	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00
14	1,00	0,55	0,60	0,20	0,20	0,00
15	1,45	0,20	1,00	0,20	0,00	0,00

**Obs: Os numerais em vermelho 4,5,6,7,8 e 9 indicam a região onde foi aplicada a solda FSW. A cor Verde representa a melhora do material e a Cor Azul representa a piora**

#### **Discussão:**

Durante a caracterização foram utilizados processos variados, para identificar do mais eficaz, inicialmente foi utilizado o processo de alívio de tensão na zona da solda, porém foi observado que esse processo aumentou significativamente os valores de empenamento, como podemos observar na Tabela 3. Nas peças seguintes não foi mais usado o processo de alívio de tensão. Na peça 1 foi feito bastante retrabalho devido ao não conhecimento da reação do material com os procedimentos de desempenho aplicados. Basicamente a peça 1 foi o início da caracterização do processo com isso teve mais retrabalho, pois nela foram testados muitos processos, que não foram eficazes e que não foram repeditos nas peças seguintes. Foi testado o pré-tensionamento mais Flap Peening utilizando calços de variados tamanhos, nos calços maiores foi observado que a ação de desempenho em muitos casos e adversa causando efeito contrario ao esperado.

#### **Conclusões:**

Ao longo do trabalho notamos que o empenamento sofrido nas peças após a aplicação da solda FSW se comportou diferente em cada umas das 4 peças analisadas. A caracterização do processo de desempenho foi feita com 4 corpos de prova, entre elas, a peça 3 foi a que apresentou o maior empenamento após a aplicação da solda. Já a peça 1 apresentou um empenamento inicial menor em relação a peça 3, porém a quantidade de retrabalho foi muito maior, devido a mesma ser o início do processo de caracterização do desempenho onde ainda não se conhecia os parâmetros do processo. Na peça 3 teve a diminuição dos retrabalhos devido a utilização dos processos mais eficientes

utilizado nas peças anteriores com isso diminuindo o set-up de retrabalho das peças. Em peças que tiveram pouco empenamento apenas a aplicação de Flap Peening é o suficiente para que as peças fiquem dentro das tolerâncias desejadas, ou seja, sem a necessidade de realizar o pré-tensionamento. A partir dos ensaios realizados concluímos que é possível corrigir o empenamento de peças que sofrem aplicação de solda FSW através do processo de Flap Peening ou pré-tensionamento mais Flap Peening. Disponível

### **Referencias Bibliográficas:**

- [1] [www.azom.com/details.asp?ArticleID=1170](http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=1170) – acesso em 28/04/2009
- [2] “friction stir link.” <http://www.frictionstirlink.com/fslfwdescription.html> - Acesso em 13/10/2008
- [3] – H.J. Schmidt, B. Schmidt-Brandecker e G.Tober, “ Design Of Modern Structure and the Role of Destructive Inspections” NDT.Net vol 4 número 6 junho 1999
- [4] – J. Liu e M Kulak “ A New Paradigm in the Design of Aluminum Alloys for Aerospace Applications” Materials Science Forum, Vols 331-337 pq 127-140 Suíça -2000
- [5] “ FSW Process Expertence at MTS-  
[http://twi.co.uk/j32k/unprotected/band\\_fsmipr.htm](http://twi.co.uk/j32k/unprotected/band_fsmipr.htm) - Acesso em 10/3/2008
- [6] Khaled, T. An outsider looks at friction stir welding, Relatório FAA ANM-112N-05-06, Julho 2005 (Disponível em [http://www.faa.gov/aircraft/air\\_cert/design\\_approvals/csta/publications](http://www.faa.gov/aircraft/air_cert/design_approvals/csta/publications))
- [7] “[http://www.metalimprovement.com/shot\\_peening.php](http://www.metalimprovement.com/shot_peening.php) - Acesso em 20/03/2009
- [8] “3M”- Flap Peening  
[http://solutions.3m.com.br/wps/portal/3M/pt\\_BR/Aeroespacial/Home/Processos/Usinagem](http://solutions.3m.com.br/wps/portal/3M/pt_BR/Aeroespacial/Home/Processos/Usinagem) - acesso em 20/04/2009
- [9] - Misrha, R.; Ma, Z. Y. Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering, p.1-78, 2005
- [10] – Norma EMBRAER- NE-000073 NE-07-030 NE-03-076
- [11]- Revista METALURGIA & MATERIAIS– Dilermando Nagle Travessa, Vinicius Rondon, Venâncio Pereira Neto “ASPECTOS DA COMPETITIVIDADE DO ALUMÍNIO EM ESTRUTURAS AERONÁUTICAS” Caderno técnico 047 JanFev2009 -Volume 65