

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Hugo Holz Ruela

Um estudo comparativo entre painéis reforçados planos:
ligação rebitada versus FSW

Trabalho de Graduação

2010

Civil - Aeronáutica

Hugo Holz Ruela

**Um estudo comparativo entre painéis reforçados planos: ligação
rebitada versus FSW**

Orientador
Francisco Alex Correia Monteiro (ITA)

Divisão de Engenharia Civil

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**Divisão de Informação e Documentação**

Ruela, Hugo Holz

Um estudo comparativo entre painéis reforçados planos: ligação rebitada versus FSW/Hugo Holz Ruela
São José dos Campos, 2010.
78f.

Trabalho de Graduação – Divisão de Engenharia Civil –
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2010. Orientador: Prof. Francisco Alex Correia Monteiro

1. Soldagem por atrito; 2. Rebitagem; 3. Placas reforçadas; 4. Flambagem; 5. Método de elementos finitos; 6. Análise estrutural. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RUELA, HUGO HOLZ. **Um estudo comparativo entre painéis reforçados planos: ligação rebitada versus FSW. 2010.**78f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Hugo Holz Ruela

TÍTULO DO TRABALHO: Um estudo comparativo entre painéis reforçados planos: ligação rebitada versus FSW.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação/2010

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

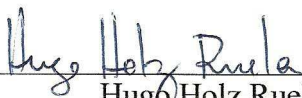
Hugo Holz Ruela

Rua Coronel José Tiago, 1260 – Centro

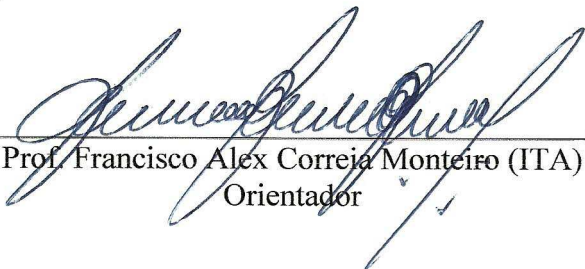
Aimorés – MG – Brasil. CEP: 35200-000

**UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PAINÉIS REFORÇADOS PLANOS: LIGAÇÃO
REBITADA VERSUS FSW**

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Hugo Holz Ruela
Autor



Prof. Francisco Alex Correia Monteiro (ITA)
Orientador



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto
Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 29 de novembro de 2010

Resumo

A introdução do método de solda por fricção (FSW) como um processo alternativo para a substituição dos tradicionais rebites em estruturas primárias de aeronaves tem potencial para a redução dos custos de fabricação e do peso estrutural. Métodos de análise estão atualmente em desenvolvimento para esse novos painéis. Nesse contexto, o presente trabalho visa identificar as principais diferenças entre a flambagem local de painéis reforçados com ligação FSW e com ligação rebitada. Diversos painéis reforçados com diferentes números de reforçadores e diferentes tipos de ligação, sujeito à compressão uniforme, são numericamente testados utilizando modelos de elementos finitos. Os resultados obtidos são comparados com resultados analíticos simples atualmente disponíveis para o projeto. Identifica-se, numa primeira aproximação, as principais diferenças do comportamento crítico de painéis reforçados com ligações FSW e com ligações rebitadas.

Abstract

The introduction of friction stir welding (FSW) as an alternative joining process for traditional rivet fastening for primary aircraft structures has the potential to lower manufacturing costs and structural weight. Methods for strength analysis and design are currently under development. In this context, the present work aims to highlight the main differences between local buckling strength behavior of FSW and rivet stiffened panels. Several stiffener panels, with a variable number of stiffeners and joining type, subject to uniform compression are numerically tested utilizing finite element models. The obtained results are compared to simplified analytical results currently employed in design. A first insight on the critical buckling performance between riveted and welded designs is then allowed.

Agradecimentos

Aos meus pais, que não mediram esforços para prover educação de alto nível aos seus filhos.

Aos meus amigos, por tantos momentos importantes e memoráveis compartilhados.

Ao Orientador Francisco Alex Correia Monteiro e ao Relator Eliseu Lucena Neto pelo papel de guiar o desenvolvimento deste Trabalho.

Conteúdo

1	Considerações Iniciais	10
1.1	Introdução	10
1.2	Objetivos	17
1.3	Estrutura do Trabalho	17
2	Modelo Estrutural	18
3	Ferramenta de Modelo	25
3.1	Descrição	25
3.2	Criação do Modelo	30
4	Aplicações Numéricas	33
4.1	Modelo 1	34
4.2	Modelo 2	38
4.3	Modelo 3	38
4.4	Modelo 4	39
4.5	Modelo 5	39
4.6	Modelo 6	40
4.7	Modelo 7	41
4.8	Modelo 8	41
4.9	Modelo 9	42
4.10	Comparação dos modelos	43

5 Conclusões e Comentários Finais	47
Apêndice A Panel Tool v4.0: código fonte	48
Referências	76

Capítulo 1

Considerações Iniciais

Este trabalho é fruto do estágio realizado no projeto Métodos e Critérios de Análise e Cálculo Estrutural Usando Novas Tecnologias patrocinado pela Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A. — EMBRAER e parte executado pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica — ITA. Aborda-se aqui apenas uma etapa desse projeto: o estudo comparativo da flambagem de painéis reforçados utilizando ligações rebitadas e ligações soldadas por fricção.

1.1 Introdução

A redução nos custos de projeto, fabricação e manutenção é uma tarefa fundamental na engenharia aeronáutica. Para alcançar esse objetivo, novos processos de fabricação têm sido desenvolvidos na última década como, por exemplo, os processos de solda por fricção (*friction stir welding* — FSW), solda com feixe de elétrons (*electron beam welding*) e solda a laser (*laser beam welding*). Diversas pesquisas têm procurado implementar esses processos aos novos projetos aeronáuticos para substituir as usuais conexões rebitadas.

A Figura 1.1 mostra uma seção típica da fuselagem e da asa de uma aeronave. Os componentes estruturais da fuselagem são: cavernas, revestimento e reforçadores. Os componentes estruturais da asa são: longarinas, nervuras, revestimento e reforçadores. Observe que cada uma dessas estruturas (fuselagem e asa) constitui-se de uma série de painéis reforçados conectados entre si. Para fins de análise, é geralmente suficiente considerar a seção da fuselagem entre duas cavernas adjacentes, e o painel reforçado da asa entre duas longarinas e duas nervuras adjacentes.

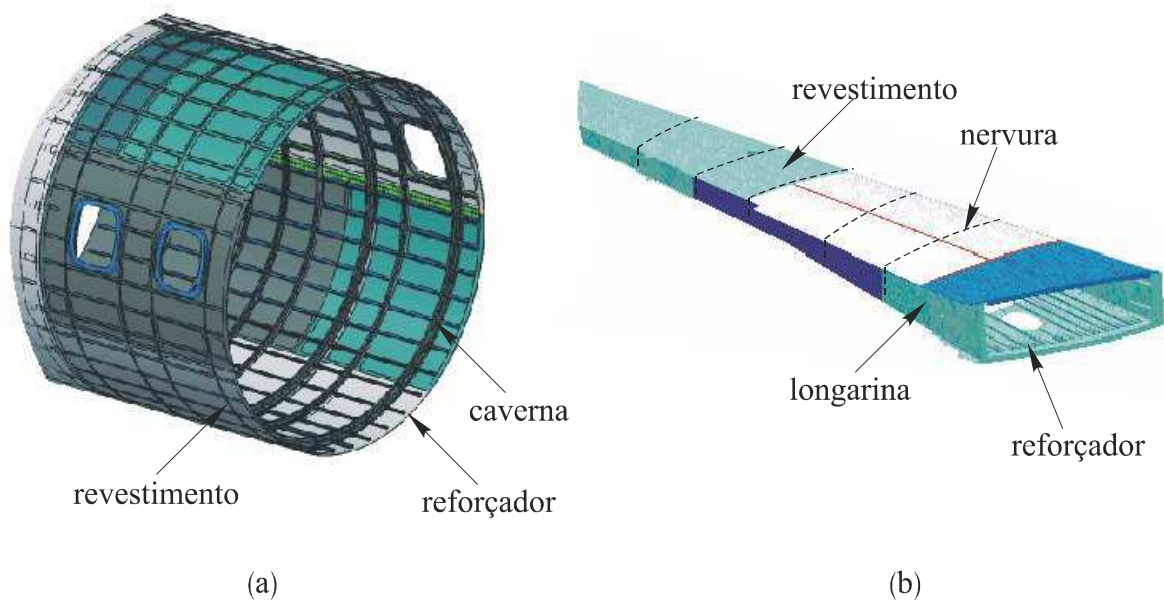


Figura 1.1 Seção típica: (a) fuselagem; (b) asa.

A perda da estabilidade do equilíbrio de um painel reforçado pode ocorrer de maneira global ou local, dependendo de sua geometria e do número de reforçadores. Na flambagem global, o revestimento e os reforçadores flambam como uma única entidade conforme mostra a Figura 1.2a. Na flambagem local, o deslocamento transversal do revestimento ao longo dos reforçadores é nulo formando uma linha nodal, flambando o reforçador ou o revestimento entre eles. Por simplicidade, costuma-se subdividir a flambagem local da seguinte maneira (BEDAIR, 1998; PAIK e LEE, 2005; HUGHES *et al.*, 2004):

- flambagem local do revestimento, em que o revestimento ao fletir rotaciona consigo o reforçador (Figura 1.2b);
- flambagem local do reforçador: (a) um ou mais elementos do perfil flambam isoladamente; (b) flambagem lateral com torção do reforçador (em inglês, *lateral torsional buckling* ou, simplesmente, *tripping*), em que o reforçador flete lateralmente e torce como um todo levando consigo o revestimento (Figura 1.2c). Esta flambagem ocorre em reforçadores com seções transversais impedidas de torcer ou deslocar-se lateralmente (seção na ligação reforçador-caverna, por exemplo).

A Figura 1.3 apresenta uma placa retangular reforçada em uma direção e sujeita a um

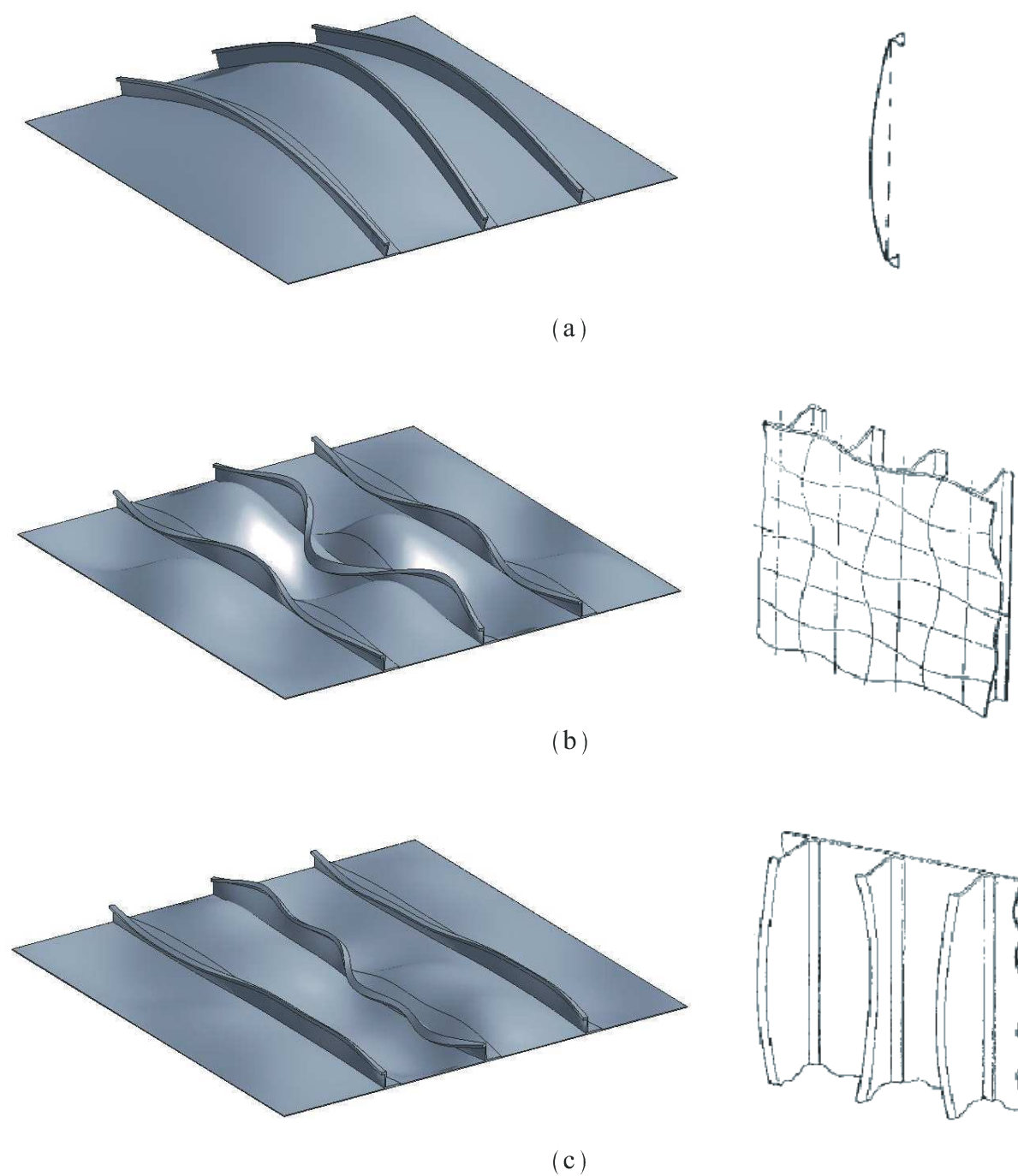


Figura 1.2 Modos de flambagem: (a) global; (b) local do revestimento; (c) lateral com torção do reforçador.

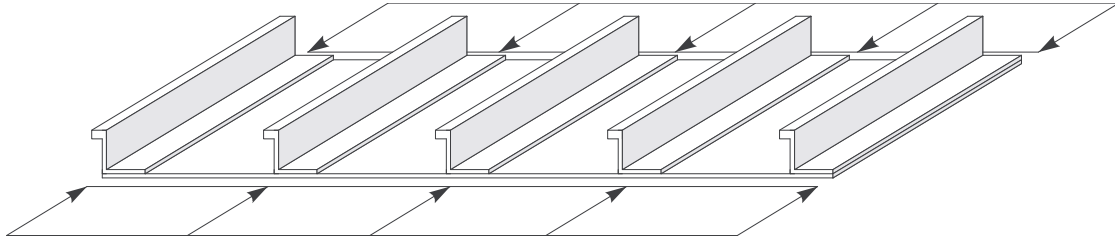


Figura 1.3 Estrutura de um painel reforçado usual do extradorso ou do intradorso das asas de aeronaves.

carregamento de compressão na mesma direção dos reforçadores. É uma estrutura usual, principalmente no extradorso ou intradorso de asas de aeronaves (CAMELO, 2009; YVES, 2009). Dentre todos os componentes do painel, é de fácil compreensão por que o revestimento é aquele que melhor tem a resistência pós-crítica a ser explorada, se imaginarmos que apoia-se nos demais componentes. Após a flambagem, parte do acréscimo de carga é transferido do revestimento aos reforçadores, cavernas (fuselagem) ou nervuras (asa), até o colapso da estrutura que, tipicamente, se dá por plastificação local ou pela flambagem lateral com torção do reforçador (GALAMBOS, 1998; BUERMANN *et al.*, 2006). Daí a indústria aeronáutica, naval, civil, etc. empregar painéis reforçados cujo modo crítico de flambagem é o local do revestimento (FUJIKUBO e YAO, 1999; BUERMANN *et al.*, 2006; BISAGNI e VESCOVINI, 2009). Projetos desse tipo exploram ao máximo a capacidade de carga do painel reforçado tornando possível a minimização de seu peso. Dessa maneira, um detalhe crucial para o projeto é identificar o modo em que o painel reforçado flamba com a menor carga (carga crítica) e conhecer seu comportamento pós-crítico até o colapso (carga última).

A fabricação de painéis reforçados emprega processos e materiais consagrados pela indústria. Por sua vez, o seu projeto estrutural pode razoavelmente ser executado empregando-se conceitos e critérios clássicos de análise. Entretanto para os novos processos de solda são necessários estudos que melhor descrevam o comportamento estrutural dos painéis reforçados, uma vez que a solda introduz imperfeições de diversas naturezas como, por exemplo, tensões residuais, deformações plásticas e alteração das propriedades do material na zona de solda.

A solda por fricção tem sido estudada como um substituto de baixo custo para as ligações rebitadas dos painéis reforçados. Em relação aos demais processos, o FSW proporciona

melhor desempenho mecânico, simplicidade de fabricação, menor quantidade de falhas e de tensões residuais. Essas vantagens são oriundas, sobretudo, devido à baixa temperatura do processo. Tudo isso resultou na rápida difusão do FSW na indústria aeronáutica, de tal forma que o entendimento fundamental dos principais elementos de seu processo e de sua relação com o comportamento estrutural do painel são, atualmente, desconhecidos. Faz-se necessário portanto estudos que avaliem a perda da estabilidade do equilíbrio dos painéis FSW e que comparem o desempenho desses com os tradicionais painéis rebitados. De fato, a perda da estabilidade do equilíbrio do painel da Figura 1.3 é sensível às imperfeições físicas e geométricas, e às condições de apoio do reforçador e do revestimento. Não há nenhuma garantia teórica de que as estruturas obtidas pelo processo FSW tenham seu comportamento estrutural satisfatoriamente descrito pelos métodos e critérios usuais.

Na solda por fricção, a conexão entre o revestimento e o reforçador é obtida por meio da rotação de um mandril especialmente projetado que opera sobre a flange de conexão do reforçador, transladando-se ao longo de seu comprimento. O processo é normalmente restrito a reforçadores com seção Z ou com seção cartola devido às limitações do ferramental utilizado. Calor é gerado pelo atrito entre o mandril e a flange de conexão, oriundo da rotação do mandril, aquecendo e deformando o material do reforçador que coalesce com o material do revestimento. A rotação do mandril e a velocidade de translação da ferramenta é que determina a taxa de fluxo de material ao redor da superfície de contato da ferramenta (GUERRA *et al.*, 2003; LIU *et al.*, 2003). A Figura 1.4 mostra uma vista esquemática das zonas de solda e nos revela três regiões distintas que variam gradualmente (MURPHY *et al.*, 2007; YOON *et al.*, 2009):

- zona do material de origem (PMZ, do inglês *parent material zone*) em que não há deformação térmica e o fluxo de calor não degrada as propriedades mecânicas do material;
- zona termicamente afetada (HAZ, do inglês *heat affected zone*) em que não há deformação térmica, porém as propriedades do material estão degradadas devido ao fluxo de calor. Dados experimentais mostram que há uma deterioração de 5% a 35% das propriedades do material de origem;
- zona termomecanicamente afetada (TMAZ, do inglês *thermo-mechanically affected*

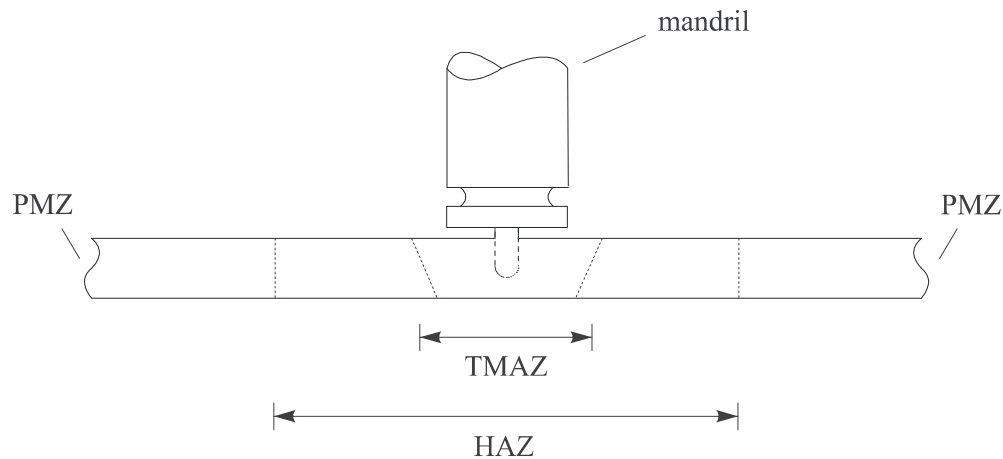


Figura 1.4 Vista esquemática das zonas de solda.

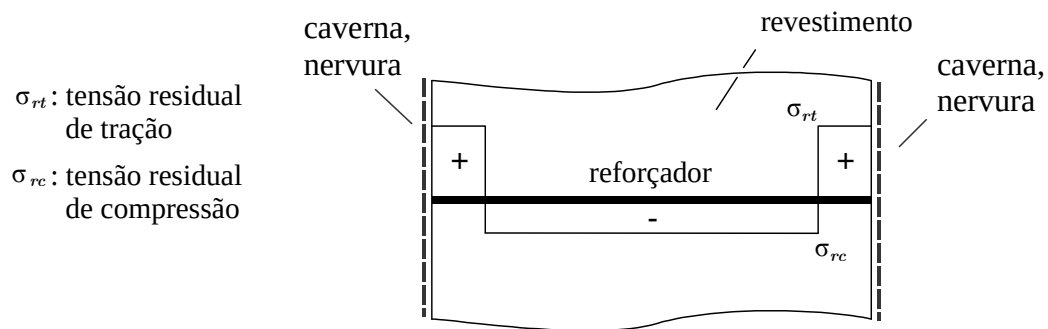


Figura 1.5 Esquematização das tensões residuais do revestimento.

zone) em que há deformação térmica e degradação das propriedades do material. A largura dessa zona, para efeito de cálculo, é considerada como a largura da junta de solda.

Nas tradicionais conexões rebitadas, a montagem estrutural é feita por meio de chapas de ligação como, por exemplo, as chapas de nó ou chapas *gussets*. O processo FSW possibilita uma montagem sem adição de chaparias, reduzindo significativamente o peso da estrutura. Além disso, a propagação de trincas é retardada devido à presença de trechos sob tensões residuais de compressão. De fato, devido o campo de tensões residuais ser autoequilibrado, como indica a Figura 1.5, forma-se ao longo da ligação reforçador - revestimento zonas sob tensões residuais de compressão e zonas sob tensões residuais de tração. A propagação da trinca é desfavorecida ao atingir a zona sob compressão, retardando o processo.

Para avaliar a FWS como um potencial substituto das ligações rebitadas na construção

de painéis reforçados, a Lockheed Martin Space Systems e a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) têm realizado estudos comparativos para se determinar a diferença entre as cargas de flambagem de painéis reforçados rebitados e soldados. Foram concebidos, fabricados e testados em larga escala painéis de alumínio lítio AL 2090–T83 com reforçadores de seção cartola (HOFFMAN *et al.*, 2002). Os resultados indicam que ambos os painéis apresentam cargas de flambagem inicial do revestimento bem abaixo dos valores por eles previstos. A discrepância entre os valores teóricos e os valores experimentais da carga de flambagem é por eles justificada pelas imperfeições da geometria do painel e pelas imperfeições do material. Verificou-se que o painel soldado exibe uma carga de ruptura 20% menor do que o painel rebitado. Entretanto, nenhuma técnica especial de análise que levasse em conta as tensões residuais ou a degradação do material na região de solda foi utilizada no cálculo da carga crítica de flambagem do painel.

Utilizando modelos de elementos finitos, MURPHY *et al.* (2007) demonstram que a flambagem do revestimento de painéis reforçados tem sua performance diminuída conforme o aumento da magnitude das tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais, fato que nos parece intuitivo com tensões residuais, se estas forem de compressão. O estudo procura identificar quais os parâmetros que mais interferem na capacidade portante do painel. Os autores advogam que a carga última do painel é menos sensível aos diversos parâmetros que controlam o processo do que a carga crítica. Quantifica-se a influência dos seguintes parâmetros:

1. *largura da junta de solda* w_{weld}

a largura da junta de solda é a largura da região onde o material da flange do reforçador coalesce com o material do revestimento e está diretamente relacionada ao diâmetro do mandril da ferramenta de solda. Verifica-se que essa largura apresenta valores compreendidos entre $1 \times t_a$ e $3 \times t_a$, onde t_a é a espessura da flange de conexão do reforçador;

2. *fator de degradação* k_z

o fator k_z quantifica a degradação do material na HAZ. Ele é definido pela razão entre a tensão de escoamento do material da HAZ e a tensão de escoamento do material original. O material no interior da HAZ tem menor resistência do que o material

original e nos estudos computacionais é comum tomar o valor do fator k_z no intervalo de 65% a 95%;

3. largura w_{HAZ} da HAZ

a largura da *heat affected zone* é a distância que estende-se cerca de $3 \times t_a$ a $6 \times t_a$ para a esquerda e para a direita da linha central de solda. A magnitude de sua extensão deve-se, sobretudo, à rotação e à velocidade de translação do mandril;

4. tensões residuais

devido ao aquecimento e ao resfriamento desigual do material da zona de solda é que se origina as parasitárias tensões residuais. Seu valor é quantificado em termos de uma fração da tensão de escoamento do material base. As tensões residuais de tração estão diretamente relacionadas às tensões residuais de compressão dada à exigência do campo residual ser autoequilibrado. Medições experimentais e simulações numéricas indicam que os valores da tensão residual vão de 20% a 50% da tensão de escoamento do material base.

1.2 Objetivo

O trabalho tem como objetivo verificar as principais diferenças entre a carga crítica de flambagem de painéis reforçados rebitados e soldados por fricção. Vários painéis planos rebitados e soldados sujeitos à compressão uniforme são numericamente avaliados, variando-se o número de reforçadores.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em cinco capítulos. O Capítulo 2 descreve o modelo estrutural e apresenta o modelo de elementos finitos empregado, bem como as considerações de cálculo. O Capítulo 3 descreve a ferramenta desenvolvida e utilizada na confecção dos modelos. Nele, se ressalta as funcionalidades e aplicações da ferramenta. O Capítulo 4 apresenta nove diferentes modelos de elementos finitos de painéis reforçados que são analisados empregando-se a solução de flambagem linear SOL 105 do NASTRAN. Por último, o Capítulo 5 traz alguns comentários e conclusões sobre o trabalho, além de sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Modelo Estrutural

A filosofia de projeto de painéis soldados assemelha-se, em parte, à dos painéis rebitados no senso que: (i) o modo crítico de flambagem deve ser o local do revestimento para que se explore, ao máximo, a resistência pós-crítica do painel; (ii) nenhuma falha do elemento de ligação deve ocorrer antes do colapso da estrutura que, tipicamente, se dá por plastificação local ou pela flambagem lateral com torção dos reforçadores (GALAMBOS, 1998; BUERMAN *et al.*, 2006).

No que diz respeito à análise de painéis reforçados é praxe empregar o método dos elementos finitos na determinação da carga crítica de flambagem local, bem como na análise do regime pós-crítico. A confecção de um modelo estrutural, o mais realista possível, de uma painel reforçado esbarra na dificuldade de se quantificar e de se introduzir todas as imperfeições presentes num painel real.

Nos painéis soldados costuma-se subdividir as imperfeições de acordo com sua origem e forma da seguinte maneira:

1. curvatura inicial do revestimento;
2. curvatura inicial do reforçador;
3. tensões residuais no revestimento;
4. tensões residuais no reforçador;
5. degradação do material base na região da solda.

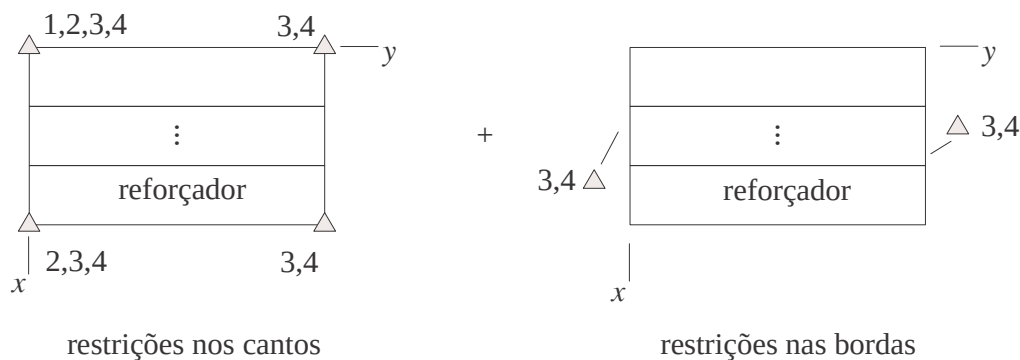
Num estudo empregando o programa ABAQUS, MURPHY *et al.* (2007) idealizam um modelo de elementos finitos para painéis FSW em que tanto o revestimento quanto os elementos do reforçador são representados por elementos planos propriamente conectados. No modelo, a conexão do revestimento com o reforçador é feita por meio de elementos rígidos ao longo da TMAZ e por meio de elementos de contato uniaxiais. A simulação numérica se dá em duas etapas: na primeira, se inserem as imperfeições do painel obtendo, após uma análise linear, a configuração inicial da segunda etapa na qual se executa uma análise não-linear na busca de um ponto limite que identifique a carga crítica da estrutura. A degradação do material na região da solda é levada em conta, de forma simplificada, pela degradação do módulo elástico do material localizado na HAZ.

Sabe-se que para se determinar, com precisão, a carga crítica de flambagem de uma estrutura imperfeita faz-se necessária uma análise não-linear geométrica, e o algoritmo de solução deve ser capaz de identificar e ultrapassar os pontos críticos da curva carga-deslocamento (CRISFIELD, 1991; BAZANT e CEDOLIN, 2003). Entretanto, assumindo que a instabilidade do painel ocorra num ponto de bifurcação na vizinhança de sua configuração indeformada plana, a carga crítica de flambagem pode ser determinada linearizando-se, em termos dos deslocamentos, o equilíbrio da estrutura perfeita. A carga de flambagem assim obtida nos fornece uma primeira estimativa da carga crítica real. Esse procedimento pode ser utilizado para comparar a carga crítica de flambagem de painéis reforçados com ligação FSW e com ligação rebitada, desde que a ligação entre o revestimento e o reforçador esteja corretamente modelada.

Visando adquirir um primeiro entendimento das principais diferenças no que tange a capacidade portante crítica de painéis FSW e rebitados é que se executa, nesse trabalho, uma série de análises linearizadas de flambagem. O modelo e a análise são feitos utilizando o NASTRAN (MSC, 2008). O modelo estrutural é descrito a seguir.

O painel está sujeito a uma carga de compressão, uniformemente distribuída ao longo das bordas carregadas. Considera-se que as bordas carregadas estejam simplesmente apoiadas e as demais bordas livres, conforme indica a Figura 2.1. Para se evitar a flambagem local das bordas livres, inserem-se reforçadores adicionais ao longo dessas bordas.

O material do revestimento e dos reforçadores é de liga de alumínio aeronáutico, cujas propriedades mecânicas estão descritas na Tabela 2.1. Os reforçadores têm seção transversal



1, 2, 3: restrição à translação em X, Y, Z.
4: restrição à rotação em torno de X.

Figura 2.1 Condições de contorno do painel.

Z e estão uniformemente espaçados de b_s , suas dimensões são apresentadas na Tabela 2.2. A geometria dos painéis com três, quatro e cinco reforçadores (incluindo os das bordas) estão listados na Tabela 2.3. Todos os painéis analisados possuem a mesma largura $a = 700$ mm, a mesma espessura $h_s = 1$ mm e dois comprimentos diferentes $b = 840$ ou $b = 560$ mm para se avaliar a influência da razão largura/comprimento sobre a carga de flambagem.

Com exceção da flange livre do reforçador, que é modelada utilizando elementos de viga do tipo CBAR, o restante da estrutura é modelada empregando elementos de placa do tipo CQUAD4. Discretiza-se o painel em um número de elementos suficiente para se representar adequadamente os modos de flambagem. Uma malha de 4×88 elementos foi utilizada no reforçador (alma e flange) e no revestimento logo abaixo da flange do reforçador, para o revestimento entre reforçadores foi utilizado uma malha de 48×88 . A Figura 2.2 mostra um modelo com três reforçadores.

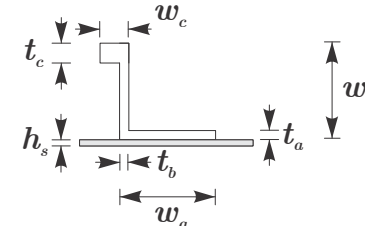
Para uma representação apropriada dos modos de flambagem em painéis da fuselagem de aeronaves é necessário uma representação realística da conexão entre revestimento e re-

Tabela 2.1 Propriedade dos materiais.

Material	Tipo	E (MPa)	ν
Revestimento	AL2024-T3	72400	0,33
Reforçador	AL7050-T3511	71020	0,33

Tabela 2.2 Dimensões da seção transversal dos reforçadores.

Largura (mm)		Espessura (mm)	
w_a	19,05	t_a	1,27
w_b	19,05	t_b	1,27
w_c	5,50	t_c	3,00



forçadores. Para a representação da ligação FSW foram adotados os seguintes procedimentos. Foi considerado que todo o material da flange do reforçador foi alterado devido ao processo de soldagem. Para simular o comportamento monolítico da ligação FSW, os nós do revestimento e os nós dos reforçadores localizados na região da solda foram conectados com elementos rígidos do tipo RBE2, onde apenas deslocamentos traslacionais dos nós são rigidamente ligados. Foi utilizado apenas um elemento rígido quando se considera a largura de solda $w_{weld} = 0$ e três elementos rígidos quando se considera a largura de solda $w_{weld} \neq 0$. As condições de contato entre a parte não soldada do revestimento e a flange do reforçador foram modeladas de duas formas diferentes para comparação, considerando contato uniaxial linear e não-linear. Para representar o contato não linear foi utilizado o elemento do tipo CGAP ligando os nós não soldados do revestimento aos nós não soldados do reforçador. O esquema da ligação FSW é mostrado na Figura 2.3a.

Em relação à ligação rebitada, o conceito de rigidez da ligação tem papel fundamental. A rigidez normalmente é usada como parâmetro ao se modelar e analisar aeronaves quanto a fadiga e vida útil. A rigidez transversal K_t da ligação é calculada através da fórmula

Tabela 2.3 Geometria dos painéis.

Painel	a (mm)	b (mm)	b_s (mm)	h_s (mm)	n.º de reforçadores
1	700	840	420	1	3
2	700	560	280	1	3
3	700	840	280	1	4
4	700	560	187	1	4
5	700	840	210	1	5
6	700	560	140	1	5

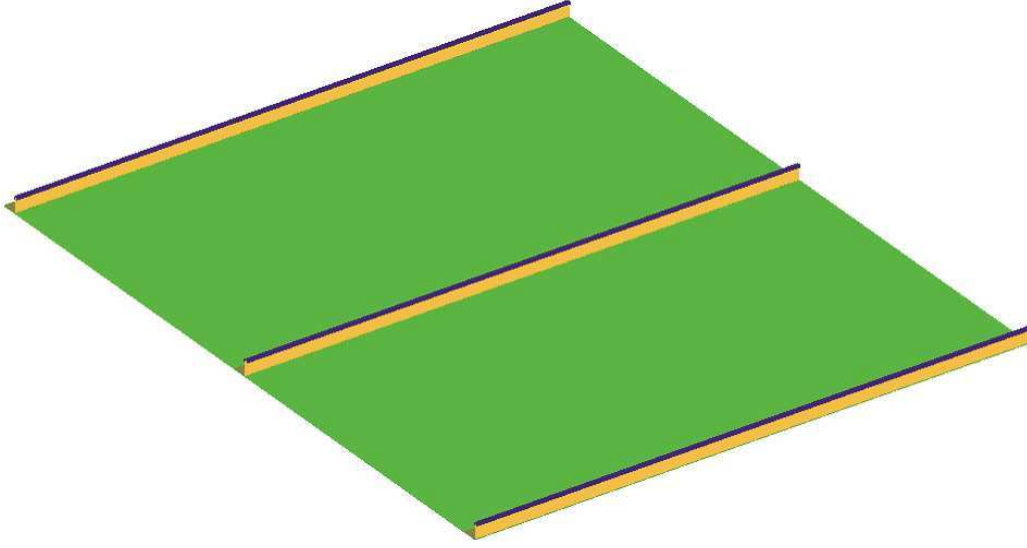


Figura 2.2 Modelo de elementos finitos utilizando três reforçadores.

empírica proposta por SWIFT (1979),

$$K_t = \left[\frac{5}{E_r d_r} + \frac{4}{5} \left(\frac{1}{h_s E_s} + \frac{1}{t_a E} \right) \right]^{-1}, \quad (2.1)$$

onde d_r é o diâmetro do rebite e E_r , E_s , E são os módulos de Young do rebite, revestimento, reforçador.

A rigidez axial K_a do rebite é calculada pela expressão

$$F = K_a \Delta, \quad (2.2)$$

onde Δ é o deslocamento axial do rebite. Se A é a área da seção transversal do rebite, então a tensão axial no rebite é

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{K_a \Delta}{A}. \quad (2.3)$$

Sabe-se também que

$$\sigma = E_r \varepsilon = \frac{E_r \Delta}{L} \quad (2.4)$$

onde ε é a deformação na seção transversal do rebite e L é o comprimento do rebite. De (2.3) e (2.4), obtém-se

$$K_a = \frac{E_r A}{L} \quad (2.5)$$

onde

$$L = \frac{h_s + t_a}{2} \quad A = \frac{\pi d_r^2}{4}. \quad (2.6)$$

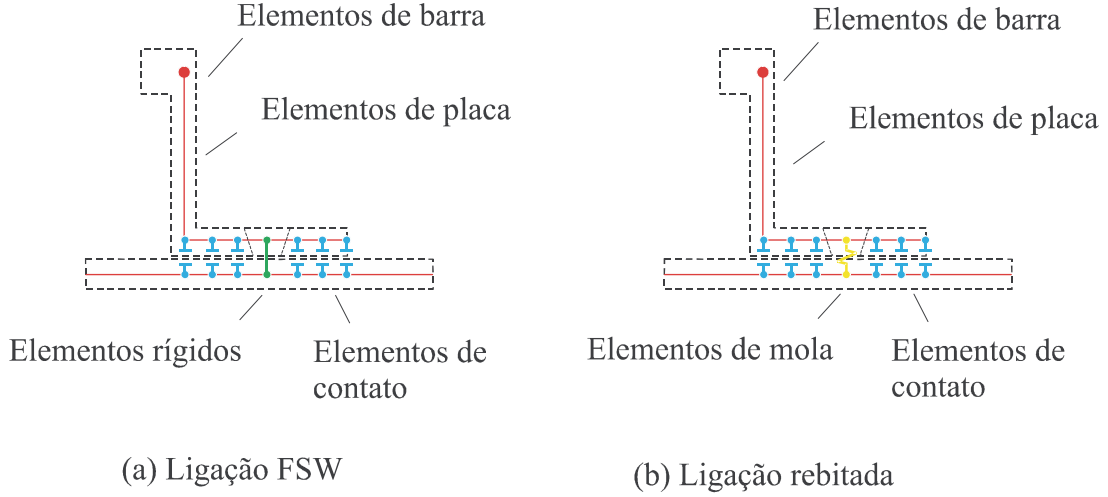


Figura 2.3 Idealização da ligação no modelo de elementos finitos.

Portanto,

$$K_a = \frac{\pi E_r d_r^2}{2(h_s + t_a)}. \quad (2.7)$$

A rigidez transversal e axial foram introduzidas no modelo como elemento de mola do tipo CELAS2 como mostra a Figura 2.3b. O elemento de mola conecta o nó central da flange com o nó do revestimento imediatamente abaixo. A rigidez transversal da ligação foi modelada com dois elementos do tipo CELAS2 inseridos na posição onde se encontra o rebite com sua constante de mola definida conforme (2.1): um elemento na direção global X e um outro na direção global Y . Para modelar a rigidez axial foi utilizado um único elemento de mola do tipo CELAS2 com constante de mola dada por (2.7). Foram consideradas duas formas de contato entre a parte não rebitada do revestimento e da flange do reforçador. Da mesma forma como foi feito para a ligação FSW, utilizou-se modelos com contato linear e modelos com contato não linear como já descritos.

O tipo de rebite utilizado foi o MS20470AD-5 por ser o mais comum em aplicações aeronáuticas ($d_r = 3,97$ mm, $E_r = 71020$ MPa). O passo considerado foi de $4 \times d_r = 15,88$ mm.

A maneira pela qual o carregamento de compressão é transferido para o painel é desconhecida. Neste trabalho para cada modelo foram considerados dois tipos de carregamento: um carregamento uniformemente distribuído aplicado somente sobre o revestimento e, alternativamente, um carregamento uniformemente distribuído aplicado sobre o revestimento e reforçadores. A carga total unitária de compressão aplicada na direção dos reforçadores

pode ser escrita da seguinte forma

$$\sigma(A_{rev} + \psi n_{ref} A_{ref}) = 1, \quad (2.8)$$

onde A_{rev} é a área da seção transversal do revestimento, n_{ref} é o número de reforçadores, A_{ref} é a área da seção transversal de um reforçador, ψ é um fator de distribuição da carga definido de maneira que $\psi = 0$ significa que o carregamento é aplicado somente sobre o revestimento, e $\psi = 1$ que o carregamento é aplicado sobre o revestimento e reforçadores.

Para se levar em conta a degradação do material da região da solda, é adotado apenas um único fator k_z para todo o material da zona HAZ. O valor da largura da *heat affected zone* é aproximado para o valor da largura w_a da flange soldada, uma vez que o limite superior de w_{HAZ} é $2 \times 6t_a \approx 0,8w_a \approx w_a$.

Capítulo 3

Ferramenta de Modelo

Devido ao grande número de painéis analisados neste trabalho tornou-se necessário, a fim de otimizar a confecção dos modelos, o desenvolvimento de uma ferramenta de trabalho. Esta ferramenta permite a criação de arquivos .DAT que contêm todos os dados necessários para a análise utilizando o NASTRAN (MSC, 2008). O programa permite a parametrização de modelos de elementos finitos de painéis planos reforçados soldados e rebitados. O Apêndice A traz o código computacional da ferramenta desenvolvida.

3.1 Descrição

A figura apresenta a entrada de dados da ferramenta *Panel Tool v4.0*, na qual se insere parâmetros do revestimento, do reforçador, do tipo de ligação e do refinamento da malha.

Primeiramente, devem ser selecionados o tipo de ligação (FSW ou rebite), o tipo de contato (linear ou não-linear) e se devem ser levados em conta os efeitos da soldagem (largura da TMAZ e degradação do material na HAZ). Os campos de entrada são descritos a seguir:

Campo	Significado
Contato Linear	contato linear na interface reforçador-revestimento
Contato Não-Linear	contato não-linear na interface reforçador-revestimento
Ligação FSW	ligação reforçador-revestimento por FSW
Ligação Rebite	ligação reforçador-revestimento por rebite
HAZ	imperfeições físicas da solda.

Os dados do revestimento são fornecidos pelos seguintes campos:

Revestimento					
a		h_s		E_s	
b				ν_s	

Campo	Significado
a	comprimento do revestimento
b	largura do revestimento
h_s	espessura do revestimento
E_s	módulo de Young do material do revestimento
ν_s	coeficiente de Poisson do material do revestimento.

Os dados do reforçador são inseridos nas caixas:

Reforçador					
w_a		t_a		E	
w_b		t_b		ν	
w_c		t_c		n_{ref}	

Campo	Significado
w_a	largura da flange de conexão (flange inferior)
w_b	largura da alma
w_c	largura da flange livre (flange superior)
t_a	espessura da flange de conexão (flange inferior)
t_b	espessura da alma
t_c	espessura da flange livre (flange superior)
E	módulo de Young do material do reforçador
ν	coeficiente de Poisson do material do reforçador
n_{ref}	número de reforçadores (incluindo os das bordas).

Caso a ligação seja rebitada deve-se inserir as seguintes informações:

Rebite

d_r p E_r

Campo	Significado
d_r	diâmetro do rebite
p	passo da ligação rebitada (função de d_r)
E_r	módulo de Young do material do rebite.

Inserem-se, após, os dados da malha do painel rebitado:

Malha do painel

EL da flange

EL entre reforçadores

EL entre rebites

Largura de solda / t_a

Fator kz

ψ

Campo	Significado
EL da flange	n.º de elementos da flange (inteiro par > 0)
EL entre reforçadores	n.º de elementos entre reforçadores (inteiro par > 0)
EL entre rebites	n.º de elementos entre dois rebites consecutivos (inteiro par > 0)
ψ	fator de carregamento (real entre 0 e 1).

Caso a ligação seja soldada deve-se fornecer as seguintes informações:

Campo	Significado
EL da flange	n.º de elementos da flange (inteiro par > 0)
EL entre reforçadores	n.º de elementos entre reforçadores (inteiro par > 0)
EL ao longo do painel	n.º de elementos entre rebites consecutivos (inteiro par > 0)
Largura de solda	largura da TMAZ = αt_a onde $\alpha = 0, 1, 2, 3$.
Fator k_z	fator de degradação do material na HAZ (real entre 0 e 1)
ψ	fator de carregamento (real entre 0 e 1).

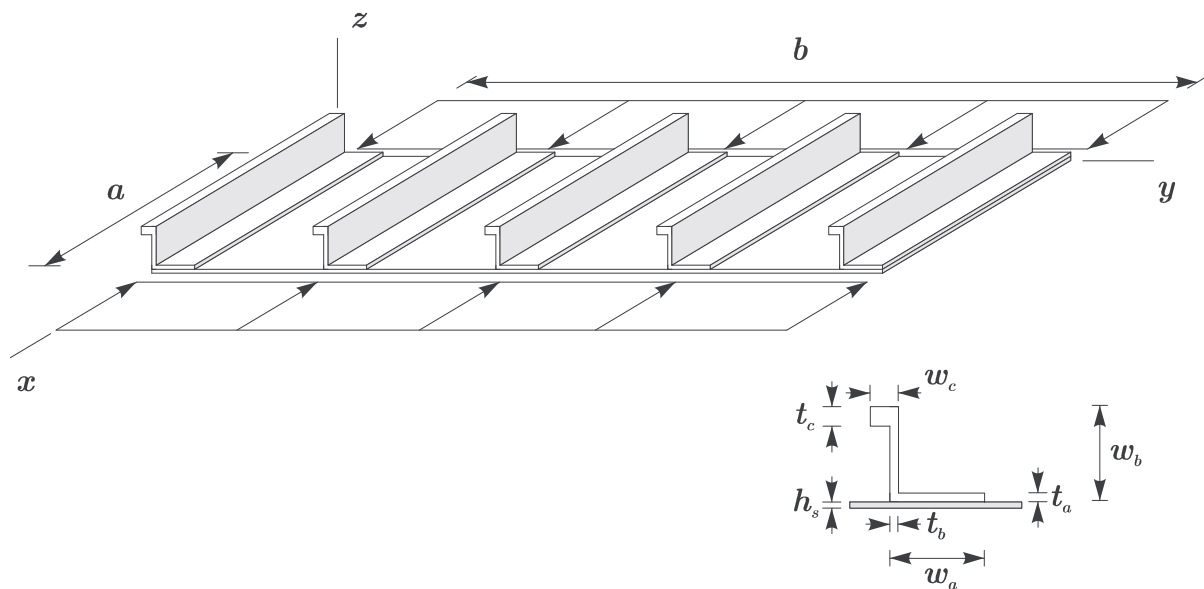
Por último, deve-se escolher o local e o nome do arquivo .DAT:

Campo	Significado
Diretório	diretório onde será salvo o arquivo de dados
Arquivo	nome do arquivo de dados.

Clicando-se no botão **Gerar DAT**, será criado o arquivo .DAT que contém todas as informações do modelo de elementos finitos do painel.

3.2 Criação do Modelo

Neste tópico será abordado, passo a passo, a criação do modelo com a utilização da ferramenta *Panel Tool v4.0*.



Painel com cinco reforçadores.

Toma-se como exemplo o painel indicado na figura, cujas propriedades geométricas e do material são definidas por:

$$\begin{array}{lll}
 a = 700,00 \text{ mm} & b = 840,00 \text{ mm} & h_s = 1,00 \text{ mm} \\
 w_a = 19,05 \text{ mm} & w_b = 19,05 \text{ mm} & w_c = 5,00 \text{ mm} \\
 t_a = 1,27 \text{ mm} & t_b = 1,27 \text{ mm} & t_c = 3,00 \text{ mm}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll}
 E_s = 72400 \text{ MPa} & \nu_s = 0,33 \\
 E = 71020 \text{ MPa} & \nu = 0,33.
 \end{array}$$

Considera-se que o painel está submetido a um carregamento longitudinal de resultante unitária de compressão e que apoia-se simplesmente ao longo das bordas carregadas do revestimento. No exemplo, a ligação é feita por FSW e o contato é não linear.

Primeiramente, seleciona-se o tipo de contato e a ligação utilizada. Seleciona-se então a opção **Contato Não Linear** e a opção **Ligação FSW**. Para este modelo será considerada

a degradação do material da HAZ, portanto ativa-se a opção **HAZ**.

☒ Ligação FSW	☒ HAZ	☐ Contato Linear
☐ Ligação Rebite	☒ Contato Não Linear	

Inserem-se os dados do revestimento:

a	700
b	840
h_s	1
E_s	72400
ν_s	0,33

Logo após, inserem-se os dados do reforçador:

w_a	19,05
w_b	19,05
w_c	5,5
t_a	1,27
t_b	1,27
t_c	3,00
E	71020
ν	0,33
n_{ref}	5

Em seguida passa-se para a definição da malha utilizada. Para este modelo, cria-se uma malha de 2×24 para a alma e para a flange dos reforçadores e uma malha de 12×24 para o revestimento entre reforçadores. A largura de solda foi considerada igual a $2t_a$ e o fator de degração k_z igual a 70%. Como o carregamento é aplicado somente sobre o revestimento, o fator de carregamento ψ é igual a zero.

EL da flange	2
EL entre reforçadores	12
EL ao longo do painel	24
Largura da solda / t_a	2
Fator kz	0,7
ψ	0

Por fim, escolhe-se o diretório e o nome do arquivo .DAT. Clicando-se em **Gerar DAT** o arquivo será criado. Este modelo será salvo no diretório $C:\backslash$ com o nome de *Painel1.DAT*.

Diretório	C:\backslash	Procurar...
Arquivo	Painel1.DAT	Gerar DAT

Capítulo 4

Aplicações Numéricas

Cada um dos seis painéis da Tabela 2.3 é analisado por meio de nove modelos de elementos finitos que diferem entre si pela maneira como a ligação é tratada. Os modelos são analisados empregando-se a solução de flambagem linear SOL 105 do NASTRAN. Os resultados obtidos são comparados com a formulação de Rayleigh-Ritz proposta por BISAGNI e VESCOVINI (2009). Nos sete primeiros modelos a ligação reforçador-revestimento é do tipo FSW, e nos dois últimos a ligação reforçador-revestimento é rebitada.

Para se avaliar a influência da largura da junta de solda w_{weld} (largura da TMAZ) sobre a carga crítica do painel é que se faz w_{weld} tomar os valores de $0, t_a, 2t_a, 3t_a$ nos quatro primeiros modelos. A degradação do material é quantificada pelo fator de degradação $k_z = E_{HAZ}/E$, que relaciona o módulo de elasticidade do material da zona termicamente afetada E_{HAZ} com o módulo de elasticidade do material original E . Faz-se $k_z = 0,7$ no quinto exemplo, $k_z = 0,8$ no sexto exemplo e para os demais, onde não se leva em conta nenhuma degradação, faz-se $k_z = 1$.

Estuda-se, também, a influência da distribuição do carregamento na carga de flambagem do painel. Nos modelos referentes à ligação FSW, os seis primeiros têm o carregamento uniformemente distribuído ao longo do revestimento ($\psi = 0$), e o sétimo apresenta o carregamento uniformemente distribuído ao longo das áreas do revestimento e dos reforçadores ($\psi = 1$). No oitavo e nono modelos que se referem a ligações do tipo rebitadas considera-se, respectivamente, $\psi = 0$ e $\psi = 1$. Por último, compara-se as cargas de flambagem de painéis rebitados com $\psi = 0$ com as cargas de flambagem dos seis primeiros modelos de painéis FSW.

4.1 Modelo 1

Neste modelo de painel reforçado com ligação FSW não se leva em conta nenhuma espécie de degradação física na HAZ ($w_{weld} = 0$ e $E_{HAZ} = E$) e o carregamento é suposto aplicado somente sobre o revestimento ($\psi = 0$). Este modelamento simplificado da ligação FSW procura avaliar a influência dessa simplificação sobre a carga crítica do painel. Os resultados obtidos são comparados com a formulação de Rayleigh-Ritz proposta por BISAGNI e VESCOVINI (2009) conforme mostra a Tabela 4.1.

A análise feita permite identificar o modo de flambagem em que cada painel flamba. Os primeiros modos de flambagem dos painéis 1 – 6 estão indicados nas figuras 4.1 – 4.6.

Tabela 4.1 Carga crítica de flambagem dos painéis FSW não considerando a largura da junta de solda nem a degradação do material base.

Painel ID	$\sigma_{\text{mod},1}$ (N/mm ²)	σ_{RR} (N/mm ²)	dif (%)
1	2,0887	2,0449	2,14
2	5,2777	5,0354	4,81
3	5,0042	4,9197	1,72
4	12,6521	12,2590	3,21
5	9,3630	9,1889	1,89
6	23,7199	22,6790	4,59

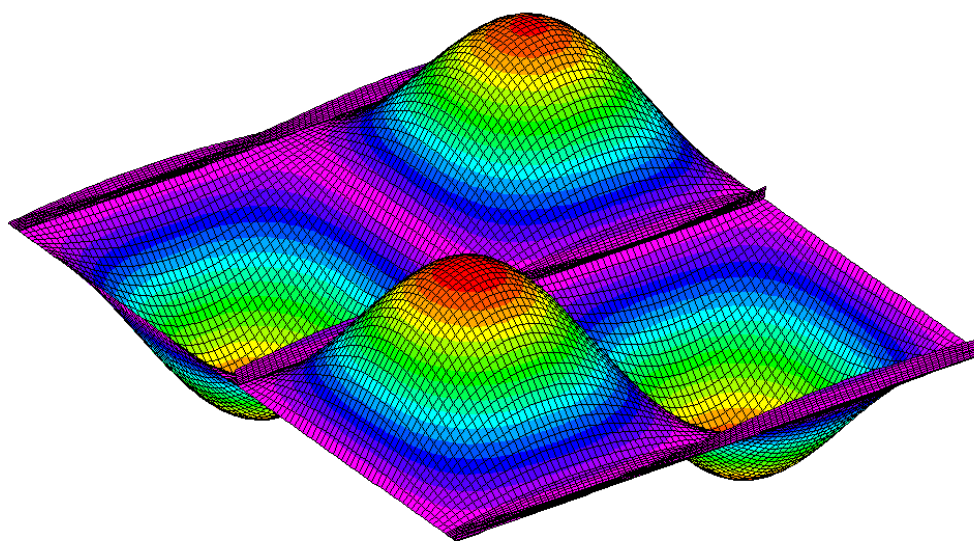


Figura 4.1 Primeiro modo de flambagem do Painel 1.

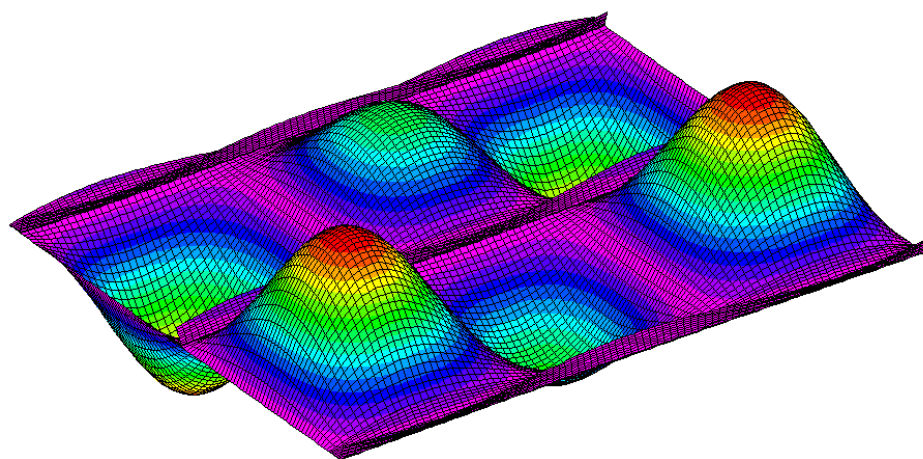


Figura 4.2 Primeiro modo de flambagem do Painel 2.

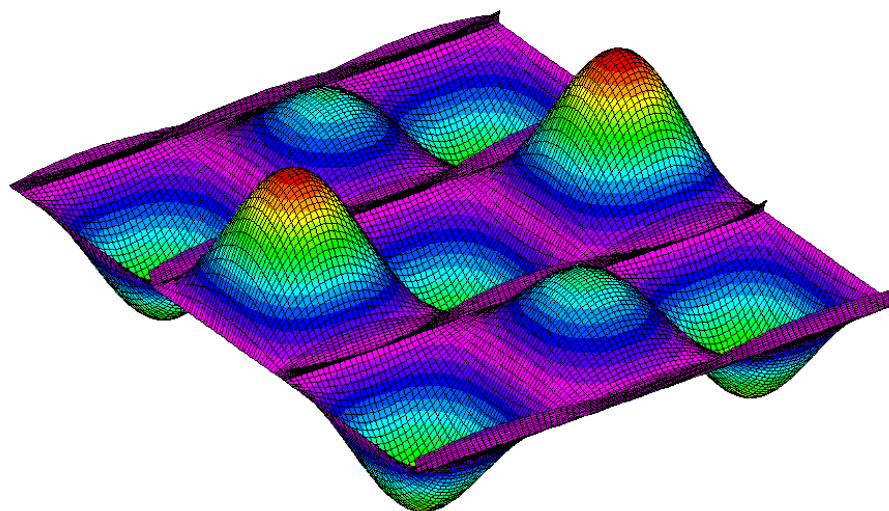


Figura 4.3 Primeiro modo de flambagem do Painel 3.

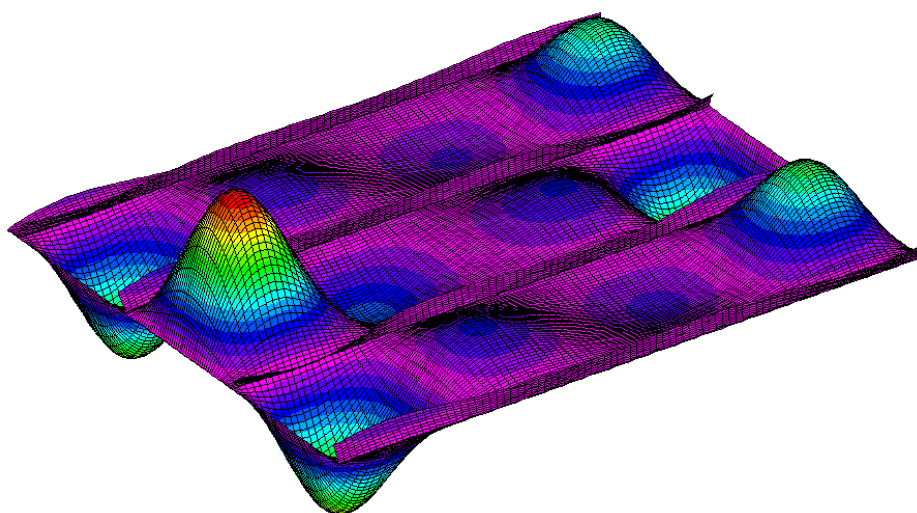


Figura 4.4 Primeiro modo de flambagem do Painel 4.

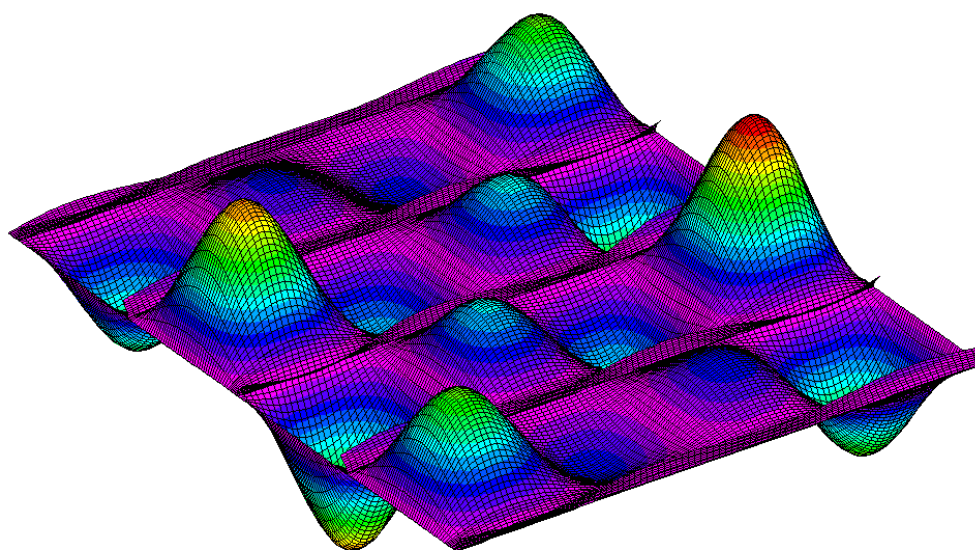


Figura 4.5 Primeiro modo de flambagem do Painel 5.

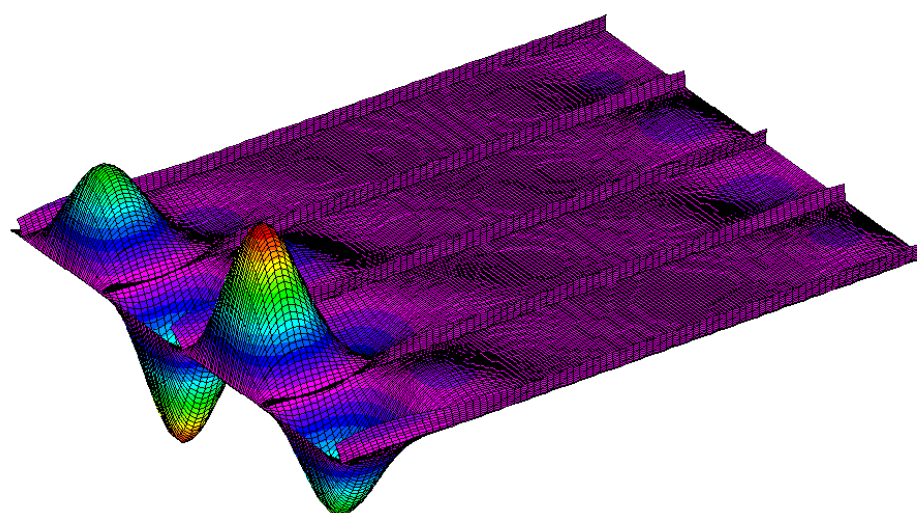


Figura 4.6 Primeiro modo de flambagem do Painel 6.

4.2 Modelo 2

Neste modelo de painel reforçado com ligação FSW considera-se a largura de solda $w_{weld} = t_a$, porém não se leva em conta a degradação do material da HAZ ($E_{HAZ} = E$) e o carregamento é suposto estar aplicado somente sobre o revestimento ($\psi = 0$). Este modelo procura avaliar a influência da largura de solda sobre a carga crítica do painel. Os resultados obtidos são comparados com a formulação de Rayleigh-Ritz conforme apresenta a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Carga crítica de flambagem dos painéis FSW com largura da junta de solda igual a t_a e desconsiderando a degradação do material base.

Painel ID	$\sigma_{\text{mod},2}$ (N/mm ²)	σ_{RR} (N/mm ²)	dif (%)
1	2,1328	2,0449	4,30
2	5,4179	5,0354	7,60
3	5,1305	4,9197	4,28
4	13,0737	12,2590	6,65
5	9,6414	9,1889	4,92
6	24,6224	22,6790	8,57

4.3 Modelo 3

Neste modelo de painel reforçado com ligação FSW considera-se a largura de solda $w_{weld} = 2t_a$, porém não se leva em conta a degradação do material da HAZ ($E_{HAZ} = E$) e o carregamento é suposto estar aplicado somente sobre o revestimento ($\psi = 0$). Este modelo procura avaliar a influência da largura de solda sobre a carga crítica do painel. Os resultados obtidos são comparados com a formulação de Rayleigh-Ritz conforme descrito na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Carga crítica de flambagem dos painéis FSW com largura da junta de solda igual a $2t_a$ e desconsiderando a degradação do material base.

Painel ID	$\sigma_{\text{mod},3}$ (N/mm ²)	σ_{RR} (N/mm ²)	dif (%)
1	2,1706	2,0449	6,15
2	5,5304	5,0354	9,83
3	5,2326	4,9197	6,36
4	13,3911	12,2590	9,23
5	9,8574	9,1889	7,27
6	25,2616	22,6790	11,39

4.4 Modelo 4

Neste modelo de painel reforçado com ligação FSW considera-se a largura de solda $w_{\text{weld}} = 3t_a$, porém não se leva em conta a degradação do material da HAZ ($E_{\text{HAZ}} = E$) e o carregamento é suposto estar aplicado somente sobre o revestimento ($\psi = 0$). Este modelo procura avaliar a influência da largura de solda sobre a carga crítica do painel. Os resultados obtidos são comparados com a formulação de Rayleigh-Ritz conforme mostra a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Carga crítica de flambagem dos painéis FSW com largura da junta de solda igual a $3t_a$ e desconsiderando a degradação do material base.

Painel ID	$\sigma_{\text{mod},4}$ (N/mm ²)	σ_{RR} (N/mm ²)	dif (%)
1	2,1950	2,0449	7,34
2	5,6019	5,0354	11,25
3	5,2984	4,9197	7,70
4	13,5871	12,2590	10,84
5	9,9954	9,1889	8,78
6	25,6743	22,6790	13,21

4.5 Modelo 5

Neste modelo de painel reforçado com ligação FSW considera-se a largura de solda $w_{\text{weld}} = 2t_a$ levando-se em conta a degradação do material da HAZ com fator $k_z = 0,7$ e o carrega-

mento é suposto estar aplicado somente sobre o revestimento ($\psi = 0$). Este modelo procura avaliar a influência da degradação do material da HAZ sobre a carga crítica do painel. Os resultados são comparados com os resultados do Modelo 3 conforme apresenta a Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Carga crítica de flambagem dos painéis FSW com largura da junta de solda igual a $2t_a$ e degradação do material base com $k_z = 0,7$.

Painel ID	$\sigma_{\text{mod},5}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{mod},3}$ (N/mm ²)	dif (%)
1	2,1142	2,1706	2,60
2	5,3405	5,5304	3,43
3	5,0629	5,2326	3,24
4	12,8743	13,3911	3,86
5	9,4920	9,8574	3,71
6	24,1754	25,2616	4,30

4.6 Modelo 6

Neste modelo de painel reforçado com ligação FSW considera-se a largura de solda $w_{\text{weld}} = 2t_a$ levando-se em conta a degradação do material da HAZ com fator $k_z = 0,8$ e o carregamento é suposto estar aplicado somente sobre o revestimento ($\psi = 0$). Este modelo procura avaliar a influência da degradação do material da HAZ sobre a carga crítica do painel. Os resultados são comparados com os resultados do Modelo 3 conforme descrito na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 Carga crítica de flambagem dos painéis FSW com largura da junta de solda igual a $2t_a$ e degradação do material base com $k_z = 0,8$.

Painel ID	$\sigma_{\text{mod},6}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{mod},3}$ (N/mm ²)	dif (%)
1	2,1339	2,1706	1,69
2	5,4074	5,5304	2,22
3	5,1225	5,2326	2,10
4	13,0595	13,3911	2,48
5	9,6211	9,8574	2,40
6	24,5658	25,2616	2,75

4.7 Modelo 7

Neste modelo de painel reforçado com ligação FSW considera-se a largura de solda $w_{weld} = 2t_a$, porém não se leva em conta a degradação do material da HAZ ($E_{HAZ} = E$) e o carregamento é considerado estar uniformemente distribuído ao longo das áreas do revestimento e dos reforçadores ($\psi = 1$). Este modelo procura avaliar a influência da distribuição do carregamento sobre a carga crítica do painel. Os resultados são comparados com a formulação de Rayleigh-Ritz conforme mostra a Tabela 4.7.

Tabela 4.7 Carga crítica de flambagem dos painéis FSW com largura da junta de solda igual a $2t_a$ e com $k_z = \psi = 1$.

Painel ID	$\sigma_{\text{mod},7}$ (N/mm ²)	σ_{RR} (N/mm ²)	dif (%)
1	2,5103	2,0449	22,76
2	6,7573	5,0354	34,20
3	6,2770	4,9197	27,59
4	17,5405	12,2590	43,08
5	12,3067	9,1889	33,93
6	35,2117	22,6790	55,26

4.8 Modelo 8

Neste modelo de painel reforçado com ligação rebitada considera-se o carregamento estar aplicado somente sobre o revestimento ($\psi = 0$). Este modelo procura avaliar a influência do tipo de ligação entre o revestimento e reforçador sobre a carga crítica do painel. Os resultados são comparados com a formulação de Rayleigh-Ritz conforme apresenta a Tabela 4.8.

Tabela 4.8 Carga crítica de flambagem para painéis rebitados com $\psi = 0$.

Painel ID	$\sigma_{\text{mod},8}$ (N/mm ²)	σ_{RR} (N/mm ²)	dif (%)
1	2,0919	2,0449	2,30
2	5,2629	5,0354	4,52
3	4,9907	4,9197	1,44
4	12,4287	12,2590	1,38
5	9,2548	9,1889	0,72
6	22,8353	22,6790	0,69

4.9 Modelo 9

Neste modelo de painel reforçado com ligação rebitada considera-se o carregamento estar uniformemente distribuído ao longo das áreas do revestimento e dos reforçadores ($\psi = 1$). Este modelo procura avaliar a influência da distribuição do carregamento e do tipo de ligação entre o revestimento e reforçador sobre a carga crítica do painel. Os resultados são comparados com a formulação de Rayleigh-Ritz conforme descrito na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 Carga crítica de flambagem para painéis rebitados com $\psi = 1$.

Painel ID	$\sigma_{\text{mod},9}$ (N/mm ²)	σ_{RR} (N/mm ²)	dif (%)
1	2,4075	2,0449	17,73
2	6,3911	5,0354	26,92
3	5,9532	4,9197	21,01
4	16,1885	12,2590	32,05
5	11,5095	9,1889	25,25
6	31,8013	22,6790	40,22

4.10 Comparação dos Modelos

Os resultados dos seis primeiros modelos FSW e os resultados do modelo de ligação rebitada com $\psi = 0$ são confrontados nas figuras 7 – 12.

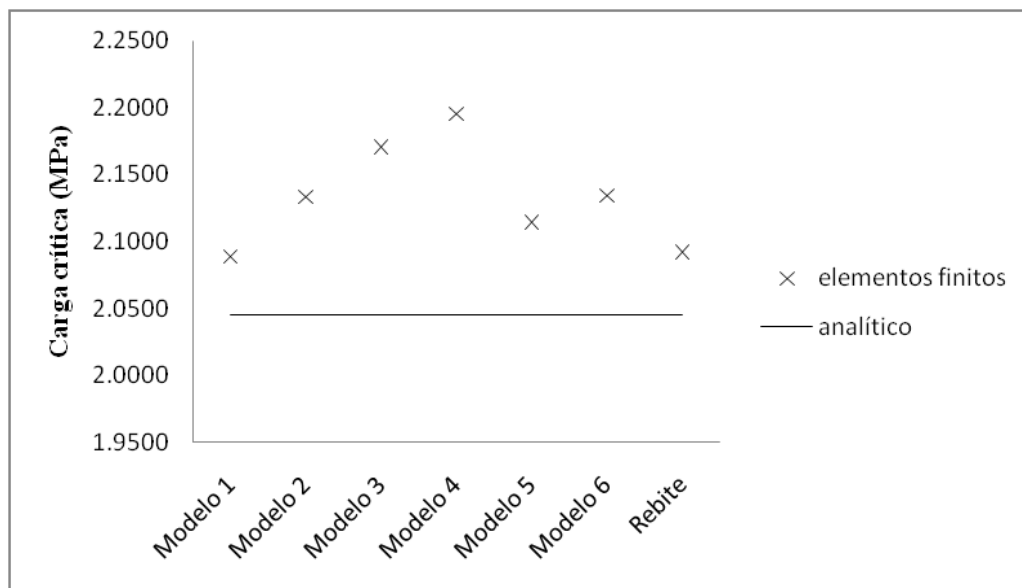


Figura 4.7 Comparação dos modelos: Painel 1.

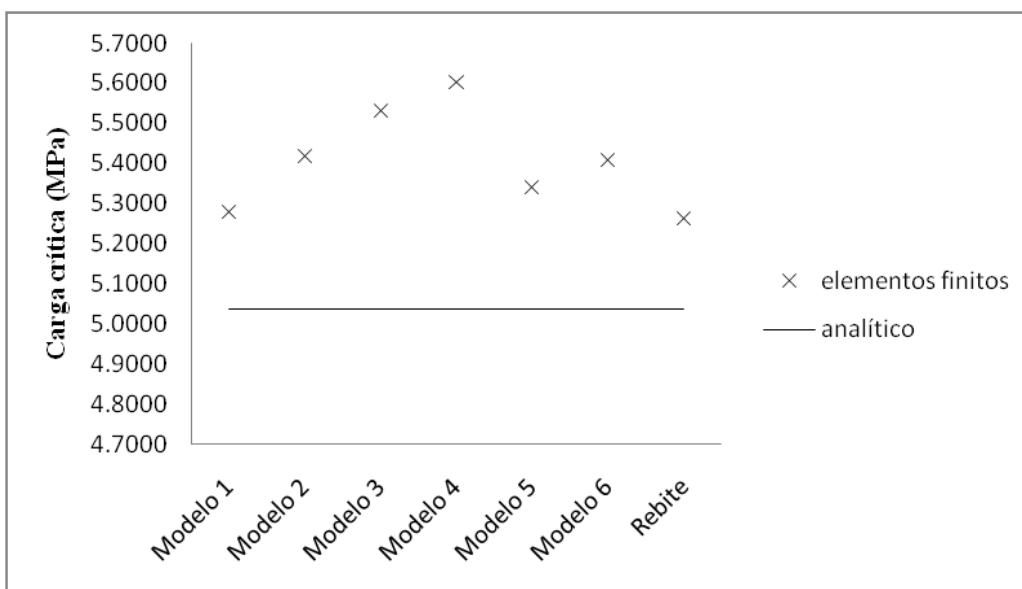


Figura 4.8 Comparação dos modelos: Painel 2.

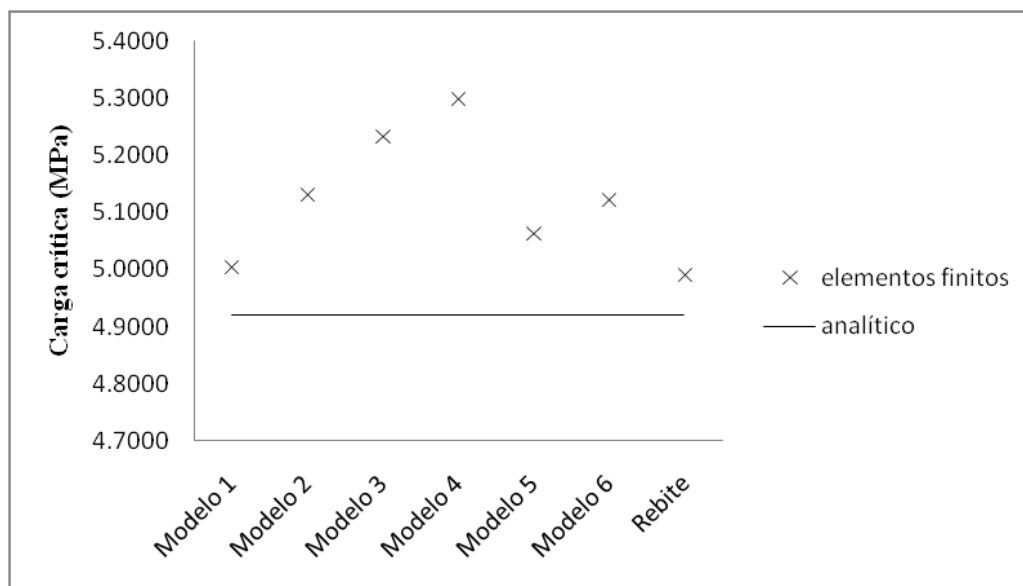


Figura 4.9 Comparação dos modelos: Painel 3.

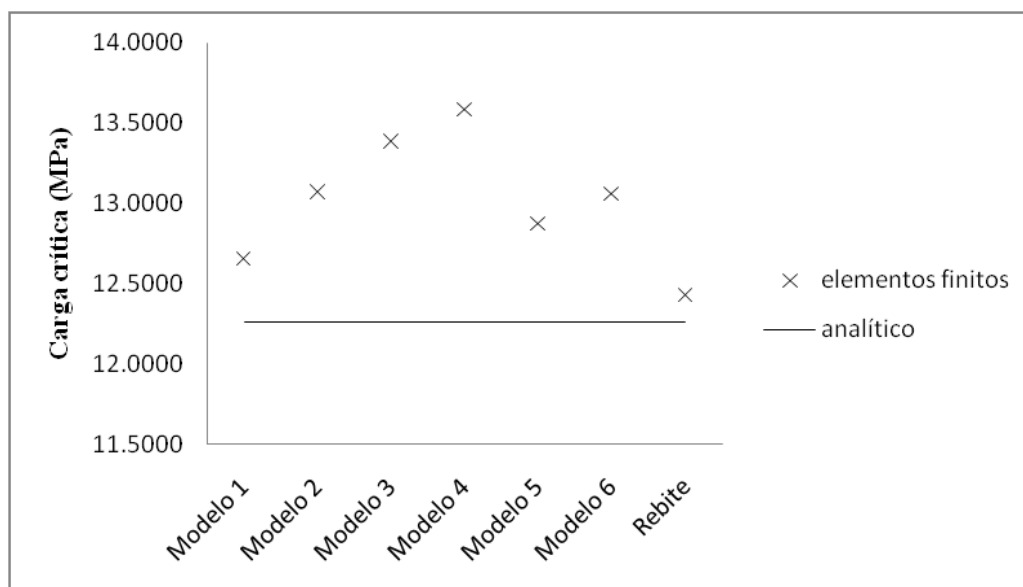


Figura 4.10 Comparação dos modelos: Painel 4.

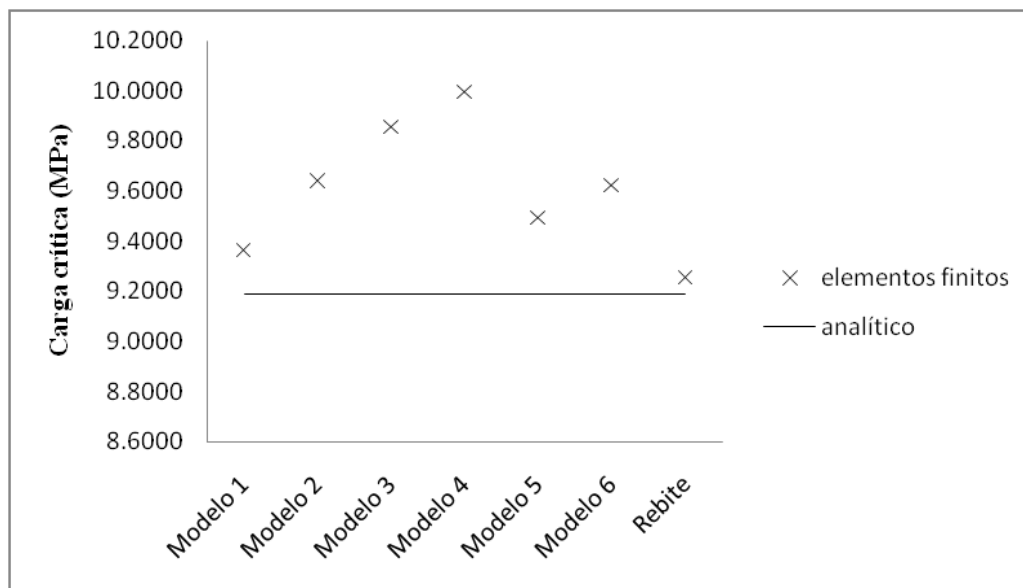


Figura 4.11 Comparação dos modelos: Painel 5.

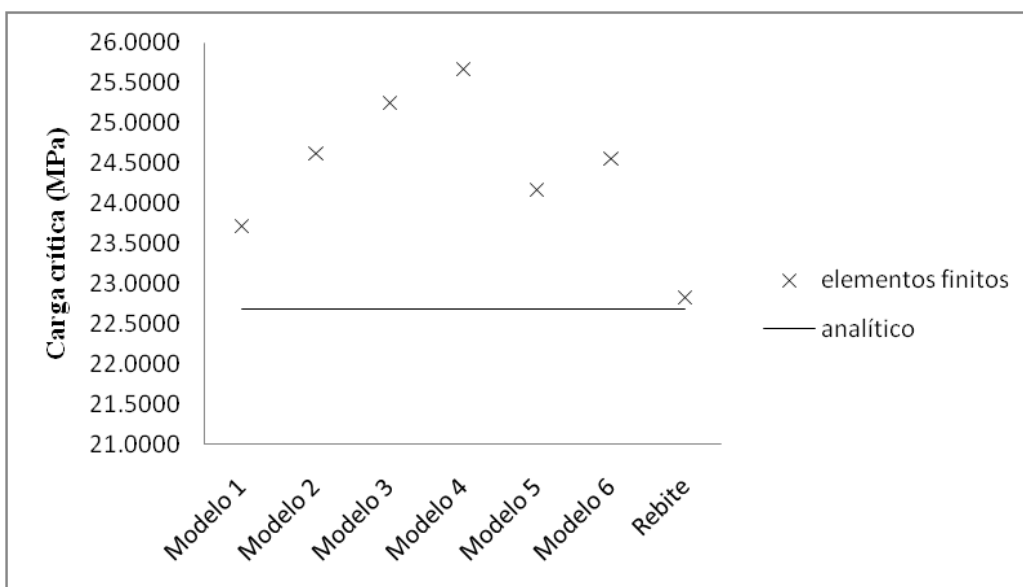


Figura 4.12 Comparação dos modelos: Painel 6.

Capítulo 5

Conclusão

Identifica-se, numa primeira aproximação, as principais diferenças do comportamento crítico de painéis reforçados com ligações FSW e com ligações rebitadas. Inserindo-se imperfeições do material nos modelos de painéis FSW podem-se avaliar os valores da carga crítica de flambagem e compará-los com os valores propostos por BISAGNI e VESCOVINI (2009). Dessa forma, quantifica-se a influência da degradação do material da zona de solda e da largura da junta de solda sobre a performance de painéis FSW.

Os resultados numéricos mostram que a largura da junta de solda aparentemente apresenta maior influência no comportamento estrutural dos painéis FSW. O estudo indica que a degradação do material da zona de solda tem baixa influência na carga crítica em comparação com o modelo livre de degradação, portanto pode ser desconsiderada. As análises mostram que a forma como o carregamento é aplicado sobre os painéis tem bastante influência na carga crítica de flambagem, porém para melhores conclusões os resultados deveriam ser comparados com resultados experimentais obtendo-se um fator de carregamento ψ que melhor representa sua distribuição.

Nos painéis rebitados não foram considerados nenhuma imperfeição geométrica ou imperfeição material, e os resultados obtidos são bastante próximos dos resultados analíticos. Comparando o comportamento dos painéis soldados com os painéis rebitados, percebe-se que existe uma pequena diferença na carga crítica de flambagem. Aparentemente, essa diferença pode ser acentuada com a inclusão das tensões residuais nos modelos FSW obtendo-se, dessa forma, uma melhor representação desses painéis.

Apêndice A

Panel Tool v4.0: código fonte

Módulo das Declarações:

```
Option Explicit On
```

```
Module Declarações
```

```
    ' checkbox
    Public gap_type As Integer = 1 ' tipo de contato: [0] = contato linear
    [1] = contato não linear
    Public cnx_type As String = "FSW" ' tipo de conexão: [FSW] = ligação
    via solda [Rebite] = ligação via rebite

    ' revestimento
    Public a As Double ' comprimento do painel
    Public b As Double ' largura do painel
    Public h As Double ' espessura do revestimento
    Public E_rev As Double ' módulo de Young do revestimento
    Public v_rev As Double ' coeficiente de Poisson do revestimento

    ' reforçador
    Public Dim_A As Double ' largura da aba do reforçador
    Public Dim_B As Double ' altura do reforçador
    Public Dim_C As Double ' largura da flange do reforçador
    Public Dim_tA As Double ' espessura da aba do reforçador
    Public Dim_tB As Double ' espessura da alma do reforçador
    Public Dim_tC As Double ' espessura da flange do reforçador
    Public E_ref As Double ' módulo de Young do reforçador
    Public v_ref As Double ' coeficiente de Poisson do reforçador
    Public n_ref As Integer ' número de reforçadores

    ' rebite
    Public d_reb As Double ' diâmetro do rebite
    Public s_reb As Double ' passo do rebite em termos de seu diâmetro
    Public E_reb As Double ' módulo de Young do rebite

    ' malha do painel
    Public nn1_x As Integer ' número ímpar de nós da aba do reforçador ao
    longo de x
    '
    ' número ímpar de nós da alma do reforçador
    ao longo de z
```



```

Public nn2_x As Integer ' número de nós do revestimento, ao longo de
x, entre dois reforçadores consecutivos
Public nn1_y As Integer ' número de nós da aba do reforçador ao longo
de y
'
' número de nós da alma do reforçador ao
longo de y
Public nnreb As Integer ' número par de nós, ao longo de y, em torno
de um rebite
Public nelZTA As Integer ' número de elementos da ZTA
Public lZTA As Integer ' largura da ZTA
Public kz As Double 'Fator de degradação do material da ZTA

' fator de carga do reforçador
Public FCR As Double

' arquivo de saída
Public dir_name As String ' nome do diretório do arquivo de saída
Public arq_name As String ' nome do arquivo .DAT
Public fs As Object ' objeto do sistema
Public arq As Object ' objeto do arquivo do sistema

' variáveis intermediárias
Public b_aba As Double ' largura de cálculo da aba do reforçador
Public h_aba As Double ' espessura de cálculo da aba do reforçador
Public b_alma As Double ' largura de cálculo da alma do reforçador
Public h_alma As Double ' espessura de cálculo da alma do reforçador
Public b_flange As Double ' largura de cálculo da flange do
reforçador
Public h_flange As Double ' espessura de cálculo da flange do
reforçador
Public A_flange As Double ' área da flange do reforçador
Public Iz_flange As Double ' inércia à flexão, ao longo do eixo local
z, da flange do reforçador
Public Iy_flange As Double ' inércia à flexão, ao longo do eixo local
y, da flange do reforçador
Public J_flange As Double ' constante de torção de Saint-Venant
Public n_reb As Integer ' número de rebites do reforçador
Public rig_ax As Double ' rigidez axial do rebite
Public rig_tr As Double ' rigidez transversal do rebite segundo Swift
Public A_painel As Double
Public sigentref As Double ' carregamento nodal de compressão, ao
longo de y, do revestimento entre dois reforçadores consecutivos
Public sigsobref As Double ' carregamento nodal de compressão, ao
longo de y, do revestimento imediatamente sob um reforçador
Public sigaba As Double ' carregamento nodal de compressão, ao longo
de y, da aba do reforçador
Public sigalma As Double ' carregamento nodal de compressão, ao longo
de y, da alma do reforçador
Public sigflange As Double ' carregamento nodal de compressão, ao
longo de y, da flange do reforçador

```

End Module

Módulo da Forma:

Option Explicit On

Public Class PanelTool

```
Sub Dados(ByRef dados_OK As Boolean, ByRef arq_OK As Boolean)

    If CheckBoxL1C1.Checked Then
        gap_type = 0
    Else
        gap_type = 1
    End If
    If CheckBoxL1C2.Checked Then
        cnx_type = "FSW"
    Else
        cnx_type = "Rebite"
    End If

    ' revestimento
    a = Val(BoxL1C1.Text)
    b = Val(BoxL2C1.Text)
    h = Val(BoxL1C2.Text)
    E_rev = Val(BoxL1C3.Text)
    v_rev = Val(BoxL2C3.Text)
    ' validação de dados: revestimento
    If Val(BoxL1C1.Text) <= 0 Then
        MessageBox.Show("Var a: REAL > 0", "Ops!!!",
        MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
        dados_OK = False
    End If
    If Val(BoxL2C1.Text) <= 0 Then
        MessageBox.Show("Var b: REAL > 0", "Ops!!!",
        MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
        dados_OK = False
    End If
    If Val(BoxL1C2.Text) <= 0 Then
        MessageBox.Show("Var h: REAL > 0", "Ops!!!",
        MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
        dados_OK = False
    End If
    If Val(BoxL1C3.Text) <= 0 Then
        MessageBox.Show("Var E_rev: REAL > 0", "Ops!!!",
        MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
        dados_OK = False
    End If
    If Val(BoxL2C3.Text) <= 0 Then
        MessageBox.Show("Var v_rev: REAL > 0", "Ops!!!",
        MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
        dados_OK = False
    End If

    ' reforçador
    Dim_A = Val(BoxL3C1.Text)
    Dim_B = Val(BoxL4C1.Text)
    Dim_C = Val(BoxL5C1.Text)
```

```
Dim_tA = Val(BoxL3C2.Text)
Dim_tB = Val(BoxL4C2.Text)
Dim_tC = Val(BoxL5C2.Text)
E_ref = Val(BoxL3C3.Text)
v_ref = Val(BoxL4C3.Text)
n_ref = Val(BoxL5C3.Text)
' validação de dados: reforçador
If Val(BoxL3C1.Text) <= 0 Then
    MessageBox.Show("Var A: REAL > 0", "Ops!!!",
    MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
    dados_OK = False
End If
If Val(BoxL4C1.Text) <= 0 Then
    MessageBox.Show("Var B: REAL > 0", "Ops!!!",
    MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
    dados_OK = False
End If
If Val(BoxL5C1.Text) <= 0 Then
    MessageBox.Show("Var C: REAL > 0", "Ops!!!",
    MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
    dados_OK = False
End If
If Val(BoxL3C2.Text) <= 0 Then
    MessageBox.Show("Var t_A: REAL > 0", "Ops!!!",
    MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
    dados_OK = False
End If
If Val(BoxL4C2.Text) <= 0 Then
    MessageBox.Show("Var t_B: REAL > 0", "Ops!!!",
    MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
    dados_OK = False
End If
If Val(BoxL5C2.Text) <= 0 Then
    MessageBox.Show("Var t_C: REAL > 0", "Ops!!!",
    MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
    dados_OK = False
End If
If Val(BoxL3C3.Text) <= 0 Then
    MessageBox.Show("Var E_ref: REAL > 0", "Ops!!!",
    MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
    dados_OK = False
End If
If Val(BoxL4C3.Text) <= 0 Then
    MessageBox.Show("Var v_ref: REAL > 0", "Ops!!!",
    MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
    dados_OK = False
End If
If Val(BoxL5C3.Text) <= 1 Or Val(BoxL5C3.Text) <>
Math.Round(Val(BoxL5C3.Text)) Then
    MessageBox.Show("Var n_ref: INTEIRO > 1", "Ops!!!",
    MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
    dados_OK = False
End If

' rebite
d_reb = Val(BoxL6C1.Text)
s_reb = Val(BoxL6C2.Text)
```

```

E_reb = Val(BoxL6C3.Text)
' validação de dados: rebite
If cnx_type = "Rebite" Then
    If Val(BoxL6C1.Text) <= 0 Then
        MsgBox.Show("Var d: REAL > 0", "Ops!!!",
        MsgBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
        dados_OK = False
    End If
    If Val(BoxL6C2.Text) <= 0 Then
        MsgBox.Show("Var p: REAL > 0", "Ops!!!",
        MsgBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
        dados_OK = False
    End If
    If Val(BoxL6C3.Text) <= 0 Then
        MsgBox.Show("Var E_reb: REAL > 0", "Ops!!!",
        MsgBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
        dados_OK = False
    End If
End If

' malha do painel
LZTA = Val(BoxL10C3.Text)
kz = 1
If CheckBoxL1C3.Checked Then

    If LZTA > 0 Then
        nn1_x = Math.Round(Dim_A / (LZTA * Dim_tA)) + 1
    Else
        nn1_x = Val(BoxL7C3.Text) + 1
    End If

    If nn1_x Mod 2 = 0 Then nn1_x = nn1_x + 1
    kz = Val(BoxL11C3.Text)

Else
    nn1_x = Val(BoxL7C3.Text) + 1
End If
nn2_x = Val(BoxL8C3.Text) + 1

If cnx_type = "FSW" Then
    nn1_y = Val(BoxL9C3.Text) + 1
Else
    nnreb = Val(BoxL9C3.Text)
End If
' validação de dados: malha do painel
If Val(BoxL7C3.Text) <= 0 Or Val(BoxL7C3.Text) <>
Math.Round(Val(BoxL7C3.Text)) Or (Val(BoxL7C3.Text) Mod 2) <> 0 Then
    MsgBox.Show("Var EL da flange: INTEIRO PAR > 0",
    "Ops!!!", MsgBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
    dados_OK = False
End If
If Val(BoxL8C3.Text) <= 0 Or Val(BoxL8C3.Text) <>
Math.Round(Val(BoxL8C3.Text)) Then
    MsgBox.Show("Var EL entre reforçadores: INTEIRO > 0",
    "Ops!!!", MsgBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
    dados_OK = False
End If

```

```

        If cnx_type = "FSW" And (Val(BoxL9C3.Text) <= 0 Or
Val(BoxL9C3.Text) <> Math.Round(Val(BoxL9C3.Text))) Then
            MsgBox.Show("Var EL ao longo do painel: INTEIRO > 0",
"Ops!!!", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
            dados_OK = False
        End If
        If cnx_type = "Rebite" And (Val(BoxL9C3.Text) <= 0 Or
Val(BoxL9C3.Text) <> Math.Round(Val(BoxL9C3.Text)) Or
(Val(BoxL9C3.Text) Mod 2) <> 0) Then
            MsgBox.Show("Var EL entre rebites: INTEIRO PAR > 0",
"Ops!!!", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
            dados_OK = False
        End If
        If CheckBoxL1C3.Checked Then
            If Val(BoxL10C3.Text) < 0 Or Val(BoxL10C3.Text) <>
Math.Round(Val(BoxL10C3.Text)) Then
                MsgBox.Show("Largura da solda: 0, 1, 2 ou 3",
"Ops!!!", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
                dados_OK = False
            End If
            If Val(BoxL11C3.Text) < 0 Or Val(BoxL11C3.Text) > 1 Then
                MsgBox.Show("Var kz: 0 <= REAL <= 1", "Ops!!!",
MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
                dados_OK = False
            End If
        End If

        ' fator de carga do reforçador
        FCR = Val(BoxL12C3.Text)
        If Val(BoxL12C3.Text) < 0 Or Val(BoxL12C3.Text) > 1 Then
            MsgBox.Show("Var FCR: 0 <= REAL <= 1", "Ops!!!",
MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
            dados_OK = False
        End If

        ' arquivo de saída
        dir_name = LabelDIR.Text & "\"
        arq_name = TextBoxDAT.Text
        ' validação de dados: arquivo de saída
        If dir_name = "\" Then
            MsgBox.Show("CAMINHO INVÁLIDO", "Ops!!!",
MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
        End If
        If arq_name = "*.DAT" Then
            MsgBox.Show("ARQUIVO INVÁLIDO", "Ops!!!",
MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
        End If
        If (dir_name <> "\" ) And (arq_name <> "*.DAT") Then arq_OK =
True

    End Sub
Sub Var()

    Dim Pi As Double = 3.141592654

    b_aba = Dim_A - 0.5 * Dim_tB
    h_aba = Dim_tA

```

```

b_alma = Dim_B - 0.5 * Dim_tA - 0.5 * Dim_tC
h_alma = Dim_tB
b_flange = Dim_C - 0.5 * Dim_tB
h_flange = Dim_tC
A_flange = b_flange * h_flange
Iz_flange = (b_flange * h_flange ^ 3) / 12
Iy_flange = (h_flange * b_flange ^ 3) / 12
J_flange = (1 - 192 * h_flange / (Pi ^ 5 * b_flange) *
(Math.Tanh(Pi * b_flange / (2 * h_flange))) + _
Math.Tanh(3 * Pi * b_flange / (2 * h_flange)) / 243))
* (h_flange ^ 3 * b_flange / 3)

If cnx_type = "Rebite" Then
    n_reb = 2
    While (a / n_reb >= s_reb * d_reb)
        n_reb = n_reb + 1
    End While
    n_reb = n_reb - 1
    nn1_y = nnreb * n_reb + 1
    rig_ax = E_reb * (Pi * d_reb ^ 2 / 4) / (0.5 * (h + h_aba))
    rig_tr = (5 / (d_reb * E_reb) + 0.8 * (1 / (h * E_rev) + 1 /
(h_aba * E_ref))) ^ (-1)
End If

'A_painel = (b + b_aba) * h + FCR * n_ref * (b_aba * h_aba +
b_alma * h_alma + A_flange)
A_painel = b * h + FCR * n_ref * (b_aba * h_aba + b_alma * h_alma
+ A_flange)
'sigentref = (b - (n_ref - 1) * b_aba) * h / ((nn2_x - 1) *
(n_ref - 1) * A_painel)
sigentref = (b - n_ref * b_aba) * h / ((nn2_x - 1) * (n_ref - 1)
* A_painel)
sigsobref = b_aba * h / ((nn1_x - 1) * A_painel)
sigaba = FCR * b_aba * h_aba / ((nn1_x - 1) * A_painel)
sigalma = FCR * b_alma * h_alma / ((nn1_x - 1) * A_painel)
sigflange = FCR * A_flange / A_painel

End Sub
Sub Mat()

' definição dos materiais: (1) revestimento
'
Coment("material 1: revestimento")
MAT1(1, E_rev, v_rev)
Coment("material 2: reforçador")
MAT1(2, E_ref, v_ref)
Coment("material 3: ZTA")
MAT1(3, kz * E_ref, v_ref)

End Sub
Sub Prop()

' definição das propriedades: (1) revestimento
'
' (2) aba do reforçador
'
' (3) alma do reforçador

```

```

'                                     (4) flange do reforçador
'                                     (5) contato

Coment("propriedade 1: revestimento")
PSHELL(1, 1, h)
Coment("propriedade 2: aba do reforçador")
PSHELL(2, 3, h_aba)
Coment("propriedade 3: alma do reforçador")
PSHELL(3, 2, h_alma)
Coment("propriedade 4: flange do reforçador")
PBAR(4, 2, A_flange, Iz_flange, Iy_flange, J_flange, h_flange,
b_flange)
Coment("propriedade 5: contato")
PGAP(5, 1000000.0)

End Sub
Sub NdRevSobRef(ByRef ndmax As Integer)

    Dim i, j, k, ndid As Integer
    Dim dx, dy, delta_x, X, Y As Double
    Coment("nós do revestimento sob reforçadores")

    ndid = ndmax

    dx = b_aba / (nn1_x - 1)
    dy = a / (nn1_y - 1)
    For i = 1 To n_ref
        For j = 1 To nn1_y
            delta_x = (b - b_aba) * (i - 1) / (n_ref - 1)
            For k = 1 To nn1_x
                ndid = ndid + 1
                X = (k - 1) * dx + delta_x
                Y = (j - 1) * dy
                GRID(ndid, X, Y, 0.0)
            Next
        Next
    Next

    ndmax = ndid

End Sub
Sub ElRevSobRef(ByRef ndmax As Integer, ByRef elmax As Integer, ByRef
ndelmax As Integer)

    Dim i, j, k, elid, nd1, nd2, nd3, nd4 As Integer
    Coment("elementos do revestimento sob reforçadores")

    elid = elmax

    For i = 1 To n_ref
        For j = 1 To nn1_y - 1
            For k = 1 To nn1_x - 1
                elid = elid + 1
                nd1 = (i - 1) * nn1_y * nn1_x + (j - 1) * nn1_x + k
                nd2 = (i - 1) * nn1_y * nn1_x + (j - 1) * nn1_x + k +
1
                nd3 = nd2 + nn1_x

```

```

        nd4 = nd1 + nn1_x
        CQUAD4(elid, 1, nd1, nd2, nd3, nd4)
    Next
Next
Next

elmax = elid
ndelmax = ndmax

End Sub
Sub NdAbaRef(ByRef ndmax As Integer)

    Dim i, j, k, ndid As Integer
    Dim dx, dy, delta_x, X, Y As Double
    Coment("nós da aba dos reforçadores")

    ndid = ndmax

    dx = b_aba / (nn1_x - 1)
    dy = a / (nn1_y - 1)
    For i = 1 To n_ref
        For j = 1 To nn1_y
            delta_x = (b - b_aba) * (i - 1) / (n_ref - 1)
            For k = 1 To nn1_x
                ndid = ndid + 1
                X = (k - 1) * dx + delta_x
                Y = (j - 1) * dy
                GRID(ndid, X, Y, 0.5 * (h + h_aba))
            Next
        Next
    Next

    ndmax = ndid

End Sub
Sub ElAbaRef(ByVal ndmax As Integer, ByRef elmax As Integer, ByRef
ndelmax As Integer)

    Dim i, j, k, elid, nd1, nd2, nd3, nd4 As Integer
    Coment("elementos da aba dos reforçadores")

    elid = elmax

    For i = 1 To n_ref
        For j = 1 To nn1_y - 1
            For k = 1 To nn1_x - 1
                elid = elid + 1
                nd1 = ndelmax + (i - 1) * nn1_y * nn1_x + (j - 1) *
nn1_x + k
                nd2 = ndelmax + (i - 1) * nn1_y * nn1_x + (j - 1) *
nn1_x + k + 1
                nd3 = nd2 + nn1_x
                nd4 = nd1 + nn1_x
                CQUAD4(elid, 2, nd1, nd2, nd3, nd4)
            Next
        Next
    Next

```



```

    elmax = elid
    ndelmax = ndmax

End Sub
Sub ElCnxNLFSW(ByVal ndmax As Integer, ByRef elmax As Integer, ByRef
ndelmax As Integer)

    Dim ndref, i, nd1, nd2, elid As Integer
    Coment("elementos de conexão reforçador/revestimento para o
processo FSW: contato não linear")

    elid = elmax

    ndref = (nn1_x - 1) / 2 + 1
    For i = 1 To ndref * nn1_y * nn1_x
        nd1 = i
        nd2 = ndref * nn1_y * nn1_x + i
        If (CheckBoxL1C3.Checked = True) And (LZTA > 0) Then

            If (i <> ndref) And (i <> ndref - 1) And (i <> ndref + 1)
Then
                ' elemento de contato não linear
                elid = elid + 1
                CGAP(elid, 5, nd1, nd2)
            ElseIf (i = ndref) Or (i = ndref - 1) Or (i = ndref + 1)
Then
                ' elemento rígido
                elid = elid + 1
                RBE2(elid, nd1, 123, nd2)
                If i = ndref + 1 Then ndref = ndref + nn1_x
            End If
        End If

        If (CheckBoxL1C3.Checked = False) Or LZTA = 0 Then
            If i <> ndref Then
                ' elemento de contato não linear
                elid = elid + 1
                CGAP(elid, 5, nd1, nd2)
            ElseIf i = ndref Then
                ' elemento rígido
                elid = elid + 1
                RBE2(elid, nd1, 123, nd2)
                ndref = ndref + nn1_x
            End If
        End If

    Next

    elmax = elid
    ndelmax = ndmax

End Sub
Sub ElCnxNLReb(ByVal ndmax As Integer, ByRef elmax As Integer, ByRef
ndelmax As Integer)

    Dim ndref, ndref_reb, ref, i, nd1, nd2, elid As Integer

```

```

Coment("elementos de conexão reforçador/revestimento por meio de
rebites: contato não linear")

elid = elmax

ndref = (nn1_x - 1) / 2 + 1
ndref_reb = (nn1_x - 1) / 2 + 1 + nnreb * nn1_x / 2
ref = 1
For i = 1 To n_ref * nn1_y * nn1_x
    nd1 = i
    nd2 = n_ref * nn1_y * nn1_x + i
    If i <> ndref Then
        If i <> ndref_reb Then
            ' elemento de contato não linear
            elid = elid + 1
            CGAP(elid, 5, nd1, nd2)
        Else
            ' elemento de mola transversal
            elid = elid + 1
            CELAS2(elid, rig_tr, nd1, 1, nd2, 1)
            ' elemento de mola transversal
            elid = elid + 1
            CELAS2(elid, rig_tr, nd1, 2, nd2, 2)
            ' elemento de mola axial
            elid = elid + 1
            CELAS2(elid, rig_ax, nd1, 3, nd2, 3)
            ndref_reb = ndref_reb + nnreb * nn1_x
        End If
    ElseIf i = ndref Then
        ' elemento rígido
        elid = elid + 1
        RBE2(elid, nd1, 123, nd2)
        ndref = nn1_x * nn1_y * ref - (nn1_x - 1) / 2
    End If
    If i = nn1_x * nn1_y * ref Then
        ndref = ndref + nn1_x
        ndref_reb = (nn1_x - 1) / 2 + 1 + nnreb * nn1_x / 2 +
nn1_x * nn1_y * ref
        ref = ref + 1
    End If
Next

elmax = elid
ndelmax = ndmax

End Sub
Sub NdRevEntRef(ByRef ndmax As Integer)

    Dim i, j, k, ndid As Integer
    Dim dx, dy, delta_x, X, Y As Double
    Coment("nós do revestimento entre reforçadores")

    ndid = ndmax

    dx = ((b - b_aba) / (n_ref - 1) - b_aba) / (nn2_x - 1)
    dy = a / (nn1_y - 1)
    For i = 1 To n_ref - 1

```

```

        For j = 1 To nn1_y
            delta_x = (b - b_aba) * (i - 1) / (n_ref - 1)
            For k = 2 To nn2_x - 1
                ndid = ndid + 1
                X = b_aba + (k - 1) * dx + delta_x
                Y = (j - 1) * dy
                GRID(ndid, X, Y, 0.0)
            Next
        Next
    Next
    ndmax = ndid

End Sub
Sub ElRevEntRef(ByVal ndmax As Integer, ByRef elmax As Integer, ByRef
ndelmax As Integer)

    Dim i, j, elid, nd1, nd2, nd3, nd4, k As Integer
    Coment("elementos do revestimento entre reforçadores")

    elid = elmax

    For i = 1 To n_ref - 1
        For j = 1 To nn1_y - 1
            elid = elid + 1
            nd1 = (i - 1) * nn1_y * nn1_x + j * nn1_x
            nd2 = ndelmax + (i - 1) * nn1_y * (nn2_x - 2) + (j - 1) *
(nn2_x - 2) + 1
            nd3 = nd2 + nn2_x - 2
            nd4 = nd1 + nn1_x
            CQUAD4(elid, 1, nd1, nd2, nd3, nd4)
            For k = 1 To nn2_x - 2 - 1
                elid = elid + 1
                nd1 = ndelmax + (i - 1) * nn1_y * (nn2_x - 2) + (j -
1) * (nn2_x - 2) + k
                nd2 = ndelmax + (i - 1) * nn1_y * (nn2_x - 2) + (j -
1) * (nn2_x - 2) + k + 1
                nd3 = nd2 + nn2_x - 2
                nd4 = nd1 + nn2_x - 2
                CQUAD4(elid, 1, nd1, nd2, nd3, nd4)
            Next
            elid = elid + 1
            nd1 = ndelmax + (i - 1) * nn1_y * (nn2_x - 2) + (j - 1) *
(nn2_x - 2) + k
            nd2 = i * nn1_y * nn1_x + (j - 1) * nn1_x + 1
            nd3 = nd2 + nn1_x
            nd4 = nd1 + nn2_x - 2
            CQUAD4(elid, 1, nd1, nd2, nd3, nd4)
        Next
    Next

    elmax = elid
    ndelmax = ndmax

End Sub
Sub NdAlmaRef(ByRef ndmax As Integer)

```

```

Dim i, j, k, ndid As Integer
Dim dy, dz, delta_x, X, Y, Z As Double
Coment("nós da alma dos reforçadores")

ndid = ndmax

dy = a / (nn1_y - 1)
dz = b_alma / (nn1_x - 1)
For i = 1 To n_ref
    For j = 1 To nn1_y
        delta_x = (b - b_aba) * (i - 1) / (n_ref - 1)
        For k = 2 To nn1_x
            ndid = ndid + 1
            X = b_aba + delta_x
            Y = (j - 1) * dy
            Z = (k - 1) * dz + 0.5 * (h + h_aba)
            GRID(ndid, X, Y, Z)
        Next
    Next
Next

ndmax = ndid

End Sub
Sub ElAlmaRef(ByVal ndmax As Integer, ByRef elmax As Integer, ByRef
ndelmax As Integer)

Dim i, j, elid, nd1, nd2, nd3, nd4, k As Integer
Coment("elementos da alma e da flange reforçadores")

elid = elmax

For i = 1 To n_ref
    For j = 1 To nn1_y - 1
        ' elemento da alma
        elid = elid + 1
        nd1 = (n_ref + i - 1) * nn1_y * nn1_x + j * nn1_x
        nd2 = ndelmax + (i - 1) * nn1_y * (nn1_x - 1) + (j - 1) *
(nn1_x - 1) + 1
        nd3 = nd2 + nn1_x - 1
        nd4 = nd1 + nn1_x
        CQUAD4(elid, 3, nd1, nd2, nd3, nd4)
        For k = 1 To nn1_x - 2
            elid = elid + 1
            nd1 = ndelmax + (i - 1) * nn1_y * (nn1_x - 1) + (j -
1) * (nn1_x - 1) + k
            nd2 = ndelmax + (i - 1) * nn1_y * (nn1_x - 1) + (j -
1) * (nn1_x - 1) + k + 1
            nd3 = nd2 + nn1_x - 1
            nd4 = nd1 + nn1_x - 1
            CQUAD4(elid, 3, nd1, nd2, nd3, nd4)
        Next
        ' elemento da flange
        elid = elid + 1
        CBAR(elid, 4, nd2, nd3)
    Next
Next

```

```

    elmax = elid
    ndelmax = ndmax

End Sub
Sub CntEntRef()

    Dim i, j, ndid As Integer
    Coment("contorno/carregamento dos nós do revestimento entre
    reforçadores")

    For i = 1 To n_ref - 1
        For j = 1 To nn2_x - 2
            ' borda y = 0
            ndid = 2 * n_ref * nn1_x * nn1_y + (nn2_x - 2) * nn1_y *
(i - 1) + j
            SPC(1, ndid, 35)
            FORCE(1, ndid, sigentref)
            ' borda y = a
            ndid = ndid + (nn2_x - 2) * (nn1_y - 1)
            SPC(1, ndid, 35)
            FORCE(1, ndid, -sigentref)
        Next
    Next

End Sub
Sub CntSobRef()

    Dim i, j, ndid As Integer
    Coment("contorno/carregamento dos nós do revestimento sob
    reforçadores")

    For i = 1 To n_ref
        For j = 1 To nn1_x
            ' borda y = 0
            ndid = nn1_x * nn1_y * (i - 1) + j
            SPC(1, ndid, 35)
            If (i = 1 And j = 1) Or (i = n_ref And j = nn1_x) Then
                FORCE(1, ndid, 0.5 * sigsobref)
            Else
                If j = 1 Or j = nn1_x Then
                    FORCE(1, ndid, 0.5 * (sigsobref + sigentref))
                Else
                    FORCE(1, ndid, sigsobref)
                End If
            End If
            ' borda y = a
            ndid = ndid + nn1_x * (nn1_y - 1)
            SPC(1, ndid, 35)
            If (i = 1 And j = 1) Or (i = n_ref And j = nn1_x) Then
                FORCE(1, ndid, -0.5 * sigsobref)
            Else
                If j = 1 Or j = nn1_x Then
                    FORCE(1, ndid, -0.5 * (sigsobref + sigentref))
                Else
                    FORCE(1, ndid, -sigsobref)
                End If
            End If
        Next
    Next

```

```

        End If
    Next
Next
End Sub
Sub CntRef()

    Dim i, j, ndid As Integer
    Coment("contorno/carregamento dos nós dos reforçadores")

    For i = 0 To n_ref - 1

        ' borda y = 0
        ' aba
        For j = 1 To nn1_x - 2
            ndid = nn1_x * nn1_y * n_ref + 1 + j + nn1_x * nn1_y * i
            FORCE(1, ndid, sigaba)
        Next
        ndid = nn1_x * nn1_y * n_ref + 1 + nn1_x * nn1_y * i
        FORCE(1, ndid, 0.5 * sigaba)
        ' alma/aba
        ndid = nn1_x * nn1_y * n_ref + nn1_x + nn1_x * nn1_y * i
        FORCE(1, ndid, 0.5 * (sigaba + sigalma))
        ' alma
        For j = 1 To nn1_x - 2
            ndid = nn1_x * nn1_y * n_ref * 2 + (nn2_x - 2) * nn1_y *
(n_ref - 1) + j + (nn1_x - 1) * nn1_y * i
            FORCE(1, ndid, sigalma)
        Next
        ndid = nn1_x * nn1_y * n_ref * 2 + (nn2_x - 2) * nn1_y *
(n_ref - 1) + (nn1_x - 1) * nn1_y * i + (nn1_x - 1)
        FORCE(1, ndid, 0.5 * sigalma + sigflange)

        ' borda y = a
        ' aba
        For j = 1 To nn1_x - 2
            ndid = nn1_x * nn1_y * n_ref + 1 + j + nn1_x * nn1_y * (i
+ 1) - nn1_x
            FORCE(1, ndid, -sigaba)
        Next
        ndid = nn1_x * nn1_y * n_ref + nn1_x * nn1_y * (i + 1) -
(nn1_x - 1)
        FORCE(1, ndid, -0.5 * sigaba)
        ' alma/aba
        ndid = nn1_x * nn1_y * n_ref + nn1_x * nn1_y * (i + 1)
        FORCE(1, ndid, -0.5 * (sigaba + sigalma))
        ' alma
        For j = 1 To nn1_x - 2
            ndid = nn1_x * nn1_y * n_ref * 2 + (nn2_x - 2) * nn1_y *
(n_ref - 1) + j + (nn1_x - 1) * nn1_y * (i + 1) - (nn1_x - 1)
            FORCE(1, ndid, -sigalma)
        Next
        ndid = nn1_x * nn1_y * n_ref * 2 + (nn2_x - 2) * nn1_y *
(n_ref - 1) + (nn1_x - 1) * nn1_y * (i + 1)
        FORCE(1, ndid, -0.5 * sigalma - sigflange)

    Next

```

```

End Sub
Sub CntMCR()

    Dim ndid As Integer
    Coment("condições de contorno para se evitar modo de corpo
    rígido")

    ndid = 1
    SPC(1, ndid, 12)

    ndid = nn1_x * nn1_y * (n_ref - 1) + nn1_x
    SPC(1, ndid, 2)

End Sub
Sub ElCnxLFSW(ByVal ndmax As Integer, ByRef elmax As Integer, ByRef
ndelmax As Integer)

    Dim ndid, elid, ndref, i, nd1, nd2 As Integer
    Coment("elementos de conexão reforçador/revestimento para o
    processo FSW: contato linear")

    ndid = ndmax
    elid = elmax

    ndid = ndid + 1
    ndref = (nn1_x - 1) / 2 + 1
    For i = 1 To n_ref * nn1_y * nn1_x

        nd1 = i
        nd2 = n_ref * nn1_y * nn1_x + i

        If CheckBoxL1C3.Checked = True Then
            If (i <> ndref) And (i <> ndref - 1) And (i <> ndref + 1)
Then
                ' contato linear
                SPOINT(ndid, ndid + 1)
                SUPPORT(ndid)
                SPC(2, ndid + 1, 0)
                MPC(2, nd2, 3, -1, nd1, 3, 1, ndid, 0, 1, ndid + 1,
0, -1)
                ndid = ndid + 2
            ElseIf (i = ndref - 1) Or (i = ndref) Or (i = ndref + 1)
Then
                ' elemento rígido
                elid = elid + 1
                RBE2(elid, nd1, 123, nd2)
                If i = ndref + 1 Then ndref = ndref + nn1_x
            End If
        End If

        If CheckBoxL1C3.Checked = False Then
            If i <> ndref Then
                ' contato linear
                SPOINT(ndid, ndid + 1)
                SUPPORT(ndid)
                SPC(2, ndid + 1, 0)
            End If
        End If
    Next i
End Sub

```

```

0, -1)          MPC(2, nd2, 3, -1, nd1, 3, 1, ndid, 0, 1, ndid + 1,
                ndid = ndid + 2
                ElseIf i = ndref Then
                    ' elemento rígido
                    elid = elid + 1
                    RBE2(elid, nd1, 123, nd2)
                    ndref = ndref + nn1_x
                End If
            End If

        Next

        elmax = elid
        ndelmax = ndmax

    End Sub
    Sub ElCnxLReb(ByVal ndmax As Integer, ByRef elmax As Integer, ByRef
    ndelmax As Integer)

        Dim ndid, elid, ndref, ndref_reb, ref, i, nd1, nd2 As Integer
        Coment("elementos de conexão reforçador/revestimento por meio de
        rebites: contato linear")

        ndid = ndmax
        elid = elmax

        ndid = ndmax + 1
        ndref = (nn1_x - 1) / 2 + 1
        ndref_reb = (nn1_x - 1) / 2 + 1 + nnreb * nn1_x / 2
        ref = 1
        For i = 1 To n_ref * nn1_y * nn1_x

            nd1 = i
            nd2 = n_ref * nn1_y * nn1_x + i

            If i <> ndref Then
                If i <> ndref_reb Then
                    ' contato linear
                    SPOINT(ndid, ndid + 1)
                    SUPORT(ndid)
                    SPC(2, ndid + 1, 0)
                    MPC(2, nd2, 3, -1, nd1, 3, 1, ndid, 0, 1, ndid + 1,
0, -1)
                    ndid = ndid + 2
                Else
                    ' elemento de mola transversal
                    elid = elid + 1
                    CELAS2(elid, rig_tr, nd1, 1, nd2, 1)
                    ' elemento de mola transversal
                    elid = elid + 1
                    CELAS2(elid, rig_tr, nd1, 2, nd2, 2)
                    ' elemento de mola axial
                    elid = elid + 1
                    CELAS2(elid, rig_ax, nd1, 3, nd2, 3)
                    ndref_reb = ndref_reb + nnreb * nn1_x
                End If
            End If
        Next
    End Sub

```



```

ElseIf i = ndref Then
    ' elemento rígido
    elid = elid + 1
    RBE2(elid, nd1, 123, nd2)
    ndref = nn1_x * nn1_y * ref - (nn1_x - 1) / 2
End If

If i = nn1_x * nn1_y * ref Then
    ndref = ndref + nn1_x
    ndref_reb = (nn1_x - 1) / 2 + 1 + nnreb * nn1_x / 2 +
nn1_x * nn1_y * ref
    ref = ref + 1
End If

Next

elmax = elid
ndelmax = ndmax

End Sub
Private Sub ButtonDAT_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles ButtonDAT.Click

    Dim dados_OK As Boolean = True, arq_OK As Boolean = False
    Dim ndmax As Integer = 0, elmax As Integer = 0, ndelmax As
Integer = 0

    Dados(dados_OK, arq_OK)

    If dados_OK And arq_OK Then

        ' arquivo de saída do BULKDATA
        fs = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
        arq = fs.CreateTextFile(dir_name & arq_name, True)

        ' inicialização das variáveis intermediárias
        Var()
        ' inicialização do BULKDATA
        Ini()
        ' definição dos materiais
        If gap_type = 0 Then
            arq.WriteLine("PARAM,CDITER,50")
            arq.WriteLine("PARAM,CDPCH,NO")
            arq.WriteLine("PARAM,CDPRT,YES")
            arq.WriteLine("SPCADD,20,1,2")
        End If
        Mat()
        ' definição das propriedades
        Prop()
        ' nós do revestimento sob reforçadores
        NdRevSobRef(ndmax)
        ' elementos do revestimento sob reforçadores
        ElRevSobRef(ndmax, elmax, ndelmax)
        ' nós da aba dos reforçadores
        NdAbaRef(ndmax)
        ' elementos da aba dos reforçadores

```

```

    ElAbaRef(ndmax, elmax, ndelmax)
    If gap_type = 1 Then
        If cnx_type = "FSW" Then
            ' elementos de conexão reforçador/revestimento para o
            processo FSW: contato não linear
            ElCnxNLFSW(ndmax, elmax, ndelmax)
        Else
            ' elementos de conexão reforçador/revestimento por
            meio de rebites: contato não linear
            ElCnxNLReb(ndmax, elmax, ndelmax)
        End If
    End If

    ' nós do revestimento entre reforçadores
    NdRevEntRef(ndmax)
    ' elementos do revestimento entre reforçadores
    ElRevEntRef(ndmax, elmax, ndelmax)
    ' nós da alma dos reforçadores
    NdAlmaRef(ndmax)
    ' elementos da alma e da flange dos reforçadores
    ElAlmaRef(ndmax, elmax, ndelmax)
    ' contorno/carregamento dos nós do revestimento entre
    reforçadores
    CntEntRef()
    ' contorno/carregamento dos nós do revestimento sob
    reforçadores
    CntSobRef()
    'contorno/carregamento dos nós dos reforçadores
    CntRef()
    ' condições de contorno para se evitar modo de corpo rígido
    CntMCR()

    If gap_type = 0 Then
        If cnx_type = "FSW" Then
            ' elementos de conexão reforçador/revestimento para o
            processo FSW: contato linear
            ElCnxLFSW(ndmax, elmax, ndelmax)
        Else
            ' elementos de conexão reforçador/revestimento por
            meio de rebites: contato linear
            ElCnxLReb(ndmax, elmax, ndelmax)
        End If
    End If

    arq.Close()
    MsgBox.Show("Arq" & " " & arq_name & ": " & "GERADO",
    "PToll v2", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.None)
End If

End Sub
Private Sub CheckBoxL2C1_CheckedChanged(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
CheckBoxL2C1.CheckedChanged

    If CheckBoxL2C1.Checked Then CheckBoxL1C1.Checked = False
    Hint.Text = ""

```

```
End Sub
Private Sub CheckBoxL1C1_CheckedChanged(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
CheckBoxL1C1.CheckedChanged
    If CheckBoxL1C1.Checked Then CheckBoxL2C1.Checked = False
    Hint.Text = ""
End Sub
Private Sub ButtonDIR_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles ButtonDIR.Click

    If Comentario.ShowDialog() = DialogResult.OK Then LabelDIR.Text =
Comentario.SelectedPath

End Sub
Private Sub BoxL1C1_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL1C1.GotFocus

    Hint.Text = "Comprimento do painel"

End Sub
Private Sub BoxL2C1_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL2C1.GotFocus

    Hint.Text = "Largura do painel"

End Sub
Private Sub BoxL1C2_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL1C2.GotFocus

    Hint.Text = "Espessura do revestimento"

End Sub
Private Sub BoxL1C3_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL1C3.GotFocus

    Hint.Text = "Módulo de Young do revestimento"

End Sub
Private Sub BoxL2C3_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL2C3.GotFocus

    Hint.Text = "Coeficiente de Poisson do revestimento"

End Sub
Private Sub BoxL3C1_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL3C1.GotFocus

    Hint.Text = "Dimensão A do reforçador"

End Sub
Private Sub BoxL4C1_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL4C1.GotFocus

    Hint.Text = "Dimensão B do reforçador"

End Sub
```

```
Private Sub BoxL5C1_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL5C1.GotFocus

    Hint.Text = "Dimensão C do reforçador"

End Sub
Private Sub BoxL3C2_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL3C2.GotFocus

    Hint.Text = "Dimensão t_A do reforçador"

End Sub
Private Sub BoxL4C2_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL4C2.GotFocus

    Hint.Text = "Dimensão t_B do reforçador"

End Sub
Private Sub BoxL5C2_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL5C2.GotFocus

    Hint.Text = "Dimensão t_C do reforçador"

End Sub
Private Sub BoxL3C3_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL3C3.GotFocus

    Hint.Text = "Módulo de Young do reforçador"

End Sub
Private Sub BoxL4C3_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL4C3.GotFocus

    Hint.Text = "Coeficiente de Poisson do reforçador"

End Sub
Private Sub BoxL5C3_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL5C3.GotFocus

    Hint.Text = "Número de reforçadores do painel"

End Sub
Private Sub BoxL6C1_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL6C1.GotFocus

    Hint.Text = "Diâmetro do rebite"

End Sub
Private Sub BoxL6C2_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL6C2.GotFocus

    Hint.Text = "Espaçamento entre rebites em termos do diâmetro"

End Sub
Private Sub BoxL6C3_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL6C3.GotFocus
```

```
Hint.Text = "Módulo de Young do rebite"

End Sub
Private Sub BoxL7C3_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL7C3.GotFocus

    Hint.Text = "Número de elementos da flange"

End Sub
Private Sub BoxL8C3_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL8C3.GotFocus

    Hint.Text = "Número de elementos entre reforçadores"

End Sub
Private Sub BoxL9C3_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL9C3.GotFocus

    If CheckBoxL1C2.Checked Then
        Hint.Text = "Número de elementos ao longo do painel"
    Else
        Hint.Text = "Número de elementos entre rebites"
    End If

End Sub
Private Sub BoxL10C3_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL10C3.GotFocus

    Hint.Text = "Largura da junta de solda em função da espessura da
flange (1, 2 ou 3)"

End Sub
Private Sub BoxL11C3_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL11C3.GotFocus

    Hint.Text = "Fator de de degradação kz do material da zona de
solda"

End Sub
Private Sub BoxL12C3_GotFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BoxL12C3.GotFocus

    Hint.Text = "Fator de carga do reforçador"

End Sub
Private Sub CheckBoxL1C2_CheckedChanged(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
CheckBoxL1C2.CheckedChanged

    If CheckBoxL1C2.Checked Then

        CheckBoxL2C2.Checked = False
        LabelREB.Enabled = False
        LabelL6C1.Enabled = False
        LabelL6C1i.Enabled = False
        BoxL6C1.Enabled = False
        LabelL6C2.Enabled = False

    End If

End Sub
```

```

        BoxL6C2.Enabled = False
        LabelL6C3.Enabled = False
        LabelL6C3i.Enabled = False
        BoxL6C3.Enabled = False
        LabelL9C3.Text = "EL ao longo do painel"
        CheckBoxL1C3.Enabled = True
    End If
    Hint.Text = ""

End Sub

Private Sub CheckBoxL2C2_CheckedChanged(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
CheckBoxL2C2.CheckedChanged

    If CheckBoxL2C2.Checked Then

        CheckBoxL1C2.Checked = False
        LabelREB.Enabled = True
        LabelL6C1.Enabled = True
        LabelL6C1i.Enabled = True
        BoxL6C1.Enabled = True
        LabelL6C2.Enabled = True
        BoxL6C2.Enabled = True
        LabelL6C3.Enabled = True
        LabelL6C3i.Enabled = True
        BoxL6C3.Enabled = True
        CheckBoxL1C3.Enabled = False
        CheckBoxL1C3.Checked = False

        LabelL9C3.Text = "EL entre rebites"
    End If
    Hint.Text = ""

End Sub

Private Sub CheckBoxL3C1_CheckedChanged(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
CheckBoxL1C3.CheckedChanged
    If CheckBoxL1C3.Checked Then
        LabelL10C3.Enabled = True
        BoxL10C3.Enabled = True
        LabelL11C3.Enabled = True
        BoxL11C3.Enabled = True
    Else
        LabelL10C3.Enabled = False
        BoxL10C3.Enabled = False
        LabelL11C3.Enabled = False
        BoxL11C3.Enabled = False
    End If
    Hint.Text = ""
End Sub
End Class

```

Módulo das Funções:

Option Explicit On

Module Funções

```

Dim m As String
Sub Coment(ByVal Texto As String)

    m = "$"
    arq.WriteLine(m)
    m = "$ " & Texto
    arq.WriteLine(m)
    m = "$"
    arq.WriteLine(m)

End Sub
Sub PSHELL(ByVal PID As Integer, ByVal MID As Integer, ByVal T As Double)

    m = "PSHELL" & "," & Trim(Str(PID)) & "," & Trim(Str(MID)) & "," &
    & Sci(T) & "," & Trim(Str(MID)) & "," & _
    " " & "," & " " & "," & " " & "," & Sci(0)
    arq.WriteLine(m)

End Sub
Sub MAT1(ByVal MID As Integer, ByVal E As Double, ByVal NU As Double)

    m = "MAT1" & "," & Trim(Str(MID)) & "," & Sci(E) & "," & " " &
    " " & Sci(NU) & "," & _
    Sci(0) & "," & Sci(0) & "," & Sci(0)
    arq.WriteLine(m)

End Sub
Sub PBAR(ByVal PID As Integer, ByVal MID As Integer, ByVal A As Double, ByVal I1 As Double, ByVal I2 As Double, _
    ByVal J As Double, ByVal h_flange As Double, ByVal b_flange As Double)

    m = "PBAR" & "," & Trim(Str(PID)) & "," & Trim(Str(MID)) & "," &
    Sci(A) & "," & Sci(I1) & "," & _
    Sci(I2) & "," & Sci(J) & "," & Sci(0) & " " & "+"
    arq.WriteLine(m)
    m = "+," & Sci(-0.5 * h_flange) & "," & Sci(0.5 * b_flange) & "," &
    & Sci(-0.5 * h_flange) & "," & Sci(-0.5 * b_flange) & "," & _
    Sci(0.5 * h_flange) & "," & Sci(-0.5 * b_flange) & "," &
    Sci(0.5 * h_flange) & "," & Sci(0.5 * b_flange) & "," & "+"
    arq.WriteLine(m)
    m = "+," & " " & "," & " " & "," & Sci(0)
    arq.WriteLine(m)

End Sub
Sub PGAP(ByVal PID As Integer, ByVal KA As Double)

    m = "PGAP" & "," & Trim(Str(PID)) & "," & Sci(0) & "," & Sci(0) &
    " " & Sci(KA) & "," & _
    Sci(0) & "," & Sci(0) & "," & Sci(0) & "," & Sci(0) & "+"
    arq.WriteLine(m)
    m = "+," & " " & "," & " " & "," & " "
    arq.WriteLine(m)

```

```

End Sub
Sub GRID(ByVal ID As Integer, ByVal X1 As Double, ByVal X2 As Double,
ByVal X3 As Double)

    m = "GRID" & "," & Trim(Str(ID)) & "," & Trim(Str(0)) & "," &
Sci(X1) & "," & Sci(X2) & "," & _
    Sci(X3) & "," & Trim(Str(0))
    arq.WriteLine(m)

End Sub
Sub CQUAD4(ByVal EID As Integer, ByVal PID As Integer, ByVal G1 As
Integer, ByVal G2 As Integer, ByVal G3 As Integer, _
    ByVal G4 As Integer)

    m = "CQUAD4" & "," & Trim(Str(EID)) & "," & Trim(Str(PID)) & "," &
& Trim(Str(G1)) & "," & Trim(Str(G2)) & "," & _
    Trim(Str(G3)) & "," & Trim(Str(G4))
    arq.WriteLine(m)

End Sub
Sub CBAR(ByVal EID As Integer, ByVal PID As Integer, ByVal GA As
Integer, ByVal GB As Integer)

    m = "CBAR" & "," & Trim(Str(EID)) & "," & Trim(Str(PID)) & "," &
Trim(Str(GA)) & "," & Trim(Str(GB)) & "," & _
    Sci(0) & "," & Sci(0) & "," & Sci(1)
    arq.WriteLine(m)

End Sub
Sub CGAP(ByVal EID As Integer, ByVal PID As Integer, ByVal GA As
Integer, ByVal GB As Integer)

    m = "CGAP" & "," & Trim(Str(EID)) & "," & Trim(Str(PID)) & "," &
Trim(Str(GA)) & "," & Trim(Str(GB)) & "," & _
    Sci(1) & "," & Sci(0) & "," & Sci(0)
    arq.WriteLine(m)

End Sub
Sub RBE2(ByVal EID As Integer, ByVal GN As Integer, ByVal CM As
Integer, ByVal GM1 As Integer)

    m = "RBE2" & "," & Trim(Str(EID)) & "," & Trim(Str(GN)) & "," &
Trim(Str(CM)) & "," & Trim(Str(GM1))
    arq.WriteLine(m)

End Sub
Sub Ini()

    m = "SOL 105"
    arq.WriteLine(m)
    m = "NASTRAN SYSTEM(151) = 1"
    arq.WriteLine(m)
    m = "CEND"
    arq.WriteLine(m)
    m = "ECHO = NONE"
    arq.WriteLine(m)

```



```

If gap_type = 0 Then
    m = "SPC = 20"
    arq.WriteLine(m)
    m = "MPC = 2"
    arq.WriteLine(m)
End If
If gap_type = 1 Then
    m = "SPC = 1"
    arq.WriteLine(m)
End If

m = "SUBCASE 1"
arq.WriteLine(m)
m = "    LOAD = 1"
arq.WriteLine(m)
m = "    DISPLACEMENT(SORT1,REAL)=ALL"
arq.WriteLine(m)
m = "SUBCASE 2"
arq.WriteLine(m)
m = "    METHOD = 1"
arq.WriteLine(m)
m = "    LOAD = 1"
arq.WriteLine(m)
m = "    VECTOR(SORT1,REAL)=ALL"
arq.WriteLine(m)
m = "BEGIN BULK"
arq.WriteLine(m)
m = "EIGRL,1,0.001,,1,0,,,MAX"
arq.WriteLine(m)
m = "PARAM,POST,-1"
arq.WriteLine(m)
m = "PARAM,OGEOM,NO"
arq.WriteLine(m)
m = "PARAM,AUTOSPC,YES"
arq.WriteLine(m)
m = "PARAM,K6ROT,100."
arq.WriteLine(m)
m = "PARAM,MAXRATIO,1.E+8"
arq.WriteLine(m)
m = "PARAM,GRDPNT,0"
arq.WriteLine(m)

m = "CORD2C" & "," & Trim(Str(1)) & "," & Trim(Str(0)) & "," &
Sci(0) & "," & Sci(0) & "," & _
    Sci(0) & "," & Sci(0) & "," & Sci(0) & "," & Sci(1) & "," & "+"
arq.WriteLine(m)
m = "+," & Sci(1) & "," & Sci(0) & "," & Sci(1)
arq.WriteLine(m)
m = "CORD2S" & "," & Trim(Str(2)) & "," & Trim(Str(0)) & "," &
Sci(0) & "," & Sci(0) & "," & _
    Sci(0) & "," & Sci(0) & "," & Sci(0) & "," & Sci(1) & "," & "+"
arq.WriteLine(m)
m = "+," & Sci(1) & "," & Sci(0) & "," & Sci(1)
arq.WriteLine(m)

End Sub

```

```

Sub SPC(ByVal SID As Integer, ByVal G1 As Integer, ByVal C1 As Integer)

    m = "SPC" & "," & Trim(Str(SID)) & "," & Trim(Str(G1)) & "," & Trim(Str(C1)) & "," & Sci1d(0)
    arq.WriteLine(m)

End Sub
Sub FORCE(ByVal SID As Integer, ByVal G As Integer, ByVal N2 As Double)

    m = "FORCE" & "," & Trim(Str(SID)) & "," & Trim(Str(G)) & "," & Trim(Str(0)) & "," & Sci(1) & "," & _
        Sci(0) & "," & Sci(N2) & "," & Sci(0)
    arq.WriteLine(m)

End Sub
Sub SPOINT(ByVal ID1 As Integer, ByVal ID2 As Integer)

    m = "SPOINT" & "," & Trim(Str(ID1)) & "," & Trim(Str(ID2))
    arq.WriteLine(m)

End Sub
Sub SUPORT(ByVal ID1 As Integer)

    m = "SUPORT" & "," & Trim(Str(ID1)) & "," & Trim(Str(0))
    arq.WriteLine(m)

End Sub
Sub MPC(ByVal SID As Integer, ByVal G1 As Integer, ByVal C1 As Integer, ByVal A1 As Integer, ByVal G2 As Integer, _
        ByVal C2 As Integer, ByVal A2 As Integer, ByVal G3 As Integer, ByVal C3 As Integer, ByVal A3 As Integer, _
        ByVal G4 As Integer, ByVal C4 As Integer, ByVal A4 As Integer)

    m = "MPC" & "," & Trim(Str(SID)) & "," & Trim(Str(G1)) & "," & Trim(Str(C1)) & "," & Sci1d(A1) & "," & _
        Trim(Str(G2)) & "," & Trim(Str(C2)) & "," & Sci1d(A2) & "," & " " & "+"
    arq.WriteLine(m)
    m = "+," & " " & "," & Trim(Str(G3)) & "," & Trim(Str(C3)) & "," & _
        & Sci1d(A3) & "," & _
        Trim(Str(G4)) & "," & Trim(Str(C4)) & "," & Sci1d(A4)
    arq.WriteLine(m)

End Sub
Sub CELAS2(ByVal EID As Integer, ByVal K As Double, ByVal G1 As Integer, ByVal C1 As Integer, ByVal G2 As Integer, _
        ByVal C2 As Integer)

    m = "CELAS2" & "," & Trim(Str(EID)) & "," & Sci2d(K) & "," & Trim(Str(G1)) & "," & Trim(Str(C1)) & "," & _
        Trim(Str(G2)) & "," & Trim(Str(C2))
    arq.WriteLine(m)

End Sub

```

```
Public Function Sci(ByVal numero As Double) As String
    m = Format(numero, "0.0000E+0")
    Sci = Trim(m)
End Function
Public Function Sci1d(ByVal numero As Double) As String
    m = Format(numero, "0.0")
    Sci1d = Trim(m)
End Function
Public Function Sci2d(ByVal numero As Double) As String
    m = Format(numero, "0.00E+0")
    Sci2d = Trim(m)
End Function
End Module
```

Referências

BAŽANT, Z. P., and CEDOLIN, L., 2003, *Stability of structures: elastic, inelastic, fracture, and damage theories*, Dover, Mineola.

BEDAIR, O. K., 1998, “A contribution to the stability of stiffened plates under uniform compression”, *Comput. Struct.*, vol. 66, pp. 535–570.

BISAGNI, C., and VESCOVINI, R., 2009, “Analytical formulation for local buckling and post-buckling analysis of stiffened laminated panels”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 47, pp. 318–334.

BUERMANN, P., ROLFES, R., TESSMER, J., and SCHAGERL, M., 2006, “A semi-analytical model for local post-buckling analysis of stringer- and frame-stiffened cylindrical panels”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 44, pp. 102–114.

CAMELO, F. F., 2009, *Uma solução analítica para a flambagem local do revestimento de asas*, Trabalho de Graduação, ITA, São José dos Campos.

CRISFIELD, M. A., 1991, *Non-linear finite element analysis of solids and structures*, volume I, John Wiley, New York.

FUJIKUBO, M., and YAO, T., 1999, “Elastic local buckling strength of stiffened plate considering plate/stiffener interaction and welding residual stress”, *Mar. Struct.*, vol. 12, pp. 543–564.

GALAMBOS, T. V., 1998, *Guide to stability design criteria for metal structures*, John Wiley, New York.

GUERRA, M., SCHMIDT, C., MCCLURE, J. C., MURR, L. E., and NUNES, A. C., 2003, “Flow patterns during friction stir welding”, *Materials Characterization*, vol. 49, pp. 95–101.

- HOFFMAN, E. K., HAFLEY, R. A., WAGNER, J. A., and JEGLEY, D. C., 2002, *Compression buckling behavior of large-scale friction stir welded and riveted 2090-T83 Al-Li alloy skin-stiffener panels*, TM-2002-211770 Technical Report, NASA, Langley Research Center, Hampton, Virginia.
- MSC, 2008, *Quick Reference Guide*, MSC Software Corporation.
- HUGHES, O. F., GHOSH, B., and CHEN Y., 2004, “Improved prediction of simultaneous local and overall buckling of stiffened panels”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 42, pp. 827-856.
- LIU, H. J., FUJII, H., MAEDA, M., and NOGI, K., 2003, “Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 142, pp. 692–696.
- MURPHY, A., MCCUNE, W., QUINN, D., and PRICE, M., 2007, “The characterisation of friction stir welding process effects on stiffened panel buckling performance”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 45, pp. 339-351.
- PAIK, K. J., and LEE, M. S., 2005, “A semi-analytical method for the elastic–plastic large deflection analysis of stiffened panels under combined biaxial compression/tension, biaxial in-plane bending, edge shear, and lateral pressure loads”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 43, pp. 375-410.
- SWIFT, T., 1979, *Fracture mechanics design methodology*, AGARD Lecture Series No. 97, Advisory Group for Aerospace Research and Development.
- YOON, J. W., BRAY, G. H., VALENTE, R. A. F., and CHILDS, T. E. R., 2009, “Buckling analysis for an integrally stiffened panel structure with a friction stir weld”, *Thin-Walled Struct.*, vol. 47, pp. 1608-1622.
- YVES, F. B. S., 2009, *Flambagem global de painéis reforçados*, Tese de Mestrado, ITA, São José dos Campos.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 24 de novembro de 2010	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-128/2010	4. N° DE PÁGINAS 77
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Um estudo comparativo entre painéis reforçados planos: ligação rebitada versus FSW			
6. AUTOR(ES): Hugo Holz Ruela			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Painel reforçado, solda por fricção, flambagem			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Soldagem por atrito; Rebitagem; Placas reforçadas; Flambagem; Método de elementos finitos; Análise estrutural; Engenharia mecânica			
10. APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Prof. Francisco Alex Correia Monteiro. Publicado em 2010.			
11. RESUMO: A introdução do método de solda por fricção (FSW) como um processo alternativo para a substituição dos tradicionais rebites em estruturas primárias de aeronaves tem potencial para a redução dos custos de fabricação e do peso estrutural. Métodos de análise estão atualmente em desenvolvimento para esse novos painéis. Nesse contexto, o presente trabalho visa identificar as principais diferenças entre a flambagem local de painéis reforçados com ligação FSW e com ligação rebitada. Diversos painéis reforçados com diferentes números de reforçadores e diferentes tipos de ligação, sujeito à compressão uniforme, são numericamente testados utilizando modelos de elementos finitos. Os resultados obtidos são comparados com resultados analíticos simples atualmente disponíveis para o projeto. Identifica-se, numa primeira aproximação, as principais diferenças do comportamento crítico de painéis reforçados com ligações FSW e com ligações rebitadas			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () CONFIDENCIAL () SECRETO			