

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE AJUSTE DE MODELOS EM ESTÁTICA PARA IDENTIFICAÇÃO DA RIGIDEZ DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS DE PERFIS PULTRUDADOS

APPLICATION OF MODEL UPDATING TECHNIQUES IN STATICS TO THE IDENTIFICATION OF THE STIFFNESS OF BOLTED JOINTS IN PULTRUDED PROFILES

Jesiel Cunha

Faculdade de Eng. Civil, Universidade Federal de Uberlândia
Campus Santa Mônica, Uberlândia - MG, Brasil
jecunha@ufu.br

Emmanuel Foltête Nouredine Bouhaddi

LMARC/Université de Franche-Comté, Besançon, France
emmanuel.foltete@univ-fcomte.fr
nouredine.bouhaddi@univ-fcomte.fr

RESUMO

Identificou-se a rigidez de ligações parafusadas em perfis pultrudados utilizados em estruturas de construção civil. Aplicou-se a técnica de ajuste de modelos, com informações do comportamento estático da estrutura. O comportamento real das ligações em estruturas reticuladas é semi-rígido, de onde a necessidade da quantificação dos parâmetros de rigidez. Modificando-se as variáveis de concepção do modelo numérico (rigidezes da ligação), formulou-se um problema de identificação paramétrica. Do ponto de vista matemático, insere-se no contexto de um problema de otimização, com a busca do mínimo de uma função custo, formada pelos resíduos das deformadas estáticas, que expressam a distância entre a resposta estática do modelo e da estrutura real. Os resultados obtidos a partir de ensaios experimentais mostraram a eficiência da técnica proposta.

Palavras-chave: materiais compostos, perfis pultrudados, ligações parafusadas, otimização, deformada estática.

ABSTRACT

Model updating techniques with static data have been applied to identifying the stiffness of bolted joints for pultruded profiles used in civil construction. The real behavior of the joints in pultruded framed structures is semi-rigid, which will influence the mechanical response of the structure as a whole. By modifying the design variables of the numerical model (stiffnesses joints), a problem of parametric identification can be formulated. Unknown stiffnesses are identified by a technique of model updating from static tests, based on the minimization of the residuals of static deformed shape, which express the distance of the static response between theoretical model and real structure. Results obtained by experimental tests show the efficiency of the proposed technique.

Keywords: composite materials, pultruded profiles, bolted joints, optimization, static deformed shape.

1 - INTRODUÇÃO

Atualmente, uma das modalidades mais difundidas dos materiais compostos na engenharia civil são os perfis pultrudados em Plástico Reforçado por Fibras de Vidro (PRFV). Estes materiais apresentam elevadas relações rigidez/peso e resistência/peso, além de uma excelente resistência à corrosão. Um problema ainda pouco explorado em relação aos perfis pultrudados é o comportamento das ligações em estruturas reticuladas como pórticos e treliças. Trata-se de saber qual é o comportamento das ligações: rígido, semi-rígido ou rotulado. Na realidade, o comportamento de uma ligação é, por definição, semi-rígido.

A importância de considerar a ligação como semi-rígida está no fato de que ela pode ter uma forte influência no comportamento estático, dinâmico e de instabilidade das estruturas interligadas, o que afeta evidentemente o dimensionamento de peças como vigas, pilares e barras.

Existem diversos métodos de identificação das rigidezes de ligações de estruturas reticuladas. Elas são de natureza experimental e numérica, utilizam informações do comportamento estático ou dinâmico e abordam a geometria da ligação localmente, com modelagem detalhada dos elementos, ou globalmente, como uma caixa preta. Uma técnica relativamente recente é o ajuste de modelos a partir do comportamento estático e dinâmico da estrutura. Modificando-se as variáveis de concepção (rigidezes das ligações), pode-se formular um problema de identificação paramétrica. Do ponto de vista matemático, insere-se no contexto de um problema de otimização, com a busca do mínimo de uma função custo, formada pelos resíduos das saídas, que expressam a distância entre a resposta dinâmica/estática do modelo numérico e da estrutura real. Esta técnica de identificação é bastante interessante, pois pode ser aplicada em qualquer tipo de perfil e de ligação; é de implementação relativamente simples, sendo do tipo não-destrutiva; é bem adaptada ao

caráter de anisotropia dos materiais compostos; em relação a outros métodos de identificação a técnica apresenta a vantagem de simplificar consideravelmente os ensaios, pois várias propriedades distintas podem ser identificadas simultaneamente.

O objetivo deste trabalho é de identificar as rigidezes de ligações parafusadas de estruturas reticuladas formadas por perfis pultrudados. Identificou-se as rigidezes de translação e de rotação das ligações através da técnica de ajuste de modelos, com base no comportamento estático da estrutura. Os resultados obtidos a partir de ensaios experimentais mostraram a eficiência e a precisão da técnica proposta.

2 - OS PERFIS PULTRUDADOS

Obtidos pelo processo de pultrusão, os perfis pultrudados são formados por uma matriz polimérica e por reforços de fibra. A rigidez e a resistência das peças são função principalmente do tipo, da quantidade, da orientação e da posição dos reforços. Os perfis padrões em PRFV possuem uma matriz de resina poliéster isoftálica. Eles são em geral reforçados por quatro tipos de camadas: *continuous roving*, *continuous* (ou *chopped*) *strand mat* (csm), *stitched fabrics* (SF) e véu de superfície. A Figura 1 mostra esquematicamente o número e o posicionamento destas camadas na seção de um perfil pultrudado comercial padrão. Na alma do perfil as camadas estão empilhadas na posição vertical.

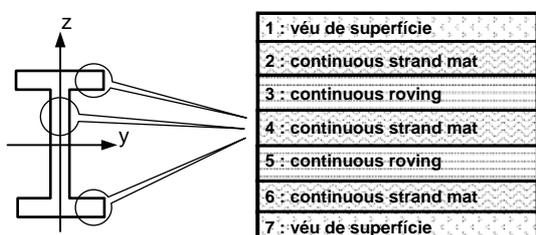


Figura 1 - Configuração típica da seção de um perfil pultrudado.

O *continuous roving* é o reforço unidirecional longitudinal do perfil, sendo o principal responsável pela resistência e rigidez da peça. Sua contribuição para a rigidez e resistência transversais é pequena.

Os *mats* são camadas com fios contínuos (*continuous strand mat*) ou curtos (*chopped strand mat*) distribuídos aleatoriamente no plano. Eles servem para atenuar a natureza anisotrópica do *continuous roving*, melhorando as propriedades transversais do perfil.

O *stitched fabrics* é formado pelo empilhamento de camadas unidirecionais com diferentes orientações. Além do reforço longitudinal, eles servem igualmente para melhorar as propriedades transversais do perfil.

Finalmente, para obter uma melhor resistência às intempéries e aos raios UV, os perfis pultrudados possuem os véus de superfície, que são formados por fibras curtas distribuídas aleatoriamente. Responsáveis pelo acabamento, os véus auxiliam também no controle da fissuração do perfil (DAVALOS, 1999; SONTI, 1992).

3 - COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS LIGAÇÕES

Utilizadas em estruturas reticuladas do tipo pórtico e treliça, as ligações desempenham um papel importante no comportamento mecânico global e local da estrutura (tensões, flechas, flambagem e vibração). Sabe-se que as condições das extremidades e dos nós dos elementos são determinantes no cálculo dos deslocamentos, dos esforços internos e por conseqüência, da ruptura das peças. Assim, o projeto e o dimensionamento de estruturas isostáticas e hiperestáticas devem considerar a influência do comportamento das ligações. A precisão dos cálculos no estado limite último e de utilização depende desta consideração.

Em termos de cálculo estrutural, a questão que se coloca em relação à condição de extremidade das barras, vigas e pilares é de saber qual é o comportamento da ligação: rígido ou flexível? Por facilidade de modelagem, observa-se na prática que os engenheiros calculistas supõem que a ligação ou é rígida ou é rotulada. No entanto, esta simplificação pode gerar estruturas que trabalham com apenas uma fração de sua resistência última, pois em certos casos o dimensionamento é definido pelo estado limite de utilização. Neste sentido, a consideração da rigidez das ligações no cálculo de estruturas formadas por perfis pultrudados é importante, pois podem ocorrer flechas significativas, conseqüência do baixo módulo de elasticidade destes materiais (TURVEY, 1997).

O conhecimento do comportamento real das ligações permite um dimensionamento mais preciso, evitando a utilização de coeficientes de segurança elevados. Vários estudos mostram que as ligações possuem um comportamento intermediário, chamado semi-rígido, conforme esquematizado na Figura 2.

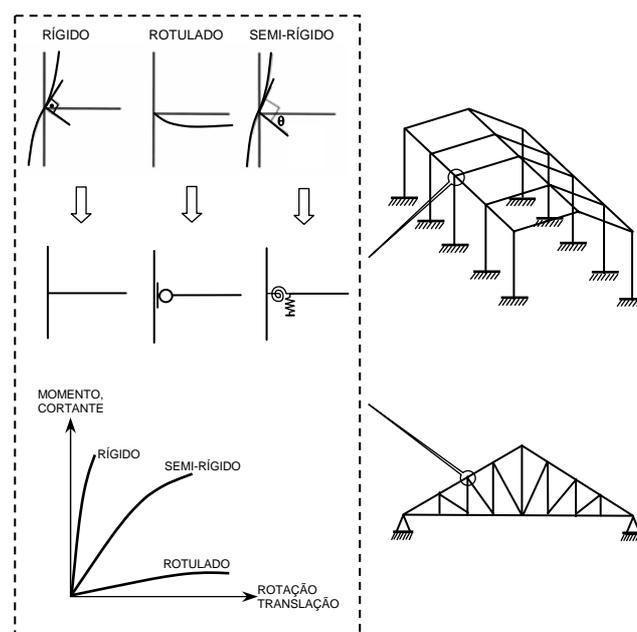


Figura 2 - Comportamento das ligações em estruturas reticuladas.

Para estruturas reticuladas pultrudadas, o comportamento mecânico das ligações é em geral mais

complexo do que em perfis de materiais convencionais. Isto é devido principalmente à anisotropia dos pultrudados. Os principais fatores que interferem no comportamento das ligações parafusadas em perfis pultrudados são (CAMANHO, 1997; OKUTAN, 2001): parâmetros dos materiais compostos (tipo e volume da resina e da fibra, orientação e seqüência de empilhamento das camadas); parâmetros geométricos (largura, espessura, diâmetro e distâncias das peças interligadas e dos furos); parâmetros dos parafusos (tipo, diâmetro, nível de aperto, folgas, características das arruelas); parâmetros de projeto (tipo de ligação, natureza e direção do carregamento); fenômenos diversos (atrito entre as partes e tensões residuais); condições ambientais (temperatura e umidade).

4 - IDENTIFICAÇÃO DE LIGAÇÕES SEMI-RÍGIDAS A PARTIR DO COMPORTAMENTO ESTÁTICO

Conforme já comentado, as ligações desempenham um papel importante no comportamento estático e dinâmico das estruturas. O conhecimento da rigidez das ligações torna-se assim uma necessidade para o correto dimensionamento das estruturas.

Enquanto as propriedades de massa e de rigidez dos membros estruturais (viga, pilar, barra, etc.) podem ser conhecidas simplesmente a partir das características geométricas, de massa e das constantes elásticas do material, as propriedades de rigidez e de amortecimento das ligações são mais difíceis de determinar. Existem na literatura diversos métodos de identificação da rigidez de ligações em estruturas de aço (WONG, 1995; ZHU, 1995) e estruturas de perfis pultrudados (TURVEY, 1998, 1999, 2000, 2002; MOTTRAM, 1997; HARTE, 2001). Estes métodos utilizam diversos dados experimentais, como as auto-soluções, as FRF's, as deformadas estáticas, etc. Existem também métodos alternativos, baseados apenas na modelagem numérica detalhada das ligações (HARTE, 2001).

Neste trabalho, a identificação da rigidez das ligações foi feita a partir de ensaios estáticos, utilizando-se os deslocamentos da estrutura. Em relação ao caso dinâmico, onde os modos de vibração e as frequências naturais são comumente utilizados, a extração dos deslocamentos no caso estático pode ser mais onerosa, em particular para estruturas com geometria complexa. Além disso, o número de pontos medidos é em geral limitado, restringindo-se às zonas acessíveis da estrutura. Assim, para garantir as condições de um problema super-determinado deve-se limitar o número de parâmetros a serem identificados, devido ao baixo número de pontos de medida. Por outro lado, as medidas efetuadas em estática podem ser exploradas diretamente. Não existe pré e/ou pós-tratamento dos ensaios, como é o caso em dinâmica. Finalmente, em estática não existe o problema de emparelhamento dos modos (BERRIET, 1995).

O algoritmo do ajuste de modelos em estática adotado pode ser chamado de *método de sensibilidade*. O processo é iterativo, devido a linearização da deformada

experimental nas vizinhanças da deformada calculada pelo modelo:

$$y^{(ex)} = y^{(a)} - \sum_{i=1}^p \frac{\partial y^{(a)}}{\partial k_i} dk_i$$

Desenvolvendo esta expressão, obtém-se (BERRIET, 1995):

$$y^{(ex)} = y^{(a)} - \sum_{i=1}^p k_i \Gamma^{(a)} K_i^{(a)} y^{(a)}$$

onde:

$y^{(ex)}$: deformada estática medida experimentalmente;

$y^{(a)}$: deformada estática calculada (modelo numérico);

$\Gamma^{(a)}$: matriz de flexibilidade do modelo numérico;

k_i : coeficientes de correção do modelo numérico (parâmetros a serem identificados);

$K_i^{(a)}$: matriz de rigidez do modelo numérico relativo aos p sub-domínios a serem corrigidos, re-atualizados a cada iteração j segundo:

$$K_i^{(a)(j)} = k_i^{(j-1)} K_i^{(a)(j-1)}$$

Pode-se reescrever esta equação dividindo-se vetores e matrizes segundo os graus de liberdade instrumentados e segundo os graus de liberdade relativos aos sub-domínios a serem corrigidos:

$$y_c^{(ex)} = y_c^{(a)} - \sum_{i=1}^p k_i \Gamma_{ca}^{(a)} K_{aa i}^{(a)} y_a^{(a)} \quad (1)$$

onde:

$y_c^{(a)} \in R^{c,1}$: sub-vetor da deformada estática do modelo nos c graus de liberdade instrumentados;

$y_a^{(a)} \in R^{a,1}$: sub-vetor da deformada estática do modelo nos a graus de liberdade correspondentes aos sub-domínios a serem corrigidos;

$\Gamma_{ca}^{(a)} \in R^{c,a}$: sub-matriz da matriz de flexibilidade, calculada nas linhas correspondentes aos graus de liberdade dos sensores e nas colunas correspondentes aos graus de liberdade dos sub-domínios a serem corrigidos;

$K_{aa i}^{(a)} \in R^{a,a}$: matrizes de rigidez dos sub-domínios a serem corrigidos.

As matrizes de flexibilidade e de rigidez devem ser recalculadas a cada iteração. A equação (1) pode ser escrita na seguinte forma abreviada:

$$\Delta y = S \Delta p \quad (2)$$

com:

$\Delta y = y_c^{(ex)} - y_c^{(a)}$: vetor dos resíduos das deformadas estáticas;

S: matriz de sensibilidade contendo os vetores $s_i = -\Gamma_{ca}^{(a)} K_{aa}^{(a)} y_a^{(a)}$;
 Δp : vetor contendo os coeficientes de correção k_i .

A Figura 3 mostra um esquema simplificado da implementação da técnica.

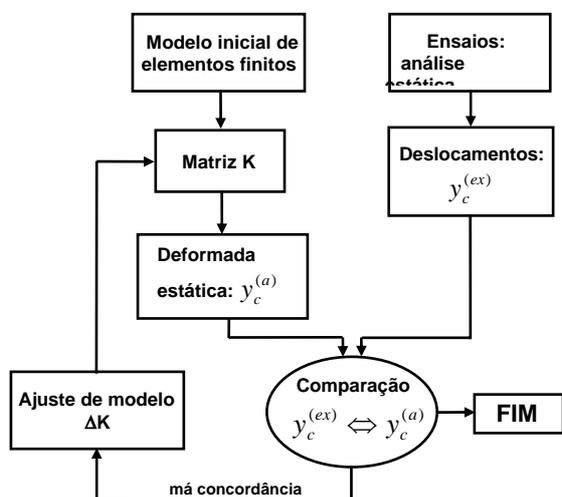


Figura 3 - Organograma geral do método de sensibilidade.

Do ponto de vista prático, existem alguns pontos do ajuste de modelos que devem ser observados: pré-tratamento dos dados experimentais; necessidade de expansão das medidas ou de condensação do modelo; reanálise exata ou aproximada da resposta do modelo; sensibilidade aos ruídos de medida; linearização das equações de otimização; eficiência da implementação, tempo de cálculo, etc. Neste contexto, o método de sensibilidade tem se mostrado bastante eficiente.

O método de otimização local escolhido para o cálculo da solução Δp na expressão de sensibilidade (2) é do tipo gradiente com restrições de desigualdade. A função custo é formada pelas distâncias entre as deformadas estáticas:

$$J(p) = \Delta y^T W_y \Delta y(p)$$

submetida às restrições de desigualdade $\Delta p_i^{inf} \leq \Delta p_i \leq \Delta p_i^{sup}$ e às restrições laterais $p_i^{inf} \leq p_i \leq p_i^{sup}$, sendo:

Δy : vetor das distâncias das deformadas estáticas;
 $\Delta p = p - p^{(0)}$: vetor das correções paramétricas;
 W_y : matriz de ponderação, escolhida segundo a especificidade do problema.

O algoritmo de implementação da técnica de ajuste de modelos é composto de diversas etapas. As principais são:

(1) Modelagem por elementos finitos da estrutura (modelo numérico: tipo de elemento, propriedades geométricas, elásticas e físicas, condições de contorno e de carregamento), através de um programa de cálculo

comercial (ANSYS e NASTRAN neste trabalho) e interface com este programa;
 (2) Definição dos dados de entrada a serem explorados (matrizes elementares, energias, etc);
 (3) Definição e cálculo da solução (estático, dinâmico, etc.);
 (4) Posicionamento ótimo dos sensores (medidores de deslocamento, acelerômetros, etc.);
 (5) Realização dos ensaios e importação dos dados através de um arquivo do tipo universal, o que gera o “modelo experimental”;
 (6) Adequação geométrica dos modelos numérico e experimental;
 (7) Correlação entre os dois modelos;
 (8) Criação das variáveis de concepção do problema (parâmetros a ajustar/identificar);
 (9) Definição dos parâmetros de controle do algoritmo de otimização (restrições de desigualdade, restrições laterais, função custo, etc.);
 (10) Escolha dos resultados a serem explorados durante e após o procedimento iterativo de ajuste;
 (11) Parâmetros de controle da execução iterativa (número de iterações, critério de convergência, tipo de variável: discreta ou contínua, algoritmo de otimização, etc.);
 (12) Lançamento do cálculo iterativo e análise dos resultados.

Todas essas etapas foram implementadas em um programa desenvolvido no LMARC- Laboratoire de Mécanique Appliquée Raymond Chaléat (Besançon, França), chamado AESOP-Analytico/Experimental Structural Optimization Platform (AESOP, 2005). AESOP permite um procedimento de identificação geral e flexível sob vários aspectos. Ele faz interface com programas externos, incluindo NASTRAN (MSC-NASTRAN, 2005), IDEAS e ANSYS (ANSYS, 2004). Isto permite que todas as propriedades de concepção previstas nestes programas possam, em princípio, ser identificadas pelo processo de ajuste de modelos.

AESOP é desenvolvido em ambiente MATLAB®, facilitando o uso de algoritmos locais e globais de otimização, como por exemplo o Método da Programação Sequencial Linear e Quadrática, os Algoritmos Evolucionários, as Redes Neurais, as Simulações de Monte Carlo e a Otimização Multiobjetivos. Além disso, AESOP oferece uma série de ferramentas de análise que permitem compreender, prever e melhorar o comportamento do modelo, como a localização de erros dominantes de modelagem, métodos de reanálise aproximada do comportamento e análise de robustez.

5 - ESTRUTURA TESTE

A estrutura teste escolhida é uma viga do tipo “engastada”-livre (Figura 4). Sua configuração simples permite obter boa sensibilidade das rigidezes, facilitando a compreensão do comportamento estático e a montagem experimental.

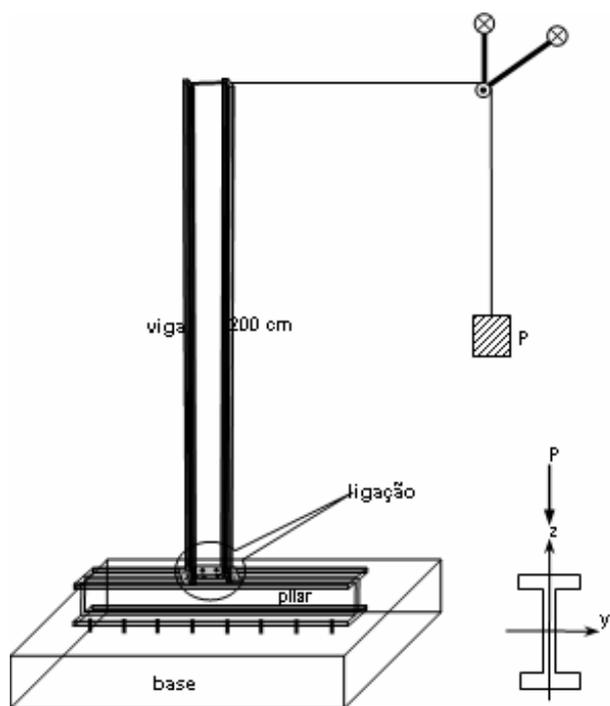


Figura 4 - Estrutura teste para identificação das ligações.

O perfil pultrudado utilizado tem seção “I” 150 x 74,5 x 5,5 mm, pertencendo à gama UTILO, de qualidade mínima E23, sendo fabricado pela empresa EXEL-COMPOSITES. As cantoneiras utilizadas na ligação são perfis L 50 x 5 mm. A resina é um poliéster e o reforço é constituído por fibras de vidro, com véu de superfície em poliéster, conforme a norma EN 13706. O módulo de elasticidade do perfil, fornecido pelo fabricante, é de 28,6 GPa. As propriedades geométricas, calculadas para um raio de curvatura na região mesa-alma de 5,5 mm, são: A (área) = $1,720 \times 10^{-3} \text{ m}^2$; I_y (momento de inércia) = $5,98 \times 10^{-6} \text{ m}^4$; I_z (momento de inércia) = $4,09 \times 10^{-7} \text{ m}^4$; J (momento de inércia de torção) = $2,42 \times 10^{-8} \text{ m}^4$; I_w (momento de inércia de empenamento) = $2,11 \times 10^{-9} \text{ m}^6$.

Conforme mostra a Figura 5, a ligação viga-pilar é do tipo *double web-angle*, sendo a viga e o pilar formados pelo mesmo perfil I.

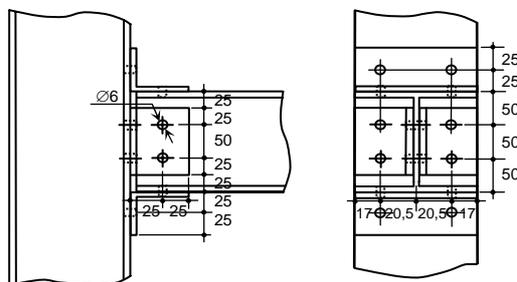


Figura 5 - Ligação parafusada estudada.

Não há colagem nos elementos da ligação. A geometria exata das ligações foi concebida segundo especificações do EUROCOMP (CLARKE, 1996). A folga furo-parafuso e a folga arruela-parafuso são nulas. A

arruela tem 12 mm de diâmetro externo e 1,5 mm de espessura.

A modelagem por elementos finitos de perfis pultrudados de paredes finas e seção aberta, formados por camadas de materiais compostos unidirecionais e/ou do tipo *mat*, pode ser feita através de elementos do tipo viga ou por elementos do tipo placa e sólido. Na modelagem por elementos do tipo placa ou sólido, supondo a alma e as mesas em estado plano de tensão, o que corresponde aos casos práticos, são necessárias quatro propriedades elásticas da camada para caracterizar o material:

- E_1 : módulo de elasticidade longitudinal;
- E_2 : módulo de elasticidade transversal;
- G_{12} : módulo de cisalhamento no plano 12;
- ν_{12} : coeficiente de Poisson.

A modelagem através de elementos do tipo viga implica na transformação da estrutura tridimensional, com seções às vezes de geometria complexa, em uma estrutura unidimensional com seção homogênea equivalente. A homogeneização é feita tanto do ponto de vista da geometria da seção quanto das propriedades elásticas do material. Desta forma, o material inicialmente ortotrópico torna-se um isotrópico equivalente.

Em uma modelagem/formulação do tipo viga é usual definir as rigidezes equivalentes. Considerando as teorias de Euler-Bernoulli (sem cisalhamento), Timoshenko (com cisalhamento) e Vlasov (torção com empenamento), tem-se no caso mais geral as seguintes rigidezes:

- EA : rigidez de membrana;
- EI : rigidez de flexão;
- kGA : rigidez de cisalhamento;
- GJ : rigidez de torção (torção livre de Saint-Venant);
- EI_w : rigidez de empenamento (torção de Vlasov, com empenamento).

Assim, no caso geral do comportamento mecânico de vigas com modelagem por elementos de viga, as propriedades elásticas necessárias à descrição do comportamento mecânico são duas: E (módulo de elasticidade), G (módulo de cisalhamento), além dos coeficientes de correção do cisalhamento (k_y e k_z).

No presente trabalho, a modelagem da estrutura teste foi feita através de elementos finitos do tipo viga. Supondo que os eixos de ortotropia do material coincidam com o sistema de referência da viga, o que efetivamente é o caso de perfis pultrudados formados por camadas de *continuous roving* e *continuous strand mat*, não há necessidade de modelar o estratificado camada por camada, conforme esquematizado na Figura 6. Neste caso, o material é considerado como um ortotrópico em escala macroscópica.

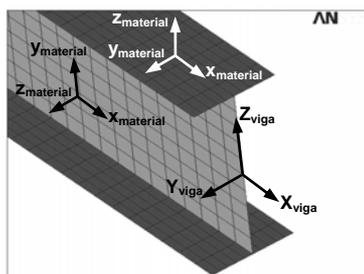


Figura 6 - Esquema de modelagem por elementos finitos do material.

Um procedimento de ajuste de modelos baseado no comportamento dinâmico da estrutura teste foi desenvolvido para identificação das propriedades elásticas do perfil. Utilizou-se os resíduos das auto-soluções como grandezas que expressam a distância entre a resposta de vibração do modelo e da estrutura real. Esta técnica é interessante, pois o comportamento vibratório comporta vários modos com diferentes energias, proporcionando a identificação simultânea de várias propriedades elásticas. Os resultados obtidos foram: módulo de elasticidade - $E = 2,988 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$; módulo de cisalhamento - $G = 2,901 \times 10^9 \text{ N/m}^2$; fator de correção do cisalhamento para o plano xy - $k_y = 0,722$; fator de correção do cisalhamento para o plano xz - $k_z = 0,131$.

Quanto à modelagem da ligação parafusada, utilizou-se elementos de mola lineares. Isto quer dizer que as ligações foram consideradas como “caixas pretas”. Esta abordagem apresenta a vantagem de que as rigidezes identificadas podem ser utilizadas diretamente nos programas correntes de cálculo estrutural, quando do cálculo dos esforços e deslocamentos. O esquema de modelagem da estrutura teste é ilustrado na Figura 7.

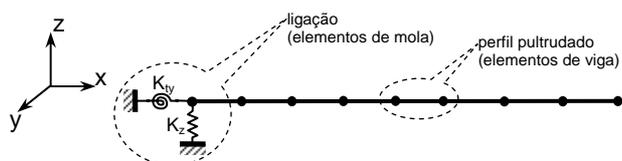


Figura 7 - Modelagem por elementos finitos da estrutura teste.

A ligação modelada é composta da rigidez de translação na direção z (K_z) e da rigidez de rotação em torno do eixo y (K_y). O modelo de elementos finitos do perfil pultrudado é composto de 200 elementos de viga, perfazendo 1.413 gdl. Para identificação das rigidezes K_y - rigidez de translação na direção y e K_z - rigidez de rotação em torno do eixo z , seria necessário um ensaio com carregamento estático atuando no plano xy .

6 - ENSAIO EXPERIMENTAL

Após o carregamento da estrutura com um sistema de pesos, as medidas dos deslocamentos na direção z da viga foram feitas através de um sensor de deslocamento do tipo LVDT (sensor de deslocamento por indução). O LVDT se

deslocava ao longo da estrutura teste com o auxílio de um sistema de guias (Figura 8).

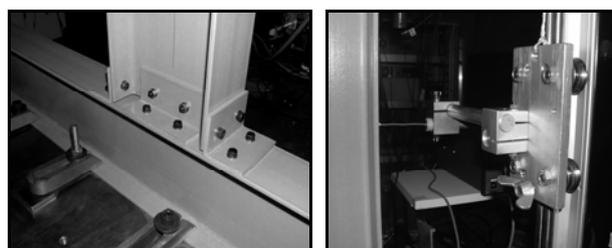
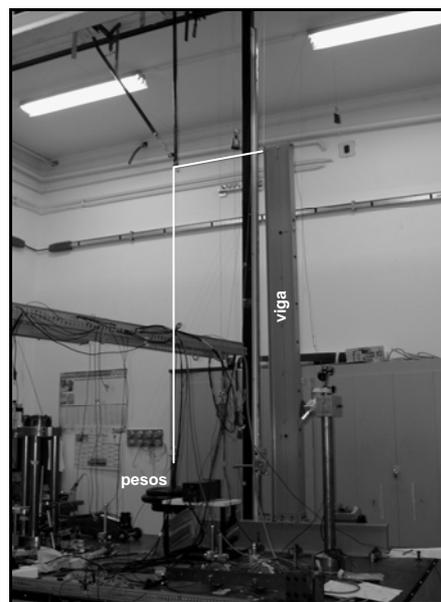


Figura 8 - Instrumentação da estrutura teste sob carga estática. Detalhes da ligação parafusada e do sistema de posicionamento do LVDT.

Foram coletados os deslocamentos em 19 pontos previamente marcados na viga. Os deslocamentos medidos foram em seguida interpolados para cada carregamento. As curvas resultantes são mostradas na Figura 9.

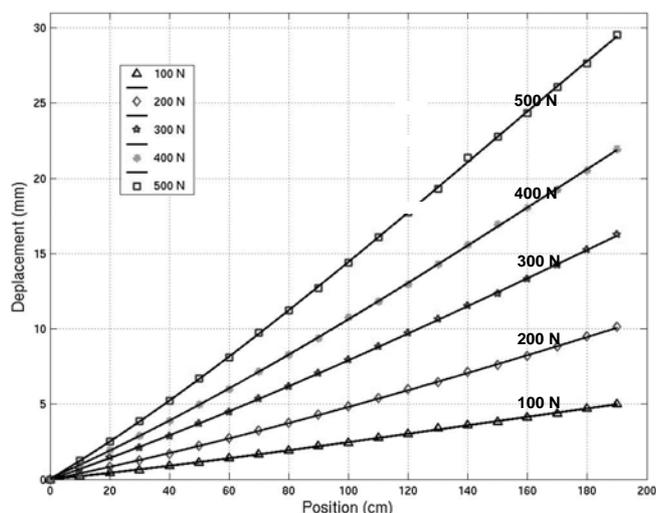


Figura 9 - Curvas dos deslocamentos medidos ao longo da viga, para diversos carregamentos.

7 - IDENTIFICAÇÃO DAS RIGIDEZES DA LIGAÇÃO

A partir dos 19 pontos onde os deslocamentos segundo z foram efetivamente medidos, a base experimental foi ampliada após interpolação (Figura 9), o que gerou um total de 181 pontos. Os parâmetros de controle do ajuste foram:

- restrições laterais dos parâmetros p : [0,0001 10.000];
- restrições de desigualdade: $\Delta p = [0,2 \ 0,4]$;
- função custo - diferença entre as deformadas estáticas:

$$\varepsilon = \frac{\|y_v^{(ex)} - y_v^{(a)}\|}{\|y_v^{(ex)}\|};$$

- torque nos parafusos (nível de aperto): 15 N.m;
- método de otimização local: “Constrained Linear Least Squares”.

O resultado do processo de ajuste é dado na Tabela 1 para uma carga de 500 N. A Figura 10 mostra que a função custo convergiu adequadamente.

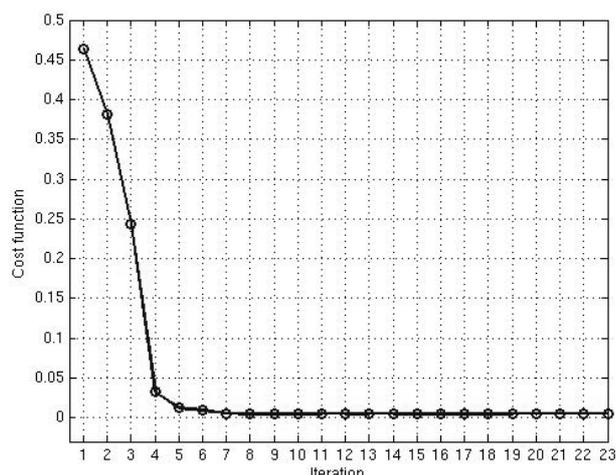


Figura 10 - Evolução da função custo ao longo das iterações.

Tabela 1 - Rigidezes da ligação identificadas. Carga estática de 500N.

Propriedade	Valores iniciais (modelo numérico)	Valores ajustados
K_z (N/m): rigidez de translação na direção z	9×10^7	$7,479 \times 10^6$
K_y (N.m/rad): rigidez de rotação em torno de y	$1,2 \times 10^5$	$8,365 \times 10^4$

O comportamento do modelo ajustado é mostrado na Figura 11, com a deformada da viga antes e após o ajuste, para uma carga de 500 N. Nota-se que a deformada do modelo ajustado praticamente se superpõe à deformada medida experimentalmente. Este bom resultado foi igualmente observado para os outros carregamentos estáticos.

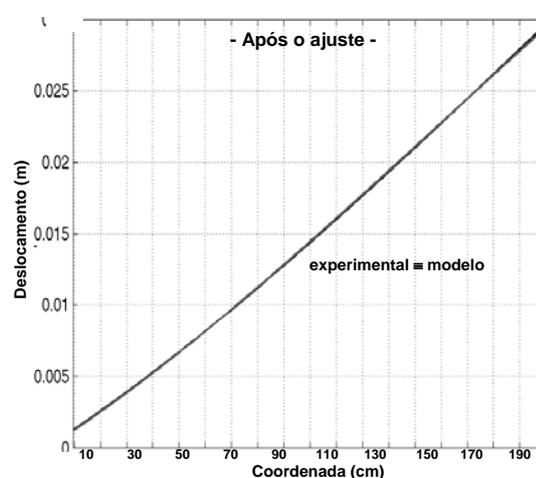
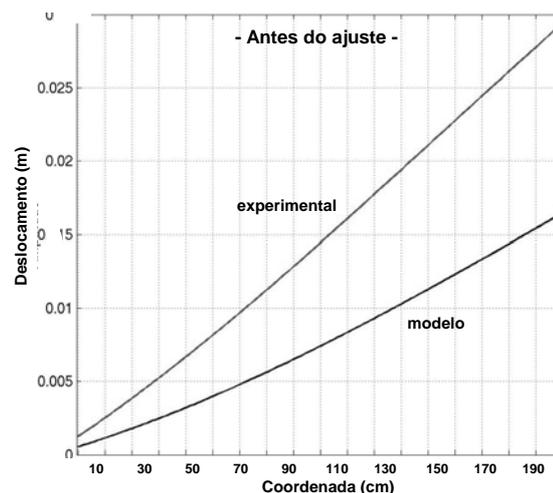


Figura 11 - Comparação das deformadas estáticas do modelo e experimental, antes e após o ajuste.

8 - COMPORTAMENTO ESTÁTICO DA ESTRUTURA TESTE COM LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA

Para ilustrar a importância do comportamento semi-rígido das ligações nas estruturas interligadas, será avaliada a resposta estática da própria estrutura teste, considerando-se três condições de comportamento da ligação: rotulada, semi-rígida e engastada.

No primeiro exemplo, calculou-se a flecha máxima da viga submetida a uma carga estática de 500 N na extremidade. O resultado mostra a diferença significativa da flecha máxima para as condições de extremidade de engastamento e semi-rígida (Figura 12).

No segundo exemplo, calculou-se a flecha máxima e o diagrama de momentos fletores da estrutura teste com ligações nas duas extremidades, submetida a um carregamento uniformemente distribuído de 1000 N/m. O resultado obtido mostra como são significativas as diferenças da flecha e dos momentos para as três condições de extremidade consideradas (Figura 13).

9 - CONCLUSÃO

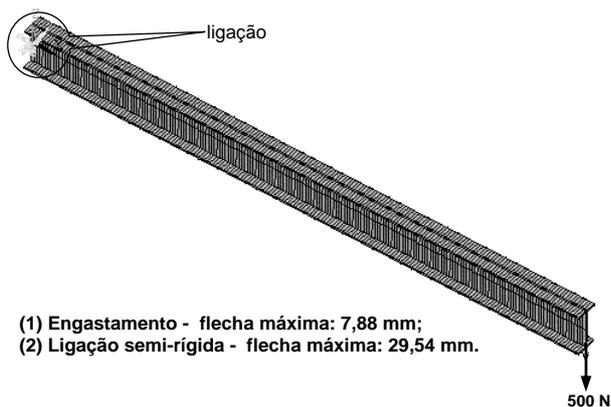


Figura 12 - Comparação da flecha máxima da estrutura teste, para duas condições de comportamento da ligação.

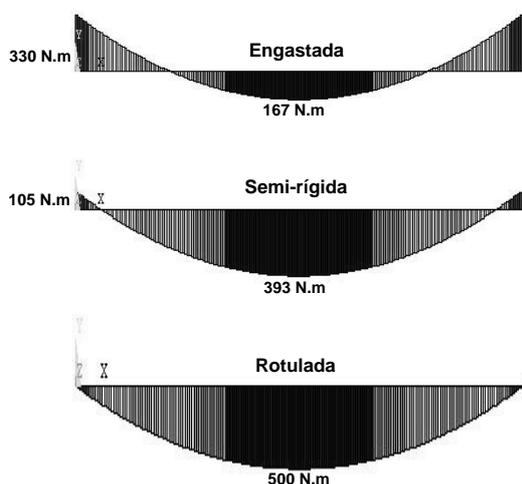
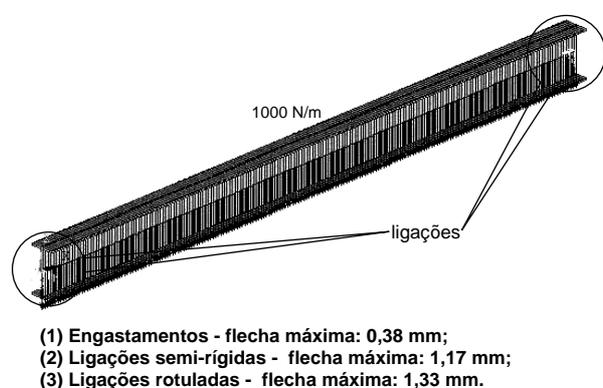


Figura 13 - Comparação da flecha e do momento fletor da estrutura teste, para três condições de comportamento da ligação.

Estes resultados demonstram de maneira clara como é importante considerar o real comportamento da ligação, que é semi-rígido. A precisão do dimensionamento das estruturas no estado limite último (momento fletor) e no estado limite de utilização (flecha) depende deste aspecto.

O objetivo principal deste trabalho é a identificação da rigidez de ligações parafusadas de estruturas reticuladas, formadas por perfis pultrudados utilizados na construção civil. Procurou-se mostrar a viabilidade do ajuste de modelos em estática como ferramenta de identificação das ligações. A técnica do tipo não-destrutiva permitiu a determinação simultânea das rigidezes a partir de um único ensaio. Os resultados obtidos em uma estrutura real demonstraram a eficiência do método de sensibilidade.

Foram identificadas duas rigidezes da ligação parafusada (translação e rotação), o que não é corrente na literatura relativa ao tema. A maioria dos estudos se limita à identificação da rigidez de rotação que age no plano do carregamento estático das estruturas.

A consideração de diferentes aspectos práticos do ajuste permitiu uma abordagem consistente do problema. Nos procedimentos de identificação realizados, foram escolhidos diferentes pontos de partida (modelos numéricos iniciais). Em todos os casos, constatou-se uma convergência que levou às mesmas soluções finais. De maneira geral, a qualidade dos resultados depende da qualidade do modelo de elementos finitos, da estratégia de ajuste e da precisão dos dados experimentais. É a associação destes três fatores que pode levar a uma identificação confiável.

Foram também identificadas através do ajuste de modelos as rigidezes da ligação a partir de ensaios dinâmicos na estrutura teste. Os resultados foram comparados aos resultados obtidos com os ensaios estáticos. Este estudo será objeto de futura publicação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), ao COFECUB (Comité Français d'Evaluation de la Coopération Universitaire avec le Brésil) pelo apoio, dentro do acordo de cooperação CAPES/COFECUB (Brasil/França) e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo suporte financeiro através do Projeto de Pesquisa EDT 1993/03.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AESOP. Analytico/Experimental Structural Optimisation Platform, Version 5.0, LMARC, Besançon-France, 2005.
- ANSYS. University Intermediate, Release 7.1, Ansys Inc, 2004.
- BERRIET, R. Étude de méthodes de correction paramétrique de modèles en elasto-dynamique, Thèse de Doctorat, LMARC-Besançon, 1995.
- CAMANHO, P.P.; MATTHEWS, F.L. Stress analysis and strength prediction of mechanically fastened joints in FRP: a review, Composites A, 529-547, 1997.
- CLARKE, J. L. Structural design of polymer composites - Eurocomp Design Code and Handbook, E & FN SPON, London, 1996.
- DAVALOS, J. F.; Qiao, P. A computational approach for analysis and optimal design of FRP beams, Computers and Structures, Pergamon, n. 70, 169-183, 1999.

- HARTE, A. M.; Mc CANN, D. Finite element modelling of the semi-rigid behavior of pultruded FRP connections, *Journal of Materials Processing Technology*, 98-103, 2001.
- MOTTRAM, J. T.; ZHENG, Y. State-of-the-art review on the design of beam-to-column connections for pultruded frames, *Composites Structures*, Elsevier, n. 35, 387-401, 1997.
- MSC-NASTRAN. Release 2005, MSC Software Corporation, 2005.
- OKUTAN, B.; ASLAN, Z.; KARAKUZU, R. A study of the effects of various geometric parameters on the failure strength of pin-loaded woven-glass-fiber reinforced epoxy laminate, *Composites Science and Technology*, 1491-1497, 2001.
- SONTI, S. S. Stress Analysis of Pultruded Structural Shapes, Msc Dissertation, West Virginia University, Morgantown, 1992.
- TURVEY, G. J. Analysis of pultruded glass reinforced plastic beams with semi-rigid end connections, *Composite Structures*, Elsevier, v. 38, n. 1-4, 3-16, 1997.
- TURVEY, G. J. Single-bolt tension joint tests on pultruded GRP plate - effects of tension direction relative to pultrusion direction, *Composite Structures*, Elsevier, n. 42, 341-351, 1998.
- TURVEY, G. J. Flexure of pultruded GRP beams with semi-rigid end connection, *Composite Structures*, Elsevier, n. 47, 571-580, 1999.
- TURVEY, G. J.; BROOKS, R. J. Semi-rigid - simply supported shear deformable pultruded GRP beams subjected to end moment loading: comparison of measured and predicted deflections, *Composites Structures*, Elsevier, n. 57, 263-277, 2002.
- TURVEY, G. J.; COOPER, C. Semi-rigid column-base connections in pultruded GRP frame structures, *Computer and Structures*, Pergamon, n. 76, 77-88, 2000.
- WONG, C. W.; MAK, W. H.; KO, J. M. System and parametric identification of flexible connections in steel framed structures, *Engineering Structures*, 581-595, 1995.
- ZHU, K.; AL-BERMANI, F.G.A.; KITIPORNCHAI, S.; LI, B. Dynamic response of flexibly jointed frames, *Engineering Structures*, 575-580, 1995.

