ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA ENTRE JUNTAS "SINGLE-LAP" E "WAVY-LAP" FABRICADAS EM COMPÓSITOS (FIBRAS DE VIDRO E CARBONO) E UNIDAS POR ADESIVO

Eli de Souza Junior, jreli2008@hotmail.com Plínio de Oliveira Bueno, pliniobueno@yahoo.com.br

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha 31270-901 - Belo Horizonte - MG

Resumo. Nas juntas planas do tipo "single-lap" têm-se, devido à excentricidade da carga, elevada concentração de tensões normais positivas nas extremidades da junta as quais são críticas para o adesivo. Para minimizar esse efeito, Zeng e Sun propuseram um novo tipo de junta com uma forma ondulada ("wavy-lap"). Nesta junta, a excentricidade da carga é evitada e os esforços de tração nas extremidades são transformados em esforços de compressão, resultando numa maior resistência mecânica. Pretende-se avaliar o desempenho dessas juntas através de ensaios de tração e ao mesmo tempo verificar a influência do tipo de tecido e material na eficiência da junta. Para isto foram utilizados os tecidos de fibra de vidro tipo "plain weave" e fibra de carbono tipo "4–harness satin" em matriz epóxi. Considerando somente os ensaios em fibra de vidro, os resultados mostraram que quando comparadas, as juntas "wavy-lap" são significantemente mais resistentes à tração. Considerando, porém, somente os ensaios em fibra de carbono, não se pode concluir que existe uma predominância das juntas "wavy-lap" sobre as jutas "single-lap". Estas observações deixam clara a existência de influências da forma e do material empregado no desempenho das juntas.

Palavras Chave: Materiais Compósitos, juntas, "single-lap", "wavy-lap"

1. INTRODUÇÃO

Muitas estruturas consistem de uma montagem de componentes individuais que devem ser conectados de forma a criar caminhos para transmissão integral dos esforços. Estas conexões são freqüentemente referidas como juntas e podem ser manufaturadas numa variedade de formas como, por exemplo, pelo uso de parafusos ou rebites, pela soldagem ou brasagem e pela união adesiva. TONG, L. and STEVEN, G. P. (1999) chamam a atenção que independentemente de quais sejam as formas de conexões usadas na estrutura, essas juntas são potencialmente pontos fracos na estrutura. As estatísticas apontam que aproximadamente 70% das falhas em estruturas são iniciadas nas juntas (HER, S-C, 1999). Assim, as juntas devem ser projetadas adequadamente, de modo a encontrar os requisitos específicos de cada projeto.

A Fig. 1 representa o caminho do momento de flexão mostrado por GOLAND, M. and REISSNER, E. (1994). Se a carga T na junta é muito pequena, nenhuma rotação da parte sobreposta ocorre e a carga atua ao longo da linha mostrada na Fig. 1(a). Neste caso, o momento de flexão na borda calculado em relação ao centro da parte sobreposta é máximo. A partir do momento em que a carga é aumentada, a junta rotaciona-se e dessa forma a linha ao longo do qual a carga é aplicada move-se aproximando para a linha de centro dos aderentes, conforme mostrado na Fig. 1(b) reduzindo assim o valor do momento.

Muito embora, o uso de compósitos possa reduzir grandemente o número de partes, a união de partes é ainda inevitável. Os métodos tradicionais citados anteriormente podem às vezes ser inadequados para compósitos reforçados com fibras. Isto se deve ao fato de que os furos de passagem de parafusos e rebites cortarem as fibras de reforço e, como resultado, ocorre uma redução da capacidade global da estrutura de suportar cargas. Por isto, o uso de adesivos torna-se muito mais interessante para compósitos (ZENG, Q. and SUN, C. T., 2001).



Figura 1. Representação geométrica do fator de momento de flexão mostrado por Goland e Reissner [1].

O objetivo principal desse trabalho é realizar um estudo comparativo entre duas juntas adesivamente unidas. Assim, a junta convencional "single-lap" plana é confrontada com um novo perfil de junta, denominada "wavy-lap", proposta por ZENG, Q. and SUN, C. T. (2001). Pretende-se avaliar o desempenho dessas juntas através de ensaios de tração e ao mesmo tempo verificar a influência do tipo de material empregado na eficiência das juntas. As ferramentas utilizadas na verificação de tais influências serão o teste T-Student, que será responsável pela avaliação direta dos pares de juntas de mesmo material, utilizando a comparação por médias, e a Análise da Variância (ANOVA), que realizará a comparação não só de ambas juntas como de ambos materiais, tratando-os como fatores influenciadores dos resultados da análise (MONTGOMERY, DOUGLAS C., 2001).

2. CORPO DO TRABALHO

2.1. Dados dos ensaios de tração

Os ensaios de tração das juntas "single-lap" de fibra de vidro foram realizados em uma máquina Instron 4482 com célula de carga de 100KN. Já os ensaios das juntas "wavy-lap" de fibra de vidro e de carbono bem como os ensaios das juntas "single-lap" de carbono foram realizados em uma máquina Instron modelo TTDML com célula de carga também de 100KN.

2.2. Planejamento dos experimentos

Foi feito o cálculo do tamanho mínimo da amostra cujo valor encontrado foi de 13 corpos de prova. Foram, porém, ensaiados 20 corpos de prova de juntas "single-lap" e outros 20 corpos de prova de juntas "wavy-lap" fabricados a partir do tecido de fibra de vidro em matriz epóxi. Os ensaios basearam-se na norma ASTM D 5868-95, a qual permite determinar a resistência aparente ao cisalhamento. O objetivo desses ensaios é obter a resistência mecânica dos diferentes tipos de juntas para sua posterior comparação.

Por questões de restrição de verba, para os corpos de prova feitos em fibra de carbono, só foi possível obter material suficiente para se confeccionar 13 corpos de prova, sendo 7 e 6, para "single-lap" e "wavy-lap", respectivamente.

Os corpos de prova de juntas "single-lap" foram confeccionados conforme a norma ASTM D 5868-95 e obedecem as dimensões nominais, em milímetros, indicadas na Fig. 2.



Figura 2. Corpos de prova de juntas "single-lap" [mm]

As dimensões nominais dos corpos de prova das juntas "wavy-lap" são apresentadas na Fig. 3.



Figura 3. Corpos de prova de juntas "wavy-lap"[mm]

Utilizou-se na fabricação dos laminados, 16 camadas, tanto para os tecidos de fibra de vidro quanto de fibra de carbono, para se obter a espessura indicada. Foram utilizados "tabs" para evitar o esmagamento do corpo de prova pelas mordeduras das garras sistema de fixação ma máquina de ensaio. Para os corpos de prova de geometria "single-lap" utilizou-se "tabs" para poder haver o alinhamento durante a execução do ensaio. Cabe lembrar que, devido a não existência de excentricidade nas juntas "wavy-lap", não há necessidade de utilização dos "tabs" de alinhamento. Nota: Os "tabs", tanto para mordedura das garras quanto para alinhamento possuem 16 camadas.

2.3. Mapeamento e análise da geometria após a construção

A diferença no processo de fabricação das juntas "wavy-lap" para as juntas "single-lap" está no fato de que para se obter a superfície ondulada, é necessário que o material seja laminado sobre um molde. Devido aos recursos disponíveis optou-se pela construção do molde em fibra de vidro. Nesse caso, a maior dificuldade é a obtenção de um modelo com o formato da junta. Para se conseguir isso, laminou-se o material em cima de molde de isopor.

Foi feito um mapeamento da geometria adquirida através da utilização deste molde e comparando-se este mapa com o modelo de ZENG, Q. (2001), percebe-se uma diferença significante na geometria, conforme representado na Fig. 4, o que certamente consiste num fator influenciador das respostas em resistência à tração das juntas ensaiadas.



Figura 4. Comparações entre perfis obtidos e o projetado; o modelo projetado está representado pela linha vermelha.

2.4. Resultados da medição

A Tabela 1 apresenta um resumo das resistências à tração em [kN] de todos os corpos de prova ensaiados:

SLV	WLV	SLC	WLC
5.78	7.00	9.69	6.28
5.95	7.46	11.23	6.72
7.04	8.04	11.82	8.81
6.88	10.30	11.62	11.48
5.87	10.48	10.03	12.16
7.37	9.22	10.45	8.16
7.47	11.48	9.73	
8.64	10.25		
8.58	9.07		
8.82	9.91		
7.75	10.54		
8.39	10.55		
8.43	12.05		
7.72	9.91		
8.33	10.35		
5.89	11.02		
6.34	10.99		
6.19	11.01		
6.03	11.26		
6.11	11.23		

Tabela 1. Resultados de resistência à tração [kN]

Onde lê-se:

- *SLV:* Sigle-Lap Fibra de Vidro;
- WLV: Wavy-Lap Fibra de Vidro;
- *SLC:* Sigle-Lap Fibra de Carbono;
- *WLC:* Wavy-Lap Fibra de Carbono

2.5. Análise Estatística dos Resultados

1º PARTE - Nesta primeira abordagem dos resultados, analisa-se somente a diferença entre as eficiências das juntas "single-lap" e "wavy-lap" para os corpos de prova fabricados em fibra de vidro, com tecido "plain weave" e resina epóxi. O tamanho da amostra para cada tipo de junta é igual a 20. Os diagramas da Fig. 5 mostram a dispersão dos dados. 2009 Brazilian Symposium on Aerospace Eng. & Applications Copyright $\textcircled{\mbox{\scriptsize C}}$ 2009 by AAB



Figura. 5. Resistências à tração das juntas em fibra de vidro [kN]

O diagrama de blocos, mostrado na Fig. 6, é uma boa forma se visualizar comparativamente o comportamento das juntas.

A Fig. 7 mostra os dados numa distribuição normalizada com uma linha de tendência passando pelos pontos. Percebe-se que somente uma porção destes valores possui tendência à normalidade, porém as extremidades estão consideravelmente fora de curva normalização.



Tipos de Juntas x Resist. à Tração

Tipos de Juntas Ensaiadas

Figura. 6. Diagrama de blocos das juntas em fibra de vidro [kN]



Figura. 7. Normalidade das juntas em fibra de vidro [kN]

Esta não normalidade de uma parte dos dados denota que existe uma diferença entre corpos de prova de mesma forma e material. Isto poderia ser atribuído à dificuldades construtivas dos materiais compósitos.

Comparando-se as eficiências, nota-se aparentemente a existência de uma diferença entre os valores das duas tomadas de dados. Para se ter certeza de que tal diferença é significante, foi realizado o teste T-Student, cuja resposta está mostrada na Fig. 8, que analisa a diferença entre as médias dos resultados dentro de um índice de confiança desejado, que no caso é de 95%.

```
Two Sample t-test
data: WLV and SLV
t = 7.546, df = 38, p-value = 4.544e-09
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
    2.141758 3.712242
sample estimates:
mean of x mean of y
    10.106 7.179
```

Figura. 8. Resultado do teste T-Student para as eficiências entre as duas tomadas de dados estudadas

De fato o teste t acusa uma diferença substancial entre as médias, sendo o índice x o representante das juntas "wavylap" e y o representante das juntas "single-lap". Nota-se, portanto, uma superioridade na eficiência das juntas "wavylap" na ordem de 40% em relação às juntas "single-lap" de fibra de vidro.

2º PARTE - Nesta próxima abordagem, os mesmos passos foram seguidos, só que, desta vez, utilizou-se os valores obtidos para as juntas fabricadas em fibra de carbono. O tamanho da amostra será de 13 corpos de prova, sendo 7 e 6, para "single-lap" e "wavy-lap", respectivamente. O pequeno tamanho de amostra deveu-se a questões de orçamento. Os diagramas da Fig. 9 mostram a dispersão dos dados:



Figura. 9. Resistência à tração das juntas em fibra de carbono [kN]

O diagrama de blocos, mostrado na Fig. 10, é uma boa forma se visualizar comparativamente o comportamento das juntas fabricadas em fibra de carbono.



Tipos de Juntas x Resist. à Tração

Figura. 10. Diagrama de blocos das juntas em fibra de carbono [kN]

A Fig. 11 mostra os dados numa distribuição normalizada. Diferentemente dos resultados obtidos para as juntas em fibra de vidro, aqui se observa que os valores tendem a uma normalidade.



Figura. 11. Normalidade das juntas em fibra de carbono [kN]

Aqui também é possível notar-se uma diferença entre estas juntas, porém, para se ter certeza de tal diferença, também foi realizado o teste t, conforme mostrado na Fig. 12.



Novamente, o teste t acusa uma diferença substancial entre as médias, sendo o índice x o representante das juntas "wavy-lap" e y o representante das juntas "single-lap" de fibra de carbono. Curiosamente nota-se uma inversão em relação aos valores esperados, sendo a superioridade, neste caso, atribuída à junta "single-lap" na ordem de 20% em relação às juntas "wavy-lap".

3º PARTE - Análise Estatística dos Resultados sobre os efeitos fixos do modelo: Projeto 2-Fatorial com 1 nível. O diagrama de blocos, na Fig. 13, é uma boa forma se visualizar comparativamente o comportamento de todas as juntas ensaiadas neste experimento.



Figura. 13. Diagrama de blocos de todas as juntas ensaiadas [kN]

Será utilizado um projeto fatorial 2-Fator, onde os fatores considerados são a forma e o material. O nível em questão é a resistência máxima das juntas à tração.

Os cálculos serão realizados através de um algoritmo implementado no software "R", para cálculos estatísticos.

Teste de Hipóteses: H0 = A média das resistências das 4 juntas são iguais. H1 = Ao menos 1 das 4 médias é diferente.

Os valores das saídas mostradas na Fig. 14 mostram os resultados dos cálculos da ANOVA, onde nota-se a influência dos materiais, formas e suas interações.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
forma	1	42.372	42.372	22.885	1.617e-05	***
mat	1	15.312	15.312	8.270	0.00595	**
forma:mat	1	54.803	54.803	29.600	1.681e-06	***
Residuals	49	90.722	1.851			
Signif. code	es:	0 `***	*′ 0.001	`**′ 0.(0.05)	5 `.' 0.1 ` ' 1

Figura. 14. Resultado do cálculo da ANOVA mostrando a influência dos materiais, formas e interações

A Fig. 15 mostra a interação entre material e forma. O esperado seria obter a curva azul paralela à vermelha.



Figura. 15. Interação Material-Forma

A Fig. 16 mostra o modelo estatístico linear que será utilizado para o delineamento deste experimento.



Figura. 16. Modelo estatístico linear

Interação Material e Forma

A Fig. 17 apresenta os resultados da função "LM" aplicada à ANOVA de forma a fornecer os parâmetros que irão alimentar o modelo estatístico linear apresentado na Fig. 16.

```
Call:
lm(formula = resist ~ forma + mat + forma * mat, data = dados)
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)
             -3.9889
                          1.7939
                                  -2.224
                                            0.0308
forma
              7,7184
                          1.1462
                                   6.734 1.71e-08
                                                   ***
                                                   ***
mat
              8.2184
                          1.3526
                                   6.076
                                         1.79e-07
              -4.7374
                          0.8708
                                  -5.441 1.68e-06
forma:mat
                0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1
Signif. codes:
```

Figura. 17. Parâmetros para alimentar o modelo estatístico linear

A Equação (1) representa o comportamento das juntas e é a base para a criação do diagrama superfície de resposta.

```
Y_{form,Mat} = \{-3.99 + 7.72*form + 8.22*mat - 4.74*form*mat\}
```

(1)

A Fig. 18 (a) relaciona a resposta, resistência à tração, à interação entre material e forma, através de um diagrama de superfície. A Fig. 18 (b) apresenta as curvas de nível provenientes do diagrama de superfície.



Figura. 18. (a) Diagrama de superfície, (b) Curvas de nível

3. DISCUSSÃO

ZENG, Q. and SUN, C. T. (2001) demonstraram que a configuração geométrica do tipo ondulada traz como vantagem para as juntas coladas, o desenvolvimento de tensões compressivas nas extremidades das juntas o que provoca um aumento da resistência da junta colada. É importante salientar que as tensões nas extremidades das juntas do tipo "single-lap" são trativas, o que faz com que haja uma redução na resistência da junta como um todo. Já com a tensão compressiva o efeito é oposto. Ou seja, de acordo com análise teórica do problema, é esperado que as juntas "wavy-lap" apresentem desempenho superior ao desempenho das juntas "single-lap", o que seria traduzido em valores mais altos de resistência à tração.

No ensaio das juntas onduladas de fibra fabricadas em fibra de vidro, observou-se uma grande dificuldade do material de se manter integro durante o ensaio, o que certamente promove influência considerável nos resultados obtidos, uma vez que, num estágio mais avançado do ensaio, próximo à ruptura do adesivo, a forma ondulada já não se mantém, conforme visto na Fig. 19.





(b) Falha de delaminação do aderente



(c) Falha com leve rasgamento de fibra

(a) Delaminação do aderente durante o ensaio



Quando comparadas isoladamente, as juntas de fibra de vidro apresentam comportamentos bem distintos. Pode-se observar claramente que as juntas "wavy-lap" apresentam uma carga de ruptura 40% superior às obtidas nas juntas "single-lap".

Observa-se que as juntas fabricadas em fibra de carbono se comportaram bem durante a bateria de ensaios, conseguindo manter a integridade de suas lâminas até o final, fazendo com que o modo de falha fosse, de fato, somente a ruptura do adesivo, o que é o desejado, conforme visto na Fig. 20. Acredita-se que a influência do material, neste caso, seja menor que para os corpos de prova em fibra de vidro.

Estas juntas, fabricadas em fibra de carbono, quando analisadas isoladamente, apresentam uma inversão de comportamentos em relação ao esperado. Observa-se que as juntas do tipo "single-lap" apresentam média de valores obtida um pouco mais elevada do que a média dos valores obtida para a junta "wavy-lap".



 (a) Falha coesiva do adesivo com leve rasgamento de fibra.



(b) Falha coesiva do adesivo.

Fig. 20. Modos de falha das juntas "wavy-lap" de carbono.

4. CONCLUSÃO

O resultado da análise da variância mostra claramente as influências da forma e do material. O objetivo principal deste trabalho é justamente analisar o efeito da forma da junta, pois a questão principal a ser analisada é o quão negativo seria o efeito que a excentricidade promove no desempenho da junta. Porém verificou-se que o comportamento do material durante o ensaio foi também um fator de grande influência.

Para os corpos de prova construídos em fibra de vidro as juntas "wavy-lap" apresentaram uma carga de ruptura, em média, 40% superior quando comparadas às juntas "single-lap".

Isto pode ser explicado devido a presença de tensão normal interfacial negativa nas extremidades da junta "wavy-lap" em contraste com a junta "single-lap". Além disso, as tensões cisalhantes são mais uniformemente distribuídas ao longo da parte sobreposta nas juntas "wavy-lap". Estes dois fatos são responsáveis pela maior resistência mecânica da junta.

Já para os corpos de prova construídos em fibra de carbono as juntas "wavy-lap" apresentaram uma carga média de ruptura consideravelmente inferior quando comparadas às juntas "single-lap", apresentando uma inversão do que nos é trazido pela literatura. Além disso, os resultados obtidos para a junta "wavy-lap", em fibra de carbono, apresentaram grande dispersão, o que dificulta a retirada de conclusões. O resultado esperado realmente seria uma dispersão menor e com valores um pouco mais altos.

Uma das hipóteses que explicariam a diferença entre os resultados esperados e os resultados obtidos para as juntas em fibra de carbono seria problemas relacionados à dificuldade de construção dos corpos de prova respeitando a geometria complexa desejada. A maior espessura obtida na laminação dos aderentes de fibra de carbono gerou uma excentricidade no caminho da carga da junta "wavy-lap". Devido a esse fator, sua comparação com a junta "single-lap" ficou prejudicada. Ver Fig. 4.

Com relação aos modos de falha ocorreram falhas com leve rasgamento de fibra, tanto para a junta "single-lap" quanto para a "wavy-lap". Exceção é feita a cinco corpos de prova de junta "wavy-lap" em fibra de vidro na qual ocorreu a delaminação do aderente, conforme mostrado na Fig. 19.

Os resultados das juntas "single-lap" de tecido de carbono mostraram que elas apresentam uma carga de ruptura, em média, 48% superiores às das juntas "single-lap" fabricadas de tecido de fibra de vidro. Essa maior resistência foi atribuída a maior rigidez da juntas de carbono e também ao diferente modo de falha. Observou-se visualmente que, as juntas "wavy-lap" de tecido de carbono apresentam um perfil mais próximo ao do molde do que as fabricadas com o tecido de fibra de vidro. Fato esse atribuído aos menores ângulos de ondulação do tecido "4 - harness satin", utilizado, e a maior rigidez das fibras de carbono que mantêm a forma após a retirada do laminado do molde. Isto é mais uma evidência da influência do tipo de material no comportamento das juntas.

4. REFERÊNCIAS

ADAMS, R. D., COMYN, J. and WAKE, W. C., 1997, Structural Adhesive Joints in Engineering, 2nd Edition, London. Chapman e Hall.

ASTM D 5868-95, Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding, Annual Book of American Society for Testing Materials.

Bueno, Plínio O., 2002, Análise comparativa entre juntas "single-lap" e "wavy-lap" de compósitos unidas por adesivos, DEMEC-UFMG, Tese de Mestrado.

GOLAND, M. and REISSNER, E., 1994, The stress in cemented joints, Journal of Applied Mechanics, 11, A17-A27. HER, S-C, 1999, Stress analysis of adhesively-bonded lap joints, Composites Structures, 47, 673-678.

MONTGOMERY, DOUGLAS C. 2001, Design and Analysis of Experiments, 5nd Edition, New York, NY.

TONG, L. and STEVEN, G. P., 1999, Analysis and Design of Structural Bonded Joints, Boston, Kluwer Academic Publishers.

ZENG, Q. and SUN, C. T., 2001, A new bonded composite wavy lap joint, the 42nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC/ Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, Seattle, WA.

ZENG, Q. and SUN, C. T., 2000, Novel desing of a bonded lap joint, submitted to AIAA Journal for publication.

ZENG, Q., 2001, A Study On Composite Adhesive Lap Joint, PhD. Thesis, Purdue University, Purdue, IN.

5. NOTA DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído neste artigo.