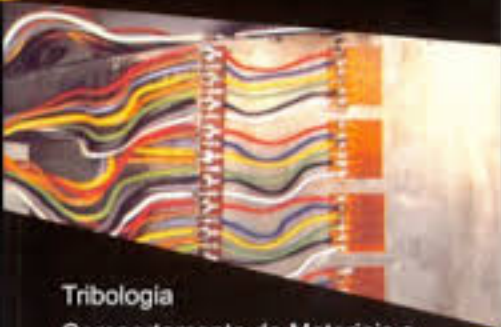


M
mecânica

E
experimental

Revista da SPHET - Associação Portuguesa de Engenharia Experimental de Tensões



Tribologia

Comportamento de Materiais e
Estruturas

nº 4
1999

ESTUDO FOTOELÁSTICO DO CAMPO DE TENSÕES EM LIGAÇÕES ADESIVAS ESTRUTURAIS

J. E. Ribeiro⁽¹⁾ e J. L. S. Esteves⁽²⁾

⁽¹⁾ ESTIG/IPB - Instituto Politécnico, Bragança, Portugal

⁽²⁾ INEGI/FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal



RESUMO

O objectivo deste trabalho foi o de investigar a distribuição de tensões em juntas adesivas de simples sobreposição recorrendo a métodos de análise experimentais e numéricos. O método experimental utilizado foi o da fotoelasticidade. Fez-se análise de vários modelos fotoelásticos e recorreu-se a técnicas de fotoelasticidade bidimensional e tridimensional. Quanto aos métodos numéricos utilizou-se um código de elementos finitos comercial, denominado ANSYS.

1. INTRODUÇÃO

O uso de juntas de adesivos estruturais para suportar cargas elevadas é relativamente recente. Só começou a ser usado, de forma significativa, nos últimos 50 anos. Devido às últimas inovações na engenharia química e mecânica, a união de materiais e especialmente a possibilidade de as juntas adesivas suportarem tensões elevadas, tornaram os adesivos muito mais importantes e populares.

A grande vantagem das juntas adesivas é a de conseguir obter estruturas leves, rígidas e económicas, livres dos defeitos causados pelos métodos de ligação convencionais, tais como zonas de concentração de tensões, zonas afectadas pelo calor, tensões de origem térmica, pontos facilitadores de corrosão, etc. Para além disso podem fazer-se colagens entre

uma grande variedade de materiais (metais, polímeros, compósitos, cerâmicos, etc...).

A melhor característica na utilização de um adesivo é a boa resistência a tensões de corte simples, originando que as juntas adesivas normalmente utilizadas em engenharia foram desenvolvidas para serem solicitadas predominantemente ao corte sob a aplicação directa de solicitações em tracção.

Para uma boa aplicação e entendimento das juntas adesivas, é necessário, antes, ter um conhecimento prévio sobre o comportamento mecânico destas.

A ferramenta de cálculo numérico mais utilizada tem sido o método dos elementos finitos. Esta área tem sofrido um grande desenvolvimento, não só a nível de códigos comerciais genéricos (ANSYS,

COSMOS, IDEAS, etc.), como em códigos específicos para a análise de juntas adesivas estruturais (Joint Design, etc...). Nestes últimos, geram-se elementos especiais para este tipo de análise, como por exemplo elementos de interface adesivo-aderente. Os resultados obtidos com estes últimos códigos são normalmente melhores do que os obtidos com os códigos comerciais genéricos.

Para aferir ou confirmar os resultados determinados com os elementos finitos é necessário compará-los com os obtidos experimentalmente. Existem diversos métodos experimentais possíveis de serem utilizados para o estudo das juntas adesivas: extensometria, fotoelasticidade, moiré, holografia, etc.

2. ANÁLISE EXPERIMENTAL

O método experimental que se utilizou foi o da fotoelasticidade. Para isso, recorreu-se a um polariscópio de transmissão, marca Photoelastic Inc., com um campo de 20 polegadas, existente no LOME (Laboratório de Óptica e Mecânica

Experimental) do INEGI (Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial).

Na construção dos modelos fotoelásticos analisados foram utilizados três materiais diferentes para os quais se procedeu á determinação das propriedades mecânicas e ópticas necessárias, utilizando um equipamento de ensaios de DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analyser) e recorrendo às técnicas clássicas de determinação da constante de franja $f\sigma$. No quadro 2.1 são apresentados os materiais utilizados.

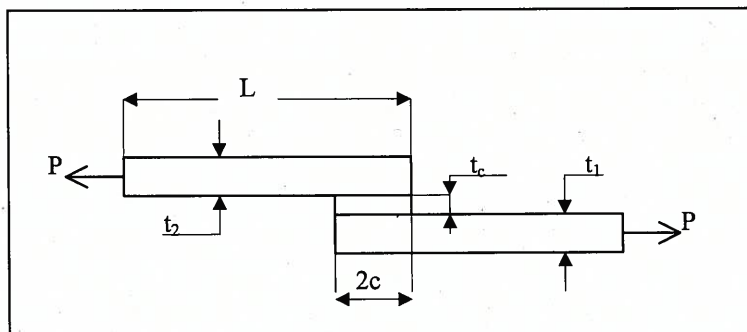
2.1 Fotoelasticidade Bidimensional

Foi utilizado um modelo fotoelástico com as características apresentadas na figura-2.1, tendo sido efectuadas observações da distribuição do padrão de franjas isocromáticas em campo escuro e campo iluminado. Na figura 2.2 podem ser observados os diferentes padrões de franjas isocromáticas.

Pela análise da figura 2.2, pode verificar-se que o modelo fotoelástico está sob a acção de dois tipos de esforços combinados: momento flector e uma força

Quadro 2.1- Materiais utilizados na construção dos Modelos Fotoelásticos.

Material	$f\sigma$ [kgf/mm]	E [MPa]	T_G [°C]	ν
Poliéster (Ortoftálica 272 – Quimigal)	2.385	3500	95.8	0.32
Epóxico (BIRESIN L84 TN – REBELCO)	1.388	1600	59.8	0.35
Epóxico (Araldite AW 106, endurecedor HV 953 – CIBA GEIGY)	—	1200	47.4	0.33



t_1 [mm]	t_2 [mm]	t_c [mm]	$2c$ [mm]	b [mm]	L [mm]	P [N]
6	6	0.2	25	6	123	70

Fig 2.1- Junta adesiva de simples sobreposição. (b – espessura do modelo fotoelástico)
 Aderente – Epóxico (BIRESIN L84 TN)
 Adesivo – Epóxico (Araldite Aw 106)

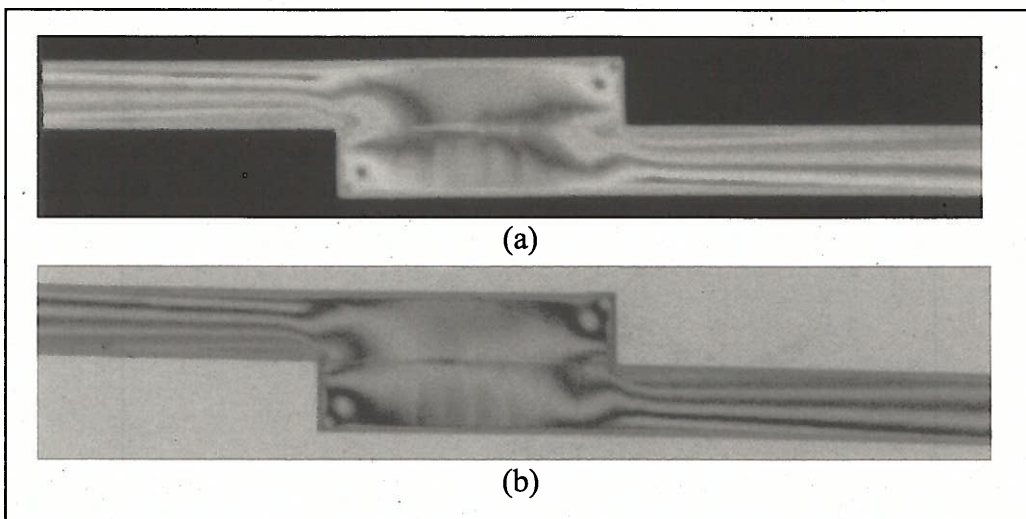


Fig. 2.2-Padrão de franjas isocromáticas em campo escuro (a) e campo iluminado (b).

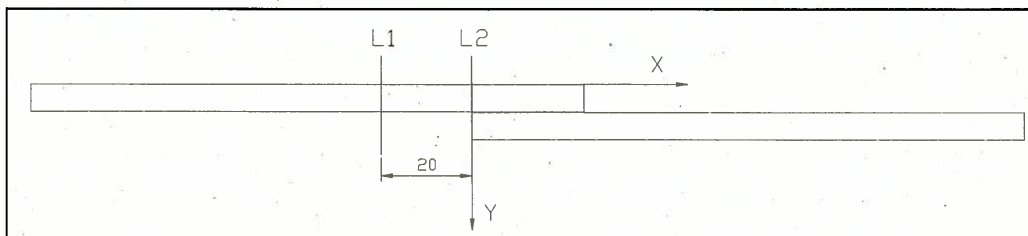


Fig. 2.3- L1 e L2 linhas para análise do campo de tensões. Na interface adesivo-aderente foi utilizado o aderente superior.

de tracção, originando uma sollicitação predominantemente de corte na camada adesiva.

Fora da zona de sobreposição, pode verificar-se que a franja isocromática de ordem zero ($\sigma_1 - \sigma_2 = 0$) encontra-se próxima de um dos bordos laterais dos aderentes da junta, significando que o eixo neutro, posicionado sobre essa franja está afastado do centro de gravidade da placa do aderente correspondente uma sollicitação de flexão.

O modelo em estudo apresenta continuidade das franjas isocromáticas ao ser atravessada a camada de adesivo na zona de sobreposição, situação esta verificada devido aos valores de modulo de elasticidade da mesma ordem de grandeza dos aderentes e do adesivo.

A análise do campo de tensões de acordo com a equação 2.1, foi efectuada ao longo de duas linhas definidas no modelo, representativas da zona de maior valor de concentração de tensões e de uma zona de flexão combinada (ver figura 2.3), assim

como ao longo da interface adesivo-aderente. Foram observadas, franjas isocromáticas até à ordem de $7/2$ nos aderentes ($\sigma_1 - \sigma_2 = 10,2$ MPa), não sendo possível fazer a observação das franjas isocromáticas na camada de adesivo devido à sua pequena espessura de 0.2 mm.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N \times f_\sigma}{h} \quad (\text{equação 2.1})$$

Nas figuras 2.4 a 2.5 pode-se observar o perfil do campo de tensões $\sigma_1 - \sigma_2$, ao longo das linhas analisadas, concluindo-se existir um esforço combinado (momento flector e tracção), em que as zonas para valores de Y inferiores à passagem pelo eixo neutro ($\sigma_1 - \sigma_2 = 0$), se encontram à compressão e as de valores de Y superiores à tracção. Por sua vez o campo de tensões ao longo da interface adesivo-aderente apresenta valores elevados de concentração de tensões nas extremidades das zonas de sobreposição da junta.

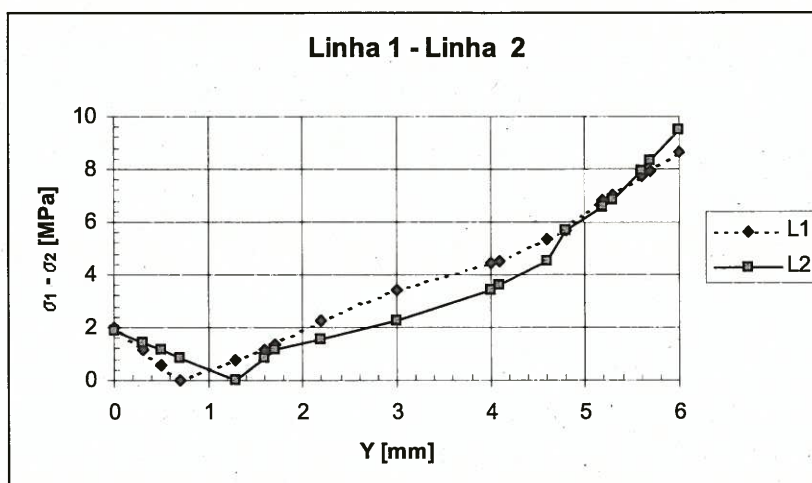


Fig. 2.4 - Variação de $(\sigma_1 - \sigma_2)$ no modelo fotoelástico sujeito a uma carga de 70 N, ao longo das linhas de posicionamento L1 e L2.

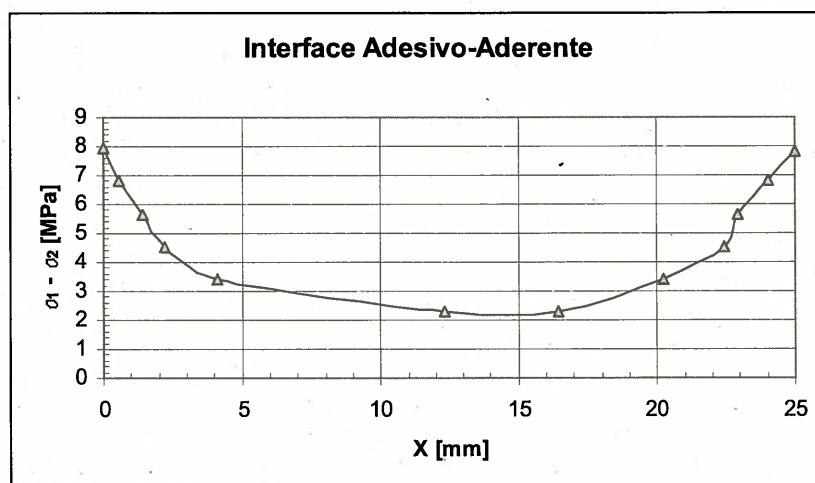


Fig. 2.5 - Variação de $(\sigma_1 - \sigma_2)$ no modelo fotoelástico, ao longo da interface inferior adesivo-aderente.

Quadro 2.4 - Junta adesiva de simples sobreposição para estudos tridimensionais.
Aderente – Epóxido(BIRESIN L84 TN)
Adesivo – Poliester (Ortoftálica 272)

t_1 [mm]	t_2 [mm]	t_c [mm]	$2c$ [mm]	b [mm]	L [mm]	P [N]
6	6	0.2	25	25	123	14.7

2.2 Fotoelasticidade Tridimensional

Na análise efectuada recorrendo a técnicas de fotoelasticidade tridimensional, foram utilizados modelos de juntas de acordo com o quadro 2.4.

As técnicas de análise de campos de tensões recorrendo à fotoelasticidade tridimensional, necessitam de um prévio congelamento das tensões instaladas no

modelo. Para isso, é necessário aquecer o modelo a uma temperatura superior à temperatura de transição vítrea (T_G) dos aderentes, mantendo o modelo sob a acção das solicitações impostas. Para se obter o congelamento de tensões montou-se o modelo fotoelástico numa estufa com uma carga de 14.7 N e seguiu-se o tratamento térmico indicado na figura 2.6.

De seguida retirou-se o modelo fotoelástico da estufa e cortou-se o modelo em fatias na direcção longitudinal. Utilizando, para o efeito, uma serra refrigerada. Montou-se as referidas fatias no polariscópio e fez-se a análise do padrão de franjas isocromáticas em campo escuro e campo iluminado.

Pela observação da figura 2.7 pode verificar-se que o campo de tensões no interior do modelo é diferente do exterior. Observando, por exemplo, em campo iluminado pode ver-se que enquanto na fatia do modelo exterior (F) tem franjas isocromáticas até à ordem 2.5, na fatia interior (D) começa a aparecer a franja

isocromática de ordem 3.5. Pode-se, então, concluir que o interior do modelo está sujeito a um gradiente de tensões mais elevado que no exterior.

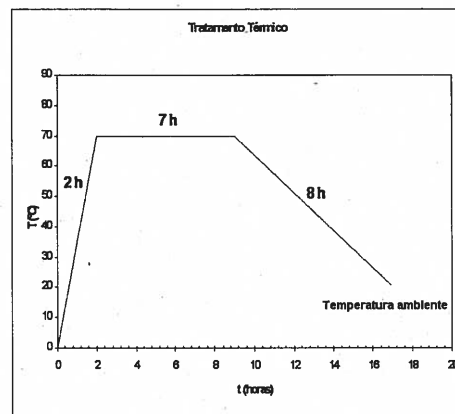


Fig. 2.6- Tratamento térmico de congelamento de tensões.

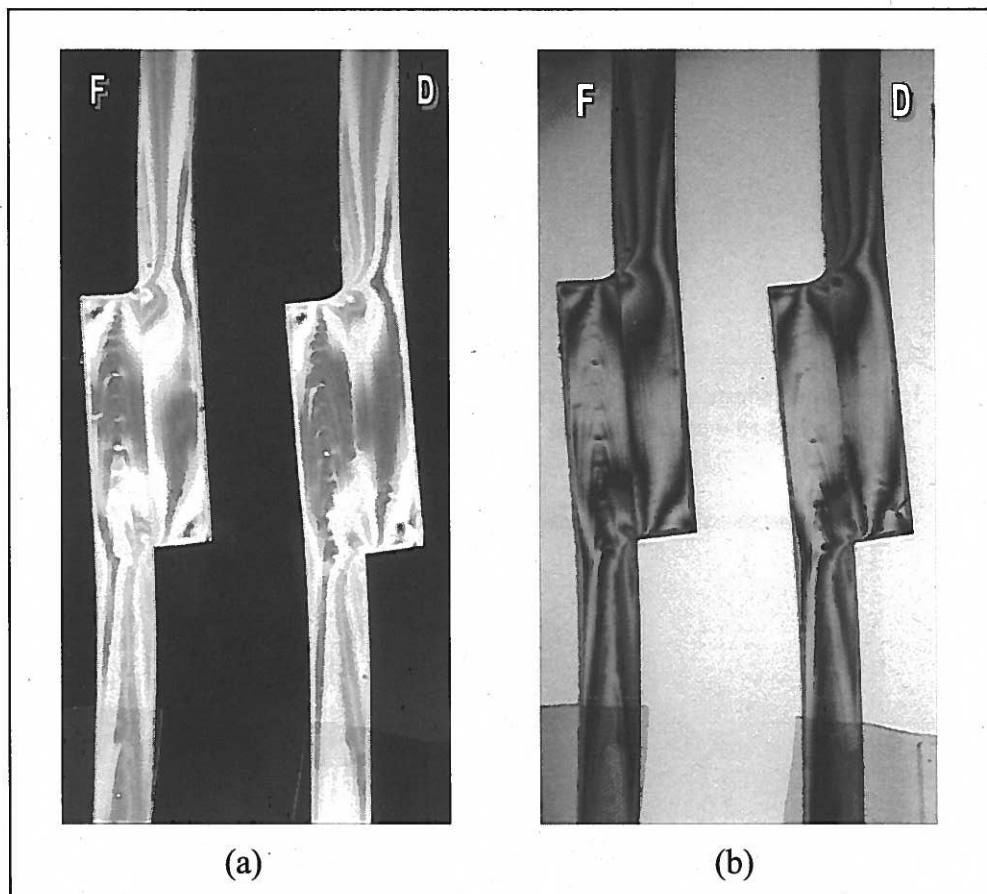


Fig. 2.7- Fatias interior (D) e exterior (F) do modelo fotoelástico em campo escuro (a) e campo iluminado (b).

3. ANÁLISE NUMÉRICA

Para análise numérica da distribuição de tensões nas juntas adesivas recorreu-se ao programa comercial de elementos finitos ANSYS.

Para o caso em análise utilizaram-se elementos sólido estruturais bidimensionais quadrangulares e rectangulares isoparamétricos com oito nós. Como a largura dos modelos fotoelásticos com os quais se pretende comparar resultados é pequena (6 mm) optou-se por considerar um estado plano de tensão. Os materiais foram considerados ter comportamento mecânico isotrópico, linear elástico

A definição da malha dos modelos utilizados foi efectuada considerando um maior refinamento de malha junto às zonas de maior concentração de tensões, situadas

nos finais da sobreposição.

Neste trabalho utilizaram-se as condições de fronteira e cargas mostradas na figura 3.1, tendo-se procedido ao cálculo das tensões de corte, tensões normais de arrancamento (σ_y) e à diferença de tensões principais $\sigma_1 - \sigma_2$. Na figura 3.2 é apresentado o campo de tensões de corte para uma das juntas adesivas analisadas (Aderente – Epóxico "BIRE SIN L84 TN", Adesivo – Epóxico "Araldite Aw 106").

Nas figuras 3.3 a 3.5 são apresentados gráficos da variação das tensões de corte e tensões normais de arrancamento (σ_y) no meio da camada do adesivo, assim como da variação da diferença das tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_2$), na interface inferior ($Y1=0$) adesivo-aderente para a junta da figura 3.2.

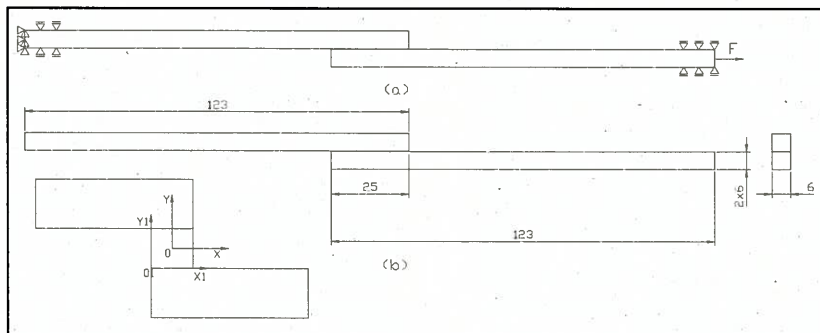


Fig. 3.1- (a) Condições de fronteira e carga ($F=2000$ N) utilizadas. (b) Geometria e dimensões do modelo utilizado

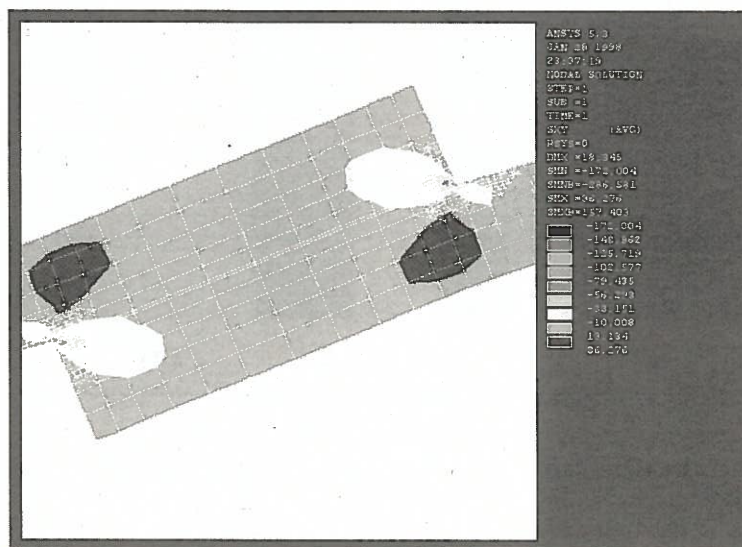


Fig. 3.2- Campo das tensões de corte τ_{xy}

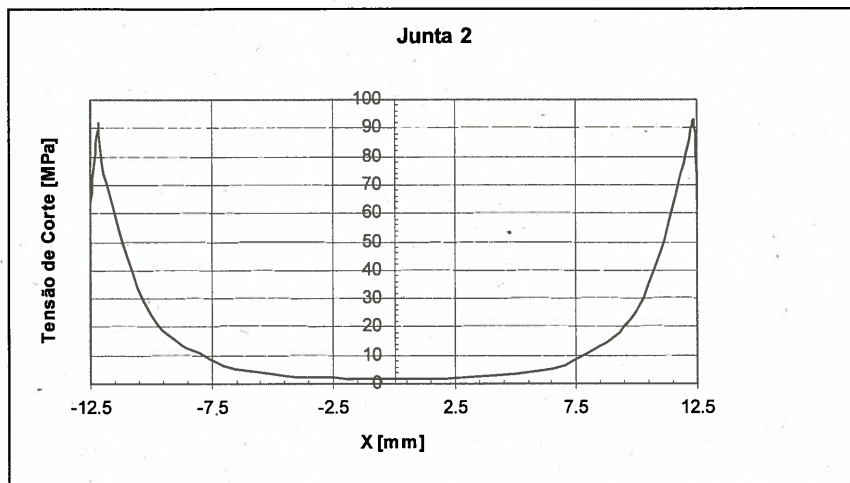


Fig. 3.3- Variação da tensão de corte (τ_{xy}) ao meio da camada do adesivo ($Y=0$).

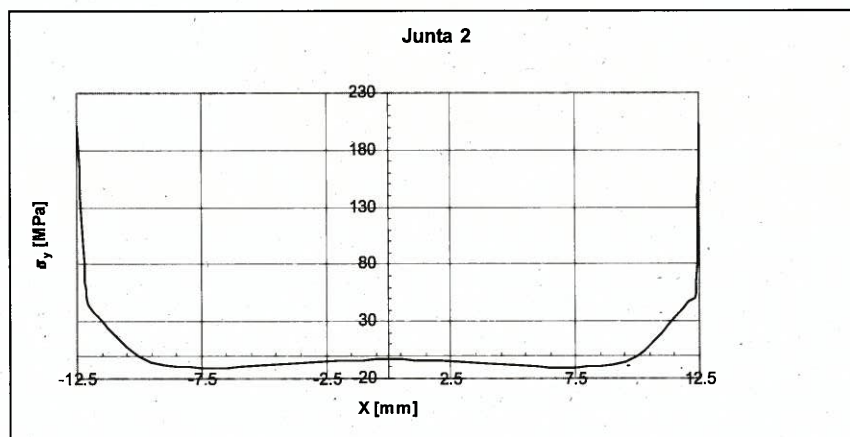


Fig 3.4- Variação da tensão normal de arrancamento (σ_y) ao meio da camada do adesivo ($Y=0$).

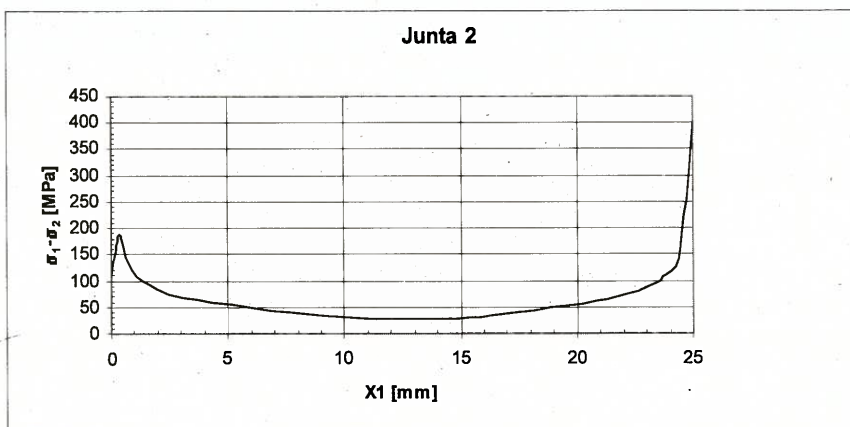


Fig. 3.5- Variação da diferença das tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_2$) na interface adesivo-aderente, para $Y1=0$ (na interface inferior da junta).

4. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Podemos observar na figura 4.1 que o andamento do campo de tensões determinado tanto pelo método dos elementos finitos (MEF) como pela fotoelasticidade é idêntico. O que nos

permite verificar uma boa correlação de resultados entre os dois.

Nos gráficos das figuras 4.2 a 4.4 são efectuadas comparações entre os resultados obtidos utilizando o método experimental da fotoelasticidade e o cálculo numérico usando o método dos elementos finitos.

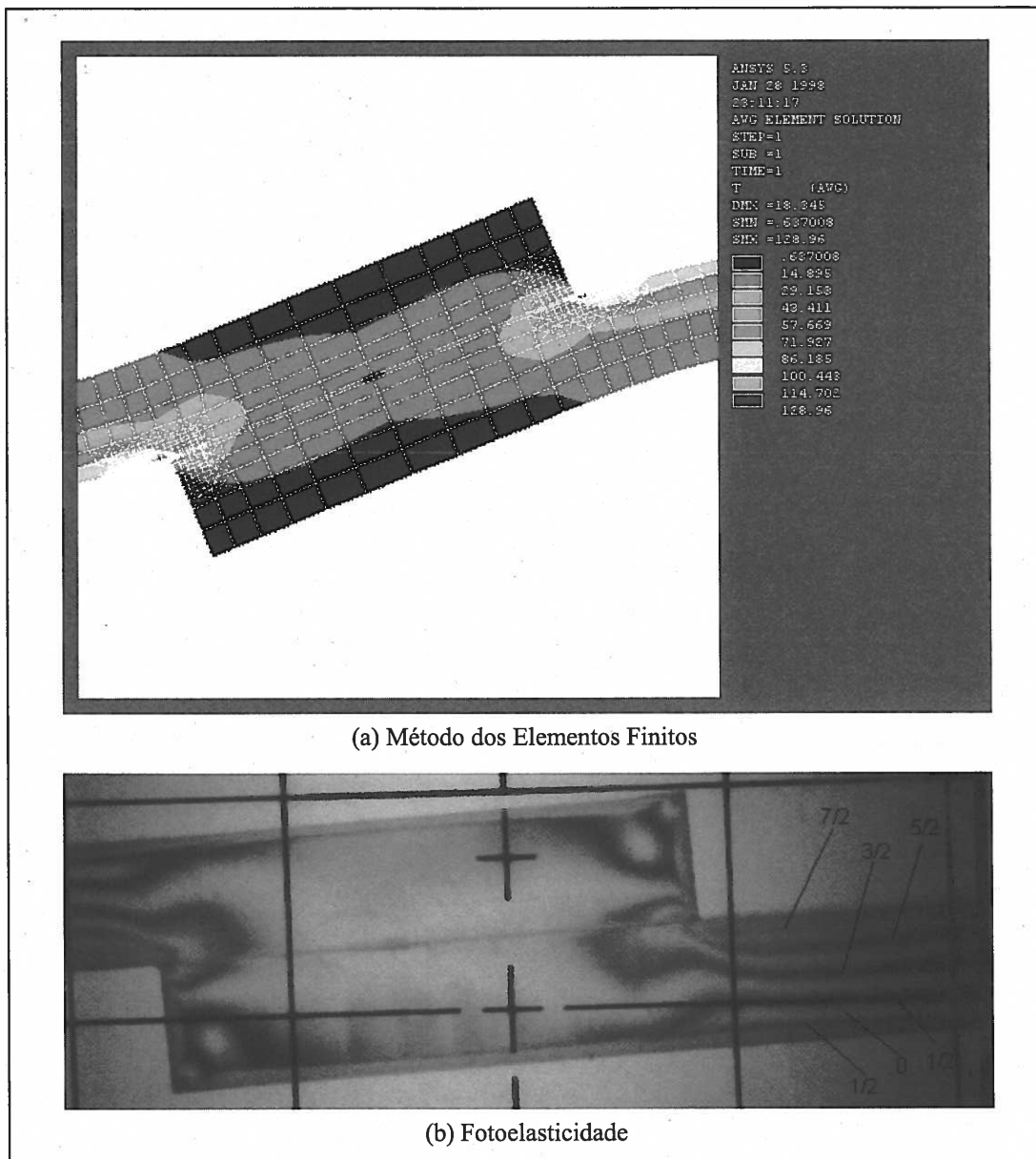


Fig. 4.1- Campo das tensões σ_1 - σ_2 .

Aderente – Epóxico(BIRESIN L84 TN) Adesivo – Epóxico (Araldite Aw 106)

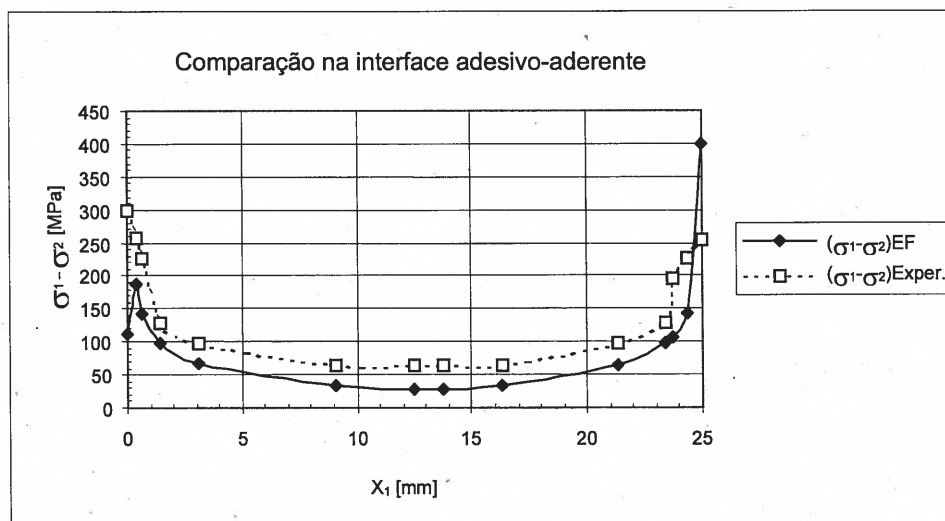


Fig. 4.2- Variação da diferença das tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_2$) na interface adesivo-aderente ($Y_1=0$ - interface inferior da junta).

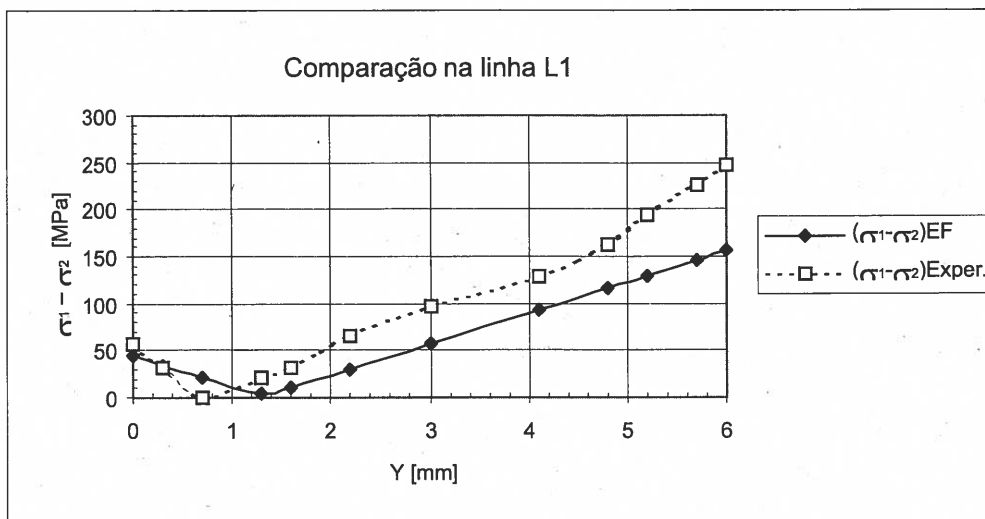


Fig. 4.3- Variação da diferença das tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_2$) na linha L1.

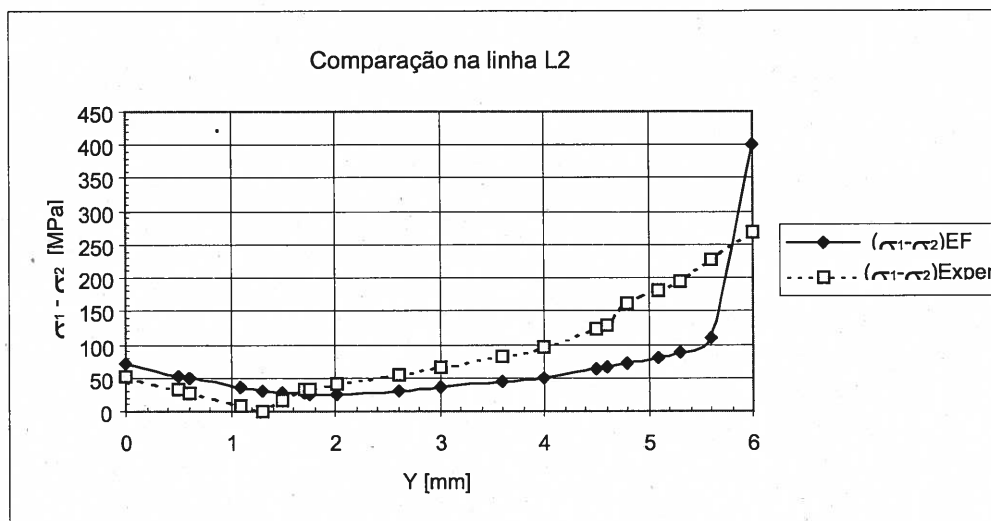


Fig. 4.4- Variação da diferença das tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_2$) na linha L2.

8. CONCLUSÕES

A realização deste trabalho permitiu verificar a validade de aplicação do método experimental da fotoelasticidade no estudo da distribuição do campo de tensões em juntas adesivas, tendo-se encontrado no entanto algumas limitações na aplicação dos diferentes métodos utilizados.

O perfil do andamento dos diferentes campos de tensões analisados pelos diferentes métodos utilizados está bastante próximo, com excepção dos finais das zonas de sobreposição em que nalgumas situações, foram encontradas diferenças significativas de grandeza dos valores de tensão. Esta diferença deve-se essencialmente ao facto de não ter sido

possível dispor de meios mais apropriados para a observação dos padrões de franjas dos modelos fotoelásticos (por exemplo técnicas de tratamento de imagens), permitindo conseguir uma melhor resolução das imagens obtidas e dessa forma conseguir-se distinguir um maior número de franjas isocromáticas.

A resina epóxico (BIRESIN L84TN-REBELCO) utilizada nos nossos modelos fotoelásticos é uma resina para utilização na fabricação de laminados de epoxido/carbono, não sendo uma resina desenvolvida para aplicações de fotoelasticidade.

A sua utilização na construção dos modelos fotoelásticos tornou-se interessante

devido a esta apresentar uma sensibilidade fotoelástica aceitável traduzida pela sua constante de franja, f_{σ} , assim como permitir efectuar o congelamento de tensões para utilizações em fotoelasticidade tridimensional.

Outro problema que surgiu ao serem efectuados os estudos de fotoelasticidade tridimensional foi a necessidade de determinar uma nova constante de franja, f_{σ} , para o material do modelo fotoelástico que permitisse quantificar o valor das franjas isocromáticas após congelamento de tensões, função do carregamento aplicado durante o processo de congelamento das tensões. A maior dificuldade advém do facto de se estar a trabalhar com dois materiais fotoelásticos diferentes para a modelação dos aderentes e da camada de adesivo, com constantes de franja, f_{σ} , diferentes e temperaturas de transição vitrea T_G diferentes, levando a que a calibração do modelo fotoelástico para uma análise tridimensional tenha que ser alvo de um estudo específico e com um certo grau de complexidade de forma a se conseguir quantificar o valor do campo de tensões no modelo, pois ele vai ser dependente do comportamento conjunto dos dois materiais por que é constituído.

Ao nível da correcta reprodução de uma junta adesiva a partir de um modelo fotoelástico deparou-se com a dificuldade de se encontrarem dois materiais

fotoelásticos diferentes para serem utilizados como aderentes e na camada de adesivo respectivamente, que apresentem uma relação de módulos de elasticidade entre eles da mesma ordem de grandeza dos encontrados na junta real em estudo constituída por materiais tais como alumínio/epóxico, aço/epóxico, carbono/epóxico, vidro/epóxico, etc...

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ribeiro, J. E. e Esteves, J. L., "Determination of the Stress Concentration Factor on a Single Lap Joint by Photoelastic Analysis", Euromech Colloquium 358, Nevers, França, 4-6 de Setembro de 1997.
- [2] Ribeiro, J. E., "Estudo do Campo de Tensões em Ligações Adesivas Estruturais", Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1998.
- [3] Adams, Robert D. e Wake, William C., "Structural Adhesive Joints in Engineering", Elsevier Applied Science Publishers Ltd., 1986.
- [4] Frocht, M. M. "Photoelasticity", Vol. I, II Willey and Sons, New York, 1948.
- [5] Post, D. "Photoelasticity", Proc. of SESA, vol IV, 1979
- [6] Esteves, J. L., "Joint Design: Programme D' Aide a la Conception des Assemblages Colles Utilisant Les Elements Finis Mistes D' Interface", Tese de Doutoramento, Universidade de Bourgogne, França, 1995.