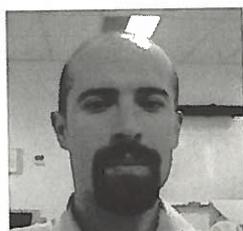


# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS EM MATERIAIS COMPÓSITOS

Pedradas, A.<sup>1</sup>, Dimitrovová, Z.<sup>2</sup>, Travassos, J.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Finalista de licenciatura em engenharia mecânica, <sup>2</sup>Equiparado a Professor-Adjunto, <sup>3</sup>Professor-Coordenador  
Departamento de Engenharia Mecânica, Secção de Projecto Mecânico,  
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa



## RESUMO

*O objectivo do presente trabalho consiste na optimização do material compósito usado numa casca reforçada utilizada em construção mecânica, visando a redução de custos de fabrico e a maximização da resistência à fadiga. A maior parte deste trabalho está a ser desenvolvida conjuntamente com alunos, no âmbito de trabalhos de fim do curso de licenciatura em engenharia mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL). É assim possível com recurso a software avançado e à experimentação, participar no desenvolvimento de produtos com interesse para a indústria.*

## 1- INTRODUÇÃO

A casca reforçada em questão representa uma elevada transferência de tecnologia no domínio do projecto e do cálculo de estruturas multimaterial, onde a análise experimental, designadamente, as fibras ópticas, a extensometria, e outras técnicas, desempenham um papel primordial para o eventual desenvolvimento de novos produtos. A casca reforçada pode integrar equipamentos sujeitos a impacto com aplicações por exemplo no combate a incêndios florestais ou para medição da resistência das estruturas ao choque. O equipamento tem uma grande capacidade de transmitir à estrutura energia de impacto extremamente elevada, com grande flexibilidade em níveis energéticos, em tempo de impulso e em inclinação do carregamento, o que é importante para um

completo estudo das aplicações em engenharia mecânica. Como o equipamento é por vezes utilizado em locais de difícil acesso a viaturas, o seu peso é uma componente a ter em conta no seu fabrico. A exposição da casca reforçada aos sucessivos impactos gerados pelos disparos exige por outro lado uma estrutura robusta que resista ao choque e à fadiga. Com base no trabalho que deu início a este em estudo, do autor (Travassos, 1994 e Travassos et al., 1994), é continuada a investigação do comportamento da casca reforçada.

## 2- COMPORTAMENTO DA CASCA REFORÇADA

A parte principal da casca reforçada (representada na figura 1) consiste numa estrutura em materiais compósitos constituída

por uma casca axi-simétrica em fibra de vidro reforçada pela aba de fibra de carbono e com reforços radiais que usam os dois tipos de fibra, vidro e carbono, sendo ambas as fibras impregnadas em resina epoxídica de elevado desempenho mecânico. Outras partes são metálicas. Um inserto em liga de alumínio (em substituição das tradicionais estruturas em aço) tem a função de distribuir as cargas aplicadas por uma maior área para a parte compósita. Uma parte de aço, que entra directamente em contacto com a carga aplicada, serve para própria localização e posicionamento do carregamento. A casca de material compósito em matriz termoendurecível apresenta elevada resistência ao impacto e à fadiga pela incorporação de fibras de vidro e de carbono.

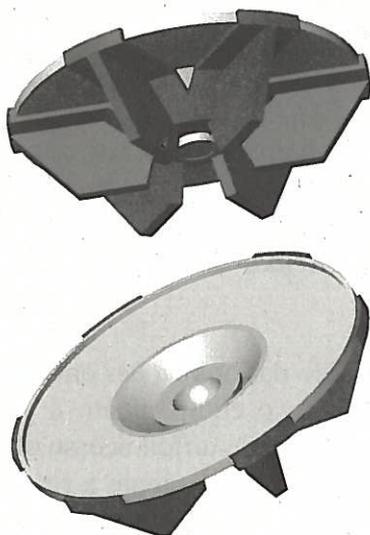


Fig. 1 - Vistas da casca reforçada

A optimização do material compósito usado na casca reforçada tem que ser originada pela determinação da carga de rotura. Na análise de carga de rotura é importante distinguir os diferentes modos de possível falha, que poderá ser originada pela delaminação ou fractura da parte compósita, ou ainda originada pela separação entre a componente metálica e a compósita. O modelo para a análise numérica tem que reflectir correctamente a descontinuidade nas propriedades mecânicas dos componentes

envolvidos, a adesão entre metal e resina, a transferência das cargas da parte metálica para o compósito, a absorção de energia de impacto e a reacção do solo à casca reforçada (fundação elástica).

Estando disponíveis no ISEL alguns exemplares da casca reforçada, é permitido aos alunos fazer ensaios experimentais de acordo com a evolução de trabalho correspondente à simulação numérica. Procedeu-se à implementação da análise experimental de tensões recorrendo à extensometria eléctrica por resistência, que actualmente consiste na utilização de um sistema electrónico de medição para PC's (HBM/Spider, 8-600Hz), destinado a efectuar a medição eléctrica de deformações em diversos tipos de materiais. A este sistema amplificador está associado um software de tecnologia de medição, que possibilita a interpretação e visualização das variáveis de saída do sistema, equipamento/objecto. Foram efectuadas as primeiras medições em diversos tipos e formas de materiais compósitos, nas placas e vigas em T, quer reforçados pelas fibras de vidro quer pelas fibras de carbono. Estes problemas simples tiveram duas tarefas; serviram para aprender usar a nova metodologia e verificar as capacidades do software fornecido com o equipamento.

### 3- ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA

Uma primeira análise da casca reforçada tem que ser o mais simples possível, visando eliminar os factores que sensibilizam os resultados. Por isso a casca reforçada, com apoios simples, exposta a uma carga centrada e estática foi estudada em primeiro lugar. Na figura seguinte mostram-se as partes principais da casca reforçada, designadamente, compósitas e metálicas. As partes em materiais compósitos incluem as nomenclaturas das camadas utilizadas no seu fabrico.

A nomenclatura referente à figura 2 encontra-se definida na tabela 1.

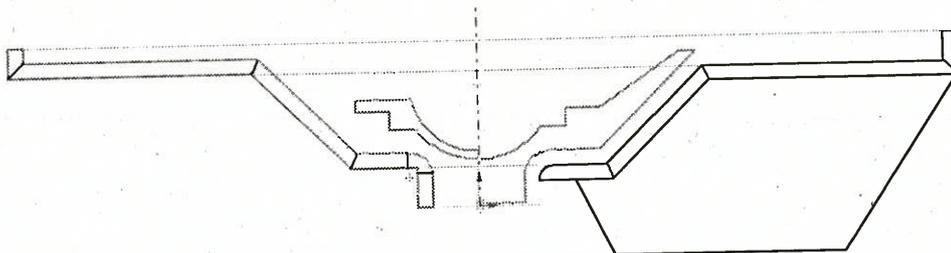


Fig. 2 - Componentes principais da casca reforçada com nomenclatura das camadas utilizadas no fabrico das partes compósitas

Tabela 1 - Significado das nomenclaturas utilizadas

Nomenclatura	Designação comercial	Tipo de pré-impregnado	Espessura nominal [mm]	Volume relativo da fibra
fg	1581 ES 67 - 42%	tecido equilibrado de vidro	0,195	58%
uva	VEE <sub>2</sub> 20 R368	vidro unidireccional	0,130	60%
uvb	VEE <sub>0</sub> 25 R368	vidro unidireccional	0,163	65%
uca	CTE <sub>3</sub> 12 R368	carbono unidireccional	0,112	57,5%
ucb	CTE <sub>2</sub> 35 R367	carbono unidireccional	0,327	60%

Tabela 2 - Arranjos e espessura total das partes compósitas da casca reforçada

Parte do modelo	Arranjo	Espessura nominal [mm]	Espessura no modelo [mm]
casca	$[(0_{fg}/45_{fg})_5/0_{fg}]_5$	4,290	5
aba carbono	$(90_{uca}/90_{ucb})_{11}$	4,829	5
reforço	$[(90_{uca}/90_{ucb})_{11}/(0_{uva}/0_{uvb})_5]_5$	12,588	12

A disposição das camadas mencionadas na tabela 1 na constituição dos laminados é a mencionada na tabela 2.

As nervuras do reforço apresentam uma complexa composição em termos de material. Dois tipos diferentes de vidro e de carbono fazem parte da nervura, intercalados entre si. As fibras de carbono estão alinhadas com a direcção vertical enquanto que as de vidro estão alinhadas com a direcção horizontal. Esta disposição deve-se às solicitações que a estrutura fica sujeita durante os disparos, uma vez que a carga aplicada tem um forte componente na

direcção vertical. As características do carbono permitem a absorção do impacto enquanto que o vidro, sendo um material com uma resistência inferior, permite uma maior elasticidade da estrutura na direcção horizontal. A “aba de carbono” é constituída por dois tipos de carbono diferentes provenientes do prolongamento da alma dão continuidade num prolongamento radial ao reforço, até à extremidade da casca. A orientação zero do tecido na casca é coincidente com uma das nervuras de reforço.

## 1.1 Análise numérica

### 1.1.1 Criação do modelo para simulação numérica

Para a análise numérica pelo método dos elementos finitos foi escolhido o software ANSYS, devido a sua fácil utilização, grande variedade dos elementos e análises possíveis e pela possibilidade de usar a sua própria linguagem de programação (APDL - ANSYS Parametric Design Language). Dois modelos para a análise numérica estão a ser desenvolvidos: o modelo composto pelas superfícies discretizado em elementos de casca multicamada e o modelo formado inteiramente por sólidos. As primeiras conclusões foram tiradas com o modelo sólido. Este modelo foi escolhido como o primeiro a analisar por se tratar de um modelo simples e pelo facto de assegurar a ligação entre os dois tipos de material: compósito (habitualmente simplificado pela superfície média) e metal (geralmente modelado como sólido), permitindo que a transmissão da carga aplicada não seja

influenciada pelas simplificações aplicadas nas zonas de ligação. Por outro lado no modelo composto pelas superfícies é possível desenvolver um ficheiro paramétrico, que permite posteriormente uma optimização de geometria e facilita geralmente alterações geométricas.

O desenvolvimento geométrico do modelo sólido foi iniciado no modelador SolidWorks. A complexidade geométrica do modelo inviabilizou a sua concepção total em ANSYS. Após a sua conclusão em SolidWorks o modelo foi exportada em formato IGES e posteriormente importado para ANSYS onde foi aperfeiçoado de acordo com os objectivos a atingir. As componentes da figura 2 são apresentadas em ambiente ANSYS nas figuras 3 e 4. Toda a estrutura é dividida em pequenas zonas. Esta divisão permite a atribuição de diferentes características em termos de propriedades mecânicas e de orientação das direcções principais das propriedades ortotrópicas.

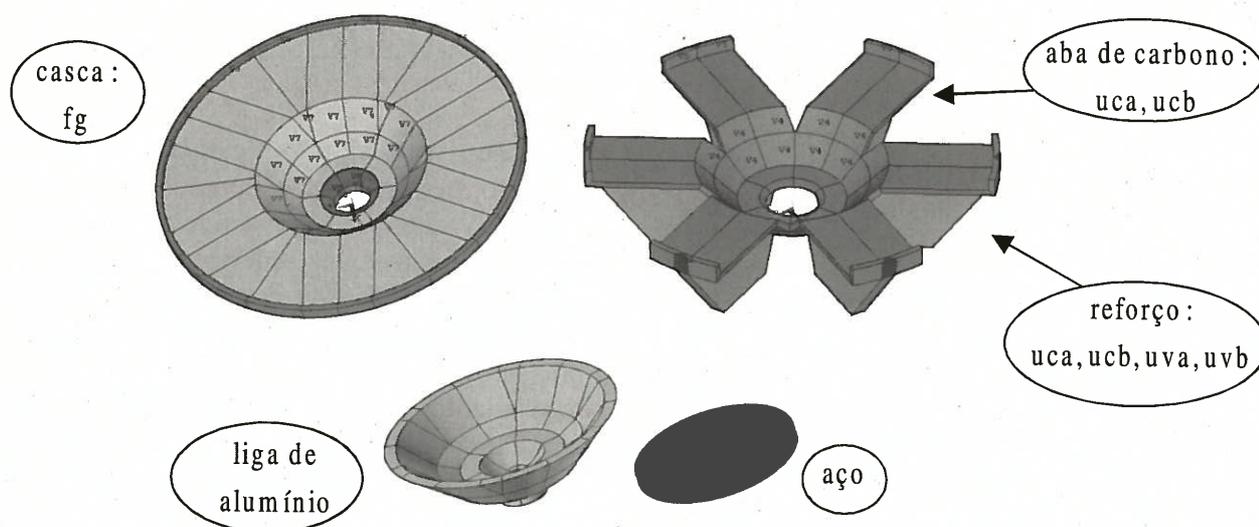


Fig. 3 - Componentes principais da casca reforçada

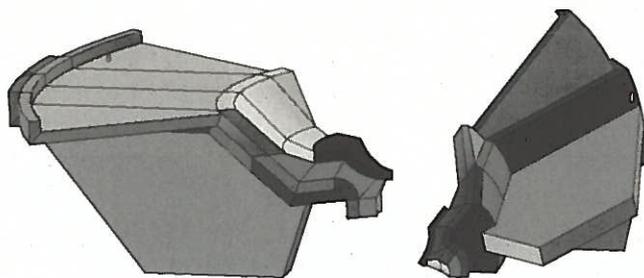


Fig. 4 - Um sexto do modelo da casca reforçada

As diferentes cores nas figuras 3 e 4 correspondem aos diferentes materiais utilizados no modelo numérico, que são diferenciados não só pelas componentes, mas também pelos sistemas de coordenadas locais, que permitem introduzir as propriedades dos materiais ortotrópicos com as direcções principais alinhadas com direcções pré-definidas. Para além do sistema cartesiano foi utilizado um sistema de coordenadas cilíndrico, cónico e toroidal.

As propriedades constitutivas dos três laminados, distintos, foram calculadas de acordo com a teoria clássica dos laminados, (Daniel, Ishai, 1994), (Reddy, 1997). Para o efeito recorreu-se ao software Maple onde foi desenvolvido um programa para calcular as propriedades da lamina e laminado. Na primeira parte calcularam-se as propriedades duma camada a partir das propriedades mecânicas das constituintes, matriz e fibra. Estes foram depois utilizados no cálculo das propriedades medias dos laminados. Os valores das propriedades foram preferencialmente as do fabricante. É conhecido, que um tecido com as orientações especificadas na tabela 2 forma um material quasi-isotrópico no plano.

As constantes elásticas do material foram organizadas num ficheiro dos comandos do ANSYS para uma fácil alteração ou para uma posterior análise paramétrica da sensibilidade dos resultados.

Para o cálculo foi escolhido o elemento sólido *Solid95*, que é um elemento tridimensional com 20 nós tendo cada nó três graus de liberdade, devido ao seu bom comportamento neste tipo de estruturas e por ser tolerante em geometrias irregulares. Conseguiu-se fazer uma malhagem quase totalmente "brick", excepto em pequenas zonas onde existem pirâmides ou tetraedros. Para a primeira abordagem do problema escolheu-se um elemento de alguma dimensão o que ainda assim implicou 2203 elementos e 10422 nós.

A carga de pressão de 50kN foi aplicada na parte esférica do aço de acordo com o trabalho experimental e foi apoiado simplesmente.

Na figura 5 é apresentada malha dos elementos finitos. Nas figuras 6 e 7 apresentam-se alguns dos resultados.

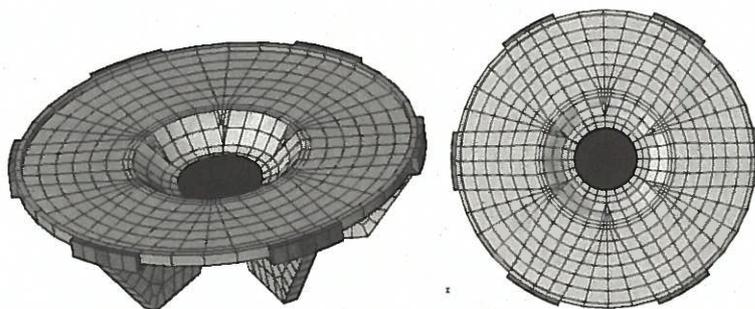


Fig. 5 - A malha dos elementos finitos usada no cálculo

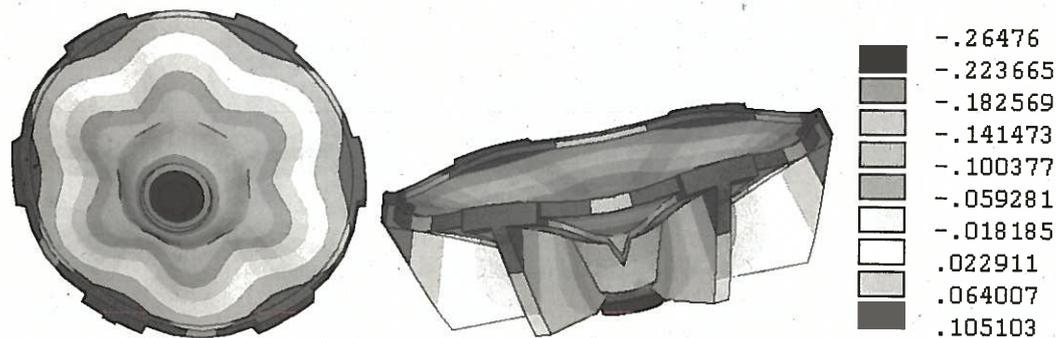


Fig. 6 - Deslocamento vertical [mm]

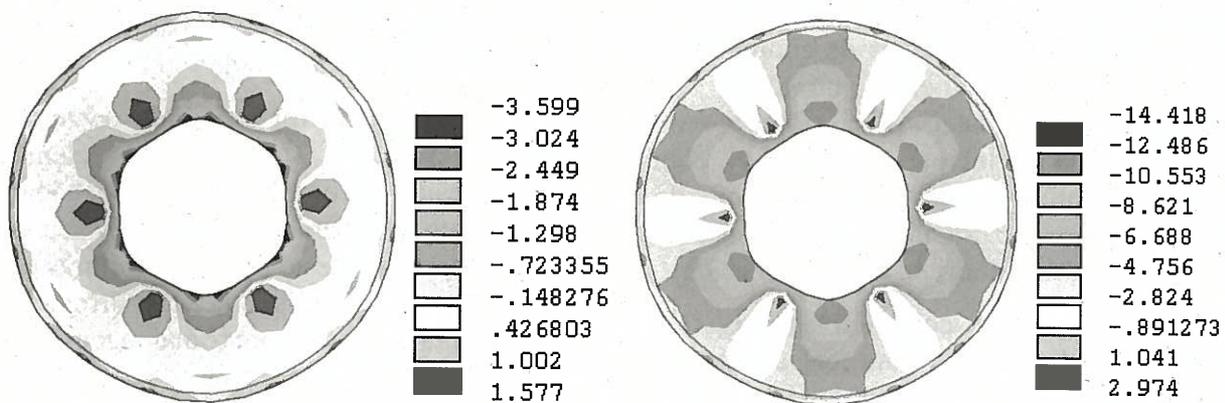


Fig. 7 - Tensão radial e tangencial da superfície horizontal da casca [MPa]

### 1.1.2 Conclusões tiradas do modelo sólido

Na importação do modelo em formato IGES, surgiram alguns problemas em termos de geometria não apropriada ao ANSYS bem como o não reconhecimento dos sólidos. Assim a importação do modelo IGES não facilitou muito a construção do modelo em ANSYS. Para facilitar este tipo de importação o modelo IGES deve ser criado considerando algumas regras "exigidas" pelo ANSYS.

*Desvantagens do modelo sólido-* O modelo sólido apresenta-se sensível a alterações geométricas e verifica-se também alguma dificuldade na alteração à sua geometria.. A malhagem foi efectuada em várias fases e foi distinta dependendo da geometria em questão. A complexidade geométrica do modelo dificulta a sua alteração pelo que se torna complicado qualquer modificação deste tipo, o que pode

todavia ser simplificado com recurso a um ficheiro paramétrico.

*Vantagens do modelo sólido-* O modelo assegura uma ligação correcta entre parte metálica e o material permitindo uma transferência da carga aplicada mais adequada.

Devido aos elementos utilizados, a parte de pós-processamento é uma fase simples. O modelo final apresenta uma grande flexibilidade em termos de propriedades constitutivas o que facilita a análise de sensibilidade dos resultados.

### 1.2 Análise experimental

Na execução do ensaio experimental foi utilizada uma prensa FORM TEST da marca Seidner (figura 8). Para a aplicação da carga axial, utilizou-se um varão de aço maquinado na aplicação da força na zona pretendida. O prato foi instrumentado com 3 extensómetros

(figura 9). Dois extensómetros na casca de vidro (ExA e ExB) e um do tipo roseta num dos reforços, com o objectivo de obter as deformações nas direcções horizontal (ExC) e vertical (ExD), (figura 11).

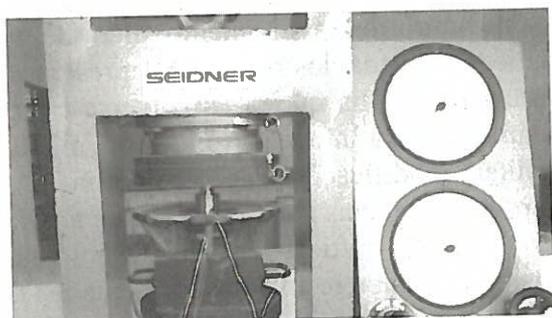


Fig. 8 - Prensa hidráulica

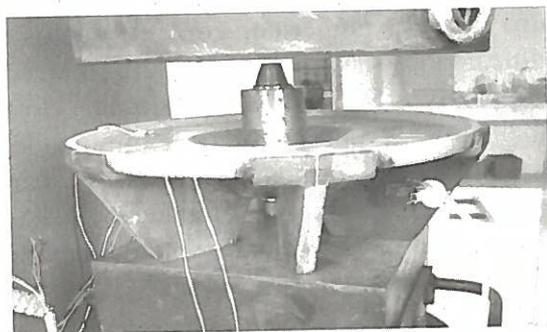


Fig. 9 - Prato instrumentado



Fig. 10 - Roseta de extensómetros

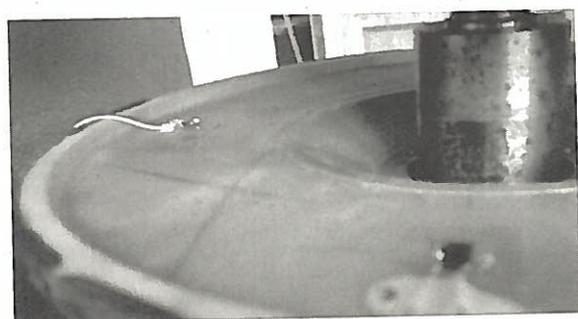


Fig. 11 - Extensómetros na casca em vidro

O sistema de amplificação utilizado foi o *Spider8* da Hottinger Baldwin Messtechnik controlado a partir do *software Spider8 Control*. Este sistema é controlado a partir de uma unidade de PC.

### 1.3 Comparação dos resultados

As deformações radiais, calculadas em ANSYS, estão representadas nas figuras 12 e 13. O extensómetro ExA está colocado no prato a uma distância de 105mm do centro e o extensómetro ExB a 110mm.

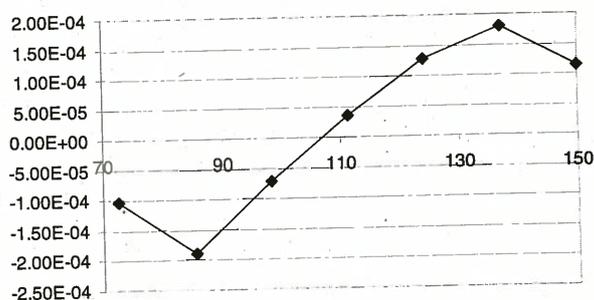


Fig. 12 - Variação da deformação, do extensómetro ExA, ao longo do raio

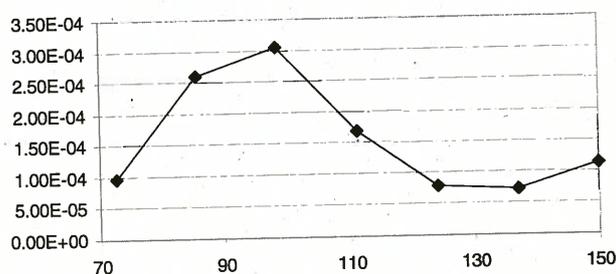


Fig. 13 - Variação da deformação, do extensómetro ExB, ao longo do raio

Verifica-se que os valores variam significativamente com o raio. É por isso importante ter em conta neste tipo de medições aspectos tais como a localização exacta dos extensómetros e a medição em vários pontos do modelo, de modo a evitar resultados influenciados pelos efeitos locais. Notou-se também uma variação significativa dos resultados numéricos com a variação da localização do ponto a medir.

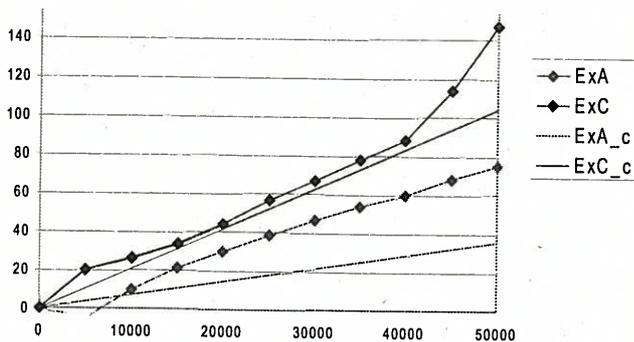


Fig. 14 - Comparação dos resultados experimentais e numéricos: carga em [N] versus microdeformações

Na figura 14 o índice “c” corresponde aos valores calculados em ANSYS. Verifica-se uma linearidade nos valores dos resultados (experimentais e numéricos) bem como uma boa aproximação entre os declives das rectas. ExB e ExB\_c não foram coincidentes com os resultados da figura 14, no entanto a maior diferença em termos de resultados foi verificada entre ExD e ExD\_c., facto que deverá ser estudado mais em pormenor. A tensão equivalente máxima na parte do aço é 185MPa e na parte de liga de alumínio é 100MPa, as tensões no material compósito não se aproximaram dos valores de rotura, mas a curva ExC pronunciou o declive acima de determinada carga, situação que também carece de um estudo mais pormenorizado.

## CONCLUSÕES

Verificou-se nesta primeira abordagem do problema que alguns dos resultados experimentais tiveram uma aproximação aceitável com o cálculo numérico, houve no entanto outros que não se aproximaram. Esta situação carece de um estudo mais detalhado. É no entanto possível concluir o seguinte: (i) a informação tirada da experimentação é muito restringida e é passível de ser

influenciada pelos efeitos locais de medição; (ii) uma malha de elementos finitos grossa, distorce os resultados, facto que não ajudou a alcançar resultado mais concretos em zonas como os reforços verticais.

Em futuro desenvolvimento, além de uma análise detalhada dos resultados apresentados neste trabalho, há que desenvolver a criação paramétrica do modelo sólido de modo a facilitar modificações na geometria e na própria malhagem. Esta, mais pormenorizada nas zonas críticas. Um estudo de sensibilidade dos resultados apresentados das propriedades mecânicas é também uma parte indispensável de futuros trabalhos a realizar. Outras conclusões têm que ser tiradas do outro modelo numérico, com elementos de multicamada na zona de materiais compósitos. Só após conclusão destes trabalhos será possível dar continuidade a este estudo em termos de análise de carga dinâmica e apoios de fundação elástica correspondente à reacção do solo ou na areia.

## REFERÊNCIAS

- ANSYS 5.7 Documentation, Swanson Analysis Systems IP, Inc., 2000.
- Daniel I. M., Ishai O., Engineering Mechanics of Composite Materials, Oxford University press, 1994.
- Reddy, J. N., Mechanics of Laminated Composite Plates, CRC Press, 1997.
- Travassos et al, Reinforced Shells Made of Hybrid Epoxy Composites, Recent Advances in Experimental Mechanics, Lisbon, 1994.
- Travassos, J. M., Produção de Materiais Compósitos de Elevado Desempenho Mecânico, IST, 1994, 349fl