

INDENTAÇÃO DE COMPÓSITOS DE APLICAÇÃO NAVAL

Sutherland, L. S.¹; Santos, F.M.²; Guedes Soares, C.³

¹Bolseiro de Pós-Doutoramento, ²Bolseiro de Investigação, ³Professor Catedrático
Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval, IST, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
Tel: +351 218 417 468 / uetn@mar.ist.utl.pt



RESUMO

O estudo do fenómeno de indentação é necessário à modelação da resposta ao impacto de peças laminadas de compósitos utilizados na indústria naval. Para isso, realizam-se testes de indentação em laminados de poliéster reforçado a fibra de vidro tipo E com uma baixa relação fibra/volume. Uma lei de contacto Hertziana descreveu satisfatoriamente a resposta inicial, mas a obtenção de parâmetros foi extremamente sensível ao reduzido número de pontos incluído na amostragem inicial. Para cargas elevadas, a resposta demonstrou adquirir um carácter linear à medida que os danos se tornam significativos. Apesar da significativa baixa relação fibra/volume, laminados com fibras de disposição aleatória (CSM) exibiram um valor ligeiramente superior da rigidez de contacto relativamente aos laminados reforçados a fibras de tecido bi-axial (WR).

1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos são, presentemente, o material de construção de eleição para embarcações de recreio, e a sua aplicação encontra-se em franco crescimento na indústria pesqueira e em meios militares navais. Na maior parte das construções as configurações dos laminados tem como base o poliéster reforçado a fibra de vidro tipo E com uma baixa relação fibra/volume, quer em mantas de fibras dispostas aleatoriamente, “*chopped-strand mat*” (CSM) quer em tecidos de configurações biaxiais (0°/90°), “*woven-roving*” (WR). As vantagens principais destes “compósitos marítimos” são a facilidade de construção de formas complexas com dupla curvatura, boa resistência à corrosão, resistência a ataques de carácter bacteriano e elevadas propriedades específicas do material. Contudo, estes materiais são bastante susceptíveis aos danos provocados por

impacto transversal, que podem ocorrer durante o processo de construção (ex: queda de ferramentas ou impactos ocorridos na movimentação do casco em estaleiro) ou durante o período operacional da embarcação (ex: colisões com outras embarcações, cais de atracação, objectos flutuantes e numa situação de encalhe). Todas estas situações poderão ser consideradas como impactos de baixa energia.

A resposta destes compósitos navais ao impacto é referida por Sutherland e Guedes Soares (2004). Este trabalho recorre à utilização de uma máquina de impacto por queda de peso, que regista dados na forma de Força de Impacto vs. Tempo; os quais são posteriormente integrados de forma a determinar o deslocamento da cabeça de impacto. O *deslocamento* medido da cabeça de impacto (δ) é determinado com base na soma da *deformada* da placa (w) e do valor da *indentação* (α) (ver Fig 1).

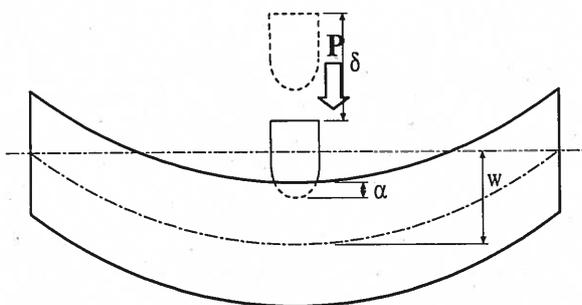


Fig 1 Força de Impacto (P), Deslocamento (δ), Indentação (α) e Deformada (w)

Para compósitos marítimos enriquecidos em resina, a indentação poderá assumir valores consideráveis na determinação da resposta de placas de rigidez elevada, sendo necessária a sua inclusão em qualquer modelo de impacto.

A força de contacto, P, é frequentemente relacionada com a indentação através da Lei de Hertz (Johnson 1985, Gladwell 1980 Timoshenko 1970, Abrate 1998), a qual caracteriza de forma satisfatória o comportamento de laminados de resina époxada reforçados a carbono e fibra de vidro (Yang and Sun 1982, Tan and Sun 1985 Wu and Shyu 1993):

$$P = n\alpha^{3/2} \quad (1)$$

Para um indentador esférico, e isotrópico, actuando num painel compósito isotrópico no seu plano transversal (Conway and Agnew 1956, and Shivakumar et al. 1985):

$$n = \frac{4\sqrt{R_I}}{3\pi(K_1 + K_2)} \quad (2)$$

onde K_1 e K_2 representam constantes dependentes do indentador e das propriedades mecânicas do painel compósito, respectivamente.

Shivakumar et al. (1985) definiram expressões para a determinação de K_1 e K_2 . Contudo, para a determinação de K_2 a expressão envolve alguma complexidade onde se incluem propriedades do material como rigidez de corte interlaminar, que é consideravelmente difícil de quantificar com precisão. Adicionalmente, os laminados em tecido WR afastam-se consideravelmente do pressuposto de isotropia transversal e as dimensões dos

filamentos interlaçados são relativamente significativas comparativamente às dimensões do indentador, tornando ainda mais difícil a adaptação destas variáveis aos pressupostos da teoria. Ensaios de impacto demonstraram que este tipo de laminados delaminam para forças de impacto de valor baixo (Sutherland e Guedes Soares 2004). Compósitos marítimos são fabricados manualmente e, frequentemente, muito abaixo das condições recomendadas para a sua produção, implicando uma variabilidade da qualidade.

Desta forma, uma abordagem experimental é aqui apresentada para a definição dos dados das forças para indentação a serem usados nos ensaios de impacto. Foram realizados ensaios de indentação quasi-estática usando uma plataforma de ensaios servo-hidráulica descrita por Sutherland et al (2004). Esta série de ensaios foi a primeira a ser efectuada usando a referida plataforma, servindo também para a exploração das capacidades deste equipamento experimental.

2. EXPERIMENTAÇÃO

O método de produção dos laminados usados nos ensaios de impacto é exactamente igual ao utilizado no presente estudo. Painéis de 30 camadas de tecido bi-axial de 500g/m^2 (WR: 50% de peso em fibra relativamente ao peso total ou 0.35 na razão fibra-volume total) e 20 camadas de manta a 450g/m^2 (CSM: 33% de peso em fibra relativamente ao peso total ou 0.20 na razão fibra-volume total). Painéis em fibra de vidro tipo E e resina poliéster isoftálica foram fabricados manualmente usando 1, 2 e 3% de acelerador, catalisador e parafina, respectivamente, a uma temperatura ambiente compreendida entre 18 e 21 graus Celsius. Os painéis foram deixados a curar por um período não inferior a 2 meses à temperatura ambiente anteriormente referida. Os provetes foram posteriormente cortados por uma serra circular com dentes de diamante.

Testes de indentação quasi-estáticos foram realizados usando a máquina de

ensaios servo-hidráulica descrita em Sutherland et al. (2004). Os provetes foram apoiados num espesso bloco de aço e foram actuados por indentadores cilíndricos com extremidade hemisférica de raios (R_1) 5mm, 10mm e 15mm, impondo uma razão tempo/deslocamento constante no processo de penetração da superfície. Uma razão de 15 s/mm foi adoptada em todos os ensaios.

Força e deslocamento foram medidos usando uma célula de carga de qualidade elevada (carga máxima de 6 toneladas) e um potenciómetro linear associado ao indentador, respectivamente. Assim que o limite da célula de carga era alcançado, o sentido do deslocamento era invertido para elevar o indentador do laminado a uma razão tempo/deslocamento aproximadamente igual àquela inicialmente imposta. A configuração experimental pode ser observada na Fig 2.

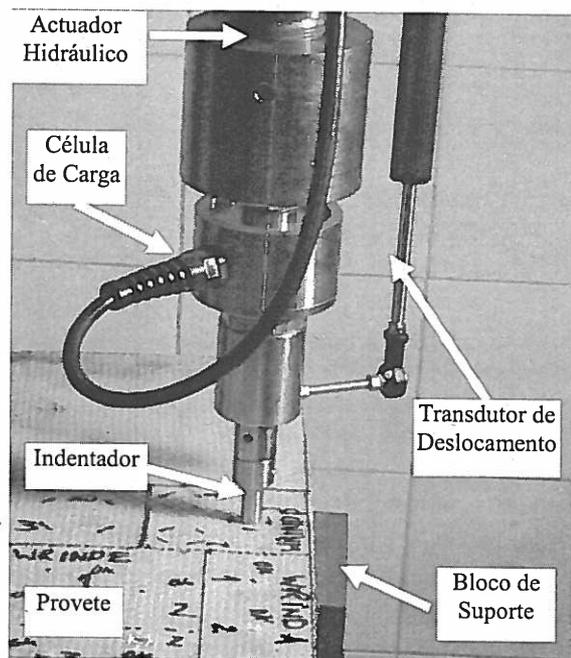


Fig 2 Configuração Experimental

Deve-se notar que a geometria dos ensaios de indentação difere ligeiramente dos testes de impacto. Nestes a flexão progressiva dos provetes é gerada numa área de contacto superior. Alguns investigadores como Tan and Sun (1985), realizaram uma réplica da flexão adquirida medindo o movimento do indentador relativamente à face posterior, por forma a

determinar a indentação. Contudo, no presente estudo, esta abordagem não é assumida como vantajosa, face às seguintes razões: a flexão é mais significativa em provetes de espessura reduzida, onde a existência de uma curvatura na face posterior torna o método impreciso; a indentação é mais significativa para provetes de maior espessura e rigidez, onde as dimensões se aproximam mais do material a ensaiar; a medição de deslocamentos muito pequenos induzirá falta de precisão, que será acrescida pela medição da alteração de posição da face posterior do painel relativamente à posição do indentador. Além disso, a irregularidade da superfície dos laminados a ensaiar provavelmente introduzirá maiores desvios comparativamente à geometria ideal, tornando os efeitos anteriormente referidos insignificantes.

Os registos foram amostrados a 20 Hz, e a plataforma de ensaios operou sob controlo de deslocamento, aplicando ao transdutor um filtro passa-baixo, a 1 Hz, durante o ciclo de controlo. Os registos dos sinais não foram filtrados para os dados força-tempo e deslocamento-tempo, tendo sido estes dados filtrados posteriormente com recurso a um filtro discreto Butterworth com base numa folha de cálculo preparada para o efeito. O ruído foi removido sem a perda de informação significativa usando um filtro de dados a 1 Hz.

3. PROCESSAMENTO DE DADOS

Apresenta-se na Fig 3 um exemplo comparativo entre dados originais e filtrados para força-tempo e deslocamento-tempo. Contudo, observa-se que apesar das forças e deslocamentos serem mais que aceitáveis, existem algumas limitações no que diz respeito ao controlo do ensaio, fundamentalmente devido às dimensões generosas e do baixo custo do actuador hidráulico. Podem-se observar pequenas flutuações da carga, provenientes de impulsos de pressão induzidos pelo sistema de potência hidráulica. Será de esperar que o sistema de controlo tenha um comportamento bastante superior na

eliminação destes impulsos de pressão, se for usado um actuador de menores dimensões e com melhor qualidade.

Um acontecimento significativo foi observado em todos os ensaios, consistindo no facto de que a função de ajustamento potencial aplicada inicialmente, definindo a razão de crescimento do registo força-tempo (e consequentemente deslocamento-tempo), não se mantém "estável", ocorrendo, após os segundos iniciais, algo que diminui esta razão de crescimento. Este acontecimento caracteriza o fenómeno de delaminação que ocorre face ao desenvolvimento das tensões de corte no espécime; na Fig 3 pode observa-se este acontecimento aproximadamente aos 24 segundos (pormenor A).

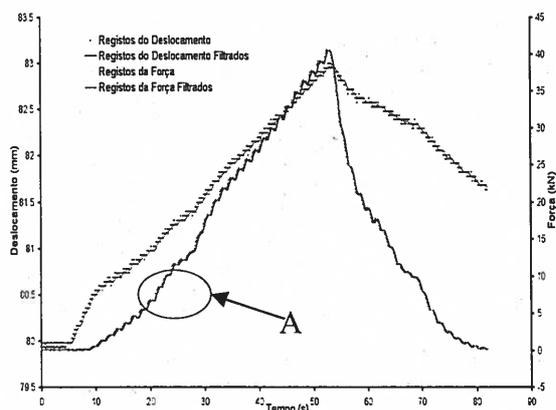


Fig 3 Exemplo de Registos Força-Tempo e Deslocamento-Tempo

Apesar da realização física dos ensaios ter um carácter simples, os resultados experimentais demonstraram ser extremamente sensíveis ao processamento de dados, em especial no que se refere à determinação exacta do instante de tempo, e deslocamento, onde ocorre o primeiro contacto entre provete e indentador. Na fase inicial do ensaio, pode-se facilmente identificar, por observação cuidada dos dados experimentais força-tempo, como será explicado adiante, que a subsequente aplicação de uma regra de potenciação, referida na equação (1), é extremamente sensível aos valores dos poucos pontos registados inicialmente. O sinal do registo da força durante o período em que não

existe carregamento é relativamente estacionário, com um ligeiro desvio da origem que advém dos ensaios e da existência de ruído; contudo, o sinal manteve-se sempre numa banda de ± 0.05 kN. Desta forma, o desvio da origem foi estimado e aplicado ao tratamento de dados assumindo-se que o contacto inicial ocorreria quando o carregamento ultrapassasse os 0.05 kN (ver Fig 4). Deveras importante, é o facto deste ponto indicar o valor para o qual o deslocamento é considerado nulo para a determinação do valor da indentação.

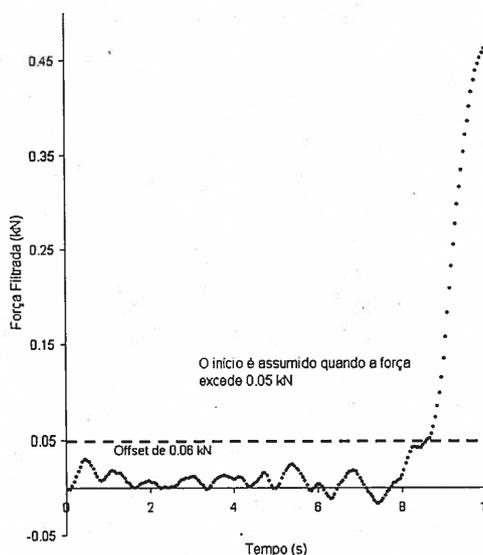


Fig 4 Início de Contacto

Uma grande quantidade de programas informáticos adapta directamente uma função potencial aos dados de força-indentação, mas é importante o reconhecimento das implicações estatísticas deste processo. No entanto, é de longe, mais seguro realizar um a regressão linear dos dados num formato log-log, ou seja logaritmo vs logaritmo. As razões que justificam a anterior afirmação poderão ser melhor observadas recorrendo ao exemplo apresentado na Fig 5.

Os mesmos registos são usados em ambos os diagramas, as diferenças entre a Fig 5(a) e a Fig 5(b) está nos dados que foram seleccionados para aplicação da regressão linear. Em ambos os casos, um pertinente limite superior corresponde à alteração da

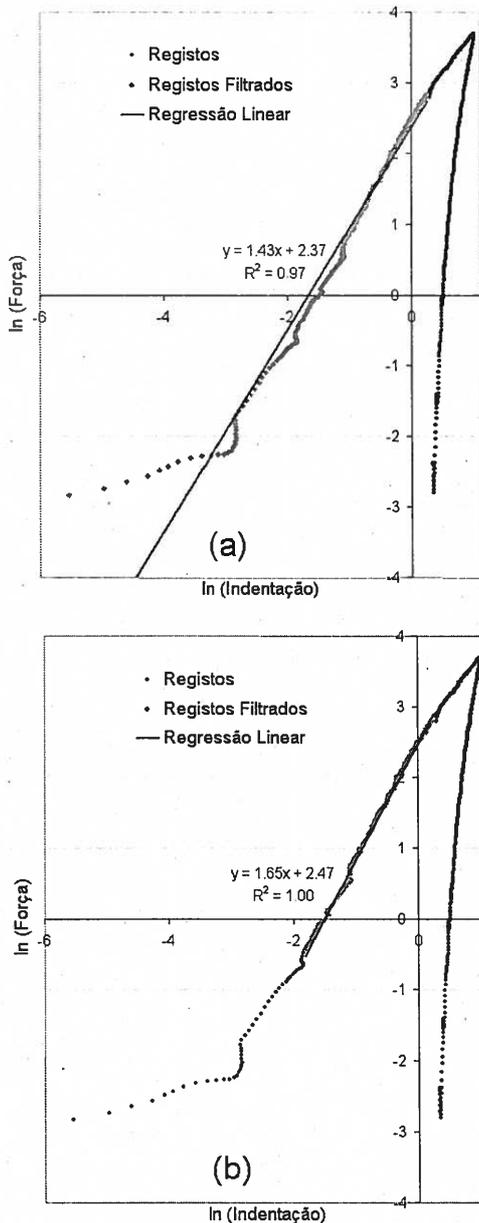


Fig 5 Diagrama Ln-Ln para Ajustamento segundo Função de Ajustamento Potencial

razão de crescimento da força quando a delaminação ocorre. Isto é reflectido nos gráficos por uma alteração para um segunda secção linear com declive inferior após o $\ln(\text{Força})$ adquirir um valor ligeiramente inferior a 3.

De facto, uma vantagem adicional na utilização de diagramas $\ln-\ln$ é que se torna mais fácil a identificação destas alterações de comportamento comparativamente ao diagrama equivalente força-indentação. A ambiguidade reside, contudo, na definição do ponto de partida para a regressão linear. Pode ser observado que a forte tendência para a linearização dos dados não se alastra

para valores de força e deslocamento baixos. Isto é devido a alguns efeitos, tais como: o facto de que o início do contacto será assumido, por necessidade, para um valor de força de 0.05 kN, induzindo um pequeno desvio da origem; o aumento de importância em termos de resolução no que diz respeito a valores muito baixos de força e deslocamento; a rugosidade associada à superfície dos provetes; e o facto de que a camada de superfície ser mais enriquecida em resina comparativamente às camadas interiores. Todos estes factores, quando considerados perante a gama de forças e indentações a ser usadas nos ensaios aparentam ter uma influência reduzida, mas têm consequências importantes no ajustamento de uma regra de exponenciação.

Como a regressão linear, aplicada à regra de potenciação referida na equação (1), é realizada sobre dados logarítmicos, o *leverage* estatístico adquire uma importância acrescida. Isto significa que os dados afastados da região central da amostra terão uma contribuição desproporcionada, induzindo um efeito significativo na regressão linear pretendida. Para o presente estudo, o facto de se trabalhar no domínio logarítmico afasta da região central da amostragem os dados de valores mais reduzidos, quer da força quer de indentação, aumentando drasticamente a sua influência no ajustamento da tendência linear. Para ilustrar este facto, na Fig 5(a) todos os dados até ao instante da delaminação foram usados no cálculo da regressão por outro lado, na Fig 5(b) os menores valores de força e indentação que se desviassem da tendência linear foram excluídos.

Esta abordagem causa uma alteração dramática nas expressões que definem o ajustamento, com cerca de 15% de diferença de declive para o caso referido no exemplo. Valerá a pena referir que o coeficiente de correlação, apesar de ser ligeiramente inferior ao da Fig 5(b), é bastante alto para ambos os casos. Contudo a decisão da escolha do ponto inicial para o ajustamento dos dados é potencialmente

uma fonte de subjectividade, sendo obviamente onde se considera o início da secção linear.

O tema da 'leverage' estatístico também define a razão pela qual a decisão sobre o ponto de contacto inicial é tão importante. Estes efeitos poderão ser reduzidos face a um aumento da resolução nas medições para valores baixos de força e indentação.

Desta forma, para reduzir o ruído e limitações na resolução foram realizados ensaios com uma célula de carga com uma capacidade de actuação de 500 kg, isto é mais precisa face às alternativas disponíveis. Como esperado, esta alteração aumentou substancialmente a resolução das leituras das forças a valores baixos, mas limitou o alcance do ensaio de indentação. Para além disto, surge um constrangimento sob a forma de limitações na resolução do transdutor de deslocamento, que evidenciou as limitações do actuador hidráulico em utilização. Está planeada, em trabalho futuro, a utilização de uma célula de carga de 500 kg em conjunto com um transdutor de deslocamento e um actuador hidráulico de qualidade superior, e também de menores dimensões, de forma a investigar com mais detalhe este aspecto.

Contudo, para a grande maioria de ensaios, com base no domínio de aplicação da força, os erros que advêm da não utilização dos primeiros registos para o processo de ajustamento são insignificantes.

Demonstra-se na Fig 6 e Fig 7 (equivalentes à Fig 5) que para valores extremamente reduzidos de força e da indentação, se obtêm melhores resultados na regressão quando são ignorados os primeiros registos.

Durante o processamento dos registos experimentais cujos resultados são apresentados na próxima secção, foi usado o método anteriormente descrito de forma a ajustar uma regressão linear aos dados logarítmicos.

Este frequentemente resulta no expoente próximo, mas não exactamente igual a 1.5, como previsto pela equação (1). No entanto, como se pode demonstrar noutro

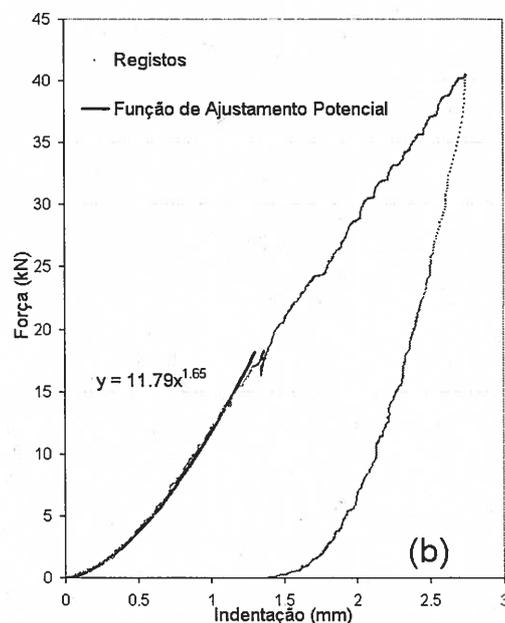
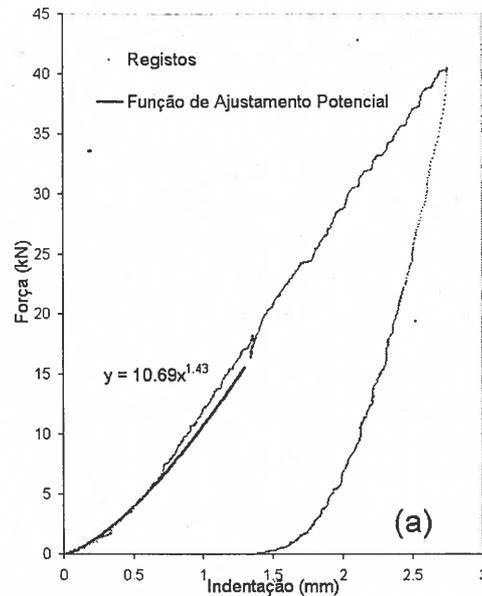


Fig 6: Diagramas Força-Indentação com Funções Potenciais de Ajustamento Alternativas

exemplo, Fig 8, o método de fixar o valor do expoente em 1.5 e ajustar iterativamente o valor de n pode também conduzir a um ajustamento bastante bom. Contudo, este último método não foi utilizado de forma a reduzir a subjectividade no processamento de dados.

4. RESULTADOS

Como exemplo dos resultados obtidos, a Fig 9 mostra os registos dos ensaios de um laminado em tecidos (WR) sujeitos ao car-

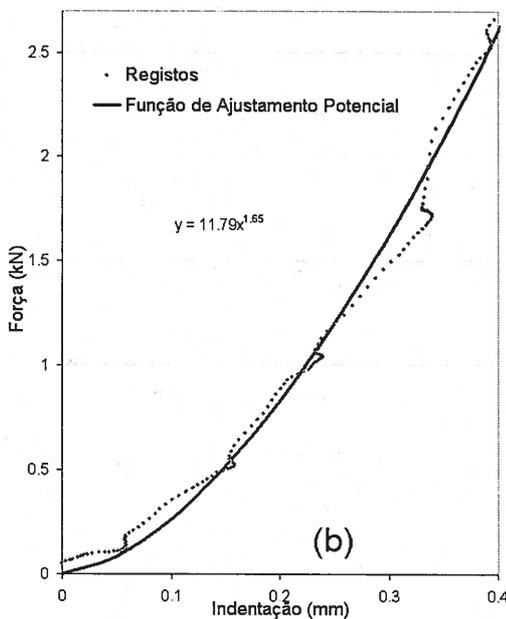
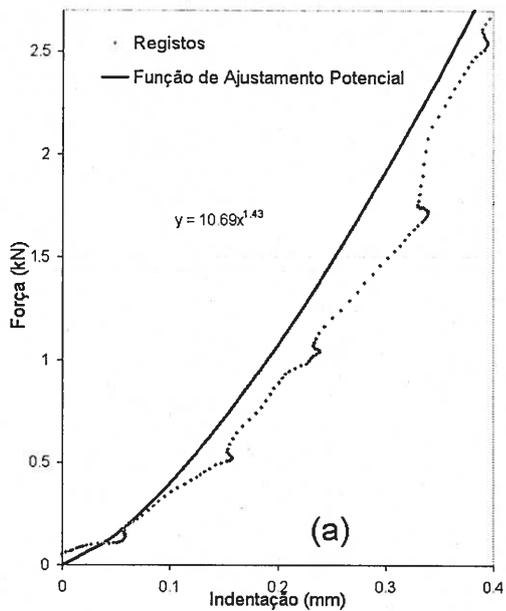


Fig 7: Diagramas Força-Indentação com Funções Potenciais de Ajustamento Alternativas para Fase de Contacto Inicial

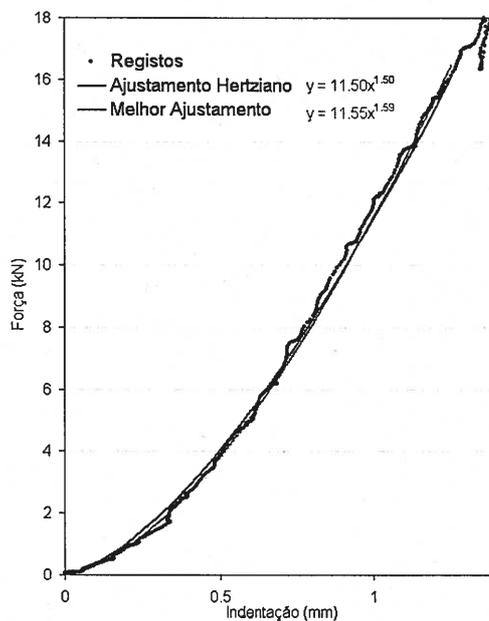
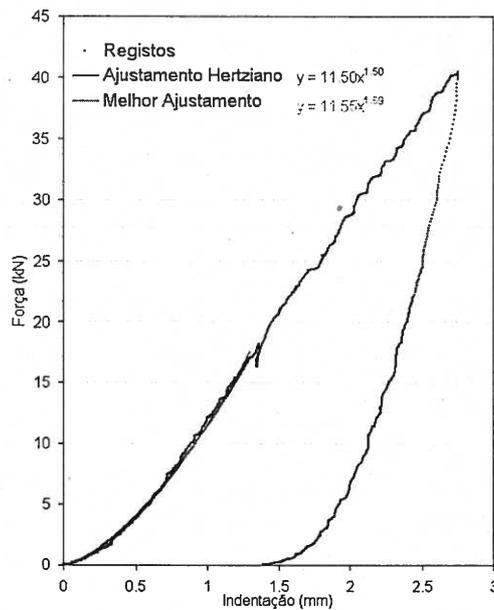


Fig 8: Ajustamentos Hertziano e por Regressão Linear

regamento induzido por a uma cabeça de indentador com 200mm de diâmetro. Observa-se nos vários ensaios um comportamento com uma semelhança elevada. A baixas forças de contacto o melhor ajustamento para uma função potencial dá um valor de 1.58 para o expoente. Este valor é consideravelmente próximo de 1.5 previsto pela Lei de Contacto de Hertz, tendo em conta o facto de que os tecidos (WR) não são isotrópicos transversalmente.

No entanto, a lei de contacto de Hertz não prevê o comportamento da indentação a forças de contacto elevadas. A forças de contacto relativamente baixas, a razão de incremento da força com a indentação diminui. De facto, um ajustamento linear nesta zona demonstra um resultado bastante aceitável, justificado por um valor de R^2 igual a 1.00. Pensa-se que a mudança de comportamento se deve ao facto dos danos do laminado passarem a ser significativos, e mais especificamente quando ocorre a delaminação.

A Fig 10 apresenta um exemplo do comportamento registado nos ensaios de um laminado constituído por manta (CSM) sujeita à acção de um indentador de 20mm de diâmetro. Os efeitos da variabilidade do material são evidentes na variação das respostas força-indentação entre provetes. Contudo, e novamente a forças de contacto baixas, o expoente determinado para o melhor ajustamento da função potencial adquire o valor 1.42, estando próximo de 1.5 como previsto na lei de contacto Hertziana, mas para valores mais elevados de forças de contacto pode ser observada uma relação linear durante a danificação do laminado.

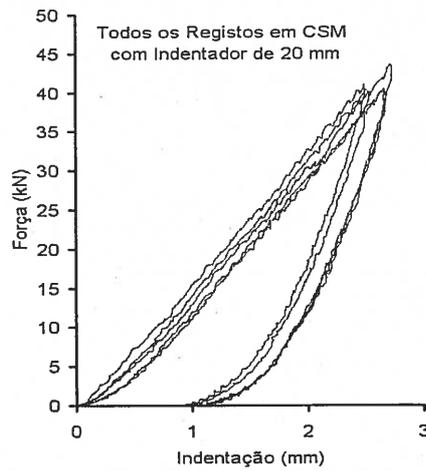
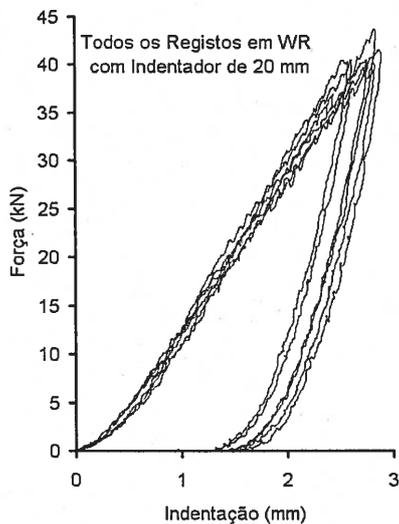


Fig 10: Exemplo de Resultados Experimentais num Laminado de Mantas (CSM)

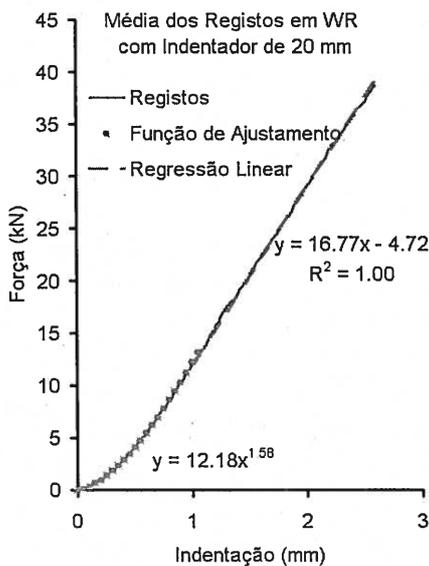


Fig 9: Exemplo de Resultados Experimentais num Laminado de Tecidos (WR)

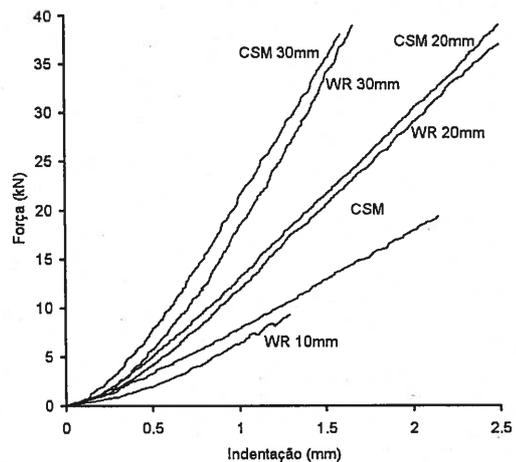


Fig 11: Comparação dos Comportamentos Laminado-Indentador

As médias dos comportamentos registados para todas as combinações laminado-indentador ensaiadas são

comparadas na Fig 11 e o conjunto de resultados resumidos na Tabela 1.

Em geral, os coeficientes de variação dos parâmetros determinados para a função potencial são relativamente elevados, reflectindo alguma sensibilidade ao ajustamento como referido anteriormente. Isto, combinado com o facto de que o meio da escala dos expoentes é 1.5, indica que um contacto Hertziano poderá ser usado para descrever o comportamento a forças de contacto de valor reduzido.

Tabela 1: Sumário dos resultados

	CSM	CSM	CSM	WR	WR	WR
Diâmetro do Indentador (mm)	10	20	30	10	20	30
Número de Ensaios	3	5	3	3	6	3
n Médio (kN/mm ^{1.5})	7.82 (5)	13.25 (11)	21.74 (4)	5.95 (9)	12.18 (11)	18.82 (10)
Expoente Médio	1.29 (8)	1.42 (17)	1.53 (6)	1.52 (1)	1.58 (6)	1.76 (7)
Final Hertziano (kN)	11.8 (2)	11.0 (2)	12.0 (8)	-	13.08 (19)	11.6 (3)
Declive Linear (kN/mm)	9.92 (2)	17.22 (1)	28.58 (2)	-	16.80 (5)	30.54 (4)

Números em parêntesis representam os coeficientes de variação expressos em %

Os valores dos expoentes para os laminados em tecido (WR) são consistentemente mais elevados do que para os laminados em manta (CSM), e o oposto é verdade para os coeficientes n. O efeito generalizado é de que os gráficos obtidos para os laminados em manta, Fig 11, são ligeiramente superiores, e mais linearizados, do que os obtidos para os laminados em tecido. Apesar do conteúdo de fibra ser baixo os laminados em manta aparentam ter uma rigidez, em termos de contacto, ligeiramente superior comparativamente aos laminados em tecido. Geralmente uma maior percentagem de fibra no volume do laminado daria um valor superior para o módulo de elasticidade, conseqüente-mente seria de esperar um valor também superior para a rigidez de contacto, contudo os ensaios não comprovam este facto.

O coeficiente n cresce com o raio do indentador, mas a Fig 12 demonstra que a variação de n² com o raio do indentador não é linear, como previsto pela equação (1). De facto, n aparenta variar linearmente com o raio do indentador. O valor do expoente obtido com base na função de ajustamento potencial também aumenta com o raio do indentador.

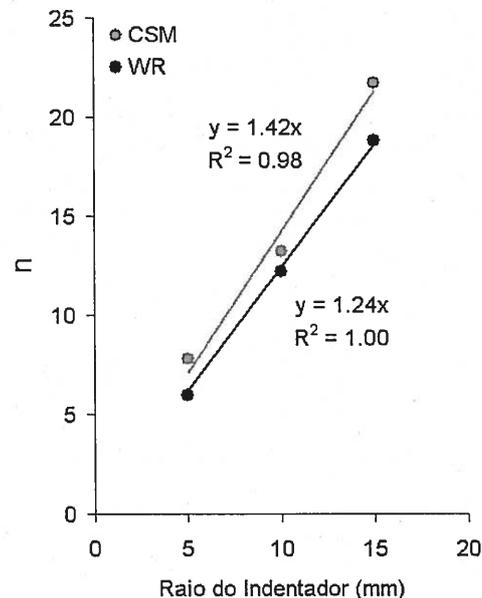
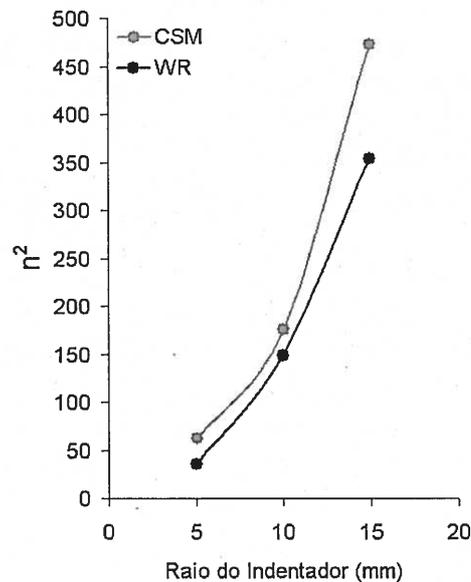


Fig 12: Variação do Coeficiente n da Função de Ajustamento Potencial com Raio do Indentador

A força a que o comportamento Hertziano termina, assim que se julga ocorrer delaminação, em que o dano é significativo, é aproximadamente constante para todos os

laminados com todos os raios disponíveis de indentadores. O coeficiente de variação é geralmente baixo para esta força. Uma exceção é o ensaio de um laminado em tecido WR sujeito a um indentador de 20mm de raio, face à ocorrência de um valor excepcionalmente elevado que provavelmente surgiu face a uma anomalia do material. No caso do laminado em tecido WR sujeito a um indentador de 10mm de raio, os ensaios não foram elaborados de forma a sujeitar o material a carregamentos suficientemente elevados para alcançar o final do domínio de aplicação do comportamento Hertziano.

O declive do comportamento linear, observado a forças de contacto elevadas, demonstra notavelmente uma baixa variabilidade, justificada por baixos valores dos coeficientes de variação. O declive aparenta um crescimento quase linear com o aumento do raio do indentador, mas varia pouco entre os laminados reforçados a tecido WR e manta CSM.

5. CONCLUSÕES

Foram realizados ensaios quasi-estáticos em laminados de poliéster reforçado a fibra de vidro tipo E com baixa razão fibra-volume. Utilizaram-se indentadores com extremidades hemisféricas com diâmetros 10, 20 e 30mm, quer em laminados reforçados a manta (CSM- Chopped Strand Mat) quer reforçados a tecidos (WR-Woven Roving).

Uma lei de contacto Hertziana caracterizou bem a resposta inicial; no entanto o incremento de rigidez com o aumento do raio do indentador não foi bem caracterizado pela teoria.

A forças elevadas, a resposta tornou-se linear à medida que os danos se tornavam significativos. Esta danificação ocorreu aproximadamente à mesma força de contacto, independentemente do tipo de reforço do laminado, tal como do raio do indentador.

Apesar da razão fibra-volume ser significativamente baixa, os laminados reforçados a manta exibiram uma ligeira

superioridade na rigidez de contacto comparativamente aos laminados reforçados a tecido.

A obtenção dos parâmetros numa função de ajustamento potencial demonstrou ser extremamente sensível ao reduzido número de registos iniciais, e um cuidado extra é necessário na determinação do início do contacto. É necessário estudar melhor o contacto inicial a forças e indentações de valor reduzido.

6. RECONHECIMENTO

O presente trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento plurianual atribuído à Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval.

O primeiro autor foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através da bolsa com a referência SFRH/BPD/1568/2000.

7. REFERÊNCIAS

- Sutherland L.S. and Guedes Soares G. "Impact characterisation of marine composites." *Actas do 5º Encontro Nacional de Análise Experimental de Tensões e Mecânica Experimental*, Universidade de Coimbra 21-23 January 2004.
- Johnson K.L. "Contact Mechanics". *Cambridge University Press*, 1985.
- Gladwell G.M.L. "Contact problems in the classical theory of elasticity". *Sijthoff and Noordhoff*, 1980
- Timoshenko S.P. and Goodier J.N. "Theory of Elasticity". *McGraw-Hill*, 1970.
- Abrate S. "Impact on Composite Structures". *Cambridge University Press*, 1998.
- Yang S.H. and Sun C.T. "Indentation law for Composite Laminates". *ASTM STP 787*, 1982 p. 425-449
- Tan T.M. and Sun C.T. "Use of statical indentation laws in the impact analysis of laminated composite plates." *Trans. ASME* 1985; 52:6-12.
- Wu E. and Shyu K. "Response of Composite Laminates to Contact Loads and Relationship to low-velocity Impact". *J. Composite Materials* 1993;27(15):1443-1464

Conway H.D. and Agnew Z. "The Pressure Distribution Between Two Elastic Bodies in Contact". *J. Mathematics and Physics* 1956;7:460-465.

Shivakumar K.N., Elber W. and Illg W. "Prediction of impact force and duration due to low-velocity impact on circular composite laminates". *J. Appl. Mech.*; 52:674-680, 1985.

Sutherland L.S., Rodrigues, B. e Guedes Soares G. "Projecto e activação de um pórtico com actuador hidráulico para ensaios de estruturas" *Actas do 5º Encontro Nacional de Análise Experimental de Tensões e Mecânica Experimental*, Universidade de Coimbra 21-23 Janeiro 2004.

