

Modelo analítico de impacto em material composto aplicado ao projeto de capacetes

Analytical Model of composite material impact behaviour applied to helmet design

João Gustavo Pereira da Silva

Graduando em Engenharia de Materiais –
Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC
Florianópolis – SC
joagops@gmail.com

Karen Possoli

Graduanda em Engenharia Mecânica – Departamento
de Engenharia Mecânica – UFSC
Florianópolis – SC
k.possoli@gmail.com

Emanuel B. Ribeiro

Graduando em Engenharia Mecânica – Departamento de
Engenharia Mecânica – UFSC
Florianópolis – SC
manu_ribeiro84@hotmail.com

Paulo Arruda Jr.

Graduando em Engenharia Mecânica – Departamento de
Engenharia Mecânica – UFSC
Florianópolis – SC
paulorpaj@gmail.com

Guilherme Mariz de Oliveira Barra

Professor do Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC
Florianópolis – SC
guiga@emc.ufsc.br

Hazim Ali Al-Qureshi

Professor do Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC
Florianópolis – SC
alhazim@emc.ufsc.br

Neste trabalho foram analisadas matematicamente as energias e tensões necessárias para causar dano permanente à superfície de um capacete em escala fabricado em materiais compósitos. Os capacetes confeccionados a partir da laminação de resina epóxi com fibras de vidro, Kevlar, carbono ou juta foram submetidos a um ensaio de impacto baseado na norma Snell M2005. Os resultados experimentais foram confrontados com os previstos pelo modelo matemático proposto. Observou-se, a partir da tendência dos resultados que o comportamento do material pode ser previsto de modo satisfatório pelo modelo proposto nas condições testadas.

Palavras-chave: Capacetes. Ensaio de queda livre. Materiais compósitos. Modelo matemático.

In this work, the energy and stress necessities to cause permanent damage to a small-scale helmet surface made by composite materials have been investigated. The helmets made by lamination of epoxy resin with glass, Kevlar, carbon and jute fibers were submitted to an impact test based on the Snell M2005 testing procedure. The experimental results were paired up with the predicted values by the mathematical model. From the tendency observed on the result data, the material behaviour can be predicted successfully by the proposed model at the tested conditions.

Key words: Composite Materials. Drop-weight test. Helmet. Mathematical Model.

1 Introdução

Hoje em dia, novas aplicações exigem um nível elevado de segurança dos produtos, aliados a um baixo peso para a melhora de seu desempenho, como em automóveis e aeronaves. O esforço dispendido no desenvolvimento de itens de segurança como o capacete e as células de sobrevivência vem aumentando a expectativa de vida em acidentes que outrora eram fatais. Os materiais compósitos tem papel importante nesse contexto, já que com o uso dos mesmos, é possível obter-se altas resistências específicas, com redução significativa de densidade.

O capacete é um equipamento de uso obrigatório para condutores e passageiros de motocicletas. Seu uso é essencial, sendo uma peça-chave de segurança em caso de queda (LIN; KRAUSS, 2009). Para sua comercialização em território brasileiro, esses equipamentos passam por uma série de testes de qualidade (ABNT, 2001), devendo estar em conformidade com a norma técnica NBR7471/2001 e ser aprovados pelo Inmetro, tendo assim sua eficácia comprovada. Porém tal metodologia de ensaios não prevê a resistência à penetração da carcaça, como nos impactos a alta velocidade contra carregamentos pontuais. Normas internacionais prevêem tais testes (SNELL INC., 2005) e tal inconformidade é uma barreira a exportação de capacetes nacionais.

O método de teste dos capacetes de qualidade internacional se espelha nas normas publicadas pela Snell Memorial Foundation. O teste utilizado neste trabalho é baseado na norma M2005 para capacetes motociclísticos. O modelo matemático a ser desenvolvido visa prever o comportamento do material diante do teste de resistência a penetração da carcaça (Shell Penetration Test). Para a solução do modelo matemático, será utilizado o princípio da conservação da energia, aplicando as aproximações e equações relevantes. Investigações

acerca da resistência de estruturas compostas com impactos a baixas energias já se encontram na literatura (GUALBERTO; TARPANI, 2009), (GUSTIN et al, 2005).

A meta deste trabalho foi analisar o impacto de um projétil em um capacete fabricado com materiais compósitos. Uma análise matemática foi desenvolvida de modo a prever as energias e tensões necessárias para causar dano permanente a superfície do capacete. Para atingir tal meta, corpos-de-prova foram manufaturados em diferentes combinações dos componentes do material compósito e testados no ensaio de queda livre (*drop-weight test*) para a observação da concordância entre os resultados experimentais e as previsões do modelo matemático.

2 Modelo matemático

Considerando o arranjo experimental abaixo baseado no teste Snell de resistência ao impacto (SNELL INC., 2005), um indentador com peso P e de ponta na forma de um cone de 60 graus é solto de uma altura H em direção a casca semiesférica composta, de raio interno r e espessura t (Figura 1).

Na região do impacto, o indentador desloca a posição da calota esférica formada pela área projetada da ponta do indentador na semiesfera por uma altura Δh . A energia cinética do indentador no ponto $H+\Delta h$ é dada pela equação (1):

$$K_{\text{indentador}} = P(H + \Delta h) \quad (1)$$

A energia até a fratura do compósito para que o indentador desloque a calota esférica é dada pela integral dupla da tensão em relação à deformação e ao volume do material, conforme generalizado a partir da análise teórica de Ishikura e Al-Qureshi (1997). Considerando que não há deformação

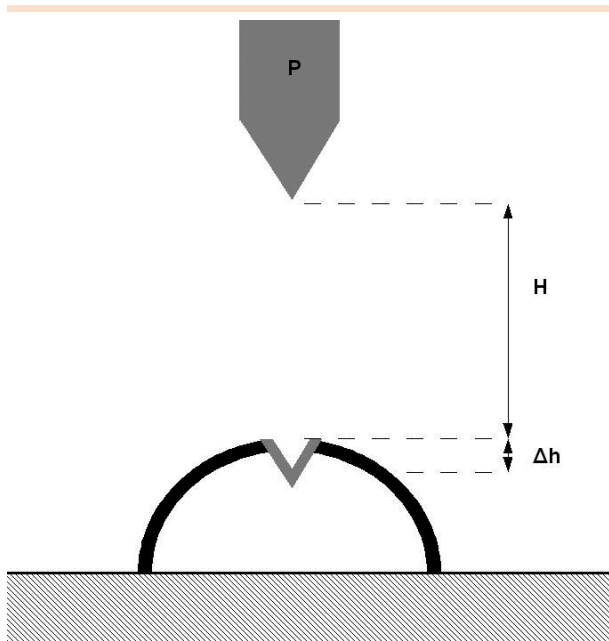


Figura 1: Esquema do arranjo experimental

Fonte: Os autores.

plástica, podemos usar a lei de Hooke para definir uma relação entre tensão e deformação, segundo a equação 2 (GONCALVES et al, 2004):

$$K_{fratura} = \iint \sigma d\epsilon dV \quad (2)$$

Da lei de Hooke: $\epsilon = \sigma/E$, então integrando (2), tem-se:

$$K_{fratura} = \iint E\epsilon d\epsilon dV = \int \frac{E\epsilon^2}{2} dV = \frac{VE\epsilon^2}{2} V \cdot U \quad (3)$$

Onde U é a resiliência do material. Igualando-se (1) e (3) e transformando volume da área em cinza no corpo-de-prova em área A x espessura t, tem-se (4):

$$A \cdot T \cdot U = P(H + \Delta h) \quad (4)$$

A área da região deformada pode ser dada pela área superficial do cone do indutor penetrando a altura Δh . Substituindo a área da região deformada em (4), tem-se (5):

$$U \cdot t = \frac{3P}{2\pi\Delta h^2} (H + \Delta h) \quad (5)$$

Ou seja, tem-se a relação entre características do composto, constantes do ensaio e a altura de perfuração Δh . Portanto, se definirmos das condições de segurança um Δh máximo admissível (Figura 2), há uma relação inversamente proporcional entre a resiliência e a espessura do compósito.

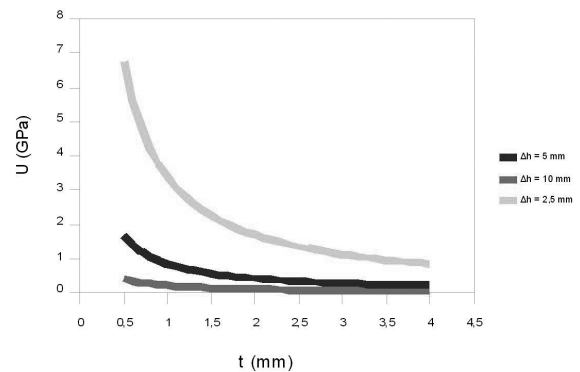


Figura 2: Relação entre a resiliência e a espessura do compósito para diferentes valores de Δh

Fonte: Os autores.

Para conhecer a resistência do material no ensaio de queda livre, é necessário o cálculo da energia até a fratura. O critério de máxima deformação foi utilizado para determinar o momento de falha, sendo que cada microcomponente falha assim que a deformação atingir o valor de sua deformação máxima isoladamente, medida em tração simples.

Portanto, a resiliência é calculada em etapas (6), levando-se em conta o módulo de elasticidade do material a cada intervalo de deformações, já que a medida que os microcomponentes falham, os mesmos tornam-se vazios no compósito. Considerando ϵ_i os valores de deformação máxima das fibras na ruptura de um compósito com n disposições de fibra/orientação diferentes, variando de $i=1$ para a fibra que quebra primeiro até $i=n$ para a n-ésima fibra que quebre por último e ϵ_m o

valor de deformação na ruptura da matriz, que é maior que qualquer ϵ_i , tem-se a seguinte expressão para a resiliência até a ruptura total do compósito:

$$U = \sum_{i=1}^n \int_{\epsilon_{i-1}}^{\epsilon_i} E_i \epsilon d\epsilon + \int_{\epsilon_n}^{\epsilon_m} E_m \epsilon d\epsilon \quad (6)$$

Integrando (6):

$$U = \left[\sum_{i=1}^n E_i \frac{(\epsilon_i^2 - \epsilon_{i-1}^2)}{2} \right] + \frac{E_m(\epsilon_m^2 - \epsilon_n^2)}{2} \quad (7)$$

O módulo de elasticidade longitudinal E_j de cada camada do compósito pode ser calculado através da lei de misturas modificada (CASARIL et al, 2007), (DOTAN; SILVA; AL-QURESHI, 2004), levando-se em conta o módulo de elasticidade das fibras E_p , o módulo de elasticidade da matriz fração volumétrica das fibras no compósito v_p , β , que é o fator de eficiência do alinhamento das fibras, que varia de 0 a 1, sendo por exemplo 1 para compósitos unidirecionais, 0,5 para tecidos e 0,375 para mantas, e λ , que é o fator de adesão entre as fibras e a matriz, variando também de 0 a 1. Assim chega-se na seguinte expressão:

$$E_j = E_{fi} v_{fi} \beta_i + E_m (1 - v_{fi}) \lambda_i \quad (8)$$

A lei das misturas em sua forma integral (DOTAN; SILVA; AL-QURESHI, 2004) também pode ser usada para determinar o módulo de elasticidade do compósito E_j , sendo dados os módulos de elasticidade E_j de cada camada, e t_j , a espessura de cada camada:

$$E_j = \frac{\sum_{j=1}^n E_j t_j}{\sum_{j=1}^n t_j} \quad (9)$$

Substituindo (8) em (9) e a expressão resultante em (7), tem-se:

$$U = \frac{1}{2t} \left[\sum_{i=1}^n \beta_i E_{fi} v_{fi} t_i \epsilon_{fi}^2 \right] + \frac{E_m \epsilon_m^2}{2t} \sum_{i=1}^n (1 - v_{fi}) t_i \quad (10)$$

Com a relação obtida de (10) em (5) (equação 11), pode-se prever a espessura mínima do compósito para resistir um conjunto de velocidades de impacto, ou se definida uma espessura mínima, descobrir qual é o valor mínimo de U que atende a solitação, como podem ser observado nas Figuras 3 e 4:

$$\frac{3P}{\pi \Delta h^2} (H + \Delta h) = \left[\sum_{i=1}^n \beta_i E_{fi} v_{fi} t_i \epsilon_{fi}^2 \right] + E_m \epsilon_m^2 \cdot \sum_{i=1}^n (1 - v_{fi}) t_i \quad (11)$$

De posse também desta relação, se U e a espessura do compósito estiverem definidas, há uma relação linear entre a velocidade de impacto e a deflexão Δh do compósito, conforme pode ser observada na Figura 5:

Do mesmo modo, com U e a espessura definidas, para uma energia de impacto, há uma relação inversamente proporcional entre $U \cdot t$ e a profundidade de penetração (que pode também ser expressa em termos do diâmetro de perfuração D para facilitar as medições) (Figura 6):

$$\frac{2PH}{\pi D^2} + \frac{\sqrt{3} \cdot P}{\pi D} = \left[\frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^n \beta_i E_{fi} v_{fi} t_i \epsilon_{fi}^2 \right) + \frac{E_m \epsilon_m^2}{2t} \sum_{i=1}^n (1 - v_{fi}) t_i \right] \quad (12)$$

3 Materiais e métodos

3.1 Materiais

Para o ensaio de impacto, foram preparados corpos-de-prova de material compósito laminado manualmente sobre semiesferas de poliestireno ex-

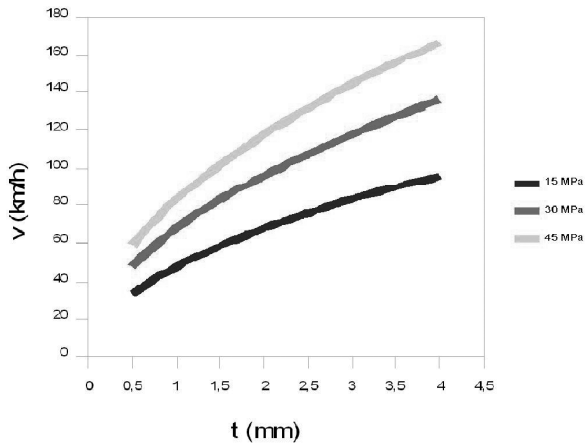


Figura 3: Relação entre v_p e a espessura do compósito

Fonte: Os autores.

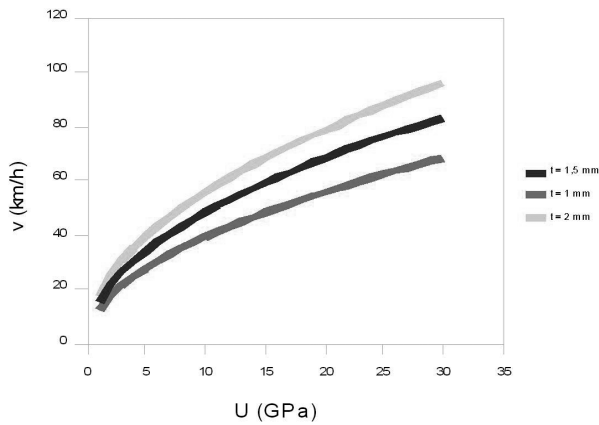


Figura 4: Relação entre v_p e U mínimos

Fonte: Os autores.

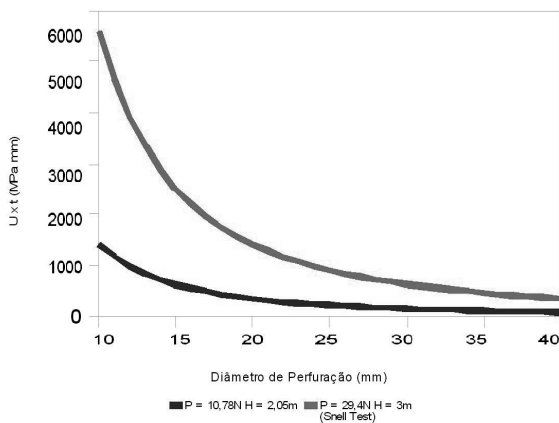


Figura 5: Relação entre v_p e a deflexão Δh para diferentes valores de U

Fonte: Os autores.

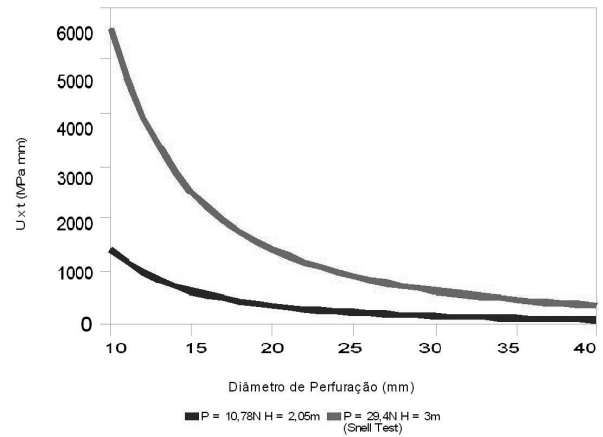


Figura 6: Relação entre o diâmetro de perfuração e as propriedades da estrutura composta para os parâmetros do ensaio e da norma Snell

Fonte: Os autores.

pandido, de diâmetro de 100mm. Foi utilizada resina epóxi (Bisfenol A TCR-Fiberglass com agente de cura a base de diamina), com uma cura feita em câmara de vácuo por no mínimo oito horas. Após a cura, os corpos de prova foram lixados, esmerilhados em sua base e pintados (Figura 7)



Figura 7: Corpo-de-prova fabricado

Fonte: Os autores.

Os corpos de prova foram fabricados em quatro disposições e tipos de fibras, conforme a Tabela 1. As propriedades dos materiais utilizados se encontram nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 1: Composição das concepções testadas

	Concepção 'M'	Concepção 'C'	Concepção 'K'	Concepção 'J'
Camada 1	Manta de Vidro Tipo "E"	Manta de Vidro Tipo "E"	Manta de Vidro Tipo "E"	Manta de Vidro Tipo "E"
Camada 2	Manta de Vidro Tipo "E"	Tecido de Vidro Tipo "S"	Tecido de Vidro Tipo "S"	Manta de Vidro Tipo "E"
Camada 3	-	Tecido de Vidro Tipo "S"	Tecido de Vidro Tipo "S"	Tecido de Fibra de Juta
Camada 4	-	Tecido de Fibra de Carbono	Tecido de Poliaramida	Tecido de Fibra de Juta

Fonte: Os autores.

Tabela 2: Propriedades das Fibras Utilizadas.

Material	ν_f	E_f (GPa)	ϵ_f (%)
Fibra de Vidro Tipo "E"	0,55	71	3
Fibra de Vidro Tipo "S"	0,55	88	3,5
Fibra de Carbono	0,66	297	1,4
Poliaramida "Kevlar 49"	0,6	124	2,5
Fibra de Juta	0,5	10	1,4

Fonte: DOTAN; SILVA; AL-QURESHI, 2004.

Tabela 3: Propriedades da Resina Utilizada no Trabalho

Resina	E_m (GPa)	ϵ_m (%)
Epóxi	3	5

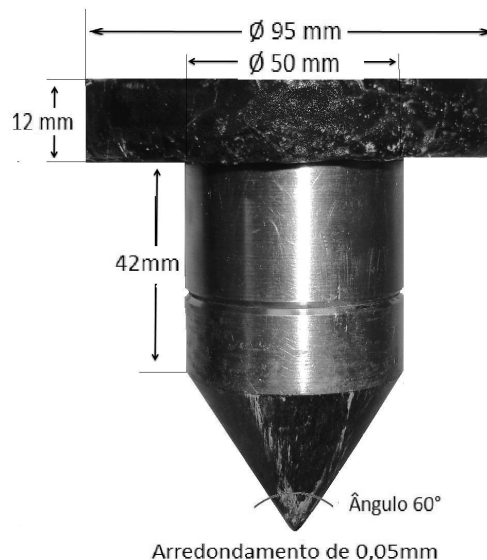
Fonte: DOTAN; SILVA; AL-QURESHI, 2004.

3.2 Ensaio de Queda Livre (Drop Weight Test)

O ensaio de queda livre pode ser resumido como a queda de um indetador de uma altura definida em uma região do capacete a ser ensaiada. O teste é aplicado a capacetes mantidos a temperaturas e umidades ambientes ou capacetes mantidos quentes, resfriados ou úmidos. No mínimo uma amostra deve ser testada em tal ensaio. O capacete completo deve ser vestido em um molde de cabeça firmemente fixado (SNELL INC, 2005).

Para todos os ensaios realizados, o indetador não deve penetrar ou manter contato momentâneo com uma cabeça-teste padrão ISO DIS 6220-1983 vestida pelo capacete (SNELL INC, 2005).

As dimensões do indetador e da bancada de testes para o ensaio de queda livre estão ilustradas nas Figuras 8 e 9, respectivamente:


Figura 8: Dimensionamento do Indetador

Fonte: Os autores.

O indetador (Figura 8) foi fabricado em aço inox, com massa aproximada de 1,1 kg por processo de usinagem no Laboratório de Ciências Térmicas da UFSC – LabTermo tomando como base a norma Snell. O aço inox, devido a sua dureza superior a dos materiais compósitos, garante a viabilidade do teste.

Como o diâmetro do tubo guia que será descrito a seguir, era superior ao do indetador, confeccionou-se um suporte circular de madeira

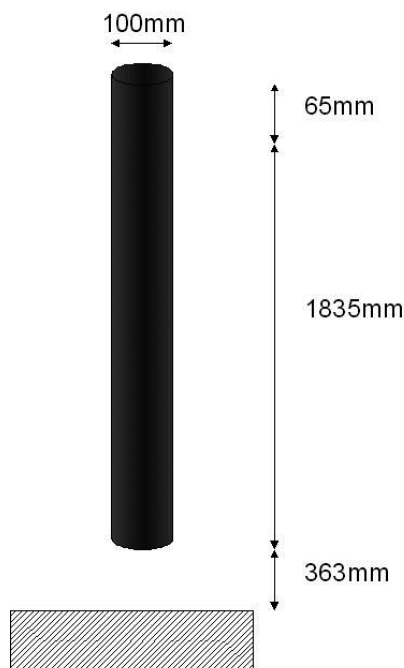


Figura 8: Dimensionamento do Indetador

Fonte: Os autores.

que garantisse ao projétil um deslocamento praticamente vertical.

Sobre a bancada de testes, escolheu-se pela construção de uma bancada vertical com um teste realizado pelo princípio de conservação de energia. A idéia inicial da bancada seria a fixação de um tubo guia de no mínimo 2 metros de altura na posição vertical.

Para a confecção da bancada utilizou-se como base a norma Snell. Um tubo de PVC com diâmetro de 100 mm, e 1,9 m de altura, fixado por braçadeiras aparafusadas à parede do laboratório foi construído segundo o esquema da Figura 9. O Indetador foi posicionado para o ensaio a 65 mm da entrada do tubo, de modo a se manter um nível padrão inicial de queda. A bancada se mostrou satisfatória para testes preliminares.

3.3 Método de Ensaio

Com o projétil e a bancada construídos foi necessário utilizar um padrão de execução em todos os testes para tornar os resultados confiáveis.

As maiores dificuldades foram manter a altura inicial do indetador constante e mantê-lo perpendicular a base da bancada.

Marcou-se uma linha em toda a parte interna do tubo guia paralela ao chão que demarcou a altura de lançamento e possibilitou o nivelamento do projétil com a base da bancada. Estipulou-se como regra sempre limpar e lubrificar o anteparo de madeira antes de cada teste. Além de demarcar o chão onde deveria ajustar-se o gabarito de fixação do corpo-de-prova e conferir a centralização dos mini capacetes a cada teste.

Primeiramente, o corpo-de-prova foi fotografado e fixado na base da bancada. Após esse processo, o peso, mais especificamente o anteparo de madeira, foi lubrificado e posicionado na demarcação desenhada. Após este procedimento, o projétil foi liberado atingindo o corpo-de-prova que foi devidamente retirado para análise. No caso dos testes aqui descritos, se utilizou da altura de perfuração como indicador do contato com a cabeça-teste.

4 Resultados e discussão

O valor da Resiliência “U” de cada concepção foi estimado aplicando-se a equação 11 aos compósitos fabricados, levando-se em conta as espessuras relativas de cada camada. Com base nesses valores, calcula-se U-t, que pode ser substituído na equação 12, gerando uma estimativa do diâmetro de perfuração com base nos parâmetros do ensaio ($P = 10,76\text{N}$, $H = 2,05\text{m}$) (Tabela 4).

Tabela 4: Cálculo das Propriedades das Concepções Testadas

Concepções	Resiliência (MPa)	Espessura (mm)
M	8,37	1,68
C	10,53	2,16
K	10,6	1,26
J	4,69	4,08

Fonte: DOTAN; SILVA; AL-QURESHI, 2004.

Os resultados do ensaio para as diferentes concepções são apresentados na Tabela 4. Como visto, todas apresentaram perfuração. Os diâmetros de perfuração foram tomados como médias de cinco medidas. Com base nessas medidas e na aplicação do modelo apresentada, os valores de $U \cdot t$ e de diâmetro de perfuração experimentais e previstos pela teoria (equação 12) foram plotados na Figura 10.

Tabela 5: Diâmetros de perfuração medidos no Teste

Concepções	M		K		C		J
	1	2	1	2	1	2	1
Diâmetro Médio (mm)	18,97	27,32	34,85	38,23	25,33	25,86	34,08
Desvio Padrão	1,38	0,79	2,55	2,75	2,16	2,96	4,02

Fonte: Os autores.

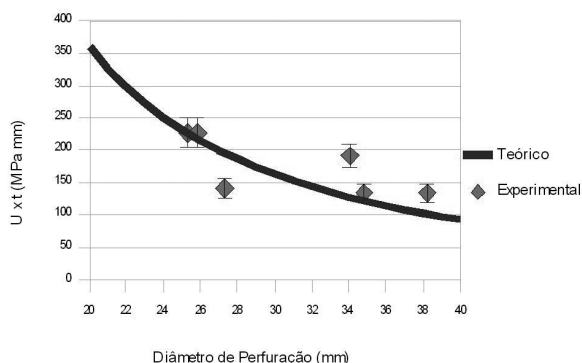


Figura 10: Valores de $U \cdot t$ calculados versus o diâmetro de perfuração medido

Fonte: Os autores.

Examinando-se a Figura 10, nota-se que há uma concordância entre a teoria e os valores observados, porém com pequena variação, mesmo para um baixo número de amostras testadas. Essas divergências podem ser atribuídas a possíveis variações locais de espessura dos compósitos fabricados, ou também a possíveis impactos oblíquos a superfície, que assim podem mascarar os reais valores de diâmetro de deformação.

Espera-se que em um teste com maior número de repetições se observe uma menor margem de erro entre os comportamentos. Portanto, considera-se o modelo válido para a predição do comportamento do material nas condições de ensaio.

5 Conclusões

O projeto desenvolvido analisou a resistência ao impacto de uma estrutura composta, de modo a projetar um capacete, assim como testou a resistência de corpos-de-prova fabricados de combinações de materiais compósitos ao impacto de um projétil, de modo a se obter dados que possibilitem projetar um material de acordo com normas internacionais de qualidade.

Uma análise matemática foi apresentada de modo a prever as energias e tensões necessárias para causar dano permanente à superfície do capacete, assim facilitando a realização dos experimentos e servindo de guia para trabalhos futuros. Conseguiu-se relacionar parâmetros típicos da caracterização dos materiais utilizados para a fabricação, bem como número e espessuras de camadas com os parâmetros de ensaio.

Para trabalhos futuros recomenda-se usar maquinários que diminuam a fonte de erros de fabricação, utilizar uma altura de queda maior para que o indentador atinja velocidades maiores e que representariam acidentes mais graves. Também aconselha-se testes em outras partes de um capacete, como a queixeira, assim como outros tipos de testes previstos na norma internacional Snell.

6 Agradecimentos

Agradecemos ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, ao Núcleo de Desenvolvimento

de Projetos - Nedip e a Equipe UFSC Mini-Baja pela concessão do local de trabalho. Ao LabMat-UFSC pelos insumos e instrumentos utilizados, ao Labtermo-UFSC pela fabricação do indentador. Ao Professor André Ogliari pela inspiração para a realização do trabalho.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resumos: NBR - 07471. Rio de Janeiro, 2001.

CASARIL, A.; GOMES, E.R.; SOARES, M.R.; FREDEL, M.C.; AL-QURESHI, H.A. Análise micromecânica dos compósitos com fibras curtas e partículas. *Revista Matéria*, v.12 n.2, 2007.

DOTAN, A.L., SILVA, J.L.G., AL-QURESHI, H.A., “Macro and Micromechanical Behaviour of Natural Fibre Composites”, In: *Mechanics in Design – CSME Forum 96*, May 7-9, Held at the University of Toronto, Toronto, Canada, v. 2, pp. 823-828, 1996.

GONCALVES, D.; MELO, F.C.L. de; KLEIN, A. N.; AL-QURESHI, H. A. Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* n.44, 2004, pp. 307–316

GUALBERTO, A. R. M.; TARPANI, J. R. Resistência e Tolerância a Impacto Transversal de Baixa Energia de Laminado Híbrido Metal-Fibra. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 2009. Artigo *In Press* na revista *Machine Tools and Manufacturing*.

GUSTIN, J.; JONESON, A.; MAHINFALAH, M.; STONE, J. Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites. *Composite Structures*, Volume 69, N.4, Agosto de 2005, pp. 396-406

ISHIKURA, D.; AL-QURESHI, H. A. An investigation of perforation of metallic and composite plates by projectiles, *Proc Fifth Pan American Congress of Applied Mechanics—PACAM V*, San Juan, Puerto Rico, 5, 1997, pp. 194–197

LIN, M.; KRAUSS, J.F.; A review of risk factors and patterns of motorcycle injuries. *Accident Analysis & Prevention* Volume 41, N. 4, Julho de 2009, pp. 710-722

SNELL MEMORIAL FOUNDATION INCORPORATED. Standard for Protective Headgear. North Highlands, USA, 2005.

Recebido em 9 set. 2009 / aprovado em 2 mar. 2010

Para referenciar este texto

SILVA, J. G. P. da et al. Modelo analítico de impacto em material composto aplicado ao projeto de capacetes. *Exacta*, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 35-43, 2010.

