

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

RONAN BALBINO ALVES FERREIRA

ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE
CAPACETES FABRICADOS COM DIFERENTES MATERIAIS
ATUANDO NA SEGURANÇA DO MOTOCICLISTA

BELO HORIZONTE

2013

RONAN BALBINO ALVES FERREIRA

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE
CAPACETES FABRICADOS COM DIFERENTES MATERIAIS
ATUANDO NA SEGURANÇA DO MOTOCICLISTA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: HERMES DE SOUZA COSTA

Co-Orientadora: ADRIANA DE SOUZA MEDEIROS BATISTA

BELO HORIZONTE

2013

RONAN BALBINO ALVES FERREIRA

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE
CAPACETES FABRICADOS COM DIFERENTES MATERIAIS
ATUANDO NA SEGURANÇA DO MOTOCICLISTA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

HERMES DE SOUZA COSTA

ALEXANDRE RANGEL DE SOUSA

MARIA CELESTE MONTEIRO DE SOUZA COSTA

RESUMO

O crescimento pronunciado do número de motos circulando nas ruas do país e do mundo tem contribuído para aumentar os índices de acidentes. Visando a minimização dos danos causados aos motociclistas envolvidos nestes acidentes, deve-se garantir aos usuários a utilização de capacetes de proteção que atendam a norma regulamentadora NBR 7471, que trata sobre os critérios que devem ser adotados para se construir um capacete, bem como os passos ao se realizar os testes para que o equipamento de proteção seja feito. O presente trabalho tem como objetivo fazer uma revisão de literatura apresentando um estudo comparativo entre os diferentes materiais utilizados na fabricação de capacetes para motociclistas e avaliar a eficiência destes, no que se refere à segurança. Basicamente a estrutura do capacete é composta mais externamente pelo casco que recobre um segundo componente mais interno a base de espuma polimérica, sendo esse último responsável pela maior parte da absorção da energia durante o choque. Neste trabalho foi estudado com maior destaque, o casco e a espuma, pois esses são os componentes que gerenciam a energia durante o impacto. Para tanto o estudo buscou relacionar a resistência ao impacto de uma amostragem de capacetes comerciais, os materiais utilizados em sua fabricação e o custo final desses capacetes. Como resultado pode ser verificado que os polímeros policarbonato (PC) e acrilonitrila butadieno estireno (ABS), bem como as fibras de Kevlar e de vidro se destacaram como materiais de maior presença nos capacetes comercializados, assiduidade explicada pelas relações das propriedades mecânicas como a resistência ao impacto, rigidez, baixa densidade, além da razão custo benefício.

Palavra Chave: Segurança do motociclista. NBR 7471. Resistência ao impacto. Capacete. Materiais poliméricos e compósitos.

ABSTRACT

The increase in number of motorcycles operating on the streets of the country and the world have contributed to increase too accident rates. Order to minimize the damage to the motorcycle riders involved in these events, must ensure the use of protective helmets that meet regulatory norm NBR 7471, which deals with the criteria that should be adopted to build a helmet, as well as steps when performing the tests so that the protective equipment is made. This paper aims to literature review by presenting a comparative study between the different materials used in manufacturing motorcycle helmets and evaluate the efficiency of these, with regard to safety. The structure of the helmet is comprised of the shell externally over a second component overlying the inner foam base polymer, the latter being responsible for the majority of energy absorption during impact. Been studied most prominently, the shell and the foam liner, because these are the components that manage the energy during impact. For this study sought to relate the impact resistance of a sample of commercial helmets, the materials used in its manufacture and ultimate cost of these helmets. As a result it can be seen that the polymers polycarbonate (PC) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS), as well as Kevlar and glass fibers stood out as greater presence in the material marketed helmets, attendance explained by the relationship of mechanical properties such as strength impact, stiffness, low density, beyond reason money.

Keyword: Security biker. NBR 7471. Impact resistance. Helmet. Polymeric and composites materials.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - a) Crescimento da frota de motocicletas na cidade de Belo Horizonte e em b) o crescimento do número de motos envolvidas em acidentes..... | 15 |
| Figura 2 - a) Número de acidentes fatais envolvendo motos e em b) vítimas fatais motociclistas..... | 16 |
| Figura 3 - a) Número de vítimas não fatais e b) fatais por tipo..... | 17 |
| Figura 4 - Estrutura da cabeça e do cérebro..... | 20 |
| Figura 5 - Componentes de um capacete..... | 22 |
| Figura 6 - Componentes e descrição..... | 24 |
| Figura 7 - Equipamento de queda da cabeça do ensaio para teste de absorção de choque..... | 28 |
| Figura 8 - Equipamento para ensaio dinâmico do sistema de retenção..... | 29 |
| Figura 9 - Relação entre as propriedades e as proporções dos monômeros do ABS..... | 32 |
| Figura 10 - Materiais usados na fabricação de capacetes..... | 36 |
| Figura 11 - Etapa de produção de um casco feito de material compósito..... | 38 |
| Figura 12 - Curva carga-deflexão para os materiais GRP e a resina ABS..... | 39 |
| Figura 13 - Curvas energia vs. Tempo das três configurações de capacetes..... | 40 |
| Figura 14 - Distribuição da energia de impacto..... | 40 |
| Figura 15 - Dano causado pela delaminação mostrado pela análise de elementos finitos..... | 41 |
| Figura 16 - Típico capacete e suas estruturas internas..... | 42 |
| Figura 17 - Curva tensão vs. deformação da espuma EPS para várias taxas de deformação..... | 44 |
| Figura 18 - Curva tensão vs. deformação da espuma EPS em vários níveis de umidade relativa..... | 45 |
| Figura 19 - Curva tensão vs. deformação da espuma EPS em vários níveis de pré-tensão compressiva..... | 46 |
| Figura 20 - Proporção de capacetes relacionados com o material utilizado na sua fabricação em relação ao total de capacetes avaliados..... | 48 |
| Figura 21 - Média dos preços dos capacetes avaliados por tipo de material usado em sua fabricação..... | 49 |

| | |
|--|-----------|
| Figura 22 - Comparação da resistência ao impacto dos capacetes usando a classificação por atribuição de estrelas..... | 50 |
| Figura 23 - Gráficos da relação das estrelas atribuídas aos capacetes de diferentes materiais..... | 51 |
| Figura 24 - Organograma de cores por resultado no teste de impacto em diversos pontos do capacete. | 52 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----------|
| Tabela 1 - Distribuição das vítimas de acidentes de trânsito segundo as regiões corpóreas e a Abbreviated Injury Scale (AIS) – Natal, RN, 2007. | 18 |
| Tabela 2 - Dimensão das cabeças de ensaio e a área de proteção, em milímetros. | 26 |
| Tabela 3 - Propriedades do terpolímero ABS com alta resistência ao calor..... | 33 |
| Tabela 4 - Propriedades mecânicas das resinas ABS..... | 34 |
| Tabela 5 - Propriedades Mecânicas do Policarbonato..... | 35 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|------------------|---|
| PP | Polipropileno |
| PVC | Poli (Cloro de Vinila) |
| PU | Poliuretano |
| ABS | Copolímero Acrilonitrila Butadieno Estireno |
| PC | Policarbonato |
| PE | Polietileno |
| EPS | Poliestireno Expandido |
| EVA | Copolímero etileno acetato de vinila |
| GRP | Glass Reinforced Plastic |
| OMS | Organização Mundial da Saúde |
| NBR | Norma Brasileira |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| DENATRAN | Departamento Nacional de Trânsito |
| CONTRAN | Conselho Nacional de Trânsito |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia |
| BHTRANS | Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte |
| DEAV | Delegacia Especializada de Acidentes de Veículos |
| DETRAN-MG | Departamento de Trânsito de Minas Gerais |
| AIS | Abbreviated Injury Scale |
| OPAS | Organização Pan-Americana da Saúde |
| CPRF | Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| SHARP | Safety Helmet Assessment and Rating Programme |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 2. OBJETIVO..... | 11 |
| 2.1 Objetivo Geral..... | 11 |
| 2.2 Objetivos Específicos..... | 11 |
| 3. JUSTIFICATIVA | 12 |
| 4. METODOLOGIA | 13 |
| 5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 14 |
| 5.1 Estatísticas de Acidentes de Trânsito no Município de Belo Horizonte..... | 14 |
| 5.2 O capacete como equipamento de segurança..... | 20 |
| 5.2.1 Função e requisitos de desempenho dos componentes dos capacetes..... | 22 |
| 5.3 Normas brasileiras de controle de qualidade de capacetes para motociclistas..... | 23 |
| 5.4 Testes de verificação da qualidade dos capacetes | 26 |
| 5.4.1 Teste de Impacto | 27 |
| 5.4.2 Sistema de Retenção..... | 28 |
| 5.4.3 Descalçamento | 30 |
| 5.4.4 viseira..... | 30 |
| 5.5 Principais materiais utilizados na fabricação de capacetes | 30 |
| 5.5.1 Copolímero ABS..... | 32 |
| 5.5.2 Policarbonato | 34 |
| 5.6 Materiais poliméricos Reforçados por Fibras..... | 35 |
| 5.7 Os Cascos: Materiais, Fabricação e Propriedades..... | 36 |
| 5.7.1 Cascos termoplásticos | 37 |
| 5.7.2 Capacetes com casco de material compósito | 37 |
| 5.8 Revestimentos de proteção: Espuma EPS (Poliestireno Expandido) | 41 |
| 5.8.1 Efeitos de degradação da espuma EPS e propriedades mecânicas..... | 42 |
| 5.9 Relações entre as Propriedades Mecânicas dos Capacetes Fabricados com Diferentes Materiais | 46 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 54 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 55 |

1. INTRODUÇÃO

Conforme dados do Departamento Nacional de Trânsito, o DENATRAN, desde o ano 2000, cerca de 9% das motos que circulam pelo país já se envolveram em algum tipo de acidente, e cerca de 2% em acidentes com vítimas. Nesses acidentes as lesões mais frequentes aos condutores são as fraturas nas pernas, seguidas por traumatismos na face e do crânio. Como consequência, o Conselho Nacional de Trânsito, CONTRAN, criou a resolução 203 de 29 de setembro de 2006, tornando obrigatório, para circular nas vias públicas, o uso do capacete pelo condutor e passageiro de motocicletas (CHIARINI, 2011).

Para assegurar que os capacetes comercializados de fato protejam os motociclistas foi criada uma norma regulamentar para o controle de qualidade destes capacetes. A norma NBR 7471 – Capacetes para Ocupantes de Motociclistas e Similares – tem como objetivo principal especificar os requisitos de construção e desempenho, os métodos de ensaio e os requisitos de rotulagem dos capacetes de proteção. A função primária dos capacetes abrangidos pela norma é de minimizar o risco de ferimentos na cabeça de condutores e passageiros em condições normais de tráfego. Para que um capacete seja aprovado para comercialização ele deve atender aos requisitos desta norma. Desta forma, todos os capacetes comercializados são testados, através dos ensaios previstos nesta norma e possuem, portanto, especificações técnicas já definidas e aprovadas (NBR 7471 - INMETRO, 2001).

Embora a aplicação desta norma garanta a qualidade dos capacetes comercializados existem diferenças quanto ao desempenho deles em função dos materiais utilizados em sua estrutura.

O presente trabalho procura relacionar os materiais utilizados na fabricação de capacetes com seu desempenho. Além disso, buscar informações na literatura para esclarecer em até que ponto é decisivo, em termos de segurança, as diferentes composições dos capacetes, em relação à resistência ao impacto e a demais propriedades mecânicas.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Buscar na literatura os desempenhos dos principais materiais utilizados na fabricação de capacetes, descrevendo os ensaios para os cumprimentos das normas e analisando a necessidade do uso do equipamento como item obrigatório com a finalidade de não gerar sequelas em prováveis acidentes.

2.2 Objetivos Específicos

- Estabelecer uma comparação entre as propriedades mecânicas dos cascos e espumas dos capacetes comerciais para motociclistas com os materiais utilizados em sua fabricação.
- Coletar dados que possibilitem relacionar o desempenho mecânico dos capacetes com a probabilidade de sobrevivência de um acidentado.

3. JUSTIFICATIVA

As mortes no trânsito relacionadas a acidentes com moto tem se elevado na proporção em que aumenta a frota deste veículo nas ruas. Os capacetes são essenciais, e por isso, obrigatórios. Eles são úteis para evitar que esses acidentes sejam fatais ou que gerem sequelas graves. Por isso foi criada a norma NBR-7471 que regulamenta os requisitos mínimos da qualidade e desempenho dos capacetes.

Mesmo que todos os capacetes estejam padronizados em termos mínimos de desempenho, existem diferenças em função dos materiais de que são produzidos. O estudo proposto neste trabalho se justifica por apresentar uma comparação entre o desempenho mecânico dos capacetes comerciais para motociclistas fabricados com diferentes materiais, apontando a relevância dessa diferença quanto à segurança do motociclista.

4. METODOLOGIA

Será realizada uma revisão na literatura sobre o tema, relacionando dados e conceitos que fundamentem o argumento de que a produção de capacetes com diferentes materiais e estrutura é decisiva em termos de desempenho final do produto. Com esses dados será estabelecida uma comparação relacionando:

- Os materiais utilizados na fabricação dos cascos e nos revestimentos de proteção dos capacetes com seu desempenho quanto ao teste de impacto.
- Os materiais utilizados na fabricação dos cascos e nos revestimentos de proteção dos capacetes com outras propriedades mecânicas relevantes, sempre levando em consideração a segurança do condutor.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 Estatísticas de Acidentes de Trânsito no Município de Belo Horizonte

Para melhor contextualizar a relevância do estudo referente à qualidade dos capacetes usados por motociclistas serão evidenciados dados estatísticos sobre acidentes de trânsito no município de Belo Horizonte que mostram o alto índice deles envolvendo motociclistas. A escolha da cidade usada para ilustrar e contextualizar o trabalho desenvolvido foi feita baseada na localidade onde ele está sendo apresentado.

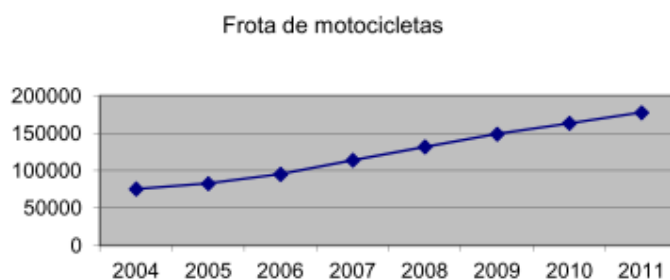
O Departamento de Trânsito de Minas Gerais - DETRAN/MG e a Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte – BHTRANS, trabalhando em parceria, elaboram estatísticas de acidentes de trânsito no município de Belo Horizonte desde 2000 e demonstram os resultados em forma de relatório anual.

Este relatório apresenta indicadores históricos de segurança de trânsito, dados de acidentes de trânsito, de vítimas fatais e não fatais, de veículos/condutores e com dados totais. Os dados são obtidos por meio de análises do banco de dados de acidentes com vítimas do município de Belo Horizonte, formado pela digitação e consistência dos boletins de ocorrência de trânsito com vítimas que estão sob responsabilidade da Delegacia Especializada de Acidentes de Veículos - DEAV, órgão subordinado ao DETRAN/MG (BHTRANS, 2012).

No ano de 2011, no município de Belo Horizonte, com frota de 1.429.865 veículos ocorreram 16.294 acidentes de trânsito com vítimas resultando em 20.110 vítimas não fatais e 217 vítimas fatais. Destes acidentes, 2.889 foram atropelamentos, sendo 39 atropelamentos de animais que incluem pessoas como vítimas. Em média, a cada dia do ano de 2011 ocorreram 44,6 acidentes de trânsito com vítimas e 55,7 pessoas sofreram algum tipo de lesão ou morreram. Também em uma média diária 77,5 veículos envolveram-se em acidentes, sendo 37,8 automóveis e 28 motocicletas. A cada cem dias morreram no local do acidente em média 59,5 pessoas, destas 20,8 pedestres e 17,5 motociclistas (BHTRANS, 2012).

O relatório demonstra um perfil de crescimento da frota de motocicletas na cidade de Belo Horizonte, assim como o aumento esperado no número de acidentes com esse tipo de veículo, observados na Figura 1 a) e 1 b).

Figura 1 - a) Crescimento da frota de motocicletas na cidade de Belo Horizonte e em b) o crescimento do número de motos envolvidas em acidentes.



a)

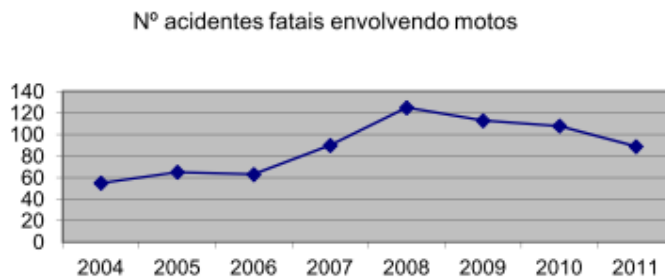


b)

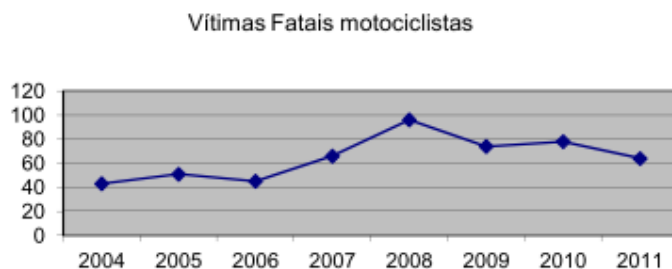
Fonte: BHTRANS, 2011.

Como pode ser observado nos gráficos apresentados nas Figuras 1 a) e 1 b) houve um crescimento expressivo ao longo dos anos entre 2004 e 2011 da frota de motocicletas na cidade de Belo Horizonte onde o crescimento de acidentes envolvendo esse tipo de veículo aparece sem grande surpresa, pois acompanha o próprio crescimento da frota. O que pode ser mais preocupante do que o aumento do número de acidentes visto na figura 1b) é o crescimento do número de vítimas fatais nesses acidentes, mostrado nas Figuras 2 a) e 2 b).

Figura 2 - a) Número de acidentes fatais envolvendo motos e em b) vítimas fatais motociclistas.



a)



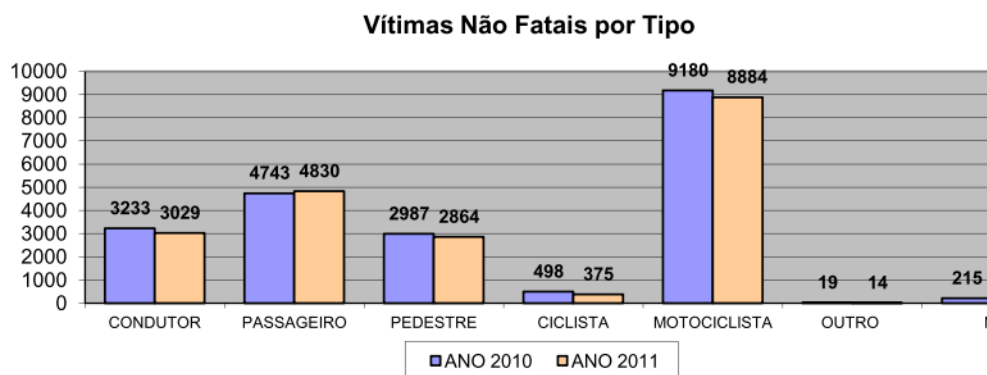
b)

Fonte: BHTRANS, 2011.

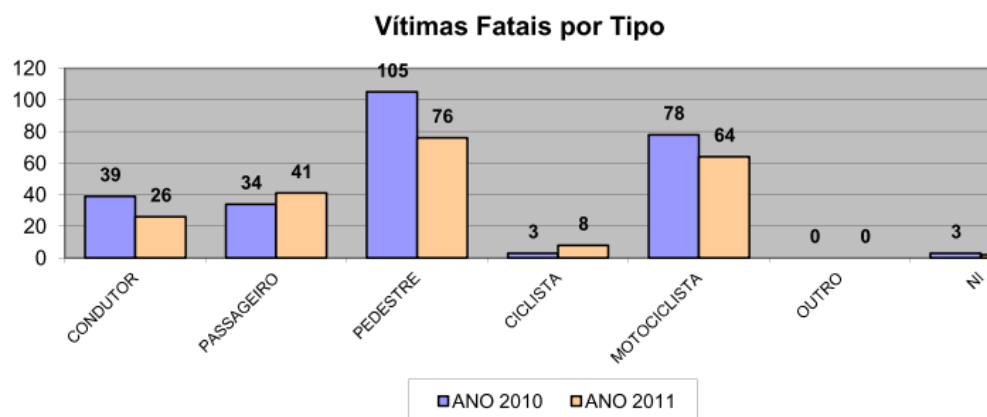
Visto nas Figuras 2 a) e 2 b) o número de acidentes fatais envolvendo motos segue uma dispersão semelhante à dos motociclistas como sendo as vítimas fatais envolvidas nesses acidentes. Isso demonstra que a maior parte das mortes devido a acidentes com motos é do próprio condutor, o que nos leva a especular quanto à segurança disponível para os motociclistas.

Para dimensionar esses dados em comparação com outros tipos de condutores e pedestres é mostrado nas Figuras 3 a) e 3 b) uma comparação entre as vítimas de acidentes não-fatais e fatais por tipo ocorridos nos anos de 2010 e 2011 na cidade de Belo Horizonte.

Figura 3 - a) Número de vítimas não fatais e b) fatais por tipo.



a)



b)

Fonte: BHTRANS, 2011.

Na Figura 3 a) e b) podem ser observadas que a incidência de vítimas envolvidas em acidentes de trânsito é expressiva para condutores de motocicletas e, quanto às vítimas fatais, os motociclistas estão atrás somente de pedestres envolvidos em qualquer acidente de trânsito.

Diante dos dados reitera-se a necessidade de entender as condições nas quais esses acidentes ocorreram e na observação dos quesitos de segurança envolvidos com os condutores das motocicletas, uma vez que essa frota de motos tem, em sua grande parcela, trabalhadores profissionais de entregas e similares.

Diante deste contexto vários estudos e consequentes publicações vêm sendo realizadas em nível nacional buscando contextualizar o perfil destas vítimas do trânsito. Em uma dessas

pesquisas realizada na cidade de Natal no Rio Grande do Norte por RAMOS (2008), caracterizaram-se os acidentes de trânsito e as gravidades dos traumas por meio de dados coletados no atendimento médico de urgência. A Tabela 1 mostra a distribuição das vítimas de acidentes de trânsito segundo a região corpórea mais acometida pelo acidente, utilizando para esta classificação o sistema Abbreviated Injury Scale (AIS). O termo "índices de gravidade do trauma" é definido nos Descritores em Ciência da Saúde como "sistemas para avaliar, classificar e codificar lesões". Esses índices são, no entanto, mais explicitamente definidos como classificações numéricas vinculadas a uma ou mais características do trauma ou das vítimas, determinantes do resultado clínico observado no paciente. Assim sendo, há uma expressão numérica nos índices de gravidade do trauma, os escores, e esses apresentam relação com a probabilidade de sobrevivência das vítimas (NOGUEIRA; DOMINGUES; CAMPOS; SOUSA, 2008).

Tabela 1 - Distribuição das vítimas de acidentes de trânsito segundo as regiões corpóreas e a Abbreviated Injury Scale (AIS) – Natal, RN, 2007.

| Regiões corpóreas | AIS | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-------------|--------------|
| | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | Total | |
| | N | % | N | % | N | % | N | % | N | % | N | % |
| Cabeça/pescoço | 195 | 30,6 | 171 | 25,0 | 174 | 62,8 | 31 | 88,6 | 9 | 75,0 | 580 | 35,3 |
| Face | 37 | 5,8 | 13 | 1,9 | 1 | 0,4 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 51 | 3,1 |
| Tórax | 11 | 1,7 | 7 | 1,0 | 4 | 1,4 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 22 | 1,3 |
| Abdomen/conteúdos pélvicos | 5 | 0,8 | 23 | 3,4 | 2 | 0,7 | 0 | 0,0 | 1 | 8,3 | 31 | 1,9 |
| Membros/Cintura pélvica | 80 | 12,5 | 203 | 29,7 | 83 | 30,0 | 4 | 11,4 | 1 | 8,3 | 371 | 22,6 |
| Superfície externa | 310 | 48,6 | 266 | 38,9 | 13 | 4,7 | 0 | 0,0 | 1 | 8,3 | 590 | 35,9 |
| Total | 638 | 100,0 | 683 | 100,0 | 277 | 100,0 | 35 | 100,0 | 12 | 100,0 | 1645 | 100,0 |

Fonte: RAMOS, 2008.

Ramos (2008) sinaliza que, das 1645 lesões, 683 (41,52%) são do tipo AIS 2 (moderada) e 638 (38,8%) do tipo AIS 1 (leve), representando o total de 80,3% das lesões, principalmente nas regiões da superfície externa, 576 (35%), e na região da cabeça/pescoço, 366 (22,24%).

Dados semelhantes foram encontrados em um estudo envolvendo motociclistas residentes em Maringá-Paraná que foram vítimas de acidentes de trânsito atendidos em centros de referência para tratamento do trauma Estes motociclistas foram categorizados

segundo gravidade do trauma, partes do corpo afetadas e região corpórea da lesão mais grave, identificando possíveis diferenças na qualidade de vida daqueles que apresentaram trauma crânio-encefálico (OLIVEIRA; SOUSA, 2003).

O estudo destacou que o seguimento corpóreo do motociclista mais protegido por equipamentos de segurança durante o impacto é a cabeça. Nos membros, o tipo de lesão mais freqüente são as fraturas, contusões e luxações. As fraturas de membros, observadas em 23,89% dos motociclistas do presente estudo são consideradas lesões de baixa ou média gravidade (AIS 1 a AIS 3). Entretanto, requerem imobilizações prolongadas, acarretando longos períodos de recuperação da vítima, com importantes custos econômicos e sociais (OLIVEIRA; SOUSA, 2003).

Embora a região mais protegida do motociclista seja a cabeça, justamente pelo uso do capacete, lesões na cabeça e no pescoço são as principais causas de lesão grave, invalidez e morte entre usuários de motocicletas e bicicletas. Nos países europeus, lesões na cabeça contribuem com cerca de 75% das mortes entre usuários de veículos motorizados de duas rodas. Em alguns países de baixa e média renda, estima-se que as lesões na cabeça sejam responsáveis por 88% das mortes. O custo social das lesões na cabeça para os sobreviventes, suas famílias e comunidades é alto, em parte porque requerem cuidados especializados ou de longo prazo. As lesões na cabeça também resultam em custos médicos muito mais altos do que qualquer outro tipo de lesão, de tal forma que essas lesões impõem um alto encargo para os custos de saúde de um país e sua economia (OPAS/OMS, 2007).

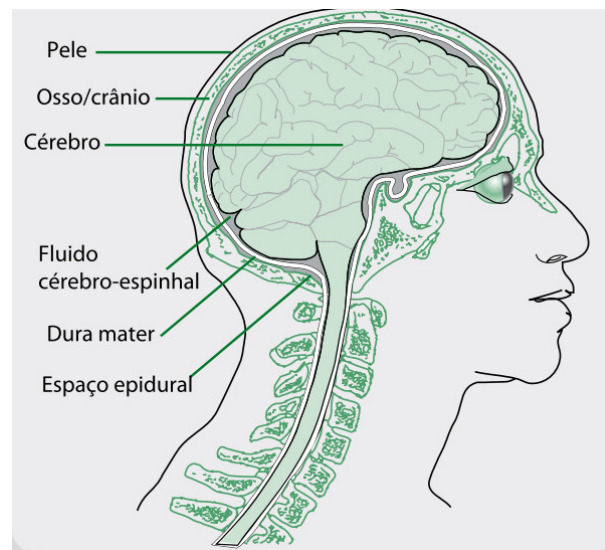
Fica claro que o capacete tem papel primordial na segurança do motociclista e por isso seu uso é obrigatório. Logo, torna relevante o estudo da sua eficiência e a procura constante por avanços que possibilitem a otimização do uso destes capacetes. Quanto aos outros tipos de lesões, estas devem ser analisadas também do ponto de vista educativo na tentativa de diminuição de comportamento displicente no trânsito, tanto pelos motociclistas quanto pelos condutores de outros veículos. É importante atentar para o foco educativo porque o uso de equipamentos de segurança para os membros é impraticável para pilotagem de motos. Salvo no que se refere ao uso de roupas resistentes e anti-chamas, que tão somente diminuem possíveis escoriações e queimaduras, nada protegendo contra lesões maiores.

5.2 O capacete como equipamento de segurança

A perícia técnica por trás do projeto de um capacete de alta qualidade baseia-se no entendimento do que acontece com a cabeça na eventualidade de uma colisão em motocicleta. A Organização Mundial da Saúde (OMS), em seu relatório sobre a importância do uso de capacetes, sinaliza que é importante fazer uma análise da anatomia da cabeça para compreender o mecanismo das lesões na cabeça e no cérebro (Figura 4). É salientado que:

- O cérebro está inserido em um crânio rígido;
- O cérebro “se assenta” em ossos que compõem a base do crânio;
- A medula espinhal passa por um forame, localizado na parte inferior do crânio;
- Sob o crânio, aderido aos ossos, há um tecido resistente chamado dura mater, em torno do cérebro;
- Entre o cérebro e a dura mater há um espaço que contém o fluido cérebro-espinhal, que protege o tecido do cérebro de choque mecânico;
- O cérebro “flutua” no fluido cérebro-espinhal, mas só pode mover 1 milímetro em qualquer direção. (OPAS/OMS, 2007).

Figura 4 - Estrutura da cabeça e do cérebro.



Fonte: OPAS, OMS, 2007.

O relatório aponta ainda que, durante uma colisão de motocicleta ou bicicleta, há dois mecanismos principais de lesão ao cérebro: um através de contato direto e outro através de aceleração-desaceleração e cada um destes mecanismos causa diferentes tipos de lesão.

Quando a motocicleta ou bicicleta se envolve em uma colisão, o motociclista ou ciclista é direcionado ao chão. Se a cabeça do condutor atingir um obstáculo rígido, como o chão, o movimento da cabeça para frente é interrompido, mas o cérebro continua a se mover para frente até bater na parte interna do crânio. Ele então rebate, atingindo o lado oposto do crânio. Esse tipo de lesão pode resultar desde um ferimento menor, como uma concussão, até uma lesão fatal (OPAS/OMS, 2007).

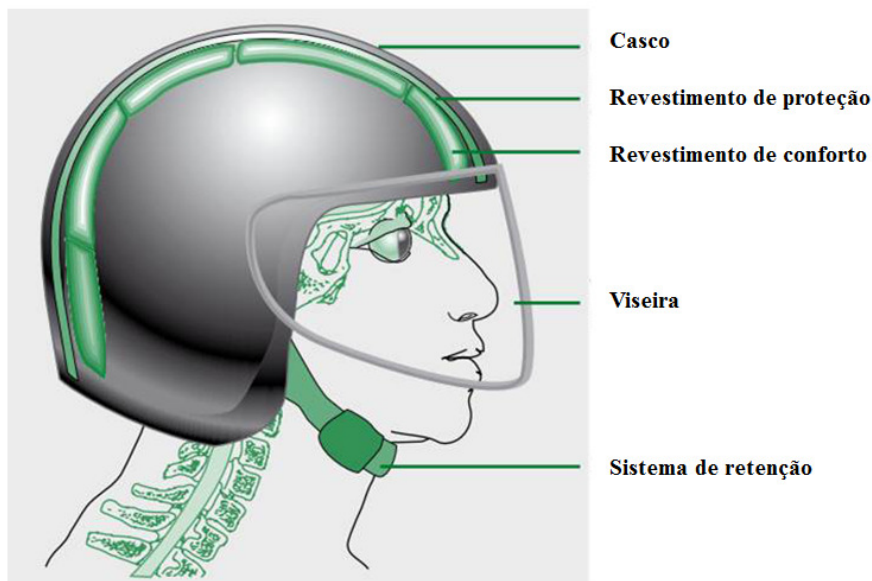
As lesões na cabeça, seja por contato ou aceleração-desaceleração, são divididas em duas categorias: lesões abertas ou fechadas. Os ferimentos mais traumáticos ao cérebro são os que resultam de lesões fechadas – ou seja, ferimentos não-abertos no cérebro. Os motociclistas que não usam capacete correm um risco muito maior de sofrer qualquer dessas lesões traumáticas na cabeça e no cérebro, ou uma combinação delas. Os capacetes criam uma camada adicional para a cabeça e assim protegem o usuário de algumas das mais graves formas de lesão cerebral traumática (OPAS/OMS, 2007).

Desta forma, o capacete tem o objetivo de reduzir o risco de lesões graves na cabeça e no cérebro, diminuindo o impacto de uma força de colisão na cabeça. Ele funciona de três maneiras:

- Reduz a desaceleração do crânio, e conseqüentemente o movimento do cérebro, administrando o impacto. O material macio que é incorporado ao capacete absorve um pouco do impacto e, portanto, a cabeça para de forma mais lenta. Isto significa que o cérebro não atinge o crânio com tanta força.
- Distribui as forças do impacto por uma superfície maior de forma que não se concentrem em determinadas áreas do crânio.
- Previne contato direto entre o crânio e o objeto do impacto, agindo como uma barreira mecânica entre a cabeça e o objeto.

Essas três funções são alcançadas pela combinação de propriedades de componentes básicos do capacete conforme a descrição (Figura 5).

Figura 5 - Componentes de um capacete.



Fonte: Adaptado de OPAS/OMS, 2007.

5.2.1 Função e requisitos de desempenho dos componentes dos capacetes

O casco do capacete forma a camada exterior forte do capacete, que distribui o impacto por uma superfície ampla, diminuindo, portanto, a força antes de chegar à cabeça. Embora o casco seja resistente, é projetado para comprimir quando atinge algo rígido. Oferece proteção contra a penetração por objetos pequenos, pontiagudos, em alta velocidade, e também protege o acolchoamento dentro do capacete de efeitos abrasivos e pancadas no uso diário. Esses requisitos significam que a casca precisa ser dura, geralmente com um acabamento exterior suave.

O forro que absorve o impacto é feito de material macio, acolchoado e que pode ser fragmentado – geralmente poliestireno expandido, comumente chamado de “espuma de borracha”. Essa camada densa funciona como uma almofada e absorve o choque quando o capacete para e a cabeça tenta continuar se movendo.

O acolchoamento de conforto é uma camada macia feita de espuma e pano e fica próxima da cabeça. Ajuda a manter a cabeça confortável e o capacete bem ajustado.

O sistema de retenção ou tira de ajuste no pescoço é o mecanismo que mantém o capacete na cabeça numa colisão. Uma tira é conectada a cada lado do casco para o queixo e pescoço, elas são especificamente desenhadas para manter o capacete no lugar durante o impacto (OPAS/OMS, 2007).

Além de atender às funções já descritas e de obedecer aos pré-requisitos de desempenho deve-se levar em consideração que:

- Os materiais usados na construção do capacete não devem se degradar com o tempo, ou pela exposição ao tempo, nem devem ser tóxicos ou causar reações alérgicas. Atualmente, os materiais plásticos que são comumente usados são Poliestireno Expandido (EPS), copolímero Acrilonitrila, Butadieno e Estireno (ABS), Policarbonato (PC) e o Polipropileno (PP). Embora o material do casco do capacete geralmente contenha PC, PVC, ABS ou fibra de vidro, o forro interno geralmente é feito de EPS – um material que pode absorver choque e impacto e que é relativamente barato. No entanto, os capacetes com forro EPS devem ser descartados após uma colisão e, de qualquer forma, os usuários devem substituir esses capacetes após 3-5 anos de uso.

- Os padrões estabelecem a cobertura mínima de um capacete. Capacetes de meia cabeça oferecem o mínimo de cobertura. Capacetes de rosto inteiro devem garantir a visão periférica do usuário e o não comprometimento da audição.

- Para assegurar que um capacete possa absorver o choque de uma colisão, o forro de material que pode ser esmigalhado deve ter entre 1,5 cm a 3,0 cm de espessura (OPAS/OMS, 2007).

5.3 Normas brasileiras de controle de qualidade de capacetes para motociclistas

A norma regulamentadora NBR 7471 - Capacetes para ocupantes de motocicletas e similares - trata sobre os critérios que devem ser adotados para se construir um capacete, bem como os passos ao se realizar os testes para que o equipamento de proteção seja comercializado. Segundo a norma “o capacete tem o objetivo de reduzir, com eficiência, o surgimento de qualquer tipo de lesão ou ferimento para o condutor ou passageiro, em caso de um acidente qualquer no trânsito”. Com relação à construção, a norma diz que o formato pode ser do tipo aberto e integral ou fechado, desde que atenda aos requisitos mínimos de segurança determinados pelos ensaios (NBR 7471; INMETRO, 2001).

A NBR 7471 (2001) identifica todos os componentes de um capacete como sendo: casco, pala, viseira, sobre viseira, sistema de retenção, fecho, cinta jugular, revestimento de proteção, revestimento de conforto, queixeira, orifícios de ventilação e guarnição. A Figura 6 resume estes componentes, bem como a função dos mesmos.

Figura 6 - Componentes e descrição

| COMPONENTES: | DESCRIÇÃO: |
|-----------------------------|---|
| a) casco | Parte externa do capacete, feita de material flexível, liso, resistente e que distribui a força advinda de choques, permitindo deslizamento do capacete. |
| b) pala | Elemento destacável do casco e que se situa acima dos olhos. |
| c) viseira | Elemento fixo ou destacável, podendo ser basculante, material transparente, colocado diante dos olhos para protegê-los. |
| d) sobre viseira | Elemento destacável de material transparente, colorido ou não, sobreposto à viseira. |
| e) sistema de retenção | Conjunto de dispositivos por meio dos quais o capacete se mantém firme na posição correta na cabeça (fecho + cinta jugular). |
| f) fecho | Dispositivo incorporado à cinta jugular que permite a retenção do capacete à cabeça. |
| g) cinta jugular | Cinta simples ou composta, que passa sob o maxilar inferior, com a finalidade de manter o capacete no lugar, através de um fecho, podendo comportar outros elementos. |
| h) revestimento de proteção | Materiais destinados a absorver a energia de impacto. |
| i) revestimento de conforto | Materiais colocados em contato com a cabeça e destinados a aumentar o conforto do usuário. |
| j) queixeira | Extensão do casco, com os revestimentos de proteção e conforto, destinado a proteger a parte inferior da face contra impactos, no caso do capacete integral ou fechado. |
| k) orifícios de ventilação | Orifícios feitos no casco com a finalidade de permitir a circulação de ar no interior do capacete. |
| l) guarnição | Elemento de acabamento com a finalidade de recobrir e evitar eventuais bordas cortantes, não podendo cria-las em caso de sua ruptura. |

Fonte: NBR 7471 (2001).

As diferentes partes do capacete precisam ser entendidas, pois cada uma exerce uma função, desde quesitos de segurança à itens de conforto, gerando custos e propriedades distintas. Um exemplo prático é o casco do capacete. A sua parte externa deve ser feita, de acordo com a norma NBR 7471, de um material flexível, de superfície lisa, de boa resistência mecânica e de boa resistência ao impacto, a fim de se distribuir o carregamento do choque fazendo com que o capacete deslize. A norma não cita a parte interna do casco, normalmente composto por espumas absorvedoras de carregamentos que também têm a finalidade de aumentar o conforto do motociclista. Outro elemento importante do capacete é a viseira, determinado pela norma como sendo uma parte que pode ser fixa ou removível, transparente e resistente a choque (boa resistência mecânica). A viseira é um elemento essencial na proteção dos olhos do condutor e passageiro. Tem o objetivo de manter a visão do condutor ou passageiro sempre na melhor condição de uso possível (NBR 7471; INMETRO, 2001).

A cinta jugular ou fecho é o dispositivo de segurança que promove a fixação completa do capacete à cabeça. Os capacetes, segundo a norma NBR 7471, devem contar com orifícios de entrada e saída de ar permitindo a circulação do mesmo dentro do dispositivo de segurança. A presença destes orifícios não se dá em localidade específica, podendo estar localizada de forma aleatória no capacete, desde que não prejudiquem ou atrapalhem qualquer função de proteção do dispositivo (NBR 7471, 2001). A guarnição é uma proteção que impede a formação de pontos cortantes quando um capacete sofre ruptura. Itens de ensaio de capacetes também são detalhados na norma (NBR 7471; INMETRO, 2001).

No projeto de produção de um capacete devem ser feitas escolhas importantes em relação ao material. O uso de materiais específicos deve atender requisitos de resistência à corrosão, tanto por envelhecimento ou circunstâncias de utilização (exposição ao sol, extremos de temperatura e chuva, etc.). Os materiais utilizados nas partes que entram em contato com a pele não podem sofrer deterioração causada pelo suor da pele, sendo também necessário que esses não provoquem nenhum problema na derme (PEROTTI, 2009).

Segundo a Norma NBR 7471, na construção do capacete deve-se atentar ao material utilizado para o casco, sendo que este deve ser resistente e de considerável absorção energia durante um choque. Um capacete não deve conter partes rígidas, ser um bom isolante térmico, ou seja, deve manter a temperatura elevada durante o inverno e reduzida durante o verão, além de possuir certo isolamento de ruídos (NBR 7471; INMETRO, 2001).

Quanto ao formato de um capacete, tomando como base a vista de topo, a superfície do mesmo deve possuir formato convexo a fim de que num eventual acidente ele deslize livremente no solo. Além do mais, toda parte externa do capacete deve facilitar o deslizamento do objeto em caso de queda.

Capacetes que possuem a extensão à proteção ao maxilar devem ser revestidos de materiais específicos. Polímeros, tais como EVA e isopor são amplamente usados para esta finalidade. Como descrito na norma NBR 7471, o dispositivo de proteção, juntamente com seus itens (viseira, suporte de fixação de viseira, protetor do maxilar, etc.) necessitam ser montados na cabeça de ensaio correspondente à sua dimensão, como o objetivo de não limitar o campo de visão. Neste quesito, as viseiras não devem possuir quaisquer defeitos de larga escala que dificultem a visão, como risco e arranhões, resíduos, rebarbas, bolhas, dentre outros. Também devem ser transparentes a fim de maximizar a sinalização e tudo que envolve a dirigibilidade. “No caso de viseiras não transparentes (fumê) e coloridas, deve haver a informação impressa em baixo ou alto relevo, na própria viseira, dos dizeres **SOMENTE PARA A UTILIZAÇÃO DIURNA**” (PEROTTI et al., 2009).

O capacete deve permitir o uso de óculos de sol ou óculos de correção; e qualquer acessório como a viseira que é um elemento destacável do casco e que se situa acima dos olhos e a queixeira que é um protetor do maxilar. Extensão do casco, com os revestimentos de proteção e conforto, destinado a proteger a parte inferior da face contra impactos, quando agregado ao capacete não pode prejudicar o desempenho e a segurança deste (PEROTTI et al., 2009, p. 141).

O sistema de retenção que é definido como “um conjunto de dispositivos por meio dos quais o capacete se mantém firme na posição correta na cabeça, representados pela cinta jugular e pelo fecho” (NBR 7471, 2001). A cinta jugular deve ser fixada ao casco e ser capaz de mantê-lo de uma forma segura na cabeça do motociclista. Conforme a NBR 7471 (2001) “a cinta jugular deve ter largura mínima de 20 mm sob a tração de 150 N após 2 minutos. Ela não pode comportar “porta-queixo”, a menos que exista outra cinta jugular auxiliar para recebê-lo”. Estas partes integrantes do capacete são utilizadas somente para essa finalidade. Deve-se destacar com cor vermelha qualquer botão ou dispositivo de abertura, para fechos do tipo engate, diferenciando-o do resto do conjunto. É necessário ainda observar o tamanho adequado do capacete para cada usuário de maneira que o sistema de retenção funcione de forma eficaz. As dimensões das cabeças de ensaio são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dimensão das cabeças de ensaio e a área de proteção, em milímetros.

| Tamanho das cabeças de ensaio | Símbolos | X | Y | AC | HD |
|--------------------------------------|-----------------|----------|----------|-----------|-----------|
| 500 | A | 24,0 | 90,0 | 80,0 | 88,0 |
| 520 | C | 25,0 | 93,0 | 82,0 | 90,0 |
| 540 | E | 26,0 | 96,0 | 84,0 | 92,0 |
| 560 | G | 27,0 | 99,0 | 86,0 | 94,0 |
| 570 | J | 27,5 | 102,5 | 87,0 | 95,0 |
| 580 | K | 28,0 | 104,0 | 88,0 | 96,0 |
| 600 | M | 29,0 | 107,0 | 90,0 | 98,0 |
| 620 | O | 30,0 | 100 | 92,0 | 100,0 |

Fonte: NBR 7471 (2001).

5.4 Testes de verificação da qualidade dos capacetes

São quatro testes básicos exigidos pela norma NBR 7471 (2001) e que são realizados pelo INMETRO ou por laboratórios credenciados para todos os lotes de capacetes fabricados no Brasil ou importados. É importante destacar que os testes são feitos por amostragem, ou seja, o importador ou fabricante informa o INMETRO do novo lote e o órgão retira algumas unidades escolhidas aleatoriamente para os testes.

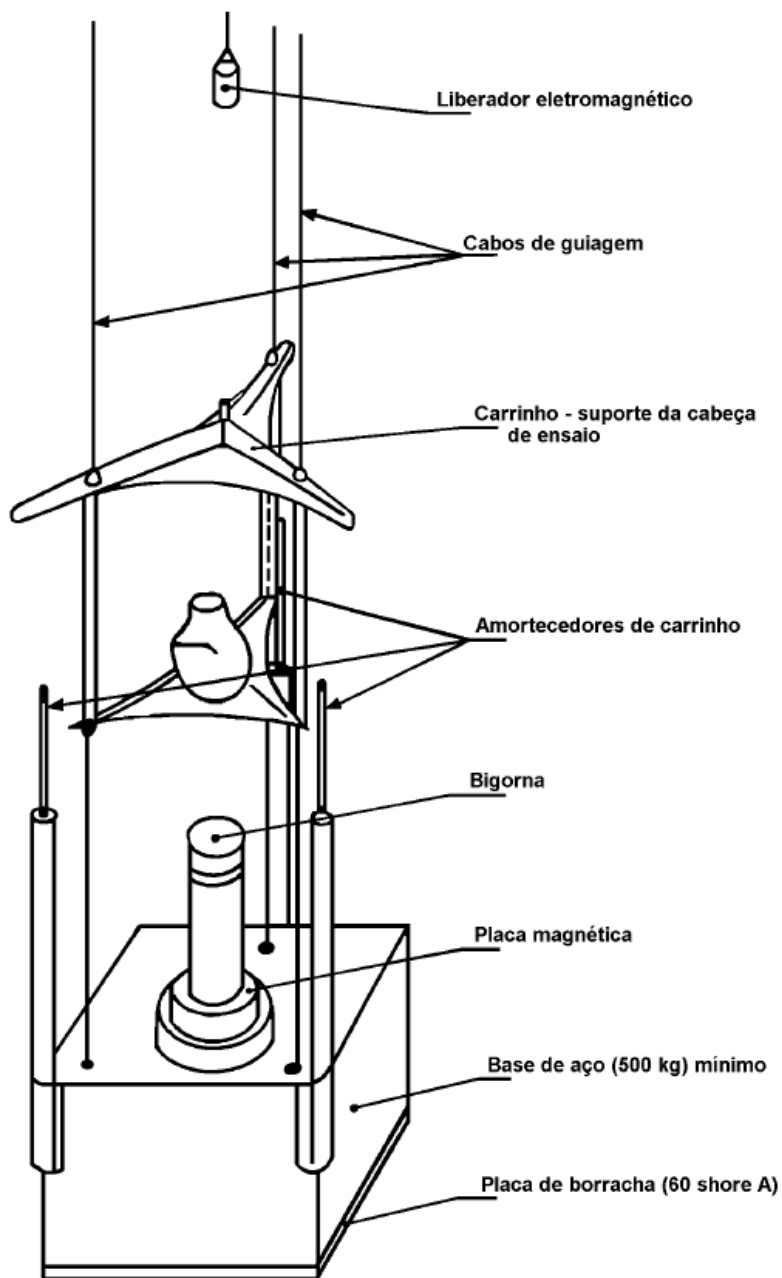
Todos os testes feitos pelo INMETRO são voltados para itens relacionados à segurança dos usuários. São eles: teste de impacto, sistema de retenção, descalçamento e viseira. A seguir serão detalhadas as principais características de cada um dos ensaios.

5.4.1 Teste de Impacto

Ashby e Jones (2007) definem que a “resistência ao impacto é medida por meio do ensaio de impacto que consiste em medir a quantidade de energia absorvida. É usado para medir como um material comporta-se de maneira frágil”.

O capacete é colocado numa cabeça de ensaio (padrão brasileiro de peso e tamanho) e é submetido a uma série de impactos: dois pontos na área frontal, dois na área lateral, além de dois na parte traseira. Antes de ir para o teste de impacto, o capacete é submetido a situações de temperaturas extremas (20°C até 50°C). Ou seja: coloca-se o capacete numa estufa a 50°C. Em seguida ele é retirado e submetido aos dois impactos frontais. Essa operação é repetida com outro capacete do mesmo modelo e lote para mais dois impactos laterais e assim sucessivamente, para cada área de impacto saindo da estufa ou do freezer. Os testes são monitorados por computador e apresentam os resultados na tela para registro e certificação da conformidade. A Figura 7 esquematiza o equipamento utilizado em um ensaio de queda de cabeça para o teste de absorção de impacto (NBR 7471; INMETRO, 2001).

Figura 7 - Equipamento de queda da cabeça do ensaio para teste de absorção de choque



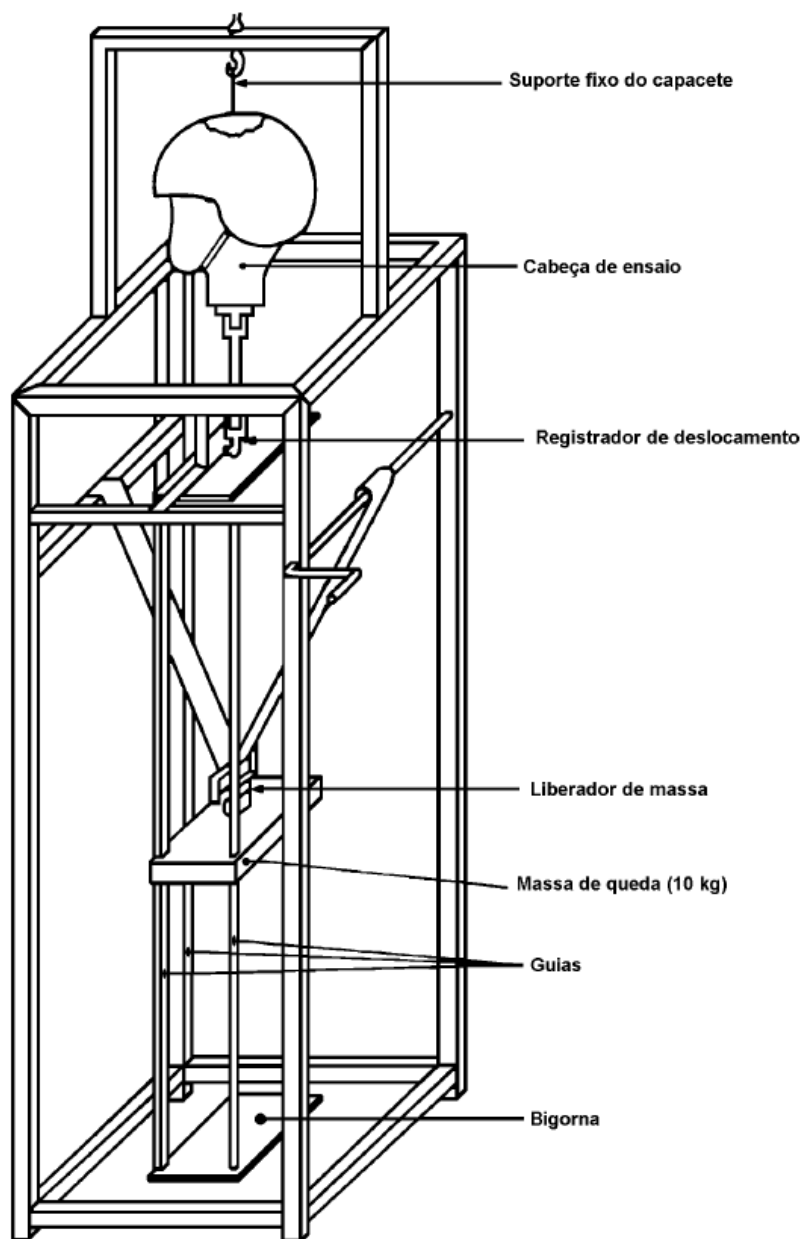
Fonte: NBR 7471 (2001).

5.4.2 Sistema de Retenção

O capacete é colocado na cabeça de ensaio e na cinta jugular é presa uma cinta que será puxada a uma determinada força. A cinta deve ceder até um determinado limite e retornar ao estado original, demonstrando que tem elasticidade suficiente para não arrebentar nem permitir que o capacete saia da cabeça em caso de uma queda. A Figura 8 ilustra o

equipamento utilizado para realização do teste do funcionamento do sistema de retenção (NBR 7471; INMETRO, 2001).

Figura 8 - Equipamento para ensaio dinâmico do sistema de retenção.



Fonte: NBR 7471 (2001).

5.4.3 Descalçamento

O teste de descalçamento é realizado para assegurar que o capacete, no momento de uma colisão, permaneça ajustado a cabeça do usuário. Colocado na cabeça de ensaio, o capacete é puxado por uma cinta pela parte posterior e não pode se mover na cabeça além de um determinado ponto, demonstrando que seu tamanho e o da cinta jugular estão adequados (NBR 7471; INMETRO, 2001).

5.4.4 viseira

O capacete é colocado na cabeça de ensaio com a viseira voltada para cima, de onde cairá uma ponta na viseira, que não poderá ceder além de um determinado limite. Esta norma será aprimorada em breve e as viseiras deverão ter no mínimo 1,5 mm de espessura.

Os testes de viseira e de impacto são destrutivos. Por esta razão existe a recomendação de troca do capacete se houver uma queda ou algum impacto maior na viseira que cause perfuração. Após os testes de impacto, fica clara a deformação do forro de isopor especial que está sob o casco (MOTO ONLINE 2013).

O estudo realiza uma comparação entre os principais materiais utilizados em capacetes, utilizando dados de resistência ao impacto, ou seja, será avaliada a estrutura que forma o casco do capacete e as principais características das espumas de proteção.

Não serão relatadas as propriedades do sistema de retenção, cinta jugular e viseira. O objetivo é mostrar a contribuição em termos de segurança para os motociclistas dos diversos materiais utilizados na composição da estrutura do casco do capacete e da espuma.

5.5 Principais materiais utilizados na fabricação de capacetes

Os primeiros capacetes para motociclistas desenvolvidos eram constituídos de duas partes: uma cobertura em couro e uma região interna de acolchoamento para absorção de choque. Posteriormente a cobertura de couro foi substituída por um casco de plástico. Sua função não era apenas a prevenção contra a penetração, mas também distribuir as forças atuantes por uma área maior (GONÇALVES, 2009).

Atualmente o capacete é confeccionado por diversos componentes, ainda sendo de primordial importância, em termos de segurança para o motociclista, os componentes do casco, forração de absorção de impacto e a região de acolchoamento. Esta, normalmente,

consiste em espumas de poliuretano ou de poli(cloreto de vinila) (PVC) caracterizadas por terem baixa densidade, flexibilidade e uniformidade. Esta região é a mais importante em termos de conforto e um bom ajuste da cabeça do motociclista. Já a forração de absorção de impacto é responsável principalmente, como o nome diz, pela absorção do impacto e é normalmente feita em espuma de poliestireno expandido (EPS). A espessura deste componente é limitada pelos requisitos aerodinâmicos e do design do capacete e varia normalmente entre 25 a 40 mm. A densidade da espuma de EPS varia aproximadamente entre 30 a 40 kg/m³ (GONÇALVES, 2009).

O casco tem três funções principais: distribuir a força de impacto, prevenir a penetração e prevenir lesões resultantes da abrasão ao longo de superfícies rugosas. São utilizados geralmente três tipos de materiais em cascos de motocicletas: Policarbonato (PC), AcrilonitrilA Butadieno Estireno (ABS) ou Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras (CPRF). Os cascos de CPRF, por serem mais rígidos, são utilizados em combinação com espumas de EPS de baixa densidade, enquanto os cascos de ABS e PC, menos rígidos, são compensados pela aplicação de espumas mais rígidas de EPS de alta densidade (GONÇALVES, 2009).

A capacidade de absorção de choque de um capacete é função do casco e do forro protetor. Sendo assim, e sem desprezar a importância dos demais componentes, este trabalho foca na comparação entre os materiais mais utilizados na composição dos cascos. Neste sentido, o trabalho demonstra a flexibilidade que os materiais compósitos oferecem em termos de propriedades, em função da escolha da fibra reforçante e do material da matriz, em comparação com as propriedades dos cascos produzidos com ABS e PC.

Os cascos de capacetes feitos a partir de materiais compostos são geralmente mais caros do que de material convencional termoplástico. Entretanto, Kostopoulos e outros estudaram o efeito dos cascos de capacetes constituídos de cortes de tecido (carbono, vidro, aramida - Kevlar) em comparação com os termoplásticos, sobre o desempenho em impacto destes capacetes e observaram que os capacetes reforçados com tecidos de Kevlar responderam melhor do que os outros (KOSTOPOULOS et al, 2002). Kormi e Etheridge relataram os resultados de um estudo realizado com cascos feitos com múltiplas camadas de fibra de vidro usando o método de elementos finitos. Eles concluíram que o capacete com invólucro feito do compósito pode atenuar a transferência de energia de impacto e, portanto, a intensidade do dano ao crânio é minimizada (ETHERIDGE; KORMI, 1992).

5.5.1 Copolímero ABS

Segundo Wiebeck e Harada (2005), trata-se de um polímero composto, ou seja, um copolímero. É formado por três monômeros diferentes (terpolímero): acrilonitrila, butadieno e estireno. O ABS é um plástico que apresenta a capacidade de variar suas propriedades através da proporção entre seus três monômeros (figura 9), como resistência ao impacto, rigidez, estabilidade dimensional e dureza.

Figura 9 - Relação entre as propriedades e as proporções dos monômeros do ABS.



Fonte: Principais características das blendas poliméricas fabricadas no Brasil (SIMIELLI, 1993).

O termoplástico ABS é amorfo e de custo médio, são rígidos e tenazes, mesmo a baixas temperaturas. São encontrados em vários tipos que apresentam diferentes níveis de resistência a impactos, ao calor, retardamento de chama e de capacidade de galvanização. A maioria das resinas de ABS varia de translúcida a opaca, mas elas também podem ser produzidas em tipos transparentes, podendo ser pigmentadas para produzir praticamente todas as cores. Cede plasticamente quando submetidos a grandes esforços, de modo que o problema de alongamento raramente adquire importância significativa em seus projetos. Normalmente, a peça pode ser curvada além do seu limite de elasticidade sem que venha a se romper, embora enfraqueça por fadiga. Embora não sejam consideradas como flexíveis, as peças em ABS apresentam suficiente efeito de mola para absorver ou atender as exigências de montagem efetuadas por pressionamentos (ALBUQUERQUE, 2001).

De acordo com Albuquerque (2001), os polímeros de ABS destinados a uso geral podem ser adequados para determinados tipo de aplicações às intempéries, mas uma prolongada exposição gera alteração de coloração e perda de brilho, resistência ao impacto e ductilidade. É possível tornar estes termoplásticos resistentes a ação do tempo por meio de certos métodos de revestimento. Peças de ABS são praticamente inertes a água, sais, à maioria dos sais orgânicos e gases.

Como relatam Wiebeck e Harada (2005), o ABS absorve quantidades significativas de umidade e apresenta boa reprodução de suas propriedades mecânicas (resistência ao impacto, resistência a tração, dureza e modulo de elasticidade) na faixa de -40 a 150 °C, porém a temperatura de uso permanente não deve ser superior a 80 °C pra evitar deformações. A densidade deste plástico é 1,05 g/cm³, não apresenta fluência em tensões até 15 MPa, tem pouca contração após moldado, não apresentando praticamente nenhuma marca de chupagem, o que faz esse plástico ser utilizado comumente em peças que exigem uma boa aparência. É um tipo de plástico que pode ser silkado, pintado, metalizado e cromado. A tabela 3 mostra as propriedades do ABS com alta resistência ao calor.

Tabela 3 - Propriedades do terpolímero ABS com alta resistência ao calor.

| PROPRIEDADES | NORMA | UNIDADE | ABS |
|--|-----------|---------|-----|
| Resistência à tração na ruptura | ASTM D638 | MPa | 58 |
| Resistência à flexão | ASTM D790 | MPa | 820 |
| Módulo de flexão | ASTM D790 | GPa | 2,5 |
| Resistência ao impacto Izod com entalhe a 25°C | ASTM D256 | J/m | 29 |
| HDT | ASTM D648 | °C | 92 |
| Vicat | ISSO 306 | °C | 98 |

Fonte: Sabic Innovative Plastics.

Na Tabela 4 as propriedades mecânicas das resinas ABS são mostradas, medidas através de ensaios realizados em conformidade com as normas da American Society for Testing and Materials (ASTM). Os polímeros T, GDT 2510 e GPM 5600 são produtos *Cycolac*[®], todos resinas ABS da GE Plastics. A seguir estão relacionadas as normas técnicas utilizadas para fabricação e também, as especificações de alguns dos tipos de *Cycolac*[®] produzidos:

- *Cycolac*[®] *T* - Uso geral; Combinação de força de impacto com rigidez, fácil moldagem, excelente brilho e qualidade de cor;
- *Cycolac*[®] *GDT 2510* - Indústria Automotiva; Baixo brilho; alta resistência ao calor;
- *Cycolac*[®] *GPM 5600* - Uso geral; Excelente razão fluxo/impacto.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas das resinas ABS.

| Propriedades Mecânicas | UN. | MÉTODO | T | GDT 2510 | GPM 5600 |
|---|-----|------------|------|-------------|-------------|
| Resistência à tração na ruptura | MPa | ASTM D 638 | 44 | 47 | 45 |
| Alongamento na ruptura | % | ASTM D 638 | - | - | - |
| Resistência à flexão no escoamento | MPa | ASTM D 790 | 64 | 72 | 70 |
| Módulo de flexão | MPa | ASTM D 790 | 2200 | 2240 | 2300 |
| Resistência ao impacto IZOD com entalhe à 25°C | J/m | ASTM D 256 | 215 | 213 | 350 |
| Resistência ao impacto IZOD com entalhe à -30°C | J/m | ASTM D 256 | - | - | - |
| Dureza Rockwell (R) | | ASTM D 785 | 103 | - | 105 |

Fonte: <http://chibre.iqm.unicamp.br/~wloh/offline/qg661/2trab2.html>, acessado em mar. 2013.

5.5.2 Policarbonato

O Policarbonato (PC) é um material transparente com propriedades mecânicas excelentes, estando entre os materiais de maior tenacidade. Sua resistência a impactos é uma de suas mais marcantes propriedades. Possui excelente estabilidade dimensional, baixa absorção de umidade, é resistente a raios ultravioletas, boa resistência a chamas e boas características elétricas. Além disso, é facilmente moldável, injetável e usinável. O grande inconveniente do PC é o seu alto custo, tanto como matéria prima quanto no gasto de energia para sua moldagem. Porém tem grande facilidade de ser misturado com outros polímeros com o objetivo de aliar propriedades desejadas. (INCOMPLAST, acessado em março de 2013).

Na Tabela 5 é apresentado um resumo de suas propriedades mecânicas.

Tabela 5 - Propriedades Mecânicas do Policarbonato.

| Propriedades Mecânicas | Normas | Unidades | Valores |
|---|------------|-------------------|--------------|
| Resistência à tração / ruptura | ASTM D 638 | N/mm ² | 55 - 160 |
| Alongamento ruptura | ASTM D 638 | % | 2 - 100 |
| Módulo de flexão | ASTM D 790 | N/mm ² | 2200 - 10000 |
| Resistência ao impacto IZOD com entalhe 25°C / - 40°C | ASTM D 256 | J/m | 100 - 800 |

Fonte: <http://www.incomplast.com.br/materiais/policarb.htm>, acessado em março de 2013.

5.6 Materiais poliméricos Reforçados por Fibras

Os materiais poliméricos reforçados por fibras fazem parte da categoria de materiais compósitos que tem sua definição em materiais formados pela união de dois materiais de natureza diferentes, resultando em um material de desempenho superior àquele de seus componentes individuais. É constituído de duas fases: a fase matriz e a fase dispersa. A fase matriz normalmente possui resistência mecânica inferior à fase dispersa, porém possui maior ductilidade. Desta forma a união sinérgica das propriedades das fases constituintes do compósito geralmente envolve a proteção mecânica de um material frágil, porém altamente resistente em uma matriz cujas propriedades são potencializadas com o acréscimo de resistência conferida pela fase dispersa (NETO, PARDINI, 2006).

Os materiais compósitos podem ser classificados conforme o tipo de reforço em compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e compósitos estruturais. Os compósitos reforçados por partículas envolvem a dispersão de pequenas partículas homoganeamente na matriz. Esta dispersão pode ter a finalidade aumentar a resistência do material ou envolver a combinação das propriedades dos componentes individuais. Nos compósitos reforçados com fibras, os reforços são dispostos em emaranhados de fibras e aumentam efetivamente a resistência mecânica do composto final. Os compósitos estruturais envolvem uma disposição específica de camadas de compósitos em formato de lâminas ou em formato sanduíche, em que duas camadas externas de um determinado material protegem uma camada interna (recheio), proporcionando elevado desempenho mecânico aliado à leveza proporcionada pelo arranjo (CALLISTER, 2007).

As extraordinárias propriedades demonstradas dos materiais quando apresentados sob a forma de fibra e a possibilidade de livre escolha da matriz base, de modo a preparar as

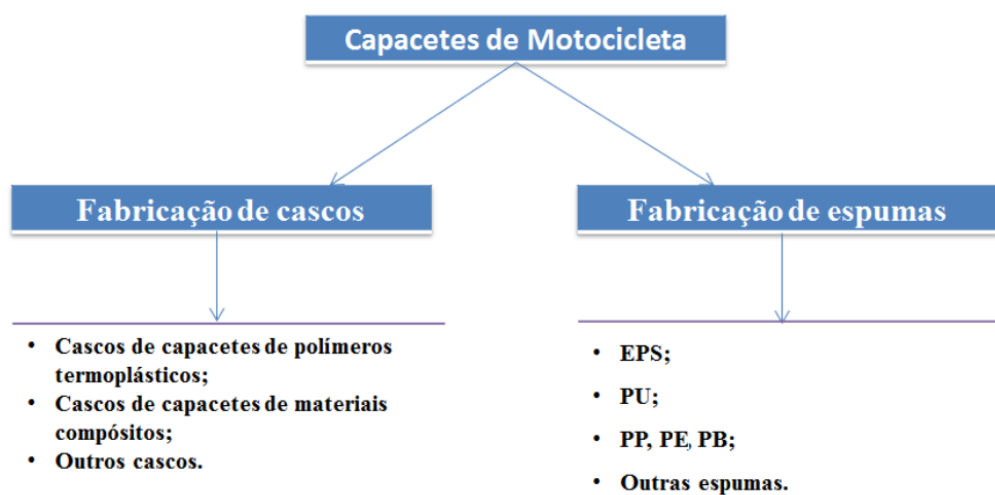
propriedades do compósito da forma mais conveniente, têm sido os fatores impulsionadores do rápido crescimento de aplicações dos materiais compósitos e da sua expansão em diversas áreas. Devido a grande variabilidade de estruturas que podem ser fabricadas modificando a matriz, a fibra, a proporção fibra/matriz e ainda, parâmetros construtivos como tamanho de fibra, dentre outros, tornou-se difícil uma catalogação das propriedades desses materiais (NETO, PARDINI, 2006).

No mercado existem capacetes cujos cascos são constituídos de uma matriz plástica reforçada principalmente com fibras de vidro, mas possuem também capacetes com fibras de carbono, uma combinação de carbono e aramida – formando um compósito híbrido – e também com o uso minoritário de outras fibras como a aramida sozinha, por exemplo. A fibra de vidro tem um custo menor além de possuir excelentes propriedades mecânicas, embora estas propriedades sejam inferiores às fibras de carbono e aramida. Apesar disso é extensivamente usada, pois estas últimas são mais caras (ARAIHELMET EUROPE, 2013).

5.7 Os Cascos: Materiais, Fabricação e Propriedades

Segundo Chang et al. 2003 existem dois tipos de materiais usados em cascos de capacetes de motociclistas. Existem os cascos feitos de polímeros termoplásticos e cascos feitos de materiais compósitos. A Figura 10 categoriza os métodos de fabricação dos cascos.

Figura 10 - Materiais usados na fabricação de capacetes.



Fonte: Autor.

5.7.1 Cascos termoplásticos

A moldagem por injeção é o processo principal para a produção de cascos de termoplásticos. Dentre os materiais utilizados o ABS se destaca devido ao seu melhor desempenho quando se fala em resistência ao impacto e menor problema de degradação. No entanto sofre com a fragilidade ocasionada pela foto-oxidação por prolongada exposição ao meio ambiente (CHANG et al., 2003).

Os polímeros termoplásticos amolecem quando são aquecidos (e por fim se liquefazem) e endurecem quando são resfriados, processos que são totalmente reversíveis e que podem ser repetidos. Esses materiais são fabricados normalmente pela aplicação simultânea de calor e pressão. Em nível molecular, à medida que a temperatura é elevada as forças de ligação secundárias são diminuídas (devido ao aumento do movimento molecular), de modo tal que o movimento relativo de cadeias adjacentes é facilitado quando uma tensão é aplicada. Uma degradação irreversível resulta quando a temperatura de um polímero termoplástico fundido é aumentada ao ponto que as vibrações se tornam violentas o suficiente para quebrar as ligações covalentes principais. Além disso, são moles e dúcteis. A maioria dos polímeros lineares e aqueles que possuem algumas estruturas ramificadas com cadeias flexíveis são termoplásticos (CALLISTER, 2007, p. 336).

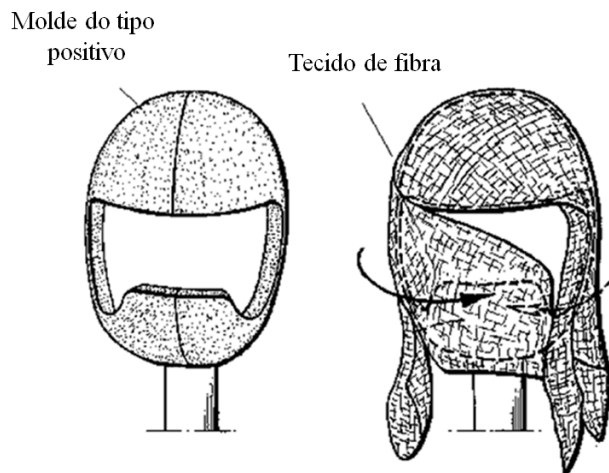
A fabricação de cascos de capacetes com termoplásticos é vantajosa pois são materiais mais leves quando comparados aos cascos de materiais compósitos. Outra vantagem é o custo do maquinário usado na fabricação do mesmo, sendo de baixo custo. É possível conseguir espessuras de cascos mais finas que os cascos de materiais compósitos, não sendo necessário, na maioria dos casos, etapas de retirada de rebarbas e modificações no produto final. Em contrapartida, para apresentarem resistência ao impacto como os compósitos é necessário aumentar a espessura do casco, o que promove um aumento do peso. Além disso, capacetes de PC (Policarbonato) são difíceis de processar e vulneráveis quando em contato com solventes orgânicos e outros fluidos (HO et al., 2003).

5.7.2 Capacetes com casco de material compósito

Um compósito consiste em um material multifásico feito artificialmente, em contraste com um material que ocorre naturalmente. Além disso, as fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e devem estar separadas por uma interface distinta. Desta forma, a maioria das ligas metálicas, além de muitos materiais cerâmicos, não se enquadra nessa definição, pois as suas múltiplas fases são formadas como consequência de fenômenos naturais. (CALLISTER, 2007, p. 359).

Capacetes para fins especiais, como os para motos de corrida, são possuem componentes feitos de compósitos como o Kevlar por possuírem um bom desempenho. Um molde de tipo positivo e um molde tipo negativo são usados fabricação (HO et al., 2003). A Figura 11 mostra uma das etapas de produção de um casco de material compósito.

Figura 11 - Etapa de produção de um casco feito de material compósito.



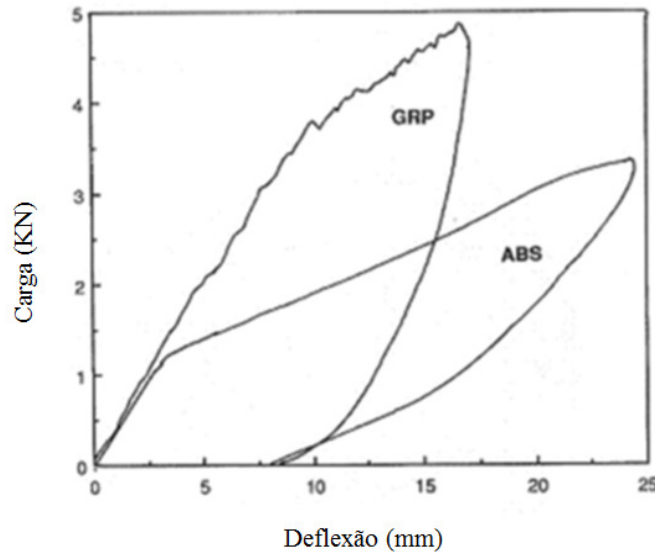
Fonte: Adaptado de HO et al., 2003.

Custo baixo em termos de máquinas e de processo tornam a fabricação de cascos de material compósito mais vantajosa. O problema aparece pela falta de mão de obra especializada, o que acarreta na elevação dos salários e por consequência reflete no custo final do capacete. Os cascos de capacete de material compósito apresentam menor precisão dimensional do que capacetes termoplásticos devido à aplicação manual de fibra de vidro sendo necessário fazer um acabamento gerando mais uma operação de trabalho (CHANG et al., 2003).

O GRP (glass-reinforced plastic ou plástico reforçado com fibra de vidro) é um tipo de fibra de vidro. O GRP proporciona elevada resistência com um baixo peso, mas o seu preço é mais elevado do que o polímero ABS. A relação entre a força aplicada e o desvio sofrido pela parte superior semiesférica de tampas esféricas cortadas de capacetes de ABS e GRP é mostrada na Figura 12. Em geral, o casco do capacete feito de ABS tem aproximadamente 4,2 - 4,6 mm de espessura e de GRP possui 2,5-3,5 mm de espessura. Pode-se concluir observando a Figura 12 que a rigidez na GRP é maior em comparação ao ABS. Em outras situações, escudos ou proteções de GPR podem fornecer melhores proteções do que o ABS.

No entanto, os preços de capacetes de GPR mais elevados do que o dos capacetes de ABS (GILCHRIST; MILLS, 1994).

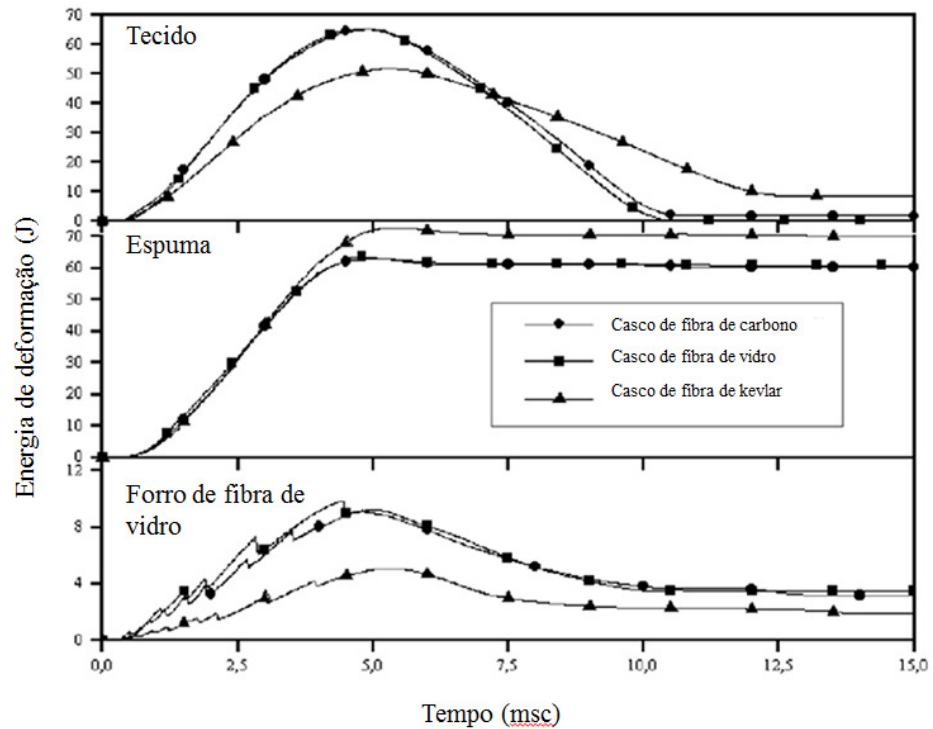
Figura 12 - Curva carga-deflexão para os materiais GRP e a resina ABS.



Fonte: Adaptado de CHANG et al. 2003.

Kostopoulos et al. (2002) avaliaram o uma simulação de elementos finitos de alguns capacetes que possuíam cascos de material compósito. Três materiais de casco (fibra de Kevlar, fibra de vidro e fibra de carbono) foram submetidos a ensaios de impacto, mostrando em seguida o comportamento da espuma, do tecido e do forro interno de fibra de vidro (Figura 13). No tecido, os cascos de fibra de vidro e de carbono apresentaram muita semelhança, sendo as curvas nos gráficos permanecendo sobrepostas em todo regime de aplicação de força. Porém a energia inserida no tecido do capacete de fibra de carbono mostrou-se ligeiramente superior em relação ao capacete de fibra de vidro. Depois do impacto a energia no tecido se mantém maior para o capacete de fibra de carbono, podendo ser atribuído tal acontecimento à falha da fibra. O capacete de fibra de Kevlar exibiu uma absorção de energia muito maior que os outros capacetes na fibra e espuma. Porém no tecido de fibra de vidro, o desempenho do casco de Kevlar em termos de energia foi menor que os outros. Contudo, o capacete de Kevlar se destaca no aspecto geral em termos de absorção de energia, exibindo uma característica positiva.

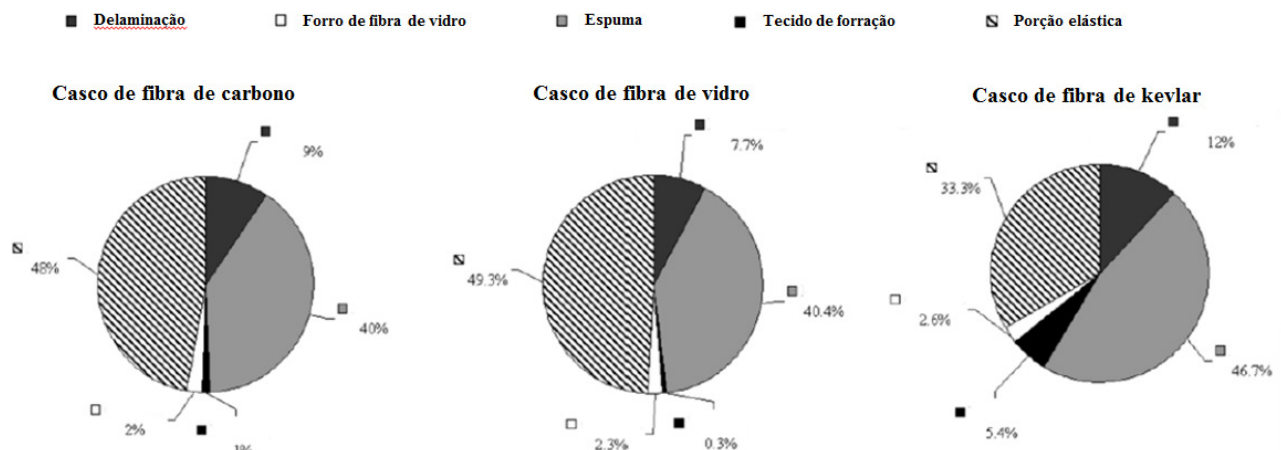
Figura 13 - Curvas energia vs. Tempo das três configurações de capacetes.



Fonte: Adaptado de KOSTOPOULOS et al. 2002.

No mesmo ensaio, Kostopoulos et al. (2002) identificaram que a delaminação também foi responsável por uma quantidade considerável de absorção da energia durante o impacto. A Figura 14 mostra que no capacete de Kevlar, 12% da energia total de impacto foi absorvida na delaminação, valor superior aos observados com os cascos.

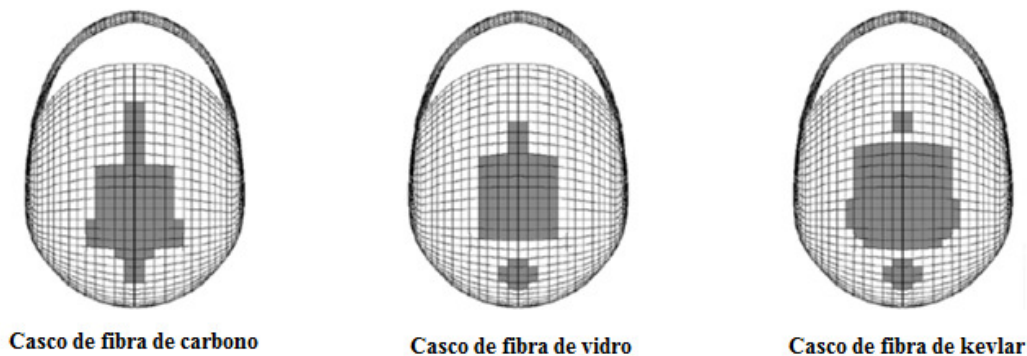
Figura 14 - Distribuição da energia de impacto.



Fonte: Adaptado de KOSTOPOULOS et al. 2002.

O efeito da delaminação foi confirmado em todos os capacetes. O casco de Kevlar apresentou uma região de delaminação maior em relação aos cascos de outros materiais, mostrando que ele, mesmo perdendo mais material (Figura 15) e sendo afetado esteticamente, cumpriu bem o seu “papel” de absorver energia durante o impacto (KOSTOPOULOS, 2002).

Figura 15 - Dano causado pela delaminação mostrado pela análise de elementos finitos.



Fonte: Adaptado de KOSTOPOULOS et al. 2002.

5.8 Revestimentos de proteção: Espuma EPS (Poliestireno Expandido)

O bom desempenho do capacete resulta em grande parte do tipo de espuma usada no revestimento, bem como seu comportamento durante o impacto. A utilização de qualquer uma das espumas depende de vários fatores, e o aspecto de fabricação é um deles. A classificação dos capacetes é feita de acordo com o tipo de espuma, podendo ser dos polímeros EPS linear (poliestireno expandido), PU linear (poliuretano), PP (polipropileno), PE (polietileno), dentre outros.

A espuma de poliestireno expandido (EPS) domina o mercado quanto ao uso de material de revestimento em capacetes. A razão para isto é o seu excelente desempenho e as características de pouco peso sendo o material mais utilizado para fornecer gerenciamento de energia em capacetes de proteção. O custo de fabricação é baixo para grandes quantidades de produção. Os revestimentos feitos de EPS usados nos capacetes são rígidos, inelásticos e possuem pouca flexibilidade quando comparadas com outras espumas. A moldagem deste material é feita por injeção. Um molde típico para um forro de capacete de EPS tem um núcleo e uma cavidade e a distância entre eles define a forma do capacete (CHANG; HO; CHANG, 2003).

Um problema adicional encontrado na fabricação de capacetes de EPS é configurar o projeto do capacete com furos com a finalidade de acomodar o sistema de retenção do capacete ou aberturas de ventilação. Um dos métodos que são utilizados para a formação de orifícios nos capacetes com EPS é fazer os furos após o processo de moldagem com uma faca ou fio quente. A principal desvantagem deste processo é que ele pode gerar uma desordem, pois o EPS acumula em torno da ferramenta de corte e polui o ambiente de trabalho (CHANG et al., 2003). A Figura 16 mostra as estruturas internas típicas de um capacete.

Figura 16 - Típico capacete e suas estruturas internas.



Fonte: PINNOJI et al. 2010.

5.8.1 Efeitos de degradação da espuma EPS e propriedades mecânicas

Quando o capacete revestido de espuma EPS sofre um impacto ele praticamente se auto-destrói por espalhar as forças de impacto por todo o dispositivo. É por isso que, na maioria dos casos, se um capacete é danificado em um acidente, pode ser de pouco valor de proteção em outro acidente, sendo aconselhado o seu descarte. Além disso, fatores como a alta temperatura e umidade relativa podem influenciar negativamente no desempenho mecânico dos dispositivos de segurança. A umidade pode se difundir nos interstícios celulares e causar stress-hídrico, que promove o inchamento dos interstícios das células fechadas do polímero (LIU et al, 2003).

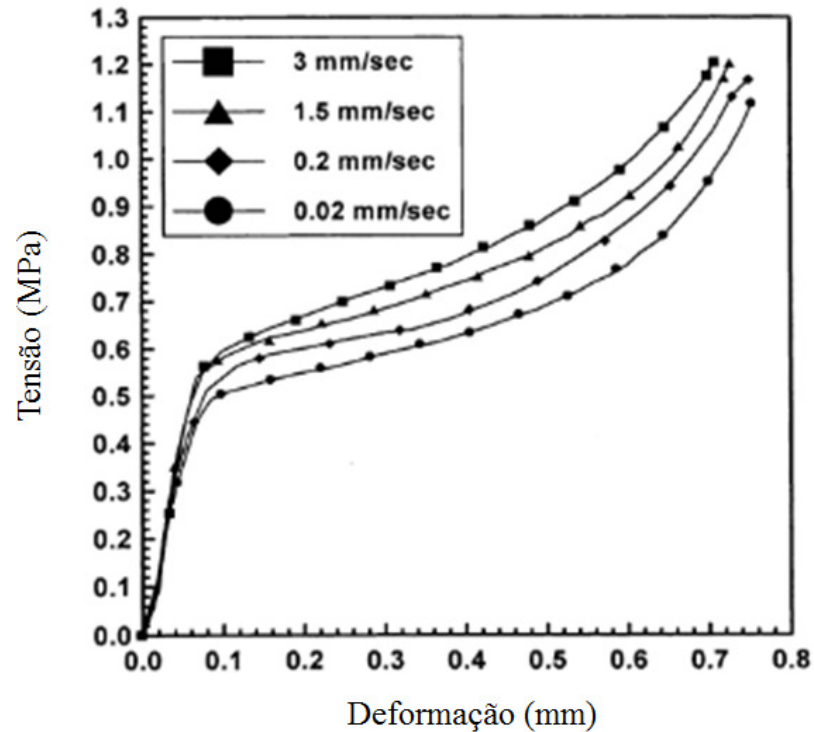
Segundo Liu et al. (2003) as propriedades mecânicas da espuma EPS são conhecidas por apresentar várias regiões de comportamento diferentes quando submetida a compressão: (1) um comportamento linear para as deformações de menos do que cerca de 0,05, (2) uma região de pico na qual a deformação aumenta à tensão constante ou quase constante, e (3) uma região de densificação da curva de esforço de tensão em que a tensão sobe abruptamente. Basicamente, a espuma é feita a partir de uma quantidade de pequenas células fechadas com dimensões na ordem de 100 μm .

O estudo de Liu et al. (2003) investigou as propriedades mecânicas da espuma EPS sob cargas compressivas e avaliou, graficamente, a influência de umidade e das compressões no comportamento mecânico do material. O modelo foi utilizado para prever as mudanças da capacidade de absorção de energia, inserindo os resultados do teste da espuma em um modelo de análise.

Resistência à umidade é a capacidade de um material de espuma de evitar a entrada de água na sua estrutura e por consequência prejudicar as suas propriedades mecânicas. A estrutura celular da EPS é essencialmente resistente à água e fornece capilaridade em condições normais de 25 °C e 30% de umidade relativa (LIU et al. 2003).

Segundo Liu et al. 2003 todas as curvas da Figura 17 têm basicamente a mesma aparência, onde a faixa elástica linear ocorre a partir da origem até cerca de 5% de deformação. Landro et al. (2002) fez a mesma observação. A faixa elástica é seguida por um fluxo contínuo em incrementos de tensão menores, com endurecimento por deformação que ocorre finalmente na região de deformação de 55% - 65%. Quando a taxa de deformação aumenta, a tensão também aumenta. Uma observação acerca desta figura é que o ensaio foi realizado sem influência de umidade e pré-compressões.

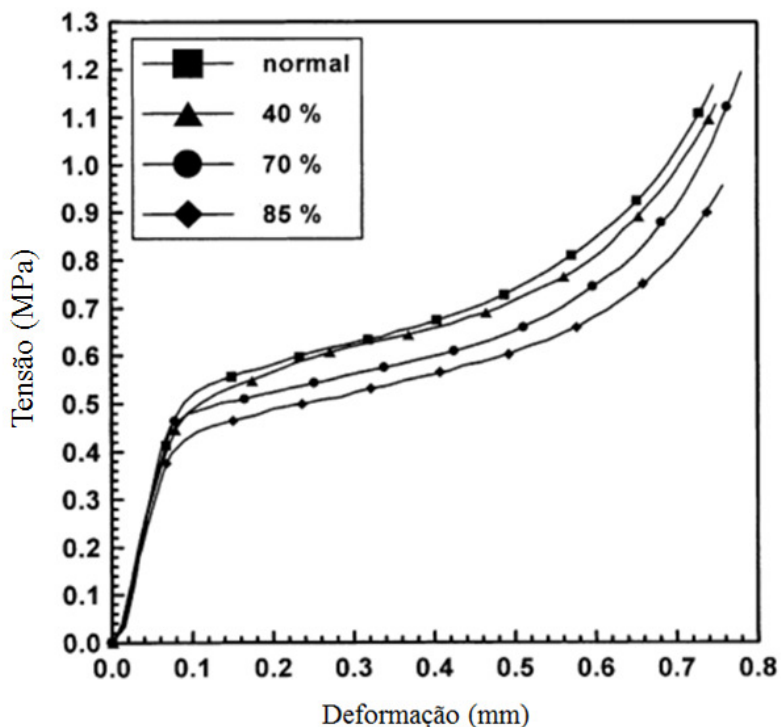
Figura 17 - Curva tensão vs. deformação da espuma EPS para várias taxas de deformação.



Fonte: Adaptado de LIU et al. 2003.

A Figura 18 mostra o comportamento da EPS em níveis diferentes de umidade relativa. Todas estas curvas aparecem com formato semelhante, onde faixa elástica linear ocorre por meio de deformação inicial de 5%-8% e é seguida por um fluxo contínuo em incrementos de tensão. Analisando os pontos na curva percebe-se que para uma mesma deformação a força em cada material diminui à medida que a umidade relativa aumenta. O endurecimento por deformação ocorre aproximadamente com 60% de deformação. Estes dados provam que o EPS pode absorver umidade quando ele está completamente imerso em água a alta temperatura. Isso porque difunde umidade nos interstícios e promove uma pressão adicional à parede da célula, onde a tensão de escoamento diminui com o aumento da porcentagem de umidade relativa (LIU et al., 2003).

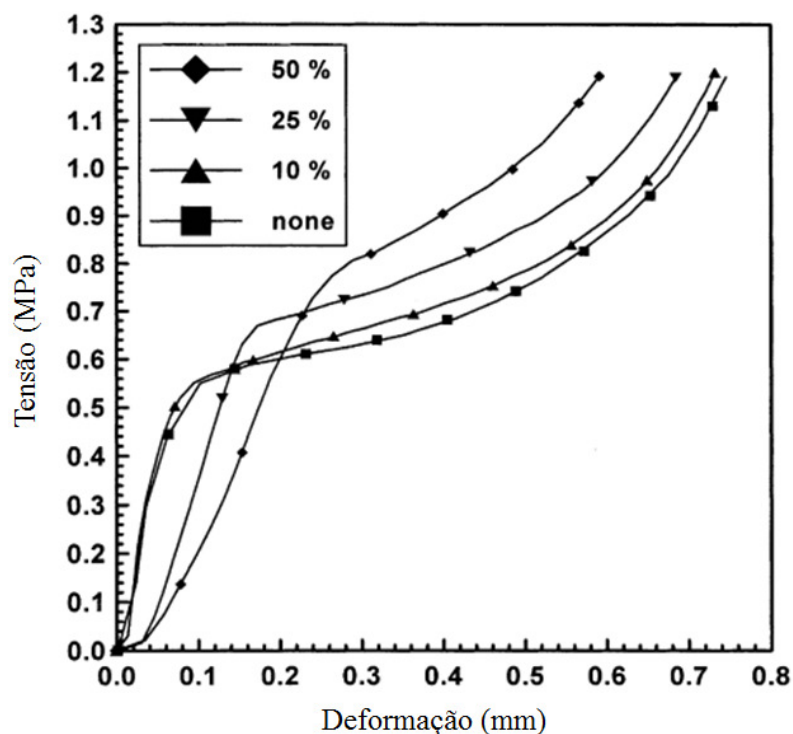
Figura 18 - Curva tensão vs. deformação da espuma EPS em vários níveis de umidade relativa.



Fonte: Adaptado de LIU et al. 2003.

Liu et al. (2003) mostram o efeito dessas mudanças nas propriedades mecânicas da espuma de EPS para porcentagens diferentes de pré-compressões (Figura 19). É evidente que as curvas de tensão-deformação com três etapas bem definidas somente existem para tensões pré-compressivas inferiores a 10%. Nota-se que para a pré-compressão atingindo 25%, a forma das curvas é modificada. A rigidez elástica é significativamente reduzida e as tensões aumentam com os valores de pré-compressão. Quando os 50% de pré-compressão é atingido, devido à grande quantidade de células que colapsam e de uma deformação não recuperável (comportamento plástico), a curva de tensão-deformação se transformou em uma curva em duas fases. Na primeira (antes de 20 – 30% de deformação) tem-se que para pequenas aplicações de tensão uma deformação elevada. Já na segunda (depois de 20 – 30% de deformação) os níveis de tensão alteram pouco a deformação, perdendo a rigidez elástica e as propriedades mecânicas. Pode-se inferir que quanto maior a pré-compressão do material, maiores são os efeitos sobre o desempenho de absorção de energia, sendo eles negativos ao material.

Figura 19 - Curva tensão vs. deformação da espuma EPS em vários níveis de pré-tensão compressiva.



Fonte: Adaptado de LIU et al. 2003.

5.9 Relações entre as Propriedades Mecânicas dos Capacetes Fabricados com Diferentes Materiais

Para comparação entre as propriedades dos capacetes fabricados com diferentes materiais foram utilizados os bancos de dados disponibilizados pelo site especializado em testes de marcas comerciais de capacete, o site britânico SHARP (Safety Helmet Assessment and Rating Programme): The Helmet Safety Scheme. O trabalho que originou este site iniciou-se em 2007 depois que o Departamento de Transportes do Reino Unido testou e encontrou diferenças reais no desempenho de capacetes disponíveis comercialmente e, embora esses capacetes cumprissem com as normas mínimas estabelecidas, a pesquisa mostrou que mais de 50 vidas poderiam ser salvas anualmente se os motociclistas usassem os capacetes mais seguros disponíveis comercialmente (SHARP, 2013).

Uma das vantagens de usar o site como referência é, além dos testes serem feitos em capacetes comerciais, a forma em como são apresentados os dados resultantes dos testes: utiliza-se um simples sistema de pontuação de cinco estrelas. Os capacetes são submetidos a

rigorosos testes de impacto que avaliam sua resistência em cinco pontos diferentes da cabeça e, segundo os resultados obtidos, os capacetes são avaliados com estrelas entre 1 a 5. Um capacete com cinco estrelas oferece bons níveis de proteção, embora todos sejam qualificados, pois todos atendem a requisitos mínimos.

É interessante observar que nem todos os capacetes oferecem segurança adequada nos cinco pontos avaliados que são: dois pontos na região frontal, dois nas laterais (esquerda e direita) e um na região traseira. Outra observação feita no site é que nunca deve-se esquecer do fator ajuste, ou seja, o capacete deve ser do tamanho e geometria adequada ao motociclista (SHARP, 2013).

Outra forma de apresentar os resultados obtidos nos ensaios de impacto adotados pelo site foi o uso de um diagrama de cores. Em cada diagrama, para cada ponto de teste, é atribuída uma cor para mostrar o nível de desempenho medido colidindo o capacete contra uma superfície plana em alta velocidade. As zonas de impacto são classificadas em seis cores significando 'muito bom' para a cor verde, decrescendo para as cores amarela, laranja, marrom, vermelha e chegando até o conceito de desempenho 'pobre' para a cor preta.

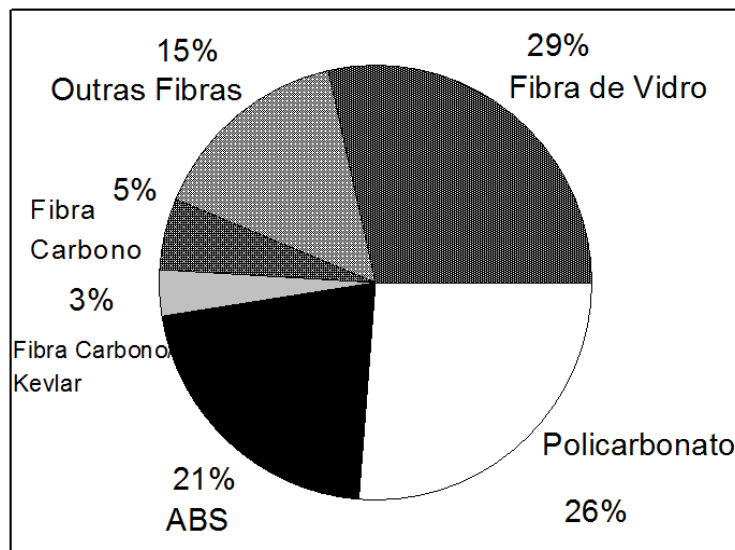
A SHARP realiza 32 testes de impacto em cada modelo de capacete antes de conceder a classificação por estrelas. Outra vantagem desse site é fornecer o preço dos capacetes e assim, sendo possível relacionar preço, material utilizado na fabricação do capacete e desempenho.

Dessa forma a seguinte metodologia foi adotada nesta etapa da pesquisa para apresentação dos resultados:

- Coletar do site informações acerca de 263 capacetes, sendo fabricados com policarbonato, ABS, compósitos com fibras de vidro, carbono, carbono/Kevlar (aramida) e outras fibras. Sendo a categoria “outras fibras” como o conjunto de capacetes fabricados com matriz polimérica reforçada com fibras que não sejam as de vidro, carbono e da combinação carbono/aramida.
- Sobre esses capacetes buscar as informações relacionadas aos materiais utilizados na sua construção, preço desses capacetes (em libras, pelo fato da SHARP realizar cotações no Reino Unido, mesmo de capacetes de outros países), desempenho.
- Montar gráficos comparativos usando o software Origin.

O primeiro gráfico é apresentado na Figura 20 é usado para demonstrar a proporção do número de capacetes de um determinado material em relação ao número total dos capacetes da amostragem.

Figura 20 - Proporção de capacetes relacionados com o material utilizado na sua fabricação em relação ao total de capacetes avaliados.

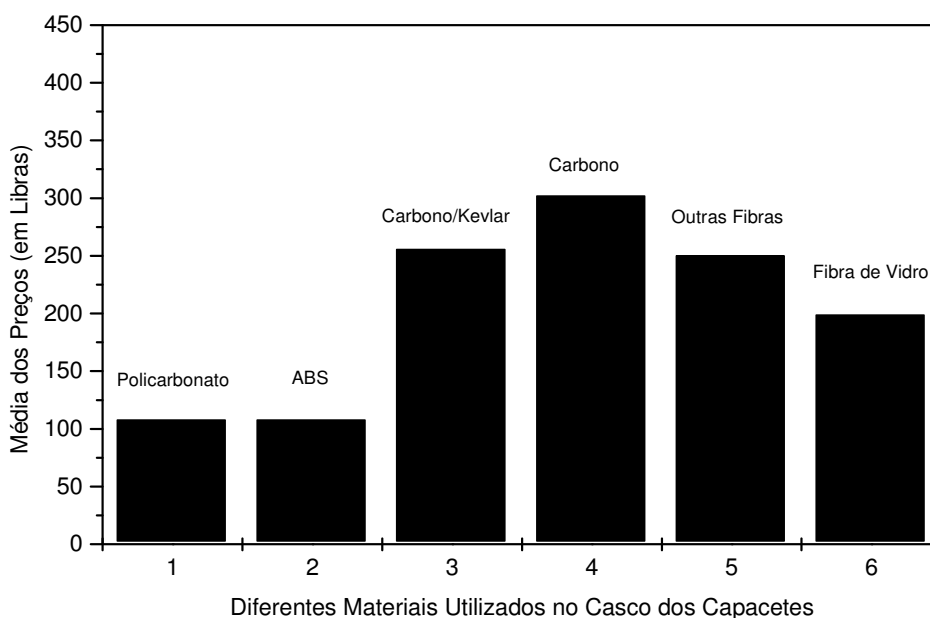


Fonte: Autor.

É possível observar na Figura 20 que a proporção de capacetes comerciais fabricados com fibras de vidro é maior do que as demais, seguida pela proporção de capacetes fabricados com policarbonato, o que demonstra a tendência da adoção de materiais compósitos na fabricação de capacetes. O ABS, mais usado quando a pesquisa acadêmica foi realizada, aparece em terceiro lugar em termos de proporção de capacetes avaliados. Esse fato pode ser explicado por se referir a um site britânico, onde o poder de compra é maior. Se pesquisa fosse feita no Brasil, por exemplo, um país em desenvolvimento, a parcela de capacetes de ABS seria maior por possuir um preço mais acessível aos consumidores. Considerando que o site de referência está sempre se atualizando, estando em atividade desde 2007, é mostrada uma amostragem representativa do panorama mundial dos materiais mais utilizados na fabricação de capacetes. É possível observar que a proporção do uso de fibra de carbono e da híbrida carbono/Kevlar é pouco expressiva em relação às demais, mas deve-se salientar que são fibras bem mais caras e por isso, provavelmente, seu uso não se dá em larga escala (NETO, PARDINI, 2006).

A fim de avaliar a relação desses materiais com o seu custo, a Figura 21 é apresentada.

Figura 21 - Média dos preços dos capacetes avaliados por tipo de material usado em sua fabricação.

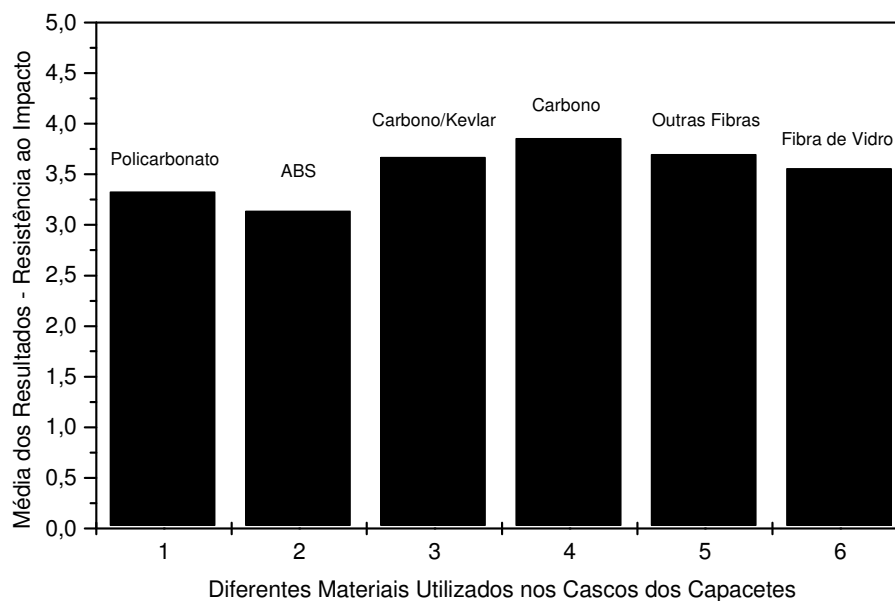


Fonte: Autor.

A Figura 21 apresenta a média dos preços dos capacetes utilizados na amostragem de dados, mostrando que os capacetes feitos de materiais compósitos são mais caros, sendo o mais caro o fabricado com fibra de carbono. É possível relacionar esse preço com o valor agregado da matéria-prima utilizada, pois as fibras de carbono possuem preço mais elevado (NETO, PARDINI, 2006). Mas pode-se aludir também a uma possibilidade de que a manufatura desses capacetes compósitos seja eventualmente mais onerosa.

A Figura 22 mostra as informações comparativas referentes ao desempenho destes capacetes quanto ao ensaio de impacto, tratando-se, portanto, da apresentação de dados mais relevante no que tange ao objetivo deste trabalho.

Figura 22 - Comparação da resistência ao impacto dos capacetes usando a classificação por atribuição de estrelas.

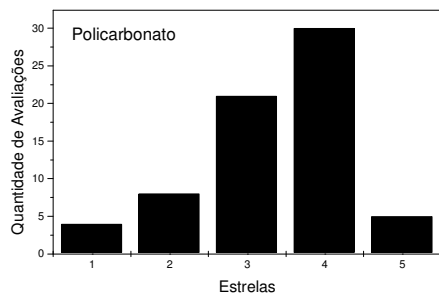


Fonte: Autor.

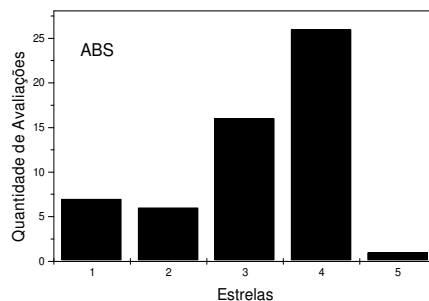
Ao observar a Figura 22 nota-se que a média dos resultados obtidos pelo ensaio de impacto sinaliza uma boa similaridade de valores entre os diferentes materiais utilizados na fabricação de capacetes, com alguma prevalência em termos de resistência ao impacto, da qualidade das fibras de carbono, seguida pela híbrida carbono/aramida.

Para se obter essa média foram somadas todas as estrelas atribuídas aos capacetes e divididos pelo total de capacetes feitos do determinado material. Neste sentido, por exemplo, foram testados 14 capacetes feitos de fibra de carbono aos quais foram atribuídas de 3 a 5 estrelas para cada capacete, totalizando 53 estrelas. Esse valor foi dividido pelo número de capacetes avaliados, ou seja, $53/14$, e obtendo-se uma média – 3,86. Porém, ao observar a Figura 22, com o objetivo de realizar uma avaliação mais criteriosa dos dados, separou-se em gráficos diferentes a relação do número de capacetes de cada material com o número de avaliações positivas que cada capacete recebeu. Assim, foi gerada uma sequência de 6 gráficos, os quais são mostrados na Figura 23.

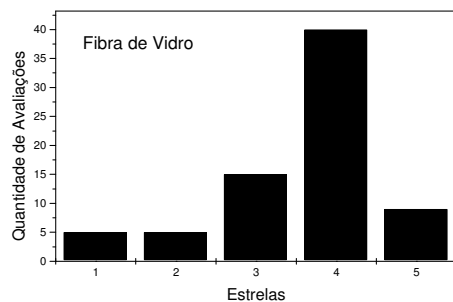
Figura 23 - Gráficos da relação das estrelas atribuídas aos capacetes de diferentes materiais.



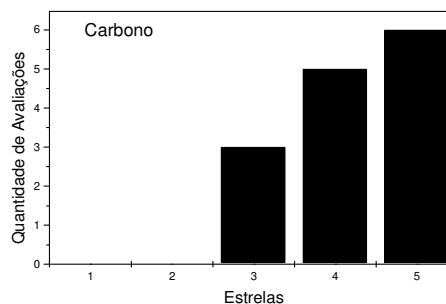
a)



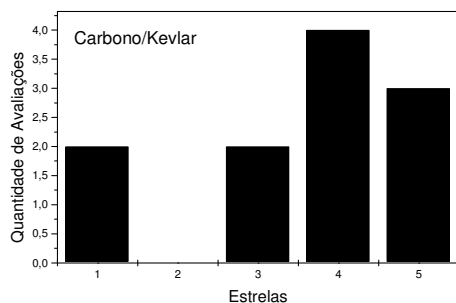
b)



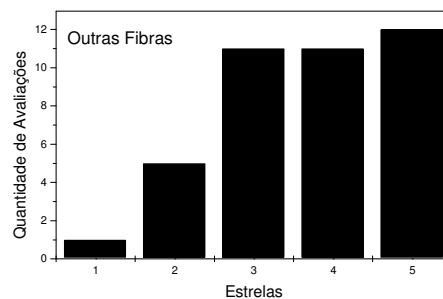
c)



d)



e)



f)









Fonte: Autor.

A importância de apresentar em separado os gráficos de atribuição do número de vezes que os capacetes foram avaliados com 5, 4, 3, 2 ou 1 estrela está na oportunidade de avaliar a variabilidade na qualidade desses capacetes em relação ao material usado em sua fabricação. Assim sendo, é possível observar, por exemplo, que os capacetes fabricados com fibras de carbono não tiveram em nenhuma das avaliações um rendimento que lhe conferisse a atribuição de 1 ou 2 estrelas. Todas as avaliações para esse material renderam de 3 a 5

estrelas para o capacete avaliado. Por outro lado poucos capacetes fabricados com policarbonato e ABS aparecem com a atribuição máxima de 5 estrelas. Observa-se a prevalência da atribuição de 4 estrelas para os capacetes fabricados com fibras de vidro e a ausência de avaliação de 2 estrelas para os fabricados com carbono/aramida. Em relação a este último, apesar de estar entre os capacetes mais caros, vê-se que ele possui avaliações de 1 estrela, mostrando que os motociclistas podem, eventualmente, estar pagando por um capacete caro, manufaturado com material de alta tecnologia mas que apresenta desempenho pouco diferente de capacetes mais modestos. Essa discrepância observada em alguns capacetes de carbono/aramida pode ter origem em outros parâmetros que não o material, como por exemplo, o fator design.

Para melhor ilustrar tal situação, tem-se na Figura 24 o organograma de cores versus ponto de impacto analisado para duas situações: avaliação 4 estrela e avaliação 1 estrela.

Figura 24 - Organograma de cores por resultado no teste de impacto em diversos pontos do capacete.

| AGV GP TECH – FEITO DE CARBONO/KEVLAR – 4 ESTRELAS | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| Impacto Frontal | Impacto Lateral Esquerda | Impacto Posterior | Impacto Lateral Direita |
| CMS – GP5F – FEITO DE CARBONO/KEVLAR – 1 ESTRELA | | | |
|  |  |  |  |
| Impacto Frontal | Impacto Lateral Esquerda | Impacto Posterior | Impacto Lateral Direita |

Fonte: Autor.

Na Figura 24 apresenta-se o resultado dos testes de impacto para dois capacetes feitos do mesmo material, carbono/Kevlar, representado pela variação das cores. É possível observar o primeiro capacete, que recebeu avaliação 4 estrelas da SHARP, mostra bons níveis de proteção frontal e posterior e um menor desempenho para impactos laterais. Já o capacete que recebeu avaliação 1 estrela apresenta níveis baixos de proteção principalmente para impactos na lateral direita.

De forma semelhante é possível encontrar na amostragem utilizada capacetes fabricados de policarbonato e/ou ABS com desempenho avaliado em 5 estrelas, mesmo sendo um capacete mais acessível financeiramente. Porém de uma maneira geral é observável a relação custo – material – desempenho.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o trabalho fica evidenciado que o uso do capacete para o motociclista é essencial na proteção da cabeça durante um acidente. Lesões no crânio e no cérebro podem ser evitadas se o motociclista estiver usando o dispositivo de segurança. Aliado a isso, as restrições da norma quanto à fabricação destes dispositivos de proteção devem ser atendidas para que a padronização seja assegurada, assim como os requisitos mínimos de segurança. Todos os ensaios para a verificação da qualidade dos capacetes também deverão ser realizados a fim de certificar o produto, de maneira que se algum acidente acontecer com o usuário, o produto atenda as características do projeto.

Destacaram-se o uso dos polímeros ABS e policarbonato, bem como as fibras de vidro, Kevlar e carbono como materiais de fabricação e composição. Utilizando como fonte de dados o site da SHARP, que possibilitou fazer um panorama mundial bem atualizado a respeito da qualidade dos capacetes comercializados em nível mundial, percebeu-se que os capacetes fabricados com materiais compósitos têm um desempenho superior aos dos fabricados com ABS e policarbonato, embora os fabricados com esses materiais poliméricos também apresentassem bons resultados. Contudo, todos cumprem o seu papel quando o quesito é a segurança do condutor. A resistência ao impacto acaba sendo a propriedade mecânica mais importante, devendo ser levada em consideração no projeto do capacete e nos ensaios de certificação e qualidade. Por fim, deve-se levar em conta que a degradação por agentes físicos ou químicos podem acarretar na perda de função das propriedades do material, comprometendo a funcionalidade principal do dispositivo, de proteger a cabeça do motociclista, sendo necessário o seu descarte e substituição por parte dos usuários.

Como limitação do estudo desenvolvido pode ser destacada a influência dos componentes como o revestimento de conforto, a cinta jugular, a viseira, dentre outros, no desempenho do capacete, uma vez que foram escolhidos o casco e o revestimento de proteção como foco do trabalho. Essa decisão ocorreu devido ao fato de que estes dois componentes são responsáveis pelo gerenciamento de energia durante uma colisão, impactando diretamente na segurança do usuário, objetivo do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIPLAST: Aditivos e termoplásticos Ltda. Disponível em: < http://www.adiplast.ind.br/news_abs.php> . Acesso em: 11 jun. 2013.

ALBUQUERQUE, J. A. C. **Planeta Plástico: Tudo que você precisa saber sobre plásticos.** São Paulo: Editora Eco, 2001. 285p.

ARAI HELMET: Fabricante de Capacetes para Motociclistas. Disponível em: <<http://www.araihelmet-europe.com/site/>>. Acesso em: 21 jun. 2013.

ASHBY, M.; JONES, D. **Engenharia de Materiais: Uma introdução a propriedades, aplicações e projetos.** São Paulo: Editora Elsevier - Campus, p. 356, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR – 7471 Capacete de proteção para ocupantes de motocicletas e similares – Especificação.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR – 7472 Capacete de proteção para ocupantes de motocicletas e similares – Verificação das características.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR – 7473 Capacete de proteção – Cabeça de ensaio – Dimensões.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF AUTOMOTIVE MEDICINE - AAAM. **The Abbreviated Injury Scale (AIS):** 1990 revision. Update 1998. Des Plaines, IL; 1998.

BORIN, J. E.; MUSSI, L. **QG 661 - Química Aplicada: Resina ABS.** Disponível em: <<http://chipre.iqm.unicamp.br/~wloh/offline/qg661/2trab2.html>>. Acesso em: 22 mai. 2013.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução.** Rio de Janeiro: Editora LTC, p. 800, 2007.

CHANG, C.Y.; HO, C. H.; CHANG, S. Y. **Design of a Helmet**. ME 499/599 Fall, 2003.

CHIARINI, F. L. **EMPRESA DE TRANSPORTES E TRÂNSITO DE BELO HORIZONTES/A – BHTRANS**: Informações sobre acidentes de trânsito com vítimas no município de Belo Horizonte. Diretoria de atendimento e informação. Gerência de Pesquisa e Documentação – GPDOC, p. 41, 2011.

ETHERIDGE, R. A.; KORMI, K. **Finite element analysis - Application of the finite element method to simulation of damage to the human skull as a consequence of missile impact on a multi-layered composite crash helmet**. J. Biomed, p. 14, 1992.

GHAJARI, M.; PELDSCHUS, S.; GALVANETTO, U.; IANNUCCI, L. **Effects of the presence of the body in helmet oblique impacts**. Accident Analysis and Prevention vol. 50 January. p. 263-271, 2013.

GILCHRIST, A.; MILLS N. J. **Modeling of the impact response of motorcycle helmets**. Int J Impact Eng; 15(3): p. 201–218, 1994.

GILCHRIST, A.; MILLS N. J. **Impact deformation of ABS and GRP motorcycle helmet shells**. Plastics, Rubber Composite Process Appl,; 21: p.141–150, 1994.

GONÇALVES, D. F. S. **Segurança passiva de capacetes rodoviários utilizando novos materiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Aveiro, Portugal, p. 1-104, 2009.

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, p. 396- 406.

HAMOUDA, A. M. S. **A new motorcycle helmet liner material:** The finite element simulation and design of experiment optimization. *Materials & Design* 28(1): p. 182–195, 2007.

INCOMPLAST: Policarbonato - Também conhecido como: Durolon, Makrolon, PC, Lexan e Polyhard. Disponível em : <[http:// www. incomplast. com. br/materiais/policarb. htm](http://www.incomplast.com.br/materiais/policarb.htm)>. Acesso em: 24 jul. 2013.

KOSTOPOULOS, V.; MARKOPOULOS, Y.P.; GIANNOPOULOS, G.; VLACHOS, D.E. **Finite Element Analysis of Impact Damage Response of Composite Motorcycle Safety Helmet.** *Composites Part B: Engineering*, Vol. 33, p. 99-107, 2002.

LANDRO, L. D.; SALA, G.; OLIVIERI, D. **Deformation mechanisms and energy absorption of polystyrene foams for protective helmets.** *Polymer Testing*; 21: p. 217–28, 2002.

LEVY, S. **Capacetes, Mais, Produtos, Segurança: Normas e regras sobre capacetes preservam a vida do motociclista.** Disponível < <http://www.motonline.com.br/normas-e-regras-sobre-capacetes-preservam-a-vida-do-motociclista/>>. Acesso em: 15 mar. 2013.

LIU, D. S.; CHANG, C. Y.; FAN, C. M.; HSU, S. L. **Influence of Environmental Factors on Energy Absorption Degradation of Polystyrene Foam in Protective Helmets Engineering Failure Analysis.** *Engineering Failure Analysis*; 10, p. 581 – 591, 2003.

MILLS, N.J. **Polymer Foam Handbook:** Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide. Elsevier Ltd.; 2007.

MILLS, N.J.; FITZGERALD, C.; GILCHRIST, A.; VERDEJO, R. **Polymer foams for personal protection: cushions, shoes and helmets.** *Composites Science and Technology*, 63 (16). p. 2389-2400, 2003.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia.** Edgard Blücher, p. 40-45, 2006.

NEVES, F. C. **Atributos da Qualidade de Capacete para Motociclista: A Percepção dos Profissionais Motofretistas e Mototaxistas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, p.131, 2011.

NOGUEIRA, L. S.; DOMINGUES, C. A.; CAMPOS, M. A.; SOUSA, R. M. C. **Dez anos de new injury severity score (NISS): possível mudança?** Revista Latino-Americana de Enfermagem, vol. 16, núm. 2, abril, 2008. Universidade de São Paulo, Brasil.

OLIVEIRA, N. L. B.; SOUSA, R. M. C. **Diagnóstico de lesões e qualidade de vida de motociclistas, vítimas de acidentes de trânsito.** Rev. Latino-Am. Enfermagem, vol.11, n.6, p. 749-756, 2003.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OPAS/ OMS). **Classificação estatística internacional de doenças e problemas relacionados à saúde.** São Paulo: EDUSP; 2007.

PATEL, R.; MOHAN D. **An improved motorcycle helmet design for tropical climates.** Applied Ergonomics; 24(6): p. 427–31, 1993.

PEROTTI, A. P.; SCHMIDT, A. S.; GODOY, L. P. **QFD no Planejamento da Qualidade de Capacetes para Ocupantes de Motocicletas.** Revista Gestão Industrial. v. 05, p. 134-158, 2009.

PINNOJI P.K., MAHAJAN P. **Analysis of impact-induced damage and delamination in the composite shell of a helmet.** Material and Design, 31(8), p.3716-3723, 2010.

PINNOJI, P.K.; MAHAJAN, P.; BOURDET, N.; DECK, C.; WILLINGER, R. **Impact dynamics of metal foam shells for motorcycle helmets: Experiments & numerical modeling.** International Journal of Impact Engineering, vol. 37, issue 3, March, p. 274-284, 2010.

RAMOS, C. S. **Caracterização do acidente de trânsito e gravidade do trauma: um estudo em vítimas de um Hospital de Urgência em Natal/RN.** Dissertação. Programa de Pós-Graduação do Departamento de Enfermagem, UFRN (Universidade Federal do Rio Grande do Norte), p. 121, 2008.

SCHMIDT, A. S. **Otimização dimensional dos capacetes de proteção para motociclistas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, p.158, 1987.

SHARP: The helmet safety scheme. Disponível: <<http://sharp.direct.gov.uk/home>>. Acesso em: 14 mar. 2013.

SHUAEIBA, F. M.; HAMOUDA, A. M. S.; RADIN UMARA, R. S.; HAMDANA, M. M.; HASHMIB, M. S. J.. **Motorcycle Helmet : Part I.** Biomechanics and Computational Issues. *Jornal of materials Processing Technology* 123, p. 406-421, 2002.

SILVA, J. G. P. ; POSSOLI, K.; ARRUDA, P.; RIBEIRO, E. B.; BARRA, G. M.; AL- QURESHI, H. A. **Modelo Analítico de Impacto em Material Composto Aplicado ao Projeto de Capacetes.** *Exacta* (São Paulo. Impresso), v. 8, p. 34-43, 2010.

SIMIELLI, E. R. **Principais Características das Blendas Poliméricas Fabricadas no Brasil,** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Campinas, p. 45-49, Jan/Mar 1993.

VAN DEN BOSCH, H. L. A. **Crash Helmet Testing and Design Specifications.** PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2006.

WIEBECK, H.; HARADA, J. **Plásticos de Engenharia: Tecnologia e Aplicações.** São Paulo: Editora Artliber, 2005. 349p.

ZAHID, B. **Riot Helmet Shells with Continuous Reinforcement for Improved Protection.** Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências Físicas) – Universidade de Manchester, p.191, 2011.