



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Departamento de Engenharia Electromecânica  
Mestrado em Engenharia Electromecânica

***MELHORIA DA RESISTÊNCIA AO  
IMPACTO EM PAINÉIS DE AUTOCARROS***

*Nuno Filipe Soares Rodrigues*

COVILHÃ  
2008



**UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR**

Departamento de Engenharia Electromecânica

Mestrado em Engenharia Electromecânica

***MELHORIA DA RESISTÊNCIA AO  
IMPACTO EM PAINÉIS DE AUTOCARROS***

Por:

***Nuno Filipe Soares Rodrigues***

Dissertação apresentada em cumprimento  
dos requisitos para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Electromecânica

COVILHÃ

2008

Ao meu filho e esposa

## AGRADECIMENTOS

Durante a realização desta dissertação foram recebidos vários apoios que auxiliaram e estimularam a sua elaboração. O autor deseja expressar os seus agradecimentos a todas as pessoas e instituições que possibilitaram a realização deste trabalho, nomeadamente:

- Ao orientador científico, Professor Paulo Nobre Balbis dos Reis, por toda a disponibilidade, colaboração, dedicação e pela constante atenção e apoio que dedicou ao longo de toda a sua execução e que sempre se mostrou incansável, nunca baixando o grau de exigência.
- Ao Engenheiro Carlos Coelho, do Instituto Politécnico de Abrantes por todo o apoio, orientação e disponibilidade para a realização dos ensaios de impacto.
- A todos os elementos do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Politécnico de Abrantes, pelo apoio e colaboração manifestada ao longo da execução do trabalho experimental.
- Ao Eng. Carlos, da SSAB, pelas informações, apoio técnico e fornecimento de material para a elaboração do meu trabalho experimental.
- À Universidade da Beira Interior por todas as facilidades concedidas e oportunidade dada aos antigos alunos na continuação dos seus estudos.
- Ao Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior pelo apoio e colaboração prestada ao longo da execução desta dissertação.
- À CaetanoBus e seus responsáveis, por todo o apoio dado e valorização à minha formação.
- Aos meus amigos pela forma como me ajudaram a criar todas as condições necessárias à execução deste trabalho.

- Aos meus PAIS pelo incentivo e apoio incondicional.
- À minha esposa e filho pelo apoio dado e pelo tempo dispensado.

## RESUMO

A ideia de efectuar um estudo de resistência ao impacto partiu de relatos de acidentes em Inglaterra, em que após despiste dos autocarros ocorre, muitas vezes, intromissão de ramos de árvores e outros objectos no interior dos veículos.

Actualmente, em termos de impacto, os passageiros estão protegidos pelo chapeamento lateral e pela estrutura. O chapeamento lateral é feito com recurso a chapa de aço ou alumínio com espessura variável. As zonas do motorista e guia são as mais expostas devido à grande superfície vidrada que os envolve e pela sua maior exposição, dada a sua localização mais baixa relativamente aos restantes passageiros. Nesta zona a protecção existente é efectuada pela estrutura, chapa e fibra de vidro, dependendo das áreas.

O presente estudo compara, assim, o comportamento de diferentes materiais ao impacto como o alumínio, uma sanduíche alumínio/pecolit/alumínio e aços de elevada resistência Docol 1000 e Docol 1200.

O alumínio, por exemplo, é usado em muitas aplicações na indústria automóvel, com a vantagem do seu baixo peso específico associado à poupança energética e menores emissões poluentes. As sanduíches além de apresentarem uma boa resistência mecânica, possuem ainda uma grande capacidade de absorção de energia. Estas propriedades tornam este tipo de materiais bastante utilizados em aplicações sujeitas ao impacto, conforme ocorre na indústria aeronáutica. Finalmente os aços de elevada resistência são materiais recentes e já com aplicações muito satisfatórias na indústria automóvel.

A comparação do comportamento ao impacto destes materiais mostrou que, para igual peso, os aços de elevada resistência são os materiais que absorvem mais energia e logo a melhor solução para aplicações sujeitas ao impacto. Os resultados obtidos permitem assim concluir que podem ser aplicadas chapas de aço com espessuras muito mais baixas que as usadas, por exemplo, com o alumínio, para os mesmos níveis de energia de impacto.

## ABSTRACT

The idea of an impact behaviour investigation was grown after some bus and coach accident reports. On those accidents, after screening, occur branches and other elements intrusion inside the vehicle.

Nowadays, in terms of impact, the passengers are only protected by side panelling and structure. Side panelling is made of steel sheets or aluminium with variable thickness. Driver and guide areas are the most exposed due to the large windscreen area and to their lower position compared to the rest of the passengers. In this area the existing protection is given by the structure, steel panelling and fibber glass, depending on the position.

This investigation compares the impact behaviour of different materials such as aluminium and high strength steels (Docol 1000 and Docol 1200) and also sandwiches of aluminium/pecolit/aluminium.

Aluminium is largely used in automotive industry, due to is lower specific weight ratio with direct benefits in energy saving and less emissions. The sandwiches despite their good strength have also good energy absorption. Those properties make the sandwiches good options when is necessary good impact behaviour as needed as in aeronautic industry. Finally, high strength steels. Those steels are mainly used in automotive industry with very good results.

The comparison of material impact behaviour, shown that for the same weight, the high strength steels absorbs more energy and are the best option when is needed good impact properties. From the tests made can be concluded that with lower thickness, compared with aluminium is possible to achieve to the same impact protection.

---

## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xi
NOMENCLATURA	xii
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2 – ENQUAADRAMENTO TEÓRICO</b>	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 3 – MATERIAL, EQUIPAMENTO E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS</b>	<b>11</b>
3.1 – Introdução	12
3.2 – Caracterização dos Materiais	12
3.3 – Provetes	15
3.4 – Equipamentos	17
3.5 – Procedimento Experimental	19
<b>CAPÍTULO 4 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b>	<b>21</b>
4.1 – Introdução	22
4.2 – Comportamento ao impacto do Alumínio 1050 H24	22
4.3 – Comportamento ao impacto da sanduíche Alumínio/Pecolite/Alumínio	27
4.4 – Comportamento ao impacto dos Aços de elevado limite elástico	35
4.5 – Análise Comparativa	43

<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>47</b>
5.1 – Conclusões Gerais	48
5.2 – Recomendações para trabalhos futuros	49
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>51</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Geometria dos provetes usados nos ensaios de impacto; e=1 mm para aços de elevada resistência, e=1.5 mm para alumínio 1050 H24 e e=2 mm para a Pecolit	16
Figura 3.2 – Geometria dos provetes usados nos ensaios de impacto para a sanduíche alumínio/pecolit/alumínio. Dimensões em milímetros	16
Figura 3.3 – Máquina de impacto IMATEK-IM10: a) Vista geral; b) Vista de detalhe Provetes	17
Figura 3.4 – Impactor hemisférico de diâmetro 20 mm utilizado nos ensaios de impacto	19
Figura 3.5 – Figura ilustrando as condições de encastramento nos ensaios de impacto	19
Figura 4.1 – Força versus tempo para os ensaios de impacto no alumínio 1050 H24	23
Figura 4.2 – Força versus deslocamento para os ensaios de impacto no alumínio 1050 H24	23
Figura 4.3 – Energia versus tempo para os ensaios de impacto no alumínio 1050 H24	24
Figura 4.4 – Fotografias ilustrando o dano ocorrido nos provetes de alumínio 1050 H24 com energias de impacto de: a) 23.6 J, b) 35.4 J, c) 44.2 J	26
Figura 4.5 – Força versus tempo para o ensaio de impacto realizado na Pecolit	28
Figura 4.6 – Força versus deformação para o ensaio de impacto realizado na Pecolit	29
Figura 4.7 – Energia versus tempo para o ensaio de impacto realizado na Pecolit	29
Figura 4.8 – Fotografia ilustrando o dano ocorrido nos provetes de Pecolit após impacto com energia de 27.96 J	30
Figura 4.9 – Força versus tempo para os ensaios de impacto realizados na sanduíche alumínio/pecolit/alumínio	31
Figura 4.10 – Força versus deslocamento para os ensaios de impacto realizados na sanduíche alumínio/pecolit/alumínio	32
Figura 4.11 – Energia versus tempo para os ensaios de impacto realizados na sanduíche alumínio/pecolit/alumínio	33
Figura 4.12 – Fotografias ilustrando o dano ocorrido nos provetes em sanduíche com energias de impacto de: a) 74.6 J, b) 111.8 J, c) 169.95 J	34
Figura 4.13 – Força versus tempo para os ensaios de impacto realizados no Docol 1000	36
Figura 4.14 – Força versus deslocamento para os ensaios de impacto realizados	

---

no Docol 1000	36
Figura 4.15 – Energia versus tempo para os ensaios de impacto realizados no Docol 1000	37
Figura 4.16 – Fotografias ilustrando o dano ocorrido nos provetes de aço Docol 1000 com energias de impacto de: a) 111.8 J, b) 167.8 J, c) 223.7 J	38
Figura 4.17 – Força versus tempo para os ensaios de impacto realizados no Docol 1200	39
Figura 4.18 – Força versus deslocamento para os ensaios de impacto realizados no Docol 1200	40
Figura 4.19 – Energia versus tempo para os ensaios de impacto realizados no Docol 1200	41
Figura 4.20 – Fotografias ilustrando o dano ocorrido nos provetes de aço Docol 1200 com energias de impacto de: a) 111.8 J, b) 167.8 J, c) 223.7 J	42
Figura 4.21 – Energia critica de impacto por unidade de massa para os diferentes materiais	43
Figura 4.22 – Força critica de impacto por unidade de massa para os diferentes materiais	44

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Composição química do alumínio 1050 H24 (% em peso)	12
Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas do alumínio 1050 H24	13
Tabela 3.3 – Composição química do aço Docol 1000 (% em peso)	14
Tabela 3.4 – Composição química do aço Docol 1200 (% em peso)	14
Tabela 3.5 – Propriedades mecânicas do aço Docol 1000	14
Tabela 3.6 – Propriedades mecânicas do aço Docol 1200	14
Tabela 3.7 – Propriedades mecânicas do Pecolit	15
Tabela 3.8 – Parâmetros usados nos diferentes ensaios	20
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de impacto para o alumínio 1050 H24	27
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de impacto para a Pecolit	30
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de impacto para a sanduíche	33
Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de impacto para o aço Docol 1000	39
Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de impacto para o aço Docol 1200	41

## NOMENCLATURA

- $C_0$  = constante de integração  
 $e$  = espessura  
 $E$  = módulo de rigidez  
 $E_{crit}$  = energia crítica (valor de energia para o qual surgem os primeiros danos por impacto)  
 $F(t)$  = força lida pela célula de carga  
 $F_{máx}$  = força de impacto máxima ocorrida durante o ensaio  
 $g$  = aceleração da gravidade  
 $h$  = altura do centro de gravidade da massa do impactor relativamente à superfície de referência  
 $m$  = massa do impactor  
 $V(t)$  = velocidade da célula de carga  
 $v_0, V_0$  = velocidade inicial  
 $X(t)$  = deflexão em função do tempo

### Símbolos gregos

- $\epsilon_r$  = deformação até à rotura  
 $\nu$  = coeficiente de Poisson  
 $\rho$  = massa específica  
 $\sigma_c$  = tensão de cedência uniaxial  
 $\sigma_r$  = tensão de rotura uniaxial

### Abreviaturas

- ISO = International standart organisation  
UP = Poliéster não saturado

# Capítulo 1

---

## INTRODUÇÃO

Cada vez é maior a preocupação dos construtores de veículos a motor pela segurança dos seus ocupantes. Se até à muito pouco tempo este tema era abordado apenas pelos construtores dos veículos ligeiros (classe M1), ele começa agora, ainda que muito timidamente, a despontar o interesse dos construtores de autocarros (classe M3).

Neste sector, e em termos legislativos, são poucas as obrigatoriedades ao nível da matéria de segurança passiva. Por exemplo, nos dias de hoje, a comercialização de um autocarro no mercado europeu apenas necessita cumprir as especificações recomendadas na:

- Directiva 74/408/EC [1], com ultima alteração dada pela directiva 2005/39: resistência dos bancos e sua fixação;
- Directiva 76/115/EC [1], com ultima alteração dada pela directiva 2005/41: fixação dos cintos de segurança;
- Directiva 77/541/EC [1], com ultima alteração dada pela directiva 2005/40: cintos de segurança e sistemas de retenção;
- Regulamento 66/ECE [2]: resistência da superestrutura em veículos pesados de passageiros, onde é estipulada a capacidade da estrutura de um autocarro resistir ao capotamento, garantindo que a área definida para cada passageiro permanece intacta e sem a intromissão de qualquer elemento aquando do acidente.

Em termos de resistência da superestrutura é usado normalmente o regulamento 66, em substituição da directiva 2001/85, dado que este é reconhecido num maior número de países, para além de apresentar uma melhor descrição/exigência dos parâmetros exigíveis ao nível da segurança dos ocupantes. Apesar de tudo, o capítulo referente à resistência da superestrutura da directiva 2001/85 foi elaborado com base no regulamento 66.

Todas estas directivas, bem como o regulamento 66, estão em vigor no nosso país. Contudo, os organismos competentes não as exigem aquando da legalização de um novo autocarro ou na homologação de um importado usado. Este facto associado ao reduzido número de acidentes que envolvem estes veículos, conduz muitas vezes, em especial nos clientes nacionais, à aquisição de autocarros com níveis de segurança menos conseguidos e, conseqüentemente, mais baratos.

Ainda assim, e apesar da preocupação de algumas empresas apresentarem soluções em termos de segurança, não estão difundidos nos autocarros uma série de elementos típicos dos automóveis ligeiros como: controlo de estabilidade, controlo de tracção, avisador de saída de faixa, controlo da velocidade em função da distância para o veículo da frente, airbags, barras de protecção lateral e zonas de deformação programada. De facto apenas é obrigatória a presença do ABS, mas sem os sistemas de auxílio às travagens de emergência, que hoje em dia se começam a tornar standard.

Os acidentes envolvendo autocarros podem dividir-se em três categorias:

- Capotamento;
- Colisões frontais;
- Colisões laterais.

Apesar do capotamento representar apenas 4% do número total de acidentes, o risco de morte por parte dos ocupantes é cinco vezes superior ao verificado nas outras categorias. Os ferimentos nos passageiros resultam do impacto com elementos do interior do autocarro, entre passageiros e muitas vezes com objectos que o próprio veículo transporta no seu interior. Neste caso a recente obrigatoriedade de cintos de segurança (de dois ou três pontos de fixação) pretende reduzir os danos causados nos passageiros, no entanto, acaba por colocar em questão toda a filosofia de projecto dos autocarros desenvolvida até aos dias de hoje. O peso do passageiro passa assim a estar associado ao peso da carroçaria e, conseqüentemente, os índices admissíveis de deformação da estrutura superior do autocarro são postos em causa.

Por outro lado as colisões frontais representam cerca de 40% dos acidentes e em tais situações é o condutor, o guia e os passageiros da frente que mais sofrem, devido essencialmente à enorme superfície vidrada da zona frontal do autocarro.

É certo que a protecção contra impactos, quer seja através de zonas de deformação programada, quer seja através da selecção de novos materiais, está neste momento a dar os primeiros passos na indústria dos autocarros. Muita metodologia existente para os veículos da classe M1 poderia ser aplicada aos da classe M3, todavia, a sua adequação passava por efectuar ensaios destrutivos, que devido aos elevados custos dos ensaios e do protótipo necessário condicionam a sua aplicação. Então, uma forma de ultrapassar este problema consiste no conhecimento do comportamento ao impacto dos materiais, especialmente

---

aqueles que apresentem uma boa absorção de energia, e o recurso a programas numéricos com vista a desenvolver estruturas mais aptas à segurança passiva.

Neste sentido, o principal objectivo deste trabalho consiste em melhorar a compreensão do comportamento ao impacto dos materiais vulgarmente utilizados na carroçaria dos autocarros, o alumínio 1050 H24, e comparativamente com outros sugerir ao projectista algumas hipóteses de escolha neste domínio. Este estudo baseia-se essencialmente na análise das curvas força/tempo, força/deformação e energia/tempo obtidas a partir dos ensaios experimentais. Finalmente os resultados serão equacionados em função da massa específica dos materiais estudados, visando, deste modo, estruturas mais leves e a respectiva poupança energética.

Para tal esta tese encontra-se organizada em cinco capítulos, sendo este, a introdução, o primeiro deles. No capítulo 2 faz-se um enquadramento teórico, onde se pretende, de algum modo, introduzir os conceitos relacionados com o estudo efectuado. O capítulo 3 descreve as técnicas experimentais utilizadas no trabalho, apresenta as propriedades dos materiais, geometria dos provetes e equipamentos utilizados. No capítulo 4 é feita a apresentação dos resultados experimentais e sua discussão em termos das curvas força/tempo, força/deformação e energia/tempo. Finalmente o capítulo 5 apresenta as conclusões gerais e algumas sugestões relativas à evolução dos estudos realizados.

# Capítulo 2

---

## ENQUADRAMENTO TEÓRICO

Na fase de projecto, um dos requisitos fundamentais para um componente mecânico é garantir que não ocorra falha em serviço, pelo que se torna necessário dimensioná-lo de modo a que não se verifique nenhum dos possíveis modos de ruína. Os principais meios que levam à deterioração e conseqüente inutilização do equipamento são: a deformação plástica, a fadiga, a fractura, a corrosão e o desgaste. A presença isolada, ou até em conjunto, de cada processo depende não só das características do material (propriedades mecânicas, existência de defeitos, etc.) mas também das condições de serviço (solicitações mecânicas, temperatura, meio ambiente, etc.).

Nas solicitações mecânicas não podemos esquecer que o tipo de carregamento, e seu historial, podem influenciar significativamente o desempenho em serviço do equipamento. Assim o projectista deve ter em conta os três tipos de cargas passíveis de actuar numa estrutura e/ou componente, e que são: as cargas estáticas, as cargas dinâmicas (com variação no tempo) e as cargas de curta duração, vulgarmente conhecidas por cargas de impacto. No caso em que são aplicadas cargas estáticas não é tomado em consideração a aceleração ou a propagação das ondas de tensão. Por sua vez as solicitações dinâmicas são cargas aplicadas ao longo de um período de tempo, cuja ruína ocorre para tensões muito inferiores à necessária aquando da aplicação de uma carga estática. Finalmente, no caso das cargas de impacto, a força é exercida num curto espaço de tempo, sendo as tensões propagadas em redor da zona de contacto. Caso o impacto envolva objectos com extremidade arredondada poderá ocorrer a penetração de um no outro, contudo, neste caso, a velocidade de impacto revela-se bastante importante.

De acordo com a velocidade, por exemplo, o impacto pode ser classificado em duas categorias [3]: *impacto de baixa velocidade ou de grande massa*, ao qual está associado uma resposta quasi-estática, e *impacto de alta velocidade ou de pequena massa*, onde a resposta é tipicamente de natureza dinâmica (associado vulgarmente à balística). Outras classificações são passíveis de se encontrar na bibliografia, onde se pode realçar, por exemplo a proposta por Ruiz e Harding [4] no domínio dos materiais compósitos. Neste caso existem três categorias:

- Impacto a velocidades da ordem dos 300 m/s, ocorrendo perfuração por parte do projectil e os danos se confinam a uma pequena zona em volta do ponto de impacto;

- Impacto a velocidades entre os 50 e os 300 m/s, onde as ondas de tensão com origem no ponto de colisão transmitem a carga à restante estrutura. Neste caso a análise deve ser dinâmica e deve incluir o carregamento de inércia e a acção da onda de tensão;
- Para velocidades de impacto mais baixas, ocorrem múltiplas reflexões nas fronteiras até se atingir o equilíbrio quasi-estático.

Os primeiros estudos sobre impacto consideravam os corpos envolvidos como sendo rígidos, sendo as perdas de energia compensadas através de factores de correcção, factores esses que traduzem a deformação plástica ocorrida. Esta aproximação tem-se mantido válida ao longo dos tempos. É certo que as transferências de energia que ocorrem são bastante complexas e de difícil resolução matemática. Então revela-se necessário a construção de modelos físicos e o recurso a ensaios experimentais para se obterem resultados fiáveis do comportamento ao impacto dos diversos materiais. Como consequência, têm vindo a ser desenvolvidas soluções complexas, não existindo, no entanto, até à data, uma teoria válida para todas as situações. Obtém-se, todavia, boas aproximações sempre que nas condições de fronteira é tida em conta a velocidade e força.

Por exemplo a teoria clássica de impacto, chamada de “*stereomechanics*” é baseada nas leis que regem os corpos rígidos e envolve uma formulação matemática simples. Todavia esta teoria é incapaz de descrever os fenómenos de transição de cargas, forças e deformações, limitando-se a especificar a velocidade inicial e final, bem como a sua direcção. Acresce ainda o facto de não contar com a deformação no ponto de contacto dos corpos e assumir apenas que uma parte da energia cinética inicial é transformada em vibrações. Assim, apenas apresenta validade para o impacto entre duas esferas ou para o impacto entre uma esfera e um corpo largo, rígido e pesado, uma vez que para impactos que envolvam tubos ou chapas não toma em conta o aspecto vibracional em torno do ponto de contacto. Em torno deste ponto existe uma perturbação que é propagada ao longo dos corpos com uma velocidade finita.

Deste modo os dados obtidos através da teoria “*stereomechanics*” deixam de ser válidos a partir do momento em que uma parte significativa da energia gerada durante o impacto se transforma em vibrações, como é o caso dos corpos que possuem uma elevada relação área/volume (por exemplo, tubos e chapas). Esta teoria ao deixar de funcionar passa a dar lugar a uma formulação que inclua os aspectos vibracionais, o que é requerido na maior parte dos problemas de impacto.

---

Neste sentido os constantes avanços em termos de cálculo computacional e análise experimental têm permitido desenvolvimentos significativos nesta área que, associados à teoria da elasticidade, permitem uma análise multi-dimensional da propagação das ondas de tensão e a distribuição das cargas no ponto de contacto dos sólidos.

Relativamente aos ensaios de impacto, os primeiros dispositivos usados foram o pêndulo de Charpy e o ensaio de Izod permitindo, deste modo, avaliar a energia absorvida pelo provete bem como determinar a sensibilidade ao entalhe e a resistência à fractura. Todavia, a partir dos anos 70 começaram a ser utilizados testes com velocidades e energias mais elevadas, surgindo assim as primeiras máquinas de impacto por queda de pesos em substituição dos tradicionais ensaios Charpy e Izod. A energia de impacto pretendida é obtida pela variação da altura de queda do impactor ou, também, pela variação de massa do referido impactor. Deste modo consegue-se controlar a velocidade de impacto. De um modo geral não existe destruição completa do provete, permitindo assim o retorno do impactor e a consequente determinação da energia residual. A velocidade de impacto pode ser obtida com recurso às equações do movimento ou através de sensores ópticos localizados perto do provete. O impactor geralmente é instrumentado para obter a curva força-tempo e pode haver também um transdutor para a determinação da energia dissipada. Com recurso a meios informáticos pode-se então obter os diagramas que podem envolver diferentes variáveis como: a força, o deslocamento, o tempo, a velocidade e a energia.

Paralelamente também tenta-se reproduzir o fenómeno de impacto através de cargas estáticas, com resultados muito discordantes, já que as diferenças entre o modelo teórico e o modelo prático são muito grandes devido à dissipação da energia inicial, natureza dos materiais e da velocidade de colisão. As estruturas metálicas, por exemplo, podem absorver a energia de impacto, e em caso de baixas velocidades esta energia é convertida em deformação plástica e no retorno do impactor. Na verdade, parte da energia de impacto é absorvida pelo material, resultando em deformação permanente, enquanto a restante é convertida em energia de deformação elástica e vibração, sendo esta última, mais tarde, dissipada sob a forma de calor. No caso dos materiais compósitos, a dissipação da energia ocorre através de diversos modos de ruína como: fissuração da matriz, delaminações, rotura das fibras e separação fibra/matriz. Apesar destes danos não serem muitas vezes visíveis à vista humana, eles podem causar reduções da resistência residual na ordem dos 60 % [5-8].

É evidente que a solução quasi-estática torna-se muito mais simples de usar do que a dinâmica. Para além disso associa ainda as vantagens de facilitar a detecção do dano e sua propagação, medir com maior exactidão a deflexão e controlar mais facilmente a força transversal. Este assunto tem sido largamente estudado no âmbito dos materiais compósitos, encontrando-se vários estudos publicados e sintetizados em [3]. No entanto, a dificuldade está na determinação dos limites de aplicabilidade da solução quasi-estática. Tendo a duração de 5 a 10 milissegundos um impacto a baixa velocidade pode-se por em questão se o teste quasi-estático, com maior duração, o pode simular em todos os seus aspectos. De acordo com Cook [9] esta metodologia apenas é válida se a frequência do impactor for menor que  $1/3$  do valor da frequência natural mais baixa do provete usado. Porém, este método requer o conhecimento de pelo menos a primeira frequência natural do provete, o que muitas vezes não é tão fácil de obter quanto isso. Swanson [10], por seu lado, propôs uma metodologia alternativa para determinar os limites da aplicabilidade da solução quasi-estática, consistindo basicamente na determinação de uma massa equivalente obtida a partir da deformação estática do provete. Uma vez conhecida esta massa equivalente, é possível combiná-la com a rigidez estática da amostra e, assim, obter a menor frequência natural.

Como vimos anteriormente, a energia de impacto é dividida em energia absorvida e em energia dissipada, sendo a sua distribuição influenciada pelas propriedades do material assim como a geometria e dimensões da estrutura. No entanto, sendo a resistência ao impacto tanto maior quanto maior for a sua capacidade de dissipar energia, e consequentemente menor será o dano, a partir da energia absorvida, as propriedades dos materiais acabam por desempenhar um papel relevante [11-13].

Assim o conhecimento das propriedades dos materiais bem como o desenvolvimento de novos materiais constitui, nos dias de hoje, um passo importante, em particular para a indústria automóvel devido à sua inserção num contexto bastante desfavorável. Por exemplo este sector revela-se responsável por 24 % da produção de  $\text{CO}_2$ , com o inevitável contributo para o efeito de estufa, para além do facto dos combustíveis estarem a aumentar significativamente de preço dia após dia, conduzindo ao consequente aumento do custo final dos produtos.

Neste caso a obtenção de estruturas mais leves conduz a menores consumos de combustível, e consequentemente a uma menor poluição. Numa outra perspectiva,

estruturas mais leves significam uma maior capacidade de carga e a consequente redução de custos devido à possibilidade de realizar um menor número de deslocações. Então o recurso a materiais de baixo peso específico, como é o caso das ligas de alumínio, ligas de magnésio e os compósitos revela-se da máxima importância.

Apesar de tudo o aço continua ainda a ser o material mais utilizado para fins estruturais por apresentar vantagens competitivas, sobre os referidos materiais, tornando-o na melhor escolha em sectores como o da indústria automóvel e de transporte de mercadorias. Estas vantagens resultam sobretudo da sua maior rigidez, o menor custo e a facilidade de processamento dos componentes através da maioria das tecnologias actualmente existentes. Por estas razões algumas siderurgias têm efectuado melhorias extraordinárias nas propriedades mecânicas dos aços vocacionados para aplicações estruturais, melhorando o seu limite elástico e consequentemente o rácio resistência/peso.

# Capítulo 3

---

## MATERIAL, EQUIPAMENTO E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

### 3.1 – Introdução

Tal como se referiu no início, o principal objectivo deste trabalho consiste essencialmente em melhorar a compreensão do comportamento ao impacto de alguns materiais com vista à sua aplicação em painéis de autocarros. Actualmente o alumínio é bastante utilizado em tais situações devido basicamente ao seu baixo peso, elevada resistência à corrosão e conformabilidade. Todavia, cada vez mais existe a preocupação da segurança dos passageiros, pelo que se verifica a necessidade de procurar novas soluções. Com vista a atingir este objectivo, foi então realizado um vasto trabalho experimental. Nos pontos seguintes é feita uma descrição sumária dos materiais seleccionados para este estudo, provetes, equipamentos e procedimentos experimentais utilizados.

### 3.2 – Caracterização dos Materiais

O alumínio ocupa uma posição de destaque entre os materiais usados na construção de autocarros, devendo-se essencialmente às suas características particulares [14-16], tais como, baixo peso (2.91 vezes mais leve que o aço), alta resistência à corrosão, devido à estabilidade do filme de óxido que se forma na sua superfície, boa conformabilidade, boa resistência mecânica (as ligas podem ter até 690MPa) e grande versatilidade.

Neste sector, e em particular na carroçaria dos autocarros, é vulgar a aplicação do alumínio 1050 H24, cuja composição química se encontra ilustrada na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química do alumínio 1050 H24 (% em peso).

<b>Cu</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>	<b>Zn</b>	<b>Ti</b>	<b>Al</b>	<b>Fe</b>
0.010	0.10	0.010	0.0010	0.010	0.028	Resto	0.34

Trata-se de uma liga da série 1XXX, vulgarmente denominada por liga comercialmente pura, cuja composição típica é essencialmente alumínio (no mínimo 99.0%) e as suas principais impurezas (elementos de liga) são o Ferro e o Silício [15, 16]. Os dois últimos dígitos indicam o grau de pureza do alumínio.

As propriedades mecânicas da liga 1050 H24, de acordo com a ficha técnica do fornecedor, encontram-se ilustradas na tabela 3.2 e resultam essencialmente do tratamento tipo H2X

[17]. Este tipo de tratamento caracteriza-se por deformação a frio seguida por um recozimento parcial de modo a promover a diminuição da resistência mecânica para um nível especificado. O valor de X indica o grau de encruamento que permanece após tratamento térmico. O tratamento H24 significa, por exemplo, que o material deformado, após o recozimento parcial, permanece com uma dureza equivalente a um material que se deformou apenas 50%.

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas do alumínio 1050 H24.

$\sigma_r$ [MPa]	$\sigma_c$ [MPa]	E [GPa]	$\epsilon_r$ [%]	$\nu$ [-]	HV <sub>50</sub> [kgf/mm <sup>2</sup> ]
127	120	69.6	7	-	-

Relativamente ao aço Docol 1000 e 1200 a sua elevada resistência mecânica torna-o adequado a muitas aplicações industriais, associadas a enormes vantagens ambientais. Ao apresentarem elevadas tensões de cedência permite-lhes, deste modo, reduzir a espessura da chapa com a consequente redução de custos ao nível do fabrico, logística e funcionamento. Basta para isto pensar que se o peso de um produto diminuir teremos menos material necessário e, consequentemente, poupança de energia tanto na produção do aço como nas suas operações de transporte. Por outro lado em certas aplicações poderá reduzir os custos de funcionamento dos produtos (vagões, contentores, carroçarias, chassis, etc.) com particular incidência no consumo da energia e nas emissões de escape. Para além de ser 100% reciclável acresce ainda o facto deste aço ser pré-temperado, durante a sua produção, eliminando assim riscos ambientais bem como custos de aquecimento dos fornos de tratamento térmicos, após o fabrico das peças.

A composição química dos aços de elevada resistência, Docol 1000 e Docol 1200, encontra-se ilustrada, respectivamente, nas tabelas 3.3 e 3.4. As suas principais propriedades mecânicas, de acordo com a ficha técnica do fornecedor, encontram-se representadas na tabela 3.5 e 3.6.

As propriedades mecânicas são obtidas a partir de um recozimento a 750° C ao que se segue um endurecimento através de têmpera em água. Finalmente o aço adquire a sua estrutura final por revenido, onde este é aquecido entre os 200-400° C. Tanto o recozimento como o revenido são efectuados numa atmosfera controlada para evitar que o

aço se oxide. A sua micro-estrutura contém a fase martensítica, responsável pela dureza, e a ferrite, a fase mais macia, ao que a resistência do aço aumenta com o aumento da percentagem de martensite na micro-estrutura. A proporção de martensite é determinada pela percentagem de carbono no aço e pelo ciclo de temperaturas que é sujeito no processo de recozimento contínuo.

Tabela 3.3 – Composição química do aço Docol 1000 (% em peso).

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Nb</b>	<b>Al</b>	<b>Fe</b>
0.15	0.50	1.50	0.010	0.002	0.015	0.04	Resto

Tabela 3.4 – Composição química do aço Docol 1200 (% em peso).

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Nb</b>	<b>Al</b>	<b>Fe</b>
0.12	0.20	1.60	0.015	0.002	0.015	≥0.03	Resto

Tabela 3.5– Propriedades mecânicas do aço Docol 1000.

<b><math>\sigma_r</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_c</math> [MPa]</b>	<b>E [GPa]</b>	<b><math>\epsilon_r</math> [%]</b>	<b><math>\nu</math> [-]</b>	<b>HV<sub>50</sub> [kgf/mm<sup>2</sup>]</b>
1000	700	208	5	-	-

Tabela 3.6– Propriedades mecânicas do aço Docol 1200.

<b><math>\sigma_r</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_c</math> [MPa]</b>	<b>E [GPa]</b>	<b><math>\epsilon_r</math> [%]</b>	<b><math>\nu</math> [-]</b>	<b>HV<sub>50</sub> [kgf/mm<sup>2</sup>]</b>
1200	1000	208	4	-	-

Também foi usado no presente estudo um compósito de poliéster não saturado (UP) reforçado com fibra de vidro, denominado comercialmente por Pecolit. Este polímero, poliéster não saturado, tem a particularidade de ser o mais usado, de entre os termoendurecíveis, na aplicação de matrizes para compósitos reforçados com fibras [18]. O poliéster tem muitas aplicações na indústria automóvel devido ao seu baixo custo, estabilidade térmica e dimensional, boas propriedades mecânicas, resistência química e baixa densidade [19]. Relativamente à fibra usada, trata-se de uma fibra de vidro do tipo E correspondente à formulação mais simples e económica, o que associada às suas boas

propriedades de resistência, rigidez, eléctricas e de desgaste, justifica a sua enorme aplicação nos compósitos como elemento de reforço.

O compósito fornecido trata-se assim de uma resina de poliéster não saturado reforçado com fibras de vidro que se entrelaçam entre si, segundo duas direcções perpendiculares, e cuja percentagem em peso de fibra é de 24.75%. Finalmente para apresentar um melhor acabamento superficial é aplicado um “Gelcoat”, o qual para além de dar um acabamento superficial liso, escondendo eventuais fibras de vidro, tem ainda a capacidade de absorção dos raios ultravioleta. Segundo a ficha técnica do fornecedor apresenta as propriedades mecânicas indicadas na tabela 3.7.

Tabela 3.7– Propriedades mecânicas do Pecolit.

$\sigma_r$ [MPa]	$\sigma_c$ [MPa]	E [MPa]	$\epsilon_r$ [%]	$\nu$ [-]	HV <sub>50</sub> [kgf/mm <sup>2</sup> ]
-	90	8206	-	-	-

Dado que os compósitos apresentam uma elevada resistência e rigidez específica, a Pecolit foi associada em forma de sanduíche com o alumínio de modo a aumentar, assim, a resistência ao impacto dos painéis. Apesar dos compósitos revelarem-se sensíveis ao impacto, esta associação em sanduíche pode conduzir a um aumento da resistência ao impacto uma vez que os elementos exteriores são alumínio.

### 3.3 – Provetes

Relativamente à geometria dos provetes utilizados nos ensaios experimentais ela encontra-se ilustrada na figura 3.1 e foi estabelecida de acordo com o porta-amostras da máquina de impacto. A referida geometria está de acordo com a norma EN ISO 6603-2.

Os provetes foram obtidos a partir de chapas com 1 mm de espessura no caso do aço de elevada resistência, 1.5 mm no caso do alumínio e 2 mm para o caso do pecolit. A sua geometria foi obtida por meio de guilhotina para os casos de alumínio e aço de elevada resistência e de serra eléctrica para o caso do Pecolit, na empresa CaetanoBus. No caso do último material houve um cuidado especial com a velocidade de avanço e o uso de um sistema de refrigeração por ar comprimido (seco) de modo a evitar o aquecimento do compósito e, assim, possíveis alterações nas suas propriedades.

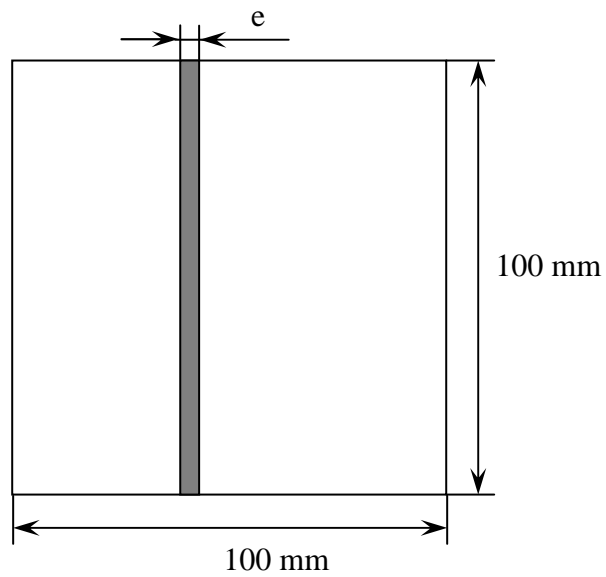


Figura 3.1 – Geometria dos provetes usados nos ensaios de impacto;  $e=1$  mm para aços de elevada resistência,  $e=1.5$  mm para alumínio 1050 H24 e  $e=2$  mm para a Pecolit.

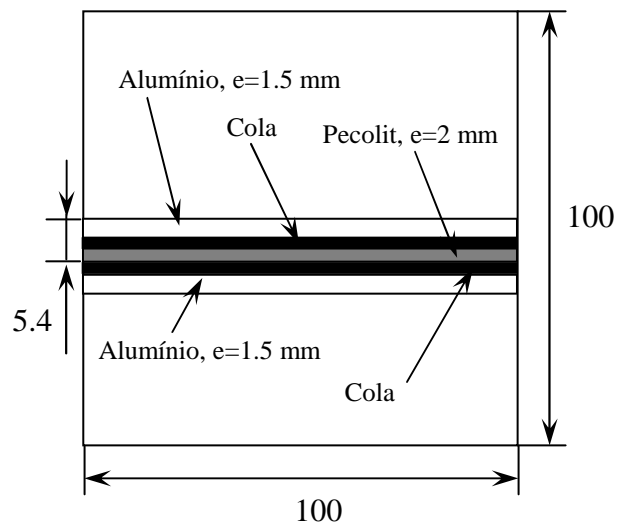


Figura 3.2 - Geometria dos provetes usados nos ensaios de impacto para a sanduíche alumínio/pecolit/alumínio. Dimensões em milímetros.

A geometria dos provetes para a sanduíche alumínio/pecolit/alumínio encontra-se ilustrada na figura 3.2. Os materiais foram colados entre si com recurso a uma cola da marca Forbo

C-8411. Após limpeza cuidada das superfícies foi aplicada a cola por pulverização, tendo a secagem ocorrido ao ar e à temperatura ambiente durante 8 horas.

### 3.4 – Equipamentos

Os ensaios foram realizados numa máquina de impacto da marca IMATEK, modelo IM10, ilustrada na figura 3.3 O seu funcionamento baseia-se essencialmente na queda livre de um peso e encontra-se instrumentada com um sistema de aquisição de dados recebidos a partir de uma célula de carga piezoelétrica, com uma capacidade de recolha de 32000 pontos, posicionada na raiz do impactor.



a)



b)

Figura 3.3 - Máquina de impacto IMATEK-IM10: a) Vista geral; b) Vista de detalhe.

Basicamente a máquina é constituída por uma torre com duas colunas-guia e nas quais se desloca, com recurso a rolamentos, um carrinho que suporta o impactor. Este pode, assim, ser elevado até uma dada altura e, de seguida, solto na direcção vertical com reduzido atrito nas colunas-guia. A massa do conjunto pode ainda ser alterada pela adição de pesos ao carrinho até um total de 30 kg. A máquina está equipada também com um dispositivo de prevenção de segundo impacto.

A energia de impacto é completamente fornecida pela gravidade e controlada pelo ajustamento da altura de queda, até um máximo de 2.5 metros. A velocidade é medida no início do contacto por meio de um sensor electrónico e a força por meio de uma célula de carga. A dupla integração da curva de carga em função do tempo fornece a variação da deflexão com a carga:

$$F(t) = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3.1)$$

onde  $F(t)$  é a força lida pela célula de carga,  $m$  é a massa do impactor e  $d^2x/dt^2$  é a aceleração.

A partir desta equação pode então calcular-se a velocidade pela seguinte expressão matemática:

$$V(t) = -\frac{1}{m} \int F(t) dt + C_0 \quad (3.2)$$

onde  $V(t)$  é a velocidade da célula de carga e  $C_0$  é a constante de integração e  $V_0$  é a velocidade inicial, ou seja, as condições iniciais de fronteira, onde  $C_0 = V_0$ , para  $t = 0$ .

Da equação 3.2 podemos finalmente calcular a deflexão, usando a seguinte expressão:

$$X(t) = \left( -\frac{1}{m} \iint F(t) dt dt \right) + V_0 t \quad (3.3)$$

onde  $X(t)$  é a deflexão em função do tempo.

Estas integrações numéricas são realizadas automaticamente pelo “software” Impact Versão 1.3, o qual permite ainda o armazenamento de dados como a aceleração, o deslocamento, a energia, a força, o tempo e a velocidade.

### **3.5 – Procedimento Experimental**

Os ensaios de impacto foram realizados na máquina de impacto IMATEK, modelo IM10, realizados à temperatura ambiente e segundo o procedimento descrito na norma EN ISO 6603-2. Para cada condição de ensaio foram ensaiados 3 provetes, com as geometrias

descritas em 3.2, tendo sido os dados posteriormente tratados em função dos respectivos valores médios.

Os ensaios foram realizados com um impactor hemisférico de diâmetro 20 mm, figura 3.4, e com as condições de fronteira de encastramento ilustradas na figura 3.5, visto ser aquela que melhor simula as condições reais de serviço. Foram estudados vários níveis de energia de modo a comparar a taxa de recuperação elástica, as velocidades de impacto e o respectivo dano provocado nos diversos materiais em estudo.



Figura 3.4 - Impactor hemisférico de diâmetro 20 mm utilizado nos ensaios de impacto.

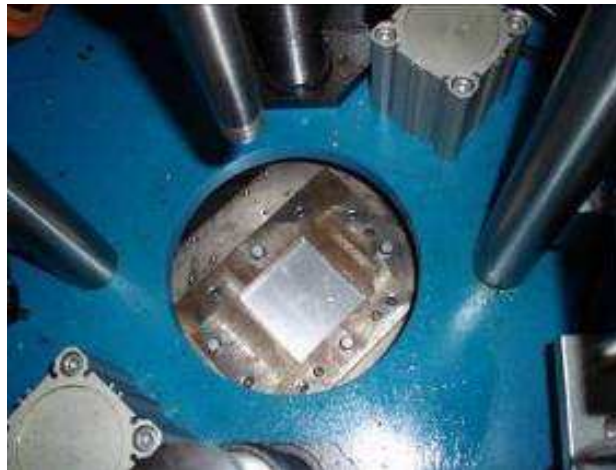


Figura 3.5 – Figura ilustrando as condições de encastramento nos ensaios de impacto.

Foram consideradas várias alturas de queda, obtendo-se, deste modo, várias energias de impacto. Considerando o impactor como um corpo rígido em queda livre a sua velocidade inicial teórica, no instante correspondente ao contacto impactor/placa, é dada por :

$$v_0 = \sqrt{2gh} \quad (3.4)$$

onde  $h$  é a altura do centro de gravidade da massa do impactor relativamente à superfície de referência e  $g$  a aceleração da gravidade. Contudo, o impactor não é completamente livre, pois existe algum atrito, ao que as velocidades registadas pelo equipamento apresentam valores ligeiramente mais baixos comparativamente à velocidade teórica. Assim, e como se pretendia, os diferentes materiais em estudo foram sujeitos a diferentes velocidades de impacto.

Dado que foram testados diferentes materiais, e devido ao limite de altura imposto pela máquina para a queda do impactor, foram usadas diferentes massas. Na tabela 3.8 resumem-se os diferentes parâmetros usados para cada ensaio e para cada material.

Tabela 3.8– Parâmetros usados nos diferentes ensaios.

<b>Material</b>	<b>Altura de queda [mm]</b>	<b>Massa do conjunto [kg]</b>	<b>Energia de Impacto [J]</b>	<b>Velocidade de Impacto [m/s]</b>
Alumínio	800	3.005	23.6	3.96
	1000		29.5	4.43
	1200		35.4	4.85
	1500		44.2	5.42
Alumínio/ Pecolit/ Alumínio	400	19	74.6	2.8
	600		111.8	3.43
	900		167.8	4.2
Docol 1000	600	19	111.8	3.43
	900		167.8	4.2
	1200		223.7	4.85
Docol 1200	600	19	111.8	3.43
	900		167.8	4.2
	1200		223.7	4.85

# Capítulo 4

---

## ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

## **4.1 – Introdução**

Para que um componente mecânico, ou uma estrutura, desempenhe com a máxima eficiência o fim a que foi proposto, torna-se fundamental, na fase de projecto, conhecer logo à partida as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos. Por outro lado assistimos cada vez mais ao surgimento de novos materiais, os quais revelam-se capazes de substituir os mais tradicionais, com enormes vantagens. Dentro da conjectura económica actual, e em particular na indústria dos autocarros, o peso é um factor cada vez mais determinante e competitivo neste sector. No entanto, o factor segurança também se impõe logo na fase de projecto conduzindo a enormes restrições ao projectista e que muitas vezes passa logo pela selecção correcta dos materiais.

Neste seguimento, o presente capítulo pretende caracterizar o comportamento ao impacto dos materiais vulgarmente utilizados na carroçaria dos autocarros, o alumínio 1050 H24, e comparativamente com outros sugerir ao projectista algumas hipóteses de escolha neste domínio.

## **4.2 – Comportamento ao impacto do alumínio 1050 H24**

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de impacto permitem compreender o comportamento do alumínio 1050 H24 em condições de serviço. Este estudo baseia-se essencialmente na análise das curvas força/tempo, força/deformação e energia/tempo obtidas segundo o procedimento experimental descrito em 3.5.

Focando neste momento a atenção unicamente no que diz respeito ao traçado das curvas força/tempo, força/deformação e energia/tempo, começa-se por apresentar a influência da velocidade de impacto no alumínio 1050 H24, a partir da energia de queda, nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3, respectivamente. Nestas figuras encontram-se representadas as curvas médias para cada condição de ensaio.

Numa primeira análise podemos observar que a evolução das curvas são muito semelhantes, excepto a apresentada para o ensaio Al\_1500, que se refere a uma altura de queda de 1500 mm, uma vez que, neste caso, já ocorrem os primeiros danos (fissuras devido ao impacto). Este andamento é idêntico ao observado na bibliografia [12, 13] e revela-se típico para os ensaios de impacto.

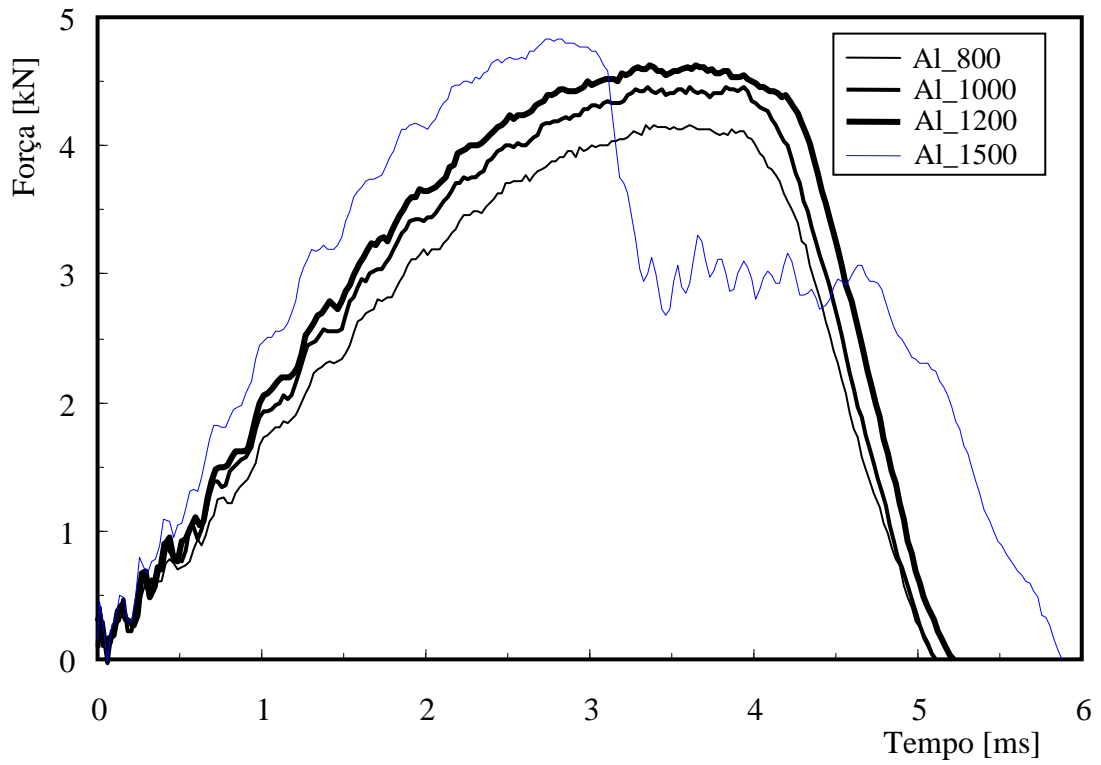


Figura 4.1 – Força versus tempo para os ensaios de impacto no alumínio 1050 H24.

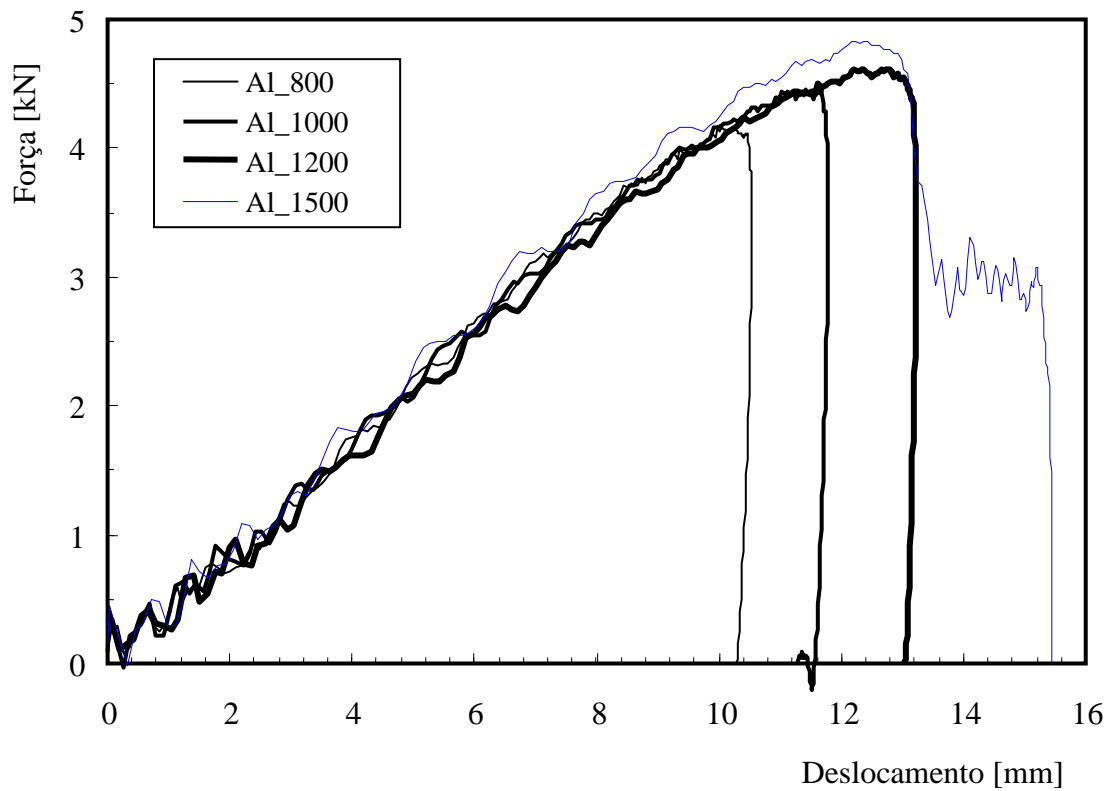


Figura 4.2 – Força versus deslocamento para os ensaios de impacto no alumínio 1050 H24.

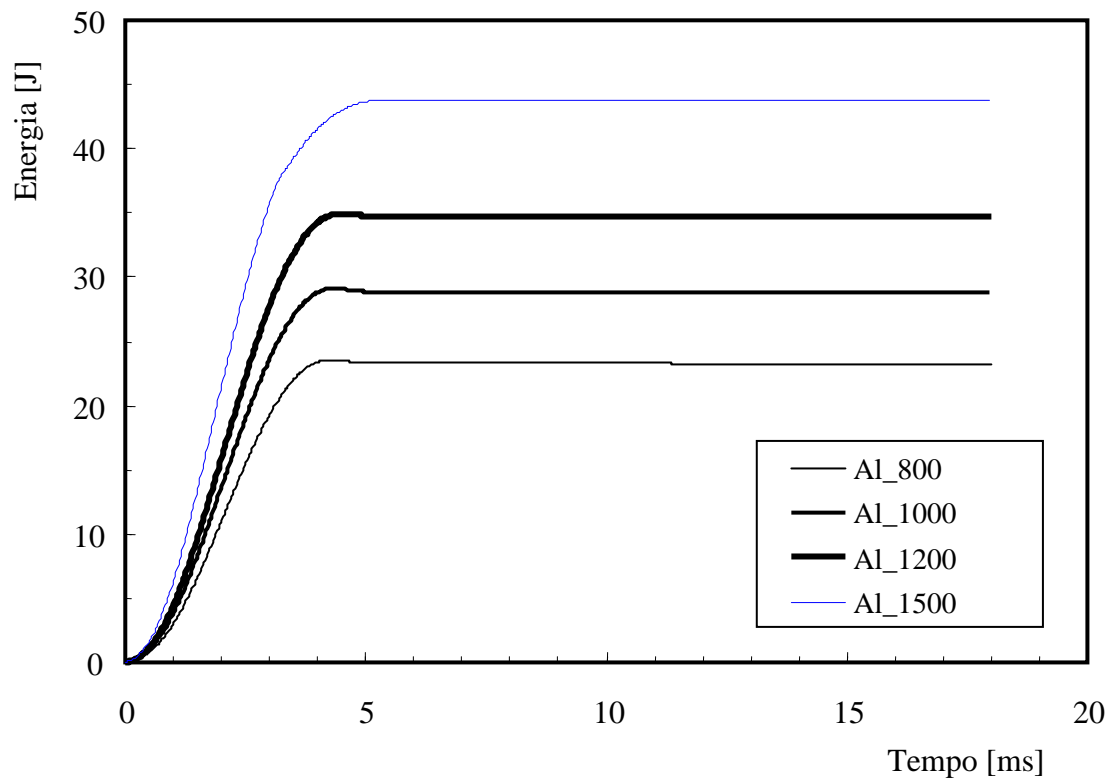


Figura 4.3 – Energia versus tempo para os ensaios de impacto no alumínio 1050 H24.

Verifica-se ainda que as curvas contêm oscilações que, segundo Schoepner e Abrate [20], são devidas à resposta da onda elástica que se cria e às próprias vibrações dos provetes. Estas, por sua vez, dependem da rigidez bem como da massa do provete e do impactor e que de acordo com Belingardi e Vadori [21] são excitadas pela rápida variação das grandezas cinemáticas no instante da colisão.

Numa análise mais detalhada da figura 4.1 podemos então ver que para os ensaios Al\_800, Al\_1000 e Al\_1200, que representam, respectivamente, o comportamento do alumínio quando sujeito a um impacto com uma energia de 23.6 J; 29.5 J, e 35.4 J, a força cresce até um determinado valor,  $F_{m\acute{a}x}$ , a partir do qual volta a diminuir até atingir novamente o zero. Neste instante o impactor deixou de ter contacto com a placa. Verificamos também que o valor de  $F_{m\acute{a}x}$ , aumenta com o aumento da energia de impacto. Por outro lado o tempo médio de contacto impactor/placa, obtido para as energias de 23.6 J e de 29.5 J é de 5.11 ms enquanto que para a energia de 35.4 J é de 5.22 ms. Podemos também concluir que quanto maior a energia de impacto maior é o tempo de contacto impactor/placa. No que diz respeito à curva média Al\_1500, que representa o comportamento da placa sujeita a um

---

impacto com um valor de energia na ordem dos 44.2 J a força cresce até ao seu valor máximo,  $F_{m\acute{a}x}$ , ao que posteriormente passa a diminuir. Todavia, entre os 3.5 e os 4.5 ms o valor da força permanece mais ou menos constante, na ordem dos 3 kN, como resultado do dano ocorrido na placa (fissura no material devido ao impacto).

Relativamente à figura 4.2 o andamento das curvas é muito semelhante ao observado nas anteriores. Para os ensaios com energias de impacto de 23.6 J; 29.5 J, e 35.4 J a força e o deslocamento crescem simultaneamente até um valor máximo, verificando-se, posteriormente, uma diminuição da força e um decréscimo do deslocamento. Isto quer dizer que após  $F_{m\acute{a}x}$  o impactor se afasta da placa. Para o ensaio Al\_1500, onde já existem fissuras na chapa provocadas pelo impacto, o comportamento é muito semelhante aos anteriores, no entanto, por volta dos 3 kN, a força permanece mais ou menos constante e o deslocamento aumenta. Este patamar coincide com o observado no gráfico força/tempo, como resultado do dano ocorrido. Verificamos também que o aumento da energia de impacto aumenta o deslocamento e conseqüentemente o dano nas placas, conforme ilustra a figura 4.4. Para a energia de impacto no valor 44.2 J não ocorre a perfuração total da chapa mas será um valor de energia limite, dado que ocorrem as primeiras fissuras por impacto na chapa. Para as energias de 23.6 J, 29.5 J e 35.3 J a chapa sofre um dano com uma profundidade máxima de 6.6 mm, 8.2 mm e 10 mm, respectivamente.

Finalmente a figura 4.3 ilustra-nos a variação da energia com o tempo. Para as energias de 23.6 J, 29.5 J e 35.3 J podemos observar que a energia aumenta no tempo até atingir um valor máximo, passando a ficar constante, após ter decrescido uma determinada quantidade. O pico corresponde à energia de impacto, que é a energia fornecida à chapa, e o decréscimo representa a recuperação elástica depois do impacto. Se o material fosse totalmente elástico a curva voltaria novamente a zero. Neste caso, parte da energia de impacto não foi absorvida de forma elástica traduzindo-se em forma de dano. No que diz respeito ao ensaio Al\_1500 toda a energia foi absorvida em dano.

Após uma análise qualitativa do efeito da energia de impacto no alumínio 1050 H24, vamos agora fazer uma abordagem mais quantitativa, de modo a podermos, posteriormente, efectuar uma comparação dos vários materiais em estudo. Assim na tabela 4.1, e em função da energia de impacto, encontra-se representado o valor médio da força máxima, dimensões do dano provocado e taxa de recuperação elástica, bem como, o respectivo desvio padrão.

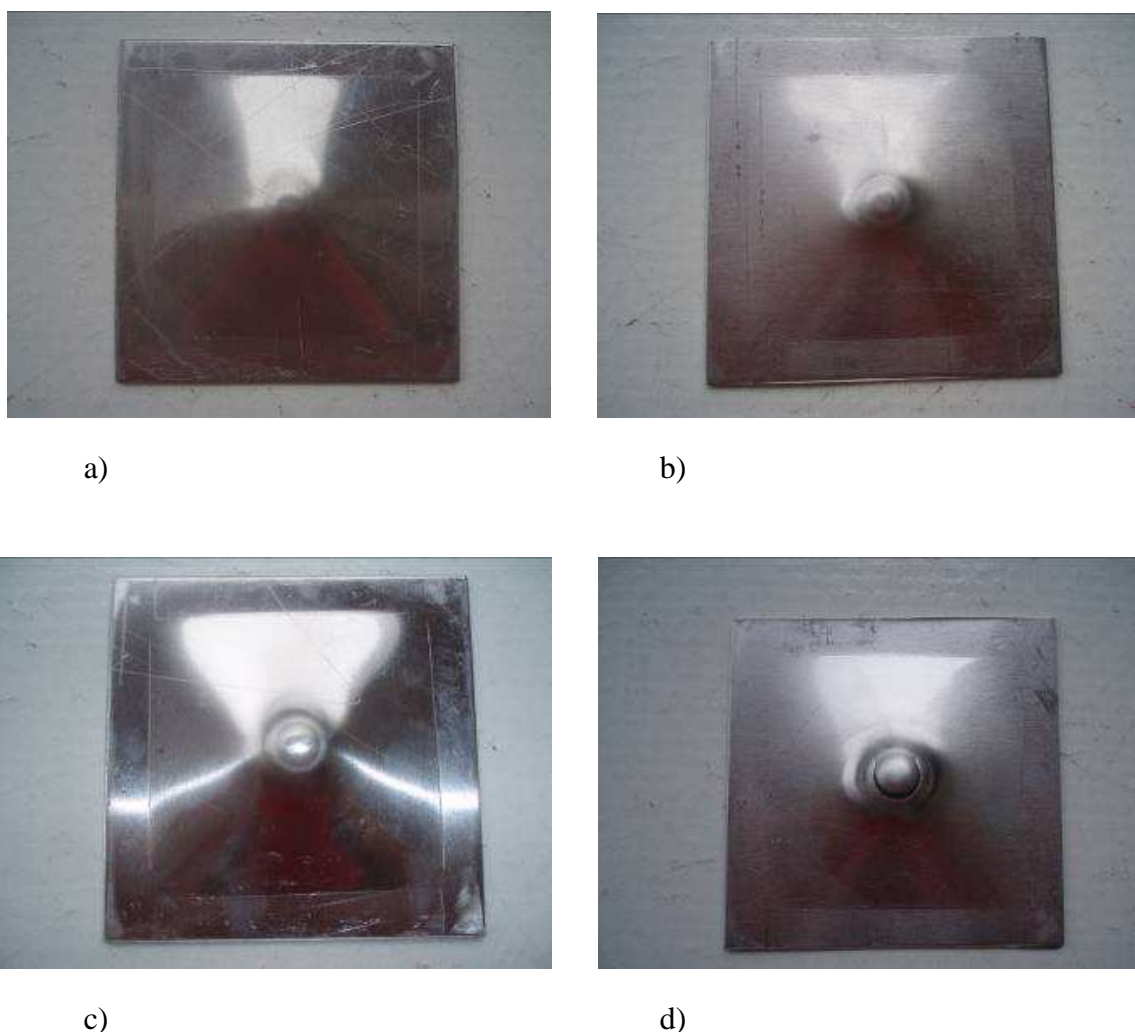


Figura 4.4 – Fotografias ilustrando o dano ocorrido nos provetes de alumínio 1050 H24 com energias de impacto de: a) 23.6 J, b) 29.5, c) 35.4 J, d) 44.2 J.

Pela análise da tabela podemos observar que à medida que a energia de impacto aumenta ocorre também o aumento da força de impacto e, conseqüentemente, a profundidade do dano. A energia de 44.2 J é a energia limite para a integridade da placa de alumínio 1050 H24, uma vez que para este valor começam a surgir as primeiras fissuras provocadas por impacto. Ao nível da taxa de recuperação elástica, esta decresce com o aumento de energia, sendo nula para a energia de 44.2 J uma vez que toda a energia é absorvida em dano. Podemos também verificar que para uma energia de 23.6 J a taxa de recuperação de energia elástica é da ordem dos 2.04% e que quando a energia de impacto aumenta para 35.4 J, representando um acréscimo de 33%, esta a taxa decresce 50%, ou seja, maior é a quantidade de energia absorvida no dano (a profundidade do dano passa de 6.6 mm para 10 mm).

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de impacto para o alumínio 1050 H24.

<b>Energia Impacto [J]</b>	<b>Força Máxima [kN]</b>	<b>Desv Padrão [kN]</b>	<b>Profundidade do Dano [mm]</b>	<b>Desv. Padrão [mm]</b>	<b>Taxa Recuperação Elástica [%]</b>	<b>Desv. Padrão [%]</b>
23.6	4.16	0.12	6.6	0.3	2.04	0.05
29.5	4.46	0.07	8.2	0.3	1.49	0.07
35.4	4.62	0.08	10	0.2	1.02	0.06
44.2	4.83	0.08	Ruína	-	-	-

### 4.3 – Comportamento ao impacto da sanduíche

#### Alumínio/Pecolit/Alumínio

Apesar da Pecolit não se revelar um bom material para uso em aplicações sujeitas ao impacto, dado ser um compósito e, como tal, pouco recomendado para tais situações, vamos fazer uma análise crítica do seu comportamento ao impacto. Deste modo vamos estudar as condições limites, ou seja, o valor da força máxima e respectiva energia crítica de impacto, para podermos avaliar o comportamento da sanduíche alumínio/pecolit/alumínio. Mais uma vez vamos apresentar as curvas força/tempo, força/deformação e energia/tempo, obtidas segundo o procedimento experimental descrito em 3.5, respectivamente, nas figuras 4.5, 4.6 e 4.7.

A figura 4.5 representa a curva força versus tempo obtida do ensaio de impacto realizado com uma massa do conjunto de 19 kg e para uma altura de 150 mm, o que corresponde, deste modo, a uma energia de 27.96 J.

Numa primeira análise realça-se o baixo valor da força máxima de impacto, na ordem dos 1.99 kN, representando, sensivelmente, 58.8% menos que a observada para o alumínio 1050 H24. Confirmamos assim, de acordo com a bibliografia [3], o mau comportamento dos materiais compósitos ao impacto. Por outro lado o traçado da curva é muito semelhante ao observado na figura 4.1, ou seja, verifica-se um aumento da força até um valor máximo ( $F_{máx}$ ) ao qual se segue, posteriormente, o decréscimo da força. Deve-se, no entanto, realçar o facto de ocorrer uma queda no valor da força antes de atingir o seu máximo ( $F_{máx}$ ) por volta dos 1 ms, como resultado do surgimento do primeiro tipo de dano no laminado [3].

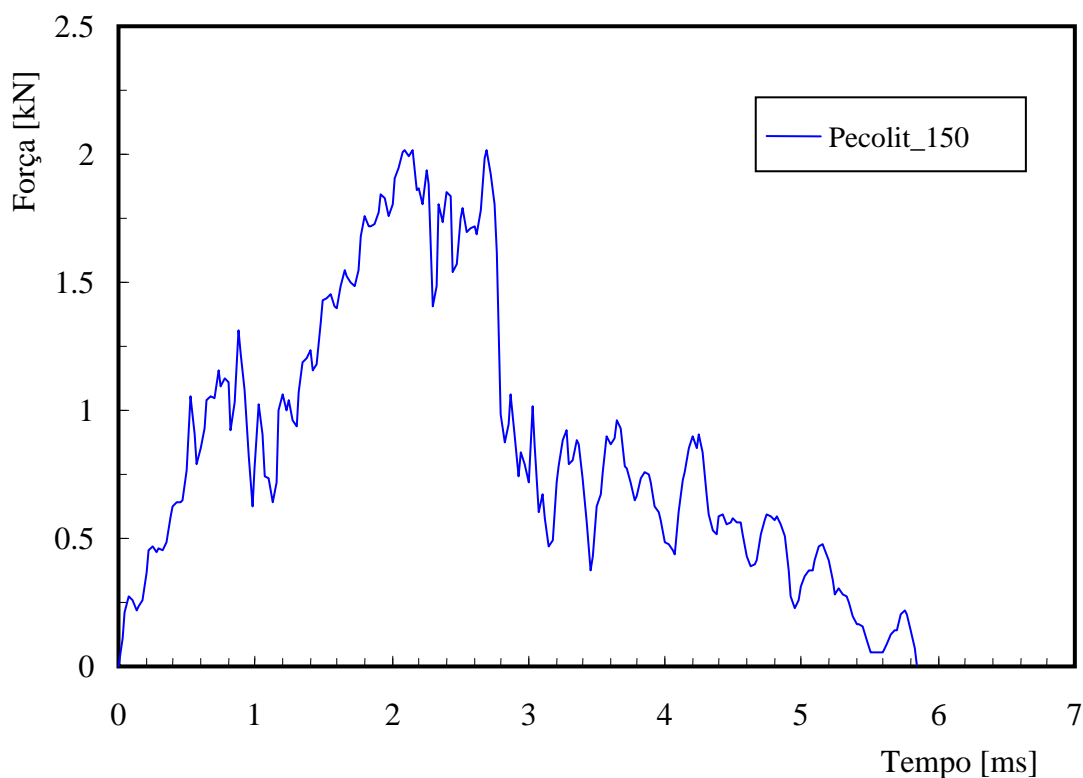


Figura 4.5 – Força versus tempo para o ensaio de impacto realizado na Pecolit.

Por sua vez na figura 4.6 encontra-se representada a evolução da força versus deslocamento. Mais uma vez a evolução desta curva é muito semelhante à observada na figura 4.2, exceptuando-se o decréscimo da força que ocorre antes de atingir o seu valor máximo ( $F_{\text{máx}}$ ), tal como foi observado na figura anterior. Vários estudos [22-24] mostram que a primeira ocorrência de dano tem como consequência uma descontinuidade na curva carga-deslocamento. De acordo com Schoeppner e Abrate [20] é suposto que o primeiro tipo de dano se manifeste no laminado por fissuras na matriz. Estas fissuras funcionam, então, como pontos de iniciação de delaminações e quebra de fibras que acabam por afectar a rigidez local e global do laminado [25].

Finalmente a figura 4.7 representa a variação da energia com o tempo. Mais uma vez esta curva apresenta um traçado típico, onde se pode observar o aumento da energia até um dado valor máximo, a partir do qual permanece constante. Esta figura também evidencia que toda a energia foi consumida em dano, não ocorrendo, assim, qualquer recuperação elástica. Na figura 4.8 podemos observar as primeiras fissuras por impacto na Pecolit, o que nos leva a dizer que a energia de impacto de 27.96 J se revela como sendo a energia crítica de impacto para este material.

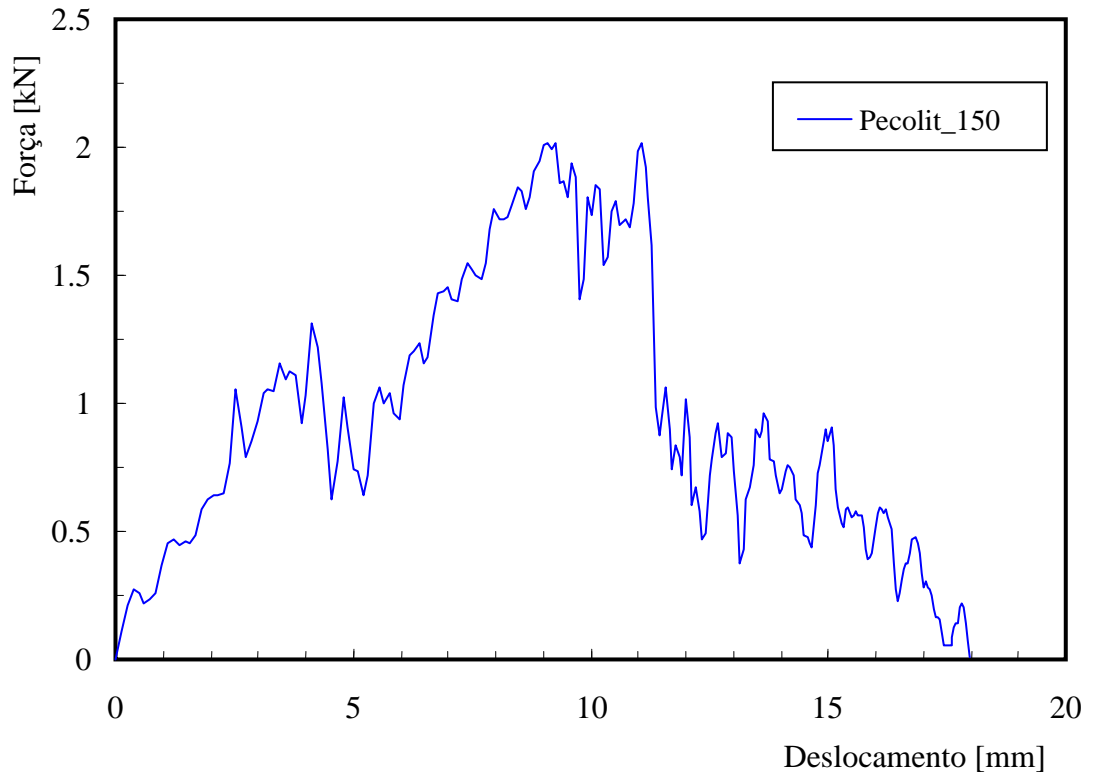


Figura 4.6 – Força versus deformação para o ensaio de impacto realizado na Pecolit.

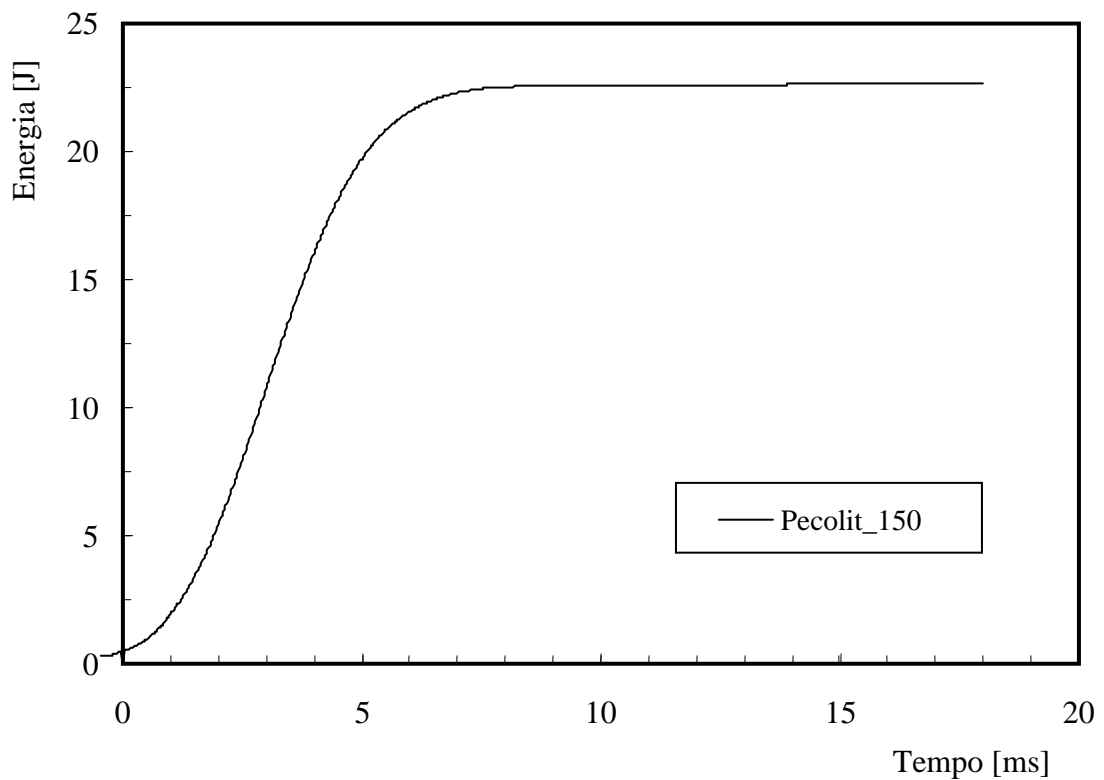


Figura 4.7 – Energia versus tempo para o ensaio de impacto realizado na Pecolit.



Figura 4.8 – Fotografia ilustrando o dano ocorrido nos provetes de Pecolit após impacto com energia de 27.96 J.

Finalmente a tabela 4.2 ilustra os resultados obtidos dos ensaios de impacto.

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de impacto para a Pecolit.

<b>Energia Impacto</b> [J]	<b>Força Máxima</b> [kN]	<b>Desv Padrão</b> [kN]	<b>Profundidade do Dano</b> [mm]	<b>Desv. Padrão</b> [mm]	<b>Taxa Recuperação Elástica</b> [%]	<b>Desv. Padrão</b> [%]
27.96	1.99	0.16	Ruína	-	-	-

Uma vez conhecido o comportamento da Pecolit ao impacto vamos agora estudar o comportamento da sanduíche alumínio/pecolit/alumínio. Os ensaios decorreram segundo o procedimento experimental descrito em 3.5 e os resultados encontram-se ilustrados nas figuras 4.9, 4.10 e 4.11 onde se representam, respectivamente, as curvas força/tempo, força/deformação e energia/tempo.

Neste caso houve a necessidade de aumentar a massa de impacto relativamente à usada nos ensaios efectuados para o alumínio. Para a massa anteriormente usada, e face aos valores de energia necessários, era preciso uma altura de queda para o impactor que ultrapassava os limites da máquina.

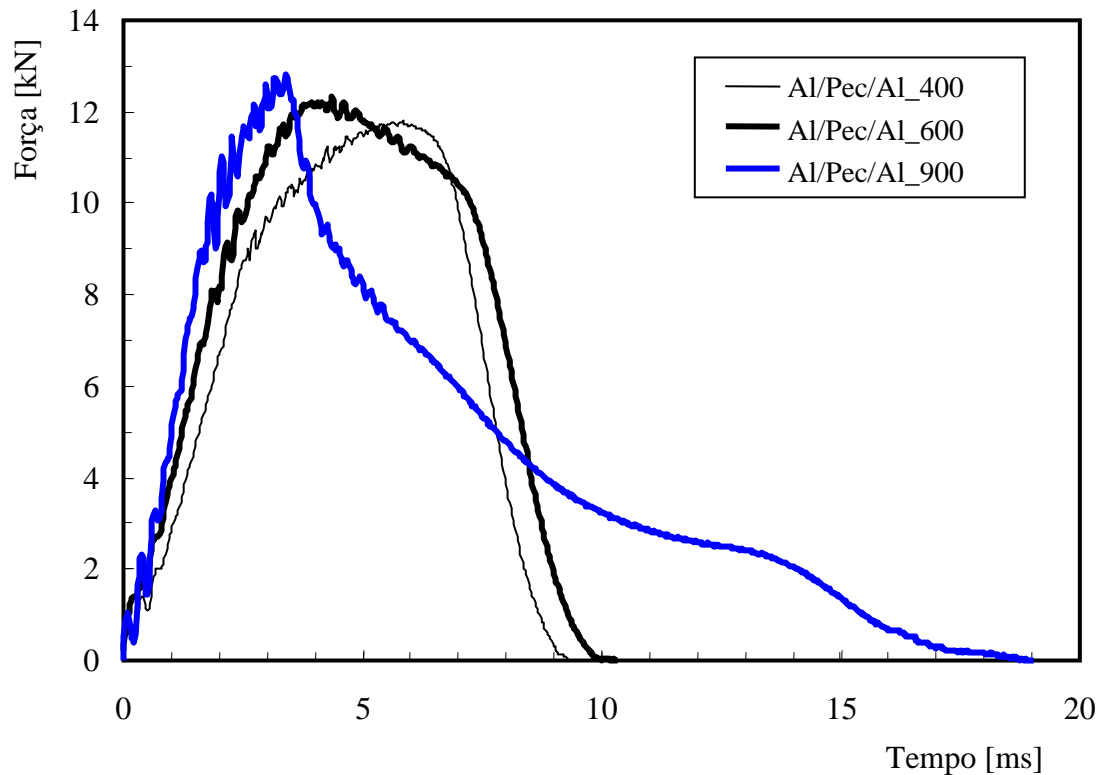


Figura 4.9 – Força versus tempo para os ensaios de impacto realizados na sanduíche alumínio/pecolit/alumínio.

De acordo com a figura 4.9 podemos então observar que para os ensaios Al/Pec/Al\_400 e Al/Pec/Al\_600, que representam, respectivamente, o comportamento da sanduíche quando sujeita a um impacto com uma energia de 74.6 J e 111.8 J, a força cresce até um valor  $F_{m\acute{a}x}$ , voltando a diminuir até atingir novamente o zero, onde o impactor deixa de ter contacto com a placa. Mais uma vez o valor de  $F_{m\acute{a}x}$  aumenta com o aumento da energia de impacto. O tempo médio de contacto impactor/placa obtido para a energia de 74.6 J é de 9.32 ms enquanto que para a energia de 111.8 J é de 10.33 ms. Assim quanto maior a energia de impacto maior é o tempo de contacto impactor/placa e, para o presente material, este tempo aumenta para o dobro comparativamente ao tempo de contacto observado no alumínio 1050 H24. No que diz respeito à curva média Al/Pec/Al\_900, que representa o comportamento da placa sujeita a um impacto com um valor de energia na ordem dos 169.95 J a força cresce até ao seu valor máximo ( $F_{m\acute{a}x}$ ) ao que posteriormente passa a diminuir com um andamento diferente dos observados anteriormente, devido à ocorrência de dano na sanduíche.

Relativamente à figura 4.10 o andamento das curvas é muito semelhante ao observado nas anteriores. Para os ensaios com energias de impacto de 74.6 J e 111.8 J a força e o deslocamento crescem simultaneamente até um valor máximo assistindo-se, posteriormente, a uma diminuição da força com o decréscimo do deslocamento. Isto quer dizer que após  $F_{\text{máx}}$  o impactor se afasta da placa. No entanto para o ensaio Al/Pec/Al\_900, onde já existem fissuras na chapa provocadas pelo impacto, o comportamento revela-se algo diferente do observado para as outras energias, onde o deslocamento é muito maior, na ordem dos 24 mm. De igual modo o aumento da energia de impacto aumenta o deslocamento e consequentemente o dano nas placas, conforme ilustra a figura 4.12.

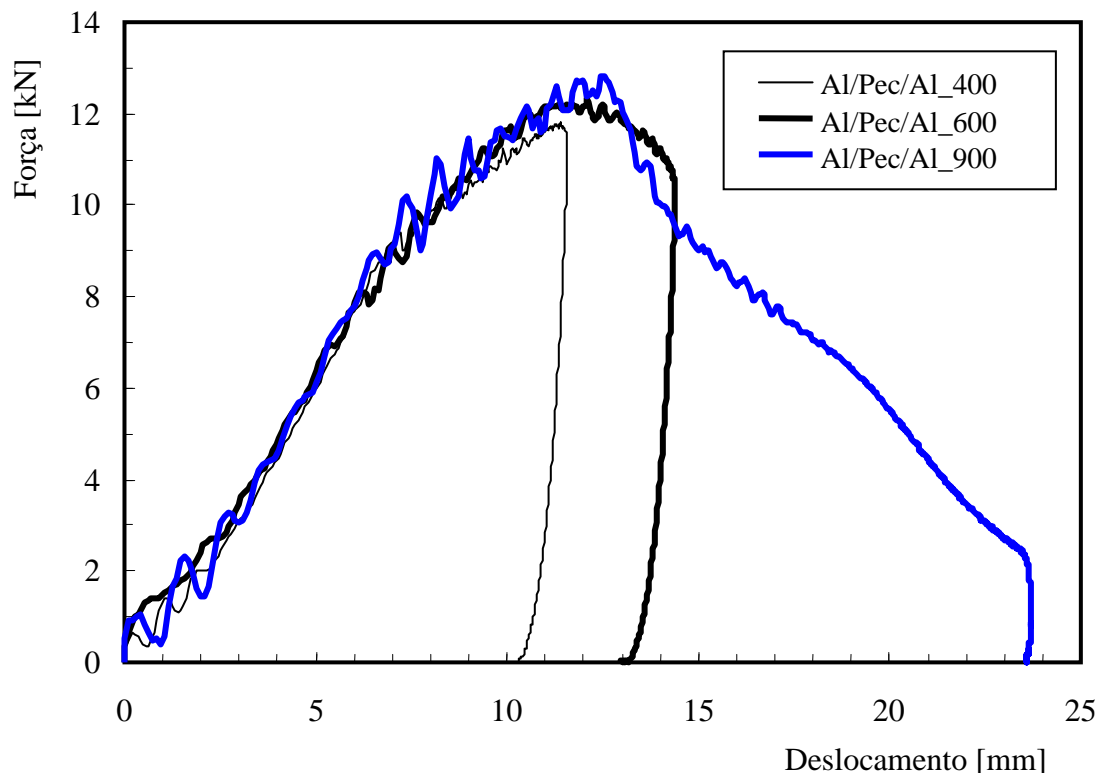


Figura 4.10 – Força versus deslocamento para os ensaios de impacto realizados na sanduíche alumínio/pecolit/alumínio.

A figura 4.11 ilustra a variação da energia com o tempo onde se observa que para as energias de 74.6 J e 111.8 J a energia aumenta no tempo até atingir um valor máximo, passando a ficar constante, após algum decréscimo. Neste caso, parte da energia de impacto não foi absorvida de forma elástica traduzindo-se em forma de dano. Contudo, para a energia de impacto no valor 169.95 J verifica-se que toda a energia foi absorvida no

dano, ao que, apesar de não ter ocorrido perfuração total da sanduíche, será um valor de energia limite, dado que ocorrem as primeiras fissuras por impacto. Para as energias de 74.6 J e 111.8 J a sanduíche sofre um dano com uma profundidade máxima de 9.5 mm e 14.1 mm, respectivamente.

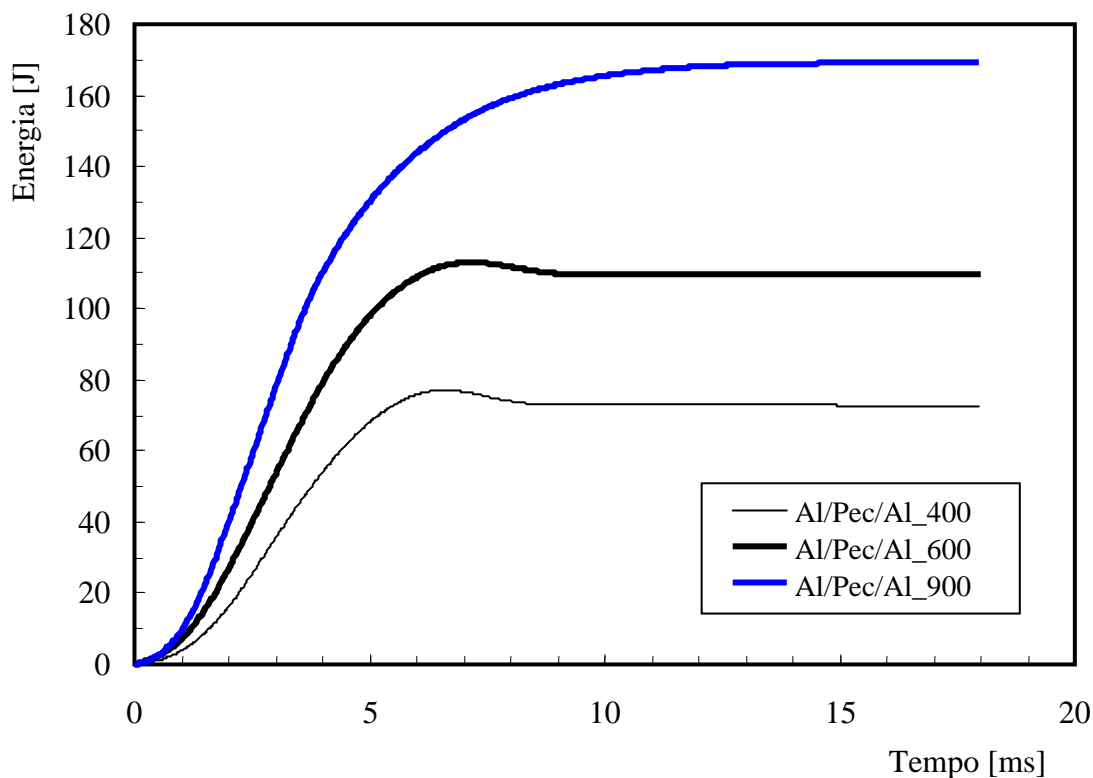


Figura 4.11 – Energia versus tempo para os ensaios de impacto realizados na sanduíche alumínio/pecolit/alumínio.

Na tabela 4.3, e em função da energia de impacto, encontra-se representado o valor médio da força máxima, dimensões do dano provocado e taxa de recuperação elástica, bem como, o respectivo desvio padrão.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de impacto para a sanduíche.

Energia Impacto [J]	Força [kN]	Desv Padrão [kN]	Profundidade do Dano [mm]	Desv. Padrão [mm]	Taxa Recuperação Elástica [%]	Desv. Padrão [%]
74.6	11.85	0.18	9.5	0.2	5.74	0.92
111.8	12.3	0.48	14.1	0.4	3.35	0.48
167.8	13.01	0.49	Ruína	-	-	-

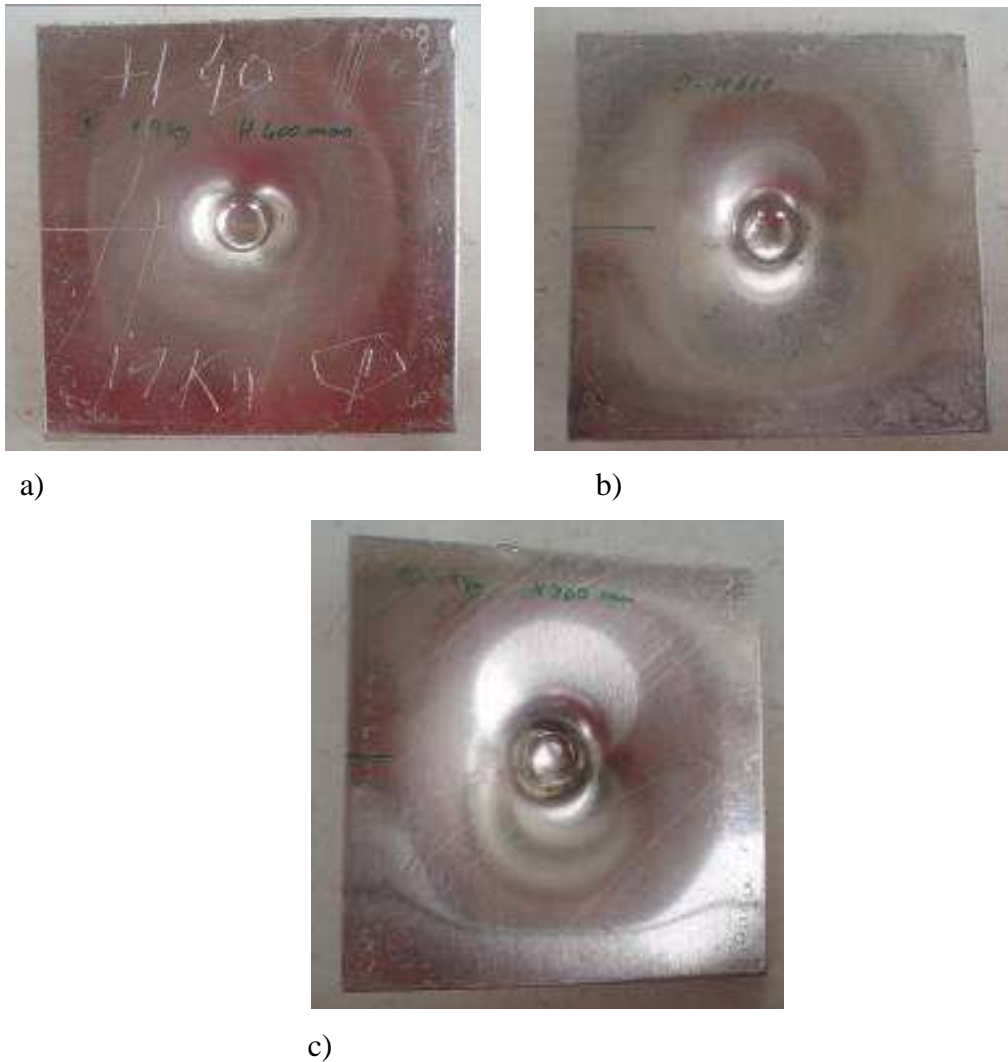


Figura 4.12 – Fotografias ilustrando o dano ocorrido nos provetes em sanduíche com energias de impacto de: a) 74.6 J, b) 111.8 J, c) 169.95 J.

À medida que a energia de impacto aumenta maior é a força de impacto e, conseqüentemente, maior a profundidade do dano. A energia de 167.8 J é a energia limite para a integridade da sanduíche, uma vez que surgem as primeiras fissuras provocadas por impacto. Mais uma vez a taxa de recuperação elástica decresce com o aumento de energia, sendo nula para a energia de 167.8 J, dado que toda ela é absorvida em dano. Neste caso um aumento de energia na ordem dos 33.3% (quando se passa de 74.6 para 111.8 J) conduz a um decréscimo da taxa de recuperação de energia em 41.6 %.

Apesar de não podermos estabelecer uma comparação directa com os valores apresentados na tabela 4.1 para o alumínio 1050 H24, devido às diferenças de massa usadas, podemos observar ao nível dos valores de energia de impacto que estes aumentam

significativamente. Por exemplo enquanto a energia crítica para o alumínio 1050 H24 é de 44.2 J o seu valor para a sanduíche alumínio/pecolit/alumínio é de 169.95 J, representando um aumento de 74 %.

#### **4.4 – Comportamento ao impacto dos aços de elevado limite elástico**

Como foi referido anteriormente o aço, apesar de tudo, ainda continua a ser o material mais utilizado na indústria automóvel. Neste sentido algumas siderurgias têm efectuado melhorias extraordinárias nas propriedades mecânicas dos aços vocacionados para aplicações estruturais. Exemplo típico deste comportamento é a empresa SSAB-Swedish Steel com a apresentação de aços de alta resistência e, mais recentemente, aços de ultra resistência, conseguindo-se níveis de resistência bem mais elevados para a mesma massa específica.

Neste ponto será então estudado o comportamento ao impacto dos aços Docol 1000 e 1200, dois produtos novos no mercado, com vista a comparar o seu comportamento com os de maior uso corrente na carroçaria dos autocarros.

Inicialmente são apresentados os resultados obtidos para o aço Docol 1000, obtidos segundo o procedimento experimental descrito em 3.5, nas figuras 4.13, 4.14 e 4.15.

Na figura 4.13, onde se encontra representada a evolução da força com o tempo, podemos observar que para os ensaios Docol 1000 h600 e Docol 1000 h900, respeitantes a uma energia de impacto de 111.8 J e 167.8 J, respectivamente, a força cresce até um valor  $F_{m\acute{a}x}$ , voltando a diminuir até atingir novamente o zero (o impactor deixa de ter contacto com a placa). O valor de  $F_{m\acute{a}x}$  aumenta com o aumento da energia de impacto e o tempo médio de contacto impactor/placa neste caso é muito semelhante e da ordem dos 7.3 ms. Verifica-se, por exemplo, que este material apresenta tempos de contacto inferiores aos observados na sanduíche alumínio/pecolit/alumínio, para o mesmo valor de energia de 111.8 J, e de uma forma geral para todas as energias. No que diz respeito à curva média Docol 1000 h1200, que representa o comportamento da placa sujeita a um impacto com um valor de energia na ordem dos 223.7 J, a força cresce até ao seu valor máximo ( $F_{m\acute{a}x}$ ), ao que decresce subitamente e passa a ter um andamento muito semelhante ao observado nas curvas anteriores. Este comportamento resulta da ocorrência das primeiras fissuras no aço.

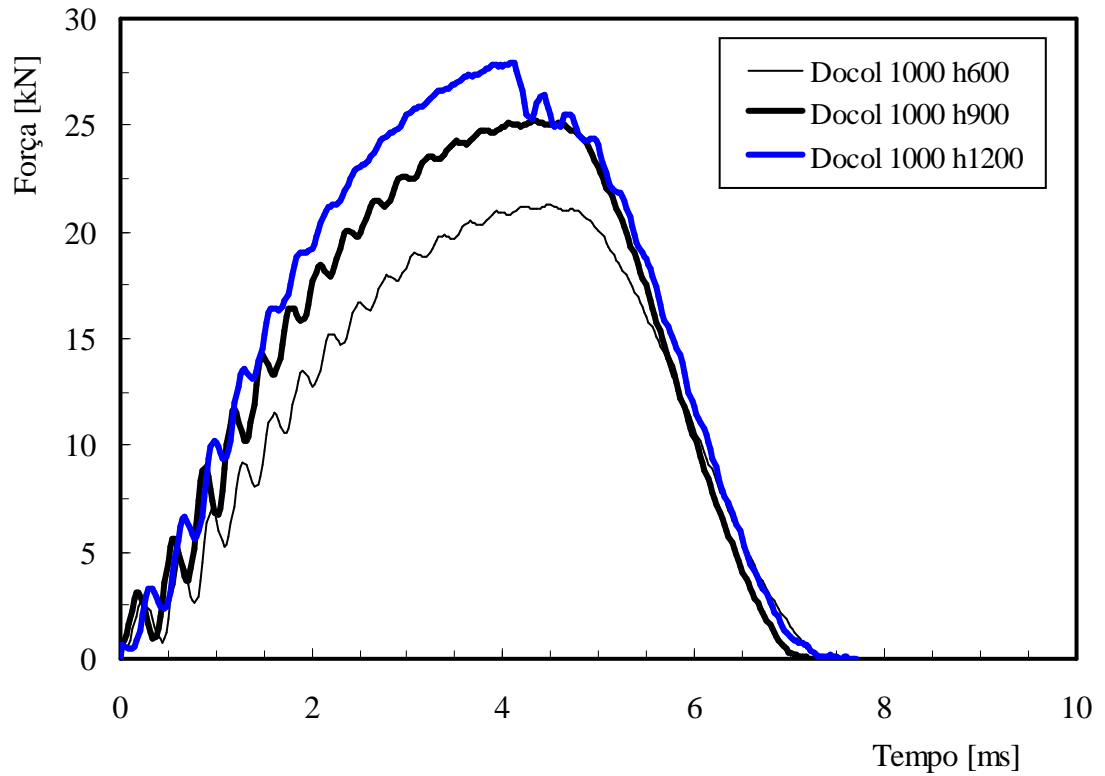


Figura 4.13 – Força versus tempo para os ensaios de impacto realizados no Docol 1000.

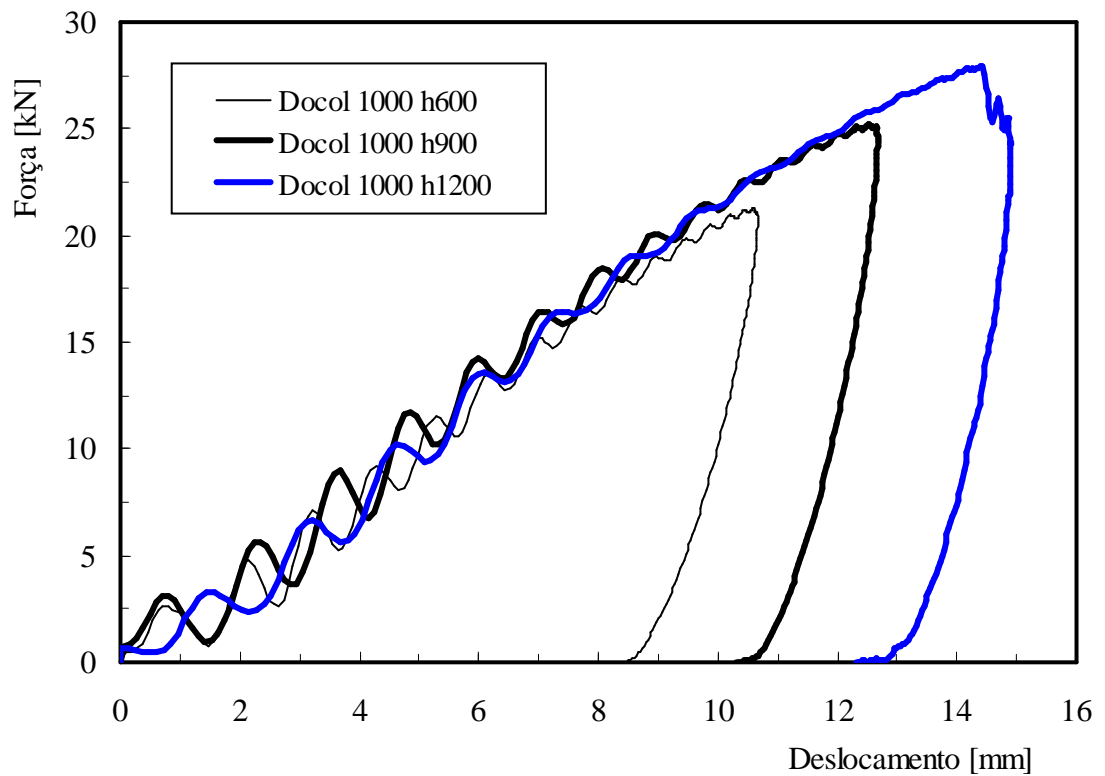


Figura 4.14 – Força versus deslocamento para os ensaios de impacto realizados no aço Docol 1000.

A evolução da força com o deslocamento é ilustrada na figura 4.14 e o andamento das curvas é muito semelhante ao observado nas anteriores. De uma forma geral podemos dizer que a força e o deslocamento crescem simultaneamente até um valor máximo, assistindo-se, posteriormente, a uma diminuição da força com o decréscimo do deslocamento. Isto quer dizer que após  $F_{m\acute{a}x}$  o impactor se afasta da placa. No entanto, para o ensaio Docol 1000 h1200, onde já existem fissuras na chapa provocadas pelo impacto, o comportamento revela-se algo diferente do observado para as outras energias. Após ser atingida a  $F_{m\acute{a}x}$  assiste-se a uma queda súbita da força, passando posteriormente a ter um comportamento muito semelhante às outras. Também se verifica que o aumento da energia de impacto aumenta o deslocamento e conseqüentemente o dano nas placas, conforme ilustra a figura 4.16. O deslocamento é todavia inferior ao observado nos outros materiais (alumínio e sanduíche).

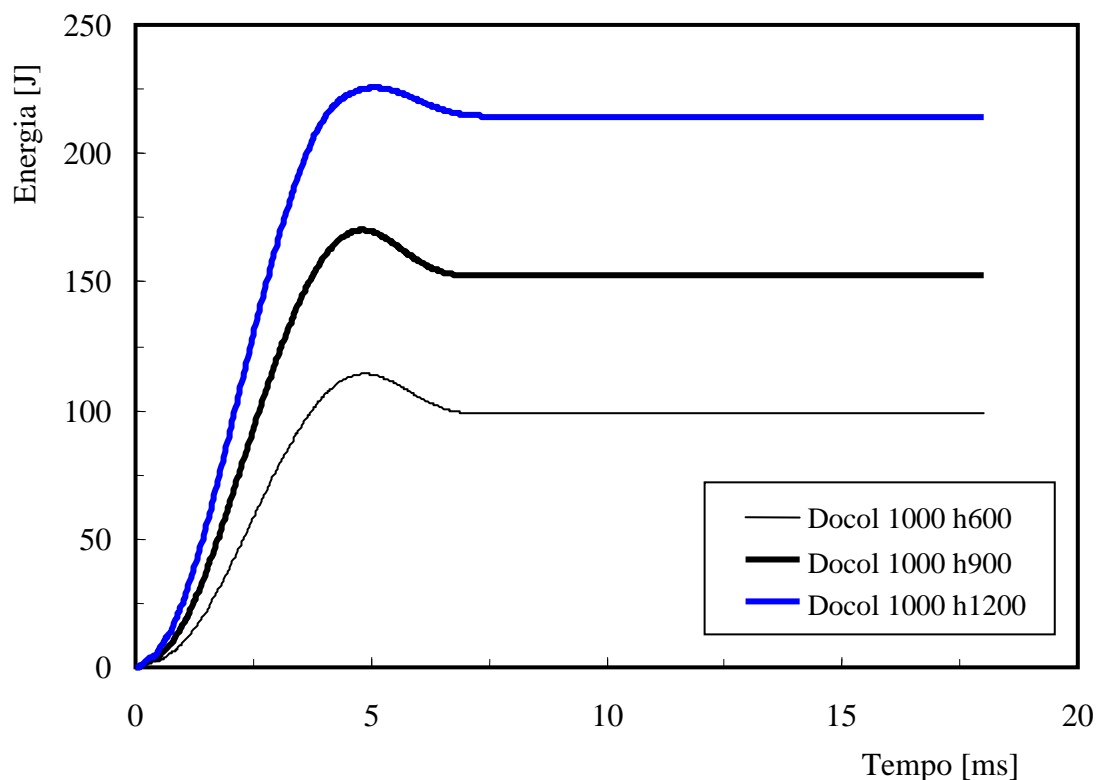


Figura 4.15 – Energia versus tempo para os ensaios de impacto realizados no Docol 1000.

A figura 4.15 ilustra a variação da energia com o tempo, onde se observa que estas grandezas aumentam até atingir um valor máximo, passando a energia a ficar constante, após algum decréscimo. Parte da energia de impacto não foi absorvida de forma elástica

traduzindo-se em forma de dano: Apesar da energia de impacto no valor 223.7 J já promover algumas fissuras na chapa, esta ainda apresenta alguma taxa de recuperação elástica. Na figura 4.16 é ilustrado o dano observado nas chapas.

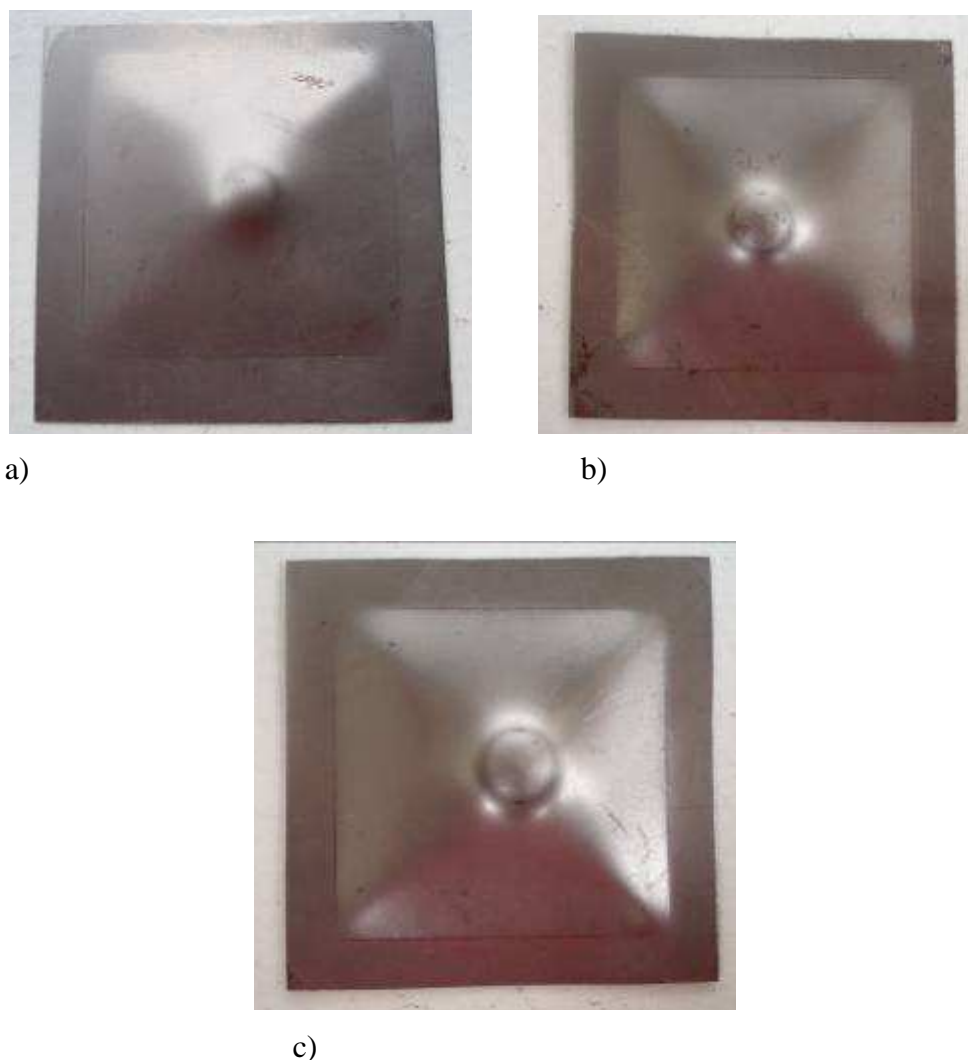


Figura 4.16 – Fotografias ilustrando o dano ocorrido nos provetes de aço Docol 1000 com energias de impacto de: a) 111.8 J, b) 167.8 J, c) 223.7 J.

Na tabela 4.4, e em função da energia de impacto, encontra-se representado o valor médio da força máxima, dimensões do dano provocado e taxa de recuperação elástica, bem como, o respectivo desvio padrão. Comparando os resultados com os obtidos para a sanduiche alumínio/pecolit/alumínio verificamos que o aço Docol 1000 apresenta valores muito mais elevados tanto para a força como para a taxa de recuperação elástica. Ao nível da força máxima, e para a energia de 111.8 J, a diferença observada é da ordem dos 42.3 % enquanto a taxa de recuperação elástica é 63.2 % mais alta do que a ocorrida na sanduiche.

Para a energia de 167.8 J já ocorrem fissuras por impacto na sanduíche enquanto o aço ainda apresenta uma taxa de recuperação elástica na ordem dos 9.1 %. Finalmente salienta-se o facto das primeiras fissuras por impacto surgirem no aço Docol 1000 para valores de 223.7 J, apesar de ainda ocorrer uma taxa de recuperação elástica de 3.9 %. Comparando os valores de energia crítica com os obtidos para o alumínio 1050 H24 assiste-se a um aumento de 80.2 %.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de impacto para o aço Docol 1000.

Energia Impacto [J]	Força [kN]	Desv Padrão [kN]	Profundidade do Dano [mm]	Desv. Padrão [mm]	Taxa Recuperação Elástica [%]	Desv. Padrão [%]
111.8	21.31	0.41	8.6	0.3	11.6	0.92
167.8	25.22	0.61	9.2	0.2	9.1	0.48
223.7	27.97	0.08	Ruína	-	3.9	0.53

Relativamente aos resultados obtidos para o aço Docol 1200 eles encontram-se ilustrados nas figuras 4.17, 4.18 e 4.19.

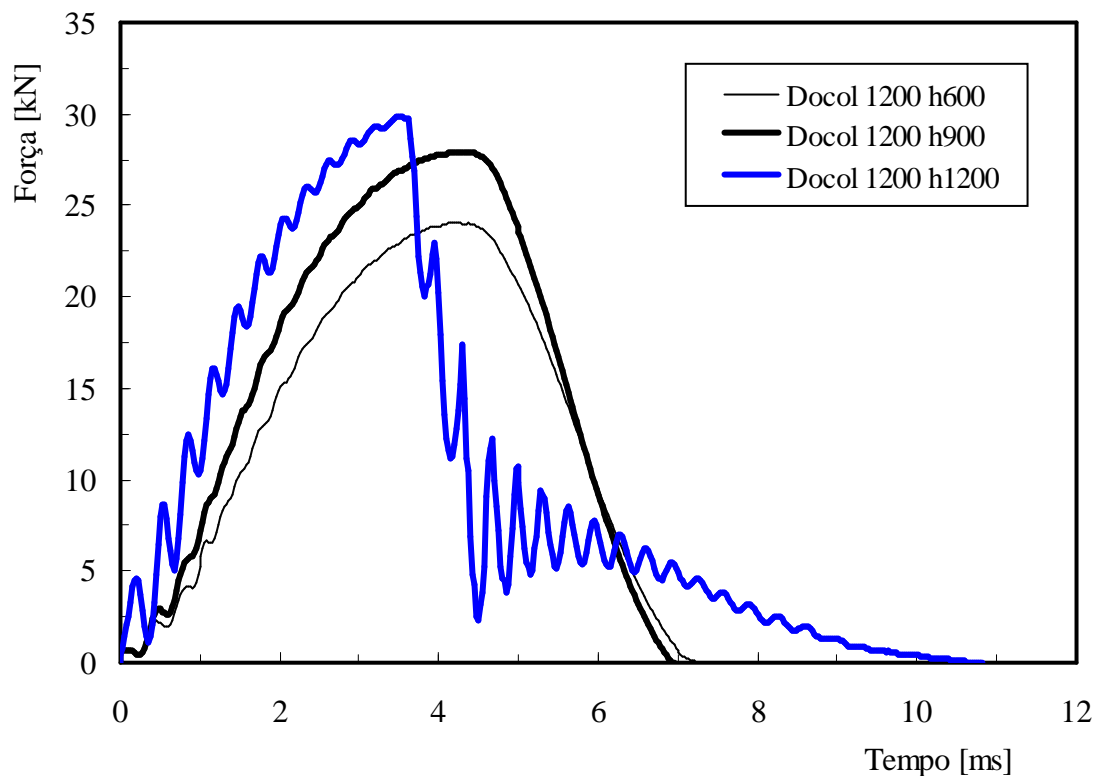


Figura 4.17 – Força versus tempo para os ensaios de impacto realizados no Docol 1200.

A figura 4.17 ilustra a evolução da força com o tempo obtida para o aço Docol 1200. As curvas médias Docol 1200 h600 e Docol 1200 h900, respeitantes a uma energia de impacto de 111.8 J e 167.8 J, respectivamente, revelam-se muito semelhantes às obtidas para o aço Docol 1000 e também com um tempo médio de contacto impactor/placa muito similar, da ordem dos 7 ms. No que diz respeito à curva média Docol 1200 h1200, referente à energia de 223.7 J, ela apresenta também um traçado reprodutivo das anteriores, onde surgem os primeiros danos por impacto.

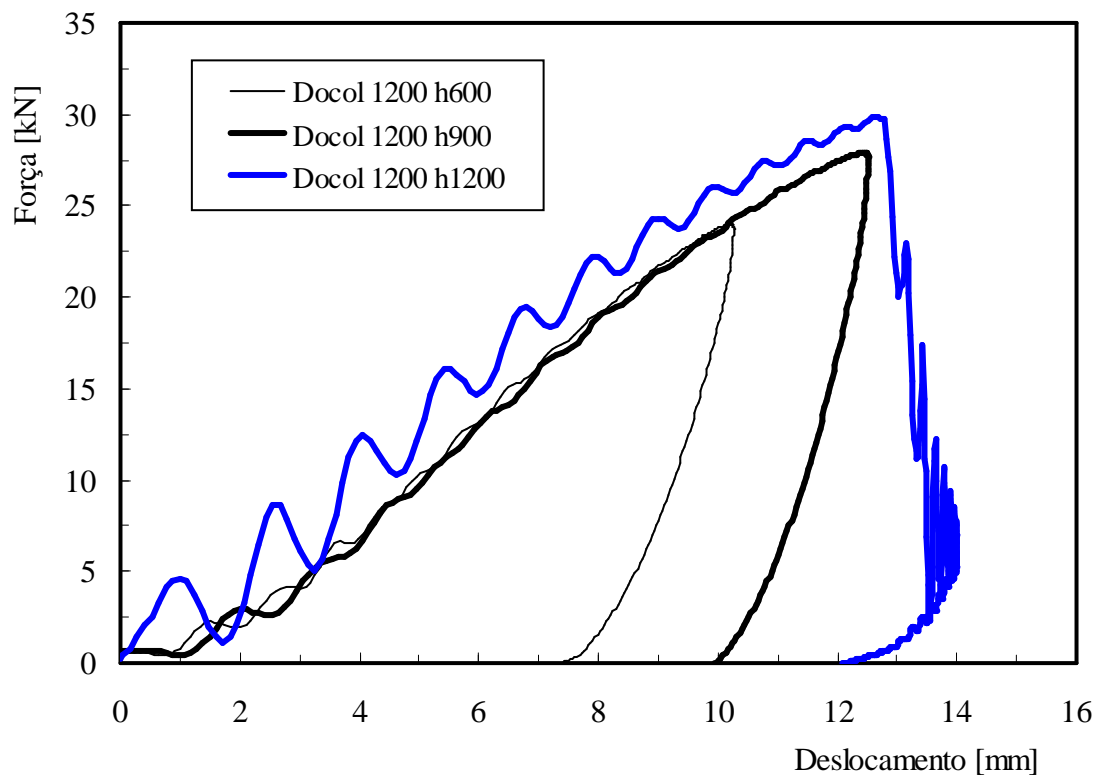


Figura 4.18 – Força versus deslocamento para os ensaios de impacto realizados no aço Docol 1200.

A evolução da força com o deslocamento é ilustrada na figura 4.18 e é semelhante à observada na figura 4.14. Apesar do ensaio Docol 1200 h1200, relativo a uma energia de impacto de 223.7 J, conduzir já aos primeiros danos na chapa, ainda é possível observar o retorno do impactor através da diminuição do deslocamento na parte final da curva.

Relativamente à variação da energia com o tempo, figura 4.19, ela reproduz mais uma vez um traçado semelhante ao ocorrido na figura 4.15. Verificamos que para todas as energias ensaiadas parte dela foi restituída na forma elástica e outra consumida em dano, mesmo

para as condições onde ocorreu os primeiros danos. Na figura 4.20 são ilustrados os danos ocorridos nas chapas de aço Docol 1200.

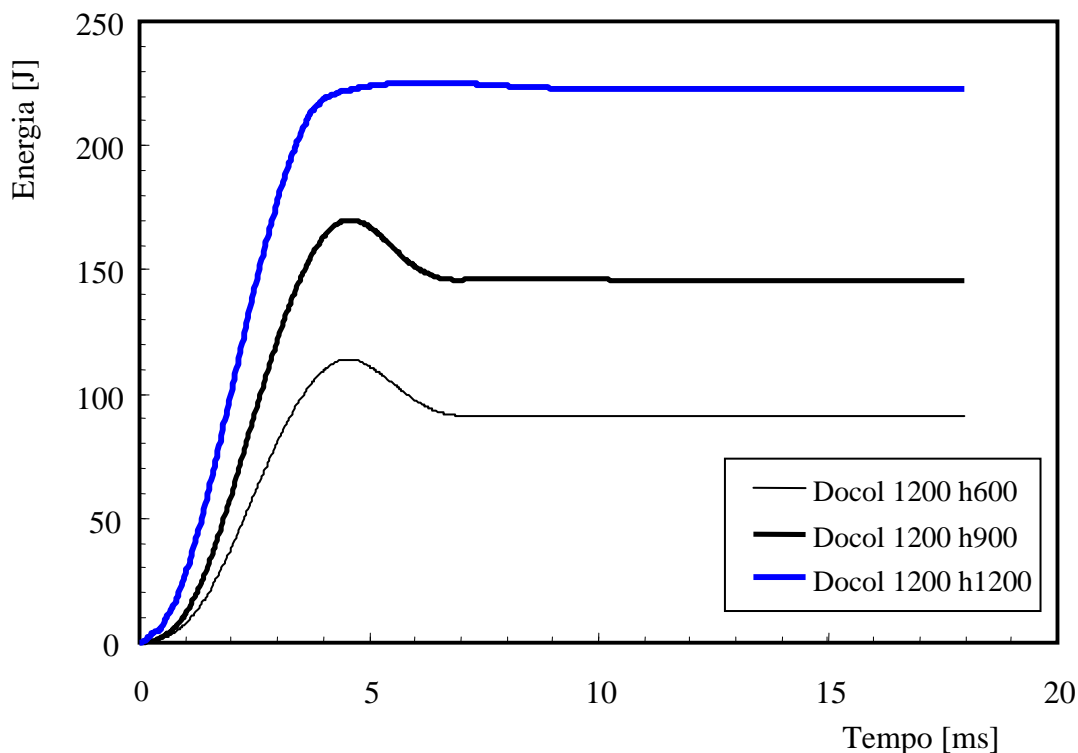


Figura 4.19 – Energia versus tempo para os ensaios de impacto realizados no Docol 1200.

Na tabela 4.5, e em função da energia de impacto, encontra-se representado o valor médio da força máxima, dimensões do dano provocado e taxa de recuperação elástica, bem como, o respectivo desvio padrão.

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de impacto para o aço Docol 1200.

Energia Impacto [J]	Força [kN]	Desv Padrão [kN]	Profundidade do Dano [mm]	Desv. Padrão [mm]	Taxa Recuperação Elástica [%]	Desv. Padrão [%]
111.8	24.05	0.18	5.4	0.2	19.1	0.05
167.8	27.94	0.34	8.1	0.5	13.6	0.02
223.7	29.89	0.19	Ruína	-	0.9	0.09

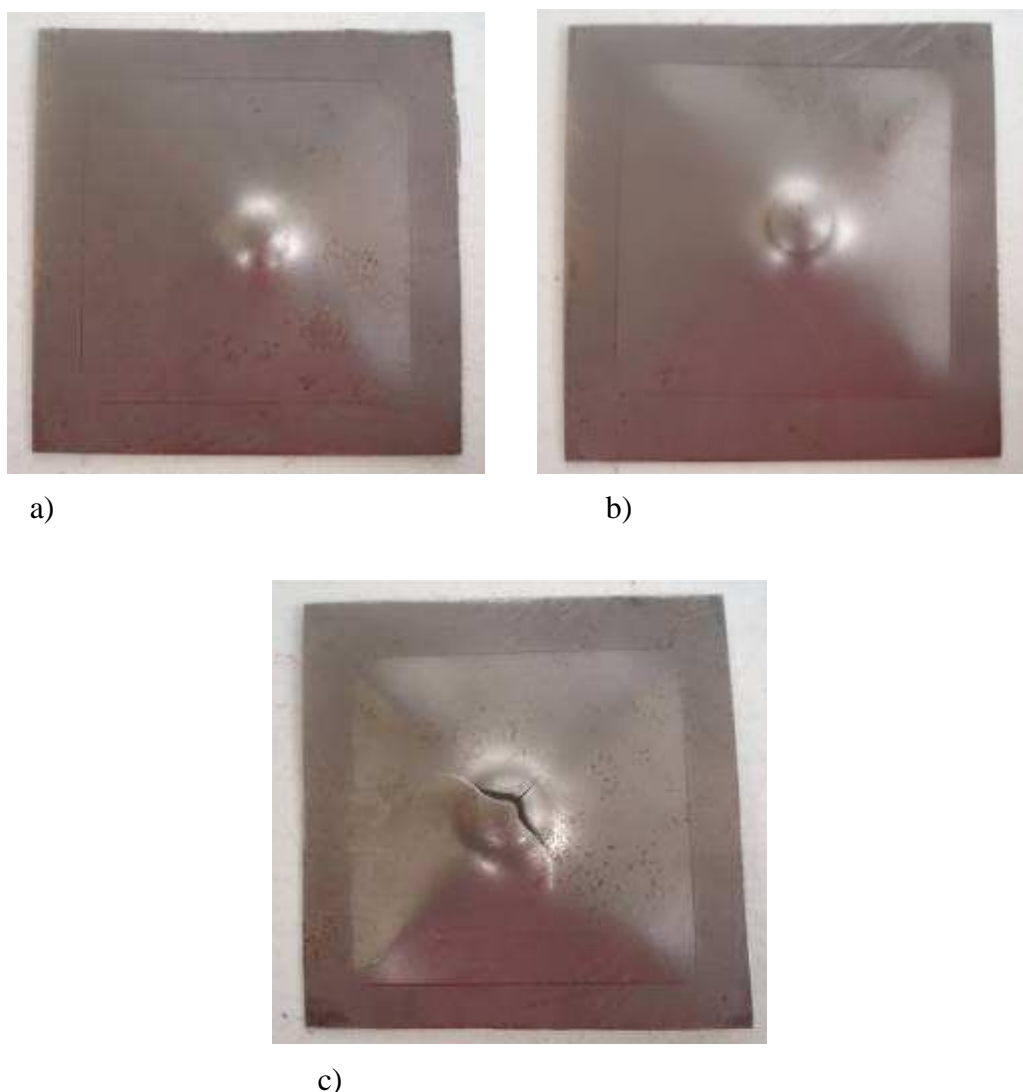


Figura 4.20 – Fotografias ilustrando o dano ocorrido nos provetes de aço Docol 1200 com energias de impacto de: a) 111.8 J, b) 167.8 J, c) 223.7 J.

Pela análise da tabela, e mais uma vez, podemos observar que o aumento da energia conduz a um aumento da força de impacto e, conseqüentemente, o dano. Ao nível da força máxima, e para a energia de 111.8 J, a diferença é da ordem dos 11.4 % relativamente à observada para o aço Docol 1000, enquanto a taxa de recuperação elástica é 39.2 % mais alta. Para a energia de 167.8 J os valores obtidos são de 9.7 % e 33.1 %, respectivamente.

Comparativamente ao aço Docol 1000 o Docol 1200 apresenta taxas de recuperação elástica mais elevadas, o que deste modo se revela mais apto para aplicações sujeitas ao impacto

## 4.5 – Análise Comparativa

Até agora fizemos uma análise individual do comportamento ao impacto de cada material envolvido no presente estudado, bem como, algumas comparações, ao nível estatístico, dos principais parâmetros de impacto. Todavia na indústria automóvel, como já foi referido, o peso revela-se determinante no âmbito do projecto. Assim será efectuada uma análise comparativa dos diferentes materiais envolvendo a sua massa específica.

Na figura 4.21 encontra-se representada a energia critica de impacto por unidade de massa para os diferentes materiais em estudo.

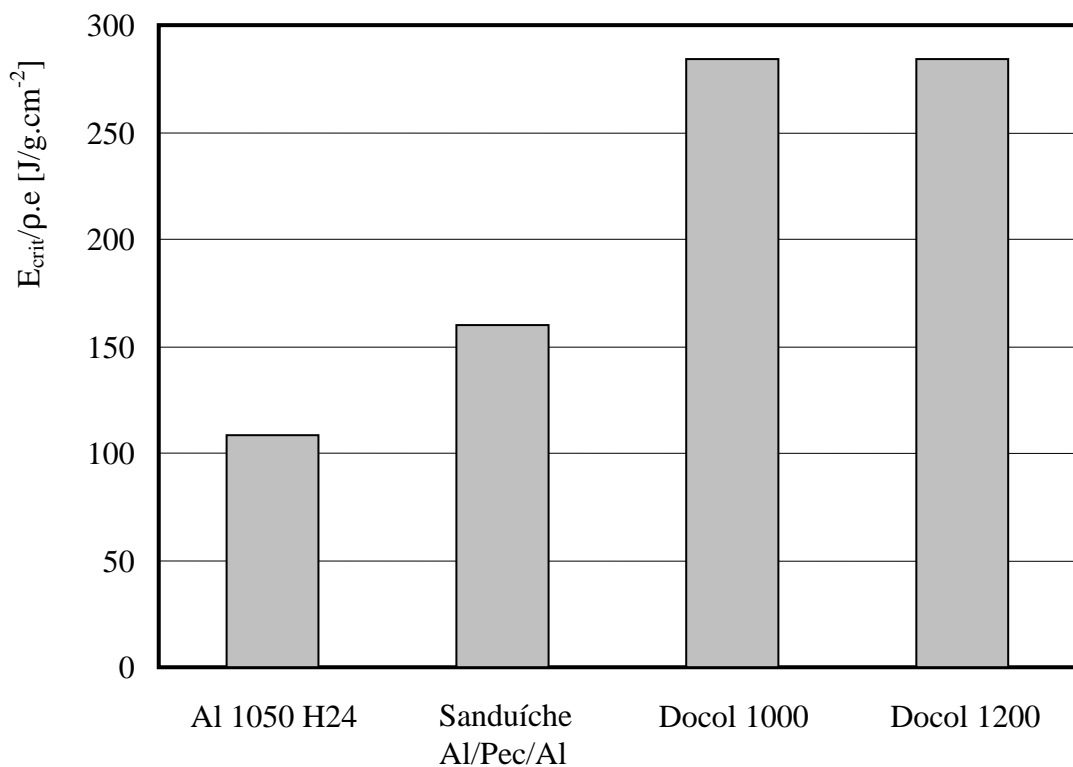


Figura 4.21 – Energia critica de impacto por unidade de massa para os diferentes materiais.

Neste gráfico, e para cada material, o valor da energia de impacto para o qual ocorrem as primeiras fissuras é dividido pela sua massa específica vezes a espessura da amostra testada. Considerou-se assim a densidade do alumínio de  $2.71 g/cm^3$ , do aço igual a  $7.81 g/cm^3$  e para a Pecolit de  $1.388 g/cm^3$ . A espessura do alumínio é de 1.5 mm, dos aços de 1 mm e da Pecolit 2 mm, conforme indicado em 3.3.

Deste modo, e para igual peso, os aços de elevada resistência mostram ser os materiais que absorvem mais energia e logo a melhor solução para aplicações sujeitas ao impacto. A sua energia crítica por unidade de massa é, por exemplo, 61.7 % vezes superior à absorvida pelo alumínio 1050 H24, enquanto relativamente à sanduíche alumínio/pecolit/alumínio é 45.9 % mais elevada. Estes resultados permitem-nos concluir que podem ser aplicadas chapas de aço com espessuras muito mais baixas que as usadas com o alumínio 1050 H24, para os mesmos níveis de energia de impacto.

Na figura 4.22 está representada, por sua vez, a força crítica de impacto por unidade de massa para os diferentes materiais em estudo.

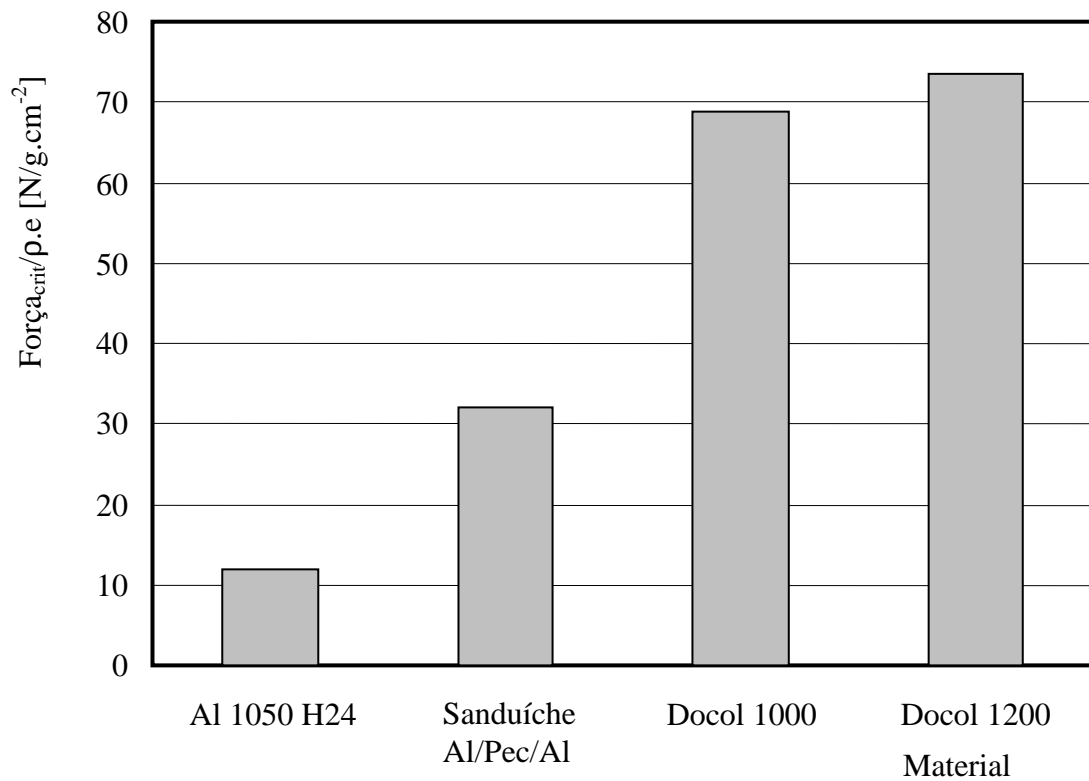


Figura 4.22 – Força crítica de impacto por unidade de massa para os diferentes materiais.

Neste caso o aço Docol 1200 é o que resiste a forças de impacto mais elevadas. A sua força crítica por unidade de massa é 83.8 % maior que a observada para o alumínio 1050 H24 e 56.5 % relativamente à sanduíche alumínio/pecolit/alumínio. Comparativamente ao aço Docol 1000 revela-se apenas 6.4 % mais elevada.

Para além do aço Docol 1200 revelar-se aparentemente uma melhor escolha do que o Docol 1000 devido a resistir a forças de impacto mais altas ele também associa, como vimos anteriormente, taxas de recuperação elástica mais elevadas e na ordem dos 39.2 % para uma energia de 111.8 J. Para a energia de 167.8 J este valor é apenas de 33.1 %. Consequentemente os danos observados no Docol 1200 são inferiores e na ordem dos 5.4 mm para a energia de 111.8 J e 8.1 mm para a energia de 167.8 J, enquanto o Docol 1000 apresenta, respectivamente, 8.6 mm e 9.2 mm. Apesar da energia crítica de ambos ser 223.7 J o aço Docol 1200 apresenta um maior dano por impacto devido a apresentar menor plasticidade.

# Capítulo 5

---

## CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os objectivos inicialmente estabelecidos, esta tese apresentou uma análise e discussão de resultados que conduziu a algumas conclusões. Neste capítulo irão ser abordadas apenas as que se julguem serem mais importantes.

Numa fase seguinte são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 5.1 – Conclusões Gerais

1 - Para o alumínio 1050 H24 verificou-se que as primeiras fissuras por impacto ocorreram para uma energia de 44.2 J, correspondendo a uma força de 4.83 kN. Para uma energia de 23.6 J a taxa de recuperação de energia elástica é de 2.04%, assistindo-se a um decréscimo de 50%, quando esta aumenta para 35.4 J. Para estes valores de energia observa-se uma força de impacto de 4.16 kN e 4.62 kN, respectivamente;

2 - As primeiras fissuras por impacto na Pecolit ocorrem para a energia de impacto de 27.96 J, à qual corresponde uma força de 1.99 kN;

3 - A energia de 167.8 J é a energia limite para a integridade da sanduíche alumínio/pecolit/alumínio, uma vez que surgem as primeiras fissuras provocadas por impacto. Para este valor de energia encontra-se associada uma força no valor de 13.01 kN. A energia de 74.6 J apresenta uma taxa de recuperação elástica de 5.74 %, enquanto para a energia de 111.8 J este valor é apenas de 3.35 %. Os valores da força de impacto associados a estas energias são de 11.85 kN e 12.03 kN, respectivamente;

4 - Para o aço Docol 1000 os primeiros danos por impacto ocorrem para uma energia de 223.7 J, apesar de ainda se assistir a uma taxa de recuperação elástica na ordem dos 3.9%. O valor da força de impacto associado a esta energia é de 27.97 kN. Para a energia de 111.8 J ocorre uma força de impacto de 21.31 kN e uma taxa de recuperação elástica de 11.6 %, enquanto que para a energia de 167.8 J estes valores são de 25.22 kN e 9.1 J, respectivamente;

5 - Relativamente ao aço Docol 1200 a energia crítica de impacto também é de 223.7 J, mas neste caso correspondendo uma força de 29.89 kN e uma taxa de recuperação elástica de 0.9 %. Para este material e para a energia de 111.8 J a força de impacto é de 24.05 kN e

a taxa de recuperação elástica de 19.1 %, enquanto que para a energia de 167.8 J estes valores são de 27.94 kN e 13.6 J, respectivamente;

6 - Os danos observados no aço Docol 1200 são menores do que os observados no Docol 1000;

7 - Para igual peso, os aços de elevada resistência são os materiais que absorvem mais energia e logo a melhor solução para aplicações sujeitas ao impacto;

8 - O aço Docol 1200 é o material que apresenta a força de impacto crítica por unidade de massa mais elevada. O seu valor é 83.8 % maior que a observada para o alumínio 1050 H24 e 56.5 % relativamente à sanduíche alumínio/pecolit/alumínio. Comparativamente ao aço Docol 1000 revela-se apenas 6.4 % mais elevada.

## **5.2 – Recomendações para Trabalhos Futuros**

Na sequência do presente trabalho surgiram alguns aspectos que se revelaram interessantes para uma abordagem mais detalhada. De seguida, são referidos sumariamente aqueles que poderão vir a ser objecto de futura investigação:

1 - Estudar os efeitos ambientais na resistência ao impacto da sanduíche alumínio/pecolit/alumínio e nos aços de elevada resistência. No caso da sanduíche as interfaces alumínio/pecolit são coladas, revelando-se assim sensíveis, por exemplo, à água e temperatura. Relativamente aos aços observar a evolução da resistência ao impacto com a sua taxa de oxidação.

2 - Estudar chapas de aço com menores espessuras, devido à sua maior energia crítica por unidade de massa, e comparar com os valores obtidos para a chapa de alumínio 1050 H24 com espessura de 1.5 mm, dado a sua aplicabilidade na carroçaria dos autocarros.

3 - Associado ao estudo do efeito da espessura nas placas de aço, efectuar simultaneamente uma análise de rigidez, tendo em vista o seu melhor desempenho em serviço.

# **Bibliografia**

---

- 
- [1] - <http://eur-lex.europa.eu/pt/index.html>.
- [2] - <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs.html>.
- [3] - Ferreira, L.M.S. - "Avaliação do Dano em Compósitos Laminados Devido a Impactos de Baixa Velocidade", Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, 2007.
- [4] - Ruiz, C. and Harding J. - "Modelling Impact of Composite Structures Using Small Specimens", Composites Engineering, Vol. 2, pgs. 164-167, 1992.
- [5] - Caprino, G. - "Residual Strength Prediction of Impacted CFRP Laminates", Composites Mater., Vol. 18, pgs. 508-518, 1984.
- [6] - Prichard, J.C. and Hogg, P.J. - "The Role of Impact Damage in Post-Impact Compression Testing", Composites, Vol. 21, N° 6, pgs. 503-509, 1990.
- [7] - Abrate, S. - "Impact on laminated Composite Materials", Applied Mech. Rev., Vol. 44, N° 4, pgs. 155-190, 1991.
- [8] - de Moura, M.F.S.F. and Marques, A.T., - "Prediction of Low Velocity Impact Damage in Carbon-Epoxy Laminates", Comp. Part. A, Vol. 33, pgs. 361-368, 2002.
- [9] - Cook, R.D., Malkus, D.S. and Plesha, M.E. - "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley and Sons Ltd, New York, United States, 1989.
- [10] - Swanson, S.R. - "Limits of Quasi-Static Solutions in Impact of Composite Structures", Composites Engineering, Vol. 2, pgs. 261-267, 1992.
- [11] - Ramachandra, S., Kumar, P.S. and Ramamurty, U. - "Impact Energy Absorption in an Al foam at Low Velocities ", Scripta Materials, Vol. 49, pgs. 741-745, 2003.
- [12] - Foo, C.C., Seah, L.K. and Chai, G.B. - "Low-Velocity Impact Failure of Aluminium Honeycomb Sandwich Panels", Composite Structures, Vol. 85, pgs. 20-28, 2008.
- [13] - Merlin, M., *et al.* Impact Behaviour of A356 alloy for Low-pressure Die Casting Aut. Wheels. J. Mater. Process. Tech. (2008), doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.03.027.
-

- 
- [14] -ASM International, The Material Information Society – “Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose materials”, Volume 2, 1990.
- [15] -Smith, W.F. – “Structure and Properties of Engineering Alloys”, Second Edition, McGraw-Hill, 1993.
- [16] -Smith, W.F. – “Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais”, Terceira Edição, McGraw-Hill, 1998.
- [17] -The Aluminium Association – “Aluminium Standard & Data”, New York, April 1968.
- [18] -Bellenger, V., Mortaigne, B. and Verdu, J. – “Structure-property Relationships for Styrene Crosslinked Polyesters. II. Glass Transition Temperature” Journal of Applied Polymer Science, Vol. 44, N° 4, pgs. 653-661, 1992.
- [19] -Sanchez, E. M. S., Zavaglia, C.A.C. and Felisberti, M. I. – “Unsaturated Polyester Resins: Influence of the Styrene Concentration on the Miscibility and Mechanical Properties”, Polymer, Vol. 41, N° 2, pgs. 765-769, 2000.
- [20] -Schoeppner, G.A. and Abrate, S. – “Delamination Threshold Loads for Low Velocity Impact on Composite Laminates”, Composites: Part A, Vol. 31, N° 9, pgs. 903-915, 2000.
- [21] -Belingardi, G. and Vadori, R. – “Low Velocity Impact of Laminate Glass-Fiber-Epoxy Matrix Composite Materials Plates”, International Journal of Impact Engineering, Vol. 27, N° 2, pgs. 213-229, 2002.
- [22] -Lee, S.M. and Zahuta, P. – “Instrumented Impact and Static Indentation of Composites”, Journal of Composite Materials, Vol. 25, N° 2, pgs. 204-222, 1991.
- [23] -Sjoblom, P.O., Hartness, T.J. and Cordell, T.M. – “On Low-Velocity Impact Testing on Composite Materials”, Journal of Composite Materials, Vol. 22, pgs. 30-52, 1988.
- [24] -Found, M.S., Howard, L.C. and Paran, A.P. – “Interpretation of Signals from Drop-Weight Impact Tests”, Composite Structures, Vol. 42, pgs. 353-363, 1998.
- [25] -Highsmith, A.L. – “A Study of the Use of Contact Loading to Simulate Low-Velocity Impact”, NASA Contractor Report 97-206121, 1997.
-