

Sónia Marisa Maciel Leitão Correia

## **ESTUDO DA TOLERÂNCIA AO DANO DE TUBAGENS EM PRFV**

Dissertação apresentada para a obtenção  
do grau de Mestre em Engenharia Mecânica  
pela Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia do Porto

Universidade do Porto

2008



Para ti mãe.

Por todos os momentos que vivemos juntas.



## Resumo

*A utilização de matrizes termoplásticas nos compósitos de fibras longas é relativamente recente tendo o número das suas aplicações vindo a crescer. A sua utilização comporta, no entanto, alguns novos desafios tecnológicos e científicos uma vez que apresentam uma viscosidade muito mais elevada que os termoendurecíveis, tornando assim muito mais difícil e complexa a tarefa de impregnação dos reforços bem como a sua consolidação.*

*Neste trabalho, pretendeu-se estudar o dano causado por impactos de baixa velocidade em tubagens produzidas por enrolamento filamentar de matriz termoplástica reforçada com fibras. Seleccionou-se o polipropileno como material para a matriz e as fibras de vidro como material para o reforço, utilizando-se um pré-impregnado disponível comercialmente (Twintex®). Para realizar os ensaios de impacto a baixa velocidade em amostras de tubagem utilizou-se um equipamento instrumentado de impacto por queda de peso.*

*Determinou-se também, experimentalmente, o valor da taxa crítica de libertação de energia em modo II ( $G_{IIc}$ ) do polipropileno reforçado com fibras de vidro, através de ensaios de END-NOTCHED FLEXURE (ENF), a partir de provetes obtidos de placas fabricadas por compressão a quente.*

*Comparou-se o comportamento ao impacto das tubagens produzidas com o de outras, de matriz termoendurecível.*

*Finalmente, foi possível relacionar o valor de  $G_{IIc}$  obtido em provetes planos com o dano de impacto nas tubagens.*



## Abstract

The use of thermoplastic matrix in long fibre composites is very recent with a growing number of applications. However, as thermoplastic matrix present a much higher viscosity than the thermosetting ones, their impregnation and subsequent consolidation into a composite part is more complex and difficult.

In this work, it was intended to study the damage caused by low velocity impact on thermoplastic matrix pipes reinforced with glass fibres. The pipes were produced by filament winding using a pre-impregnated commercial solution (Twintex<sup>®</sup>) with polypropylene as matrix and glass fibres as reinforcement.

The composite critical strain energy release rate in mode II ( $G_{IIc}$ ) was also experimentally determined by using the end-notched flexure tests (ENF) and specimens produced from plates that were produced by compression moulding.

The impact properties of the produced pipes were also compared with the ones from other pipes with a thermosetting matrix.

Finally, it was possible to relate  $G_{IIc}$  obtained values with the impact damage in thermoplastic composite pipes.



## Résumé

L'utilisation de matrices thermoplastiques pour les composites de fibres longues est relativement récente, ayant le nombre de ses applications croissant. Cette utilisation comporte, cependant, certains nouveaux défis technologiques et scientifiques une fois qu'elles présentent une viscosité beaucoup plus importante que les thermodurcissables, devenant ainsi plus difficile et complexe le travail d'imprégnation des renforcements comme sa consolidation.

Dans ce travail, le but est d'étudier les endommagements causés par les impacts à basse vitesse sur des tuyaux produits par enroulement filamentaire de matrice thermoplastique renforcée avec des fibres. Le polypropylène a été sélectionné comme matériel pour la matrice et les fibres de verre comme matériel de renforcement, en utilisant un pré-imprégné disponible commercialement (Twintex®). Pour la réalisation des essais d'impact à basse vitesse sur des éprouvettes de tuyau il a été utilisé un équipement instrumenté d'impact par chute de poids.

Il a été déterminé, expérimentalement, la valeur du taux critique de libération d'énergie en mode II ( $G_{IIc}$ ) de polypropylène renforcé avec des fibres de verre, à travers d'essais de ENF, à partir d'éprouvettes obtenus de plaques fabriquées par compression à chaud.

Il a été aussi comparé le comportement à l'impact des tuyaux produits par des matrices thermodurcissables.

Finalement, il a été possible de créer une relation entre la valeur de  $G_{IIc}$  obtenu en éprouvette plane avec le endommagement de l'impact sur le tuyau.



## Agradecimentos

Não teria conseguido realizar este trabalho sem a imprescindível e valiosa ajuda de diversas pessoas e entidades, às quais desejo agradecer e expressar o meu reconhecimento. Correndo o risco de me esquecer de algumas pessoas, gostaria de agradecer, em particular:

Ao Professor António Torres Marques, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Universidade do Porto, por ter aceite ser orientador deste trabalho e pela liberdade que me concedeu de poder tomar opções e evoluir cientificamente. Quero também expressar a minha admiração pelo seu vasto conhecimento científico, que tanto me incentivou. Agradeço ainda a sua disponibilidade e a ajuda na obtenção dos meios necessários ao longo destes meses.

Ao Doutor João Francisco Machado Gomes da Silva, equiparado Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, co-orientador deste trabalho, pelo seu exemplo, amizade, disponibilidade, esclarecimentos prestados e empenho em que eu terminasse esta dissertação. A sua capacidade de trabalho e o seu profundo conhecimento científico na área dos materiais compósitos nunca cessam de me espantar.

À Doutora Olga Maria Maia Coutinho de Paiva, Professora Coordenadora, Presidente do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, quero agradecer a sua amizade, interesse e apoio demonstrados no acompanhamento deste trabalho, que tanto me motivaram.

À Engenheira Dina Dimas, da Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval (UETN) do Instituto Superior Técnico de Lisboa, por ter disponibilizado os equipamentos necessários à realização dos ensaios de impacto a baixa velocidade, bem como a ajuda e o empenho postos nos trabalhos necessários para obtenção de resultados.

Ao CEMACOM, o ter-me disponibilizado os meios laboratoriais e os equipamentos tecnológicos necessários à realização deste trabalho.

Agradeço também às minhas amigas e amigos, por acreditarem em mim e por me terem compreendido nos períodos mais difíceis em que lhes prestei menos atenção por estar envolvida na realização deste trabalho. Quero agradecer, com especial carinho, à Sandra, por toda a sua amizade e pelo incondicional apoio que me tem dado nestes últimos meses.

Quero ainda expressar o meu reconhecimento ao Luís, amigo dedicado, que admiro, pelas suas fortes convicções e pela sua extraordinária capacidade de trabalho. Agradeço o encorajamento e a força que sempre me transmitiu para que terminasse este trabalho.

Por último, quero agradecer com especial carinho, ao meu Pai e aos meus Irmãos, Nelson e Nuno, por fazerem parte da minha vida. E à Paula claro! Peço desculpa a todos pelos períodos em que estive mais ausente por estar envolvida na realização deste trabalho.

Finalmente, quero agradecer à minha Mãe, a quem dedico este trabalho, por ter acreditado sempre em mim. Quero expressar a minha mais profunda admiração pela *Mãe, Mulher e Amiga* de todos os momentos. Enquanto mãe, sempre atenta e presente, agradeço os princípios morais e a educação que me facultou, bem como, o facto de nos ter posto sempre em primeiro lugar. Enquanto mulher e amiga, nunca esquecerei o seu sorriso, a sua alegria e força de viver, o seu aprumo, a nossa cumplicidade e confidências, os momentos que passamos juntas... Por tudo isto e pelo tanto que não foi dito: Obrigada Mãe!

# Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E OBJECTIVO .....</b>	<b>3</b>
1.1	INTRODUÇÃO .....	3
1.2	OBJECTIVO.....	5
1.3	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	6
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>9</b>
2.1	COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA .....	9
2.1.1	Compósitos de matriz termoendurecível.....	10
2.1.2	Compósitos de matriz termoplástica .....	10
2.1.2.1	Matrizes.....	11
2.1.2.2	Reforços.....	12
2.2	PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS .....	15
2.2.1	Introdução.....	15
2.2.2	Processamento de compósitos de matriz termoplástica.....	16
2.2.2.1	Moldação por compressão a quente .....	16
2.2.2.2	Moldação por injeção.....	17
2.2.2.3	Enrolamento filamentar.....	18
2.2.2.4	Pultrusão .....	18
2.3	TUBAGENS .....	19
2.3.1	Introdução.....	19
2.3.2	Materiais utilizados em tubagens.....	20
2.3.2.1	Acrilonitrilo butadieno e estireno (ABS).....	20
2.3.2.2	Polibutileno (PB).....	20
2.3.2.3	Polietileno (PE).....	20
2.3.2.4	Polipropileno (PP).....	20
2.3.2.5	Policloreto de vinilo (PVC) .....	21
2.3.2.6	Plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV).....	21
2.4	DANO.....	22
2.4.1	Introdução.....	22
2.4.2	Resistência à fadiga.....	23
2.4.3	Resistência ao impacto .....	23
2.4.3.1	Introdução .....	23
2.4.3.2	Impacto a baixa velocidade.....	24
2.4.3.2.1	Ensaio de impacto a baixa velocidade .....	24
2.4.3.2.2	Métodos experimentais para detecção do dano .....	26
2.4.3.2.3	Dano causado por impacto a baixa velocidade .....	26
2.4.3.2.4	Modelação.....	27
2.4.3.3	Parâmetros fundamentais na resistência ao impacto.....	28
2.4.3.4	Resistência residual após impacto.....	29

2.4.4	Fractura interlaminar .....	31
2.4.4.1	Introdução .....	31
2.4.4.2	Taxa crítica de libertação de energia em modo II .....	32
2.4.4.3	Métodos de cálculo para estimar a fractura interlaminar .....	32
2.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	34
<b>3</b>	<b>FABRICO DE COMPÓSITOS .....</b>	<b>41</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	41
3.2	MATÉRIAS-PRIMAS .....	41
3.2.1	Pré-impregnados .....	41
3.2.1.1	Introdução .....	41
3.2.1.2	Fibras de reforço .....	42
3.2.1.3	Matriz termoplástica .....	43
3.3	TRANSFORMAÇÃO POR ENROLAMENTO FILAMENTAR .....	43
3.3.1	Introdução .....	43
3.3.2	Equipamento .....	45
3.3.3	Parâmetros de fabrico .....	47
3.3.4	Fabrico de tubagens .....	47
3.3.5	Fabrico de placas .....	51
3.4	TRANSFORMAÇÃO POR COMPRESSÃO A QUENTE .....	52
3.4.1	Introdução .....	52
3.4.2	Equipamento .....	52
3.4.3	Tecnologia .....	53
3.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57
<b>4</b>	<b>ENSAIOS .....</b>	<b>61</b>
4.1	ENSAIO 'END NOTCHED FLEXURE' - ENF .....	61
4.1.1	Introdução .....	61
4.1.2	Procedimentos .....	61
4.1.3	Preparação dos provetes .....	63
4.1.4	Tecnologia .....	64
4.2	ENSAIO DE IMPACTO DE BAIXA VELOCIDADE POR QUEDA DE PESO .....	67
4.2.1	Introdução .....	67
4.2.2	Procedimentos .....	67
4.2.3	Cálculo das grandezas físicas relevantes .....	72
4.2.3.1	Velocidade .....	72
4.2.3.2	Deflexão .....	73
4.2.3.3	Energia de Impacto .....	73
4.3	DETERMINAÇÃO DE FRACÇÕES MÁSSICAS E VOLÚMICAS .....	73
4.4	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75
<b>5</b>	<b>RESULTADOS OBTIDOS E CONCLUSÕES .....</b>	<b>79</b>
5.1	5.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO .....	79
5.1.1	Resultados obtidos .....	79

5.1.2	Estimativa da força máxima de impacto.....	83
5.1.3	Comparação com outros compósitos.....	84
5.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS 'END NOTCHED FLEXURE' - ENF.....	85
5.2.1	Resultados obtidos.....	85
5.2.2	Comparação com outros compósitos.....	86
5.3	DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA ÁREA DELAMINADA .....	87
5.3.1	Electronic Speckle Pattern Interferometry' - ESPI .....	87
5.3.2	Estimativa do valor da área delaminada .....	89
5.3.3	Comparação com outros compósitos de matriz termoadesívica.....	90
5.4	CONCLUSÕES GERAIS .....	91
5.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	92
<b>6</b>	<b>SÍNTESE E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>95</b>
6.1	SÍNTESE.....	95
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	95
6.3	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	96
	<b>PRINCIPAIS NOTAÇÕES.....</b>	<b>97</b>
	<b>ANEXO1 - PROPRIEDADES DA MATÉRIA-PRIMA.....</b>	<b>I.1</b>
	<b>ANEXO2 - PROPRIEDADES GENÉRICAS DAS FIBRAS DE VIDRO .....</b>	<b>II.1</b>
	<b>ANEXO3 - PROPRIEDADES GENÉRICAS DO POLIPROPILENO.....</b>	<b>III.1</b>
	<b>ANEXO4 - CORRECÇÕES PARA GRANDES DESLOCAMENTOS.....</b>	<b>IV.1</b>
	<b>ANEXO5 - REGISTO DOS VALORES DOS ENSAIOS "END-NOTCHED FLEXURE" – ENF.....</b>	<b>V.1</b>
	<b>ANEXO6 - REGISTOS DOS VALORES OBTIDOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO.....</b>	<b>VI.1</b>



---

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO E OBJECTIVO**

---



# 1 Introdução e objectivo

## 1.1 Introdução

Um material compósito pode ser definido como a combinação de pelo menos dois materiais distintos, com uma interface comum [1.1]. Embora esta definição englobe uma ampla variedade de materiais, apenas se abrangem neste trabalho os compósitos de matriz polimérica, que representam a quase totalidade das aplicações comerciais. Estes materiais têm vindo a ser cada vez mais utilizados em diferentes mercados como o aeroespacial (actualmente com taxas de incorporação de componentes em material compósito muito elevadas [1.2]) ou o sector automóvel [1.3]. Entre os compósitos de matriz polimérica podem, ainda, distinguir-se os de matriz termoendurecível e os de matriz termoplástica.

A aplicação de matrizes termoplásticas nos compósitos de fibras longas contribui para uma melhoria muito significativa de algumas propriedades mecânicas destes materiais. Como principais vantagens podem referir-se, nomeadamente, o aumento da tenacidade, tolerância ao dano e durabilidade e ainda a possibilidade de reprocessamento, reciclagem e significativa redução do ciclo de fabrico. Outras vantagens incluem a eliminação das emissões de estireno para o ambiente, a implementação de ambientes de trabalho muito mais limpos e um importante alargamento da capacidade de resistência à corrosão. Ultimamente, tem-se também assistido ao desenvolvimento de novos polímeros termoplásticos de elevado desempenho [1.4] que apresentam um enorme potencial para aplicações mais exigentes.

Este relevante conjunto de benefícios permite perspectivar um crescimento muito mais intenso da aplicação deste tipo de matrizes do que o das matrizes termoendurecíveis [1.5]. A aplicação das matrizes termoplásticas comporta, no entanto, também alguns novos desafios tecnológicos e científicos que derivam, sobretudo, dos elevados níveis de temperatura e de pressão que o seu processamento exige. De facto, apresentando os termoplásticos uma viscosidade muito superior à dos termoendurecíveis, torna-se muito mais difícil e complexo impregnar reforços longos ou contínuos com eles. Por essa razão, o êxito da aplicação de compósitos de matriz termoplástica nos mercados comerciais ainda se encontra bastante dependente do desenvolvimento de novos processos de transformação e/ou da adaptação dos equipamentos actualmente usados para a produção de compósitos de matriz termoendurecível às exigências do seu processamento. Não sendo, por outro lado, bem conhecidos os fenómenos que ocorrem durante a transformação dos termoplásticos reforçados com fibras longas, torna-se ainda relevante

efectuar estudos mais profundos que permitam estabelecer os mecanismos de impregnação dos reforços e consolidação dos estratificados finais.

Este trabalho pretende estudar o dano por impacto de baixa velocidade por queda de peso em tubagens de material termoplástico reforçado com fibras.

Este tipo de dano, que pode ser provocado pelo simples cair de um utensílio de trabalho (como por exemplo um martelo, uma chave inglesa, etc.) na fase de instalação/funcionamento de uma conduta pode comprometer seriamente as propriedades mecânicas do compósito, podendo constituir um problema grave de manutenção. Em certas indústrias, onde os referidos custos de manutenção são muito elevados o conhecimento da resistência ao dano de impacto do componente é crítico [1.5]. Acresce ainda, o facto deste tipo de dano poder ser invisível à vista desarmada.

A partir dos conceitos então desenvolvidos, o presente estudo pretende efectivamente estender a aplicação dos termoplásticos reforçados com fibras longas aos grandes mercados comerciais correntes. Assim, optou-se por nele utilizar um reforço e uma matriz com custos compatíveis às exigências desses mercados. De facto, não sendo actualmente o preço das fibras de carbono ainda compatível com as restrições económicas da procura nas aplicações comerciais e industriais de grande volume, a selecção recaiu, naturalmente, sobre o desenvolvimento de compósitos à base de polipropileno reforçado com fibras de vidro. O pré-impregnado seleccionado para este estudo, o Twintex<sup>®</sup>, fabricado pela Vetrotex, pode adquirir-se facilmente no mercado, em bobinas de mechas de fibras. Neste pré-impregnado, as fibras do reforço (fibras de vidro E) estão misturadas com fibras do polímero termoplástico (polipropileno).

Com esse objectivo, e por se tratar de uma tecnologia de processamento em série especialmente apropriada para a transformação de materiais reforçados com fibras contínuas, utilizou-se um equipamento de enrolamento filamental de compósitos de matriz termoendurecível, que permitiu processar a baixo custo e em contínuo os filamentos de matriz termoplástica reforçada com fibras de vidro.

No sentido de otimizar o processo, produziram-se tubagens de matriz termoplástica em diferentes condições de fabrico. Variando as condições de fabrico dos tubos de matriz termoplástica, foi possível ajustar os parâmetros operacionais do equipamento de forma a aumentar a sua produtividade e a otimizar as propriedades mecânicas dos compósitos produzidos.

Esta tecnologia foi ainda utilizada para o fabrico de placas planas utilizadas para a obtenção de provetes para testes. Neste caso, utilizou-se um mandril plano montado convenientemente no referido equipamento de enrolamento filamental.

Para proceder à consolidação completa das placas previamente fabricadas por enrolamento filamentar, utilizou-se a tecnologia de compressão a quente.

Espera-se que, embora modesto, este trabalho seja um contributo efectivo para o estudo do dano de impacto em tubagens de matriz termoplástica reforçada com fibras.

## **1.2 Objectivo**

O objectivo deste trabalho é o estudo da tolerância ao dano de tubagens fabricadas em polipropileno reforçado com fibras de vidro por enrolamento filamentar. Como matéria-prima para o fabrico das referidas tubagens, utilizou-se um pré-impregnado comercial, com fibras de vidro e polipropileno (Twintex®).

Pretende-se estudar a transformação do pré-impregnado por enrolamento filamentar utilizando-se para isso um equipamento já adaptado para o processamento deste tipo de matéria-prima.

É ainda objectivo deste trabalho a transformação por compressão a quente do pré-impregnado, utilizando-se um molde já desenvolvido num estudo anteriormente realizado [1.6].

As tubagens fabricadas serão sujeitas a ensaios de impacto por queda de peso, pretendendo-se determinar os parâmetros mais relevantes destes ensaios.

Finalmente, pretende-se determinar o valor da taxa crítica de libertação de energia em modo II ( $G_{IIc}$ ) do material e correlacionar esta constante com os parâmetros relevantes do ensaio de impacto por queda de peso.

### 1.3 Referências bibliográficas

- [1.1] M. F. S. F. Moura, A. B. Morais, A. G. Magalhães. Materiais Compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico. Publindústria (2005).
- [1.2] The Research Requirements of the Transport Sectors to Facilitate an Increased Usage of Composite Materials. Part I. The Composite Materials Research Requirements of the Aerospace Industry EADS Deutschland GmbH (2004).
- [1.3] The Research Requirements of the Transport Sectors to Facilitate an Increased Usage of Composite Materials. Part I. The Composite Materials Research Requirements of the Automotive Industry, Centro Ricerche Fiat (2004).
- [1.4] PARMAX, Catálogo do Produto. Mississippi Polymer Technologies. Inc. 13233 Webre road, Bay Saint Louis, MS 39520-9078 (2005).
- [1.5] Thermoplastic Composites in Europe to 2025. Foresight Study into Future Research Needs. Thermoplastic Composites Infrastructure Cooperation Network – Coronet. Output from Task 3.2: Foresight Activity. Final Version After Validation.
- [1.6] J. F. Silva. Pré-Impregnados de Matriz Termoplástica: Fabrico e Transformação por Compressão a Quente e Enrolamento Filamentar. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Tese de Doutoramento (2005).

---

## **CAPÍTULO 2**

### **ESTADO DA ARTE**

---



## 2 Estado da arte

### 2.1 Compósitos de matriz polimérica

Os compósitos são materiais bastante diferentes dos materiais homogêneos tradicionais, reservando-se este termo para os materiais constituídos por pelo menos duas fases distintas. Dado o interesse destes materiais em aplicações estruturais, a designação materiais compósitos restringe-se aos materiais que contenham um reforço (sob a forma de fibras, que podem ser contínuas ou curtas, alinhadas ou aleatórias, etc.) suportado por um material aglomerante (o qual constitui a matriz, normalmente polimérica, podendo ser termoplástica ou termoendurecível) [2.1]. Nos materiais compósitos as fibras suportam os esforços, enquanto que a matriz tem como principais funções a transmissão de esforços para as fibras, o conferir à estrutura uma forma estável, bem como servir de protecção ao reforço.

Os materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras, também conhecidos por plásticos reforçados com fibras (PRF), têm emergido nos últimos anos como materiais atractivos para a engenharia, nomeadamente para a construção de novas estruturas e para a reabilitação das já existentes, saindo assim dos nichos de mercado iniciais que se circunscreviam às indústrias aeronáutica e dos transportes.

A leveza e as elevadas características mecânicas que caracterizam os PRF, associadas à sua resistência à corrosão, através de uma combinação de fibras de reforço e de matrizes poliméricas, tornam estes materiais adequados a diversas aplicações permitindo soluções construtivas inovadoras muitas vezes impossíveis de conceber com os materiais de construção tradicionais [2.2].

Apesar dos progressos conseguidos, subsistem alguns obstáculos à generalização das aplicações estruturais de compósitos, associados aos elevados custos de algumas matérias-primas primas (como por exemplo as fibras de carbono) e à complexidade do comportamento mecânico. Na realidade, devido a lacunas no conhecimento dos mecanismos de dano e de ruína, há um enorme potencial de optimização de estruturas compósitas. Um dos modos de dano mais perigoso dos laminados compósitos de alto desempenho é a delaminação. Após inúmeros estudos publicados, estão disponíveis normas que permitem caracterizar a resistência à delaminação de compósitos unidireccionais. Porém, na grande maioria das aplicações estruturais usam-se laminados multidireccionais e as delaminações tendem a formar-se entre camadas de diferentes orientações [2.3].

O objectivo principal deste trabalho foi, por isso, caracterizar a tolerância ao dano provocado por impacto de baixa velocidade de tubagens produzidas por enrolamento filamental em termoplástico (polipropileno) reforçado com fibras de vidro.

Atendendo à importância prática das solicitações e dos materiais, foram realizados ensaios de modo II “end-notched flexure” (ENF) em provetes das tubagens com a mesma matriz termoplástica e reforços por forma a determinar-se para este material compósito a taxa crítica de libertação de energia em modo II ( $G_{IIc}$ ). Por fim, tenta-se correlacionar alguns parâmetros do impacto com o valor de  $G_{IIc}$  obtido experimentalmente.

### **2.1.1 Compósitos de matriz termoendurecível**

As resinas mais utilizadas no fabrico de compósitos para aplicações não-estruturais e semi-estruturais são os poliésteres insaturados, as resinas de vinilester e as resinas fenólicas. Em compósitos avançados de alta resistência, os epóxidos, as bismaleimidias e as poliimidias termoendurecíveis são as mais comuns [2.4].

As matrizes (resinas) mais utilizadas no processamento por enrolamento filamental são baseadas em sistemas à base de epóxido, poliéster ou vinilester [2.5].

Todas as resinas mencionadas, são classificadas como resinas termoendurecíveis, pois uma vez polimerizadas não se podem reprocessar. Uma vez aquecidas, assumem uma forma permanente e o aumento da temperatura, se suficiente, apenas acarreta uma degradação da resina.

Uma das principais vantagens das resinas termoendurecíveis é a maior facilidade de impregnação do reforço, dado que, antes da cura, apresentam viscosidades bastante inferiores às dos termoplásticos [2.4].

### **2.1.2 Compósitos de matriz termoplástica**

Os compósitos poliméricos termoplásticos (CPT) são constituídos por uma matriz polimérica termoplástica e por elementos de reforço.

As matrizes termoplásticas salientam-se por apresentarem maior resistência ao impacto, maior tenacidade e bastante menor higroscopicidade quando comparadas com os polímeros termoendurecíveis. São facilmente processados por injeção, extrusão ou por termoformação e podem ser recicladas, o que constitui um ponto muito importante nos dias de hoje. A expansão dos compósitos de matriz termoplástica sempre foi condicionada pela maior dificuldade em impregnar completamente os reforços [2.4].

A selecção entre as várias opções de materiais, tanto da matriz como do reforço, é condicionada por inúmeros factores, tais como, desempenho, custo, condições de processamento e disponibilidade. A produção comercial de grânulos reforçados que ocorreu a partir da década de 60 facilitou o rápido crescimento dos compósitos de matriz termoplástica, estimando-se que representem actualmente cerca de 35% do mercado mundial de materiais compósitos [2.4].

### 2.1.2.1 Matrizes

Podemos dividir os compósitos de matriz termoplástica em duas categorias distintas: os compósitos de fibras curtas, produzidos a partir de grânulos contendo fibras de comprimentos inferior a 6,4 mm, e os compósitos de fibras longas, que se destacam por apresentarem propriedades mecânicas superiores [2.4].

As propriedades da matriz adoptada vão influenciar em larga escala as características do compósito, como por exemplo, a transferência de tensões aplicadas ao compósito para o reforço, a resistência a agentes químicos e a protecção da superfície das fibras de reforço.

Para aplicações não estruturais e semi-estruturais, os polímeros que podemos encontrar mais frequentemente como matriz são os polipropilenos, as poliamidas e os policarbonatos. Nos compósitos avançados de alta resistência usam-se sobretudo o PEEK (poli-éter-éter-cetona), poliimidas e o PPS (polisulfureto de fenileno) [2.4]:

- Polipropileno (PP): é polímero do grupo das poliolefinas, produzido pela primeira vez em 1957. Trata-se de um termoplástico branco com cristalinidade entre 60 e 70%. Apresenta boa resistência ao impacto e rigidez, resistência à distorção e possui excelente resistência ao ataque químico mesmo a elevadas temperaturas. A temperatura típica de processamento ronda os 200 °C, o que o torna um dos mais acessíveis ao processamento por técnicas tradicionais.
- Poliamida (PA): As poliamidas, vulgarmente designadas por Nylon<sup>®</sup>, são fortemente higroscópicas, apresentam baixos coeficientes de atrito, grande resistência ao desgaste e boa resistência térmica. Como a sua viscosidade é menor que a dos plásticos comuns, existe a necessidade de tomar precauções especiais no seu processamento.
- Policarbonato (PC): é um termoplástico incolor, dimensionalmente estável, durável, com boa resistência térmica, química e à exposição aos agentes ambientais. Salienta-se ainda o facto de se tratar de um polímero retardador de chama e pouco higroscópico. A sua resistência ao impacto é elevada, considerando-se mesmo a mais elevada de entre os diversos termoplásticos. É bastante utilizado na indústria automóvel, sob a forma de

compósitos de fibras longas. Não é recomendável o seu uso em contínuo a temperaturas superiores a 80 °C. A temperatura típica de processamento é de 200 °C.

- Poli-éter-éter-cetona (PEEK): é um polímero semicristalino, com grau de cristalinidade máximo de 48%, utilizado frequentemente em compósitos para a indústria aeronáutica. Pode ser usado em contínuo a temperaturas até 250 °C. Tem grande tenacidade e absorve pouca água. O seu processamento é difícil devido à sua cristalinidade ser variável e o seu custo é elevado. Para garantir boa impregnação dos reforços são necessárias temperaturas e pressões elevadas.
- Poliimidas termoplásticas: boa resistência a altas temperaturas, que lhes permitem funcionar em contínuo até aos 260 °C. As polietermidas (PEI) e as poliamidas-imidas (PAI) são dois exemplos de poliimidas termoplásticas. A temperatura de processamento é próxima dos 350 °C. Apresentam elevada resistência mecânica e rigidez a altas temperaturas, estabilidade dimensional e boas propriedades eléctricas. São também retardadoras de chama e resistem bem a agentes químicos como hidrocarbonetos e solventes halogenados. Em alguns casos, a sua elevada resistência à fluência permite substituir metais e outros materiais em muitas aplicações estruturais.
- Polissulfureto de fenileno (PPS): é um polímero semicristalino, com grau de cristalinidade máximo de 65%, que apresenta elevada resistência mecânica, excelente resistência química e pode ser usado em contínuo a temperaturas até 225 °C [2.4].

A tabela 2.1 apresenta algumas propriedades das matrizes termoplásticas acima referidas.

**Tabela 2.1.** Propriedades físicas e mecânicas dos polímeros termoplásticos [2.4, 2.6, 2.7].

Polímeros	PP	PA	PC	PEEK	PPS
Temperatura de fusão (°C)	165	265	-	334	290
Temperatura de transição vítrea (°C)	-10	50	150	150	88
Densidade específica	0,91	1,13-1,15	1,20	1,30	1,35
Absorção de água, 24 h (%)	0,01	0,02	0,35	0,06-0,12	0,01-0,07
Resistência à tracção (MPa)	33	70	>70	103	86
Módulo de elasticidade em tracção (MPa)	1400	2900	2400	3600	3300
Resistência à flexão (MPa)	37	100	100	110	145
Módulo de elasticidade em flexão (MPa)	1100	3000	2500	3900	4100

### 2.1.2.2 Reforços

Os materiais de reforço conferem ao compósito excelentes propriedades mecânicas. Existe uma sinergia entre as propriedades da matriz e as do reforço que resulta, no material

compósito final, em propriedades que não existiam nos materiais originais. Os materiais de reforço podem apresentar-se sob diferentes formas: bobinas de fibras contínuas (rovings), mantas, tecidos 2D e 3D, malhas, entrançados, pré-formas etc. Os reforços mais utilizados são: as fibras de vidro (A, C, D, E, R e S), as fibras de carbono, as fibras aramídicas e as fibras de boro. A tabela 2.2 resume algumas propriedades relevantes dos reforços referidos.

**Tabela 2.2.** Propriedades genéricas dos diferentes reforços [2.4].

	Reforço	Densidade g/cm <sup>3</sup>	Módulo à tracção GPa	Resistência à tracção GPa	Deformação na rotura %	Coefficiente expansão térmica 10 <sup>-6</sup> /°C
Vidro	E	2,56	73,0	3,4	4,4	5,0
	S	2,49	85,5	4,6	5,3	2,9
	R	2,55	86,0	4,4	5,2	4,0
Carbono	PAN	1,8	200 a 400	2,5 a 5,6	0,6 a 1,2	-0,7 a -0,5
	Pitch	2,0	300 a 700	1,9 a 2,2	1 a 1,5	-1,6 a -0,9
	Rayon fibers	1,7	415 a 680	2,1 a 2,8	0,5 a 0,6	-
Aramida	Kevlar <sup>®</sup> 29	1,44	60	3,0	3,6	-2,0
	Kevlar <sup>®</sup> 49	1,45	129	3,0	1,9	-2,0
	Twaron <sup>®</sup>	1,44	60	2,6	3,0	-
Boro	100 µm	2,61	400	3,5	0,7 a 0,9	4,9
	140 µm	2,47	400	3,5	0,7 a 0,9	4,9
	200 µm	2,39	400	3,5	0,7 a 0,9	4,9

Como se pode constatar pela observação da tabela 2.2., a fibra de vidro possui uma elevada resistência à tracção e um módulo de elasticidade razoável. Este reforço pode adquirir-se facilmente no mercado, a preços bastante inferiores ao dos outros reforços, o que o torna no reforço de eleição para aplicações de mercados de grande consumo. Algumas vantagens das fibras de vidro relativamente aos outros materiais de engenharia são apresentadas de seguida:

- resistência mecânica: resistência específica (resistência à tracção/densidade) superior à do aço;
- condutibilidade eléctrica: baixa (excelente isolante eléctrico mesmo em espessuras reduzidas);
- combustibilidade: incombustível (não propaga a chama nem origina fumos com o calor);

- estabilidade dimensional: baixo coeficiente de dilatação térmica (pouco sensível às variações de temperatura e humidade);
- compatibilidade com matérias orgânicas: apta a receber diferentes ensimagens, o que permite associar diferentes resinas sintéticas e mesmo matrizes minerais (cimento);
- condutibilidade térmica: baixa (para aplicações que requeiram reduzidas perdas térmicas);
- permeabilidade dieléctrica: óptima (radares, etc.);
- resistência a agentes químicos: elevada quando em conjunto com resinas apropriadas.

O material de reforço utilizado em aplicações estruturais de interesse nas indústrias espacial e aeronáutica é, por excelência, as fibras de carbono, geralmente na forma de filamentos contínuos [2.6].

Existem dois tipos de fibras agrupáveis no termo mais lato de “fibras de carbono”: as fibras de carbono propriamente ditas, com percentagens de carbono entre 80 e 95%, e as fibras de grafite onde a percentagem de carbono chega aos 99% [2.8].

As fibras de carbono são classificadas com base na sua resistência mecânica e comercializadas segundo as seguintes designações:

- UHM (ultra high modulus) para fibras com módulos superiores a 500 GPa;
- HM (high modulus) para fibras com módulos superiores a 300 GPa e rácio resistência mecânica/módulo em tracção inferior a 1%;
- IM (intermediate modulus) para fibras com módulos até 300 GPa e rácio resistência mecânica/módulo de cerca de 1%;
- HS (high strength) para fibras com resistência à tracção superior a 3 GPa e rácio resistência/rigidez entre 0,015 e 0,02 [2.4].

As fibras de carbono apresentam uma particularidade importante: no sentido longitudinal têm um coeficiente de dilatação negativo ou quase nulo. Associadas a materiais com coeficiente de dilatação positivo podem dar origem ao aparecimento de tensões prejudiciais na interface. Pelo contrário, conseguindo uma conjugação criteriosa entre a fibra e a matriz, conseguem-se fabricar materiais compósitos com coeficiente de dilatação nulo, o que é útil para aplicações no domínio da metrologia, da óptica e aeroespacial [2.4].

Quando é necessária elevada rigidez, materiais de reforço como o carbono ou as fibras aramídicas serão de considerar.

Quando o peso da estrutura fabricada for um factor importante, serão também estes dois últimos tipos de reforços referidos aqueles onde a densidade será menor.

Actualmente existem dois tipos de fibras aramídicas:

- As fibras “standard”, tipo Kevlar<sup>®</sup>29, Twaron<sup>®</sup> ou HM 50<sup>®</sup>, com aplicações correntes em cabos, materiais diversos de baixo coeficiente de atrito e objectos de protecção pessoal;
- As fibras de elevado módulo, tipo Kevlar<sup>®</sup>49 da Dupont ou Twaron e HM<sup>®</sup> da Enke, com inúmeras aplicações em cascos de barcos, estruturas de aviões, capacetes, coletes de protecção balística e automóveis de competição [2.4].

As fibras aramídicas apresentam excelente resistência química, mecânica, óptima relação rigidez-peso, boa resistência ao impacto e à fadiga, boa capacidade de amortecimento de vibrações, boas características dieléctricas, elevada resistência a solventes orgânicos, combustíveis e lubrificantes. O seu coeficiente de dilatação tem um comportamento idêntico ao das fibras de carbono, com as consequências que então se referiu [2.4].

As principais desvantagens são: a baixa resistência à compressão e à flexão, bem como elevada sensibilidade ao corte interlaminar. Esta desvantagem é normalmente atribuída à fraca ligação interfacial entre a matriz e as fibras, pelo que se desenvolveram diferentes tratamentos superficiais das fibras aramídicas para melhorar a ligação interfacial e a resistência à delaminação [2.4].

As fibras de boro, apresentam um módulo de elasticidade cinco vezes superior ao da fibra de vidro mas são ligeiramente mais pesadas do que estas. Utilizam-se na forma de fitas pré-impregnadas numa resina de epóxico, fenólica ou poliimida. Pelo seu elevado custo, os compósitos com fibras de boro aplicam-se sobretudo na indústria aeronáutica. As fibras de boro também podem ser integradas no seio de matrizes metálicas para produzir materiais de utilização a temperaturas muito elevadas. Contudo, o boro tem o inconveniente de reagir com a matriz metálica, destruindo-se. Esta situação é ultrapassada através de uma deposição final de carboneto de boro ou de carboneto de silício, que actua como barreira ao mecanismo de difusão [2.4].

## **2.2 Processamento de materiais compósitos**

### **2.2.1 Introdução**

A designação processamento refere-se aqui ao conjunto de técnicas que conduzem à obtenção ou modificação de peças em materiais compósitos de matriz polimérica.

Existe uma grande variedade de processos de fabrico de estruturas em material compósito, tais como, a moldação por contacto (moldação manual, moldação por projecção), a moldação por vácuo, a moldação por compressão (a frio e a quente), a injeção de fibras curtas, a moldação por injeção a baixa pressão e por transferência (RTM, SRIM, RRIM), a moldação em autoclave, o enrolamento filamentar, a pultrusão, a moldação por centrifugação e a moldação em contínuo (também designada laminagem contínua).

Os diferentes processos de fabrico, se criteriosamente seleccionados, podem permitir uma redução significativa do número de peças a integrar um conjunto, reduzindo os custos de mão-de-obra na montagem. Com o desenvolvimento tecnológico dos últimos anos, a acentuação do grau de automatização tem vindo a tornar os processos de fabrico economicamente mais competitivos.

Os processos de fabrico podem ser classificados em dois tipos: processos em molde aberto ou processos em molde fechado:

- Molde aberto: neste processo apenas uma das superfícies tem bom acabamento. É ideal para produzir componentes de grandes dimensões e de geometria complexa onde a pressão exercida é reduzida ou nula;
- Molde fechado: os componentes produzidos por este processo têm excelente acabamento nas duas superfícies e óptima reprodutibilidade. A emissão de produtos nocivos à saúde presente na maior parte dos processos que envolvem as resinas de poliéster é menor neste processo.

A qualidade e o desempenho dos compósitos é, em grande medida, determinada pelo conteúdo de vazios, que são formados durante o seu processamento. Os vazios podem ser minimizados utilizando parâmetros de processamento adequados, nomeadamente, pressão, temperatura e tempo.

## **2.2.2 Processamento de compósitos de matriz termoplástica**

Os processos mais utilizados na transformação de compósitos de matriz polimérica termoplástica são, a moldação por compressão a quente, a moldação por injeção, o enrolamento filamentar e a pultrusão.

### **2.2.2.1 Moldação por compressão a quente**

A moldação por compressão a quente permite a obtenção de peças aplicadas nas carroçarias de automóveis, outros componentes estruturais para a indústria automóvel, equipamentos eléctricos e electrónicos, peças para a indústria da construção, mobiliário urbano, etc.

Consiste na utilização de moldes metálicos aquecidos (entre 80 °C e 170 °C) e na utilização de pressões entre 0,5 a 15 MPa. O ciclo de produção depende da temperatura, complexidade e peso da peça moldada, podendo ser muito rápido, da ordem dos 30 segundos, ou de 2 a 4 minutos, como é mais comum. As cadências de produção, maiores do que na compressão a frio, podem situar-se em valores entre 15 e 30 peças por hora.

As peças obtidas incorporam elevadas quantidades de reforço, o que permite a obtenção de boas propriedades mecânicas [2.4].

#### **2.2.2.2 Moldação por injeção**

A moldação por injeção é um processo muito utilizado para a produção de grandes séries de peças. Podem utilizar-se quase todos os termoplásticos e podem ser adicionadas fibras curtas para melhorar as propriedades mecânicas das peças obtidas. As máquinas de injeção modernas, controladas por microprocessadores e dotadas de vários sensores, permitem a obtenção de peças de alta qualidade face à capacidade de monitorização e correcção em tempo real, se necessário, de alguns parâmetros essenciais, como por exemplo, a dosagem conveniente da matéria-prima, a temperatura de injeção, a pressão de injeção, a velocidade de rotação do parafuso, etc.

Um ciclo de injeção comporta várias fases. O ciclo inicia-se com o fecho do molde. Segue-se a injeção propriamente dita, a pressurização, a plasticização, o arrefecimento, a abertura do molde, a extracção da peça e uma pausa para execução de algumas operações manuais antes de iniciar um novo ciclo.

No caso da injeção de poliamidas, polipropilenos e policarbonatos, onde é necessário de suportar elevadas pressões de injeção, os moldes são normalmente em aço. A cadência de produção são muito elevadas podendo atingir 20 a 100 peças/hora. Os parâmetros que controlam essa cadência são a temperatura de aquecimento da matéria-prima (200 °C a 350 °C), a temperatura do molde (20 °C a 120 °C) e a pressão de injeção, que pode ir de 300 a 1500 bar. Além disso, os moldes são normalmente dotados de canais de arrefecimento com circulação de água.

Uma das maiores vantagens da moldação por injeção de termoplásticos consiste na produção de peças de geometria bastante complexa numa única operação. Reduz-se assim, consideravelmente, o número de pequenas peças que seriam necessárias para a produção de um determinado componente. Podemos ainda citar a leveza conseguida nas peças, a estabilidade dimensional e algumas propriedades como a rigidez, a resistência à tracção e à flexão.

Os inconvenientes principais são a possibilidade de ocorrência de anisotropia material, resultante da forma como a matéria-prima flui no interior do molde, bem como os elevados investimentos nas máquinas de injeção e nos moldes [2.4].

### **2.2.2.3 Enrolamento filamentar**

O enrolamento filamentar: é um processo que consiste em depositar sobre um mandril em rotação fibra contínuas, desenroladas de bobinas (rovings) previamente impregnadas com resina.

As resinas com utilização mais habitual são as resinas termoendurecíveis, embora também se possam utilizar as resinas termoplásticas. Habitualmente utilizam-se combinações reforço-matriz à base de carbono/PEEK, carbono/PA ou carbono/PPS. O enrolamento filamentar com matrizes termoplásticas não tem emissões de estireno, potencialmente prejudiciais para a saúde.

Normalmente, utilizam-se fitas ou bobinas pré-impregnadas que se enrolam sob um mandril ao qual se aplica calor (e eventualmente pressão) para promover a fusão e consolidação do termoplástico nas fibras de reforço.

As principais vantagens deste método são: a sua relativa simplicidade; o elevado grau de automatização; a possibilidade de obtenção de peças com um volume de fibras elevado e com boas características mecânicas; a possibilidade de orientação do reforço segundo as solicitações principais e de produção de peças de grandes dimensões.

As desvantagens mais importantes são: as limitações na forma de peças, sobretudo no que toca a concavidades; a necessidade eventual de maquinagem ou acabamentos posteriores, a necessidade da presença permanente de um operador qualificado para fazer a mudança de bobines ou verificar deslizamentos de fibras e, a dificuldade na obtenção de ângulos baixos ( $<15^\circ$ ) na orientação das fibras relativamente ao eixo de rotação do mandril [2.4].

### **2.2.2.4 Pultrusão**

A pultrusão é um processo contínuo através do qual se podem produzir perfis de secção constante,ocos ou maciços, de diferentes formas.

Os reforços são dispostos de modo a proporcionarem um reforço longitudinal, sendo as fibras de reforço utilizadas na forma de bobinas, mantas e tecidos.

No caso de se utilizarem resinas termoendurecíveis, os reforços são mergulhados num recipiente com a resina no estado líquido – normalmente resina de poliéster – dando-se a impregnação, e, em seguida, as fibras molhadas com a resina passam por uma fieira de aço pré-aquecida. Esta, também designada por molde, confere a forma do perfil e polimeriza a resina. O perfil pultrudido é puxado pelo módulo de arrasto e, no final do processo, um sistema de corte deixa o perfil no comprimento desejado.

A velocidade típica da pultrusão é de 0,5 a 2 metros por minuto, dependendo da resina, espessura e complexidade do perfil.

No caso de se utilizarem matrizes termoplásticas, as fibras pré-impregnadas com a matriz termoplástica entram directamente na fieira aquecida e, normalmente, numa outra com um sistema de arrefecimento.

As principais vantagens da pultrusão são: a produção contínua e totalmente automática, e portanto com pouca incorporação de mão-de-obra no produto final, as excelentes características mecânicas na direcção longitudinal dos perfis, em virtude das elevadas percentagens de fibras (30 a 70%) em peso, e, a variedade de secções que se podem obter.

Como principais desvantagens citam-se: a limitação ao fabrico de componentes com secção constante, o facto de não ser possível produzir peças com grande rigor dimensional e o reforço estar limitado à direcção longitudinal sendo necessário recorrer a tecidos para melhorar as propriedades transversais. No caso de serem usadas resinas termoplásticas (que possuem maior viscosidade) são necessárias maiores forças de arrasto e o processo torna-se mais complicado de controlar [2.4].

## **2.3 Tubagens**

### **2.3.1 Introdução**

No domínio dos materiais tem havido nos últimos anos uma evolução do conhecimento muito acentuada, permitindo, por um lado, estabelecer novas aplicações, e, por outro, desenvolver materiais com melhores propriedades.

A aplicação dos materiais plásticos em tubagens tem vindo a aumentar gradualmente, reflectindo a confiança que estes materiais têm conquistado nos últimos anos.

As tubagens em material plástico apresentam importantes vantagens relativamente às tubagens tradicionais em aço ou ferro fundido, nomeadamente, leveza, resistência química, flexibilidade, durabilidade, entre outras.

Existem diversos tipos de plásticos que são utilizados no fabrico de tubagens, sendo os mais comuns, o policloreto de vinilo (PVC), o polietileno (PE) e o polipropileno (PP). O processo de fabrico de tubagens com estes materiais é, normalmente, a extrusão. Existem também no mercado, sobretudo para aplicações estruturais, tubagens em plástico reforçado com fibras.

## **2.3.2 Materiais utilizados em tubagens**

### **2.3.2.1 Acrilonitrilo butadieno e estireno (ABS)**

O ABS é um material termoplástico que permite fabricar tubagens rígidas com boa resistência ao impacto. É frequentemente utilizado como matéria-prima no fabrico de tubagens para sistemas de canalização.

### **2.3.2.2 Polibutileno (PB)**

O PB é um polímero (butileno) fabricado a partir de derivados de combustíveis fósseis (petróleo, gás e carvão), que apresenta flexibilidade com elevada resistência a temperaturas elevadas. As tubagens em PB são utilizadas em instalações de água quente e fria.

### **2.3.2.3 Polietileno (PE)**

As tubagens de PE podem ser de diferentes densidades e utilizadas numa ampla gama de aplicações, nomeadamente, em redes de transporte de água, redes de distribuição de gás natural e em redes de esgotos.

Existem tubagens em polietileno reticulado, designadas por PEX, que apresentam elevada resistência a fluidos agressivos, elevada resistência à corrosão externa e a baixa condutibilidade térmica. Estas tubagens são, normalmente, aplicadas em sistemas de aquecimento e em redes sanitárias de água quente e fria.

### **2.3.2.4 Polipropileno (PP)**

As tubagens de PP são utilizadas em instalações domésticas de água quente e fria, em sistemas de aquecimento, em redes de esgotos, em sistemas de drenagem de solos e no transporte de efluentes industriais.

### **2.3.2.5 Policloreto de vinilo (PVC)**

As tubagens de PVC podem ser utilizadas em redes de esgotos, redes de distribuição de água, redes de distribuição de gás (como mangas) e em diversas instalações industriais.

As tubagens de PVC apresentam boa resistência aos ácidos e às bases, bem como aos óleos, álcoois e hidrocarbonetos. No entanto, são sensíveis aos hidrocarbonetos aromáticos e clorados, aos ésteres e cetonas.

### **2.3.2.6 Plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV)**

As PRFV, normalmente fabricadas por enrolamento filamental ou centrifugação, são uma alternativa às tubagens metálicas, nomeadamente, em aplicações cujos requisitos são a resistência à corrosão, o peso, a facilidade de instalação e manutenção. Este tipo de tubagens é cada vez mais utilizado em aplicações de engenharia, especialmente, nas indústrias químicas e petroquímicas.

A aplicação deste sistema compósito em tubagens e reservatórios sob pressão tem sido limitado a sistemas de baixa pressão, quando não é utilizado um “liner” interior. Esta limitação deve-se, essencialmente, ao desconhecimento das propriedades mecânicas a longo prazo deste tipo de materiais, especialmente quando são aplicados em ambientes húmidos [2.9].

O fabrico de tubagem em PRFV do ponto de vista industrial está normalizado (por exemplo ASTM 2996) e pode ser conseguido por diferentes processos de fabrico, tais como:

- fabrico por moldação manual: indicado quando a resistência à corrosão é significativamente mais importante que ter um alto desempenho mecânico;
- fabrico por enrolamento filamental (adoptado neste estudo): permite a obtenção de laminados com elevadas propriedades mecânicas. Permite também o uso de espessuras muito mais reduzidas do que aquelas que seriam necessárias se o método de fabrico fosse a moldação manual;
- moldação por centrifugação: as espessuras necessárias para a obtenção das mesmas propriedades mecânicas das tubagens produzidas por enrolamento filamental são superiores. É corrente a utilização de cargas inorgânicas tais como o carbonato de cálcio e o silício [2.8].

A justificação, para equipar uma instalação com tubagem em PRFV relativamente a tubagem de outros materiais convencionais competitivos, prende-se com critérios

económicos de minimização do custo total de instalação. Este custo deve ter em consideração a duração útil da instalação e a respectiva manutenção.

As tubagens em compósito têm normalmente as seguintes vantagens em relação aos materiais tradicionais [2.10]:

- coloração das resinas: fácil (permite identificação dos diferentes tramos de uma instalação);
- peso específico: 1,7 a 2,0 gr/cm<sup>3</sup> (corresponde a cerca de 25% da densidade do aço o que permite a produção de troços de grandes comprimentos);
- redução do número de ligações: devido ao facto de se produzir troços com grandes comprimentos, reduz-se o número de ligações/soldaduras, reduzindo o número de fugas;
- maior facilidade de manuseamento, instalação e soldadura;
- rugosidade: baixa;
- corrosão química: baixa (não necessitam de manutenção);
- condutividade eléctrica: baixa;
- condutibilidade térmica: baixa;
- material translúcido;
- flexibilidade: elevada (pouco sensível às sobrepressões por golpe de aríete);
- resistência específica: superior à do aço (devido às elevadas propriedades mecânicas do material de reforço, fibra de vidro, e da baixa densidade do compósito);
- optimização das propriedades mecânicas através da orientação do material de reforço segundo a direcção dos maiores esforços.

## **2.4 Dano**

### **2.4.1 Introdução**

Num projecto com materiais compósitos, no qual se pretenda otimizar o seu desempenho, é necessário um conhecimento profundo das suas propriedades a curto e longo prazo, da resistência à fadiga e resistência ao dano dos mesmos.

No que se refere a esta última propriedade, sabe-se que a queda de uma ferramenta pode significar a completa ruína de uma estrutura fabricada em material compósito. Por tal facto, e por o mecanismo de dano ser ainda mal compreendido, os estudos actuais nesta área recebem ampla justificação.

Os danos causados por delaminação interlaminar, ou descolamento entre camadas, em compósitos laminados, reduzem significativamente a sua resistência e/ou a sua rigidez.

Torna-se, assim, crucial a detecção de tais danos, muitas vezes invisíveis à inspecção. Vários métodos de detecção deste tipo de dano têm sido propostos, incluindo a detecção por ultra sons, entre outros [2.11].

Em 2001 foi desenvolvido um método para detecção e localização de danos, provocados por delaminação, não visíveis à superfície. Este método aplica-se em tubagens e placas em CFRP [2.12].

## **2.4.2 Resistência à fadiga**

A fadiga é um tipo de solicitação que consiste na aplicação de cargas cíclicas abaixo do limite elástico dos materiais, e que provoca a propagação de defeitos susceptíveis de conduzir à rotura [2.13-2.15].

Nos materiais homogêneos e isotrópicos a rotura por fadiga é ditada pela iniciação e propagação de uma fenda, ao passo que nos materiais compósitos ocorre uma acumulação generalizada de dano de natureza diversa: fissuração transversal e longitudinal, descoesão fibra-matriz, delaminagem e rotura de fibras.

A caracterização do comportamento à fadiga de materiais compósitos faz-se, geralmente, através de ensaios do tipo tracção-tracção uniaxial, uma vez que os ensaios tracção-compressão ou compressão-compressão apresentam problemas de encurvadura nos laminados finos. É, por isso, comum recorrer-se a ensaios de fadiga em flexão para se obter solicitações do tipo tracção-compressão com tensão média nula. O comportamento à fadiga de um material é caracterizado pela curva S-N que representa a tensão máxima em função do número de ciclos de vida. [2.4].

## **2.4.3 Resistência ao impacto**

### **2.4.3.1 Introdução**

As vantagens que os compósitos de alto desempenho possuem relativamente aos metais, em aplicações que requerem alta resistência, elevada rigidez e baixo peso, tendem a esbater-se quando o impacto é um dos parâmetros de concepção a considerar. De facto, estes materiais podem apresentar uma fraca resistência a este tipo de solicitações, o que se traduz numa importante redução da sua resistência residual à compressão.

As solicitações de impacto podem dividir-se em duas categorias consoante o valor da velocidade [2.16-2.18]:

- impacto a baixa velocidade;
- impacto a alta velocidade.

Estes dois fenómenos são completamente diferentes em termos de comportamento do material e do dano que provocam [2.4], podendo existir ou não perfuração.

### **2.4.3.2 Impacto a baixa velocidade**

O impacto a baixa velocidade é, sem dúvida, a solicitação mais perigosa. As extensas zonas danificadas introduzidas pelo impacto e o tipo de dano que provoca (caracterizado por delaminagens entre camadas com diferentes orientações e por fissuração transversal), podem afectar de forma drástica a resistência residual da estrutura, principalmente quando esta é submetida a solicitações de compressão.

Também pelo facto de o dano poder não ser visível a olho nú, pode não ser possível observar a indentação ou fissuração superficial, sendo necessário recorrer a técnicas de análise relativamente sofisticadas, tais como os ultra sons e as radiografias, para detectar este dano.

A simples queda de uma ferramenta durante o fabrico ou manutenção de estruturas laminadas em material compósito, o manuseamento descuidado destas, a queda de granizo, o impacto de aves nas aeronaves, etc., são algumas das situações típicas que poderão conduzir ao aparecimento do dano de delaminação [2.4].

#### **2.4.3.2.1 Ensaio de impacto a baixa velocidade**

Com o objectivo de simular o impacto de objectos estranhos, foram desenvolvidos vários métodos de ensaio, que se podem agrupar em dois tipos: dispositivos pendulares e dispositivos de queda de peso.

##### **Dispositivo pendular**

Inclui os ensaios Charpy e Izod concebidos para os metais. O objectivo destes ensaios é obter a energia necessária para a rotura de um provete com geometria específica. Todavia, o facto de o ensaio ser destrutivo e de a geometria do provete não retratar o tipo de estruturas geralmente utilizadas, originou o recurso a soluções alternativas, embora seja

ainda usado para comparação de comportamento de diferentes materiais [2.4]. Sjöblom et al. [2.16] desenvolveram um dispositivo pendular adequado para muito baixas velocidades de sollicitação.

Moura [2.19] usou um dispositivo de viga que apresenta a vantagem de a energia disponível no momento do impacto resultar da soma da energia gravítica e da energia de deformação elástica da viga. Esta é facilmente variável, bastando para tal alterar o comprimento da viga em balanço. Este e outros dispositivos apresentam algumas restrições na sua utilização, tornando o dispositivo de impacto por queda de peso como o mais universal.

#### Dispositivo de queda de peso

Consiste na queda de uma massa bem conhecida a partir de uma altura predefinida, que sollicita o provete colocado num plano horizontal.

De um modo geral, este tipo de ensaio não provoca a destruição do provete, o que origina o ressalto do impactor. Como consequência, existe a necessidade de munir o equipamento com um sistema anti-ressalto que impeça o impactor de sollicitar o provete mais de uma vez. A velocidade do impactor, geralmente hemisférico, é medida através dos sensores ópticos colocados imediatamente acima do provete.

A instrumentação do impactor permite o registo da curva força-tempo e, por integração, podem obter-se as curvas velocidade-tempo, deslocamento-tempo e energia-tempo.

A energia cinética do impactor no momento do impacto é também um parâmetro a ser considerado embora, por si só, não seja determinante. Na realidade, uma determinada energia cinética pode ser obtida por duas vias distintas: um elevado valor da massa a uma velocidade baixa ou uma pequena massa a velocidade elevada. Enquanto no primeiro caso teremos uma resposta do tipo estrutural, no segundo a resposta será localizada numa região confinada à zona de impacto.

Conclui-se, assim, que a selecção do tipo de ensaio deve ser criteriosa para assegurar que as características do ensaio são similares às condições de impacto a que a estrutura esta submetida [2.4].

#### 2.4.3.2.2 Métodos experimentais para detecção do dano

Nos laminados de vidro-epóxico as delaminagens podem ser observadas recorrendo a um foco de luz intenso colocado por trás da estrutura, uma vez que se trata de um material translúcido [2.4].

Nos compósitos carbono-epóxico é necessário o recurso a métodos não destrutivos, tais como os ultra-sons (C-scan) ou as radiografias por raios-X. Em ambos os casos, não é possível a obtenção de detalhes sobre a distribuição das delaminagens ao longo da espessura, uma vez que a imagem obtida corresponde à sobreposição das delaminagens. Um outro exemplo de ensaios não destrutivos é um método sem contacto com alta precisão, designado de ESPI - Electronic Speckle Pattern Interferometry [2.20], que pode ser ainda aplicado para a medição da rugosidade superficial, dos estados de deformação, contorno de superfícies, análise de vibrações e de fracturas.

Alternativamente, podem utilizar-se outros métodos, em particular, o método destrutivo denominado por Técnica de Desempilhamento (“Deply Technique”). Esta técnica baseia-se num processo termoquímico que permite a remoção das camadas, mantendo a sua integridade, e a identificação individualizada das delaminagens [2.21].

Outro processo, regularmente usado, consiste no corte de um elevado número de tiras finas na zona danificada e, após polimento, observação das respectivas secções ao microscópio, o que permite a identificação das delaminagens em cada interface e das roturas de matriz nas camadas [2.4].

#### 2.4.3.2.3 Dano causado por impacto a baixa velocidade

O dano causado por impacto a baixa velocidade caracteriza-se pela rotura da matriz e por delaminagens entre camadas diferentemente orientadas. A rotura de fibras é limitada e, quando existe, está confinada à zona de contacto. O aparecimento das delaminagens nas interfaces entre camadas diferentemente orientadas, está relacionado com a diferença de rigidez existente entre elas, sobretudo à flexão. Em cada interface, a delaminação apresenta uma forma de “amendoim” na direcção das fibras da camada situada abaixo da interface. O tamanho das delaminagens, aumenta com a diferença de orientação das camadas adjacentes à interface. Por outro lado, constata-se que nos laminados pouco espessos o tamanho das delaminagens aumenta das interfaces junto à superfície solicitada para as interfaces situadas mais longe dessa mesma superfície.

As delaminagens e a rotura da matriz estão intimamente ligadas. A fissuração da matriz, resultante das tensões de corte e/ou flexão, constitui o dano inicial. As fissuras da matriz

propagam-se até às interfaces entre camadas diferentemente orientadas originando o aparecimento de delaminagens. Uma fissura de corte localizada no grupo de camadas intermédio gera uma delaminação substancial na interface inferior e uma pequena e confinada delaminação na interface superior. Uma fissura de flexão localizada no grupo exterior de camadas contribuirá para a delaminação da interface que lhe está adjacente [2.4]. Para laminados mais espessos ou com maior número de camadas, o dano característico de impacto consiste numa rede interligada de fissuras de matriz e delaminagens e a sua distribuição ao longo da espessura evidencia uma maior concentração do dano a meio da espessura [2.4]. Sabe-se, no entanto, que as características de absorção da energia são fortemente dependentes do tipo de fibra e de matriz usadas [2.22-2.27], bem como, das arquitecturas utilizadas no reforço [2.24,2.28,2.29]. Os materiais compósitos podem absorver uma maior quantidade de energia por unidade de massa do que os metais [2.22,2.23,2.30]. No entanto, os metais e os compósitos absorvem energia através de processos completamente diferentes. Os metais são dúcteis e absorvem a energia através de deformação plástica, enquanto que a maior parte dos materiais compósitos são frágeis e absorvem energia através de uma combinação complexa de mecanismos de fractura, incluindo fractura da matriz, delaminação, quebra da fibra.

#### 2.4.3.2.4 Modelação

O estabelecimento de modelos analítico-numéricos na previsão de comportamento ao impacto de compósitos adquire especial relevo sob duas perspectivas:

- resistência ao impacto, que envolve a previsão da natureza e dimensões do dano, servindo de base à obtenção de soluções para a sua minimização;
- tolerância ao dano, que pretende avaliar a resistência residual das estruturas após uma solicitação de impacto.

Numa primeira fase, os modelos devem contemplar a determinação da distribuição espacial e da evolução temporal da força de impacto no compósito. Seguidamente, o objectivo é recorrer a uma análise de resistência dos materiais ou de mecânica da fractura para a determinação dos modos de rotura e previsão do dano causado pela solicitação. Em geral, a modelação deste fenómeno requer uma análise dinâmica explícita com modelos de elementos finitos do impactor e da peça compósita.

Caso se pretenda modelar a previsão do dano, os modelos resultam extremamente pesados em termos computacionais. Daí que se assumam algumas simplificações, nomeadamente na previsão da força de impacto.

No impacto a baixa velocidade, a duração do contacto entre os corpos permite desprezar o efeito da propagação das ondas de tensão e tratar a solitação como quase-estática. Neste caso, existem alguns modelos simples que podem ser usados para modelar o comportamento da estrutura: o modelo do balanço energético e o modelo da massa e mola [2.4].

#### **2.4.3.3 Parâmetros fundamentais na resistência ao impacto**

Existem diversas possibilidades de melhorar o desempenho de uma estrutura compósita perante solicitações de impacto.

No que concerne às propriedades do material, uma regra básica consiste em usar materiais com maior tenacidade, porque absorvem maiores níveis de energia de deformação e dissipam mais energia durante os processos de danificação. São preferíveis, portanto, resinas dúcteis, como é o caso das resinas de epóxico modificado com partículas de borracha, ou o recurso a matrizes termoplásticas. Neste caso, os requisitos a nível de resistência a condições ambientais adversas (humidade e temperatura) exigem a selecção de materiais bastante dispendiosos e mais difíceis de processar, como é o caso do PEEK e das poliimidas [2.4].

A colocação de camadas adesivas mais tenazes (“interleaves”), nas interfaces susceptíveis de delaminar, é uma opção alternativa que aumenta significativamente a resistência ao impacto, na medida em que diminui claramente as tensões de corte interlaminares, diminuindo assim o tamanho das delaminagens e a rotura da matriz [2.31].

Por outro lado, a “hibridização” que consiste na introdução de dois ou mais tipos de fibras diferentes no mesmo laminado é, actualmente, um dos métodos mais usados para aumentar o desempenho dos compósitos ao impacto.

A introdução de fibras de vidro em laminados de carbono é frequente, na medida em que para além de melhorar a resposta ao impacto reduz o custo do laminado.

A obtenção de compósitos híbridos pode ser feita de dois modos distintos: os diferentes tipos de fibra são misturados na resina sem olhar à respectiva distribuição ou, cada tipo de fibra é disposto por camada, o que constitui o caso mais comum [2.4].

As propriedades da interface fibra/matriz também desempenham um papel importante que deve ser tido em conta [2.32-2.34]. O tratamento superficial das fibras pode melhorar o nível de adesão destas com a matriz e influenciar a energia absorvida no impacto. Para níveis de adesão elevados, o modo de rotura torna-se muito frágil e os valores de energia de impacto absorvida são baixos. Para graus de adesão baixos, a energia absorvida

adquire valores elevados e a rotura ocorre catastroficamente. O melhor compromisso reside em valores intermédios de adesão que se caracterizam por delaminagens progressivas sem rotura de fibras assinalável [2.4].

Quanto à sequência de empilhamento, existem duas regras fundamentais a seguir:

1. contabilização da influência que a sequência de empilhamento tem na rigidez à flexão, o que condiciona o comportamento da estrutura;
2. minimização da diferença de orientação de duas camadas adjacentes, no sentido de minimizar o valor das tensões interlaminares.

Outras estratégias consistem na costura dos laminados antes do processo de cura, o que gera uma restrição à propagação da delaminação, quer durante a solicitação de impacto, quer no comportamento após impacto. Outra solução, é usar camadas superficiais de outros materiais para a protecção do laminado contra solicitações de impacto a baixa velocidade.

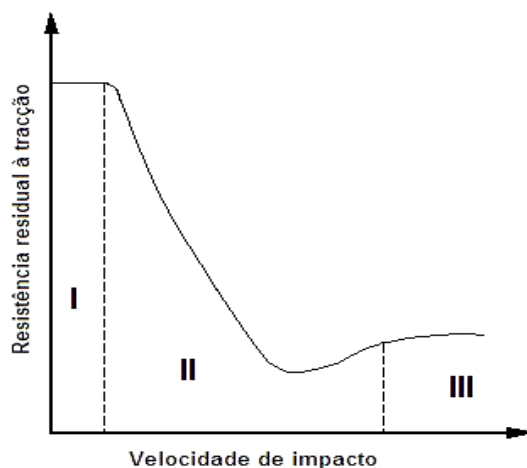
Uma desvantagem da maioria das soluções apresentadas, é o aumento do custo de produção do material, o que sustenta a necessidade premente de mais investigação no sentido de se conhecer todos os detalhes do complexo comportamento ao impacto dos materiais compósitos [2.4].

#### **2.4.3.4 Resistência residual após impacto**

O dano devido ao impacto altera as propriedades do laminado, nomeadamente a sua resistência residual perante solicitações de tracção, compressão, flexão, corte e de fadiga.

A resistência residual à tracção diminui em função da velocidade de impacto, podendo distinguir-se três zonas (figura 2.1):

- zona I: não ocorre degradação da resistência residual à tracção uma vez que a velocidade se mantém abaixo de um determinado valor limite;
- zona II: o dano surge e, conforme a velocidade de impacto vai aumentando, a resistência residual vai rapidamente diminuindo até se atingir um mínimo correspondente ao máximo tamanho do dano causado pela solicitação;
- zona III: a resistência residual à tracção mantém-se aproximadamente constante uma vez que as altas velocidades de impacto originam completa perfuração, produzindo um furo cujo diâmetro é independente do valor da velocidade [2.4].



**Figura 2.1.** Variação da resistência residual à tração com a velocidade de impacto.

A maioria dos modelos existentes para estimar a resistência residual à tração após impacto [2.35-2.37], baseiam-se no pressuposto de que o dano devido ao impacto tem um efeito semelhante ao de um furo ou de uma fenda com o mesmo tamanho. Assim, os modelos de Whitney-Nuismer [2.38, 2.39] são frequentemente aplicados para estimar a resistência residual à tração, bastando para tal assumir que o tamanho do defeito considerado (furo ou fenda) é equivalente ao dano causado pelo impacto.

A resistência residual à flexão após impacto depende das propriedades mecânicas do compósito em questão. Rotem [2.40] demonstrou que nos materiais dúcteis se verifica uma degradação importante quer do módulo quer da resistência à flexão, enquanto nos materiais mais frágeis não se registam quaisquer perdas até à rotura completa.

Malvern et al [2.41] estudaram a relação entre o factor de retenção de resistência e a rigidez à flexão para compósitos aramida-epóxico e carbono-epóxico. Constataram que a rigidez se mantém constante até um valor limite do tamanho da delaminação após o qual decresce linearmente. Por outro lado, a resistência apresenta um decréscimo acentuado na presença de pequenas áreas delaminadas para, a partir daí exibir uma diminuição linear pouco acentuada.

Dorey et al [2.42] estudaram a resistência residual ao corte após impacto, de laminados de carbono-epóxico, Kevlar<sup>®</sup>-epóxico e híbridos realizando ensaios de corte interlaminares, criando uma relação que permite a obtenção de uma estimativa da resistência residual ao corte em função da área delaminada.

A resistência à compressão é, sem dúvida, a propriedade do material mais afectada pelas solicitações de impacto. Este tipo de solicitação pode reduzir a resistência do material à

compressão em cerca de 60% devido às laminagens que provoca [2.43]. Estas afectam o comportamento do material à compressão por duas vias distintas:

- de forma directa: diminuem a sua resistência residual;
- de forma indirecta: alteram a distribuição das forças na estrutura originando uma sobrecarga e conseqüente roturas de zonas não danificadas [2.4].

Os modos de rotura numa estrutura sujeita à compressão e na presença de uma delaminação podem assumir três modos distintos: local, misto e global. As propriedades do material, a geometria da estrutura, as condições de carregamento e a posição da delaminação são factores preponderantes na definição do modo de colapso. Por outro lado, as delaminações características do impacto são embebidas e não a toda a largura, o que significa que os modelos de previsão de comportamento baseados em elementos finitos devem ser tridimensionais [2.44, 2.45].

Diversos estudos [2.45, 2.46] demonstraram que a interpenetração entre as camadas delaminadas deve ser evitada numericamente, uma vez que os modos de deformação podem ser drasticamente afectados. Foi ainda comprovada a existência de delaminações antes do colapso [2.21, 2.47, 2.48], e a importância que adquire na previsão da força máxima.

## **2.4.4 Fractura interlaminar**

### **2.4.4.1 Introdução**

A grande dificuldade da aplicação da Mecânica da Fractura Linear Elástica aos materiais compósitos está relacionada com a sua heterogeneidade que, em muitas situações, impede a propagação de fissuras de uma forma auto-semelhante. Todavia, a delaminação, que consiste num descolamento entre duas camadas contíguas, representa um tipo de dano em que a propagação está confinada a um plano. Estão, portanto, cumpridos os requisitos da teoria clássica, o que faz com que a fractura interlaminar seja considerada um domínio da aplicação natural da Mecânica da Fractura. As taxas críticas de libertação de energia podem ser determinadas de diferentes modos: modo I, modo II, modo III e modo misto. É geralmente aceite que o modo II é preponderante na criação de danos de delaminação.

#### 2.4.4.2 Taxa crítica de libertação de energia em modo II

A taxa crítica de libertação de energia em modo II ( $G_{IIc}$ ) pode ser obtida recorrendo ao ensaio “end-notched flexure” (ENF), cuja representação esquemática se pode ver na figura 2.2. A fenda está localizada a meio da espessura do provete (eixo neutro), o que significa que a propagação da delaminação é controlada pelas tensões de corte, traduzindo assim um efeito de modo II. Assume-se a hipótese de que a secção delaminada do provete actua como duas vigas independentes, cada uma delas suportando metade da carga aplicada.

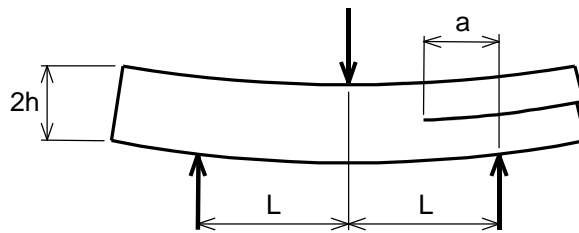


Figura 2.2. Representação esquemática de provete para ensaio ENF.

#### 2.4.4.3 Métodos de cálculo para estimar a fractura interlaminar

Os problemas de Mecânica da Fractura em materiais compósitos susceptíveis de resolução por via analítica são limitados devido à complexidade envolvida. A alternativa são os métodos numéricos, nomeadamente os elementos finitos que, pela sua versatilidade, rapidamente se tornaram imprescindíveis na análise de problemas mais complexos [2.49]. O conceito fundamental do método dos elementos finitos é que, qualquer variável de campo contínua, como é o caso dos deslocamentos na análise estrutural, pode ser aproximada por um modelo discreto composto por uma série de variáveis de campo contínuas.

A delaminação é um tipo de dano que reduz significativamente a rigidez do laminado e é prejudicial à sua resistência. Um modelo teórico sobre a fractura ortotrópica de compósitos laminados sujeitos a tensão, aplicando o Modelo de Constrangimento Equivalente (ECM) de laminados danificados, permitiu deduzir uma expressão analítica para a determinação da taxa de libertação de energia associada à delaminação [2.50].

Num outro estudo [2.51], identifica-se efeito do ângulo de enrolamento na resistência ao impacto em tubos e em placas de compósitos de carbono e resina epóxico. Nesse estudo, verificou-se que a energia de impacto é máxima nos tubos cujo enrolamento é efectuado com um ângulo de  $\pm 45^\circ$  e em placas cuja orientação das fibras é de  $\pm 0^\circ$ . Também se verificou que a energia de impacto diminui gradualmente em tubos cujo ângulo de

enrolamento se situa nas gamas entre  $\pm 0$  a  $\pm 20^\circ$  e  $\pm 70$  a  $\pm 90^\circ$ . As diferenças resultam dos diferentes arranjos geométricos das fibras nas placas e nos tubos compósitos.

A influência do valor do parâmetro  $G_{IIc}$  com o ângulo de enrolamento em tubos de material compósito produzidos por enrolamento filamentar foi estudado por [2.52]. Verificou-se que o valor máximo de  $G_{IIc}$  ocorre para valores do ângulo de enrolamento próximos de  $30^\circ$ .

## 2.5 Referências bibliográficas

- [2.1] Designing Components from Composite Materials Imperial College of Science and Technology Vol. I. Centre for Composite Materials (1991).
- [2.2] S. C. Fonseca. Materiais Compósitos de Matriz Polimérica Reforçada com Fibras usados na Engenharia Civil - características e aplicações. LNEC (2006).
- [2.3] A. M. Pereira. Fractura Interlaminar de Compósitos de Matriz Polimérica. Tese de Doutoramento (2006).
- [2.4] M. F. S. F. Moura, A. B. Morais, A. G. Magalhães. Materiais compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico. Publindústria (2005).
- [2.5] G. Lubin. Handbook of Composites. Van Nostrand (1982).
- [2.6] C. L. Nogueira, J. M. F. Marlet, M. C. Rezende. Processo de Obtenção de Pré-impregnados Poliméricos Termoplásticos Via por Compressão a Quente. Divisão de Materiais/Instituto de Aeronáutica e Espaço/Centro Técnico Aeroespacial, S.P.E, Polímeros: Ciência e Tecnologia (1999).
- [2.7] J. F. Silva. Pré-Impregnados de Matriz Termoplástica: Fabrico e Transformação por Compressão a Quente e Enrolamento Filamentar. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Tese de Doutoramento (2005).
- [2.8] J. F. Silva. Estudo da Resistência à Pressão Interior Após Impacto de Tubagem Produzida por Enrolamento Filamentar. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Tese de Mestrado (1996).
- [2.9] A. C. Sá. Influence of Moisture Absorption on Quasi-Static and Long-Term Failure of a GRP Pipe under Lateral Compression. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Tese de Mestrado (2005).
- [2.10] Tuberias en PRFV. Manual de Tuberia en PRFV. Publicación em Espanhol (1980).
- [2.11] K. C. Park, G. W. Reich, K. F. Alvin. Damage Detection using Localized Flexibilities, in: Structural Health Monitoring. Current Status and Perspectives. F. K. Chang (Ed.). Technomic Publishers (1997).
- [2.12] Y. Aoki, O. I. Byon. Damage Detection of CFRP Pipes and Shells by Using Localized Exibility Method Vol. 10. Composite Materials (2001).
- [2.13] A. Wolher. Experiments on the Strength of Metals, Engineering (1967).
- [2.14] Standard Definitions of Terms Relating to Fatigue Testing and Statistical Analysis of Data. ASME E 206-272 (1972).
- [2.15] L. F. Coffin. Fatigue. Ed. Applied Science Publishers, EUA (1972).

- [2.16] P.O. Sjöblom, J.T. Harteness. On Low-Velocity Impact Testing of Composite Materials. *Journal of Composite Materials* (1988).
- [2.17] C. Y. Wang, C. H. Yew. Impact Damage in Composite Laminates. *Computers & Structures* (1990).
- [2.18] S. Abrate. Impact on Laminates Composite Materials, *Applied Mechanics Review* (1990).
- [2.19] M. F. S. Moura. Estudo do comportamento Mecânico dos Materiais Compósitos Sujeitos a Solicitações de Impacto a Baixa Velocidade, provas de Capacidade Científica. DEMEGI-FEUP (1989).
- [2.20] W.C. Wang, C.H. Day, C. H. Hwang, T. B. Chiou. Nondestructive Evaluation of Composite Materials by ESPI. *Res Nondestr Eval.* 10:1–15, Springer-Verlag New York Inc. (1998).
- [2.21] M. F. S. Moura. Modelo de Previsão do Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Carbono-Epóxido Sujeitos a Solicitações de Impacto a Baixa Velocidade e da sua Resistência Residual à Compressão Após impacto. Dissertação de Doutorado, DEMEGI-FEUP (1995).
- [2.22] D.W. Schmueser, L. E. Wickliffe. Impact Energy Absorption of Continuous Fiber Composite Tubes. *Journal of Engineering Materials and Technology* (1987).
- [2.23] G. L. Farley. Energy Absorption of Composite Materials. *Journal of Composite Materials* (1983).
- [2.24] C. H. Chiu, C. K. Lu, C. M. Wu. Crushing Characteristics of 3-D Braided Composite Square Tubes. *Journal of Composites Materials* (1997).
- [2.25] V. M. Karbhari, P. J. Falzon, I. Herzberg. Energy Absorption Characteristics of Hybrid Braided Composite Tubes. *Journal of Composite Materials* (1997).
- [2.26] P. H. Thornton, P. J. Edwards. Energy Absorption in Composite Tubes. *Journal of Composite Materials* (1982).
- [2.27] G. L. Farley. Effect of Fiber and Matrix Maximum Strain on The Energy Absorption of Composite Materials. *Journal of Composite Materials* (1986).
- [2.28] D. Hull. A Unified Approach to Progressive Crushing of Fibre-Reinforced Composite Tubes. *Composites Science and Technology* (1991).
- [2.29] S. Ramakrishna. Energy Absorption Characteristics of Knitted Fabric Reinforced Epoxy Composite Tubes. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* (1995).
- [2.30] P. Beardmore, C. F. Johnson. The Potential For Composites In Structural Automotive Applications. *Composite Science and Technology* (1986).
- [2.31] C. T. Sun, S. Rechack. Effect of Adhesive Layers on Impact Damage in composite Laminates. *ASTM STP 972* (1998).
- [2.32] W. N. Reynolds, N. L. Hancox. Shear Strenght of Carbon-Resin Bond in Carbon-Fibre-Reinforced Epoxies. *Journal of Physics 4*: 1747 (1971).

- [2.33] M. G. Bader, J. E. Bailey, I. Bell. Effect of Fibre Matrix Interface Strength on the Impact and Fracture Properties of Carbon-Fibre-Reinforced Epoxy Resin Composites. *Journal of Physics*. 6: 572, (1973).
- [2.34] P. Yeung, L. J. Broutman. Effect of Glass-Resin Interface Strength on the Impact Strength of Fiber Reinforced Plastics. *Polymer Engineering and Science*, 18: 62-72, (1978).
- [2.35] J. Awerbuch, H. T. Hahn. Hard Object Impact Damage of Metal Matrix Composites. *Journal of Composites Materials*, 10: 231-257 (1976).
- [2.36] G. Caprino. Residual Strength Prediction of Impacted Composite Laminates. *Journal of Composite Materials*, 18: 508-518 (1984).
- [2.37] V. S. Avva, J. R. Vala, M. Jeyaseelan. Effect of Impact and Fatigue Loads on the Strength of Graphite/Epoxy Composites, ASTM STP 893, 196-206 (1986).
- [2.38] J. M. Whitney, R. J. Nuismer. Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations. *Journal of Composite Materials* (8), p. 253-265 (1974).
- [2.39] R. J. Nuismer, J.M. Whitney. Uniaxial Failure of Composites Laminates Containing Stress Concentrations, in *Fracture Mechanics of Composites*, ASTM STP 593, American Society for Testing and Materials Philadelphia, PA, p.117-142 (1975).
- [2.40] A. Rotem. Residual Flexural Strength of FRP Composite Specimens Subjected to Transverse Impact Loading. *SAMPE J*, 24: 19-25 (1988).
- [2.41] L. E. Malvern, C. T. Sun, D. Liu. Delamination Damage in Central Impacts at Subperforation Speeds on Laminated Kevlar/Epoxy Plates. ASTM STP 1012, 387-405 (1989).
- [2.42] G. Dorey, G. R. Sidney, J. Hutchings. Impact Properties of Carbon Fiber/Kevlar 49 Fibre Hybrid Composites. *Composites* 9: 25-32 (1978).
- [2.43] M. B. Rhodes. Damage Tolerance Research on Composite Panels, Selected NASA Research in Composite Material and Structures, NASA CP-2142 August (1980).
- [2.44] G. F. Z. Steinmetz, Arendts. Compression Failure Behaviour of CFRP Strips Containing Delaminations. *Advanced Composites* 93. International Conference on Advanced Composite Materials. Ed. By T. Chandra and A. K. Dhingra. The Minerals, Metals & Materials Society (1993).
- [2.45] J. D. Whitcomb. Three-Dimensional Analysis of a Postbuckled Embedded Delamination. *Journal of Composite Materials*, 23: 862-889 (1989).
- [2.46] M. S. Weinman, G. Steinmetz, F. J. Arendts. Numerical and Experimental 3-D Delamination Behaviour of an Anisotropic Layered Plate Under Compression Loading. *Proceedings of the Ninth International Conference on composite Materials (ICCM/9)*, Madrid, Ed. By António Miravete, Pub. By Univ. of Zaragoza, 12-16 July (1993).

- [2.47] Z. Kutlu, F. K. Chang. Modeling Compression Failure of Laminated Composites Containing Multiple Through-the-Width Delaminations. *Journal of Composites Materials*. 26: 350-387 (1992).
- [2.48] G. F. Z. Steinmetz, R. N. Arendts, Delamination Buckling of Laminated Plates. *Developments in the Science and Technology of Composite Materials. Fourth European Conference on Composite Materials. ECCM 4. Stuttgart. F.R.G., Ed. By J. Füller et. al., pp. 495-502 (1990).*
- [2.49] S. Beard, H.K. Chang. Design of Braided Composites for Energy Absorption, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 15-January 2002.
- [2.50] C. Soutis, M. Kashtalyan, Delamination Growth and Residual Properties of Cracked Orthotropic Laminates under Tensile Loading. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 15 January (2002).
- [2.51] Z. Korinek, J. Chromy, L. H. Giang, Z. Jenikova; Effect of Winding Angle on Impact Properties of thin Walled Tubes. *Journal of Materials Science* 39 (2004).
- [2.52] A. B. Morais, J. F. Silva, A. T. Marques, P. T. Castro. Mode II Interlaminar Fracture of Filament Wound Angle-ply Specimens. *Applied Composite Materials* 9: 117–129. Kluwer Academic Publishers (2002).



---

## **CAPÍTULO 3**

### **PRODUÇÃO DE TUBOS E PLACAS**

---



## 3 Fabrico de compósitos

### 3.1 Introdução

Neste capítulo, descreve-se a matéria-prima utilizada neste estudo para fabrico dos tubos e das placas para ensaio. De notar que não foram feitos quaisquer ensaios à matéria-prima, podendo observar-se as suas propriedades reológicas, mecânicas e térmicas no anexo I.

Descrevem-se, também, os equipamentos utilizados, bem como os processos de transformação dos pré-impregnados.

### 3.2 Matérias-primas

#### 3.2.1 Pré-impregnados

##### 3.2.1.1 Introdução

A matéria-prima utilizada neste estudo para a produção dos tubos e das placas para ensaio foi um pré-impregnado constituído por uma mistura de fibras de polímero e de reforço, denominado Twintex<sup>®</sup> e fabricado pela firma Saint-Gobain, Vetrotex. O Twintex<sup>®</sup> é constituído por filamentos de polipropileno, que constituem a matriz, e por fibras de vidro que constituem o material de reforço. A referência deste material é TR PP 60 B 1870, com o seguinte significado:

**T:** Twintex<sup>®</sup>;

**R:** bobinas de pré-impregnado (rovings);

**PP:** matriz de polipropileno;

**60:** percentagem em peso das fibras vidro;

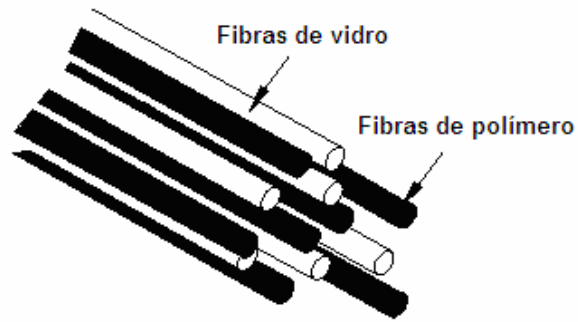
**B:** cor das fibras de polipropileno: negra (Black);

**1870:** peso linear (tex).



**Figura 3.1.** Bobinas de Twintex<sup>®</sup>.

O pré-impregnado Twintex<sup>®</sup> é comercializado em bobinas, (ver figura 3.1) com desenrolamento das mechas de filamentos pelo seu interior. Este tipo de pré-impregnados constituídos por misturas de fibras denominam-se 'commingled fibres' e estão representados esquematicamente na figura 3.2.



**Figura 3.2.** Representação esquemática de um pré-impregnado.

As principais razões que levaram a escolher este pré-impregnado como matéria-prima para o fabrico de estruturas em material compósito objecto deste estudo foram, nomeadamente:

- tratar-se de um pré-impregnado comercial, com algumas aplicações comerciais conhecidas e cuja aquisição é relativamente simples;
- as fibras de reforço (fibras de vidro) serem muito utilizadas em aplicações comerciais;
- as garantias, para as estruturas em compósito fabricadas a partir do Twintex<sup>®</sup>, de manutenção das suas propriedades mecânicas às temperaturas de serviço requeridas pela grande maioria das aplicações em mercados de grande consumo;
- as propriedades mecânicas finais dos compósitos reforçados com fibras contínuas serem essencialmente determinadas pelas propriedades mecânicas das fibras de reforço e pelo seu teor, e não propriamente pelas propriedades relativamente baixas da matriz, sendo uma matéria-prima de baixo custo e de utilização muito vulgarizada em mercados de grande consumo e exigência, como o dos transportes;
- apresentar um excelente quociente desempenho versus densidade e, sobretudo, desempenho versus custo;
- o PP ter boa resistência química, baixa densidade, excelente resistência ao impacto e bom isolamento eléctrico;
- a temperatura de “amolecimento” do PP ser relativamente baixa, facilitando o seu processamento, traduzindo-se numa importante economia energética.

### **3.2.1.2 Fibras de reforço**

As fibras de reforço presentes nas bobinas de Twintex<sup>®</sup> utilizadas neste estudo são as fibras de vidro tipo E, representando 60% do peso total do compósito.

As características técnicas destas fibras são as que se apresentam no anexo II, salientando-se desde já o valor da sua densidade, que é de 2,56.

O diâmetro médio do diâmetro dos filamentos constituintes das mechas da fibra de vidro usadas é de cerca de 17 $\mu$ m (valor definido pelo fabricante).

### 3.2.1.3 Matriz termoplástica

A resina termoplástica utilizada na produção de tubagem e placas para ensaio foi o polipropileno. Na tabela 3.1 podem ver-se as principais características deste material de cor preta. No anexo III deste estudo pode consultar-se um resumo mais detalhado das propriedades típicas do polipropileno obtidas a partir dos dados de uma base de dados comercial.

**Tabela 3.1.** Propriedades típicas de um polipropileno comercial [3.1].

Propriedade	Unidade	Valor
Densidade	-	0,905
Temperatura de processamento	°C	204
Temperatura de serviço	°C	120
Tensão de rotura em tracção	MPa	33
Módulo em flexão	MPa	1,5

## 3.3 Transformação por enrolamento filamental

### 3.3.1 Introdução

A tecnologia de fabrico por enrolamento filamental consiste numa rápida deposição de filamentos contínuos de reforço em padrões de enrolamento variados sobre um mandril rotativo, até que este fique integralmente coberto por estas fibras. Repetindo-se o processo é possível obterem-se várias camadas.

Nesta tecnologia, são utilizadas máquinas especialmente concebidas para o efeito, nas quais o movimento de translação é sincronizado com o movimento de rotação do mandril, permitindo assim um controlo correcto do ângulo de enrolamento bem como da deposição dos filamentos.

Os filamentos podem ser enrolados em bandas adjacentes ou em padrões repetitivos até que haja uma cobertura da toda a superfície pretendida do mandril. São enroladas camadas sucessivas de filamento com o mesmo ângulo ou com ângulos diferentes até que a espessura desejada seja atingida. Os ângulos de enrolamento podem variar desde pequenos ângulos longitudinais até enrolamentos circunferenciais (cerca de 90°). Estes ângulos de enrolamento são definidos a partir do eixo longitudinal do mandril. A remoção do mandril completa normalmente a fase de fabrico de um componente.

As estruturas produzidas por este processo são, normalmente, de revolução, muito embora outras formas possam ser enroladas. O tamanho das estruturas fabricadas pode variar desde alguns centímetros até muitos metros. Existem inúmeros exemplos de estruturas fabricadas por enrolamento filamentar, tacos de golfe, raquetes, tubos para pressão interior, corpos de foguetes, reservatórios, etc. As partes de estruturas fabricadas por este processo podem ser projectadas e fabricadas com um elevado grau de precisão.

Potencialmente qualquer reforço contínuo pode ser usado para fins de enrolamento. No entanto, na prática, a maior parte dos reforços utilizados no enrolamento filamentar são fibra de vidro. As fibras de carbono e aramídicas são utilizadas neste processo de fabrico sobretudo em aplicações para as indústrias aeroespacial e aeronáutica.

As principais matrizes utilizadas nesta tecnologia são as resinas à base de epóxido, poliéster não saturado e vinilester. Os equipamentos de enrolamento filamentar variam desde tornos adoptados até máquinas de vários eixos de controlo por CNC.

Em suma, referiremos de seguida os aspectos mais importantes deste processo de fabrico:

- forma das peças fabricadas: principalmente cilíndricas e ocas (também podem ser esféricas, cónicas, planas, etc.);
- dimensões das peças fabricadas: diâmetros desde alguns milímetros a 4 m e comprimentos de alguns centímetros a 12 m;
- espessuras das peças fabricadas: sem limite;
- colocação de insertos: é possível;
- aspecto das peças fabricadas: interior liso (podendo detectar-se as imperfeições do mandril), exterior mais ou menos liso dependendo de vários factores;
- percentagem de reforço: 60 a 75% no caso de bobinas de fibras;
- produtos utilizados: agentes desmoldantes, 'gel-coats', resinas, fibras de vidro.

### 3.3.2 Equipamento

Para fabrico dos provetes para ensaio foi utilizada uma máquina de enrolamento filamentar helicoidal de comando numérico Pultrex Modwind 1S 6NC, existente nas instalações do INEGI, na unidade de matérias compósitas CEMACOM (ver figura 3.3). Trata-se de uma máquina de 6 eixos, com comando numérico, de enrolamento filamentar cilíndrico, capaz de produzir estruturas até 2 m x 4 m [3.2].



**Figura 3.3.** Máquina de enrolamento filamentar utilizada.

Este equipamento existente no INEGI pode ser dividido basicamente em três partes:

1. Sistema de impregnação/tensão dos rolos de 'rovings':

O sistema de impregnação está concebido para receber até 8 'rovings'. As fibras, primeiramente traccionadas, passam, então, por um tambor parcialmente imerso num banho de resina podendo este ser aquecido ou não, ficando impregnadas e estando prontas para o enrolamento no mandril. O sistema tensor, montado na mesma estrutura mecânica do sistema anterior, está preparado para receber rolos de 'roving' até 260 mm de diâmetro. A carga na fibra pode ir desde 4 N até 40 N por 'roving', sendo esta tensão

ajustada mediante o controlo de um sistema pneumático. Para a transformação de bobinas de pré-impregnados de matriz termoplástica, utiliza-se este sistema, mas sem se fazer a passagem das mechas de fibras pelo tambor de impregnação. Assim, este sistema só é utilizado para tensionar as bobinas de fibras.

## 2. Sistema de controlo da máquina, controlo numérico por CNC de seis eixos FANUC:

O sistema de controlo é constituído por um CNC de seis eixos, podendo este comunicar com um computador (PC). Assim um programa elaborado no PC pode ser passado directamente para o CNC da máquina. O CNC é programado em linguagem ISO.

## 3. Sistema de movimentação do olhal de deposição e rotação do mandril (este sistema constitui o corpo principal da máquina):

O sistema de movimentação do olhal de deposição permite a movimentação precisa dos seguintes eixos:

- Eixo vertical Z
- Eixo horizontal Y: neste eixo está montado o sistema de aquecimento por infravermelhos que permite o aquecimento do pré-impregnado até uma temperatura que permita a fusão e subsequente consolidação do compósito final. A temperatura no interior do forno onde passam as mechas de fibras pode ser controlada actuando sobre os respectivos controladores de temperatura:
- Eixo longitudinal X
- Eixo de rotação B, do olhal de deposição
- Eixo pivotante C do olhal de deposição
- A rotação de uma bucha constitui o eixo A do mandril. Esta bucha pode apertar veios até 150 mm.

Há basicamente dois processos de enrolamento filamentar, conhecidos como polar e helicoidal.

No enrolamento polar, o mandril permanece estacionário enquanto o olhal de deposição roda em torno do eixo longitudinal deste. O mandril avança do valor da largura da banda das mechas de fibras entre cada rotação completa do olhal.

No enrolamento helicoidal, é o mandril que roda em contínuo, enquanto o olhal de deposição se movimenta para a frente e para trás. O movimento da carruagem está

sincronizado com o do mandril. O equipamento que se descreve permite realizar este tipo de enrolamento que é particularmente apropriado para o fabrico de tubagens e geometrias semelhantes.

É possível realizar dois tipos de trajectórias segundo as quais as fibras vão sendo colocadas sobre a superfície do mandril: geodésicas e não geodésicas.

Quando se está a efectuar o enrolamento de uma estrutura, verifica-se que as fibras tendem a encontrar uma posição estável, ou seja deslizam sobre a superfície do mandril até encontrarem esta posição. As trajectórias que permitem um enrolamento estável designam-se por geodésicas.

As trajectórias não-geodésicas não são naturalmente estáveis. Para se conseguir enrolar com este tipo de trajectória é necessário que a tendência para o deslizamento das fibras impregnadas com resina seja contrariada pelo atrito destas com o mandril.

A forma do mandril é normalmente axissimétrica e define a geometria do componente a fabricar.

O fabrico de componentes tubulares (utilizando-se um mandril também tubular) bem como de placas planas (mandril com duas faces planas) será descrito nos próximos capítulos.

### **3.3.3 Parâmetros de fabrico**

No processo de enrolamento filamental existem vários parâmetros de fabrico que devem ser controlados. Estes parâmetros influenciam a qualidade dos compósitos [3.3, 3.4], sendo que se a sua selecção for menos adequada, pode levar à criação de estruturas com um conteúdo excessivo de vazios e conseqüentemente ao decréscimo das propriedades mecânicas [3.5].

A produção das tubagens neste trabalho foi estudada variando apenas alguns desses parâmetros, tais como, a tensão nas fibras, a temperatura de pré-aquecimento, a velocidade de rotação do mandril e a velocidade de translação do olhal de deposição.

### **3.3.4 Fabrico de tubagens**

Para este estudo foram produzidos, por enrolamento filamental e a partir de 5 bobinas de Twintex<sup>®</sup>, 20 tubos com 80 mm de diâmetro interior e 400 mm de comprimento.

Para o fabrico dos referidos tubos utilizou-se um mandril tubular em aço, com uma ligeira conicidade (1/1000), revestido com uma camada desmoldante de politetrafluoretileno

(PTFE) para que o processo de desmoldagem fosse possível de realizar sem ser necessário recorrer a qualquer equipamento específico.

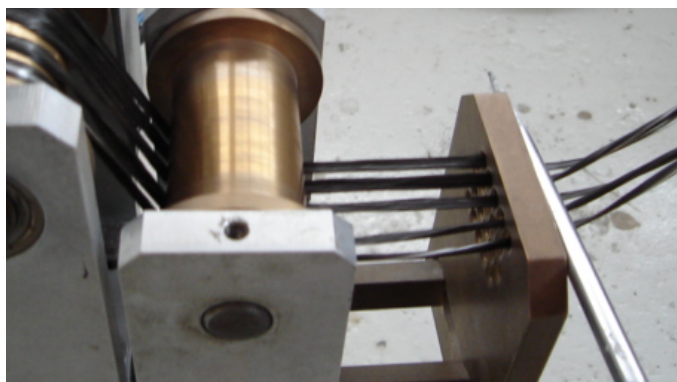
Para facilitar ainda mais a desmoldagem, “forrou-se” a superfície do mandril com uma película de Melinex, um filme desmoldante correntemente empregue na indústria de fabrico de tubagem reforçada, de 25 µm de espessura.

Atingida a temperatura desejada no forno, cerca de 320 °C, iniciou-se o processo de produção dos tubos, detalhado de seguida.

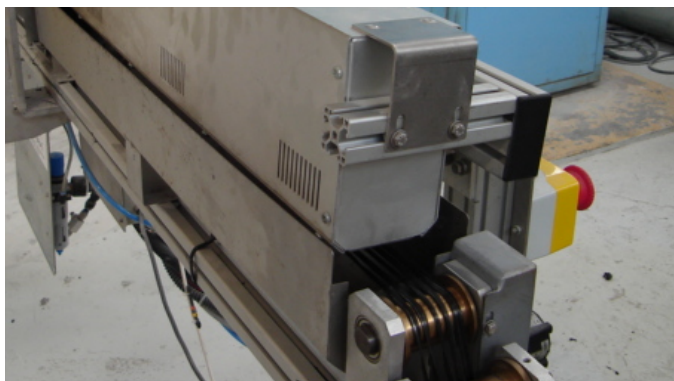
O fabrico dos tubos inicia-se com a passagem das mechas de fibras oriundas de cinco bobinas de Twintex® por uma grelha condutora (ver figura 3.4). De seguida as mechas passam por dois rolos aquecidos (figura 3.5) na entrada de um forno de infravermelhos (figura 3.6) onde o pré-impregnado vai fundir, permitindo a sua consolidação sobre o mandril.



**Figura 3.4.** Grelha condutora dos vários filamentos.



**Figura 3.5.** Rolos à entrada do forno.



**Figura 3.6.** Forno de infravermelhos.

No início do enrolamento, a fita fundida de mechas de fibras foi cuidadosamente cortada e fixa ao mandril previamente “forrado” com a película de Melinex conforme já foi descrito (figura 3.7a).



**Figura 3.7a.** Preparação para o início do enrolamento de tubagem.

Iniciou-se então o processo de enrolamento da tubagem, com quatro camadas estruturais, de acordo com o programa CNC (em linguagem ISO). As camadas foram sempre enroladas a uma velocidade linear das fibras aproximadamente constante (cerca de 100 mm/s) e com um ângulo de enrolamento circunferencial (aproximadamente  $89^\circ$ ).

A velocidade de fabrico e a temperatura média existente no interior do forno de infravermelhos foram determinadas como resultado de diversas experiências, até se conseguir desmoldar facilmente a tubagem do mandril. Verificou-se também que, nestas circunstâncias, a tubagem se encontrava, aparentemente, bem consolidada.



**Figura 3.7b.** Aspecto da produção de um tubo e tubo produzido ainda no mandril.

A figura 3.7b mostra a produção de um tubo, vendo-se a banda de pré-impregnado a ser colocada no mandril em rotação e o tubo produzido ainda agarrado ao mandril.

A desmoldagem foi sempre uma operação realizada com muito cuidado para evitar todo e qualquer dano possível de ser produzido na tubagem nesta fase. Com os sistemas de desmoldagem anteriormente referidos verificamos que esta operação foi possível de efectuar à mão, apenas puxando a tubagem no sentido axial do maior para o menor diâmetro do mandril.

Após a desmoldagem os tubos foram retirados e colocados ao ar à temperatura ambiente até à altura de serem ensaiados.

Os tubos produzidos foram posteriormente identificados e submetidos a ensaios de impacto de baixa velocidade por queda de peso.



**Figura 3.8.** Identificação dos tubos para ensaios de impacto.

### 3.3.5 Fabrico de placas

Para o fabrico dos provetes com uma pré-fenda inicial para os ensaios de ENF (end-notched flexure), começou por fabricar-se uma série de pré-formas utilizando-se o processo de enrolamento filamental com um mandril plano, constituído por duas faces de vidro de 5 mm com 650 mm x 390 mm, conforme se pode observar na figura 3.9.



**Figura 3.9.** Mandril plano utilizado no fabrico das pré-formas dos provetes de ENF.

O fabrico destas pré-formas seguiu a mesma metodologia referida para o fabrico de tubos, utilizando-se de igual modo 5 bobinas de Twintex<sup>®</sup>. O comprimento das mechas de pré-impregnado a enrolar é função da espessura desejada para as placas que se pretendem produzir por compressão a quente, utilizando-se as pré-formas produzidas por enrolamento filamental e um molde adequado (ver os subcapítulos seguintes). Este comprimento pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$L_{tow} = H \frac{A(v_f(\rho_f - \rho_p) + \rho_p)}{d_{tow}} \quad \text{Equação 3.1}$$

onde,

$L_{tow}$  comprimento das mechas de pré-impregnado

$H$  espessura da placa

$A$  área da placa a produzir (área útil do molde de compressão a quente)

$d_{tow}$  peso linear do pré-impregnado

$\rho_f$  peso específico das fibras de vidro

$\rho_p$  peso específico das fibras de polipropileno e,

$v_f$  fracção volúmica de fibras de vidro.

Utilizando a expressão anterior, considerando o peso linear do pré-impregnado de 1,87 g/m, a densidade das fibras de vidro de 2,56, a densidade das fibras de polipropileno de 0,91, a fracção volúmica de fibras igual a 35% (correspondendo uma fracção mássica de fibras de 60 %, de acordo com a referência TR PP 60 B 1870) e uma espessura de 4 mm para a placa, obtém-se cerca de 31,8 m de comprimento das mechas de Twintex<sup>®</sup> para uma placa de 100 mm x 100 mm. Quando se atingiu um valor de espessura correspondente a metade do valor total pretendido para a pré-forma, foi colocado um filme de Melinex com 25 µm de espessura, para criar a pré-fenda inicial. O enrolamento filamentar prosseguiu, de seguida, normalmente até ao final do processo produtivo.

Posteriormente, as duas metades foram sujeitas a compressão a quente para finalizar a consolidação, seguindo-se um procedimento descrito nos subcapítulos seguintes. As placas consolidadas foram posteriormente identificadas e submetidas a ensaios ENF, de acordo com o Protocolo ESIS para os testes de fractura interlaminar em modo II.

### **3.4 Transformação por compressão a quente**

#### **3.4.1 Introdução**

A compressão a quente é uma tecnologia bastante utilizada para obter placas em compósito a partir de pré-impregnados, por permitir ciclos de fabrico relativamente simples e curtos.

Esta tecnologia de transformação foi também bastante empregue no decurso deste trabalho para fabricar placas usadas na determinação das propriedades mecânicas dos compósitos produzidos.

#### **3.4.2 Equipamento**

O equipamento utilizado para transformar os pré-impregnados por compressão a quente foi uma prensa hidráulica SATIM 400 kN existente nas instalações do INEGI (ver figura 3.10). Esta prensa foi utilizada para aplicar os ciclos de pressão a um molde de compressão fabricado em aço com aquecimento e arrefecimento controlado [3.6].

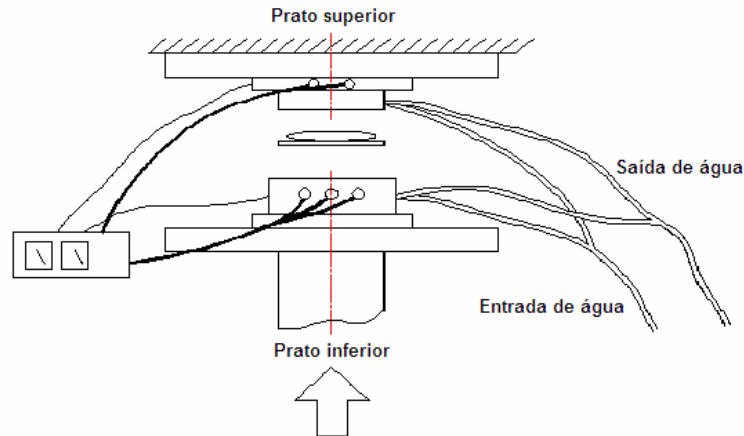


**Figura 3.10.** Prensa SATIM de 400 kN.

### **3.4.3 Tecnologia**

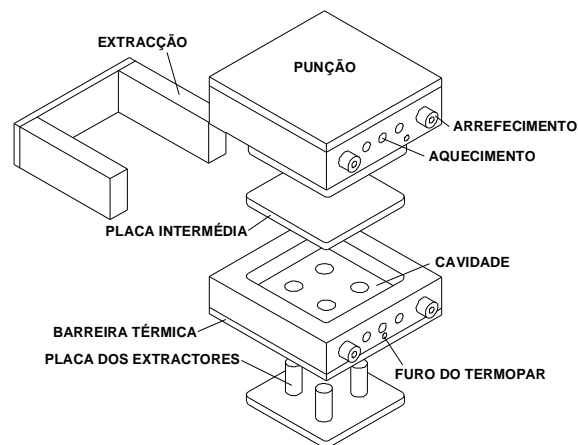
Após o enrolamento completo do pré-impregnado, já descrito anteriormente, a pré-forma obtida foi cuidadosamente retirada do mandril de vidro onde foi fabricada e colocada na cavidade de um molde de compressão. Previamente, aplicou-se um desmoldante apropriado na cavidade do molde e o conjunto molde e pré-forma foram colocados nos pratos da prensa.

Como já foi referido, a prensa foi apenas usada para aplicar a pressão especificada já que o controlo e monitorização das temperaturas de aquecimento e arrefecimento foram efectuados através do molde, que foi projectado para o efeito com sistemas independentes de aquecimento e arrefecimento do punção e da respectiva cavidade, como se pode observar na figura 3.11.



**Figura 3.11.** Esquema do molde de compressão a quente utilizado neste estudo.

O molde apresenta uma cavidade quadrada de 100 mm x 100 mm e uma folga entre o punção e a cavidade moldante de cerca de 50  $\mu\text{m}$ , por forma a garantir a formação de rebarbas, tanto quanto possível isentas de fibras de vidro. O aquecimento deste molde é garantido por dois conjuntos de quatro resistências de cartuchos com 0,5 kW cada, montados, respectivamente, do lado do punção e da cavidade. A temperatura é monitorizada e controlada por dois sistemas de termopares tipo K e controladores tipo Honeywell-BTC-2220, um para o controlo da temperatura do punção e o outro para o controlo da temperatura da cavidade moldante. O arrefecimento do molde efectua-se por passagem de água em canais com 8 mm de diâmetro maquinados no punção e cavidade. O molde comporta ainda um sistema para ejeção das placas em compósito consolidadas realizado a baixo custo que, embora sendo manual, permite uma fácil e rápida remoção das placas produzidas na cavidade moldante (figura 3.12).



**Figura 3.12.** Desenho esquemático do molde utilizado no fabrico de placas em compósito.

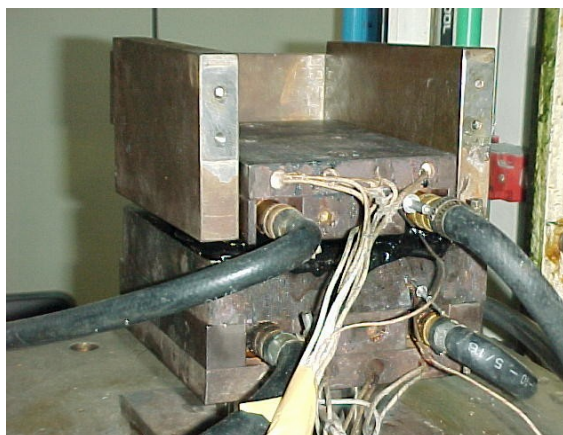
Para operar o molde começa-se por colocar a placa intermédia na cavidade e o material a consolidar sobre ela. De seguida, coloca-se o punção e inicia-se o seu aquecimento até se atingir a temperatura de estágio.

Após atingida a temperatura de estágio no molde, é aplicada uma pressão previamente definida durante o tempo necessário à consolidação da placa, definindo-se assim o ciclo de consolidação das placas (ver tabela 3.2).

**Tabela 3.2.** Ciclo de consolidação das placas obtidas por compressão a quente.

Variável	Unidades	Valor
Temperatura	°C	260
Pressão	MPa	15
Tempo de estágio	min	10

Na figura 3.13 pode ver-se uma fotografia do molde utilizado neste trabalho.



**Figura 3.13.** Molde utilizado.

Findo o tempo de estágio à pressão e temperatura definidas, inicia-se o arrefecimento com circulação de água fria pelos canais do molde até a temperatura se situar próxima da temperatura ambiente. Inicia-se, então, o processo de extracção da placa laminada com auxílio do fecho dos pratos da prensa. Extraída a placa (ver figura 3.14), cortaram-se os provetes rectangulares para os ensaios de ENF.



**Figura 3.14.** Aspecto da placa laminada consolidada.

### 3.5 Referências bibliográficas

- [3.1] PLASCAMS Database. Versão 3.0 para Microsoft Windows 95, Rapra Technology Lda., U. K. (1998).
- [3.2] Pultrex Filament Winding Machine Specifications. PULTREX Lda. Clacton-On-Sea, Essex, England (1992).
- [3.3] D. Choen, Y. Toombs, A. Johnson, M. Hansen. Experimental Investigation into the Influence of Filament Winding Parameters on Composite Vessel Quality and Strength. Proceedings of ICCM-10, Whistler, Canada, (1995).
- [3.4] P. Mertiny, F. Ellyin. Influence of the Filament Winding Tension on Physical and Mechanical Properties of Reinforced Composites. Advanced Composite Materials Engineering Group, Department of Mechanical Engineering, 4-9 Mechanical Engineering Building, University of Alberta, Edmonton, AB T6G 2G8, Canada (2002).
- [3.5] R. J. Stango, J. E. Matar, V. Cariapa, W. E. Ryan. Fabrication Parameters for Filament-Wound Composites. Manufacturing Review vol. 4, nº 3, Sept. (1991).
- [3.6] J. F. Silva. Estudo da Resistência à Pressão Interior Após Impacto de Tubagem Produzida por Enrolamento Filamentar. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Tese de Mestrado (1996).



---

## **CAPÍTULO 4**

### **ENSAIOS**

---



## 4 ENSAIOS

Neste capítulo resumem-se os aspectos mais relevantes dos ensaios a que os tubos e placas produzidos em PRFV foram sujeitos. Para além dos ensaios de determinação das fracções mássicas dos constituintes do compósito, os provetes obtidos a partir das estruturas fabricadas foram sujeitos aos seguintes ensaios:

- ensaios 'End-Notched Flexure' (ENF), realizados em amostras retiradas das placas produzidas, e,
- ensaios de impacto de baixa velocidade por queda de peso, realizados em amostras de tubagens.

### 4.1 Ensaio 'End Notched Flexure' - ENF

#### 4.1.1 Introdução

Os materiais compósitos de matriz polimérica são cada vez mais utilizados em aplicações estruturais. Todavia, estes materiais são susceptíveis de sofrer delaminação, isto é, descoesões localizadas entre as camadas que os constituem. A delaminação é particularmente perigosa pois, podendo ser invisível a 'olho nu', pode debilitar consideravelmente as estruturas. Com a determinação da taxa crítica de libertação de energia em modo II ( $G_{IIc}$ ), a partir dos ensaios ENF, pretende-se relacionar esta propriedade com o comportamento ao impacto de tubagem fabricada.

Para realizar os testes ENF de acordo com o Protocolo ESIS para o teste de fractura interlaminar No.2 em modo II, de Novembro de 1988, cortaram-se quatro provetes das placas produzidas por compressão a quente com pré-fenda, tendo sido possível determinar a já referida taxa crítica de libertação de energia ('critical strain energy release rate'-  $G_{IIc}$ ), isto é, a energia necessária para o início da propagação de uma pré-fenda já existente do provete.

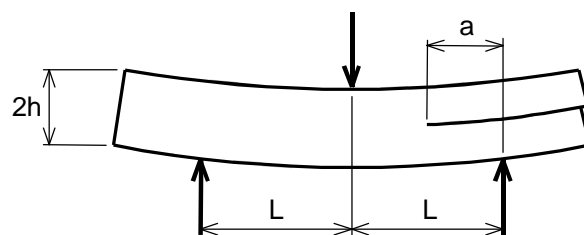
#### 4.1.2 Procedimentos

Para realizar estes ensaios utilizou-se um dispositivo para segurar os provetes, constituído por dois apoios cilíndricos que também é necessário para a realização de ensaios de flexão em três pontos. A máquina de ensaios utilizada foi uma Instron 4208 existente nas instalações do INEGI.

Os provetes para estes ensaio ENF têm uma pré-fenda inicial. Essa fenda é realizada durante o processo de fabrico das placas em material compósito, através da colocação de um filme desmoldante muito fino a meio da espessura da referida placa. O filme desmoldante utilizado foi o Melinex, com espessura nominal de 25  $\mu\text{m}$ .

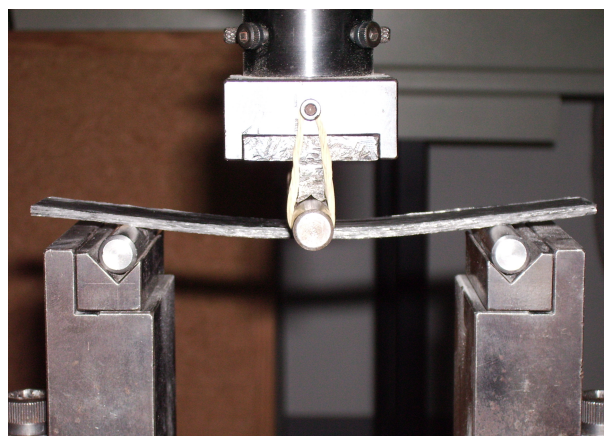
Após o fim do ciclo de fabrico, o filme desmoldante é removido, garantindo-se a existência de um descolamento entre as duas camadas médias da placa (pré-fenda).

Foram utilizados provetes com uma forma rectangular, garantindo-se que eles apresentavam uma geometria final que assegurasse, na sua secção transversal, um largo predomínio das tensões normais derivadas da solicitação de flexão relativamente às tensões de corte desenvolvidas pelo esforço cortante. De facto, um modo de rotura em flexão apenas é garantido em provetes que apresentem valores suficientemente elevados do cociente  $L/h$ , ie, entre a distância entre apoios  $,2L$ , e a espessura do provete,  $2h$  (figura 4.2).



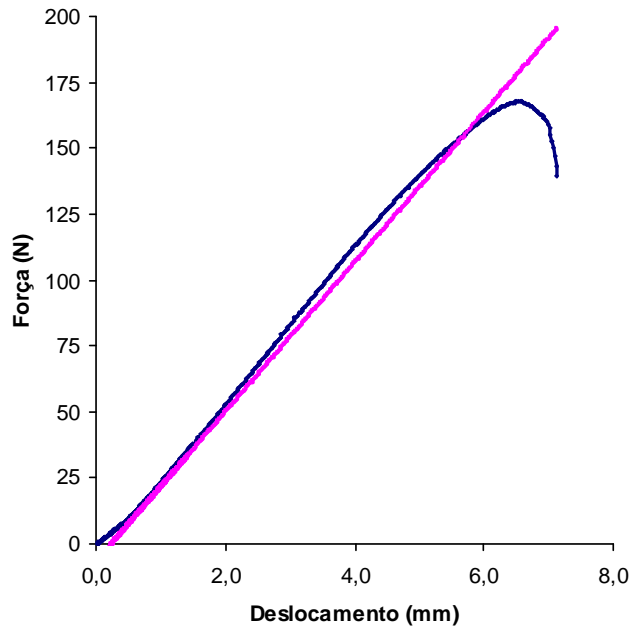
**Figura 4.1.** Esquema do carregamento do provete.

A carga é aplicada a meio do comprimento do provete gerando uma distribuição de tensões que promove a propagação da pré-fenda, neste caso, em modo II. Na figura 4.3 pode observar-se, para um dos provetes ensaiados, o cilindro de aplicação da carga bem como os dois cilindros de apoio.



**Figura 4.2 .** Dispositivo utilizado nos ensaios ENF.

A análise das curvas carga-deslocamento ( $P-\delta$ ) e o conhecimento da medida do comprimento inicial da pré-fenda permitem realizar o cálculo do valor do parâmetro  $G_{IIC}$ . A expressão utilizada para o cálculo é baseada na teoria das vigas utilizando os resultados experimentalmente obtidos. Uma curva típica deste ensaio pode ser vista na figura 4.3.



**Figura 4.3.** Gráfico típico força-deslocamento obtido nos ensaios ENF.

Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, tendo-se utilizado uma célula de carga de 5 kN e uma velocidade de deslocamento de 2 mm/min.

#### **4.1.3 Preparação dos provetes**

Das placas fabricadas em compósito e consolidadas por compressão a quente foram cortados quatro provetes retangulares, segundo a direcção das fibras de reforço, com cerca de 20 mm de largura por 140 mm de comprimento (figura 4.4).



**Figura 4.4.** Corte dos provetes para ensaios ENF.

No geral, a configuração dos provetes deverá ser escolhida de modo a evitar que ocorram grandes deslocamentos e minimizar os efeitos de corte transversal. Contudo, ambos os efeitos podem ser corrigidos, sendo considerados nas equações 4.4, 4.5, e 4.6.

A distância entre suportes utilizada,  $2L$ , foi de 100 mm. A relação entre o comprimento da fenda e metade da distância entre apoios,  $a/L$ , foi aproximadamente de 0,5.

A tabela 4.1 resume os valores encontrados para a geometria dos provetes.

**Tabela 4.1.** Dimensões dos provetes para os ensaios de ENF.

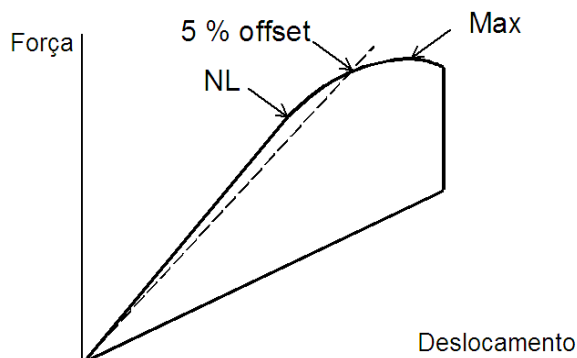
	a (mm)	L (mm)	B (mm)	h (mm)
<b>Provete 1</b>	-	50,0	20,3	2,7
<b>Provete 2</b>	25,0	50,0	20,0	3,0
<b>Provete 3</b>	25,0	50,0	20,9	2,8
<b>Provete 4</b>	25,0	50,0	19,8	2,9

a: comprimento da fenda, L: metade da distância entre apoios, B: largura do provete, h: metade da espessura do provete.

#### 4.1.4 Tecnologia

O critério adoptado para a determinação do ponto inicial de propagação da fenda foi o “5% offset value”. Segundo este critério, a intersecção da curva experimental força-deslocamento com uma linha recta correspondente a um aumento de 5% da ‘compliance’ define o ponto carga-deslocamento (valores de  $P$  e  $\delta$ , respectivamente) da curva experimental correspondente ao início da propagação da fenda (ver figura 4.4).

Nesta figura, NL corresponde ao início da não linearidade entre os valores da força e os do deslocamento.



**Figura 4.4.** Critério “5% offset value”.

No caso do valor da carga máxima ser encontrado para um deslocamento menor do que o encontrado segundo o critério já referido, deverá utilizar-se o valor da carga máxima e o correspondente deslocamento para definição do início da propagação da fenda.

Neste estudo calculou-se o valor de  $G_{IIC}$  utilizando-se as equações obtidas a partir da teoria das vigas “Direct Beam Theory” e também aquelas que resultam da utilização da teoria das vigas corrigidas “Corrected Beam Theory”.

A expressão mais simples que permite o cálculo do valor de  $G_{IIC}$  segundo a teoria das vigas apresenta-se na equação 4.1.

$$G_{IIC} = \frac{9a^2 P \delta}{2B(2L^3 + 3a^3)} \quad \text{Equação 4.1}$$

onde:

- $a$  comprimento da fenda inicial,
- $P$  valor da carga correspondente ao início da propagação da fenda,
- $\delta$  deslocamento correspondente à carga  $P$ ,
- $B$  largura do provete, e,
- $L$  igual a metade da distância entre apoios.

Expressões mais rigorosas que utilizam novamente a teoria de vigas mas com correcções que contemplam os esforços de corte e os grandes deslocamentos serão apresentadas de seguida. Para este caso, é necessário obter experimentalmente o valor do módulo de

elasticidade à flexão, tendo-se utilizando para isso ensaios de flexão em três pontos com provetes sem fenda.

A expressão para o cálculo do valor de  $G_{IIc}$  é, neste caso, a apresentada na equação 4.2.

$$G_{IIc} = \frac{9P a^2}{16B^2 E h^3} \quad \text{Equação 4.2}$$

onde:

$E$  módulo de elasticidade à flexão de provetes sem fenda,

$h$  igual a metade da espessura do provete.

A expressão que permite calcular o módulo de elasticidade à flexão ( $E$ ) é a seguinte:

$$E = \frac{L^3}{4BCh^3} \quad \text{Equação 4.3}$$

onde:

$C$  inclinação da curva carga-deslocamento, ignorando alguma não-linearidade inicial

Para corrigir os valores de  $G_{IIc}$  calculados a partir da expressão 4.2 para contemplar a hipótese de existirem grandes deslocamentos (que serão particularmente importantes se  $\delta/L > 0.2$ ), pode utilizar-se a expressão seguinte:

$$G_{II}^{LD} = G_{II} \left[ \frac{F}{N} \right] \quad \text{Equação 4.4}$$

onde  $F$  e  $N$  são factores de correcção calculados de acordo com as expressões apresentadas de seguida. Estes valores (de  $F$  e de  $N$ ) dependem da relação  $a/L$ , que, no caso deste trabalho, é constante e igual a 0,5. Assim, para  $a/L=0,5$  teremos:

$$F = 1 - (0,6099) \left( \frac{\delta}{L} \right)^2 \quad \text{Equação 4.5}$$

e

$$N = 1 + (0,3766) \left( \frac{\delta}{L} \right)^2 \quad \text{Equação 4.6}$$

No anexo IV apresentam-se as expressões que permitem o cálculo de F e N para valores de  $a/L$  diferentes de 0,5.

## 4.2 Ensaio de impacto de baixa velocidade por queda de peso

### 4.2.1 Introdução

Os tubos produzidos por enrolamento filamentar a partir do Twintex<sup>®</sup> foram submetidos a uma série de ensaios de impacto de baixa velocidade por queda de peso, para a determinação das grandezas físicas mais relevantes no estudo do fenómeno do impacto. Conseguiu-se determinar a evolução da força e velocidade de impacto, da energia absorvida e da deflexão da tubagem.

### 4.2.2 Procedimentos

Os ensaios de impacto por queda de peso foram efectuados numa máquina de impacto por queda de peso Rosand Instrumented Falling Weight Impact Tester Machine, IFW5HV, existente no campus do IST na Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval. A figura 4.5 mostra a máquina de ensaios de impacto por queda de peso utilizada.



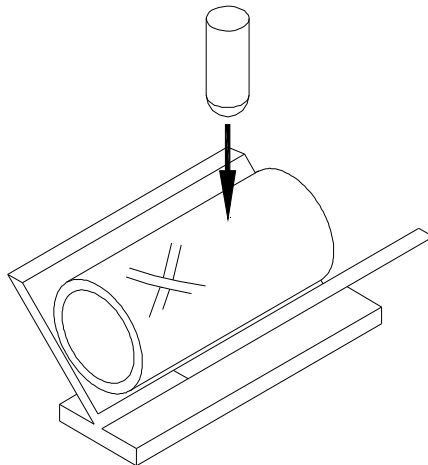
**Figura 4.5.** Máquina de ensaio de impacto por queda de peso.

As características fundamentais deste equipamento são as que a seguir se apresentam [4.1].

- A massa do impactor pode ser alterada por adição de massas de aço. Estão disponíveis dois sistemas, um para massas de 2,853 kg até 10,853 kg podendo ser adicionadas massas (de aço) suplementares de 1 kg cada. Para massas de impactores maiores que os 25 kg podem ser adicionadas massas de aço de 5 kg ou 10 kg, até ao máximo de 75 kg.
- A cabeça do impactor pode ser mudada de acordo com o tamanho e a geometria pretendidos, devendo-se contabilizar sempre a respectiva massa. A geometria mais utilizada nestes ensaios é a hemi-esférica.
- Da conjugação das características acima referidas e considerando que a elevação da massa pode variar entre os 75 mm e os 2000 mm de altura, é possível obter energias de impacto que podem variar entre um mínimo de 2 Joule e um máximo de 1400 Joule.
- Para uma dada massa pode ser especificada a energia de impacto, sendo calculada pelo programa a velocidade de impacto e a altura a que o impactor deve ser colocado para cair por gravidade.

Neste equipamento foram feitos os ensaios de impacto das tubagens produzidas por enrolamento filamental, com um diâmetro interior de 80 mm, uma espessura aproximada de cerca de 3 mm e um comprimento total de 250 mm.

As tubagens foram simplesmente apoiadas num suporte em 'V' conforme se mostra na figura 4.6. Este suporte em 'V', com um ângulo de abertura de 90° e comprimento suficiente para apoiar todo o comprimento útil da tubagem, segue a norma para impacto de tubagens em termoplástico ASTM D 2444. O suporte em 'V' utilizado tinha uma largura de abas de 130 mm, sendo o seu comprimento igual ao da tubagem, 250 mm.



**Figura 4.6.** Sistema de suporte das tubagens para ensaio de impacto.

O ponto de impacto esteve sempre sensivelmente a meio do comprimento da tubagem e transversalmente ao seu eixo longitudinal.

No caso de se pretender simular o comportamento ao impacto de tubagens industriais, as quais têm grandes comprimentos, recorrendo a amostras de tubagem com comprimento reduzido, é necessário evitar o fenómeno de ovalização. Esta ovalização acontece porque o efeito da componente global da flexão provocada pelo impacto ainda se consegue fazer sentir nos topos da amostra da tubagem. Esta situação é tanto mais crítica quanto menor for o comprimento da amostra de tubo a ensaiar, mais baixa for a sua rigidez ou mais elevadas forem as energias de impacto. Uma forma de evitar a referida ovalização é o emprego de peças cilíndricas, colocadas nos topos das tubagens a ensaiar.

No presente estudo foram ensaiadas tubagens com uma elevada rigidez nos topos, sendo as energias de impacto baixas. Por tais motivos, não foram utilizados dispositivos especiais para evitar este fenómeno.

A máquina de impacto está instrumentada com um sensor de força do tipo piezoeléctrico, capaz de medir forças até 20 kN. Neste trabalho o sensor utilizado tinha um fim de escala de 9,529 kN.

Refira-se que os resultados apresentados não são filtrados, embora esteja previsto no software da máquina a possibilidade de aplicação aos valores da força medidos a partir de um filtro do tipo Butterworth de dois pólos. Trata-se de um filtro passa-baixo com uma resposta muito pouco distorcida para as baixas frequências. Com este filtro, as altas frequências (tipicamente ruído eléctrico) poderão ser eliminadas.

Existe neste equipamento um sistema de 'trigger' que permite medir a velocidade do impactor no momento do impacto. Para que a velocidade medida represente correctamente a velocidade do impactor, é necessário ter o cuidado de regular este sistema para cada ensaio. Assim, para cada ensaio o impactor foi aproximado do provete até ficar tangente a este, definindo-se então aí o despoletar do 'trigger' para a medição de velocidade.

Um problema particularmente importante quando se fazem ensaios com valores de energia baixos é o problema da escolha correcta do fim de escala do transdutor de força. De facto, é aconselhável não considerar os valores registados menores que 2% do fim de escala do transdutor seleccionado (no caso deste trabalho cerca de 0,19 kN), pois provavelmente esses valores são ruído, e, por esse facto, não se devem fazer ensaios que apresentem valores significativos de medição de força dentro da faixa de valores mencionada.

Por último, refira-se que este equipamento tem capacidade para guardar 1000 valores da força exercida pelo impactor no provete, em intervalos fixos de 0,002 ms. A conversão do

sinal analógico do transdutor de força para um sinal digital é feita recorrendo a um conversor analógico-digital de 12 bits.

Descrevem-se, de seguida, os ensaios de impacto efectuados nas tubagens. De acordo com o procedimento referido pelas normas de impacto em tubagem, é usual começar por fazer-se uma série de ensaios preliminares de impacto para determinar as energias de impacto a utilizar nos testes finais. Dividimos, assim, os testes de impacto em ensaios preliminares e ensaios finais. Nos ensaios preliminares das tubagens procedemos a um conjunto de ensaios para teste das energias a utilizar posteriormente. Para uma dada energia verificamos se o interior da tubagem era afectado ou não. Foi unicamente testado um tubo por cada valor de energia e o fim de escala foi sempre igualado a 9,529 kN.

A verificação da existência de dano no interior da tubagem fez-se por simples inspecção visual. Concluiu-se que somente para valores de energia de impacto inferiores a 12 Joule não se verifica dano aparente na superfície interior da tubagem ensaiada. Para valores de energia superiores a 15 Joule observou-se já dano na superfície interior dos tubos ensaiados.

A energia de impacto pode ser obtida pela expressão seguinte (equação 4.7):

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2 \quad \text{Equação 4.7}$$

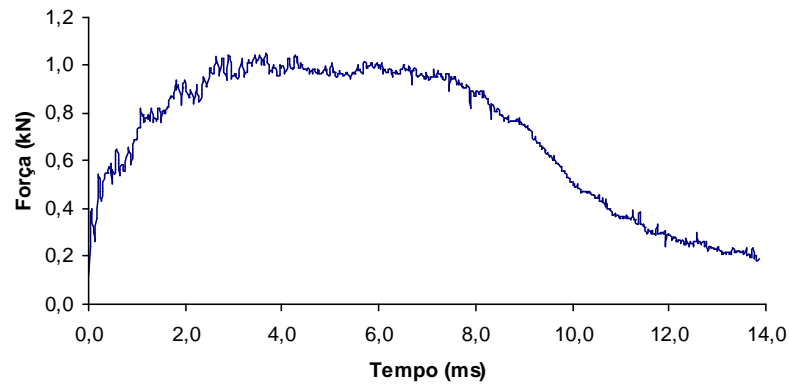
Os ensaios de impacto finais foram efectuados em duas séries de tubos, série 1 (ensaios a 10 Joule) e série 2 (ensaios a 12 Joule), utilizando-se sempre o mesmo impactor hemisférico com a massa de 2,853 kg.

Na tabela 4.2, estão referenciadas as tubagens ensaiadas, bem como os respectivos valores da energia de impacto e da massa do impactor utilizadas.

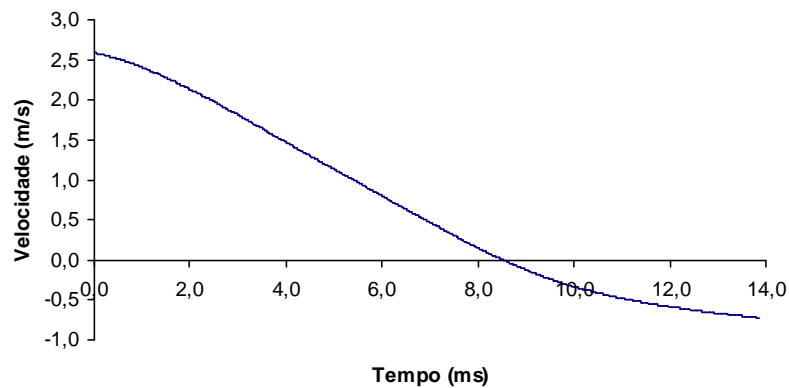
**Tabela 4.2.** Tubagens sujeitas ao ensaio de impacto.

Referência dos Tubos	Energia de impacto (J)	Massa do impactor (kg)
T1	10	2.853
T2		
T4		
T3		
T5	12	2.853
T6		
T7		
T8		

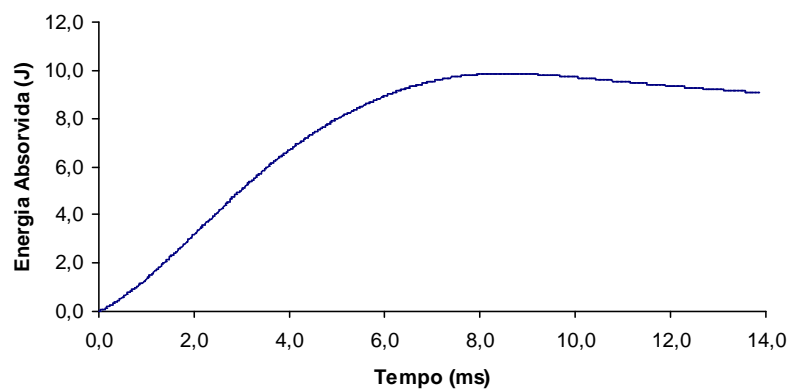
Todas as grandezas físicas importantes para o estudo do fenómeno do impacto, tais como, a velocidade de impacto (curva típica mostrada na figura 4.7b.), a energia absorvida (curva típica mostrada na figura 4.7c.) e a deflexão da tubagem (curva da figura 4.7d.), foram obtidas através de cálculos feitos com base nos valores de força medidos (curva típica da figura 4.7a.) pelo sensor de força com o qual a máquina de impacto está instrumentada.



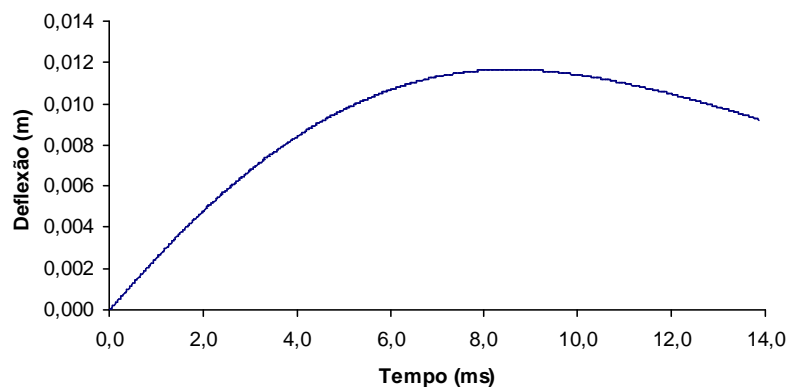
**Figura 4.7a.** Gráfico típico força-tempo.



**Figura 4.7b.** Gráfico típico velocidade-tempo.



**Figura 4.7c.** Gráfico típico energia-tempo.



**Figura 4.7d.** Gráfico típico deflexão-tempo.

Os resultados obtidos nestes ensaios serão discutidos no capítulo V (resultados e conclusões).

### 4.2.3 Cálculo das grandezas físicas relevantes

Nos pontos seguintes observa-se como foi feito o cálculo das grandezas físicas mais relevantes no estudo do impacto de baixa velocidade [4.2].

#### 4.2.3.1 Velocidade

A velocidade foi calculada por integração da aceleração ao longo do tempo. Esta integração foi feita segundo a regra do trapézio, sendo dada pela expressão seguinte:

$$v_i = v_{i-1} + t \times \left( g - \frac{F_i + F_{i-1}}{2m} \right) \quad \text{Equação 4.8}$$

onde,

$v_i$  velocidade no instante  $i$ ,

$v_{i-1}$  velocidade no instante anterior  $i-1$ ,

$t$  tempo,

$g$  aceleração da gravidade,

$F_i$  força no instante  $i$ ,

$F_{i-1}$  força no instante  $i-1$ , e,

$m$  massa do impactor.

#### 4.2.3.2 Deflexão

A deflexão (deslocamento do impactor a partir do momento de impacto) pode ser calculada por integração da velocidade ao longo do tempo:

$$d_i = d_{i-1} + t \times v_{i-1} \quad \text{Equação 4.9}$$

onde,

$d_i$  deslocamento no instante  $i$ ,

$d_{i-1}$  deslocamento no instante  $i-1$ ,

$t$  tempo, e,

$v_{i-1}$  velocidade no instante  $i-1$  (anterior a  $i$ ).

#### 4.2.3.3 Energia de Impacto

O cálculo da energia foi efectuado pela integração numérica da força ao longo da deflexão.

$$e_i = e_{i-1} + \frac{(d_i - d_{i-1})(F_i + F_{i-1})}{2} \quad \text{Equação 4.10}$$

onde,

$e_i$  energia no instante  $i$ ,

$e_{i-1}$  energia no instante  $i-1$ ,

$d_i$  deslocamento no instante  $i$ ,

$d_{i-1}$  deslocamento no instante  $i-1$ ,

$F_i$  força no instante  $i$ , e,

$F_{i-1}$  força no instante  $i-1$ .

### 4.3 Determinação de fracções mássicas e volúmicas

Tanto nas placas produzidas por compressão como nos tubos produzidos por enrolamento filamental, a fracção mássica de fibras foi determinada por ensaios de calcinação de acordo com a norma NP 2216/ISO 1172. Usou-se um provete por cada ensaio, e seguiu-se o procedimento abaixo descrito.

Secaram-se os cadinhos e os provetes numa estufa a 50 °C, até que duas pesagens sucessivas, com diferença temporal de 30 minutos, não diferissem mais do que 1 mg. Pesaram-se os cadinhos numa balança com precisão de 0,01 mg, tendo-se designado a massa inicial de cada cadinho por  $m_1$ .

Cada provete seco foi, então, colocado num cadinho também ele seco previamente, pesando-se o conjunto na mesma balança referida anteriormente, designando-se a massa obtida por  $m_2$ .

De seguida, aqueceu-se, lentamente, o conjunto provete e cadinho até 625 °C numa mufla, até que toda a matéria orgânica tivesse desaparecido e restasse apenas um resíduo de fibras. Após arrefecimento num exsiccador até à temperatura ambiente, o cadinho com o resíduo foi pesado. Designando a massa obtida para o cadinho com resíduo por,  $m_3$ , a fracção mássica de fibras,  $w_f$ , foi calculada através de:

$$w_f = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \quad \text{Equação 4.11}$$

Os valores das propriedades elásticas da camada podem ser calculadas a partir das constantes elásticas da fibra de reforço e da matriz bem como das respectivas fracções volúmicas.

A expressão seguinte permite calcular a fracção volúmica de fibras a partir da respectiva fracção mássica:

$$v_f = \frac{w_f \rho_p (1 - v_v)}{\rho_f + w_f (\rho_p - \rho_f)} \quad \text{Equação 4.12}$$

onde,

- $v_f$  fracção volúmica das fibras,
- $w_f$  fracção mássica (ou ponderal) de fibras,
- $\rho_f$  densidade das fibras,
- $\rho_p$  densidade da matriz,
- $v_v$  representa o teor em vazios.

A fracção mássica de polímero,  $w_p$ , pode ser obtida pela expressão  $w_p = (1 - w_f)$ . Se o teor de vazios não for significativo, pode simplificar-se a expressão anterior, e considerar-se  $v_v = 0$ .

#### **4.4 Referências bibliográficas**

- [4.1] Rosand Precision Impact Tester. Operators Manual. Rosand Precision Lda, West Midlands, England.
- [4.2] Rosand Precision Impact Tester. Software Manual, version 1.3. Rosand Precision Lda, West Midlands, England.



---

## **CAPÍTULO 5**

### **RESULTADOS OBTIDOS E CONCLUSÕES**

---



## **5 RESULTADOS OBTIDOS E CONCLUSÕES**

Este capítulo encontra-se dividido em três partes:

- resultados dos ensaios de impacto;
- resultados dos ensaios de “End-Notched Flexure” – ENF;
- cálculo da área delaminada.

No primeiro sub-capítulo, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de impacto a diferentes energias (10 J e 12 J, respectivamente) e discutem-se os mesmos. Faz-se também uma comparação dos resultados obtidos com os valores obtidos para outros sistemas compósitos.

No segundo sub-capítulo, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos nos ensaios de “End-Notched Flexure” - ENF. À semelhança do sub-capítulo anterior, faz-se também uma comparação dos resultados obtidos com os resultados já conhecidos de outros compósitos.

No terceiro sub-capítulo estima-se o valor da área afectada pelo dano de impacto (área delaminada). A determinação experimental da área delaminada em tubos idênticos ao deste trabalho, foi já publicada [5.1]. Utiliza uma montagem de um sistema de interferometria óptica “Electronic Speckle Pattern Interferometry” (ESPI) para determinar a zona afectada pelo impacto (dano). A área delaminada também foi calculada segundo o exposto por [5.2], estabelecendo-se uma correlação entre o valor da energia absorvida (obtido a partir dos ensaios de impacto) e a taxa crítica de libertação de energia em modo II (obtida a partir dos ensaios ENF). Fez-se ainda uma comparação com resultados de outros compósitos de matriz termoendurecível já conhecidos.

### **5.1 Resultados dos ensaios de impacto**

#### **5.1.1 Resultados obtidos**

Os resultados obtidos do ensaio de impacto por queda de peso a baixa velocidade encontram-se coligidos nas tabelas 5.1 e 5.2. Utilizaram-se duas energias de impacto: 10 e 12 J.

**Tabela 5.1.** Resultados obtidos nos ensaios de impacto com energia de 10 J.

<b>Energia=10J</b>	<b>F<sub>máx</sub></b> <b>(kN)</b>	<b>Tempo<sub>(F<sub>máx</sub>)</sub></b> <b>(ms)</b>	<b>E<sub>absorv máx</sub></b> <b>(J)</b>	<b>E<sub>absorv (F<sub>máx</sub>)</sub></b> <b>(J)</b>	<b>Vel impacto</b> <b>(m/s)</b>	<b>Deflexão<sub>máx</sub></b> <b>(m)</b>
<b>T1e10</b>	1,046	3,66	9,87	6,17	2,5835	0,012
<b>T2e10</b>	1,030	2,54	9,80	4,30	2,5737	0,012
<b>T3e10</b>	1,049	3,68	9,80	6,06	2,5737	0,012
<b>T4e10</b>	1,100	5,18	9,85	8,50	2,5835	0,011
<b>Média</b>	<b>1,056</b>	<b>3,77</b>	<b>9,83</b>	<b>6,26</b>	<b>2,5786</b>	<b>0,012</b>
<b>DesvPad</b>	<b>0,030</b>	<b>1,08</b>	<b>0,04</b>	<b>1,72</b>	<b>0,0057</b>	<b>0,0005</b>

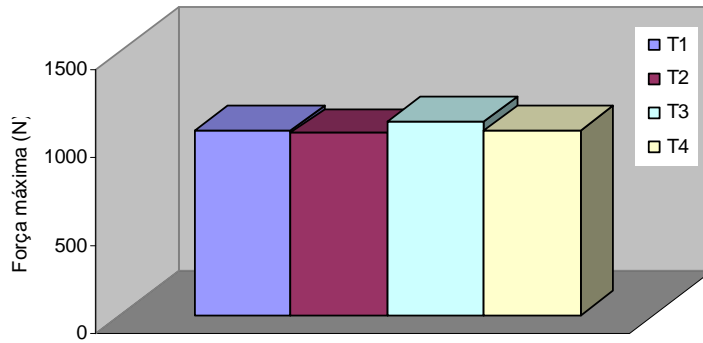
Como se pode estimar da tabela 5.1, a diferença entre a energia do ensaio (10 J) e a que foi devolvida ao impactor (energia recuperada) é de cerca de 0,17 J. Esta energia foi utilizada na criação do dano de impacto. Neste ensaio a força máxima de impacto registada foi de cerca de 1,056 kN.

**Tabela 5.2.** Resultados obtidos nos ensaios de impacto com energia de 12 J.

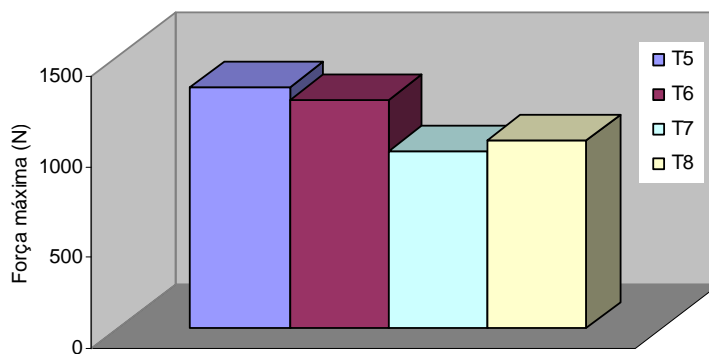
<b>Energia=12J</b>	<b>F<sub>máx</sub></b> <b>(kN)</b>	<b>Tempo<sub>(F<sub>máx</sub>)</sub></b> <b>(ms)</b>	<b>E<sub>absorv máx</sub></b> <b>(J)</b>	<b>E<sub>absorv (F<sub>máx</sub>)</sub></b> <b>(J)</b>	<b>Vel impacto</b> <b>(m/s)</b>	<b>Deflexão<sub>máx</sub></b> <b>(m)</b>
<b>T5e12</b>	1,338	3,50	11,99	8,27	2,8576	0,011
<b>T6e12</b>	1,261	4,24	12,02	9,08	2,8576	0,012
<b>T7e12</b>	0,986	3,50	11,56	6,68	2,8698	0,015
<b>T8e12</b>	1,047	3,66	9,87	6,17	2,5835	0,012
<b>Média</b>	<b>1,158</b>	<b>3,725</b>	<b>11,36</b>	<b>7,5500</b>	<b>2,7921</b>	<b>0,013</b>
<b>DesvPad</b>	<b>0,168</b>	<b>0,3515</b>	<b>1,0153</b>	<b>1,3565</b>	<b>0,1392</b>	<b>0,0017</b>

A análise dos resultados da tabela 5.2, obtidos com uma energia de impacto de 12 J, permite estimar o valor da energia utilizada na criação do dano de impacto em 0,64 J. Neste caso, a força máxima de impacto registada foi de cerca de 1,056 kN.

Os valores da força de impacto máxima obtida nas duas séries de tubos ensaiados estão representados nas figuras 5.1a e 5.1b.



**Figura 5.1a.** Força máxima obtida na série de tubagens ensaiadas a 10 J.



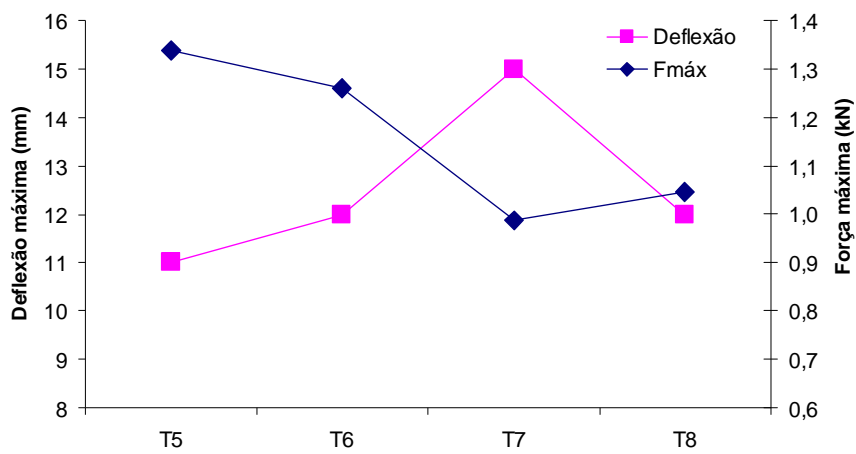
**Figura 5.1b.** Força máxima obtida na série de tubagens ensaiadas a 12 J.

Da observação da figura 5.1a. pode concluir-se que as diferenças em termos de força máxima de impacto não são significativas, apresentando a tubagem com a referência T4 o valor mais elevado da força de impacto. Relativamente à tubagem que apresentou o valor mais baixo para a força de impacto (tubagem referência T2), a diferença de valores, para este parâmetro, é de cerca de 8%.

Na figura 5.1b, pode verificar-se que as diferenças entre as tubagens ensaiadas a 12 J, em termos de força máxima de impacto, já são significativas. A diferença entre o valor máximo da força de impacto (obtido no ensaio da tubagem com a referência T5) e o valor mínimo (obtido no ensaio da tubagem com a referência T7) é, neste caso, de cerca de 35%.

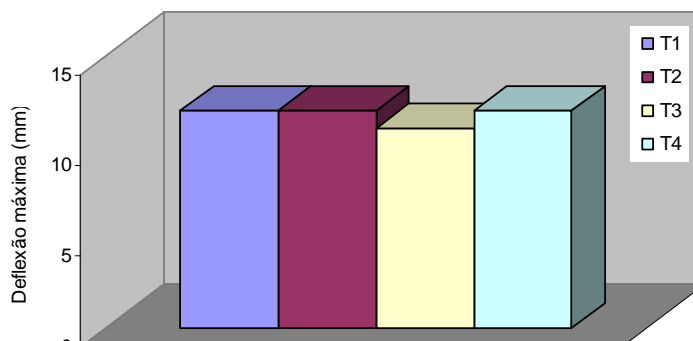
Em termos de deformação das tubagens no ensaio de impacto (deflexão localizada na zona do impacto), verifica-se que não se observam diferenças significativas no comportamento das tubagens ensaiadas a 10 J. A análise das deformação das tubagens ensaiadas a 12 J evidencia uma relação entre a força de impacto e este parâmetro. A tubagem que registou o maior valor para a força máxima de impacto é aquela que apresenta uma menor deformação. Por outro lado, a tubagem para a qual se registou o

menor valor da força de impacto é aquela que apresenta um maior valor de deformação. A figura 5.2 evidencia este comportamento.

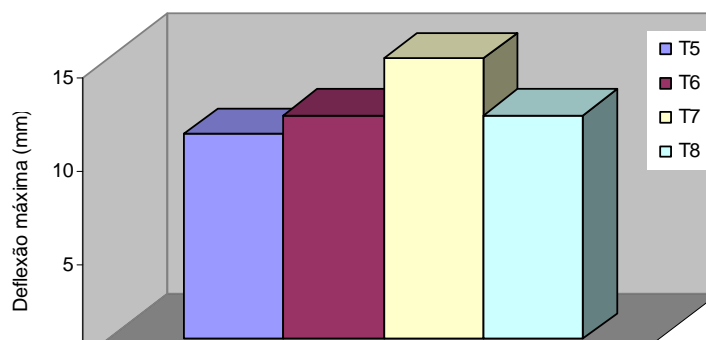


**Figura 5.2.** Força máxima e deflexão máxima obtidas na série de tubagens ensaiadas a 12 J.

As figuras seguintes, 5.3a e 5.3b, apresentam de uma forma gráfica o valor da deformação máxima (deflexão máxima na zona do impacto) produzida para os diferentes tubos ensaiados.



**Figura 5.3a.** Deflexão máxima obtida na série de tubagens ensaiadas a 10 J.



**Figura 5.3b.** Deflexão máxima obtida na série de tubagens ensaiadas a 12 J.

Nos cálculos realizados para a determinação da deformação das tubagens ensaiadas, considerou-se a curvatura destas negligenciável. Este pressuposto será tanto melhor cumprido quanto maior for o diâmetro da tubagem. Neste caso, o diâmetro médio das tubagens ensaiadas tinha 83 mm, para um diâmetro do impactor de 20 mm.

### 5.1.2 Estimativa da força máxima de impacto

Frost [5.2] determinou a força máxima de impacto, utilizando para o cálculo a equação 5.1, de acordo com Robinson and Davis [5.3].

$$P_m = \sqrt{G_{IIc} \frac{8\pi^2 E_{av} e^3}{9(3 + \nu_{av})(1 - \nu_{av})}} \quad \text{Equação 5.1}$$

onde,

$P_m$  força máxima de impacto (N),

$G_{IIc}$  taxa crítica de libertação de energia em modo II (J/m<sup>2</sup>),

$E_{av}$  módulo de elasticidade médio (GPa),

$e$  espessura (mm),

$\nu_{av}$  coeficiente de *Poisson* médio.

Os valores médios, do módulo de elasticidade e do coeficiente de “Poisson”, podem ser calculados através das equações 5.2 e 5.3, respectivamente. No entanto, neste trabalho, tendo em consideração que o módulo de elasticidade médio e o coeficiente de “Poisson” médio são valores que dependem da rigidez do reforço e da matriz, principalmente dos valores do material de reforço, utilizou-se para aplicação na equação 5.1, os valores obtidos num outro estudo [5.4], onde o material estudado utilizou também a fibra de vidro como material de reforço da matriz.

$$E_{av} = \left( E_{axial} \times E_{hoop}^3 \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{Equação 5.2}$$

onde,

$E_{av}$  módulo de elasticidade médio (GPa),

$E_{axial}$  módulo de elasticidade axial (GPa),

$E_{hoop}$  módulo de elasticidade circunferencial (GPa).

$$\nu_{av} = \frac{(\nu_{axial} + \nu_{hoop})}{2} \quad \text{Equação 5.3}$$

onde,

$\nu_{av}$  coeficiente de *Poisson* médio,

$\nu_{axial}$  coeficiente de *Poisson* axial,

$\nu_{hoop}$  coeficiente de *Poisson* circunferencial.

A aplicação da equação 5.1 encontra-se resumida na tabela 5.3.

**Tabela 5.3.** Cálculo da força máxima de impacto de acordo com a equação 5.1.

$G_{IIC}$ (J/m <sup>2</sup> )	$E_{av}$ (GPa)	$e$ (mm)	$\nu_{av}$	$P_m$ (N)
383,9	18	2,9	0,21	763

Os valores médios da força máxima de impacto, obtidos experimentalmente nos ensaios de impacto por queda de peso a baixa velocidade, a 10 e 12 J de energia, foram de  $1056 \pm 30$  e  $1158 \pm 168$  respectivamente. Pela observação da tabela 5.3, verifica-se que o valor estimado da força máxima de impacto é de 763 N, aproximadamente 72 e 66% dos valores obtidos experimentalmente. Este resultado, embora não totalmente satisfatório, permite realizar de uma maneira simples uma estimativa da força de impacto.

### 5.1.3 Comparação com outros compósitos

A tabela 5.4. permite comparar os resultados obtidos através dos ensaios de impacto das tubagens em compósito produzidas neste trabalho com os resultados obtidos de [5.1] em tubagens idênticas (mesma geometria e empilhamento de camadas), fabricadas com o mesmo reforço, mas com matriz termoendurecível (resina de poliéster ortoftálico).

**Tabela 5.4.** Comparação de resultados de ensaios de impacto (10 J) em tubagens.

Compósito	$F_{m\acute{a}x}$ (GPa)	$E_{absorv} (F_{m\acute{a}x})$ (J)	Vel impacto (m/s)
Vidro/Polipropileno	1,06±0,03	6,30±1,7	2,58±0,006
Vidro/Poliéster	0,75±0,1	5,0±0,6	2,57±0,006

Pela leitura da tabela 5.4, constata-se que as tubagens produzidas com uma matriz termoplástica apresentam um valor da força máxima de impacto mais elevado do que as tubagens de matriz termoendurecível. Este comportamento, pode levar a concluir que estas tubagens terão uma maior rigidez do que as tubagens de matriz termoendurecível, conforme se pode observar pela figura 5.2.

Também, se verifica, relativamente à energia absorvida, um valor mais elevado para as tubagens com matriz termoplástica. Este comportamento deixa antever que este tipo de tubagens resistirá melhor ao dano de impacto, isto é, terá um dano de impacto com menor área delaminada do que as tubagens de matriz termoendurecível.

## 5.2 Resultados dos ensaios 'End Notched Flexure' - ENF

### 5.2.1 Resultados obtidos

Os resultados obtidos do ensaio ENF são apresentados na tabela 5.5.

**Tabela 5.5.** Resultados obtidos nos ensaios ENF.

	<b>a</b> (mm)	<b>L</b> (mm)	<b>B</b> (mm)	<b>H</b> (mm)	<b>G<sub>IIc</sub></b> (J/m <sup>2</sup> )	<b>G<sub>IIc corr</sub></b> (J/m <sup>2</sup> )	<b>G<sub>IIc corr GD</sub></b> (J/m <sup>2</sup> )
Provete 1	-	50	20,3	2,7	-	-	-
Provete 2	25	50	20,0	3	830,8	700,7	683,9
Provete 3	25	50	20,9	2,8	409,9	387,7	382,7
Provete 4	25	50	19,8	2,9	294,7	231,0	228,6
<b>Média</b>	-	-	20,3	2,85	383,9	329,9	323,8
<b>Desvio Pad</b>	-	-	0,5	0,13	344,4	294,1	287,0

O provete 1, ensaiado sem qualquer pré-fenda, foi utilizado para o cálculo do módulo de elasticidade do material. Nesta tabela, o valor da taxa crítica de libertação de energia em modo II ( $G_{IIc}$ ), calculado de acordo com a equação 4.1 é mostrado na sexta coluna. Na sétima coluna da tabela 5.5 apresenta-se o valor da taxa crítica de libertação de energia em modo II, corrigido para os esforços de corte de acordo com a equação 4.2.

Na oitava e última coluna o valor da taxa crítica de libertação de energia em modo II é calculado de acordo com a equação 4.4, que contempla a correcção para o caso de existirem grandes deslocamentos.

Como se pode verificar da análise da tabela 5.5, existe uma grande discrepância entre os valores obtidos para a taxa crítica de libertação de energia em modo II nos três provetes ensaiados. Este facto é evidenciado pelo elevado valor que se obteve para o desvio-padrão. Comparando os três cálculos da taxa crítica de libertação de energia, pode constatar-se que o valor mais elevado deste parâmetro é obtido quando não se consideram as correcções já referidas. No entanto, a utilização de factores de correcção no cálculo do valor da taxa crítica de libertação de energia não altera significativamente o valor deste parâmetro.

## 5.2.2 Comparação com outros compósitos

A tabela 5.6 compara o valor da taxa crítica de libertação de energia em modo II do material deste trabalho com o de outros compósitos com reforços de fibras de vidro.

**Tabela 5.6.** Comparação de resultados do ensaio de ENF de diferentes compósitos [5.1].

<b>Compósito</b>	<b><math>G_{IIc}</math> (kJ/m<sup>2</sup>)</b>
Twintex <sup>®</sup> (FV/PP)	0,384±0,34
Vidro/Poliéster	2,50±0,1

Como se pode observar na tabela 5.6, a fibra de vidro com poliéster exhibe os valores mais elevados do  $G_{IIc}$ .

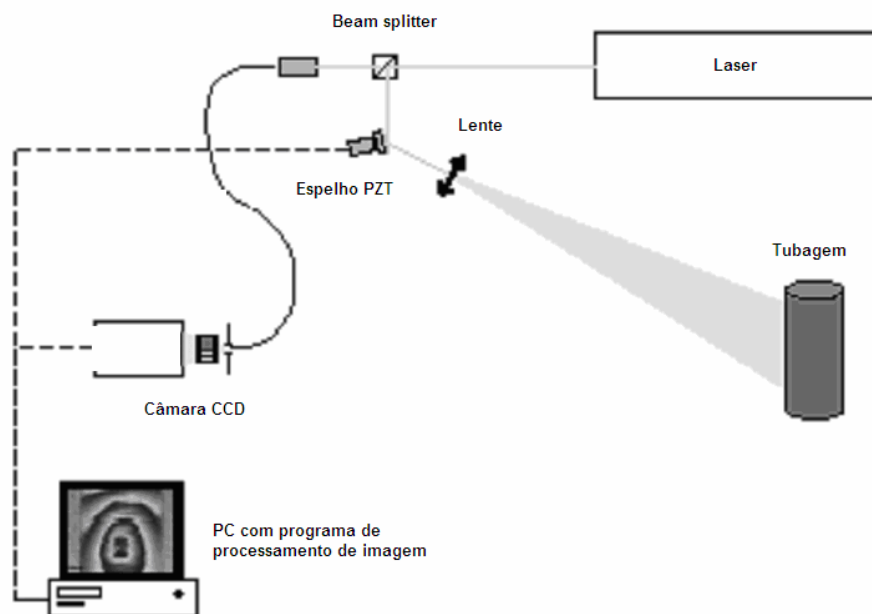
Note-se que apesar dos tubos produzidos a partir do Twintex<sup>®</sup> apresentarem um valor de  $G_{IIc}$  bastante inferior ao dos tubos produzidos com uma matriz termoendurecível, a área delaminada nestes últimos é muito elevada. Assim, os tubos produzidos a partir do Twintex<sup>®</sup> apresentam uma tolerância ao dano superior a tubos produzidos com uma matriz de poliéster. Este aspecto, poderá estar relacionado com uma consolidação incompleta do polipropileno, havendo, por isso, uma fraca adesão do polímero com as fibras, o que poderá permitir uma maior dissipação da energia de impacto, sem que ocorra delaminação.

## 5.3 Determinação experimental da área delaminada

### 5.3.1 Electronic Speckle Pattern Interferometry' - ESPI

As tubagens produzidas neste trabalho que foram submetidas a ensaios de impacto foram, fora do âmbito desta tese, submetidas a ensaios utilizando-se uma técnica denominada ESPI – ‘Electronic Speckle Pattern Interferometry’, para determinação da área delaminada na zona do impacto. Nestes tubos, a matriz não é translúcida e portanto não é possível determinar, por simples inspeção visual, a área delaminada, sendo necessário recorrer a outras técnicas [5.2].

A figura 5.4 representa esquematicamente a montagem de ESPI utilizada para a determinação da área delaminada nas tubagens ensaiadas.



**Figura 5.4.** Representação esquemática do ensaio ESPI.

Com esta técnica, consegue guardar-se informação, sob a forma de um holograma, da fase da luz reflectida por um objecto, resultante da interferência entre duas ondas (uma de referência e a outra que iluminou o objecto a estudar depois de ser solicitado).

Quando o objecto a estudar (amostra de tubo) é solicitado (neste trabalho a solicitação consistiu no aquecimento da zona a estudar com um secador de ar quente), produz-se e guarda-se informação de um novo holograma, sendo possível ressaltar-se a muito pequena deformação do tubo na zona delaminada, por correlação dos dois hologramas referidos.

A correlação resulta num ‘interferograma’ constituído por um conjunto de franjas de interferometria. Estas franjas representam pontos com o mesmo deslocamento, sendo a

distância entre duas franjas adjacentes igual a metade do comprimento de onda da luz do LASER utilizado (no trabalho referido, o LASER utilizado gerou uma luz coerente com um comprimento de onda de aproximadamente 532 nm) [5.5].

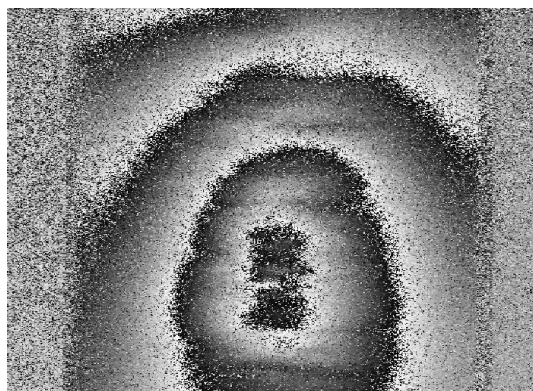
As imagens obtidas com esta técnica foram posteriormente processadas digitalmente. Para a obtenção do mapa de fase de cada franja de interferometria foram utilizadas técnicas de diferença de fase temporal. O espelho (ver figura 5.4) foi montado num transdutor piezoelétrico (PZT) e utilizado para modular a fase dos padrões de franjas que, em combinação com técnicas de processamento de imagem, permitiram o cálculo da distribuição da fase nas três dimensões espaciais.

Para o cálculo da fase de cada pixel, foi utilizado um algoritmo especial que utiliza quatro imagens com informação da fase, permitindo a obtenção do mapa de fase.

Na figura 5.5 pode ver-se a zona a inspeccionar correspondente à parte da tubagem onde se deu o impacto. Na figura 5.6 mostra-se o mapa de fase ESPI, revelando a zona com defeito (área delaminada).

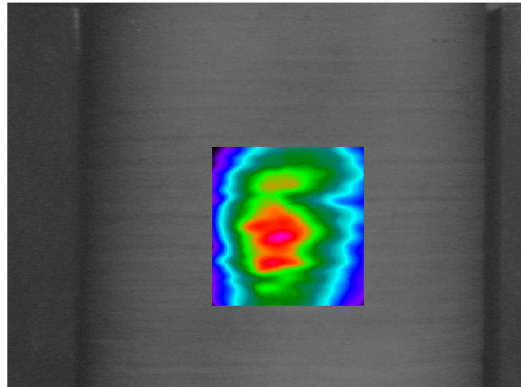


**Figura 5.5.** Área a inspeccionar.



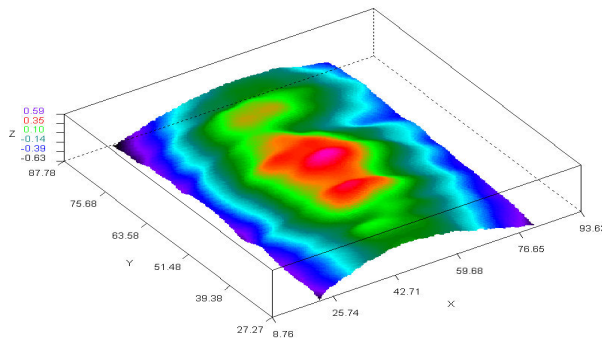
**Figura 5.6.** Zona evidenciando a área delaminada.

Os resultados obtidos foram posteriormente processados usando algoritmos dedicados. Na figura 5.7 mostra-se a zona com defeito após filtragem e remoção de todos os movimentos de corpo rígido. Pode ver-se ainda que na zona do impacto os deslocamentos são elevados (cor vermelha). A cor azul representa as zonas da tubagem com menores valores de deslocamento.



**Figura 5.7.** Área delaminada.

Na figura 5.8, apresenta-se uma imagem tridimensional do campo de deslocamentos da zona da tubagem com o defeito. Como se pode observar nota-se claramente uma zona aproximadamente elíptica que delimita a área de dano.



**Figura 5.8.** Representação 3D da área delaminada.

Com a técnica descrita foi possível determinar um valor correspondente à área afectada pelo dano de impacto. O valor determinado foi de, aproximadamente 452 mm<sup>2</sup>.

### 5.3.2 Estimativa do valor da área delaminada

A delaminação entre camadas que compõem uma estrutura de um laminado compósito verifica-se quando existe um valor significativo do movimento relativo entre elas. Isso

acontece quando as diferentes camadas de um laminado compósito estão sujeitas a diferentes tensões.

Segundo Frost [5.2], pode-se estabelecer uma correlação entre o valor da energia absorvida (obtidos a partir dos ensaios de impacto) e a taxa crítica de libertação de energia em modo II (obtida a partir dos ensaios ENF), para a avaliação da área de impacto de estruturas em material compósito. Este autor utilizou a referida abordagem para calcular o dano de tubagens obtidas por enrolamento filamentar, utilizando a equação 5.2.

$$E_a = G_{IIc} (n_p - 1) A_d \quad \text{Equação 5.2}$$

onde,

$E_a$  energia absorvida (J),

$G_{IIc}$  taxa crítica de libertação de energia em modo II (J/m<sup>2</sup>),

$n_p$  número de camadas da tubagem,

$A_d$  área delaminada (m<sup>2</sup>).

A aplicação da equação 5.2 pode ser resumida na tabela 5.7.

**Tabela 5.7.** Cálculo da delaminação de acordo com a equação 5.2.

$E_a$ (J)	$G_{IIc}$ (J/m <sup>2</sup> )	$n_p$	$A_d$ (m <sup>2</sup> )
0,17	383,85	4	0,000148
0,64	383,85	4	0,000556

O cálculo da delaminação foi feito utilizando os valores médios dos resultados obtidos nos ensaios de ENF e de impacto, para energias de impacto de 10 J e 12 J. Os valores calculados foram de 148 mm<sup>2</sup> e 556 mm<sup>2</sup>, respectivamente.

Como seria de esperar, a área delaminada aumenta com o aumento da energia de impacto.

### 5.3.3 Comparação com outros compósitos de matriz termoendurecível

Os resultados obtidos com a técnica de ESPI permitiram a determinação das áreas danificadas nos tubos de Twintex<sup>®</sup>. Para os tubos de fibra de vidro com poliéster, a

extensão dos danos foi avaliada por simples inspecção visual, uma vez que o material é translúcido.

**Tabela 5.8.** Áreas delaminadas obtidas.

Área Delaminada	Unidade	Twintex <sup>®</sup>	FV/Poliéster
Experimental	mm <sup>2</sup>	452	1850
Calculada		148	667

Os valores calculados assumem uma relação linear para a energia absorvida entre o parâmetro de  $G_{IIC}$  e as áreas danificadas.

## 5.4 Conclusões gerais

Com este trabalho, pretendeu-se, através da utilização de tecnologias que possibilitam a transformação de pré-impregnados de matriz termoplástica, alargar o campo de aplicações dos termoplásticos reforçados com fibras longas aos mercados de grande consumo.

Após ter-se seleccionado um termoplástico com fibra de vidro, Twintex<sup>®</sup>, como matéria-prima a utilizar, estudou-se a transformação deste através de duas tecnologias convencionais, o enrolamento filamentar e a compressão a quente.

Realizaram-se ensaios que permitiram estudar o dano em tubagens produzidas a partir do pré-impregnado referido.

As principais conclusões resultantes do estudo efectuado são as seguintes:

- os pré-impregnados são indicados para processos produtivos que apresentem ciclos de transformação muito rápidos, tais como, o enrolamento filamentar;
- a temperatura de pré-aquecimento e a velocidade de rotação do mandril são parâmetros que devem ser controlados e ajustados no enrolamento filamentar para melhor comportamento dos compósitos fabricados e boa flexibilidade de produção;
- o cálculo da força máxima de impacto através de expressões analíticas dá resultados indicativos, podendo o erro ser relativamente elevado;
- os compósitos produzidos a partir do pré-impregnado Twintex<sup>®</sup> apresentam melhor tolerância ao dano do que o tradicional FV/Poliéster;

O ensaio de ESPI pode ser usado para determinar as áreas delaminadas em compósitos de polipropileno reforçados com fibra de vidro.

## 5.5 Referências bibliográficas

- [5.1] J. F. Silva, S. M. Correia, J. Monteiro, J. P. Nunes, A. T. Marques. Study of Damage in Filament Wound Thermoplastic Matrix Composite Pipes. 10<sup>th</sup> Euro-Japanese Symposium, 26 - 27 September, Ueda (2007).
- [5.2] S. R. Frost, A. Cervenka. Glass Fibre-Reinforced Epoxy Matrix Filament-Wound Pipes for use in the oil industry. Composite Manufacturing, Vol 5, N<sup>o</sup>2, (1994).
- [5.3] P. Robinson, G. A. O. Davies. Predicting Failure by Debonding and Delamination. AGARD 74<sup>th</sup> Structures and Materials Meeting. Greece (1992).
- [5.4] J. F. Silva. Estudo da Resistência à Pressão Interior Após Impacto de Tubagem Produzida por Enrolamento Filamentar. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Tese de Mestrado (1996).
- [5.5] J. M. Burch. Holographic Measurement of Displacement and Strain. Journal of Strain Analysis, vol. 9, n<sup>o</sup> 1 (1974).

---

## **CAPÍTULO 6**

### **SÍNTESE E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

---



## **6 SÍNTESE E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

### **6.1 Síntese**

Neste trabalho foram ensaiadas ao impacto por queda de peso a energias distintas tubagens em polipropileno reforçado com fibras de vidro produzidas por enrolamento filamentar. Foram também realizados ensaios de 'End-Notched Flexure' a provetes extraídos de placas produzidas em termoplástico reforçado com fibras consolidadas por compressão a quente. Os dados obtidos experimentalmente foram comparados com outros, obtidos experimentalmente de compósitos fabricados em poliéster reforçado com fibras de vidro [6.1].

### **6.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Em trabalhos futuros sugerimos que sejam estudados ou aprofundados os seguintes aspectos:

- otimizar os parâmetros do enrolamento filamentar de modo a produzir mais facilmente tubagens;
- o fabrico de provetes tubulares com determinadas características específicas, em laboratório, é caro, não sendo algumas vezes possível realizar ensaios com um número de provetes tão elevado quanto o desejado (em trabalhos futuros, a experiência adquirida agora permitiria reduzir os desperdícios que naturalmente existiram). Sugere-se assim que se realizem alguns dos ensaios deste trabalho com um número de provetes tal que permita ter desvios-padrão baixos;
- verificação da degradação do polímero no compósito final utilizando por exemplo, técnicas de fluorescência, para correlação deste fenómeno com eventuais variações nas propriedades obtidas nos ensaios efectuados;
- fabricar tecidos a partir do Twintex<sup>®</sup> que permitam vir a produzir componentes estruturais por termoformação, com ciclos de fabrico muito rápidos, e portanto, sendo fácil obter a partir deles um número de provetes suficiente para realizar testes.
- estudar o tensionamento das fibras durante o processo de produção de tubagens por enrolamento filamentar, relacionando a influência deste parâmetro com a respectiva resistência ao impacto.

### **6.3 Referências bibliográficas**

- [6.1] J. F. Silva. Estudo da Resistência à Pressão Interior Após Impacto de Tubagem Produzida por Enrolamento Filamentar. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Tese de Mestrado (1996).

## Principais notações

$a$	comprimento da fenda inicial, (mm)
$A$	área da placa a produzir (área útil do molde de compressão a quente), (mm <sup>2</sup> )
$A_d$	área delaminada (mm <sup>2</sup> )
$B$	largura do provete, (mm)
$C$	declive da curva carga-deslocamento, (N/m)
$d_i$	deslocamento no instante $i$ , (m)
$d_{i-1}$	deslocamento no instante $i-1$ , (m)
$d_{tow}$	massa linear do pré-impregnado, (g/m)
$e$	espessura (mm)
$e_i$	energia no instante $i$ , (J)
$e_{i-1}$	energia no instante $i-1$ , (J)
$E$	módulo de elasticidade, (GPa)
$E_a$	energia absorvida, (J)
$E_{av}$	módulo de elasticidade médio (GPa)
$E_{axial}$	módulo de elasticidade axial (GPa)
$E_{hoop}$	módulo de elasticidade circunferencial (GPa)
$F$	factor de correcção
$F_i$	força no instante $i$ , (N)
$F_{i-1}$	força no instante $i-1$ , (N)
$g$	aceleração da gravidade, (m/s <sup>2</sup> )
$G_{IIC}$	taxa crítica de libertação de energia em modo II, (J/m <sup>2</sup> )
$h$	metade da espessura do provete, (mm)
$H$	espessura da placa, (mm)
$L$	distância entre apoios, (mm)

## Principais notações (cont.)

$L_{tow}$	comprimento das mechas de pré-impregnado, (mm)
$m$	massa do impactor, (kg)
$n_p$	número de camadas da tubagem
$N$	factor de correcção
$P$	valor da carga correspondente ao início da propagação da fenda, (N)
$P_m$	força máxima de impacto (N)
$t$	tempo, (s)
$\nu_{av}$	coeficiente de Poisson médio
$\nu_{axial}$	coeficiente de Poisson axial
$\nu_{hoop}$	coeficiente de Poisson circunferencial
$v_i$	velocidade no instante $i$ , (m/s)
$v_{i-1}$	velocidade no instante $i-1$ , (m/s)
$v_f$	fracção volúmica de fibras de vidro
$v_v$	teor em vazios
$w_f$	fracção mássica (ou ponderal) de fibras
$\delta$	deslocamento correspondente à carga $P$ , (mm)
$\rho_f$	massa específica da fibra de vidro, (2,56 Mg/m <sup>3</sup> )
$\rho_p$	massa específica do polipropileno, (0,905 Mg/m <sup>3</sup> )

---

## **ANEXOS**

---



## **ANEXO I**

### **PROPRIEDADES DA MATÉRIA-PRIMA**



# Propriedades do pré-impregnado de fibra de vidro e polipropileno (TWINTEX®)

(Informação do produto fornecida pelo fabricante Saint-Gobain Vetrotex)



## PP GLASS ROVING TR PP

### Technical data sheet

**Twintex® Roving (TR PP)** is composed of commingled E-glass and polypropylene filaments. TR PP is suitable for filament winding, pultrusion, reinforcement of extruded profiles and weaving. Consolidation is done by heating the roving above the melting point of the PP matrix (180°C–230°C / 360°F-450°F) and applying a pressure.

#### Identification

Example: **TR PP 60 B 1870**

**T:** Twintex®  
**R:** roving  
**PP:** polypropylene matrix  
**60:** glass content by weight (%)  
**B:** B: black colour, heat and UV stabilisation  
 N: natural colour, heat and UV stabilisation  
**1870:** titer (tex)

#### Composite mechanical properties (after processing)

				Unidirectional roving PP 75	Unidirectional roving PP 60	Unidirectional roving PP 53
Tensile	Strength Modulus	ISO 527	MPa (psi x 10 <sup>3</sup> )	960 (139)	760 (110)	690 (100)
			GPa (psi x 10 <sup>6</sup> )	38.5 (5.5)	29.5 (4.2)	25.0 (3.6)
Flexural	Strength Modulus	ISO 14125	MPa (psi x 10 <sup>3</sup> )	860 (125)	740 (107)	610 (88)
			GPa (psi x 10 <sup>6</sup> )	37.5 (5.4)	25.5 (3.7)	22.0 (3.2)

Mechanical property data was determined in accordance with standard ISO specifications. Relative values shown are accurate to the best of our knowledge, but should not be used for design purposes since absolute values can be influenced by processing conditions.

#### Properties

- Fast consolidation
- High mechanical properties
- Intended for industrial applications
- Recyclable



Credit photos - EuroRSCG, Covess, Aresa, Polygon.



# Propriedades do pré-impregnado de fibra de vidro e polipropileno (TWINTEX®)

(Informação do produto fornecida pelo fabricante Saint-Gobain Vetrotex)

## Applications :

- Transportation
- Sports & Leisure
- Tanks & Vessels

## Products available

### Rovings (internal unwinding):

- Twintex® R PP 53 2120 N or B
- Twintex® R PP 60 1870 N or B
- Twintex® R PP 75 1500 N or B

### Roving characteristics:

- Internal diameter: 165 mm
- External diameter: 290 mm
- Height: 265 mm
- Nominal weight: ≈12.50 kg (PP 53–60-75)

## Packaging

The rovings are shrink wrapped in a PE film and palletized with a cardboard and stretched film wrapping.

Number of rovings per pallet: 44.

Average weight of a pallet: 550 kg.

## Storage

TR PP must be stored in its original packaging, away from moisture and at room condensation.

Pallets may be stacked up to two high.

## Note

It is the responsibility of the user to satisfy himself that the Product is suitable for the fabrication of the final product conforming to expectations, taking account of the other components used and of the fabrication process. In case of any doubt that the product is appropriate, or of difficulty in using the product, the user is asked to contact the commercial service of SG Vetrotex. It is explicitly understood that the user who has established that the product is unsuitable for him and has, nonetheless, continued to use it after having established that fact, will do so under his own full responsibility. SG Vetrotex will not accept any claim notified more than 6 months after delivery of the disputed product. Compensation, if it is to take place, in all cases is only accepted in respect of the cost of the Saint-Gobain Vetrotex product found to be responsible, and not on the cost of other processed materials (resin, consummables,...)

Edited by:



Sales & Marketing TWINTEX®

[www.twintex.com](http://www.twintex.com)

[infotwintex@saint-gobain.com](mailto:infotwintex@saint-gobain.com)

### Saint-Gobain Vetrotex Reinforcement S.A.

Sales & Marketing TWINTEX®  
130, avenue des Follaz – B.P. 928  
73009 Chambéry Cedex  
France  
Tel: +33 (0)4 79 96 83 93  
Fax: +33 (0)4 79 96 95 86

[www.twintex.com](http://www.twintex.com)  
[infotwintex@saint-gobain.com](mailto:infotwintex@saint-gobain.com)

### Saint-Gobain Vetrotex America Inc.

51010 Celeste Drive  
Shelby Township, MI 48315  
USA  
Tel: +1 586 532-9500 x26  
Fax: +1 586 532-9501

### NSG Vetrotex K.K.

Sales & Marketing Department  
6F, Saint-Gobain Bldg, 3-7 Kojimachi  
Chiyoda-ku, Tokyo, 102-0083  
JAPAN  
Tel: +81 (0) 3 5275 2562  
Fax: +81 (0) 3 5275 2491  
Mobile while in Japan : +81-90-2664-9592  
Mobile while outside Japan : +86-1391-738-7568

Saint-Gobain Vetrotex reserves the right to change the information given herein without prior notice (May 2005)

## TWINTEX®

A unique thermoplastic roving consisting of commingled unidirectional thermoplastic and glass fibers. Its mechanical characteristics are comparable to those available in thermoset composites, with the added advantage of excellent impact resistance and recyclability. It can be used in low-pressure molding applications in the consumer and recreational markets, such as kayaks.



## **ANEXO II**

### **PROPRIEDADES GENÉRICAS DAS FIBRAS DE VIDRO**



## Propriedades genéricas das fibras de vidro

(Informação do produto fornecida pelo fabricante Saint-Gobain Vetrotex)

Reinforcements Europe

# ROVING for SPRAY-UP

# P217

Standard Product Specification

This E-glass roving has a sizing system with a silane coupling agent. It has been designed to provide optimal choppability and very fast wetting.

### Properties Identification

Example : EC 2400 P217  
E : Type of glass  
C : Type of process, continuous  
2400 : Roving linear weight (tex) P  
217 : Saint-Gobain Vetrotex code for sizing system

### Properties

- Very easy chopping
- No static electricity
- No fuzz
- Flat lay down and uniform dispersion
- Fast wet out
- Easy rolling and de-airing
- Excellent mechanical properties

### Technical characteristics (nominal values)

Linear weight of roving (tex)	Loss on ignition (%)	Moisture (%)
ISO 1889: 1997	ISO 1887: 1995	ISO 3344: 1997
2400	1.25	≤ 0.20





## **ANEXO III**

### **PROPRIEDADES GENÉRICAS DO POLIPROPILENO**



## Propriedades genéricas do polipropileno

(Informação do produto fornecida pelo fabricante PLASCAMS MATERIAL DATA SHEET Database. 1998. versão 3.0 para Microsoft Windows 95, Rapra Technology Lda., U. K)

Material: Polypropylene (homopolymer), (PP)  
Resin Type: TP Semi-Crystalline, Cost: 660 £/tonne SG: 0,905  
Max. Operating Temp.: 100 °C  
Surface Hardness: RR90  
Water Absorption: 0,02 %  
Lin. Expansion ( $\times E-5$ ): 10 m/m/°C  
Tensile Strength: 33 MPa  
Flammability: HB UL94  
Flexural Modulus: 1,5 GPa  
Oxygen Index: 17 %  
Elongation@Break: 150 %  
Volume resistivity: 17 log ohmcm  
Strain@Yield: 10 %  
Dielectric Strength: 28 MV/m  
Notched Izod: 0,07 kJ/m  
Dielect. Constant 1 kHz: 2,28  
HDT (.46MPa/66.7psi): 105 deg. C  
Dissipat'n Fact. 1 MHz: 0,0001  
HDT (1.8MPa/261psi): 65 deg. C  
Melt Temperature: 210 to 290 °C  
Mould Shrinkage: 1,5 %  
Mould Temperature: 20 to 60 °C

Advantages: Good chemical resistance. Good fatigue resistance. Better temperature resistance than HDPE. Lower density than HPDE.

Disadvantages: Oxidative degradation is accelerated by contact with certain materials, e.g. copper. High mould shrinkage and thermal expansion . High creep. Poor UV resistance.

Applications: Buckets, bowls, general mechanical parts, bottle crates, toys, medical components, washing machine drums, pipes, battery cases, bottles, bottles caps. Rubber modified PP for impact resistant components such us bumpers. Talc-filled polypropylene for additional stiffness at elevated temperatures, (e.g. jug kettle applications). Films for packing (e.g. cigarette packets). Fibres for carpeting and artificial sports surfaces.5



## **ANEXO IV**

### **CORRECÇÕES PARA GRANDES DESLOCAMENTOS**



Correcções para grandes deslocamentos (Williams JG, a ser publicado)

$$F = 1 - \theta \left( \frac{\delta}{L} \right)^2$$

$$\theta_1 = \frac{3}{5} \frac{\left\{ 15 \left[ 1 - \left( \frac{a}{L} \right)^3 \right] - 40 \left( \frac{a}{L} \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{a}{L} \right)^3 \right] + 48 \left( \frac{a}{L} \right)^4 \right\}}{\left[ 2 + 3 \left( \frac{a}{L} \right)^3 \right]^2}$$

Do mesmo modo, a expressão pode ser corrigida por um factor N,

$$C = C_0 N$$

onde a  $C_0$  é o valor do slope inicial da força deslocamento ( $\delta / P$ ), e N é dado por:

$$N = 1 + \theta_2 \left( \frac{\delta}{L} \right)^2$$

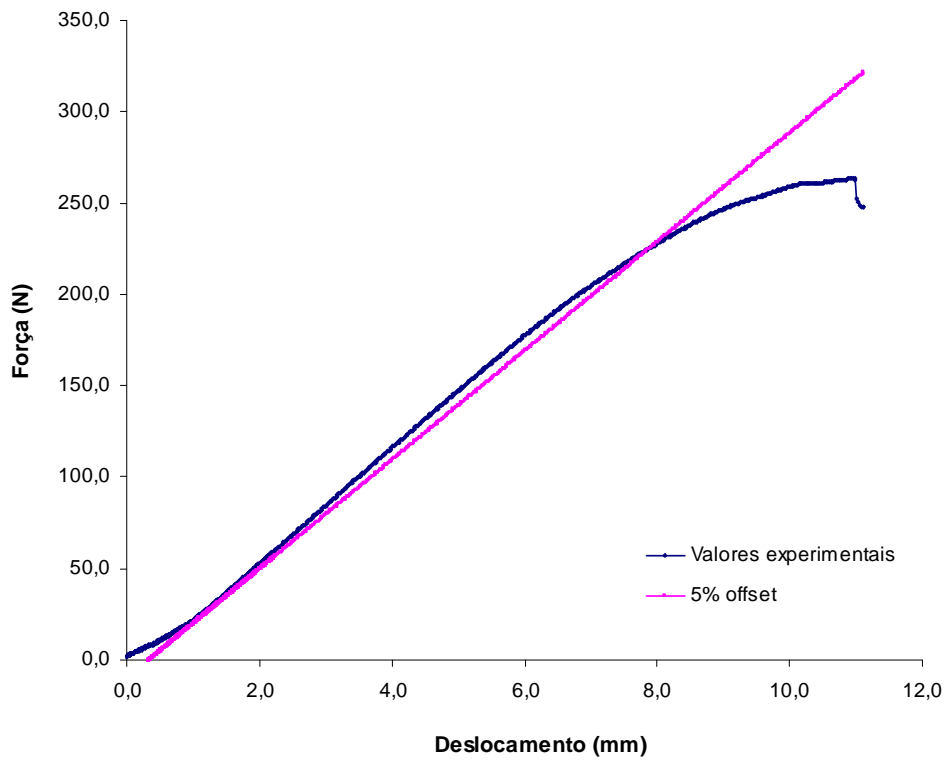
$$\theta_2 = \frac{3}{35} \frac{\left[ 37 + 147 \left( \frac{a}{L} \right)^3 + 210 \left( \frac{a}{L} \right)^6 + 105 \left( \frac{a}{L} \right)^9 \right]}{\left[ 2 + 3 \left( \frac{a}{L} \right)^3 \right]^3}$$



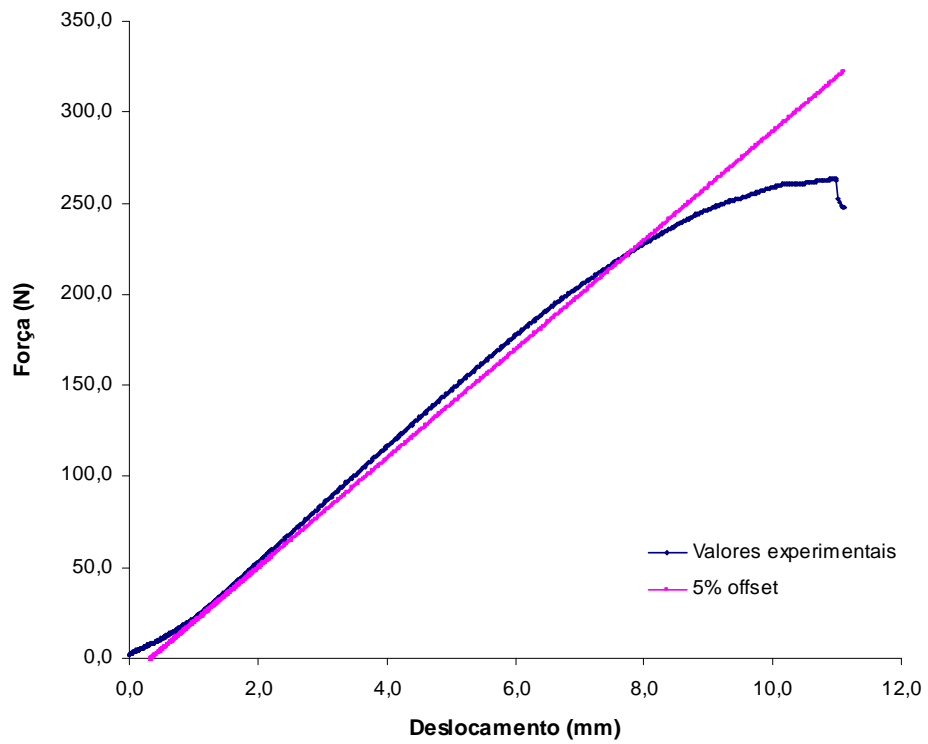
## **ANEXO V**

**ENSAIOS 'END-NOTCHED FLEXURE' – ENF  
EM PLACAS EM COMPÓSITO FABRICADAS POR ENROLAMENTO FILAMENTAR A  
PARTIR DE TWINTEX® E CONSOLIDADAS POR COMPRESSÃO A QUENTE**





**Figura V-1** Ensaio de ENF do provete 1.



**Figura V-2** Ensaio de ENF do provete 2.



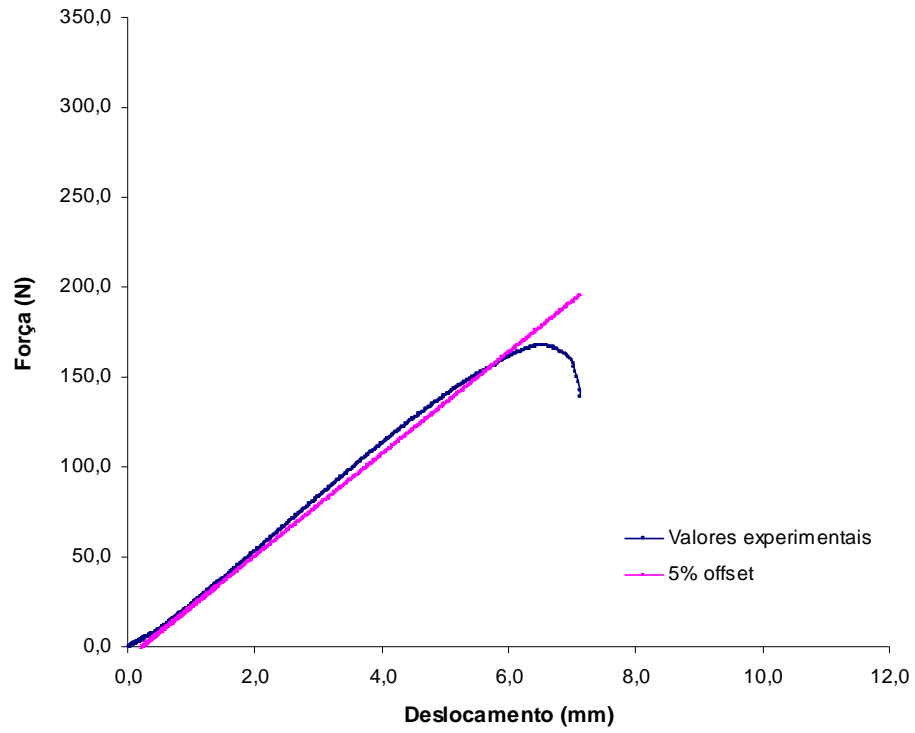


Figura V-3 Ensaio de ENF do provete 3.

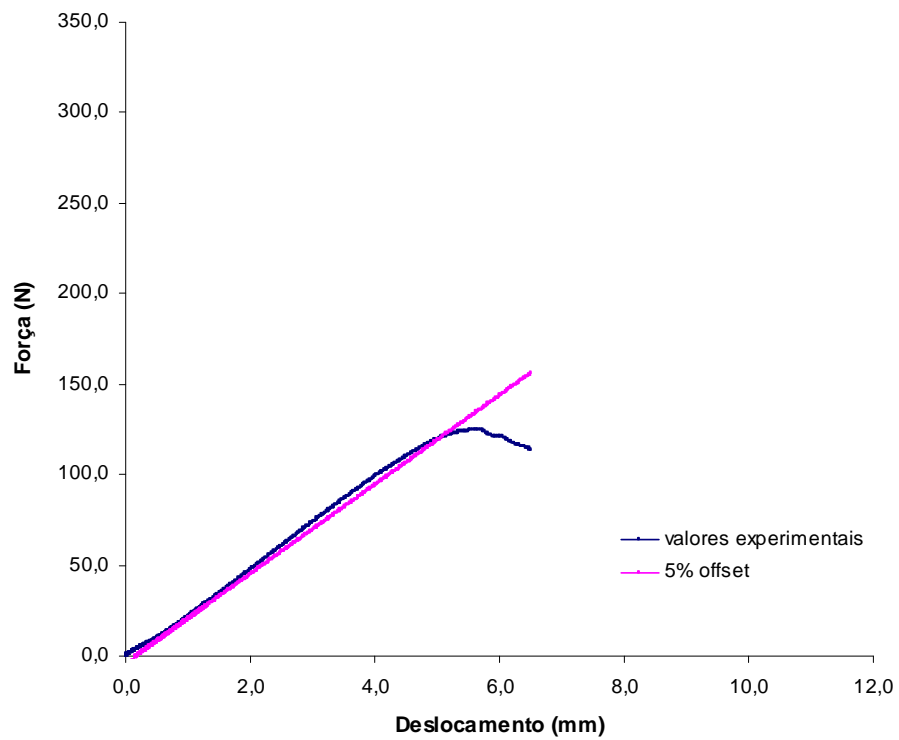


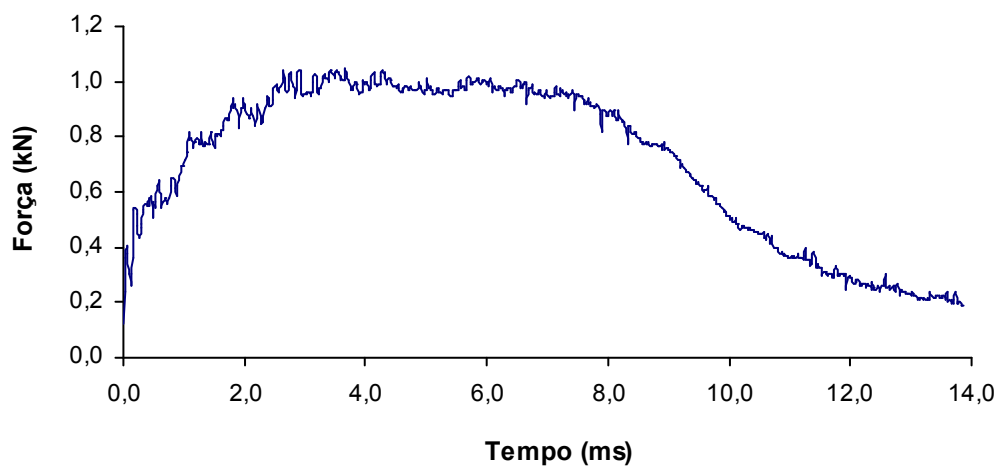
Figura V-4 Ensaio de ENF do provete 4.



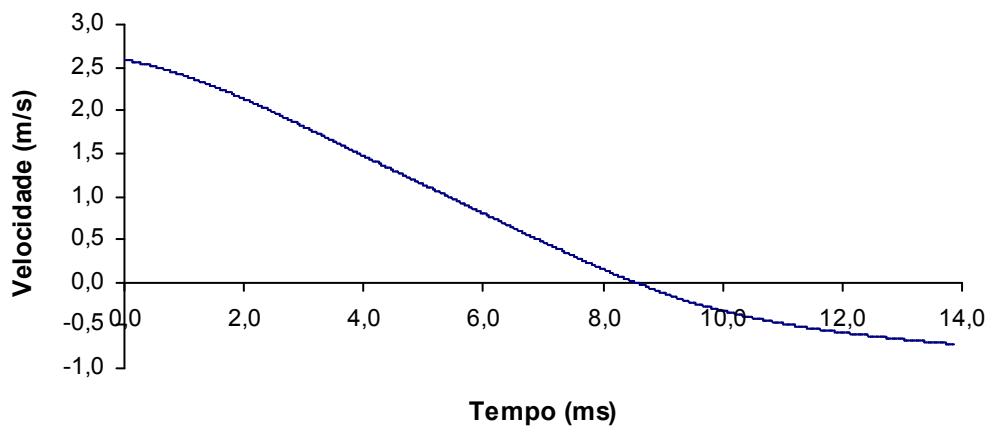
## **ANEXO VI**

### **ENSAIOS DE IMPACTO EM TUBOS EM COMPÓSITO FABRICADOS POR ENROLAMENTO FILAMENTAR A PARTIR DE TWINTEX®**



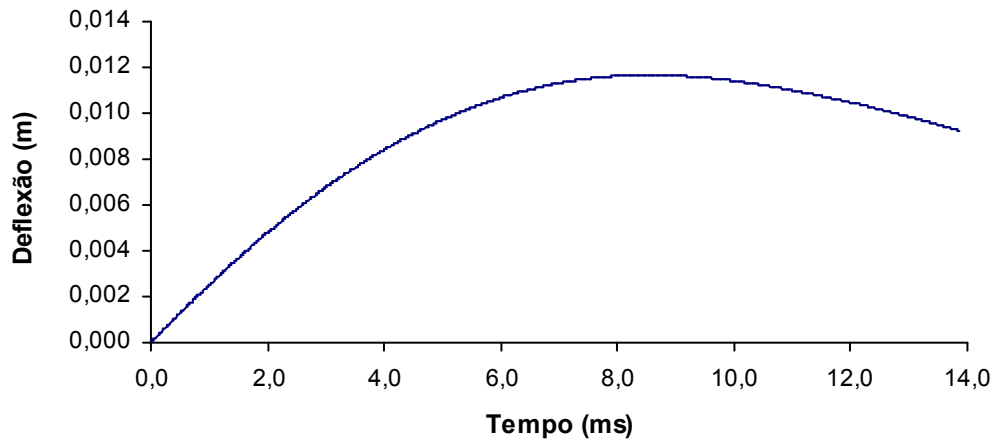


**Figura VI - 1** Curva força-tempo do ensaio de impacto do tubo T1 com uma energia de 10 J.

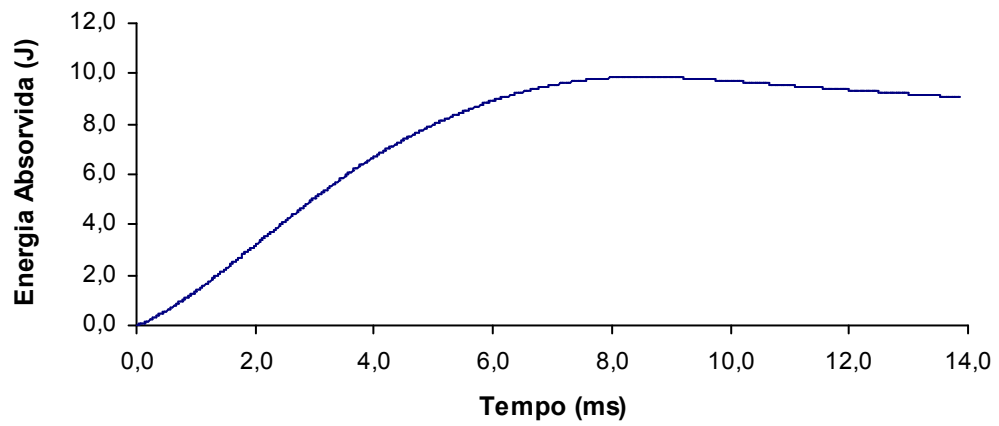


**Figura VI - 2** Curva velocidade-tempo do ensaio de impacto do tubo T1 com uma energia de 10 J.



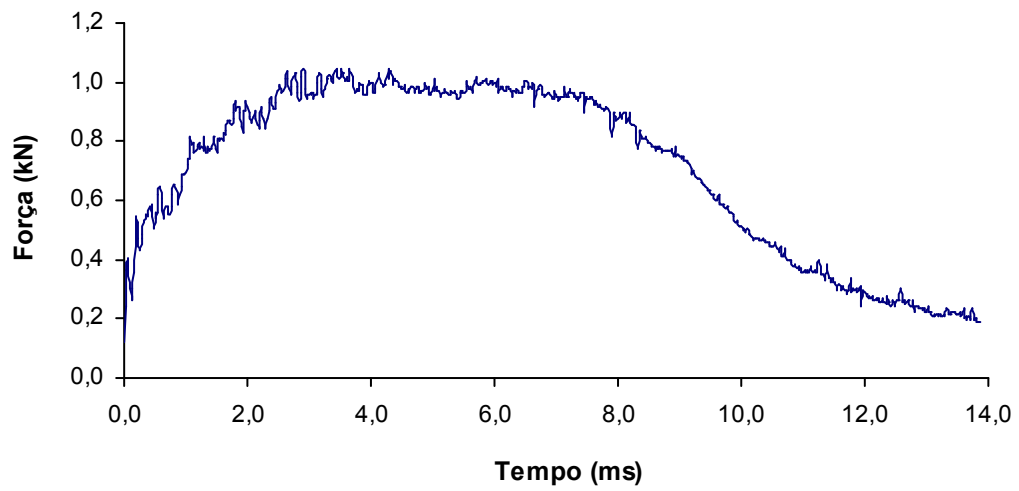


**Figura VI - 3** Curva deflexão-tempo do ensaio de impacto do tubo T1 com uma energia de 10 J.

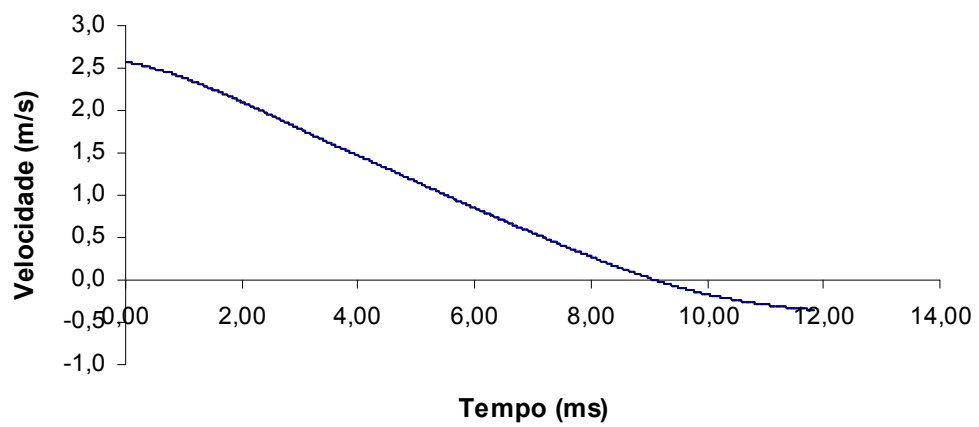


**Figura VI - 4** Curva energia-tempo do ensaio de impacto do tubo T1 com uma energia de 10 J.



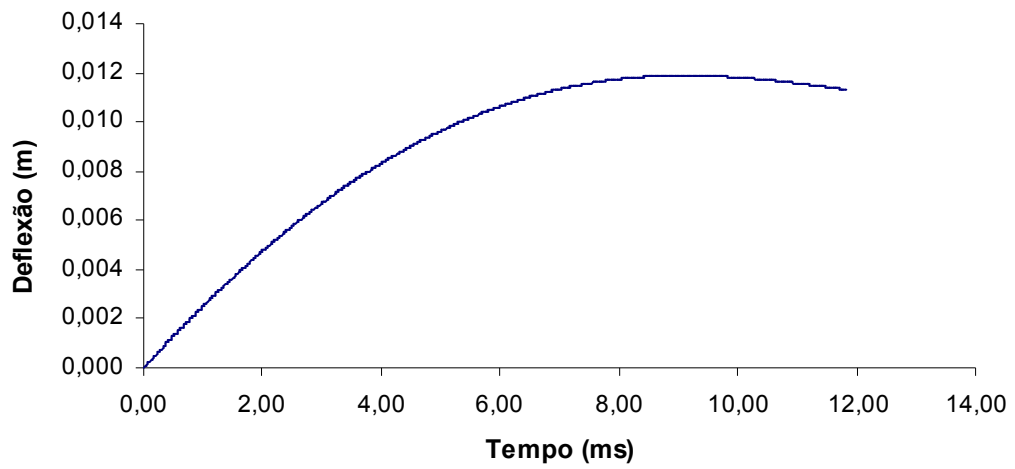


**Figura VI - 5** Curva força-tempo do ensaio de impacto do tubo T2 com uma energia de 10 J.

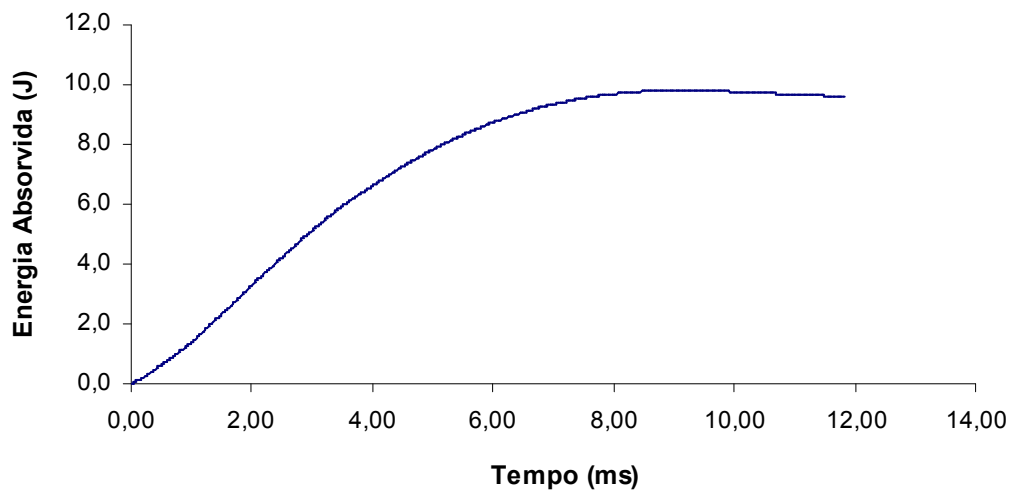


**Figura VI - 6** Curva velocidade-tempo do ensaio de impacto do tubo T2 com uma energia de 10 J.



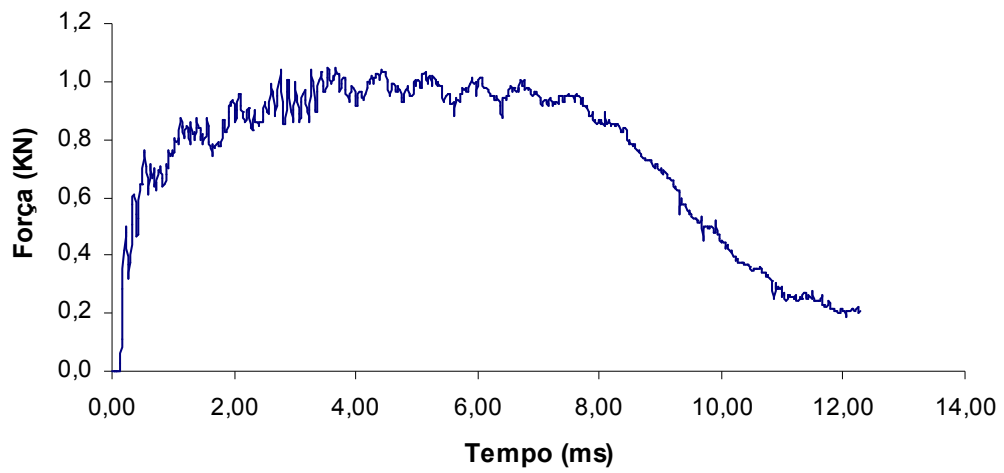


**Figura VI - 7** Curva deflexão-tempo do ensaio de impacto do tubo T2 com uma energia de 10 J.

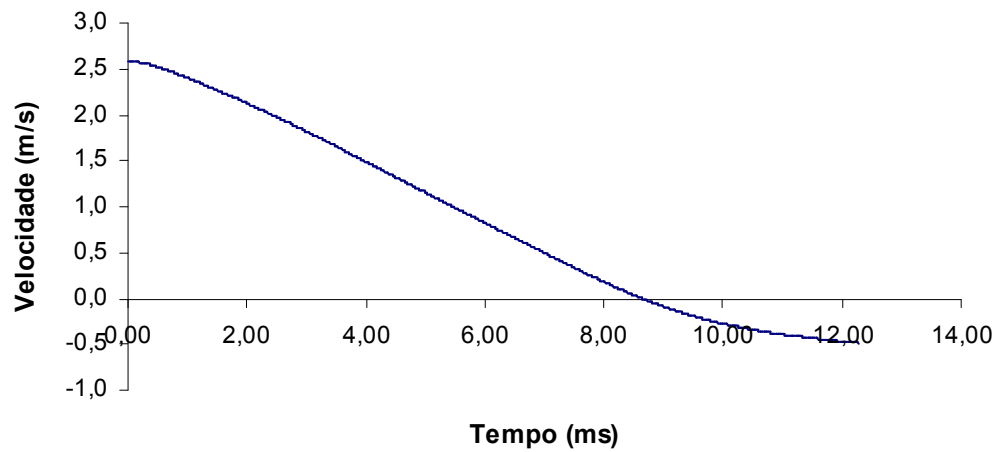


**Figura VI - 8** Curva energia-tempo do ensaio de impacto do tubo T2 com uma energia de 10 J.



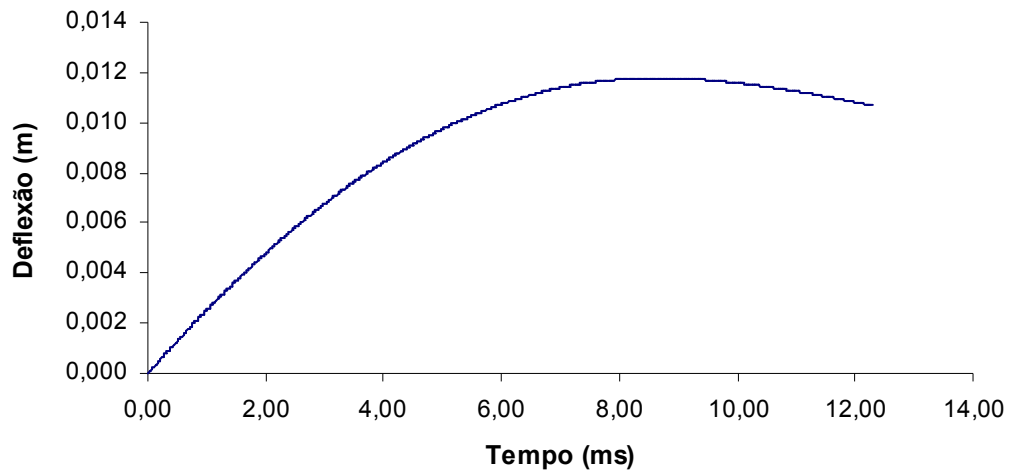


**Figura VI - 9** Curva força-tempo do ensaio de impacto do tubo T3 com uma energia de 10 J.

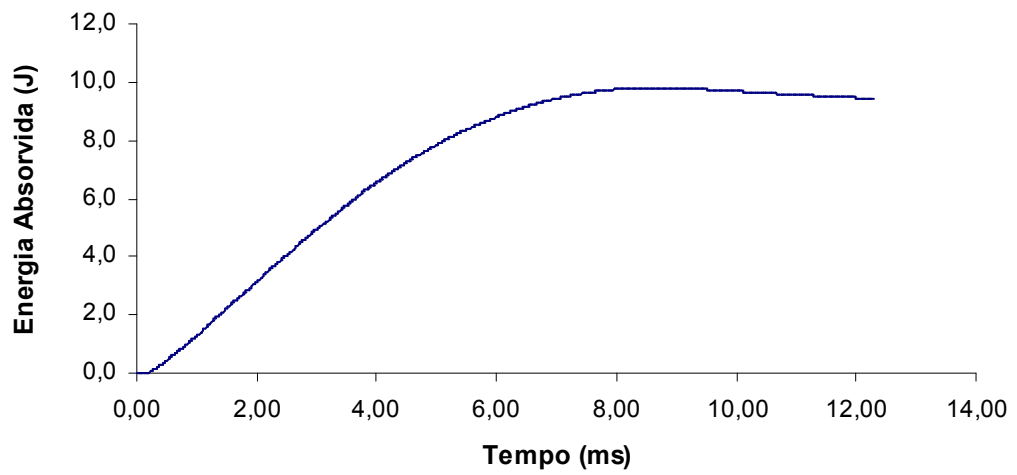


**Figura VI - 10** Curva velocidade-tempo do ensaio de impacto do tubo T3 com uma energia de 10 J.



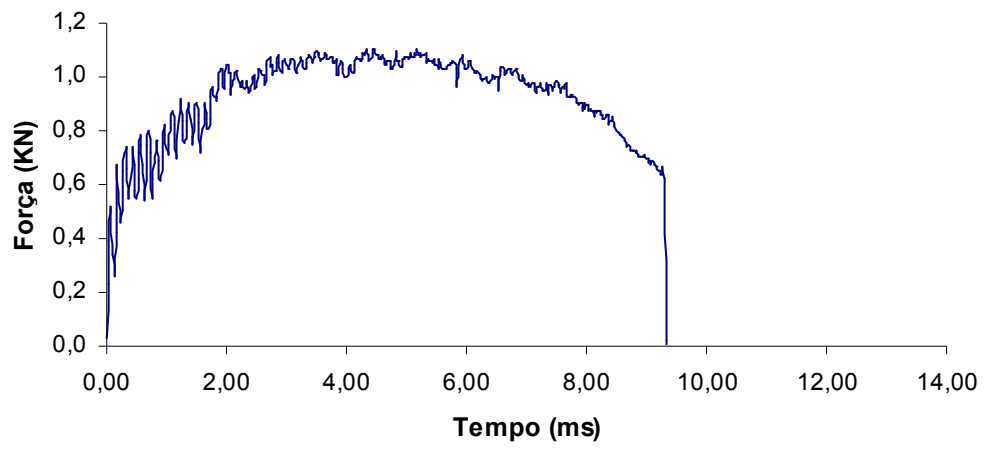


**Figura VI - 11** Curva deflexão-tempo do ensaio de impacto do tubo T3 com uma energia de 10 J.

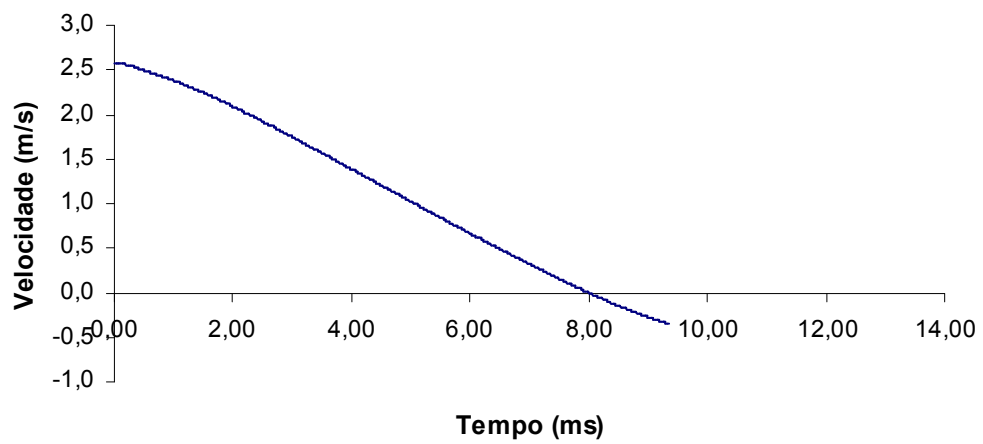


**Figura VI - 12** Curva energia-tempo do ensaio de impacto do tubo T3 com uma energia de 10 J.



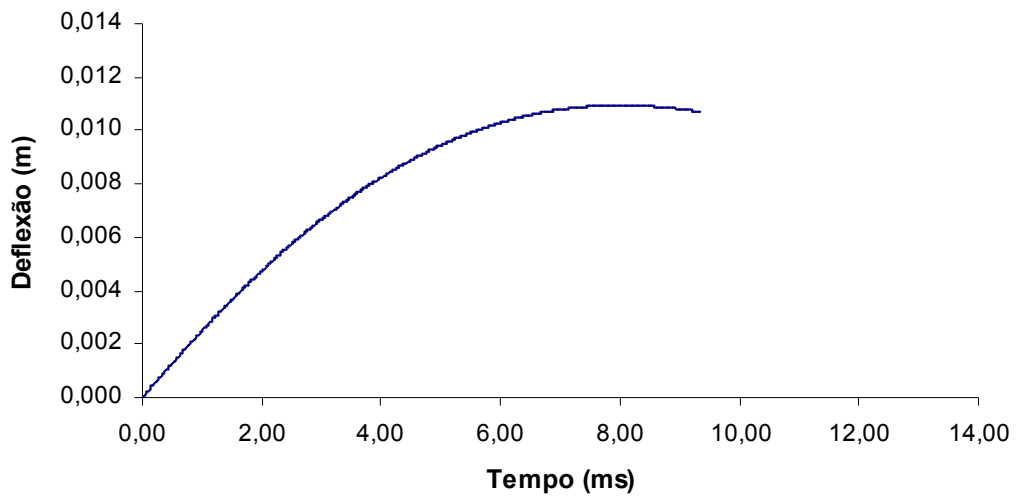


**Figura VI - 13** Curva força-tempo do ensaio de impacto do tubo T4 com uma energia de 10 J.

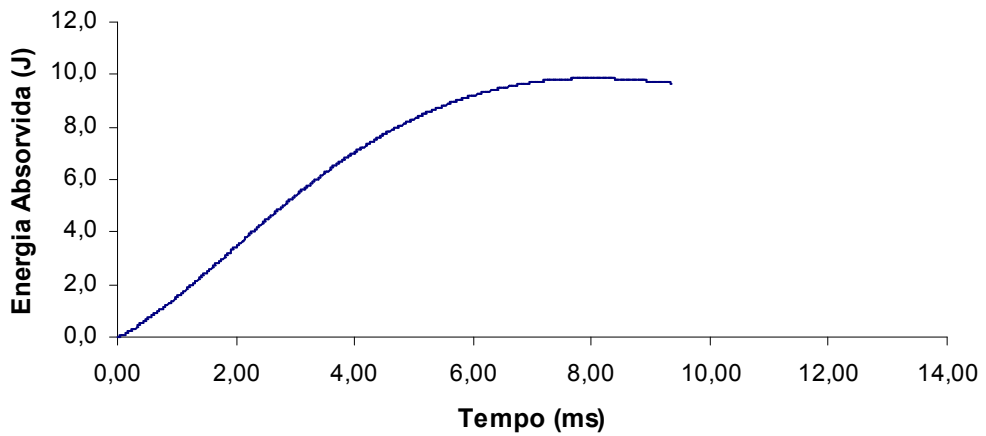


**Figura VI - 14** Curva velocidade-tempo do ensaio de impacto do tubo T4 com uma energia de 10 J.



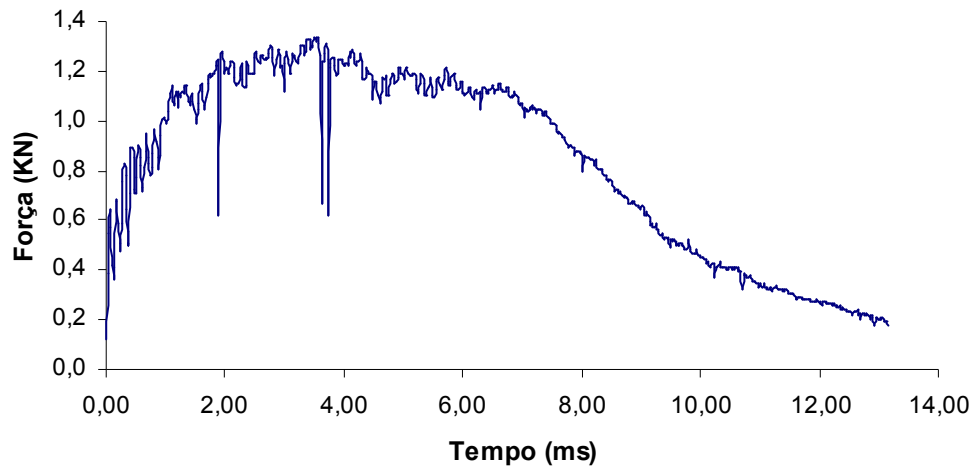


**Figura VI - 15** Curva deflexão-tempo do ensaio de impacto do tubo T4 com uma energia de 10 J.

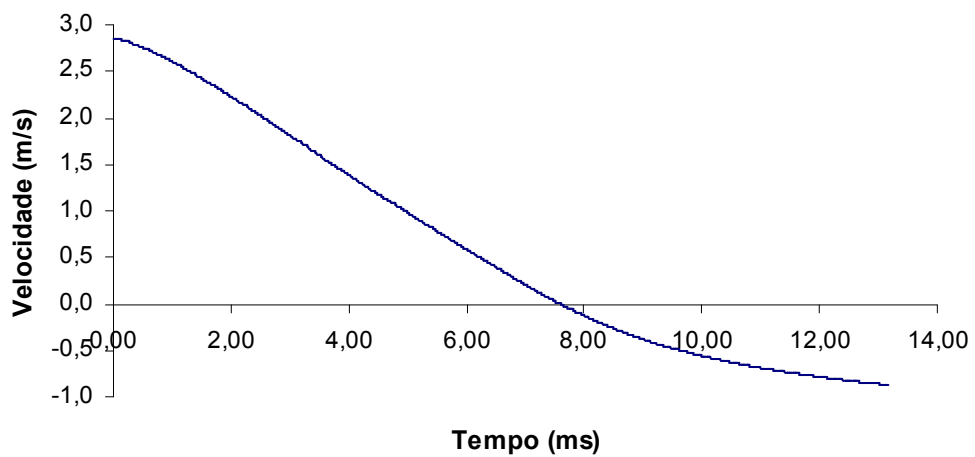


**Figura VI - 16** Curva energia-tempo do ensaio de impacto do tubo T4 com uma energia de 10 J.



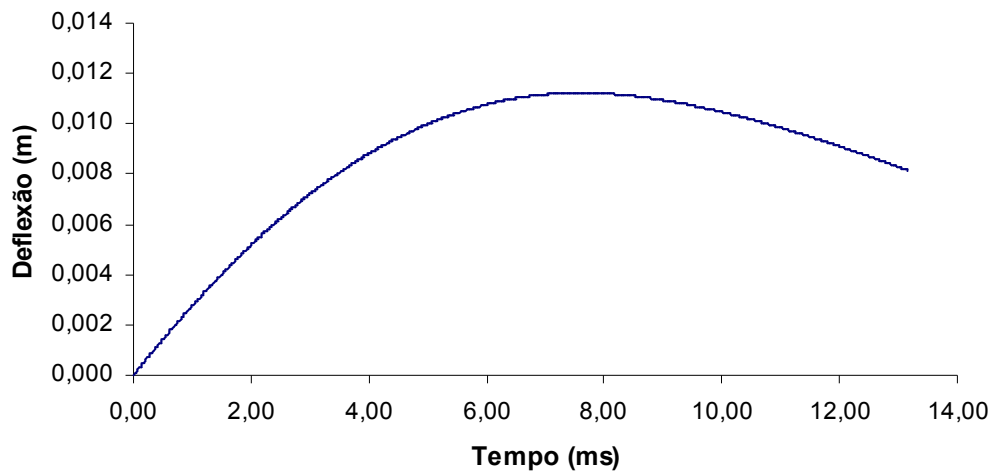


**Figura VI - 17** Curva força-tempo do ensaio de impacto do tubo T5 com uma energia de 12 J.

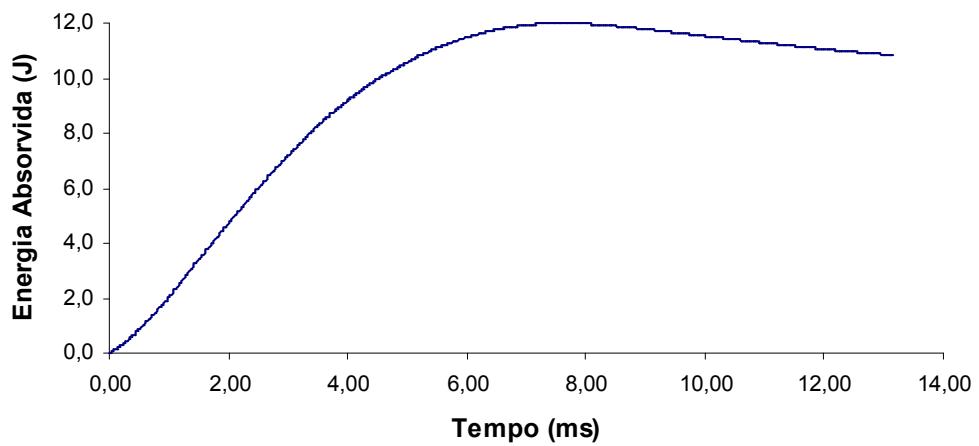


**Figura VI - 18** Curva velocidade-tempo do ensaio de impacto do tubo T5 com uma energia de 12 J.





**Figura VI - 19** Curva deflexão-tempo do ensaio de impacto do tubo T5 com uma energia de 12 J.



**Figura VI - 20** Curva energia-tempo do ensaio de impacto do tubo T5 com uma energia de 12 J.



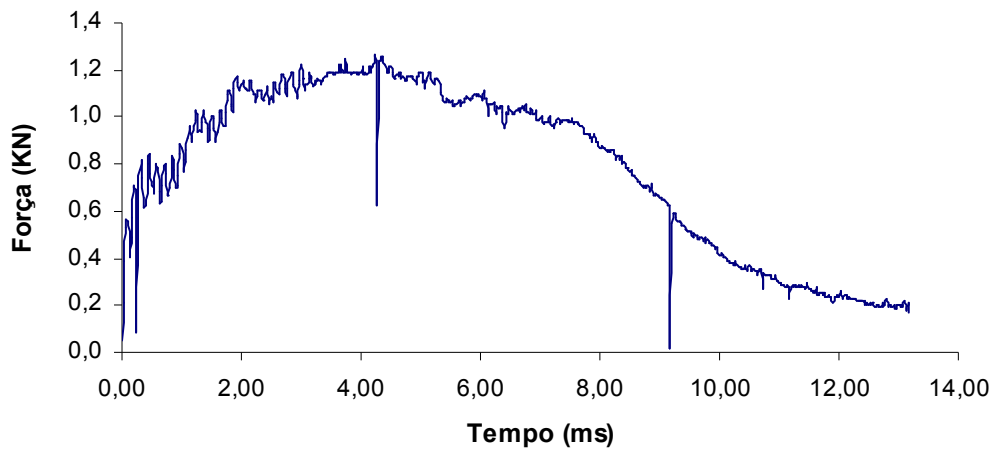


Figura VI - 21 Curva força-tempo do ensaio de impacto do tubo T6 com uma energia de 12 J.

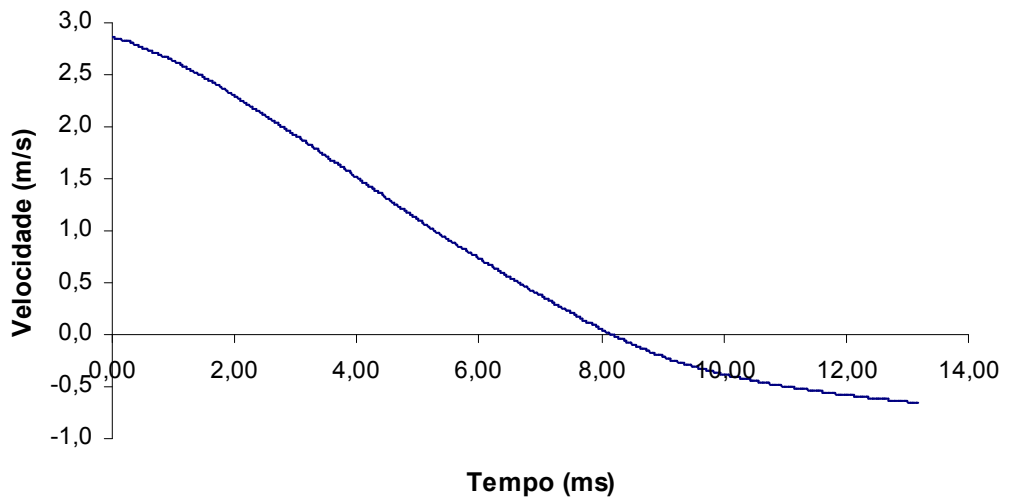
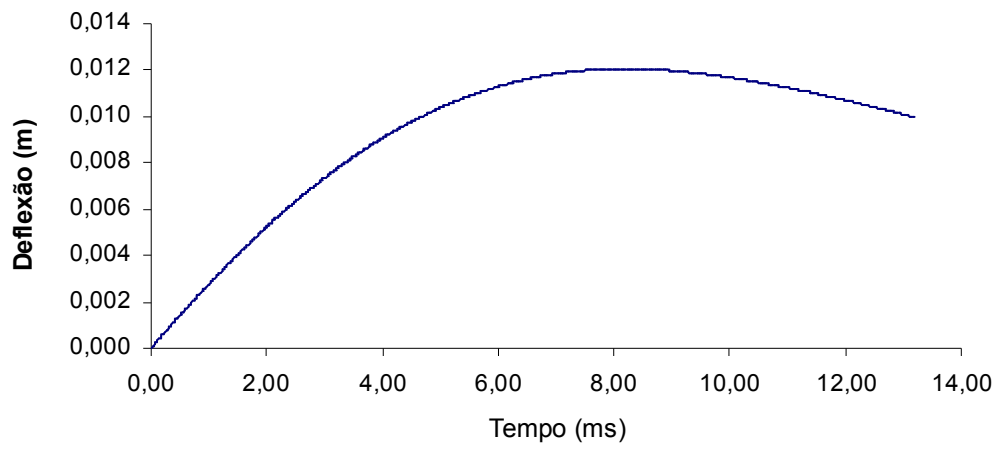
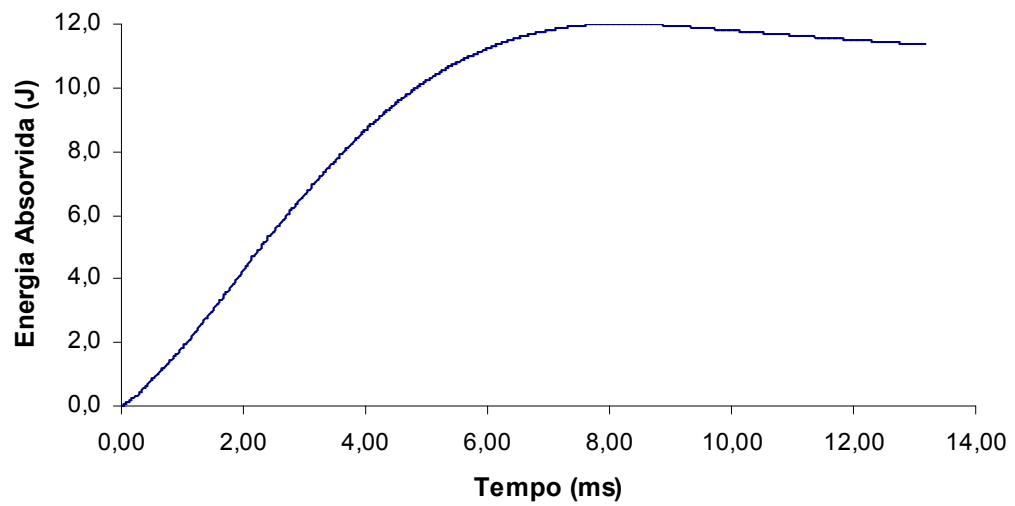


Figura VI - 22 Curva velocidade-tempo do ensaio de impacto do tubo T6 com uma energia de 12 J.



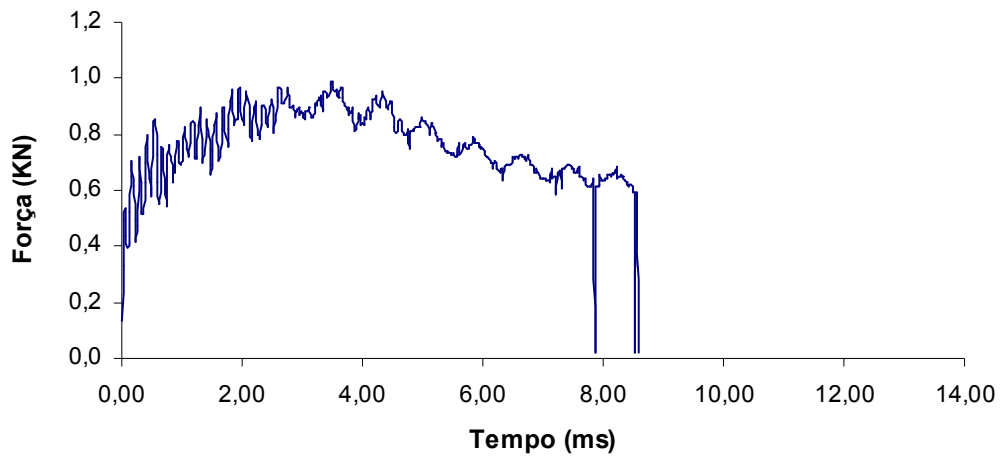


**Figura VI - 23** Curva deflexão-tempo do ensaio de impacto do tubo T6 com uma energia de 12 J.

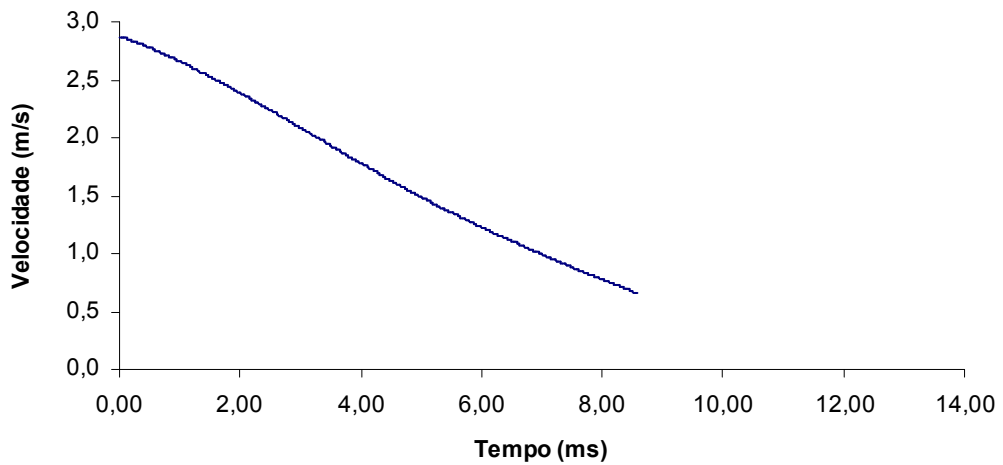


**Figura VI - 24** Curva energia-tempo do ensaio de impacto do tubo T6 com uma energia de 12 J.



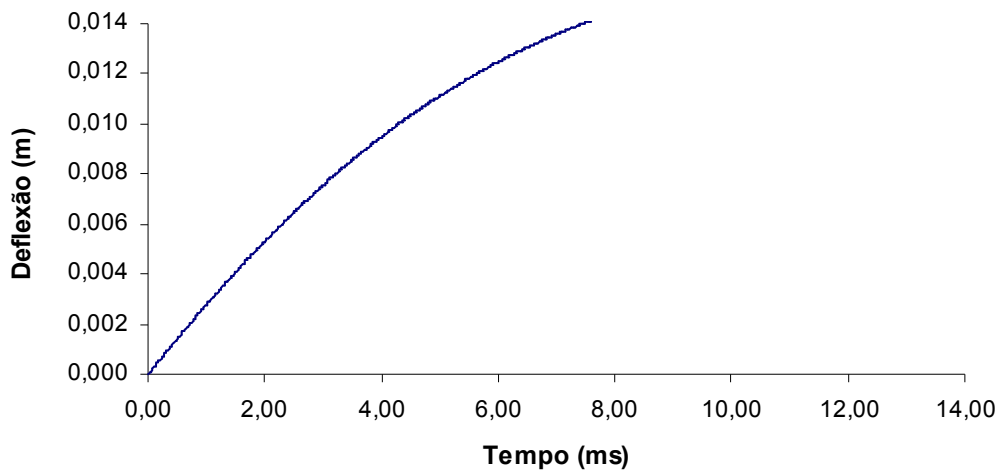


**Figura VI - 25** Curva força-tempo do ensaio de impacto do tubo T7 com uma energia de 12 J.

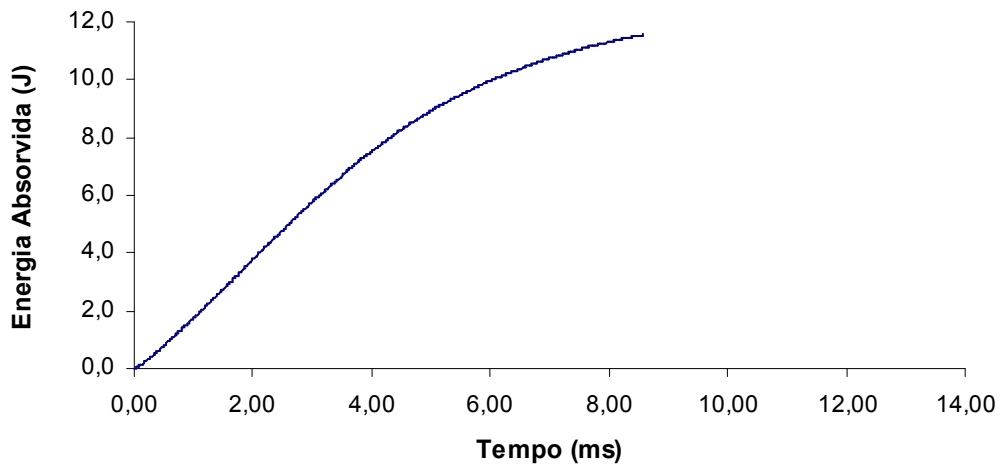


**Figura VI - 26** Curva velocidade-tempo do ensaio de impacto do tubo T7 com uma energia de 12 J.



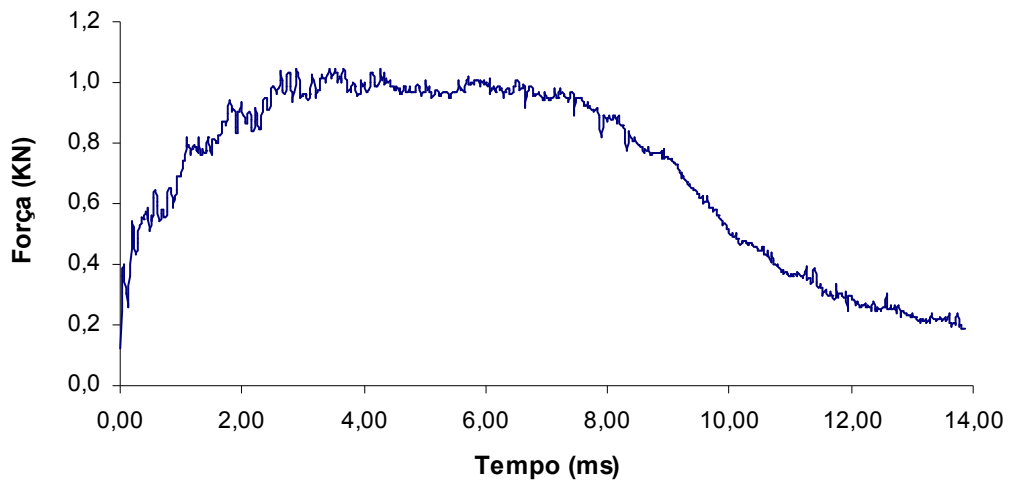


**Figura VI - 27** Curva deflexão-tempo do ensaio de impacto do tubo T7 com uma energia de 12 J.

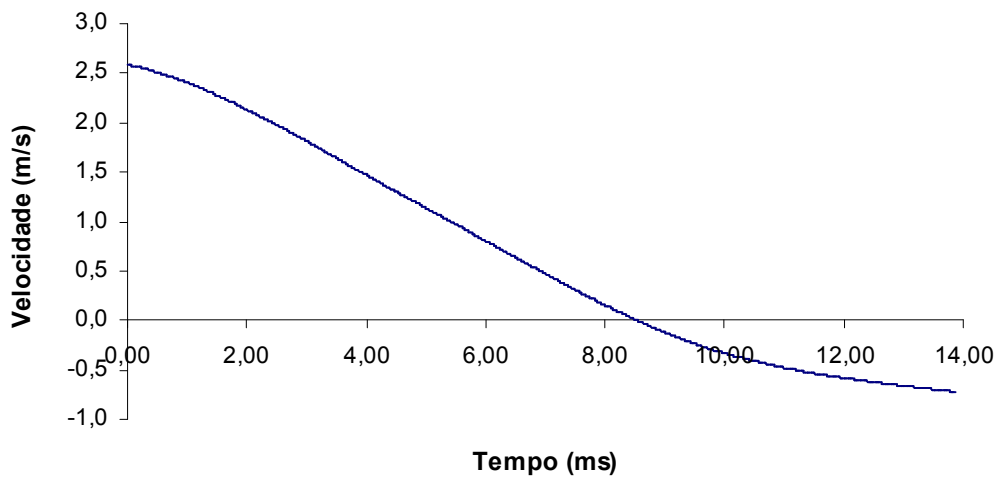


**Figura VI - 28** Curva energia-tempo do ensaio de impacto do tubo T7 com uma energia de 12 J.



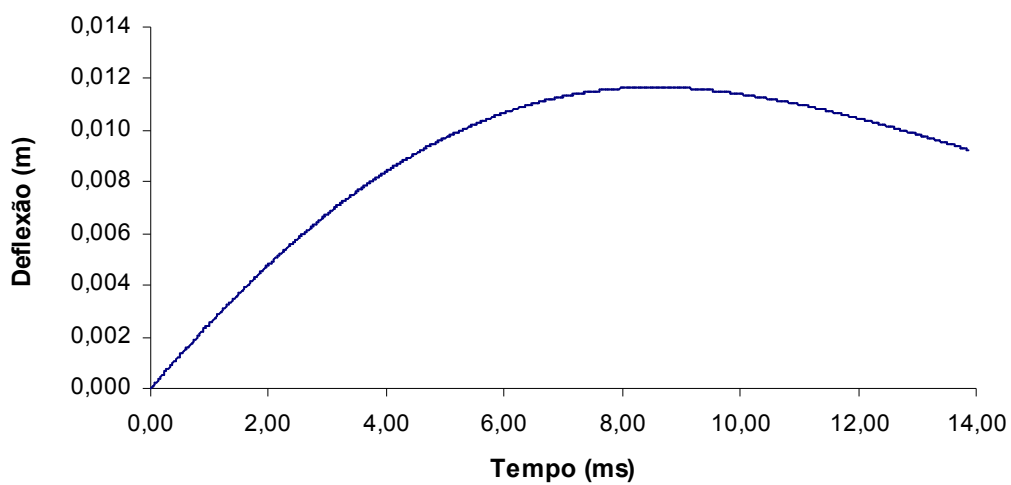


**Figura VI - 29** Curva força-tempo do ensaio de impacto do tubo T8 com uma energia de 12 J.

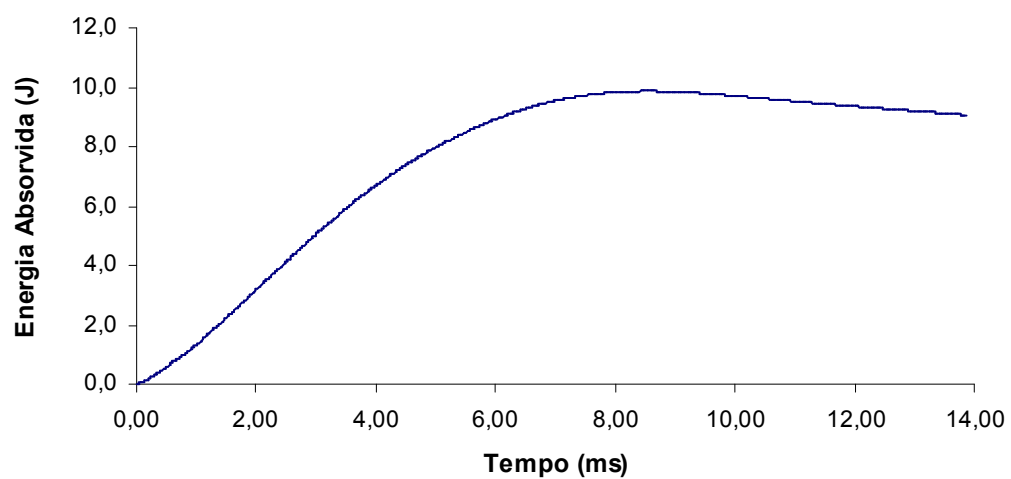


**Figura VI - 30** Curva velocidade-tempo do ensaio de impacto do tubo T8 com uma energia de 12 J.





**Figura VI - 31** Curva deflexão-tempo do ensaio de impacto do tubo T8 com uma energia de 12 J.



**Figura VI - 32** Curva energia-tempo do ensaio de impacto do tubo T8 com uma energia de 12 J.