



Instituto Politécnico de Tomar

Escola Superior de Tecnologia de Abrantes

Fábio Vasco Passarinho Navalho

DESENVOLVIMENTO DE CANELEIRAS EM MATERIAL COMPÓSITO

Dissertação de Mestrado

Orientado por:

Carlos Campos Coelho – Escola Superior de Tecnologia de Abrantes

Dissertação apresentada ao Instituto Politécnico de Tomar
para cumprimento dos requisitos necessários
à obtenção do grau de Mestre
em Projecto e Produção Mecânica

Dedico este trabalho aos meus pais, Manuel Vasco e Emília Passarinho.

I. AGRDECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Professor Carlos Campos Coelho, que ao longo de todo o projecto sempre me procurou incentivar, pesquisar e ajudar naquilo que precisasse.

O meu obrigado ao Professor Paulo Reis que se disponibilizou sempre para ajudar e com a sua experiência na área dos materiais compósitos indicou o caminho mais fácil para a execução deste projecto.

Agradeço também a todos os professores que ao longo do projecto me deram dicas e colocaram a sua ajuda ao meu alcance. Agradeço também ao Engenheiro Carlos Filipe por me ter lembrado o correcto funcionamento do centro de maquinação CNC.

Gostaria de agradecer à Escola Superior de Tecnologia de Abrantes por me ter facultado as ferramentas necessárias e também a oportunidade de poder ter realizado este projecto.

Um agradecimento especial aos meus colegas de mestrado pois foi com eles que a procura pelo conhecimento se tornou mais fácil e o trabalho em equipa supera qualquer dificuldade.

O meu maior agradecimento vai para toda a minha família, especialmente para a minha irmã Rita e para a minha namorada Fátima.

II. RESUMO

O objectivo da presente tese é o estudo e desenvolvimento de um produto, mais concretamente uma protecção para a tibia, vulgarmente conhecida como caneleira, para assegurar a prática de desporto com contacto físico e impactos de baixa velocidade, da forma mais segura possível.

O objectivo prendeu-se com a possibilidade de desenvolver algo com melhores características do que existe neste momento no mercado. Isto na sequência de ter sido reconhecido que grande parte das protecções que existem em grandes superfícies comerciais não ser suficiente para a prática de desporto de uma forma segura [15].

Foram realizados vários ensaios a diferentes materiais compósitos produzidos de forma a identificar qual deles seria o melhor em termos de propriedades mecânicas e depois compará-lo com outros materiais de caneleiras existentes no mercado e retirar conclusões.

Palavras-chave:

Materiais compósitos, impacto, baixa velocidade, caneleiras, dano, fractura, resistência

III. ABSTRACT

The scope of this thesis is the study and development of a product, more specifically a tibia protection, normally known as a shin guard, to ensure the safest sports practice with physical contact, high and low impact velocities.

The objective was the possibility of develop a product with better characteristics than what exists in the market. This is because it has been recognized that most of the protections that exist on large commercial market are not sufficient for a sport practice in a safe way [15].

Several tests were carried out on different composite materials produced, in order to identify which of them would be the best in terms of mechanical properties and then to compare it with other materials of shin guards on the market and draw conclusions.

Key words:

Composite materials, impact, low velocity, shin guards, damage, mechanical properties, fracture, strenght

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABELAS	13
LISTA DE ABREVIATURAS.....	14
LISTA DE SÍMBOLOS	14
1. ORGANIZAÇÃO.....	15
2. INTRODUÇÃO.....	16
3. ESTADO DE ARTE.....	18
3.1. Avaliação da Protecção Proporcionada por Caneleiras	18
3.2. Impacto em Materiais Compósitos	20
3.2.1. Impacto de baixa velocidade	21
4. ANÁLISE EXPERIMENTAL	23
4.1. Equipamentos Utilizados	25
4.1.1. Máquina universal de ensaios.....	25
4.1.2. Máquina de ensaios de impacto.....	26
4.1.3. Câmara de alta velocidade.....	28
4.2. Análises de Gráficos Resultantes dos Ensaios de Flexão e Impacto	29
4.3. Caracterização do Comportamento da Amostra nos Diferentes Ensaios	31
5. MATERIAIS UTILIZADOS.....	36
5.1. Provetes Produzidos e Seus Constituintes	38
6. PRODUÇÃO DOS PROVETES EM MATERIAL COMPÓSITO	44
6.1. Equipamentos Utilizados	44
6.2. Procedimento Experimental.....	47
6.3. Preparação das Amostras	54
7. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	55
7.1. Apresentação e Análise de Resultados dos Ensaios de Compressão Estáticos	55

7.2.	Apresentação e Análise de Resultados Obtidos nos Ensaios de Impacto.....	70
7.2.1.	Impacto em provetes de 8 camadas	70
7.2.2.	2º impacto entre zona de impacto central e o bordo em provetes de 8 camadas	83
7.2.3.	Impacto em provetes de 6 camadas	97
7.2.4.	2º impacto entre zona de impacto central e o bordo em provetes de 6 camadas	110
7.2.5.	Impacto em provetes de 4 camadas	125
7.2.6.	2º impacto entre zona de impacto central e o bordo em provetes de 4 camadas	135
7.2.7.	Resumo das propriedades mecânicas dos materiais ensaiados.....	145
7.3.	Comparação de Ensaios de Compressão Quasi-Estáticos e Ensaios no Impacto	147
7.4.	Seleccção de Materiais	149
7.5.	Comparação do Material com a Literatura	150
8.	PRODUÇÃO DO PROTÓTIPO	151
9.	CONCLUSÃO.....	155
10.	SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	157
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	158
12.	ANEXOS	160
12.1.	Anexo A – Ficha de Produção (Materiais e Quantidades)	160

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Ensaio de Charpy.....	21
Figura 2- Queda de peso.....	22
Figura 3- Máquina universal de ensaios Shimdzu.....	25
Figura 4- Penetrador de 10 mm de diâmetro.....	26
Figura 5- Máquina de impacto Imatek.....	26
Figura 6- Projecto dos apoios.....	27
Figura 7- Apoios produzidos e fixos no prato de impacto.....	28
Figura 8- Centro de maquinação CNC HAAS.....	28
Figura 9- Câmara de alta velocidade.....	29
Figura 10- Exemplo de ensaio quai-estático.....	30
Figura 11- Representação esquemática dos pontos onde foram efectuados os ensaios nos provetes.....	31
Figura 12- Representação dos provetes com diâmetro exterior de 82 mm e 100 mm de comprimento. Vista frontal e alçado lateral esquerdo.....	38
Figura 13- Representação dos provetes com diâmetro exterior de 106mm e 100 mm de comprimento. Vista frontal e alçado lateral esquerdo.....	39
Figura 14- Provetes ensaiados.....	40
Figura 15- Infusão de resina utilizando como superfície moldante um tubo de PVC.....	44
Figura 16- Molde de Sikablock de baixa densidade.....	45
Figura 17- Balança de precisão Kern.....	45
Figura 18- Máquina de corte Isomet.....	46
Figura 19- Máquina polidora de pratos rotativos Struers.....	46
Figura 20- Bomba de vácuo.....	47
Figura 21- Reservatório de pressão Airtech.....	47
Figura 22- Molde com desmoldante aplicado.....	48
Figura 23- Película de peel-ply.....	48
Figura 24- Rede de expansão de resina.....	48
Figura 25- Filme para o saco de vácuo.....	49
Figura 26- Sequência habitual de posicionamento dos diferentes materiais em processo de infusão de resina.....	49

Figura 27- Fita selante de borracha aplicada no molde.	50
Figura 28- Spray cola para evitar que haja deslocamentos.	50
Figura 29- Fibras colocadas e coladas com o spray cola.	51
Figura 30- Colocação do filme do saco de vácuo.	51
Figura 31- Colocação do tubo de aspiração de ar.	52
Figura 32- Tubos de entrada de resina.	52
Figura 33- Amostra produzida ainda no molde.	53
Figura 34- Amostra desmoldada.	53
Figura 35- Provete com o corte das abas efectuado.	54
Figura 36- Provete final acabado e pronto para ensaio.	54
Figura 37- Conjunto de gráficos para o provete 8C82 ensaiado na zona central.	71
Figura 38- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8C82 num impacto na zona central.	72
Figura 39- Conjunto de gráficos para o provete 8C//82 ensaiado na zona central.	73
Figura 40- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8C//82 num impacto na zona central do provete.	74
Figura 41- Conjunto de gráficos para o provete 8C ensaiado na zona central.	75
Figura 42- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8C num impacto na zona central.	76
Figura 43- Conjunto de gráficos para o provete 8C// ensaiado na zona central.	77
Figura 44- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8C// num impacto na zona central.	78
Figura 45- Conjunto de gráficos para o provete 8(4K//4C) ensaiado na zona central.	79
Figura 46- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8(4K//4C) num impacto na zona central.	80
Figura 47- Conjunto de gráficos para os provetes 8C82 ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.	84
Figura 48- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8C82 num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	85
Figura 49- Conjunto de gráficos para os provetes 8C//82 ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.	86
Figura 50- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8C//82 num	

impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	87
Figura 51- Conjunto de gráficos para os provetes 8C ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.	88
Figura 52- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8C num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	89
Figura 53- Conjunto de gráficos para os provetes 8C// ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.	90
Figura 54- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8C// num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	91
Figura 55- Conjunto de gráficos para os provetes 8(4K//4C) ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.	92
Figura 56- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8(4K//4C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	93
Figura 57- Conjunto de gráficos para os provetes 6(2C2K2C) ensaiados na zona central.	98
Figura 58- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 6(2C2K2C) num impacto na zona central.	99
Figura 59- Conjunto de gráficos para os provetes 6(2C2V2C) ensaiados na zona central.	100
Figura 60- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 6(2C2V2C) num impacto na zona central.	101
Figura 61- Conjunto de gráficos para os provetes 6(2C2B2C) ensaiados na zona central.	102
Figura 62- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 6(2C2B2C) num impacto na zona central.	103
Figura 63- Conjunto de gráficos para os provetes 6C ensaiados na zona central.	104
Figura 64- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 6C num impacto na zona central.	105
Figura 65- Conjunto de gráficos para os provetes 6(3K//3C) ensaiados na zona central..	106
Figura 66- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 6(3K//3C) num impacto na zona central.	107
Figura 67- Conjunto de gráficos para os provetes 6(2C2K2C) ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.	111

Figura 68- Fotografia no momento de deslocamento máximo antes da fratura de um provete 6(2C2K2C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	112
Figura 69- Fotografia no momento de rotura máxima do provete 6(2C2K2C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	112
Figura 70- Conjunto de gráficos para os provetes 6(2C2V2C) ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo	113
Figura 71- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 6(2C2V2C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	114
Figura 72- Fotografia no momento de rotura máxima do provete 6(2C2V2C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	114
Figura 73- Conjunto de gráficos para os provetes 6(2C2B2C) ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo	115
Figura 74- Fotografia no momento de deslocamento máximo e antes de haver rotura, de um provete 6(2C2B2C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	116
Figura 75- Fotografia no momento propagação da falha até à extremidade do provete 6(2C2B2C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	116
Figura 76- Fotografia de uma segunda rotura localizada na zona lateral do provete perto da superfície onde encosta o lado direito.	117
Figura 77- Conjunto de gráficos para os provetes 6C ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.	118
Figura 78- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 6C num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	119
Figura 79- Conjunto de gráficos para os provetes 8(4K//4C) ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.	120
Figura 80- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 6(3K//3C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	121
Figura 81- Conjunto de gráficos para os provetes 4C ensaiados na zona central.	126
Figura 82- Fotografia no momento de deslocamento máximo antes da fratura de um provete 4C num impacto na zona central.	127
Figura 83- Fotografia no momento de rotura máxima do provete 4C num impacto na zona central.	127
Figura 84- Conjunto de gráficos para os provetes 4C// ensaiados na zona central.	128

Figura 85- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 4C// num impacto na zona central.	129
Figura 86- Conjunto de gráficos para os provetes 4(2K//2C) ensaiados na zona central..	130
Figura 87- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 4(2K//2C) num impacto na zona central.	131
Figura 88- Conjunto de gráficos para os provetes 4C ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.	136
Figura 89- Fotografia no momento de deslocamento máximo antes da fratura de um provete 4C num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	137
Figura 90- Fotografia no momento da fratura máxima do provete 4C num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	137
Figura 91- Conjunto de gráficos para os provetes 4C// ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.	138
Figura 92- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 4C// num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	139
Figura 93- Conjunto de gráficos para os provetes 4(2K//2C) ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.	140
Figura 94- Fotografia no momento de deslocamento máximo antes da falha do provete 4(2K//2C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.....	141
Figura 95- Fotografia no momento de falha do provete 4(2K//2C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	141
Figura 96- Folha de cálculo de selecção do melhor material a utilizar.	149
Figura 97- Molde de uma perna com gaze engessada.	152
Figura 98- Peça em bruto desmoldada e molde após a desmoldação.....	152
Figura 99- Peça com gel-.coat aplicado.....	153
Figura 100- Caneleira com acabamento liso, brilhante e fundo com a aparência de fibra de carbono.	153
Figura 101- Caneleira com imagem colocada sobre superfície acabada.....	154

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela I- Técnicas experimentais usadas para detectar e visualizar o dano interno em compósitos laminados devido ao impacto [18].	24
Tabela II- Materiais utilizados na construção dos laminados.....	36
Tabela III- Propriedades mecânicas da resina SR1500 com o endurecedorSD2503. Propriedades obtidas através da ficha técnica da Sicomin.	37
Tabela IV- Síntese das amostras produzidas.	40
Tabela V- Caracterização do conjunto de materiais com 8 camadas.	41
Tabela VI- Caracterização do conjunto de materiais com 6 camadas.	42
Tabela VII- Caracterização do conjunto de materiais com 4 camadas.....	43
Tabela VIII- Síntese das propriedades de todas as amostrass ensaiadas nos ensaios quasi-estáticos.	67
Tabela IX- Síntese das propriedades dos provetes com 8 camadas no impacto central.....	82
Tabela X- Comparação das propriedades das amostras com 8 camadas no impacto central e no 2º do impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	96
Tabela XI- Síntese das propriedades dos provetes com 6 camadas no impacto central....	109
Tabela XII- Comparação das propriedades das amostrass com 6 camadas no impacto central e no 2º impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	124
Tabela XIII- Síntese das propriedades das amostras com 4 camadas no impacto central.	134
Tabela XIV- Comparação das propriedades das amostras com 4 camadas no impacto central e no 2º impacto na zona entre o impacto central e o bordo.	143
Tabela XV- Síntese das propriedades das amostras ensaiadas através do impacto na zona central.	145
Tabela XVI- Comparação das forças máximas de cada material em cada ensaio.	148

LISTA DE ABREVIATURAS

BS EN- British Standard European Norm
CK 45 – Aço ao carbono de construção
CNC – Controlo numérico computadorizado
ISO - International Organization for Standardization
NF - Norme Française
PP – Polipropileno
PTFE – Politetrafluoretileno
PVC – Policloreto de polivinila

LISTA DE SÍMBOLOS

E – Energia
 $E_{m\acute{a}x}$ – Energia máxima
 E_{abs} – Energia absorvida
 E_{el} – Energia elástica
F – Força
 F_i – Força aplicada relativa
 $F_{m\acute{a}x}$ – Força máxima aplicada
 $l_{Fm\acute{a}x}$ – Deslocamento relativo à força máxima
 $l_{m\acute{a}x}$ – Deslocamento máximo
t – Tempo de contacto
 $t_{Fm\acute{a}x}$ – Tempo de contacto relativo à força máxima
 $t_{m\acute{a}x}$ – Tempo de contacto máximo

1. ORGANIZAÇÃO

Esta dissertação de mestrado encontra-se dividida em 11 capítulos, sendo este onde se explica a organização o primeiro.

No capítulo 2 fala-se da introdução ao trabalho, o porque da sua elaboração, a definição de caneleira e os objectivos a que se propõe o trabalho.

No capítulo 3 são demonstradas as propriedades e fenómenos que podem aumentar a capacidade protectora de uma caneleira e também que tipo de impactos hojem em dia protegem.

No capítulo 4 são explicados os ensaios que foram efectuados, os equipamentos utilizados para o efeito além de se caracterizar os gráficos resultantes dos mesmos ensaios.

No capítulo 5 são descritos os materiais utilizados na construção das diferentes amostras e suas propriedades.

No capítulo 6 é descrito o processo de produção das amostras e também o processo de preparação dos provetes para os ensaios, além dos equipamentos utilizados para tal.

O capítulo 7 apresenta os resultados e gráficos obtidos para os ensaios de compressão e os ensaios de impacto. Além disso, é neste capítulo onde são feitas as comparações de propriedades e valores. Este capítulo também apresenta o processo de selecção de materiais escolhido e possui no fim a comparação dos materiais produzidos neste trabalho com outros presentes na literatura disponível.

O capítulo 8 descreve o processo de produção do protótipo da caneleira e apresenta o resultado final.

O capítulo 9 apresenta as conclusões a que se chegou no fim do trabalho e a verificação de que se o objectivo da dissertação foi cumprido ou não.

O capítulo 10 sugere futuros trabalhos a desenvolver tendo em conta este trabalho numa perspectiva de desenvolvimento e continuação deste mesmo trabalho.

O capítulo 11 contém todas as referências bibliográficas sobre as quais este trabalho se baseou.

2. INTRODUÇÃO

A caneleira é um equipamento de protecção normalmente utilizado em desportos como o hóquei no gelo, hóquei em patins, futebol, basebol, *muay thai*, entre outros. De uma forma geral é utilizada em todos os desportos em que haja uma probabilidade de contacto com a zona inferior à linha do joelho.

No hóquei, é utilizada para proteger a canela dos jogadores tanto da bola, como dos tacos dos oponentes (tanto no hóquei no gelo como no hóquei em patins). No futebol, protegem de acções como carrinhos, colisões e agressões dos outros jogadores.

A caneleira costuma ser presa por tiras de velcro ou meia de sustentação. Diversas organizações profissionais, amadoras e instituições educacionais já adoptaram a caneleira como equipamento obrigatório para reduzir o número de contusões e lesões.

A tíbia encontra-se muito exposta na sua superfície anterior medial, isto é, está directamente sob a pele na região da canela e isso não dá o nível de absorção ao impacto que existe nos outros ossos do corpo pelos músculos. Golpes e pancadas na região podem, portanto, provocar ferimentos sérios, a ponto de existirem fraturas. Tais ferimentos são extremamente dolorosos, já que o perióstio, a fina membrana que reveste todos os ossos, é um tecido com abundância de nociceptores (os "receptores" da dor).

Ao nível de um desporto em concreto, o futebol, existe uma norma que obriga à utilização das caneleiras em qualquer tipo de competição amadora ou profissional. Esta norma apenas visa que o material utilizado necessita de proteger as pernas a nível de lacerações ou contusões. Desta forma, é lógico compreender que o material ao dispor dos praticantes de desporto, nas grandes superfícies comerciais, obedeça apenas aos critérios mínimos de protecção, tendo assim preços baixos e competitivos.

Tentou proceder-se então ao desenvolvimento de caneleiras em material compósito, de forma a melhorar as propriedades de dissipação de energia de um provável impacto, estando assim o praticante da modalidade mais protegido, e também melhorar o conforto na utilização da caneleira.

Ao tentar procurar um material compósito que consiga ao mesmo tempo oferecer uma boa protecção e tenha um custo moderado, é possível contrariar os custos muito elevados das caneleiras em material compósito já existentes no mercado e tornar também possível que cada vez mais praticantes de desporto amador possam utilizar esta tecnologia.

No final deste trabalho será indicado um material compósito com as melhores propriedades encontradas, dentro dos materiais que foram ensaiados. Para isso, será escolhido um material que reflecta o melhor compromisso entre as propriedades mecânicas em análise e o custo de produção.

As condições de comparação entre o melhor material compósito obtido neste trabalho e os materiais existentes no mercado são a força máxima aplicada, a energia elástica, o deslocamento e o tempo de contacto.

3. ESTADO DE ARTE

Neste capítulo verifica-se quais as condições que conferem à caneleira uma protecção aceitável, o efeito geral do fenómeno do impacto em materiais compósitos e também a caracterização do impacto de baixa velocidade.

3.1. Avaliação da Protecção Proporcionada por Caneleiras

As fraturas representam 2-11% de todas as lesões do futebol e as fraturas das extremidades inferiores representam 30-33% de todas as fraturas [1]. Colisões inesperadas, como pontapés ou desarmes em carrinho deslizantes são as principais razões dessas lesões [2]. Não há consenso sobre as forças de impacto necessárias para produzir uma fratura.

A utilização de caneleiras é um dos métodos preventivos sugeridos. A sua principal função é proteger os tecidos moles e ossos nas extremidades inferiores do impacto externo. Estas protecções fornecem absorção ao choque e facilitam a dissipação de energia, diminuindo assim o risco de lesões graves.

Muitos autores concordam que as caneleiras podem reduzir o número de lesões menos graves [6,7]. No entanto, não é claro se elas conseguem prevenir lesões mais graves, como fraturas da tibia. Os desarmes em carrinho que normalmente causam lesões mais graves, frequentemente produzem fissuras ou danos na caneleira. Assim o uso de caneleiras pode não prevenir todas as fraturas [8, 9]. Neste contexto, usar o material apropriado e aplicar a geometria correcta são aspectos importantes do *design* do equipamento de protecção [10]. Actualmente, materiais rígidos (plástico, carbono, kevlar, etc.) são usados como a casca externa, enquanto materiais macios são preferidos para o forro interior da caneleira. Uma caneleira bem projectada deve fornecer protecção adequada para todo o comprimento da tibia, mas permitir a amplitude de movimento do tornozelo e do joelho [11]. Para aumentar a absorção de energia, a casca da caneleira deve ser espessa e rígida na direcção transversal. Entretanto, um aumento no comprimento não proporciona uma melhor absorção de choque [8, 12]. A montagem da caneleira na geometria tibial por adição de material macio (por exemplo, espuma) ou cavidades de ar entre a caneleira e a espuma, irá reduzir a força de impacto máxima [12]. Alguns cientistas sugeriram mesmo preencher essas cavidades com materiais semi-rígidos [8]. Embora muitos autores defendam o uso de caneleiras, as

características de projecto estrutural ideal não foram especificamente definidos.

A norma inglesa BS EN 13061 (2001) descreve caneleiras como sendo destinadas a reduzir significativamente a gravidade da laceração, contusão e punção cutânea causada por impactos. Por dedução, caneleiras certificadas sob esta norma não se destinam a prevenir fraturas da tibia. Por conseguinte, as caneleiras são propensas a ser eficazes contra a punção dos *pitons* em vez de um impacto da tibia ou pé de outro jogador.

Os testes de impacto não são exigidos e as suas energias de impacto não são justificadas de forma alguma. Num teste, um pino de diâmetro de 10 mm, acoplado a uma massa de 1 kg, faz um impacto quase tangencial (10°) a $5,4 \text{ m s}^{-1}$. A casca não deve rasgar ou perfurar, mas não há medição de força. Num ensaio de impacto com uma barra horizontal de face plana (massa de 1 kg, largura 14 mm, raio de canto 2 mm) com uma energia cinética extremamente baixa de 2 J, a força de pico permitida é de 2 kN, embora a energia cinética equivalente a um pontapé esteja estimada em 10 J [8]. Isto mostra o quão modestos os níveis de protecção das caneleiras actuais podem ser contra os impactos. Por isso, os 2 J de energia presentes na norma BS EN 13061 precisam de ser reconsiderados, pois são demasiado baixos.

Foi mostrado que já ocorreram danos a caneleiras em 16,9% durante um desarme em carrinho [1] e que ocorreram fraturas em indivíduos enquanto estes utilizavam caneleiras [8, 4]. Estes dados foram obtidos através de jogadores que usavam caneleiras padrão que atendem aos requisitos da norma BS EN 13061. Vários autores relataram que a protecção através das caneleiras poderia não ser suficiente em impactos de força elevada e que poderiam ocorrer fraturas na tibia [8, 9, 13].

O contacto por desarme em carrinho foi identificado como o mais perigoso [4] (em termos estatísticos), são caracterizados por velocidades relativamente baixas (1 a 5 m/s), enquanto impactos devidos a pontapés atingem velocidades mais elevadas (18-24 m/s) [12].

O critério para a fratura óssea foi descoberto ensaiando tíbias de cadáver em impacto. Elas fraturaram com forças na gama de 4 a 7 kN para *Nyquist, G. et. al* [14], e de $2,9 \pm 0,4$ kN para *Francisco, C. et. al* [12]. Se o pé está fixo no chão e o pé do jogador adversário carrega a tibia perto do seu centro, a energia cinética de contacto ultrapassa a energia de fratura tibia (para desarme e pontapé). Mesmo se uma caneleira pudesse distribuir este tipo de carga para o joelho e tornozelo, isso aumentaria o risco de lesões nestes pontos, que são mais difíceis de tratar.

Foram efectuados uma série de ensaios de impacto a tibiás de cadáveres para verificar quais as forças máximas, deformações e tempos de contacto associadas às mesmas [12]. Estes ensaios foram executados a várias alturas 10, 20 e 30 cm. Depois disto efectuou os mesmos ensaios sobre caneleiras a alturas de 20, 30, 40 e 50 cm de altura e respectivas velocidades, 1,7, 2,2, 2,5 e 2,7 m/s. As diferentes caneleiras tinham na sua composição diferentes materiais como plástico, fibra de vidro, plástico com cavidade de ar e kevlar. Os ensaios decorreram com um corpo de prova de 4,2 kg de massa. O ensaio utilizado foi o de queda de peso com acção gravítica, ensaio similar ao efectuado no presente trabalho. O ensaio a 20 cm de altura corresponde a uma energia máxima de 6 J, foi o escolhido para ser seguido de forma similar neste trabalho sendo que, como método de trabalho e como valores de referência para todos os ensaios foi escolhido o nível de energia de 5 J, correspondendo a um corpo de carga de 2,903 kg de massa caindo a 180 mm de altura a uma velocidade de 1,88 m/s.

Yasar, T. et al realizaram ensaios de impacto em caneleiras de polipropileno (caneleiras comercializadas) e em fibra de carbono (800–900 N e 2400–2800 N) [15]. Através destes observou-se e concluiu-se que as caneleiras em fibra de carbono oferecem melhores condições de protecção ao impacto. As forças verificadas por eles que se transmitiram à parte frontal da tibia foram significativamente mais baixas do que aquelas necessária para fraturar a tibia. Verificaram também que as caneleiras *standard* comercializadas podem não oferecer protecção adequada contra forças de impacto [15]. Isto acontece quando a caneleira flexa mais (baixa rigidez transversal), e se aumenta o deslocamento e tempo de contacto da força na tibia, aumentando também a possibilidade de lesão. Esta é então uma das desvantagens das caneleiras de PP [15].

3.2. Impacto em Materiais Compósitos

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

As solicitações de impacto podem-se dividir em duas categorias diferentes consoante

o valor da velocidade: impacto de alta velocidade ($50 \text{ m/s} < \text{velocidade} < 1000 \text{ m/s}$) e impacto de baixa velocidade ($\text{velocidade} < 10 \text{ m/s}$) [16].

3.2.1. Impacto de baixa velocidade

O impacto de baixa velocidade é, sem dúvida, a solicitação mais perigosa em materiais compósitos. Como veremos, o dano originado pode afectar de uma forma drástica a resistência residual da estrutura, nomeadamente quando esta está submetida a solicitações de compressão. Para além de poder originar extensas zonas danificadas, estas zonas danificadas ou o dano em geral é sempre muito difícil de verificar a olho nu, ou seja, não se observa geralmente indentação ou fissuração superficial. Na realidade, são necessárias técnicas de análise relativamente sofisticadas (ultrassons, radiografias) para detectar o dano de impacto. Finalmente, refira-se que este tipo de solicitação é talvez o mais comum. A queda de ferramentas durante o fabrico ou manutenção de estruturas, o manuseamento descuidado, a queda de granizo, o impacto de aves nas aeronaves, são algumas das situações típicas. Com o objectivo de simular o impacto de objectos estranhos, foram desenvolvidos vários métodos de ensaio, que se podem agrupar em dois tipos: os dispositivos pendulares (Figura 1) e os de queda de peso (Figura 2) [17].

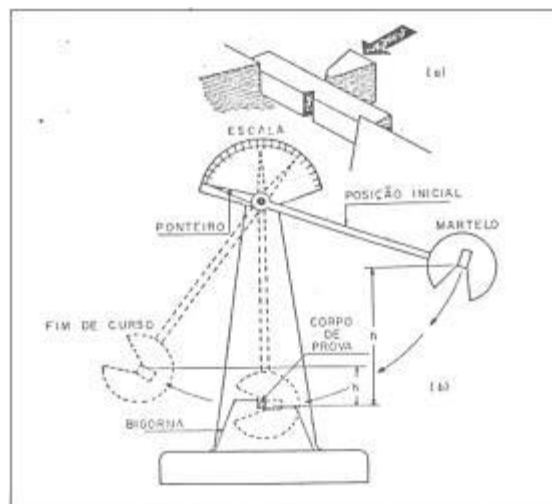


Figura 1- Ensaio de Charpy.

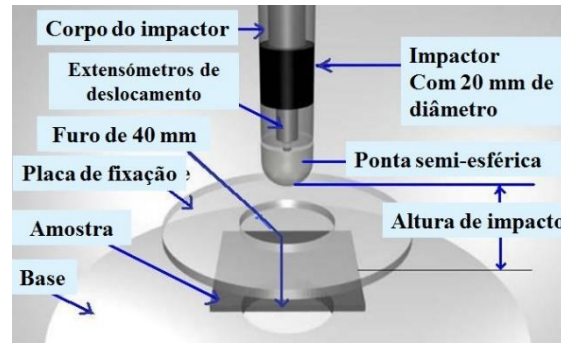


Figura 2- Queda de peso.

O dano causado por impacto de baixa velocidade caracteriza-se por rotura da matriz, delaminações entre camadas, na maior parte dos casos com rigidez e orientação diferentes (como se referiu anteriormente) e destacamento entre a matriz e a fibra [17]. A rotura das fibras é limitada, e quando existe, está confinada à zona de contacto [17]. O aparecimento das delaminações nas interfaces entre camadas diferentemente orientadas está relacionado com a diferença de rigidez entre elas, sobretudo à flexão. Em cada interface, a delaminação apresenta uma forma de amendoim orientado na direcção das fibras da camada situada abaixo da interface. O tamanho das delaminações aumenta com a diferença de orientação das camadas adjacentes à interface [17]. Por outro lado, constata-se que nos laminados pouco espessos, o tamanho das delaminações aumenta das interfaces situadas junto à superfície solicitada, para as interfaces situadas mais longe dessa mesma superfície (distribuição troncocónica). As delaminações 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 existentes entre camadas diferentemente orientadas originando o aparecimento de delaminações. 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 [17].

Para laminados mais espessos ou com maior número de camadas, o dano característico de impacto consiste numa rede interligada de fissuras de matriz e delaminações e a sua distribuição ao longo da espessura evidência uma maior concentração do dano a meio da espessura.

4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Várias técnicas têm sido desenvolvidas para determinar a extensão de dano presente numa estrutura após o impacto (Tabela I) [18]. O dano que ocorre internamente, normalmente, consiste em rotura das fibras, delaminações, e fissuras na matriz. Na maior parte dos casos, e particularmente em casos de impacto de baixa velocidade, uma grande parte do dano induzido é interno e não é possível ser detectado simplesmente por observação da superfície da estrutura [16]. Desta forma, com o objectivo de simular o impacto de objectos estranhos, foram desenvolvidos vários métodos de ensaio, que se podem agrupar em dois tipos: os dispositivos pendulares e os de queda de peso.

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dois equipamentos para a obtenção de dados que permitiram a análise das diferentes propriedades dos diferentes provetes através de um ensaio de compressão quasi-estático numa máquina universal de ensaios de tracção e um ensaio de baixa velocidade executado numa máquina “drop test”.

Os ensaios de compressão quasi-estáticos foram efectuados com o objectivo de verificar níveis de resistência e de energia. Através destes ensaios é possível também determinar a rigidez transversal dos diferentes materiais pela determinação do declive inicial da curva e comparar com o obtido em impacto.

Tabela I- Técnicas experimentais usadas para detectar e visualizar o dano interno em compósitos laminados devido ao impacto [18].

Technique	References	Technique	References
Visual observations	Cristescu et al (1975) Liu (1988) Liu and Malvern (1987b) Malvern et al (1978; 1989) Ross and Sierakowski (1973) Ross et al (1985) Sierakowski et al (1976) Takeda et al (1981a,b; 1982a)		Grady and Meyn (1989) Guynn and O'Brien (1985) Khetan and Chang (1983) Leach and Moore (1985) Leach et al (1987) Levin (1986) Li and Harding (1987) Liu et al (1987a) Liu (1988) Malvern et al (1987) Potter (1985) Preuss and Clark (1988) Ramkumar and Chen (1983a) Ramkumar (1983b) Rhodes et al (1981) Sankar and Sun (1986) Saunders and Van Blaricum (1988) Stellbrink (1983) Williams and Rhodes (1982) Wu and Springer (1986; 1988a) Wyrick and Adams (1988)
Microscopic examinations	Awerbuch and Hahn (1976) Bishop (1985) Boll et al (1986) Bowles (1988) Cantwell and Morton (1984b; 1985b; 1989) Chai et al (1983) Cordell and Sjoblom (1986) Dan-Jumbo et al (1989) Demuts and Sharpe (1987) Dorey et al (1978) Dorey et al (1985) Evans and Masters (1987) Freeman (1982) Frock et al (1988) Gardiner and Pearson (1985) Grady and Meyn (1989) Greszczak (1982) Griffin (1987) Joshi and Sun (1985; 1987) Leach et al (1987) Liu et al (1987a) Liu and Malvern (1987b) Preuss and Clark (1988) Reed and Schuster (1969) Rhodes et al (1981) Schuster and Reed (1970) Sjoblom et al (1988) Stellbrink (1983) Sun and Rechak (1988b) Takeda et al (1982a; 1986; 1987) Vasudev and Meehlman (1987) Williams and Rhodes (1982) Wu and Springer (1988a) Wyrick and Adams (1988) Yew and Kendrick (1987)	Radiography	Adsit and Wazczak (1979) Awerbuch and Hahn (1976) Cantwell and Morton (1985b; 1989) Cantwell et al (1986) Clark (1989) Clerico et al (1989) Guynn and O'Brien (1985) Liu et al (1987a) Liu (1988) Malvern et al (1987) Potter (1985) Wyrick and Adams (1988)
		Shadow-Moire technique	Chai et al (1983) Clark and Van Blaricum (1987) Jones et al (1987) Khetan and Chang (1983) Leach et al (1987) Mousley (1984) Saunders and Van Blaricum (1988) Van Blaricum et al (1989)
		Thermography	Hillman and Hillman (1983) Potet et al (1987)
		Deptying	Cantwell (1988a) Cantwell and Morton (1985b) Guynn and O'Brien (1985) Levin (1986) Freeman (1982) Li and Harding (1987)
		Brittle lacquer spallation	Rhodes et al (1981)
		Acoustic emission	Gardiner and Pearson (1985) Ochiai et al (1982)
		Tapping technique	Kenner et al (1985)
		Fiber optics	Hofer (1987)
Ultrasonic techniques	Adsit and Wazczak (1979) Bishop (1985) Boll et al (1986) Buynak et al (1988) Cantwell (1988a,b) Cantwell and Morton (1985a,b) Cantwell et al (1983; 1984a; 1986) Chai et al (1983) Cordell and Sjoblom (1986) Curtis and Bishop (1984) Curtis et al (1984) Demuts and Sharpe (1987) Dobyns and Porter (1981) Gandhe and Griffin (1989)		

4.1. Equipamentos Utilizados

De modo a avaliar o comportamento mecânico em compressão e em impacto, foi necessário a utilização de vários equipamentos de forma a ser possível recolher dados.

4.1.1. Máquina universal de ensaios

Os ensaios de compressão foram realizados numa máquina universal de ensaios **SHIMADZU modelo Autograph AG-1**, com capacidade para 100 kN (Figura 3). Esta máquina tem a capacidade de atingir velocidades de ensaio de 0.0005 – 1000 mm/min para a capacidade máxima e velocidade máxima de retorno de 1200 mm/min. Tem uma precisão de velocidade de $\pm 0.1 \%$. A largura útil para ensaios da máquina é de 600 mm e altura útil 750 mm. As medidas são obtidas através de encoder óptico com uma precisão de $\pm 0.1 \%$. Possui uma célula de carga e as dimensões 1186 x 752 x 2173 mm.



Figura 3- Máquina universal de ensaios Shimadzu.

Foi usado um penetrador, (Figura 4), hemisférico de 10 mm de diâmetro para os ensaios de impacto.



Figura 4- Penetrador de 10 mm de diâmetro.

4.1.2. Máquina de ensaios de impacto

Os ensaios de impacto foram realizados numa máquina de impacto de queda livre **IMATEK-IM10**, (Figura 5), completamente instrumentada com um sistema de aquisição de dados recebidos de uma célula de carga piezoelétrica, com uma capacidade de recolha de 32000 *pontos*, posicionada na raiz do penetrador.



Figura 5- Máquina de impacto Imatek.

Esta máquina é constituída por uma torre com duas colunas-guia, um carrinho que suporta o penetrador, correndo nestas, apoiado em rolamentos. Possui ainda uma parte fixa inferior normalmente no interior de uma câmara onde poderá ser controlada a temperatura e onde se fixa a amostra num dispositivo adequado. O penetrador pode ser elevado até uma altura predeterminada e solto na direcção vertical com reduzido atrito nas colunas-guia. Ao peso em queda podem associar-se diferentes tipos de penetradores, variando a forma e dimensões da sua ponta. Pode ainda alterar-se a massa do conjunto pela adição de massas. A energia de impacto é completamente fornecida pela gravidade e controlada pelo ajustamento da altura de queda, até um máximo de 3.5 metros, possuindo um sistema de

massas variável de 8 a 30 *kg*, o que permite um pico de 1000 *J*, com uma velocidade de impacto de 8.28 *m/s*. Está equipada com um dispositivo de prevenção de segundo impacto e um “software” “**Impacqt Versão 1.3**”. As dimensões nominais da câmara, onde se situa o dispositivo de fixação dos provetes são (600×600×600) mm. O penetrador de ponta esférica utilizado para os ensaios de impacto foi também o de 10 mm de diâmetro.

Devido à geometria de meia cana dos provetes, foi necessário construir um dispositivo de fixação adequado para evitar que estes se deslocassem no seu sentido transversal (Figura 6e Figura 7).

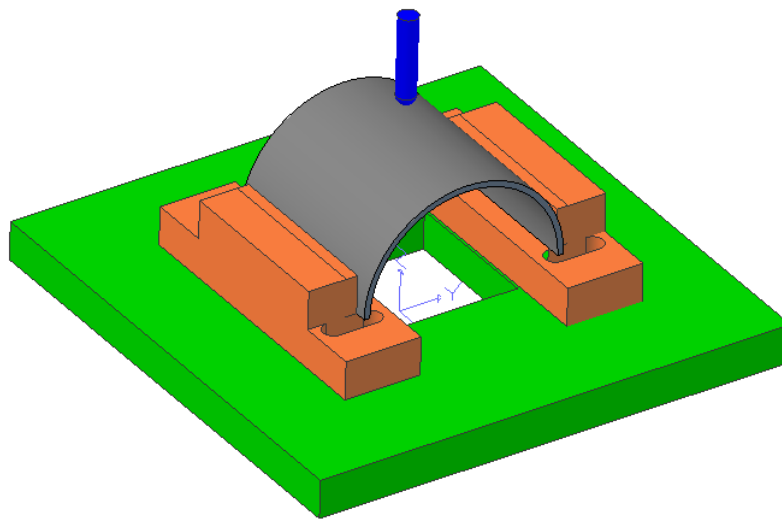


Figura 6- Projecto dos apoios.

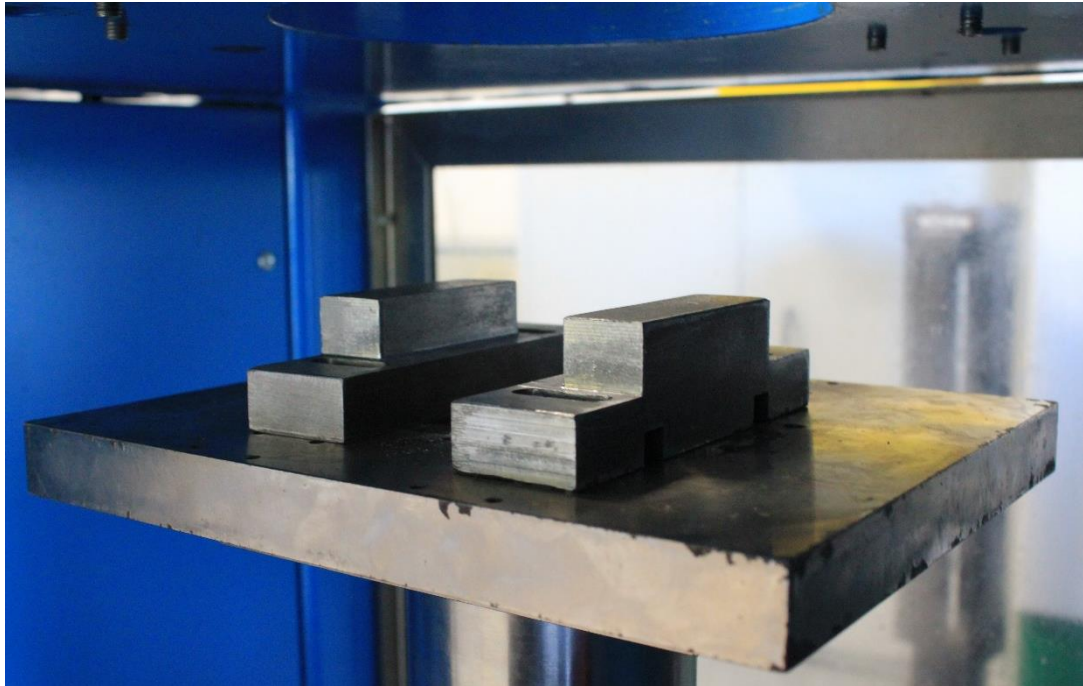


Figura 7- Apoios produzidos e fixos no prato de impacto.

Este dispositivo foi construído a partir de uma barra de aço CK45 (40 x 40 mm) e maquinada através de uma fresadora CNC modelo HAAS série VFE (Figura 8) tendo os programas sido desenvolvidos no *software* de desenho e simulação de maquinação “Catia V5”.



Figura 8- Centro de maquinação CNC HAAS.

4.1.3. Câmara de alta velocidade

Como o impacto, mesmo sendo de baixa velocidade, acontece a uma velocidade

demasiado alta para se conseguir visualizar o deslocamento do provete alguma coisa por observação a olho nu, foi utilizada uma câmara de alta velocidade **PHOTRON FASCAM SA3 Modelo 60K-C2** (Figura 9) com o objectivo de observar a amplitude do deslocamento ao nível visual.



Figura 9- Câmara de alta velocidade.

A câmara de alta velocidade foi colocada de frente para o ensaio/provete sendo apenas possível verificar o deslocamento transversal do provete.

A configuração da câmara utilizada para a aquisição de imagem foi a seguinte:

- ❖ **Velocidade:** 3000 fps
- ❖ **Resolução:** 384x576 pixeis

4.2. Análises de Gráficos Resultantes dos Ensaios de Flexão e Impacto

Os ensaios quasi-estáticos e os ensaios de impacto foram elaborados tendo em conta a possível observação dos níveis de resistência e energia (como indicado em 2.1.). Além disso, pode-se determinar a rigidez transversal do material pela determinação do declive inicial da curva e comparar com o obtido em impacto.

- **Ensaio de quasi-estáticos**

Foram efectuados ensaios quasi-estáticos (Figura 10) com o objectivo de comparar propriedades de resistência e deslocamento obtidos, com os mesmos resultados obtidos através dos ensaios de impacto de baixa velocidade e verificar se os gráficos obtidos teriam perfis e registos similares.



Figura 10- Exemplo de ensaio quai-estático.

No “*set-up*” do ensaio quasi-estático leram-se valores com um intervalo de 200 milissegundos e a velocidade de deslocamento foi de 0,5 mm/min..

- **Ensaio de Impacto**

Todos os ensaios de impacto foram executados nas mesmas condições tendo a massa do corpo em queda 2,903 kg, a massa do penetrador 0,336 kg de massa, a altura de queda 180mm o que convertido em energia, dá cerca de 5 J de energia de impacto.

A energia escolhida foi 5 J pois no planeamento deste trabalho estavam previstos ensaios de impacto numa tibia artificial da marca *Sawbones*. Para esta tibia artificial, *Ankrah, S. e Mills, N. J.*, definiram que devem ser utilizadas energias de impacto iguais ou menores

que 5 J, de forma a não introduzir dano na tibia [8]. Desta forma futuros ensaios na tibia artificial possuem dados para comparação.

Em cada provete fizeram-se ensaios no ponto central (**ponto A**) e num ponto entre o ponto central e uma aresta (**ponto B**) de modo a avaliar a integridade do provete após o primeiro impacto. Existiram dois tipos de ensaios de impacto executados, o ensaio no **ponto A** (centro do provete) e o ensaio no **ponto B** (localizado perto do bordo livre do provete) (Figura 11).

O segundo impacto foi efectuado a 25 mm do centro porque havia a possibilidade de analisar a resistência depois do primeiro impacto central e de forma a não ter que analisar qual o fenómeno de maior influência (impacto central ou distância até ao bordo), escolheu-se uma distância equidistante entre os dois pontos.

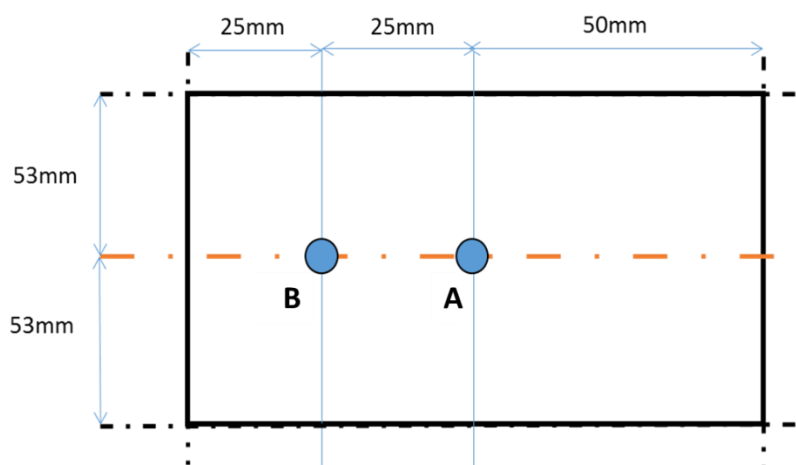


Figura 11- Representação esquemática dos pontos onde foram efectuados os ensaios nos provetes.

4.3. Caracterização do Comportamento da Amostra nos Diferentes Ensaios

Nos diferentes ensaios, foram obtidos diferentes tipos de gráficos consoante a análise que se queira fazer. Nos ensaios quasi-estáticos os gráficos foram obtidos através do programa “**Trapezium X**” e nos ensaios de impacto de baixa velocidade os gráficos foram obtidos através do *software* “**Impacqt Versão 1.3**”.

Nos ensaios quasi-estáticos os gráficos obtidos são do tipo **Força (kN) x Deslocamento (mm)**. Nos ensaios de impacto de baixa velocidade os gráficos obtidos foram

do tipo *Força (kN) x Deslocamento (mm)*, *Energia (J) x Deslocamento (mm)*, *Energia (J) x Tempo (ms)* e *Força (kN) x Tempo (ms)*.

Os diferentes tipos de gráficos permitem obter diferentes tipos de valores e propriedades para cada tipo de material utilizado. Assim, é possível verificar o tipo de comportamento de cada material, através da medida da sua resistência, capacidade de absorção de energia no limite elástico, capacidade de absorção de energia através de dano e absorção de energia através de deslocamento.

❖ Gráficos Força (kN) x Deslocamento (mm)

Neste tipo de gráfico é possível obter a força máxima exercida sobre o material ($F_{m\acute{a}x}$), o deslocamento máximo que o material possui ($l_{m\acute{a}x}$) e ainda o deslocamento para o qual a força tem o valor máximo ($l_{Fm\acute{a}x}$) (Gráfico 1). O deslocamento máximo e o deslocamento para o qual a força é máxima pode ser coincidente, ou não.

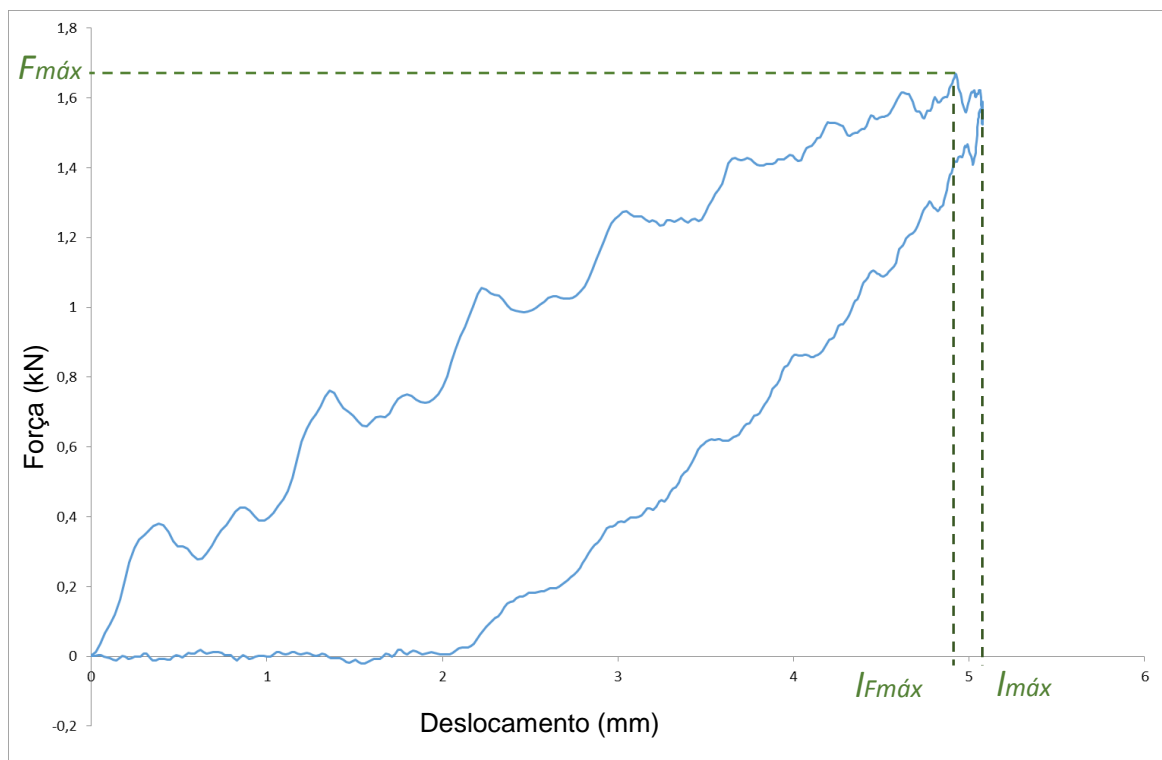


Gráfico 1- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm).

- **Gráficos Energia (J) x Tempo (ms)**

Para além de alguns parâmetros anteriormente referidos como a energia máxima, energia absorvida, neste tipo de gráfico é possível verificar o tempo de contacto entre o penetrador e o material. Isto torna possível observar se o impacto foi feito de uma forma muito rápida e curta, neste caso mais violenta, ou se foi através de um contacto mais prolongado, havendo assim mais tempo para uma absorção de energia de uma forma mais prolongada e não tão agressiva. Assim, é possível verificar o tempo de contacto à força máxima ($t_{Fmáx}$), para o qual se regista a força máxima, e também o tempode contacto máximo ($t_{máx}$) que mostra o tempo de contacto que houve entre o penetrador e a amostra (Gráfico 2).

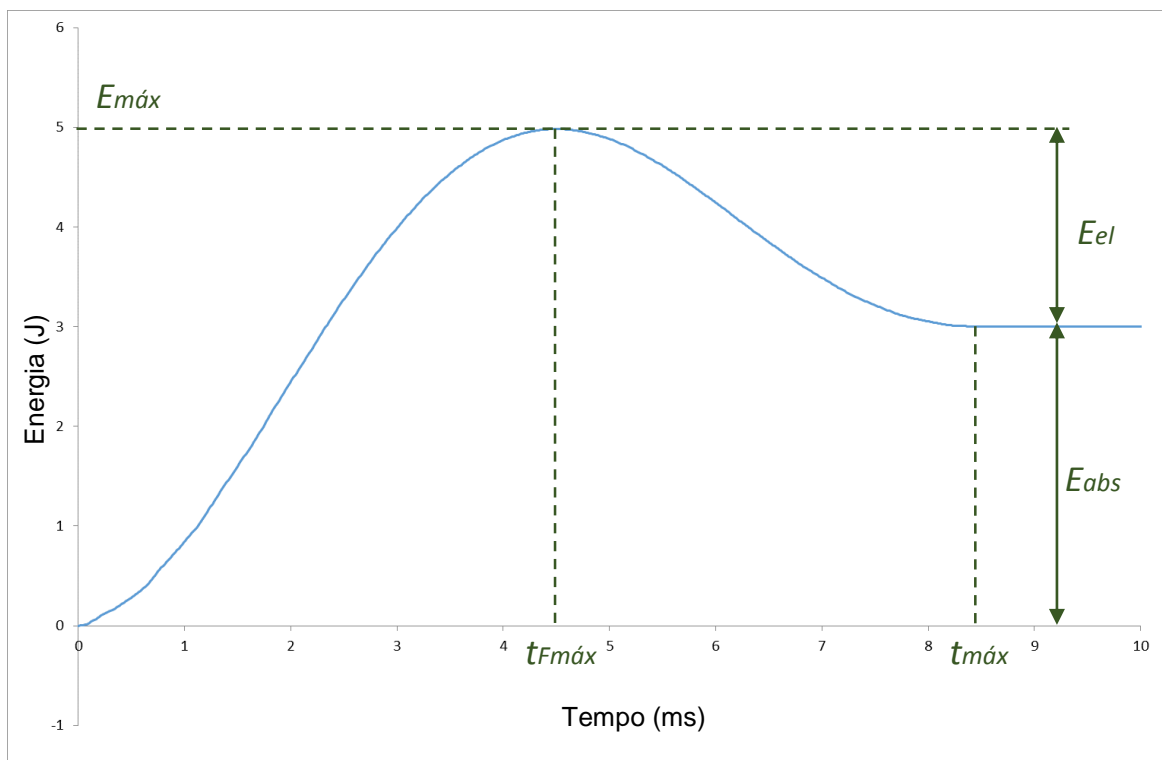


Gráfico 2- Gráfico Energia (J) x Tempo de contacto (ms).

- **Gráficos Força (kN) x Tempo (ms)**

No gráfico Força x Tempo, é possível verificar também o tempo máximo de contacto ($t_{máx}$) e o tempo de contacto para o qual a força é máxima ($t_{Fmáx}$). Além disto verifica-se também a força máxima ($F_{máx}$) e a que instante ela é exercida no material (Gráfico 3).

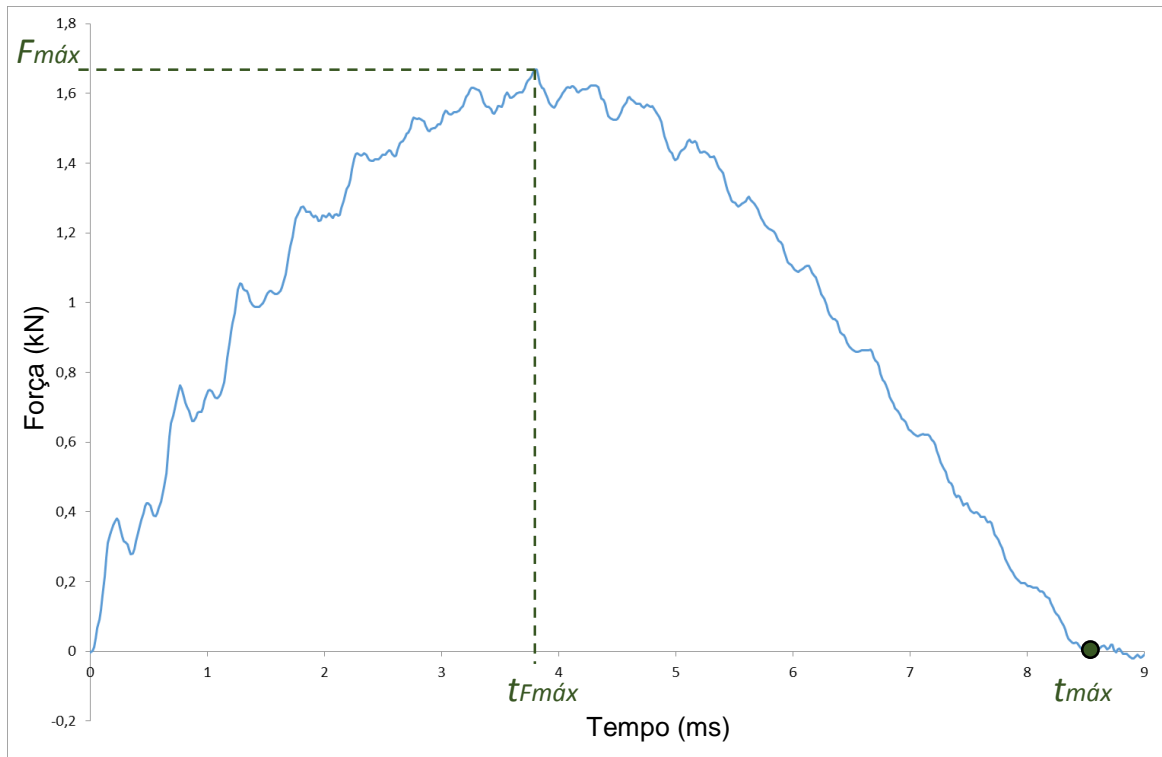


Gráfico 3- Gráfico Força (kN) x Tempo de contacto (ms).

1. **Força, F** : Força exercida pelo penetrador sobre provete, na direcção do impacto, neste caso vertical. Expressa em kilo-Newton, kN .
2. **Força máxima, $F_{máx}$** : É a força máxima que ocorre durante o teste de impacto. É expressa em kilo-Newton, kN .
3. **Deslocamento, l** : É o deslocamento relativo entre o penetrador e o suporte da amostra, a partir do primeiro contacto do penetrador com a amostra. É expressa em milímetros, mm .
4. **Deslocamento máximo, $l_{máx}$** : É o maior deslocamento relativo registado entre o penetrador e o provete, a partir do primeiro contacto do penetrador com a amostra. É expresso em milímetros, mm .

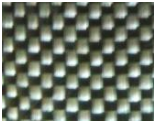


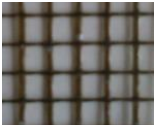

5. **Deslocamento à máxima força, $l_{Fmáx}$:** É o deslocamento correspondente à máxima força $F_{máx}$. É expresso em milímetros, mm .
6. **Energia, E :** É a energia dispendida na deformação e penetração do penetrador até um deslocamento, l . É expressa em joules, J .
7. **Energia máxima, $E_{máx}$:** É a energia dispendida até à deflexão correspondente à máxima força, $l_{Fmáx}$. É expressa em joule, J .
8. **Energia elástica, E_{el} :** É a energia que é absorvida pelo domínio elástico do material e depois libertada para fora do sistema. É expressa em joule, J .
9. **Energia absorvida, E_{abs} :** É a energia que absorvida pelo material sob a forma de dano. Quando este nível de energia é atingido, o material não volta ao seu estado inicial. É expresso em joule, J .
10. **Tempo de contacto, t :** É a medida de tempo que se inicia quando o penetrador entra em contacto com a amostra. É expresso em milisegundos, ms .

5. MATERIAIS UTILIZADOS

Na elaboração das diferentes amostras e respectivos provetes foram utilizados vários tipos de fibras em diferente número de camadas, tipo e orientação, e também cortiça.

Desta forma apresenta-se todos os tipos de fibra utilizados para a construção dos provetes bem como a cortiça utilizada (Tabela II).

Tabela II- Materiais utilizados na construção dos laminados.

Nº Identificação	Tipo Fibra	Material	Malha	Peso específico (g/m²)
1		Fibra de Carbono	Tafeta	160,0
2		Kevlar	Tafeta	281,0
3		Fibra de Vidro	Tafeta	205,0
4		Fibra de Basalto	Rede	11,5
5		Cortiça	Aglomerado prensado	380,0

Como matriz, foi utilizada apenas um tipo de resina, resina epóxy SR1500 e endurecedor SD2503. As propriedades da matriz após a cura são apresentadas de seguida (Tabela III).

Tabela III- Propriedades mecânicas da resina SR1500 com o endurecedorSD2503. Propriedades obtidas através da ficha técnica da Sicomin.

Ciclo de Cura	SR 1500 / SD2503	
	14 dias 23° C	24 h – 23° C + 8 h – 60° C
Tensão:		
Módulo de Elasticidade (MPa)	3350	2860
Resistência Máxima (MPa)	77	71
Resistência à Ruptura (MPa)	72	65
Alongamento à Tensão Máxima (%)	3.6	4.7
Alongamento na Ruptura (%)	5.4	8.0
Flexão:		
Módulo de Elasticidade (MPa)	3300	2760
Resistência Máxima (MPa)	125	123
Alongamento à Tensão Máxima (%)	4.6	6.4
Alongamento na Ruptura (%)	7.2	7.5
Resistência ao Impacto de Charpy		
Resiliência (kJ/m ²)	12	30
Temperatura de Transição Vítrea		
Tg1 (° C)	55	70
Tg1 máx (° C)		76

Resultados obtidos através das normas:

Tracção : NF T51 -034

Flexão : NF T51 -001

Impacto Charpy: NF T51 -501

Transição vítrea: ISO 11357-2 : 1999 -5°C/180°sem azoto

Como agente desmoldante, foi utilizado **Release All Safelease 30** que se define como sendo um agente desmoldante PTFE à base de água. Pode ser usado em moldes metálicos ou compósitos e possui boas características de desmoldação em sistemas com resinas epoxy e fenólicas.

5.1. Provetes Produzidos e Seus Constituintes

Os provetes produzidos são constituídos pelos materiais descritos na introdução deste capítulo. A escolha desses materiais deve-se sobretudo à sua resistência. O ponto de partida para a escolha dos constituintes dos provetes, foi a construção efectuada de protótipos por parte de outros autores [15], que utilizaram três camadas de fibra de carbono e duas camadas de fibra de polyester. No fim do trabalho, no anexo 12.1., está disponível toda a informação compilada de todos os materiais e quantidades para a produção das amostras.

Foram no total produzidas treze amostras de materiais diferentes. As amostras estão divididas em três grupos com oito, seis e quatro camadas. Foi estabelecido no início deste trabalho que a cortiça não contaria como camada. De modo a avaliar o efeito da geometria, foram produzidas amostras de oito camadas com dois diâmetros diferentes (82 mm e 106 mm).

Provetes do mesmo material, foram submetidos a ensaios de impacto no ponto central (A) e num ponto lateral após o primeiro impacto (B) e a ensaios de compressão quasi-estáticos.

A avaliação do efeito do número de camadas foi feita com a geometria de diâmetro 106 mm. Todos os provetes possuem 100 mm de comprimento (Figura 12 e Figura 13).

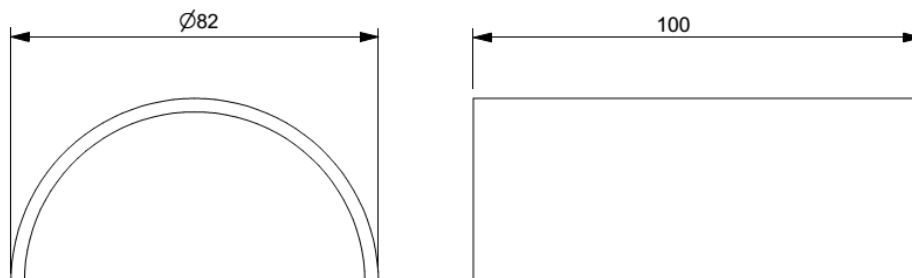


Figura 12- Representação dos provetes com diâmetro exterior de 82 mm e 100 mm de comprimento. Vista frontal e alçado lateral esquerdo.

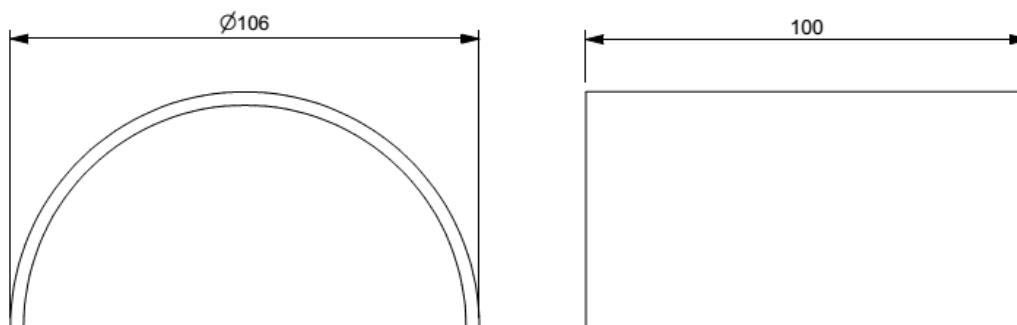


Figura 13- Representação dos provetes com diâmetro exterior de 106mm e 100 mm de comprimento. Vista frontal e alçado lateral esquerdo.

Foi elaborada uma tabela de modo a sintetizar de uma forma geral as amostras e provetes existentes (Figura 14) neste trabalho (Tabela IV).

Tabela IV- Síntese das amostras produzidas.

AMOSTRAS	Nº CAMADAS	ESPESSURA (mm)	GEOMETRIA $\varnothing_e \times L$ (mm)	IMPACTO (PROVETES)		QUASI-ESTÁTICO
8C82	8	2,1	82x200	8C82-00	8C82-01	8C82
8C//82	8	4,0	82x200	8C//82-00	8C//82-01	8C//82
8C	8	2,6	106x300	8C-00	8C-01	8C
8C//	8	4,3	106x300	8C//-00	8C//-01	8C//
8(4K//4C)	8	4,1	106x300	8(4K//4C)-00	8(4K//4C)-01	8(4K//4C)
6(2C2K2C)	6	1,4	106x300	6(2C2K2C)-00	6(2C2K2C)-01	6(2C2K2C)
6(2C2V2C)	6	1,2	106x300	6(2C2V2C)-00	6(2C2V2C)-01	6(2C2V2C)
6(2C2B2C)	6	1,3	106x300	6(2C2B2C)-00	6(2C2B2C)-01	6(2C2B2C)
6C	6	1,5	106x300	6C-00	6C-01	6C
6(3K//3C)	6	3,4	106x300	6(3K//3C)-00	6(3K//3C)-01	6(3K//3C)
4C	4	1,0	106x300	4C-00	4C-01	4C
4C//	4	2,7	106x300	4C//-00	4C//-01	4C//
4(2K//2C)	4	2,8	106x300	4(2K//2C)-00	4(2K//2C)-01	4(2K//2C)

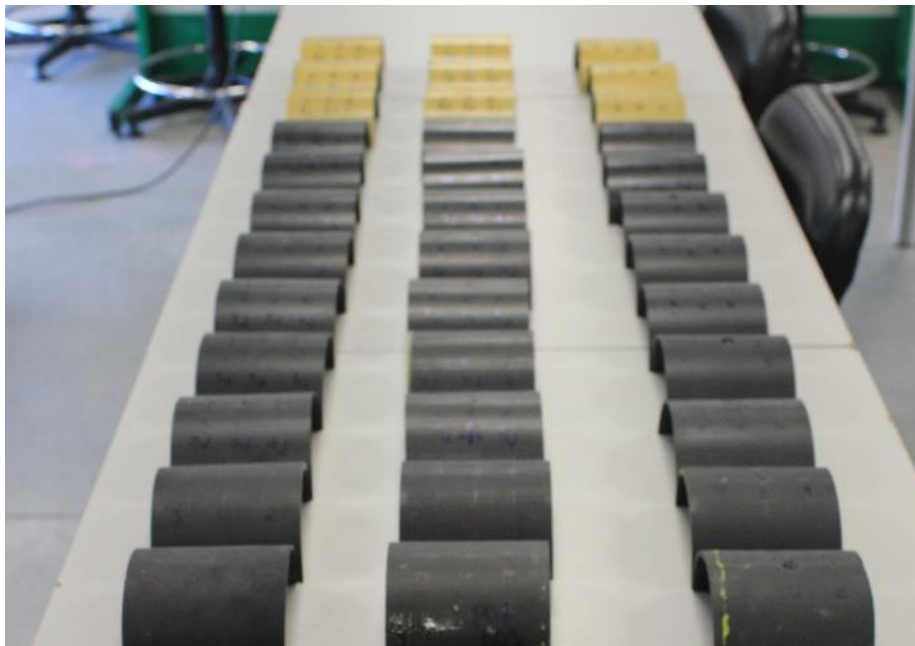



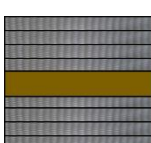
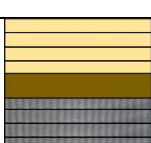


Figura 14- Provetes ensaiados.

- **Materiais compósitos com 8 camadas**

Para o material com 8 camadas existem duas variáveis que são o material e a geometria (Tabela V).


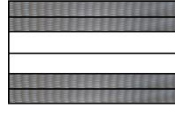


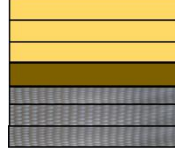
Tabela V- Caracterização do conjunto de materiais com 8 camadas.

Amostra	Espessura (mm)	Provetes- Geometria (mm)	Constituintes do Laminado
8C82	2,1	82 x 100	 8x carbono
		82 x 100	
		-	
8C//82	4,0	82 x 100	 4x carbono 1x cortiça 4x carbono
		82 x 100	
		-	
8C	2,6	106 x 100	 8x carbono
		106 x 100	
		106 x 100	
8C//	4,3	106 x 100	 4x carbono 1x cortiça 4x carbono
		106 x 100	
		106 x 100	
8(4K//4C)	4,1	106 x 100	 4x kevlar 1x cortiça 4x carbono
		106 x 100	
		106 x 100	

- **Materiais compósitos com 6 camadas**

Aqui é possível observar-se a constituição dos materiais com 6 camadas. O diâmetro de todas as amostras é de 106 mm (Tabela VI).



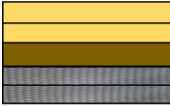
Tabela VI- Caracterização do conjunto de materiais com 6 camadas.

Amostra	Espessura (mm)	Amostras - Geometria (mm)	Constituintes do Laminado
6(2C2K2C)	1,4	106 x 100	 2x carbono 2x kevlar 2x carbono
		106 x 100	
		106 x 100	
6(2C2V2C)	1,2	106 x 100	 2x carbono 2x vidro 2x carbono
		106 x 100	
		106 x 100	
6(2C2B2C)	1,3	106 x 100	 2x carbono 2x basalto 2x carbono
		106 x 100	
		106 x 100	
6C	1,5	106 x 100	 6x carbono
		106 x 100	
		106 x 100	
6(2C2K2C)	3,4	106 x 100	 3x kevlar 1x cortiça 3x carbono
		106 x 100	
		106 x 100	

- **Materiais compósitos com 4 camadas**

Neste ponto pode observar-se a composição dos materiais compósitos formados por 4 camadas (Tabela VII).

Tabela VII- Caracterização do conjunto de materiais com 4 camadas.

Amostra	Espessura (mm)	Amostras - Geometria (mm)	Constituintes do Laminado
4C	1,0	106 x 100	 4x carbono
		106 x 100	
		106 x 100	
4C//	2,7	106 x 100	 2x carbono 1x cortiça 2x carbono
		106 x 100	
		106 x 100	
		106 x 100	
		106 x 100	
4(2K//2C)	2,8	106 x 100	 2x kevlar 1x cortiça 2x carbono
		106 x 100	
		106 x 100	

6. PRODUÇÃO DOS PROVETES EM MATERIAL COMPÓSITO

Para a construção dos provetes em material compósito, foram necessários vários equipamentos e ferramentas.

6.1. Equipamentos Utilizados

Para a produção dos provetes foram utilizados diferentes equipamentos com diversas finalidades.

Para a geometria de 82 mm foi utilizado um tubo de PVC que criou dois provetes com um diâmetro interior de 82mm com 200 mm de comprimento (Figura 15).

Para a geometria das amostras com 106 mm, o molde foi construído a partir de um bloco de *Sikablock* de baixa densidade, maquinado através da fresadora CNC (Figura 16).



Figura 15- Infusão de resina utilizando como superfície moldante um tubo de PVC.

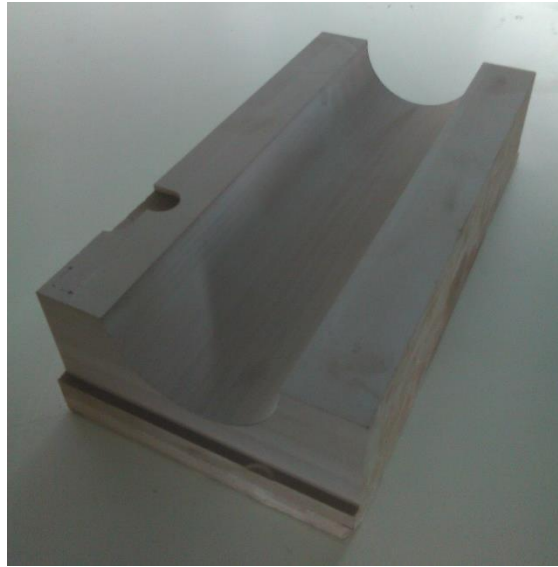


Figura 16- Molde de Sikablock de baixa densidade.

De forma a conseguir calcular e pesar a quantidade necessária de resina para fazer as laminações e infusões, foi utilizada uma balança de precisão **KERN**, com uma precisão de $\pm 0,01$ g (Figura 17).



Figura 17- Balança de precisão Kern.

Para conseguir cortar os provetes com 100 mm de comprimento, foi utilizada uma máquina de corte **ISOMET-1000** (Figura 18), com uma serra de disco diamantado de 0,5 mm de espessura à velocidade de 850 mm/rotação com refrigeração a ar seco.



Figura 18- Máquina de corte Isomet.

Foi utilizada uma máquina polidora de pratos rotativos **Struers RotoPol-21** para acertar e tornar as bases e extremidades das amostras paralelas de forma a haver um bom apoio entre batentes e superfícies das amostras (Figura 19). Foi utilizada uma velocidade de rotação de 150 rot/min.



Figura 19- Máquina polidora de pratos rotativos Struers.

Para ser possível fazer vácuo no interior do molde foi utilizada uma bomba de vácuo (Figura 20), modelo **VP 115** de um estágio com 0,25 CV e máxima capacidade de vácuo de 5 Pa.



Figura 20- Bomba de vácuo.

Num passo anterior ao da bomba de vácuo foi utilizado um reservatório de pressão **Airtech Composites** (Figura 21) com a finalidade de armazenar algum excesso de resina e evitar que esta vá para a bomba.

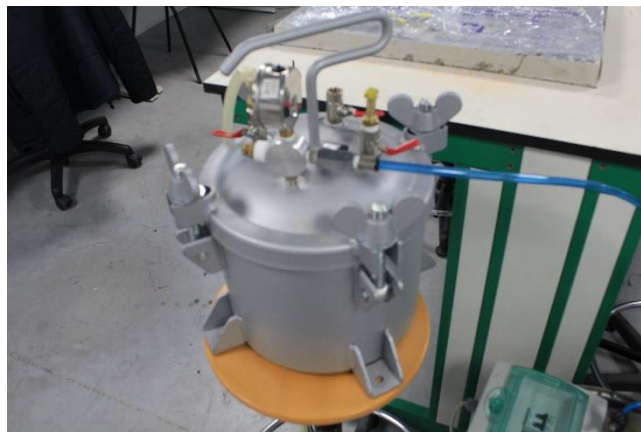


Figura 21- Reservatório de pressão Airtech.

6.2. Procedimento Experimental

O procedimento experimental utilizado foi o processo por infusão de resina.

Inicialmente aplicaram-se duas camadas de desmoldante esperando entre camadas 30 minutos e depois da última aplicação, mais 30 minutos (Figura 22).



Figura 22- Molde com desmoldante aplicado.

O material utilizado neste processo é constituído por películas de peel-ply (Figura 23), rede de expansão de resina (Figura 24) e filme para o saco de vácuo (Figura 25). Normalmente a sequência de empilhamento do material é feita pela ordem apresentada (Figura 26).



Figura 23- Película de peel-ply.



Figura 24- Rede de expansão de resina.



Figura 25- Filme para o saco de vácuo.

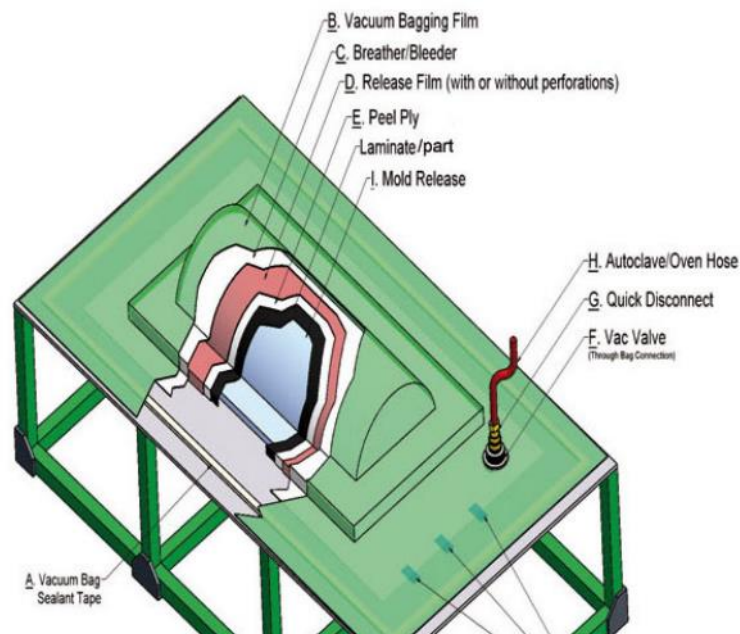


Figura 26- Sequência habitual de posicionamento dos diferentes materiais em processo de infusão de resina.

Depois de esperar que os solventes do desmoldante evaporem, aplicou-se à volta da extremidade do molde a junta de borracha que possibilita fechar o saco de vácuo (Figura 27).



Figura 27- Fita selante de borracha aplicada no molde.

Após a aplicação da borracha, é possível iniciar a sequência de empilhamento dos materiais que se pretendem obter no laminado final.

Para auxiliar no posicionamento correcto das fibras e para que estas não saiam do lugar no empilhamento dos materiais seguintes é possível utilizar cola em forma de *spray* (Figura 28 e Figura 29).



Figura 28- Spray cola para evitar que haja deslocamentos.



Figura 29- Fibras colocadas e coladas com o spray cola.

Depois de colocar todas as fibras, inicia-se a colocação dos restantes materiais que fazem parte do restante empilhamento (Figura 30).

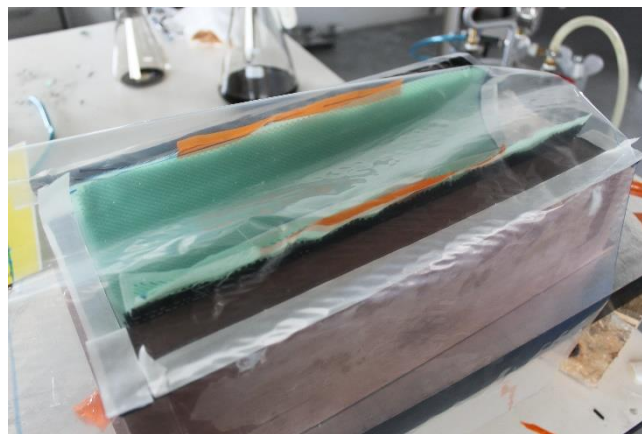


Figura 30- Colocação do filme do saco de vácuo.

Depois do filme do saco de vácuo é necessário iniciar a selagem do saco de vácuo. É necessário retirar as fitas de papel que protegem a borracha e começar a fechar o saco. Antes de selar tudo completamente foi necessário deixar uma abertura no fim do molde de modo a poder ser possível colocar um tubo que permite fazer a saída do ar de dentro do molde e mais tarde a saída do excesso de resina (Figura 31).

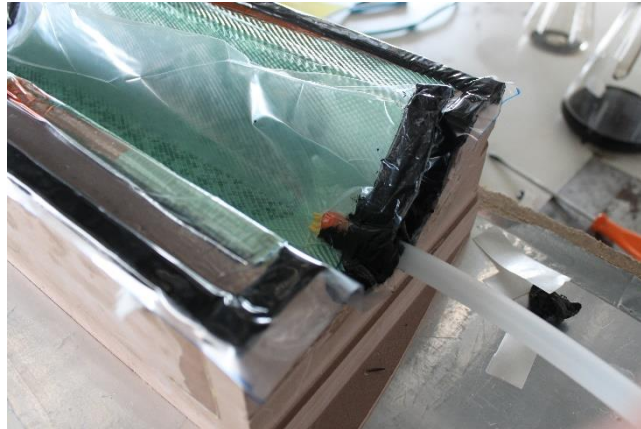


Figura 31- Colocação do tubo de aspiração de ar.

Também no início do molde foram deixadas duas aberturas nas extremidades superiores do molde, local onde vai dar entrada a resina catalizada para dentro do molde (Figura 32). Foram utilizadas duas entradas em cada extremidade de forma que fosse mais fácil para a resina chegar às duas extremidades mais altas do molde e assim não existirem espaços no provete com falta de resina.



Figura 32- Tubos de entrada de resina.

Depois de todos os tubos estarem ligados, foi necessário fazer um teste à estanquicidade do molde e verificar se não existia nenhuma entrada de ar e confirmar a existência de vácuo. Deste modo foram tapados os tubos de entrada de resina e ligada a bomba de vácuo para fazer vácuo no interior do molde. Deixou-se durante cerca de vinte e cinco minutos a bomba de vácuo ligada para verificar se a pressão se mantinha. Depois de verificar que tudo se mantinha, misturou-se a resina com catalisador e colocou-se os tubos

de entrada na resina.

Assim que a resina comece a aparecer no tubo de saída, fecha-se os tubos de entrada de resina para a evitar a entrada de mais quantidade e desliga-se a bomba de vácuo. Depois foi necessário esperar vinte e quatro horas para que a resina curasse parcialmente para depois terminar o processo de pós-cura colocando o provete em mufla durante 8 horas à temperatura de 60°C. Passadas 32 horas, foi retirado todo o material de empilhamento e foi possível verificar o provete produzido ainda no molde (Figura 33). Depois restou apenas desmoldar a amostra sem dificuldades devido à anterior aplicação de desmoldante e obter o provete final produzido (Figura 34).

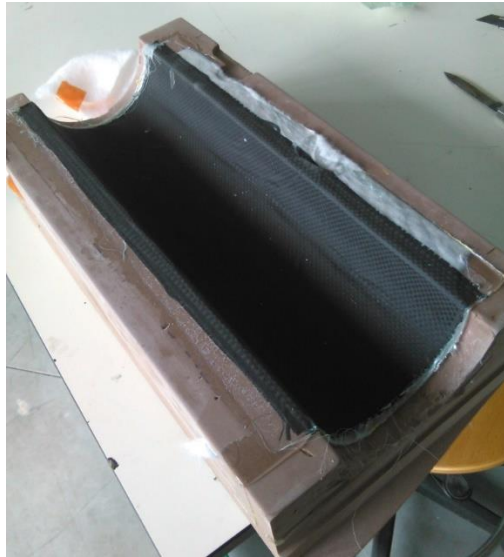


Figura 33- Amostra produzida ainda no molde.



Figura 34- Amostra desmoldada.

A duração do processo de produção de cada amostra durou em média 1 dia, assim como o processo de preparação dos provetes.

6.3. Preparação das Amostras

Depois de obter o provete foi necessário prepará-lo de forma dimensional para ser possível proceder aos ensaios.

Cada amostra de 300 mm deu origem a três provetes de 100 mm cada.

Para o corte utilizou-se a serra de precisão ISOMET-1000 (Figura 35).

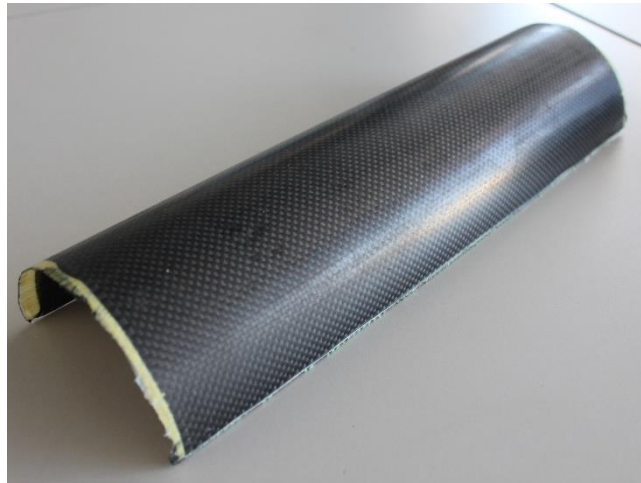


Figura 35- Provete com o corte das abas efectuado.

Na polidora de pratos rotativos acertou-se a base das amostras e laterais para haver um apoio total do provete nos apoios. Desta forma os provetes ficaram prontos para os ensaios (Figura 36).



Figura 36- Provete final acabado e pronto para ensaio.

7. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

7.1. Apresentação e Análise de Resultados dos Ensaios de Compressão Estáticos

Os dados obtidos nos ensaios de compressão quasi-estáticos possibilitam fazer uma análise à resistência do material assim como da deslocação do penetrador sobre o provete, tanto no ponto central (ponto A) como na zona entre o centro e o bordo (ponto B).

Dos gráficos de compressão no ponto A retiraram-se os valores de força máxima atingida no ensaio, $F_{máx}$ (kN), o deslocamento máximo para a força máxima atingida, $l_{Fmáx}$ (mm) e a rigidez dada pelo declive inicial da curva, **Rigidez** (N/mm). A rigidez analisada e registada é a indicada pelo declive da primeira recta. Em amostras com vários materiais verificam-se mais do que um declive mas será sempre a primeira a ser analisada.

A apresentação e análise de resultados foram agrupadas em três grupos, um grupo com os provetes com oito camadas de material, outro com seis e ainda outro com quatro camadas.

Na análise quasi-estática não foi tida em consideração o efeito da geometria, pelo que os provetes ensaiados tinham todos o diâmetro de 106 mm.

Os resultados dos ensaios efectuados entre o centro e o bordo livre dos provetes são apenas ilustrativos e informativos do comportamento do provete se este estiver sujeito a um esforço exercido nesta específica posição após um primeiro ensaio na zona central.

- **Apresentação dos resultados obtidos em provetes de 8 camadas na zona central (A) e na zona entre o centro e o bordo (B)**

Na análise de oito camadas existem três provetes, 8C (Gráfico 4), 8C// (Gráfico 5) e 8(4K//4C) (Gráfico 6).

Os provetes de oito camadas são aqueles que expectavelmente terão os maiores valores de rigidez transversal.

- **8C – 8 camadas de carbono (Diâmetro 106 mm)**

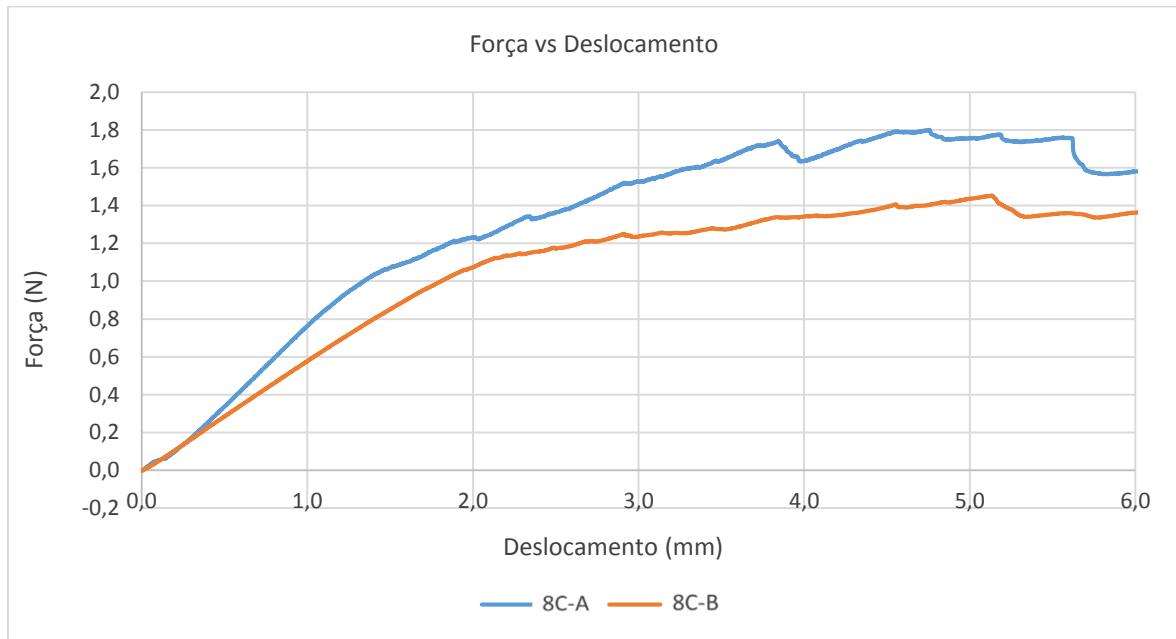


Gráfico 4- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) do ensaio quasi-estático do provete 8C.

Força máxima: 1,800 kN

Deslocamento na força máxima: 4,745 mm

Rigidez transversal (declive inicial da curva): 814,600 N/mm

- **8C// – 8 camadas de carbono + 1 camada de cortiça (Diâmetro 106 mm)**

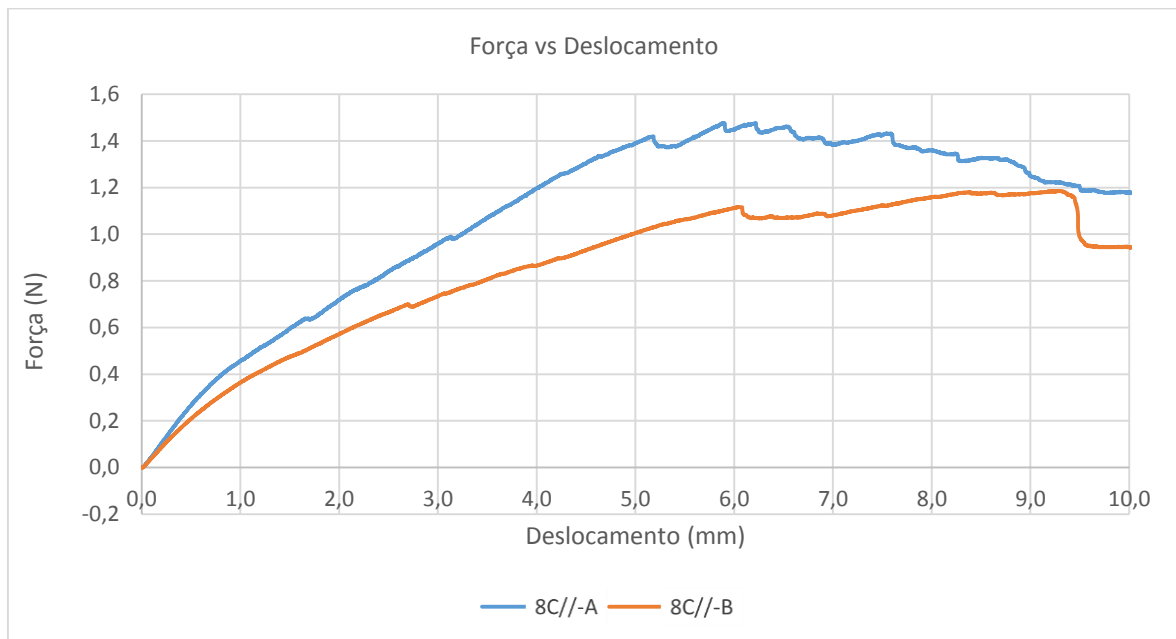


Gráfico 5- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) do ensaio quasi-estático do provete 8C//.

Força máxima: 1,476 kN

Deslocamento na força máxima: 5,893 mm

Rigidez transversal (declive inicial da curva): 565,300 N/mm

- **8(4K//4C) – 4 camadas de fibra de carbono + 4 camadas de kevlar + 1 camada de cortiça (Diâmetro 106 mm)**

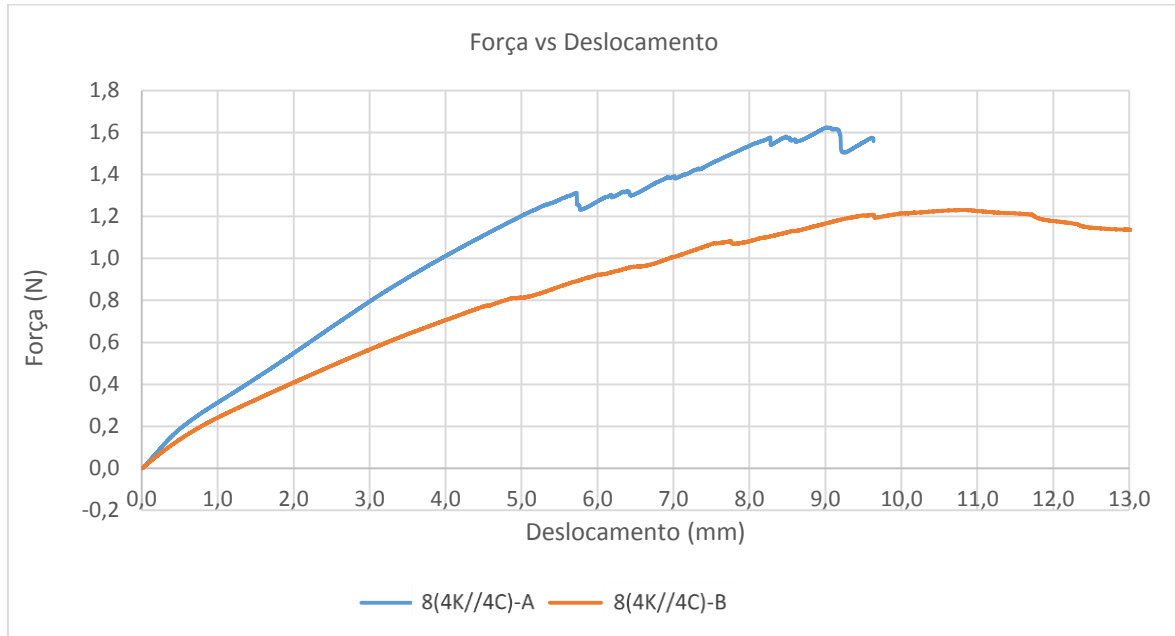


Gráfico 6- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) do ensaio quasi-estático do provete 8(4K//4C).

Força máxima: 1,623 kN

Deslocamento na força máxima: 9,057 mm

Rigidez transversal (declive inicial da curva): 408,400 N/mm

- **Apresentação dos resultados obtidos em provetes de 6 camadas na zona central (A) e na zona entre o centro e o bordo (B)**

De seguida apresentam-se os resultados para os materiais compósitos com seis camadas. Desta análise fazem parte os provetes 6(2C2K2C) (Gráfico 7), 6(2C2V2C) (Gráfico 8), 6(2C2B2C) (Gráfico 9), 6C (Gráfico 10) e 6(3K//3C) (Gráfico 11).

Este conjunto de provetes com seis camadas é o único conjunto que possui materiais como fibra de basalto e fibra de vidro.

- **6(2C2K2C) – 4 camadas de fibra de carbono + 2 camadas de kevlar (Diâmetro 106 mm)**

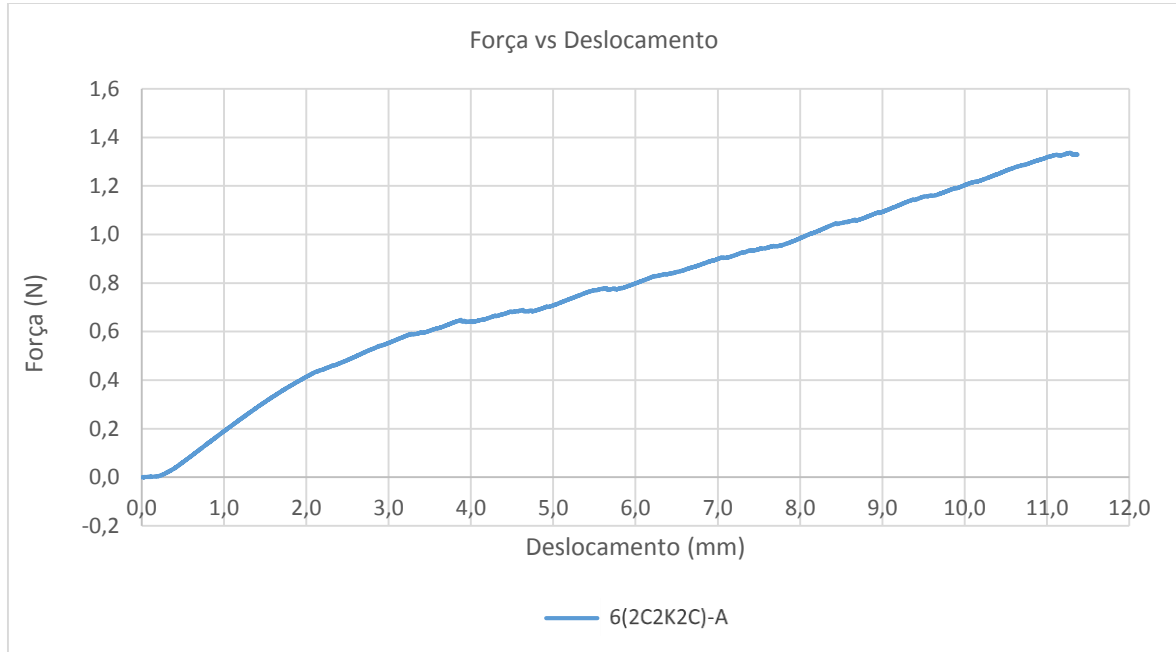


Gráfico 7- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) do ensaio quasi-estático do provete 6(2C2K2C).

O provete 6C(2C2K2C) não possui o gráfico relativo ao ensaio efectuado na zona entre o centro e o bordo livre devido a um erro de conversão de dados da máquina universal de tracção.

Força máxima: 1,337 kN

Deslocamento na força máxima: 11,283 mm

Rigidez transversal (declive inicial da curva): 252,000 N/mm

- **6(2C2V2C) – 4 camadas de fibra de carbono + 2 camadas de fibra de vidro (Diâmetro 106 mm)**

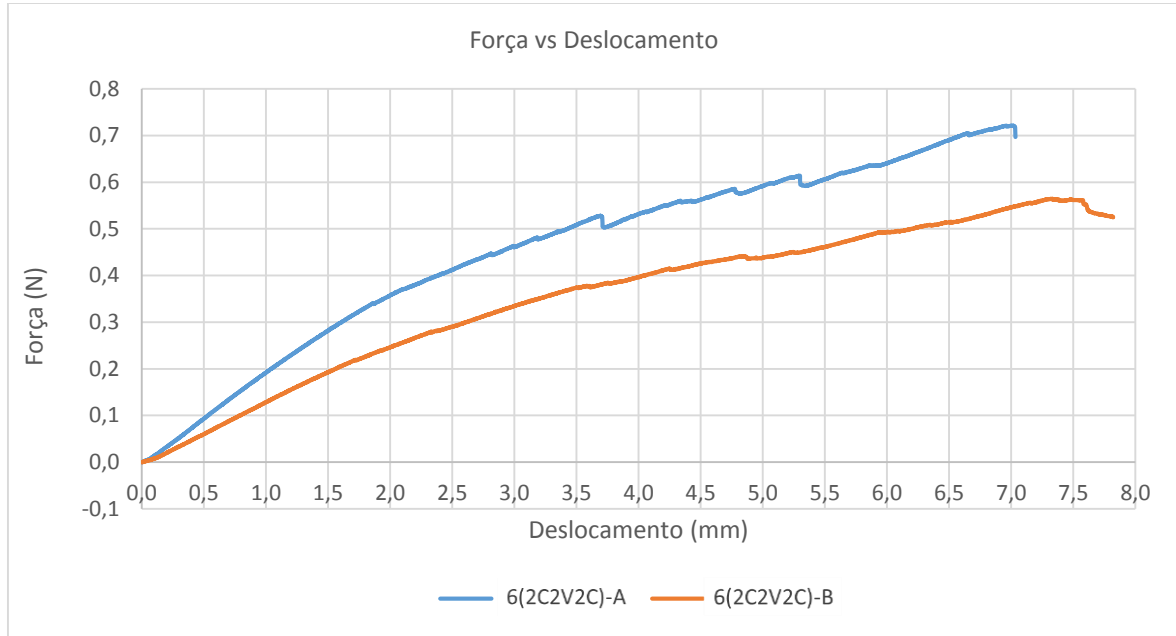


Gráfico 8- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) do ensaio quasi-estático do provete 6(2C2V2C).

Força máxima: 0,722 kN

Deslocamento na força máxima: 7,016 mm

Rigidez transversal (declive inicial da curva): 203,700 N/mm

- **6(2C2B2C) – 4 camadas de fibra de carbono + 2 camadas de fibra de basalto (Diâmetro 106 mm)**

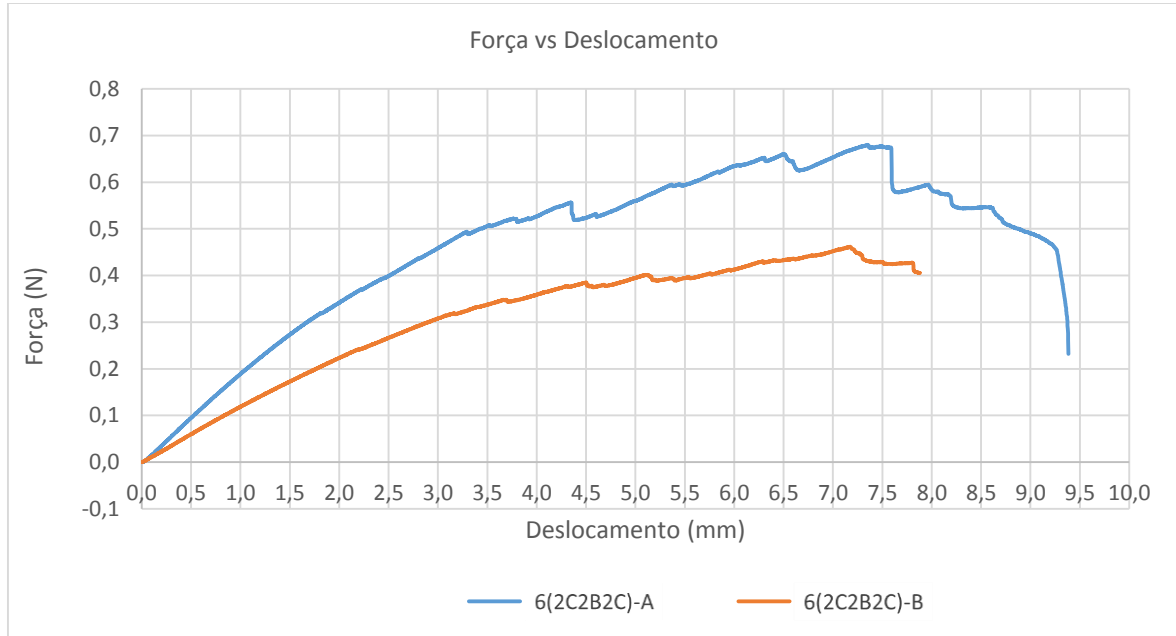


Gráfico 9- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) do ensaio quasi-estático do provete 6(2C2B2C).

Força máxima: 0,680 kN

Deslocamento na força máxima: 7,336 mm

Rigidez transversal (declive inicial da curva): 199,800 N/mm

- **6C – 6 camadas de fibra de carbono (Diâmetro 106 mm)**

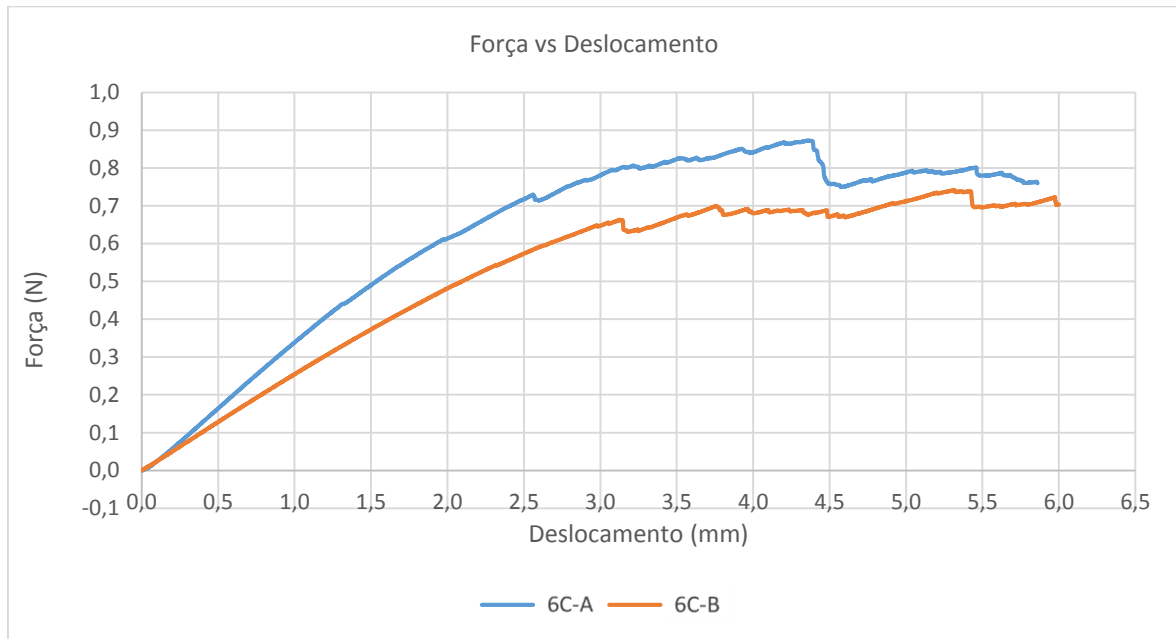


Gráfico 10- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) do ensaio quasi-estático do provete 6C.

Força máxima: 0,873 kN

Deslocamento na força máxima: 4,391 mm

Rigidez transversal (declive inicial da curva): 354,000 N/mm

- **6(3K//3C) – 3 camadas de fibra de carbono + 3 camadas de kevlar + 1 camada de cortiça (Diâmetro 106 mm)**

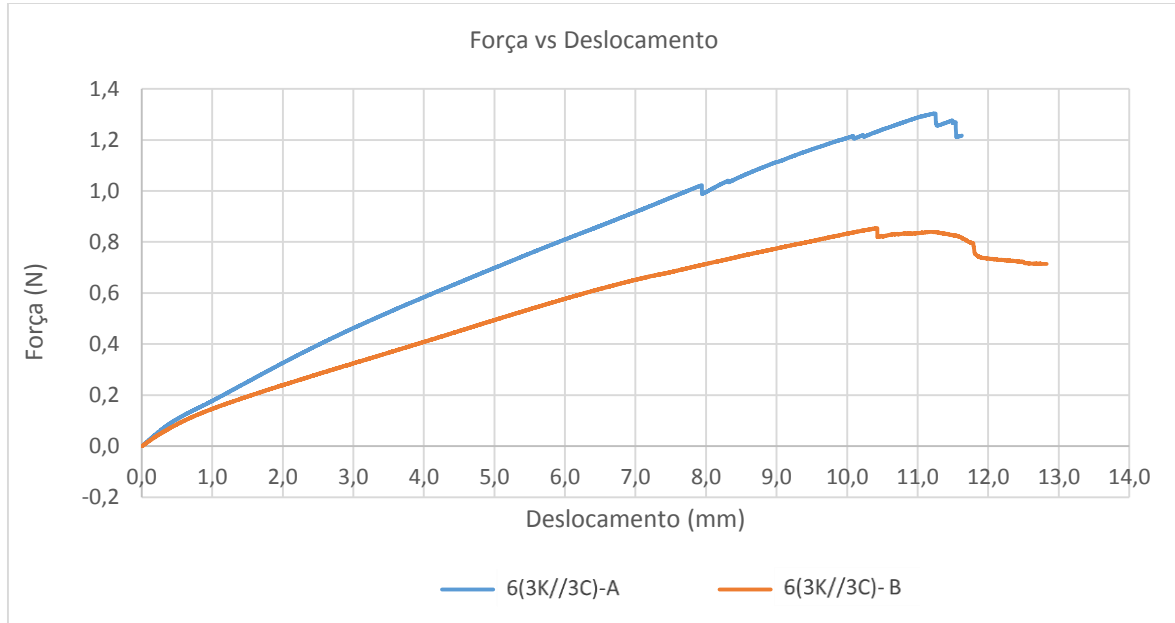


Gráfico 11- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) do ensaio quasi-estático do provete 6(2C2K2C).

Força máxima: 1,304 kN

Deslocamento na força máxima: 11,249 mm

Rigidez transversal (declive inicial da curva): 231,600 N/mm

- **Apresentação dos resultados obtidos em provetes de 4 camadas na zona central (A) e na zona entre o centro e o bordo (B)**

No conjunto de provetes com quatro camadas é esperado que a sua resistência seja a mais baixa dos três conjuntos de provetes existentes ensaiados. Deste conjunto fazem parte os provetes 4C (Gráfico 12), 4C// (Gráfico 13) e 4(2K//2C) (Gráfico 14).

- **4C – 4 camadas de fibra de carbono (Diâmetro 106 mm)**

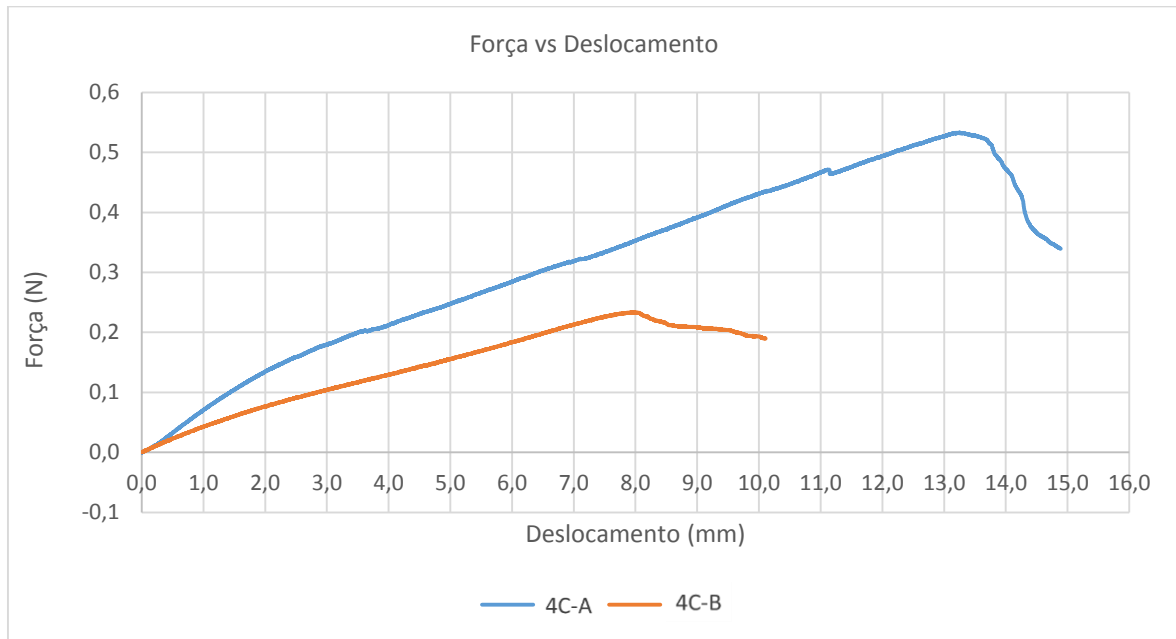


Gráfico 12- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) do ensaio quasi-estático do provete 4C.

Força máxima: 0,533 kN

Deslocamento na força máxima: 13,166 mm

Rigidez transversal (declive inicial da curva): 77,500 N/mm

- **4C// – 4 camadas de fibra de carbono + 1 camada de cortiça (Diâmetro 106 mm)**

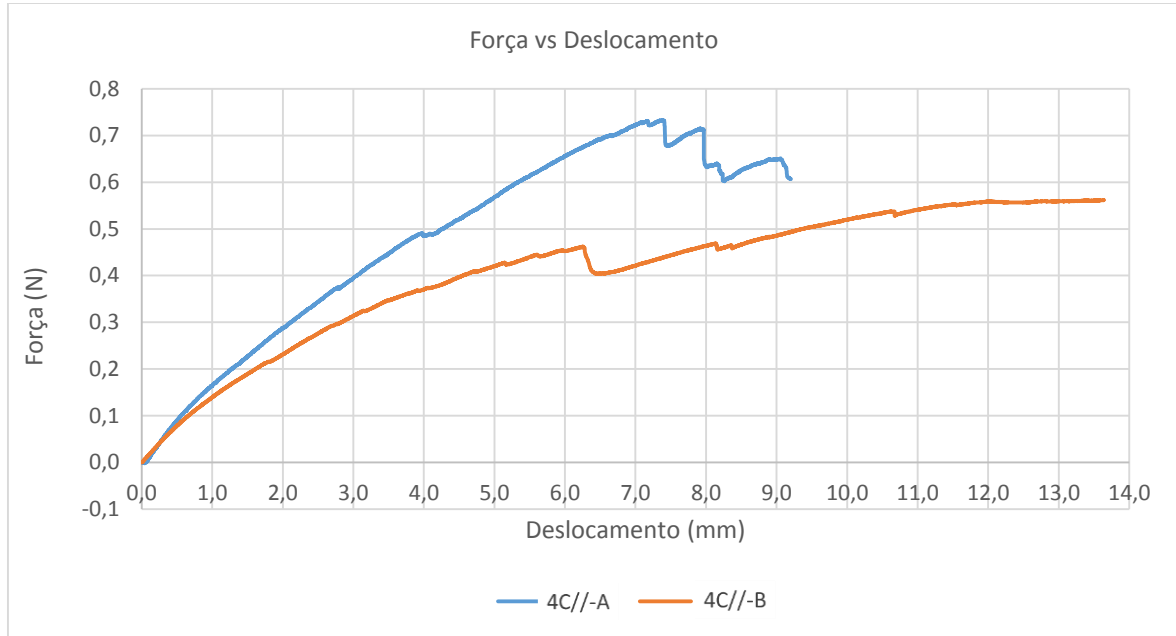


Gráfico 13- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) do ensaio quasi-estático do provete 4C//.

Força máxima: 0,733 kN

Deslocamento na força máxima: 7,390 mm

Rigidez transversal (declive inicial da curva): 192,300 N/mm

- **4C(2K//2C) – 2 camadas de fibra de carbono + 2 camadas de kevlar + 1 camada de cortiça (Diâmetro 106 mm)**

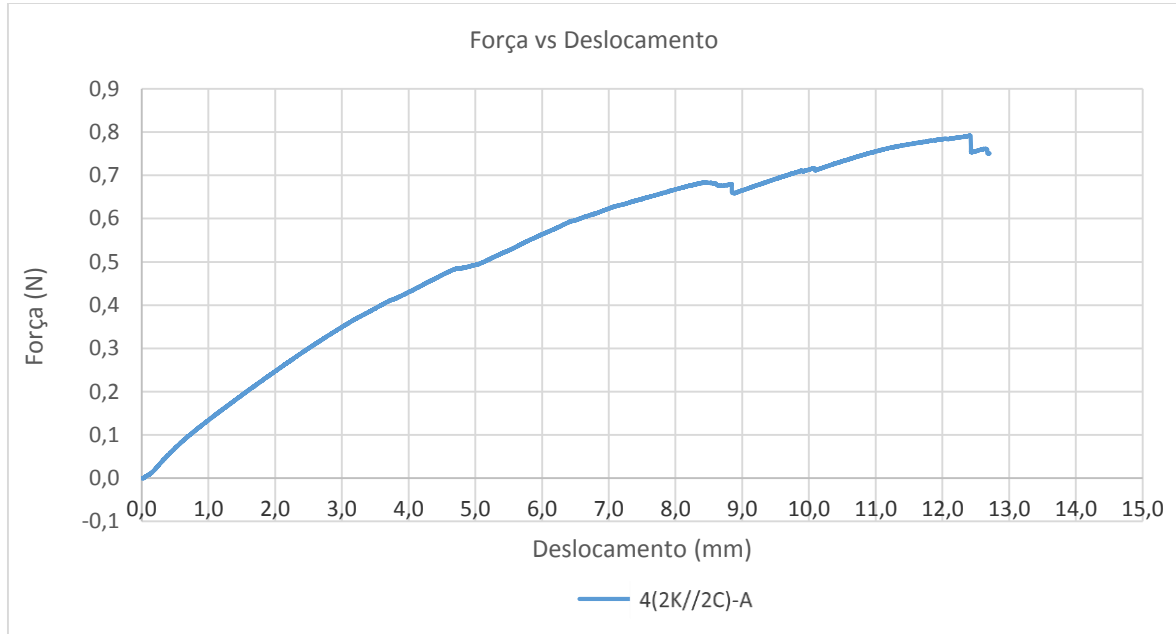


Gráfico 14- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) do ensaio quasi-estático do provete 4(2K//2C).

O provete não possui o gráfico relativo ao ensaio efectuado na zona entre o centro e o bordo livre (B) devido a um erro de conversão de dados da máquina universal de tracção.

Força máxima: 0,792 kN

Deslocamento na força máxima: 12,418 mm

Rigidez transversal (declive inicial da curva): 154,4 N/mm

- **Resumo dos ensaios quasi-estáticos no ponto central do provete**

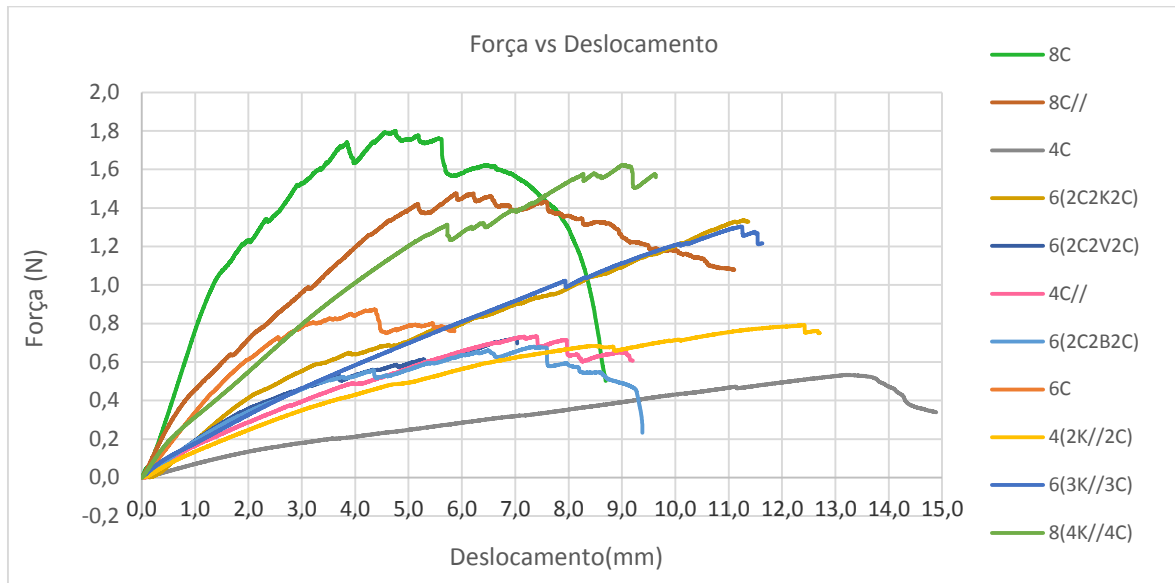


Gráfico 15- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) dos ensaios quasi-estático de todos os provetes ensaiados.

Depois de obtidos os dados dos diferentes ensaios é possível compilar toda a informação num gráfico (Gráfico 15) e numa tabela (Tabela VIII).

Tabela VIII- Síntese das propriedades de todas as amostrass ensaiadas nos ensaios quasi-estáticos.

Amostra/ Propriedade	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$l_{m\acute{a}x}$ (mm)	Rigidez (N/mm)
8C	1,800	4,745	814,600
8C//	1,476	5,893	565,300
8(4K//4C)	1,623	9,057	408,400
6(2C2K2C)	1,337	11,283	252,000
6(2C2V2C)	0,722	7,016	203,700
6(2C2B2C)	0,680	7,336	199,800
6C	0,873	4,391	354,000
6(3K//3C)	1,304	11,249	231,600
4C	0,533	13,166	77,500
4C//	0,733	7,390	192,300
4(2K//2C)	0,792	12,418	154,400

Depois de apresentados o gráfico e a tabela é possível fazer as seguintes análises:

1. A rigidez transversal, como era de esperar, é superior para o material que tem mais camadas, como se pode verificar graficamente (declive inicial) e pelo valor obtido na tabela.
2. A peça que registou uma maior força aplicada foi a 8C com 1,800 kN. Por ordem decrescente as restantes peças com maior resistência foram a 8(4K//4C) com 1,623 kN, a 8C// com 1,476 kN, a 6(2C2K2C) com 1,337 kN e a 6(3K//3C) com 1,304 kN. Em relação à força máxima aplicada, verifica-se que a peça com a maior quantidade de lâminas com fibra de carbono é a mais resistente. Comparando também 8C com 8C// onde a principal diferença é a adição de cortiça a 8C//, pode afirmar-se que a cortiça faz a peça perder resistência. É possível comparar também as propriedades das peças em relação à sua adição de lâminas de fibra de carbono. 8C, 6C e 4C, têm lâminas nas quantidades decrescentes de oito, seis e quatro camadas de carbono. Verificou-se que em termos de deslocamento não existe relação mas que em termos de força máxima aplicada e força de iniciação de dano, verificou-se uma tendência de valores em que, de 8C (8 camadas) para 6C (6 camadas) houve um decréscimo de 51,5 % em força máxima aplicada. De 6C (6 camadas) para 4C (4 camadas) houve um decréscimo de 38,9 % em força máxima aplicada. De 8C (8 camadas) para 4C (4 camadas), havendo a adição do dobro de camadas do material inicial, não se verificou o dobro da resistência do material.
3. A resistência do ponto B (ensaio após teste no ponto A) é bastante inferior à registada no ponto A. Esta diminuição pode ser explicada pela proximidade ao ponto A, que previamente sofrera uma compressão e portanto dano, ou pela proximidade à borda do provete.
4. O provete que registou um deslocamento para a força máxima aplicada mais baixo foi a 6C com 4,391 mm. De seguida foi a 8C com 4,745 mm e a 8C// com 5,893 mm.
5. Em relação ao deslocamento, todas as peças que possuem lâminas de fibra de carbono em maior número apresentam o menor deslocamento de todas as peças. A peça que apresenta o menor deslocamento é a 6C que apresenta na sua constituição seis lâminas de fibra de carbono, seguida da 8C com seis lâminas.

6. Nos materiais que existe adição de cortiça, verifica-se uma variação de rigidez na parte inicial no ensaio. Isto pode ficar a dever-se a uma primeira resistência do material suportada pelas fibras, seguida pela compressão da própria cortiça (menos rígida).

- **Análise do efeito de adição de cortiça**

7. Ao nível das oito camadas, o efeito de adição da cortiça fez baixar um pouco a resistência e aumentar o deslocamento máximo do provete.
8. Em termos de rigidez, do provete 8C para 8C//, a adição de cortiça resultou num decréscimo de 44,1%. Do provete 4C para 4C// a diminuição de rigidez foi de 148,0 %.
9. Nos materiais com quatro camadas a adição de cortiça não provoca o efeito evidenciado nas oito camadas. Nesta situação, o provete com a cortiça (4C//) tem uma maior resistência e um menor deslocamento máximo. Isto poderá relacionar-se com o facto do provete 4C ser mais flexível. A adição de cortiça, fazendo-lhe aumentar a espessura, contribui para um aumento de rigidez transversal.

- **Análise do efeito de adição de kevlar, fibra de vidro e basalto**

10. Comparando 6(2C2K2C) e 6(2C2V2C) para uma comparação de efeito entre a utilização de kevlar (2 camadas) e fibra de vidro (2 camadas) em substituição de duas camadas de fibra de carbono (6C), verifica-se que a colocação de kevlar aumenta a resistência do material em relação a 6C e também em relação à adição de fibra de vidro, visto que a resistência de 6(2C2K2C) (adição de kevlar) tem quase o dobro (1,337 kN – 0,722 kN) em relação a 6(2C2V2C) (adição de fibra de vidro). Outro efeito contrário é o que existe em relação ao deslocamento, tendo 6(2C2V2C) (adição de fibra de vidro) diminuído bastante o deslocamento (7,016 mm – 13,166 mm) em relação a 4C (quatro camadas de fibra de carbono). Já a adição de kevlar, peça 6(2C2K2C) em relação a 4C, teve pouca influência na variação do deslocamento (11,283 mm – 13,166 mm).

7.2. Apresentação e Análise de Resultados Obtidos nos Ensaios de Impacto

Nos ensaios de impacto, os dados obtidos possibilitam fazer uma análise da resistência ao impacto do material, o deslocamento que este sofre, tempo de contacto da força exercida sobre o material e dos níveis de energia absorvida.

Assim, e com a ajuda de gráficos construídos com esses dados, retiraram-se os valores de força máxima atingida no ensaio, $F_{máx}$ (kN), o deslocamento máximo, $l_{máx}$ (mm), a energia absorvida sob a forma de dano, E_{ab} (J), a energia elástica dissipada, E_{el} (J), e o tempo de contacto máximo entre o penetrador e o material, $t_{máx}$ (ms).

A apresentação e análise de resultados dos ensaios de impacto foi dividida em três grupos, um grupo com as amostras com oito camadas de material, outro com seis camadas e ainda outro com quatro camadas.

Os resultados dos ensaios de impacto efectuados entre o ponto central de impacto e o bordo do provete tiveram o objetivo de analisar o comportamento do material a uma distância de 25 mm do primeiro impacto.

Para cada grupo de materiais com igual número de camadas, apresenta-se no final da análise dos dados obtidos para o impacto central uma tabela com os valores para cada material.

Para cada amostra ensaiada (são ensaiados um par de provetes para o mesmo material) é escolhido um provete que possua o cenário mais optimista de forma que no final das análises possa haver uma comparação geral e válida entre os materiais com oito, seis e quatro camadas.

7.2.1. Impacto em provetes de 8 camadas

De seguida são apresentados os resultados para os ensaios de impacto na zona central do provete 8C82 (Figura 37), 8C//82 (Figura 39), 8C (Figura 41), 8C// (Figura 43) e 8(4K4C) (Figura 45). Apresenta-se também as fotografias obtidas através da câmara de alta velocidade que mostram o deslocamento máximo que o penetrador tem em cada provete (Figura 38, 40, 42, Figura 44 e Figura 46).

- **8C82 – 8 camadas de carbono (Diâmetro 82mm)**

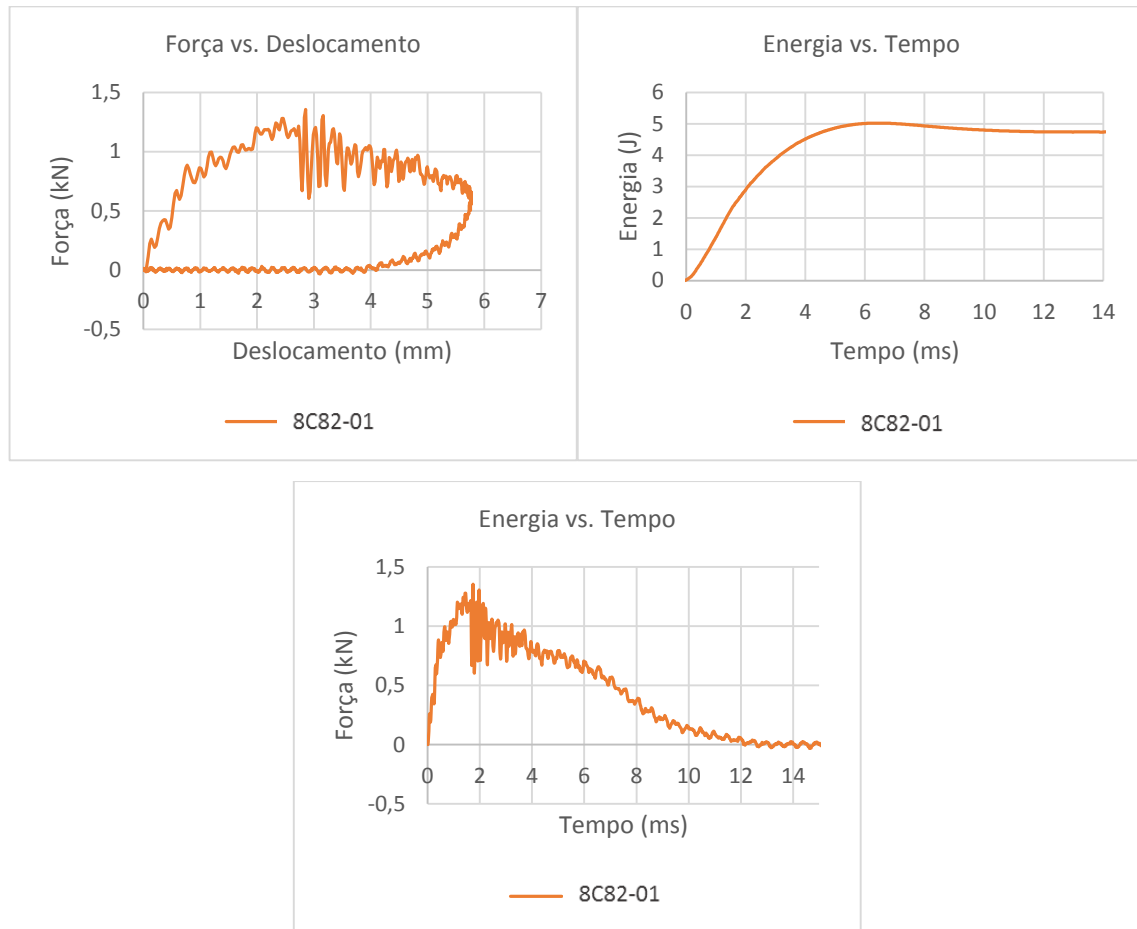


Figura 37- Conjunto de gráficos para o provete 8C82 ensaiado na zona central.

O provete 8C82-00 não possui o gráfico relativo ao impacto efectuado na zona central devido a um deslocamento imprevisto dos apoios do provete.

Força máxima: 1,356 kN

Deslocamento máximo: 5,764 mm

Energia absorvida: 4,738 J

Energia elástica: 0,286 J

Tempo de contacto: 12,600 ms

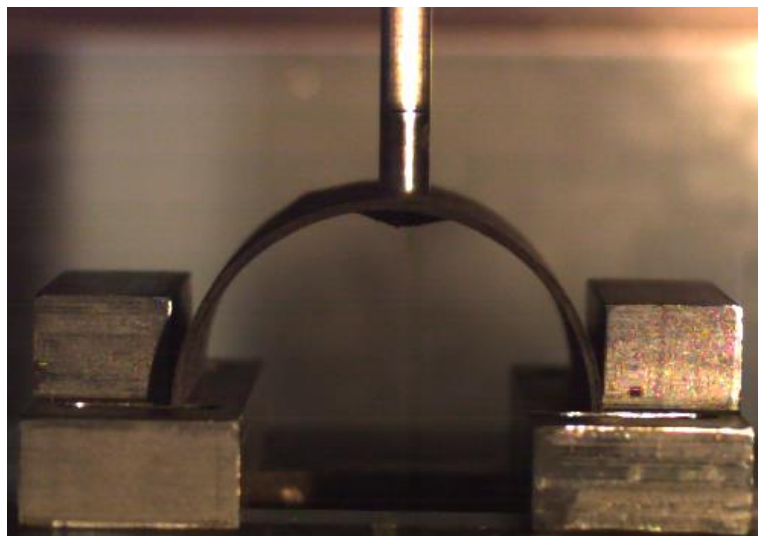


Figura 38- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8C82 num impacto na zona central.

- **8C//82 – 8 camadas de carbono + 1 camada de cortiça (Diâmetro 82mm)**

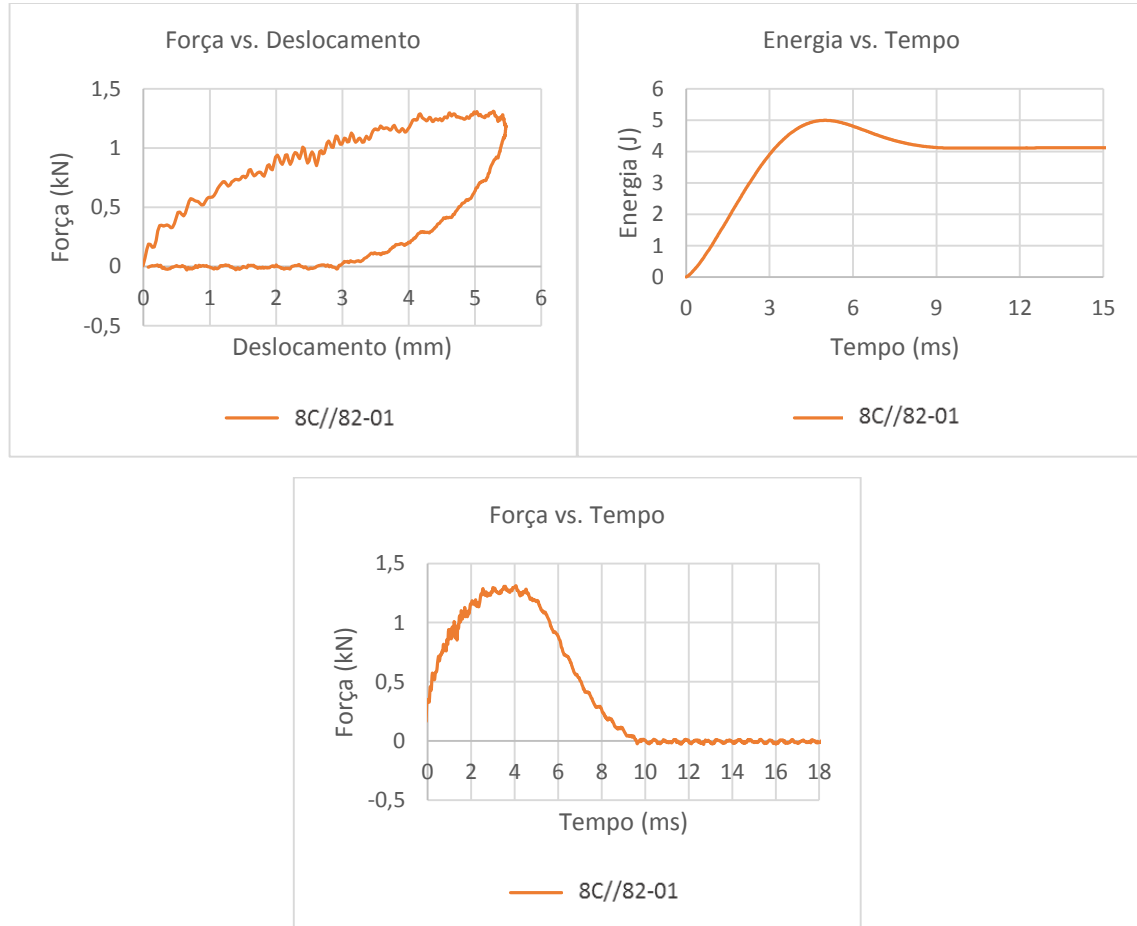


Figura 39- Conjunto de gráficos para o provete 8C//82 ensaiado na zona central.

O provete 8C//82-00 não possui o gráfico relativo ao impacto efectuado na zona central devido a um deslocamento imprevisto dos apoios do provete.

Força máxima: 1,311 kN

Deslocamento máximo: 5,514 mm

Energia absorvida: 4,384 J

Energia elástica: 0,646 mm

Tempo de contacto: 9,980 ms

No momento do ensaio e captura do vídeo do mesmo, a sala possuía baixa

luminosidade, prejudicando a imagem capturada (Figura 40).



Figura 40- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8C/82 num impacto na zona central do provete.

- **8C – 8 camadas de carbono (Diâmetro 106 mm)**

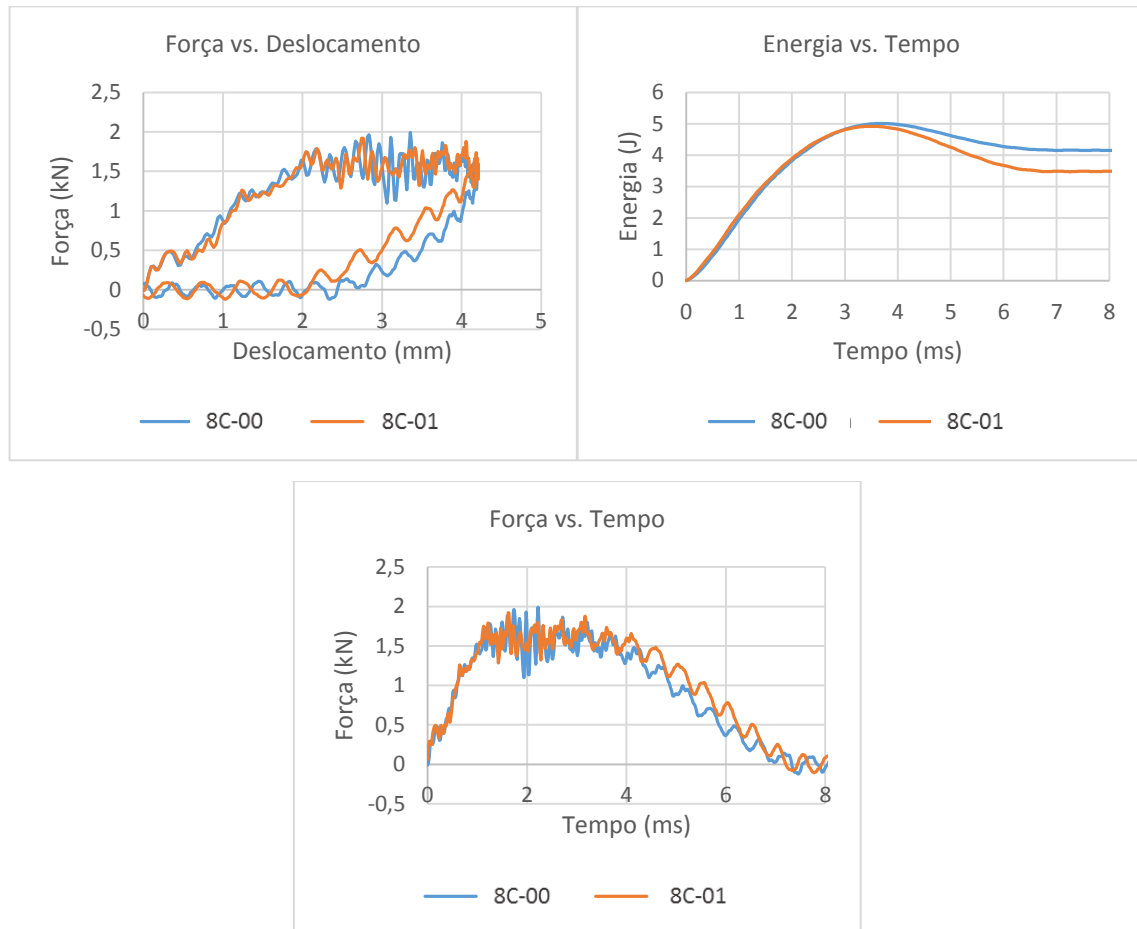


Figura 41- Conjunto de gráficos para o provete 8C ensaiado na zona central.

Força máxima: 1,956 kN

Deslocamento máximo: 4,208 mm

Energia absorvida: 3,820 J

Energia elástica: 1,340 J

Tempo de contacto: 7,305 ms

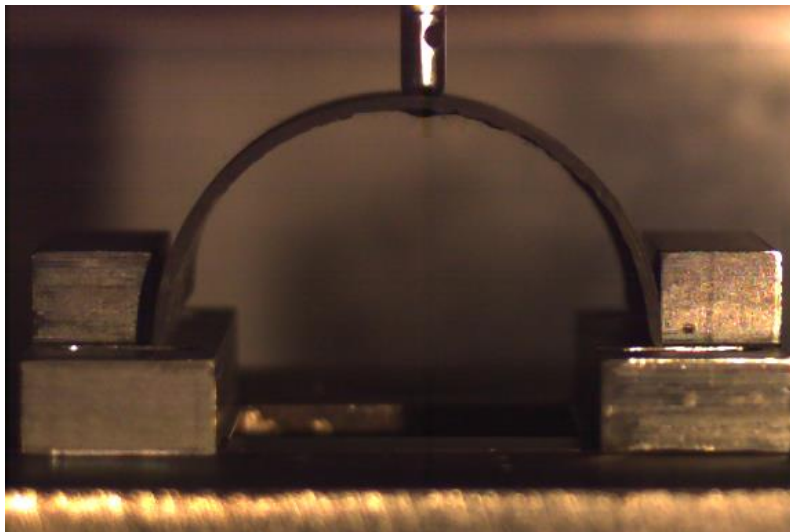


Figura 42- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8C num impacto na zona central.

- **8C// – 8 camadas de carbono + 1 camada de cortiça (Diâmetro 106 mm)**

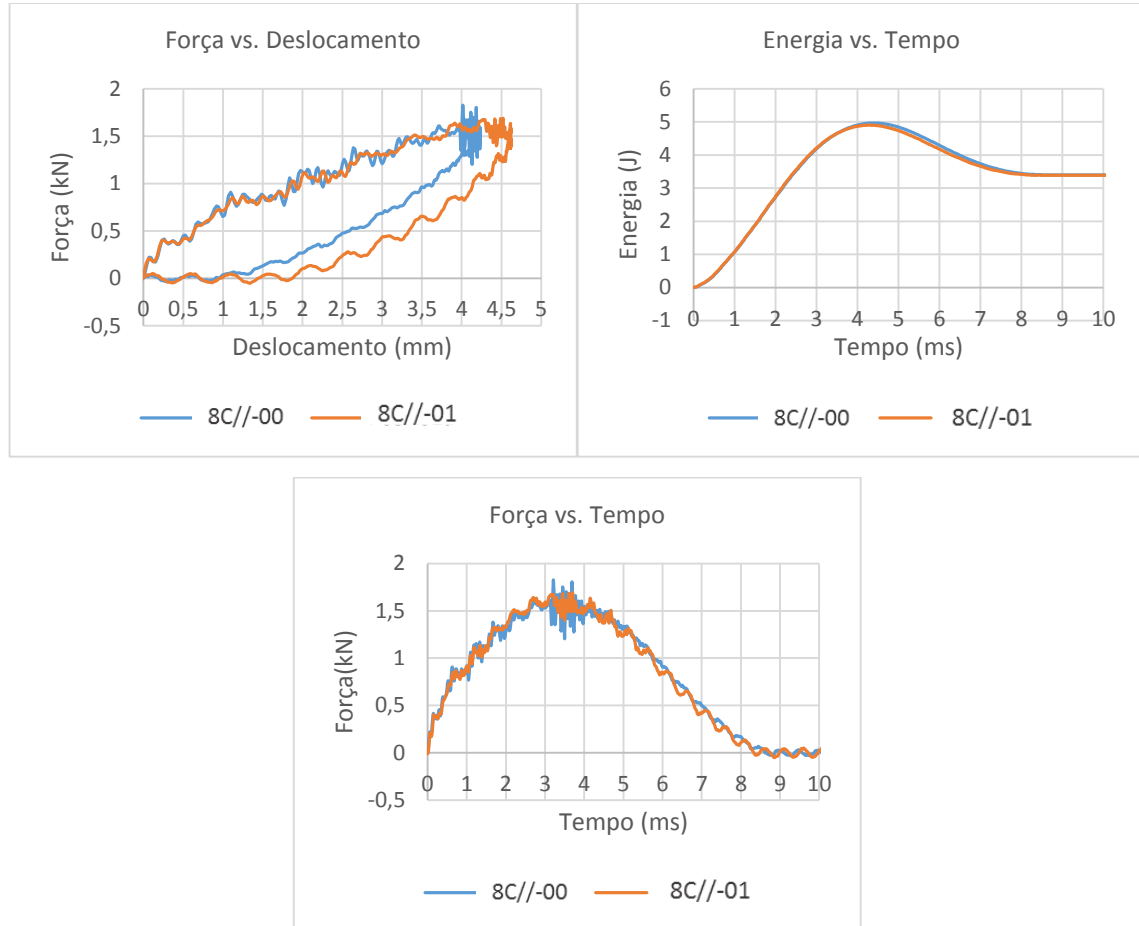


Figura 43- Conjunto de gráficos para o provete 8C// ensaiado na zona central.

Força máxima: 1,759 kN

Deslocamento máximo: 4,514 mm

Energia absorvida: 3,399 J

Energia elástica: 1,535 J

Tempo de contacto: 8,468 ms

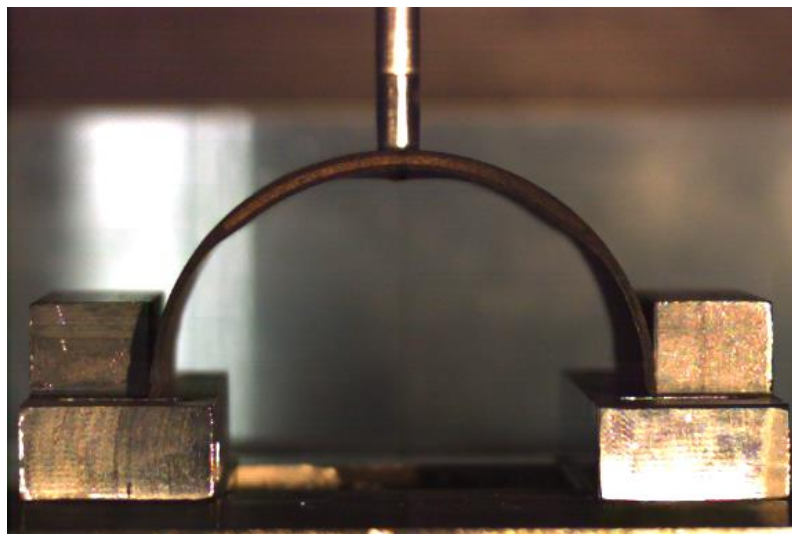


Figura 44- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8C// num impacto na zona central.

- **8(4K//4C) – 4 camadas de fibra de carbono + 4 camadas de kevlar + 1 camada de cortiça (Diâmetro 106 mm)**

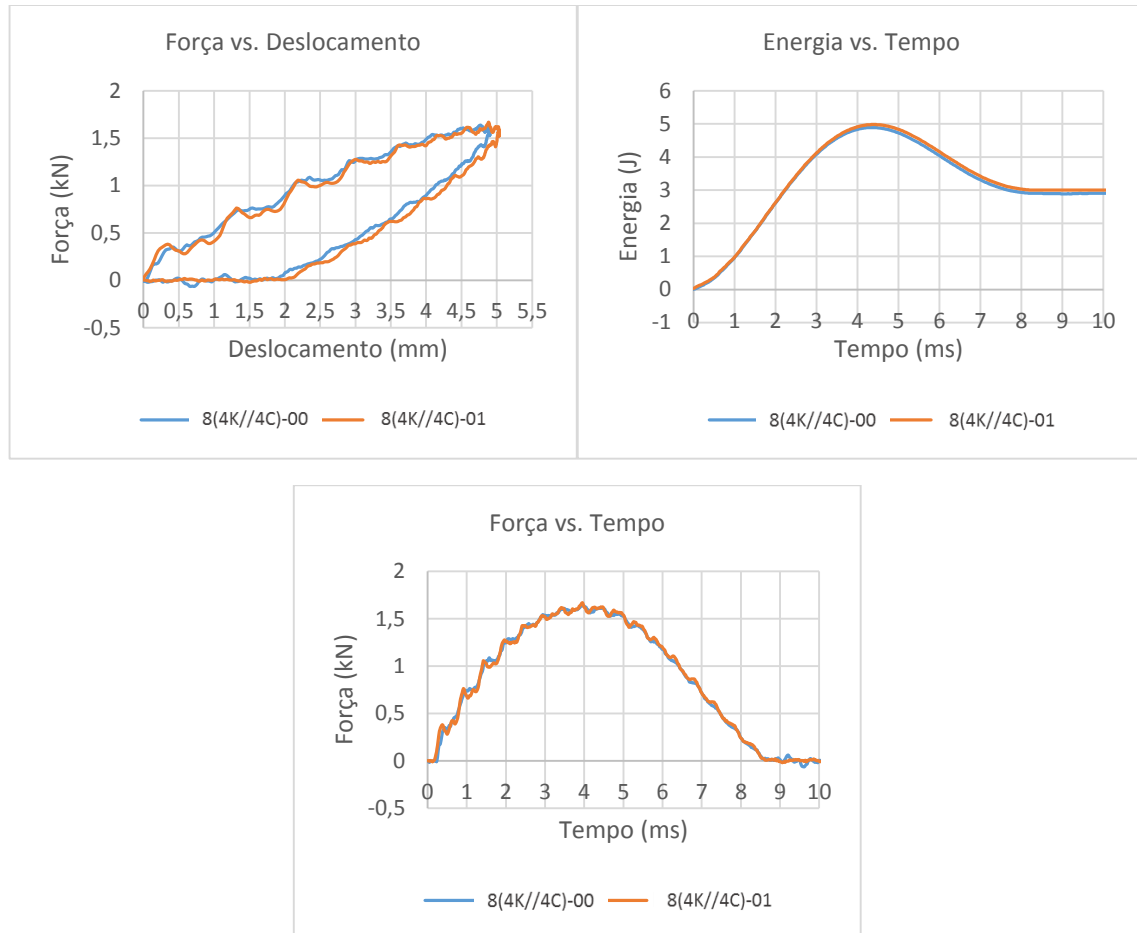


Figura 45- Conjunto de gráficos para o provete 8(4K//4C) ensaiado na zona central.

Força máxima: 1,654 kN

Deslocamento máximo: 5,033 mm

Energia absorvida: 3,003 J

Energia elástica: 1,946 J

Tempo de contacto: 8,267 ms

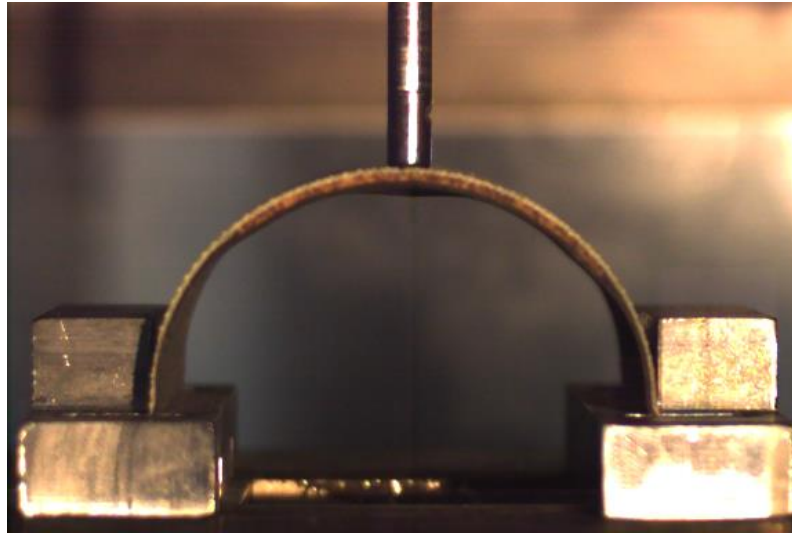


Figura 46- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8(4K//4C) num impacto na zona central.

- **Comparação de propriedades entre provetes de 8 camadas no 1º impacto central**

Depois de obtidos todos os dados dos diferentes ensaios do conjunto de oito camadas para um impacto central, é possível fazer uma análise mais global, comparando os resultados dos vários provetes (Gráfico 16, 17 e 18) compilando-os numa tabela (IX).

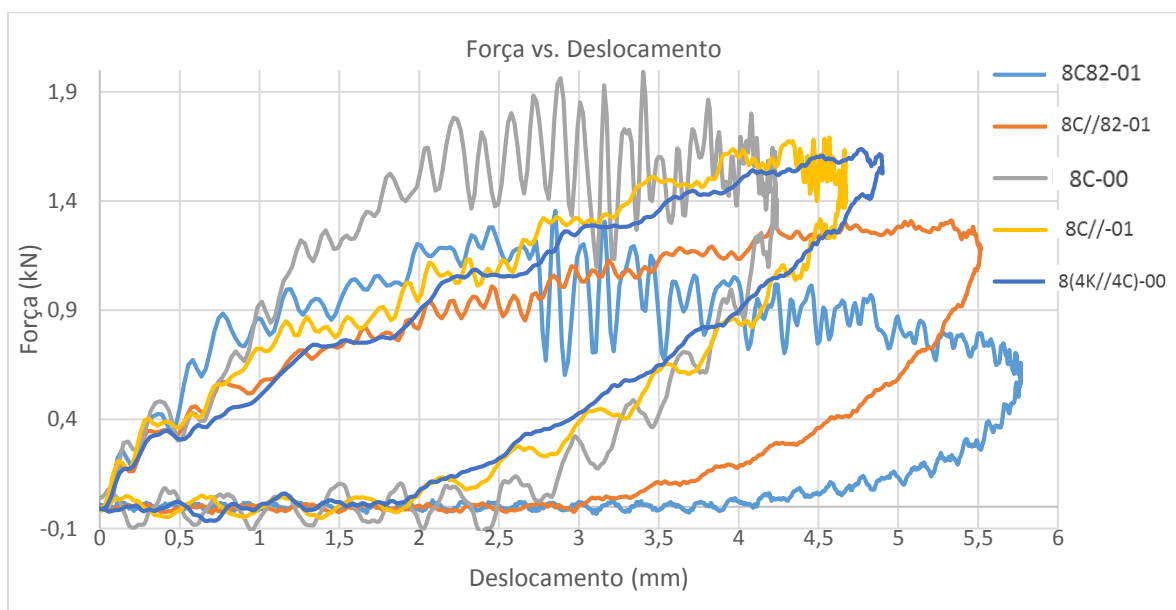


Gráfico 16- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) do impacto central dos provetes com 8 camadas.

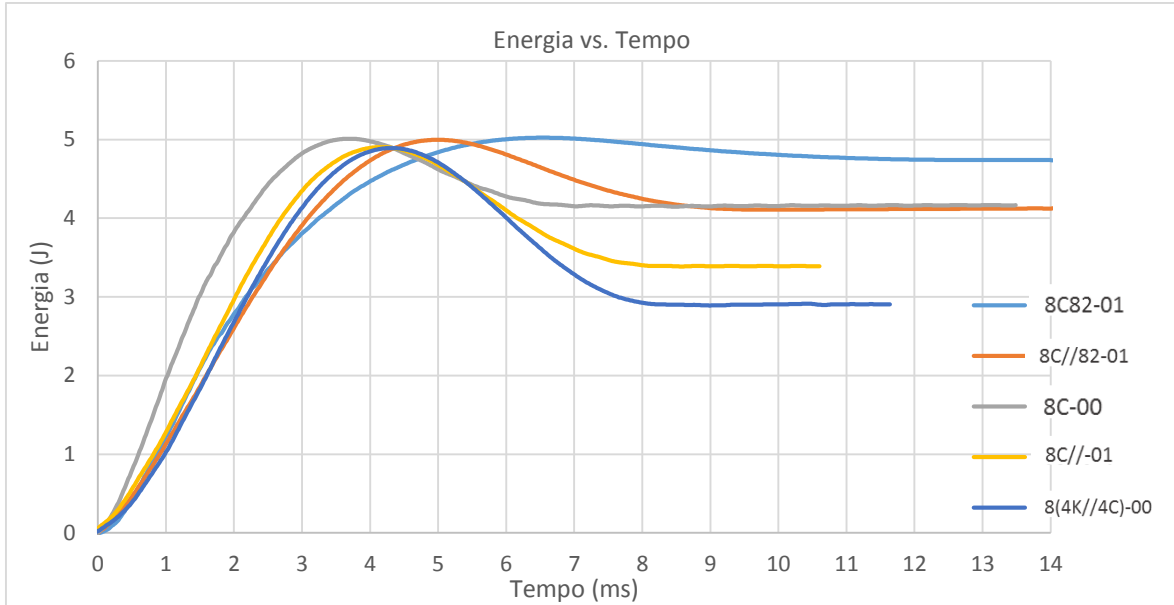


Gráfico 17- Gráfico Energia (J) x Tempo (ms) do impacto central dos provetes com 8 camadas.

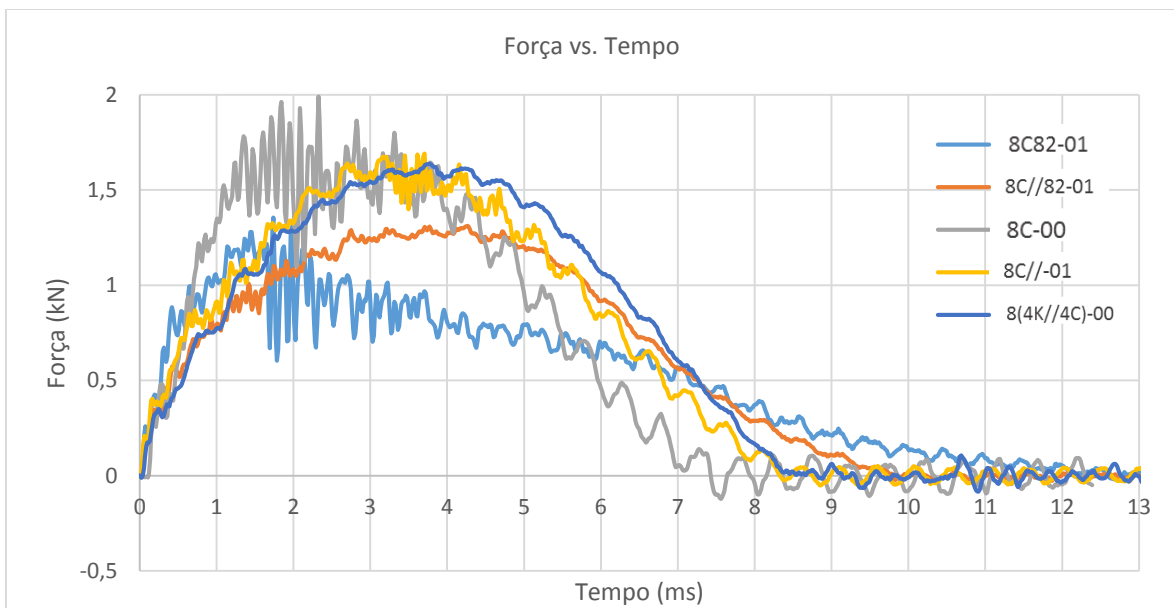


Gráfico 18- Gráfico Força (kN) x Tempo (ms) do impacto central dos provetes com 8 camadas.

Tabela IX- Síntese das propriedades dos provetes com 8 camadas no impacto central.

Resumo das propriedades dos provetes com 8 camadas no impacto central – Energia (5 J)					
Propriedade	8C82	8C//82	8C	8C//	8(4K//4C)
<i>Força máx. (kN)</i>	1,356	1,311	1,956	1,759	1,654
<i>Deslocamento máx. (mm)</i>	5,764	5,514	4,208	4,514	5,033
<i>Energia int. absorvida (J)</i>	4,738	4,384	3,820	3,399	3,003
<i>Energia elástica (J)</i>	0,286	0,646	1,340	1,535	1,946
<i>Tempo contacto (ms)</i>	12,600	9,980	7,305	8,468	8,267

Depois de compilar os dados obtidos na anterior tabela, é possível fazer as seguintes análises:

1. Os materiais mais resistentes são os que têm geometria com 106mm e dentro destes a ordem decrescente é 8C, 8C// e o 8(4K//4C). Em termos de deslocamento, os provetes com 82 mm apresentam os maiores valores. Os provetes com 82 mm de diâmetro absorvem mais energia em forma de dano do que os provetes de 106 mm. Os tempos de contacto para os provetes de 82 mm são superiores aos de 106 mm.
2. Comparando os provetes com o mesmo material e com geometrias diferentes (8C82 com 8C e 8C//82 com 8C//) verifica-se que para diâmetros maiores (106 mm) existe aumento de resistência, um aumento de energia elástica, uma diminuição de tempo de contacto máximo e uma diminuição do deslocamento do material.
3. Fazendo uma análise ao comportamento da cortiça quando esta é adicionada a oito camadas de carbono com a mesma geometria, verificou-se que a cortiça faz diminuir a resistência e também diminui a quantidade de energia absorvida em forma de dano, embora as diferenças sejam muito baixas. Verifica-se que a cortiça faz aumentar o tempo de contacto, embora no caso de 8C82 para 8C//82 não exista diferença assinalável. O seu papel no aumento de deslocamento verifica-se apenas para os

provetes 8C e 8C// (diâmetros de 106 mm) e nos provetes 8C82 e 8C//82 existe uma diminuição de deslocamento tão baixa que pode ser quase desprezável.

4. Verificou-se que as peças em que a sua constituição é feita apenas por fibra de carbono, apresentam maior quantidade de dano e maior resistência.
5. Verificou-se que entre as peças 8C// (4,3 mm) e 8(4K//4C) (4,1 mm) na peça 8C// existe um perfil muito mais irregular. Como em termos de propriedades não existem diferenças assinaláveis, possivelmente o papel do kevlar na recepção do primeiro impacto seja preponderante para a não existência de dano.
6. Considerando apenas os provetes de diâmetro com 106 milímetros, o material com maior tempo de contacto é o 8(4K//4C) (8,230 ms). De ambos os provetes com 82 milímetros de diâmetro, os dois têm valores similares de tempo de contacto.

7.2.2. 2º impacto entre zona de impacto central e o bordo em provetes de 8 camadas

Na análise de segundo impacto entre a zona do primeiro impacto central e o bordo livre dos provetes para este conjunto de materiais, são apresentados os resultados para os ensaios nas amostras 8C82 (Figura 47), 8C//82 (Figura 49), 8C (Figura 51), 8C// (Figura 53) e 8(4K//4C) (Figura 55). São apresentados três gráficos diferentes e uma fotografia para cada provete (Figura 48, 50, 52, 54 e 56) a ilustrar o deslocamento máximo do provete efectuado pelo penetrador.

- **8C82 – 8 camadas de carbono (Diámetro 82mm)**

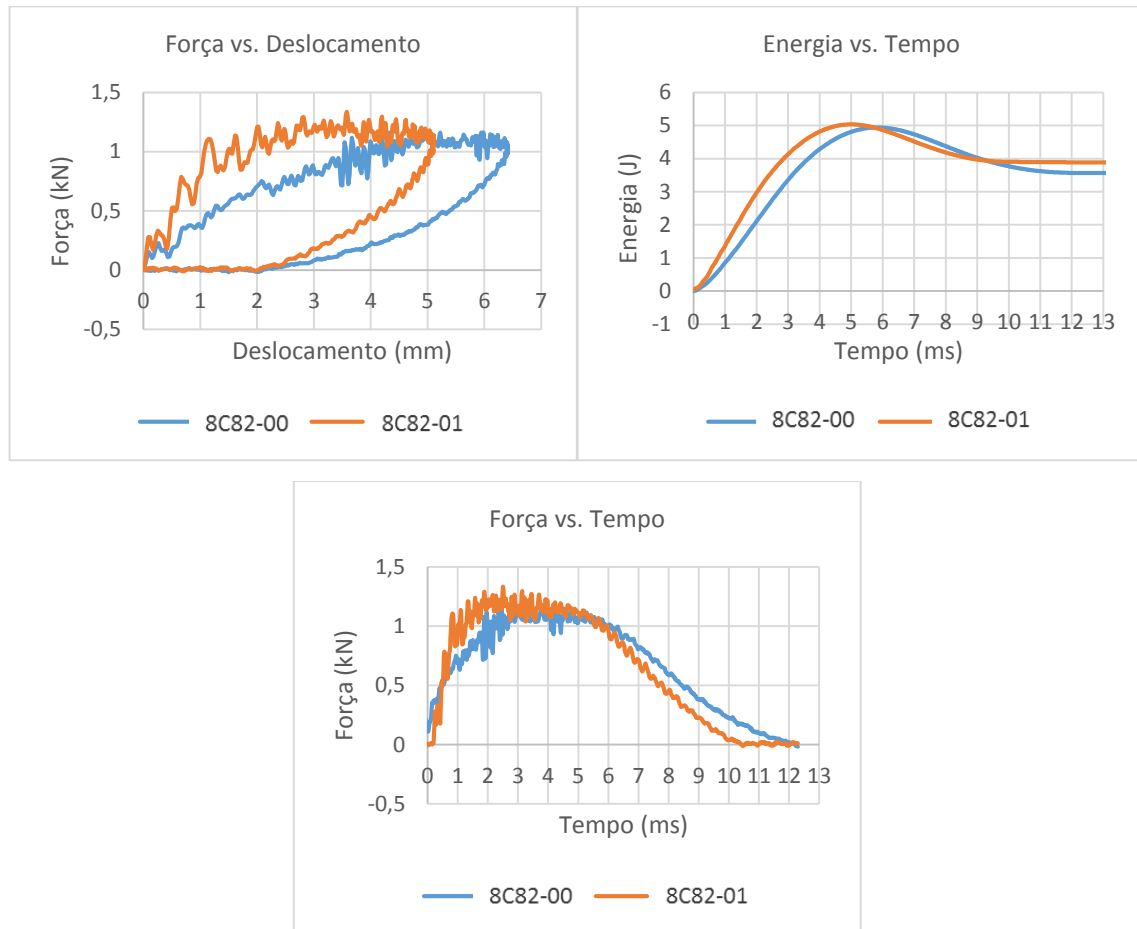


Figura 47- Conjunto de gráficos para os provetes 8C82 ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.

Força máxima: 1,207 kN

Deslocamento máximo: 5,658 mm

Energia absorvida: 3,730 J

Energia elástica: 1,302 J

Tempo de contacto: 11,183 ms

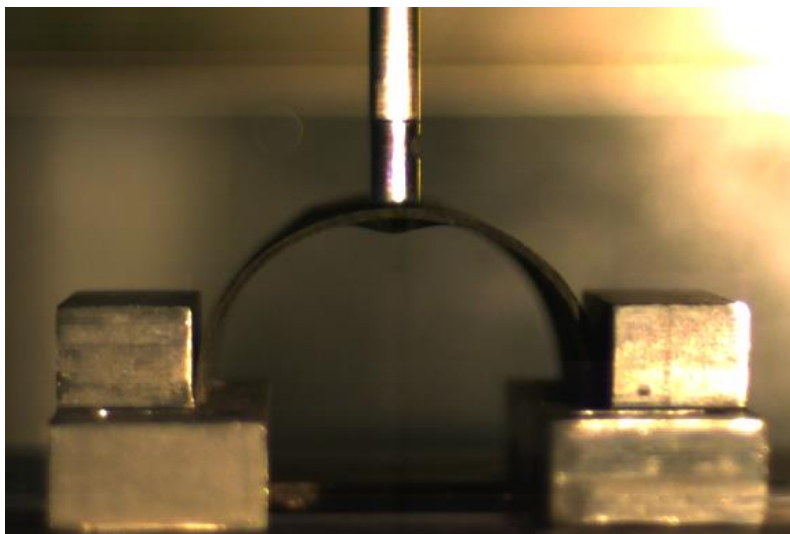


Figura 48- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8C82 num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

- **8C//82 – 8 camadas de carbono + 1 camada de cortiça (Diâmetro 82mm)**

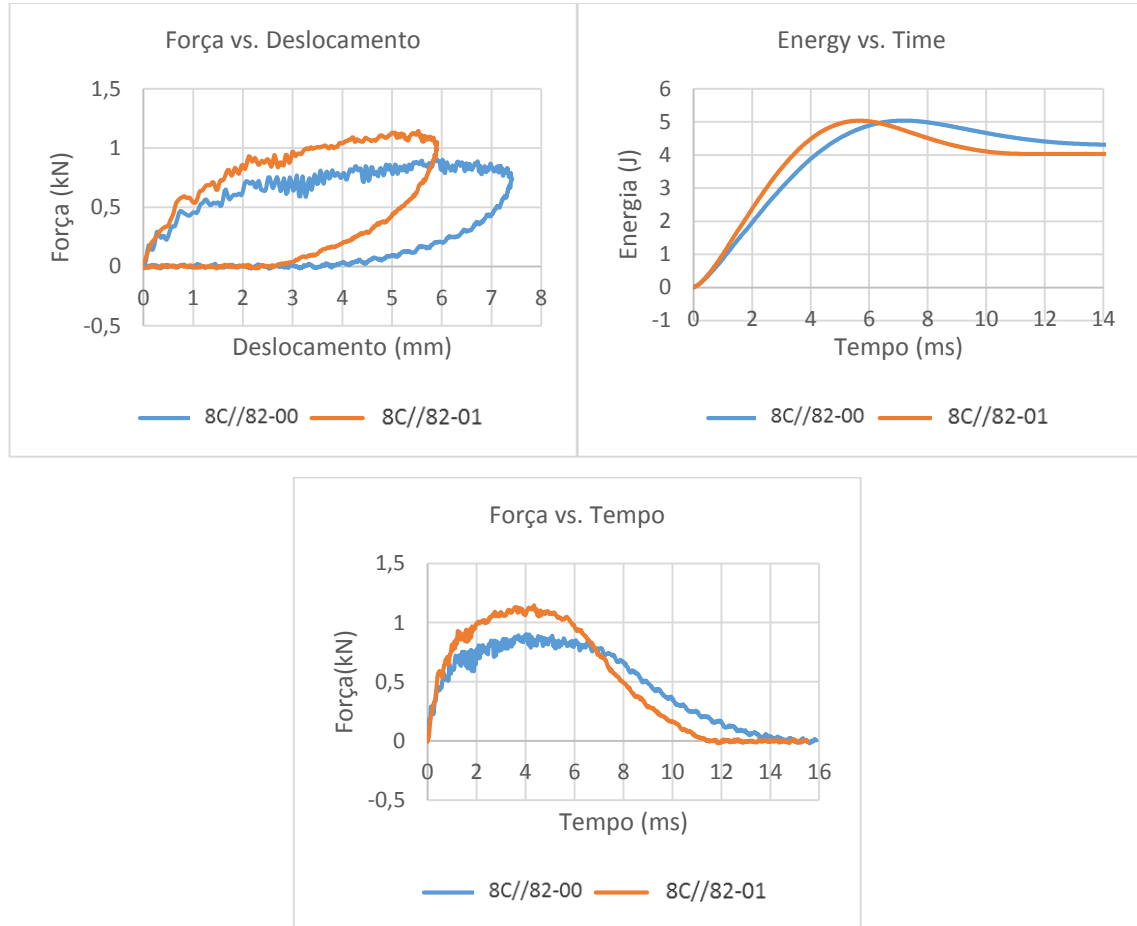


Figura 49- Conjunto de gráficos para os provetes 8C//82 ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.

Força máxima: 1,005 kN

Deslocamento máximo: 6,813 mm

Energia absorvida: 4,174 J

Energia elástica: 1,152 J

Tempo de contacto: 12,815 ms

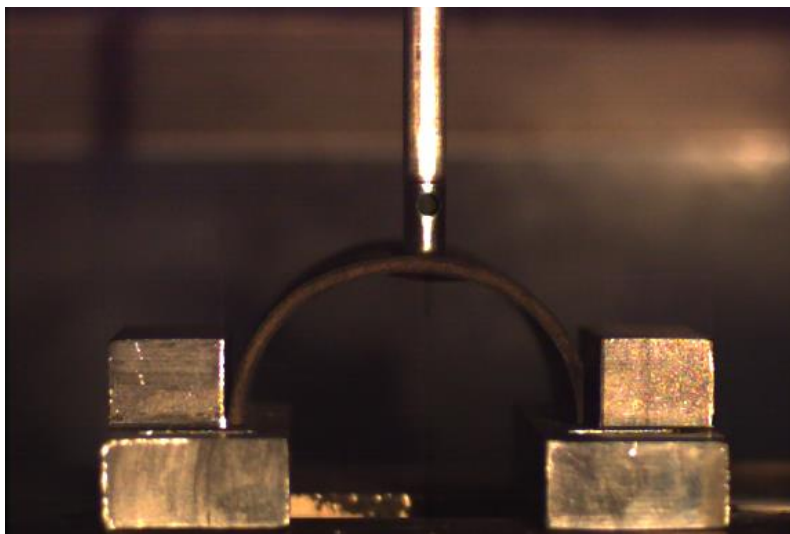


Figura 50- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8C//82 num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

- **8C – 8 camadas de carbono (Diámetro 106 mm)**

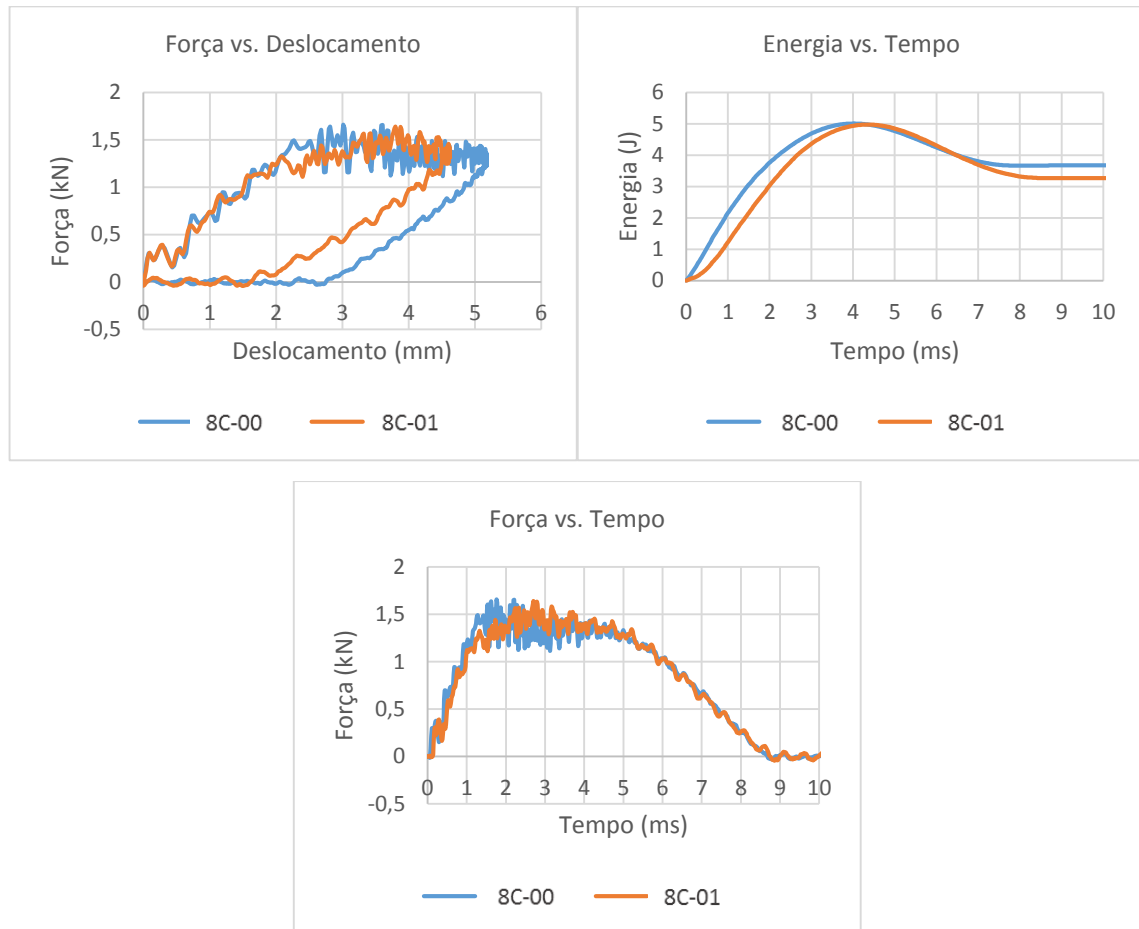


Figura 51- Conjunto de gráficos para os provetes 8C ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.

Força máxima: 1,634 kN

Deslocamento máximo: 4,892 mm

Energia absorvida: 3,473 J

Energia elástica: 1,531 J

Tempo de contacto: 8,725 ms

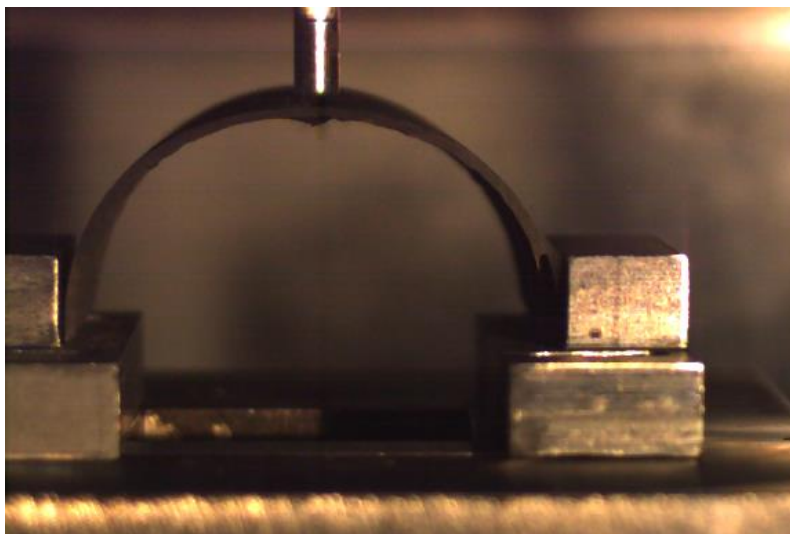


Figura 52- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8C num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

- **8C// – 8 camadas de carbono + 1 camada de cortiça (Diámetro 106 mm)**

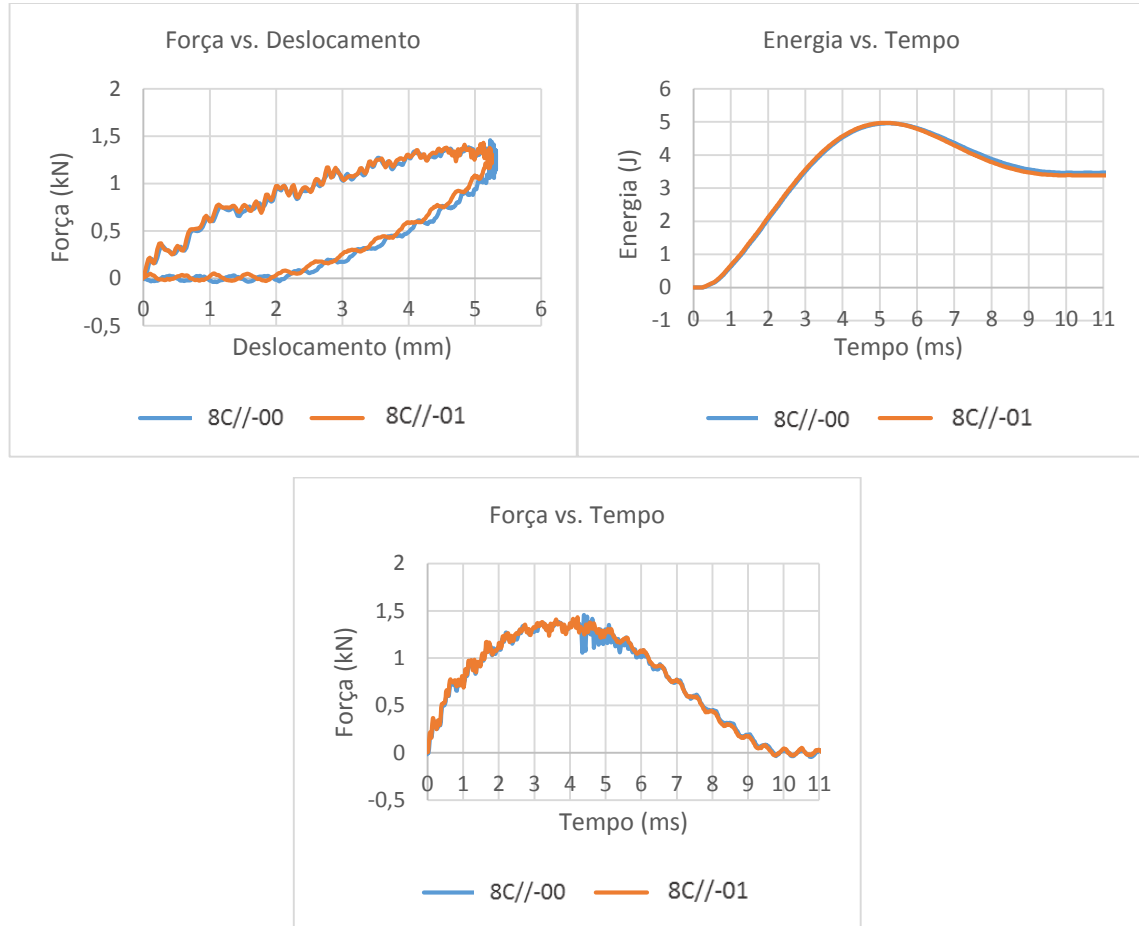


Figura 53- Conjunto de gráficos para os provetes 8C// ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.

Força máxima: 1,443 kN

Deslocamento máximo: 5,262 mm

Energia absorvida: 3,392 J

Energia elástica: 1,582 J

Tempo de contacto: 9,681 ms

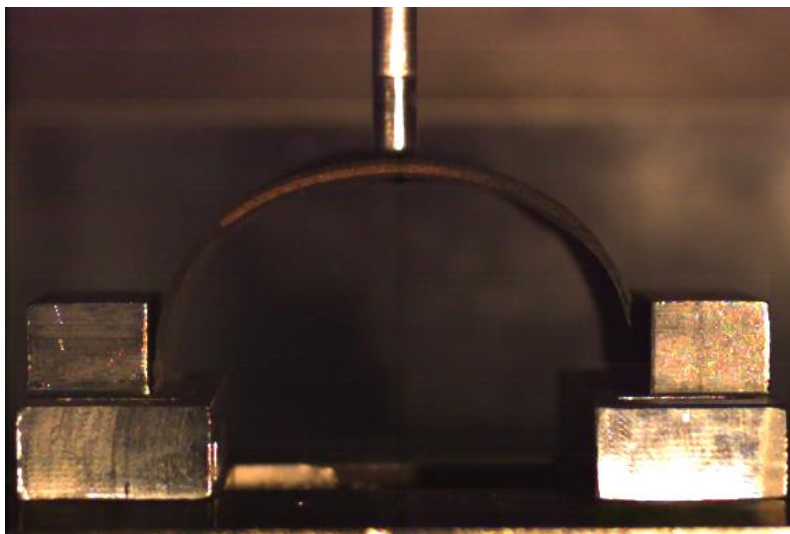


Figura 54- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8C// num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

- **8(4K//4C) – 4 camadas de fibra de carbono + 3 camadas de kevlar + 1 camada de cortiça (Diâmetro 106 mm)**

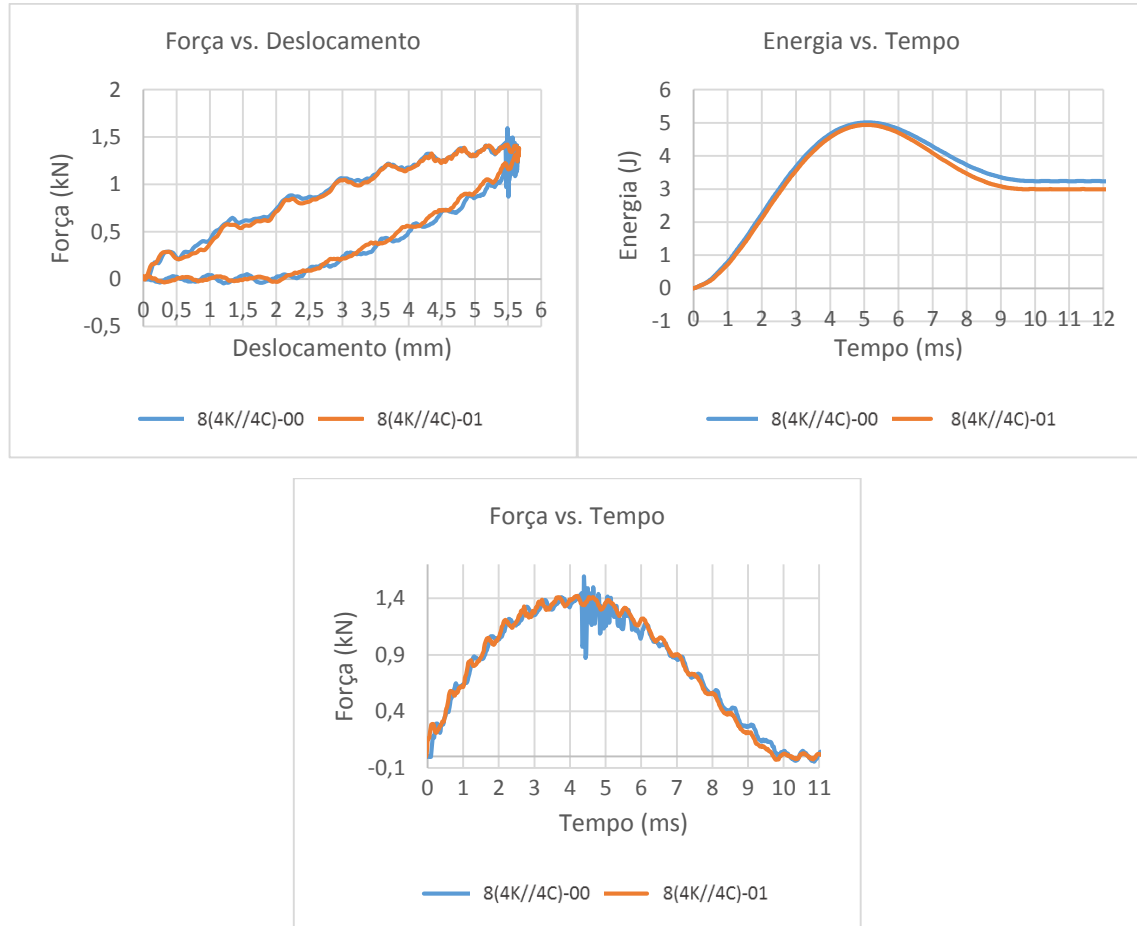


Figura 55- Conjunto de gráficos para os provetes 8(4K//4C) ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.

Força máxima: 1,501 kN

Deslocamento máximo: 5,616 mm

Energia absorvida: 3,117 J

Energia elástica: 1,891 J

Tempo de contacto: 9,998 ms

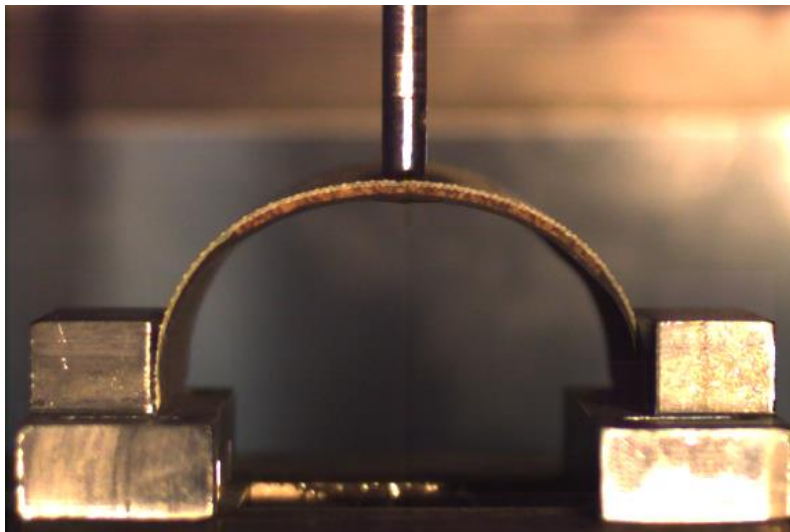


Figura 56- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 8(4K/4C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

- **Comparação de propriedades entre provetes de 8 camadas no 2º impacto no bordo**

Depois de obtidos todos os dados dos diferentes ensaios do conjunto de oito camadas para um impacto na zona entre o impacto central e o bordo, é possível fazer uma análise mais global, comparando os resultados dos vários provetes (Gráfico 19, 20, e Gráfico 21), compilando-os numa tabela (Tabela X).

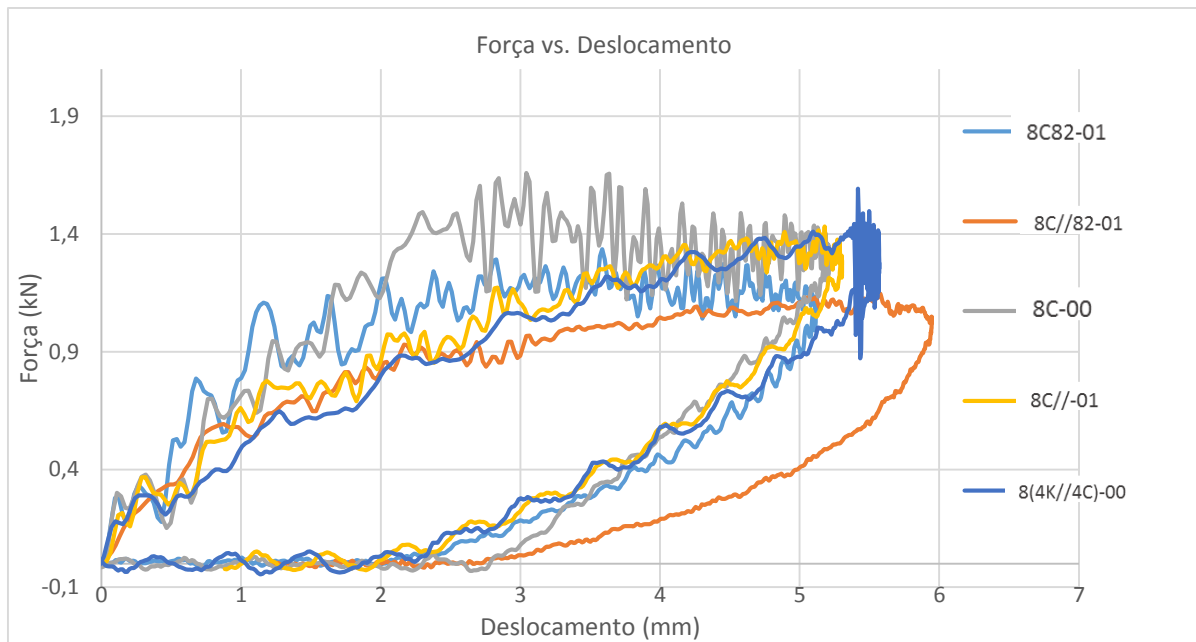


Gráfico 19- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) do impacto na zona entre o impacto central e o bordo dos provetes com 8 camadas.

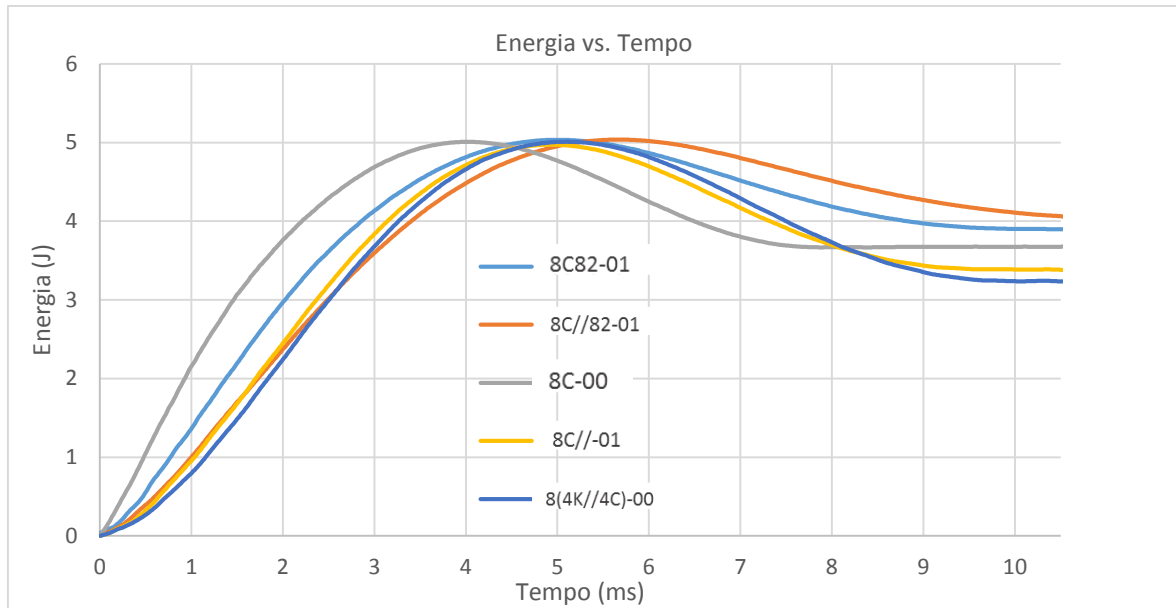


Gráfico 20- Gráfico Energia (J) x Tempo (ms) do impacto na zona entre o impacto central e o bordo dos provetes com 8 camadas.

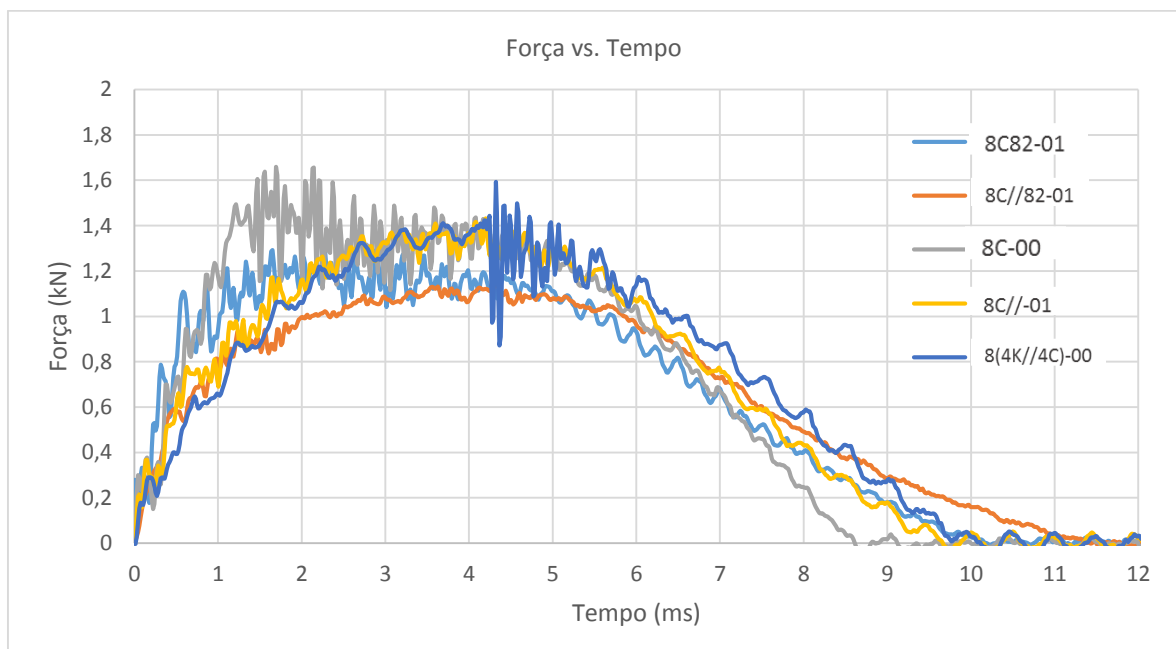


Gráfico 21- Gráfico Força (kN) x Tempo (ms) do impacto na zona entre o impacto central e o bordo dos provetes com 8 camadas.

Tabela X- Comparação das propriedades das amostras com 8 camadas no impacto central e no 2º do impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

Resumo e comparação das propriedades dos provetes com 8 camadas no impacto central (A) e no 2º impacto na zona entre o impacto central e o bordo (B) – Energia (5 J)										
Propriedade	8C82	8C82	8C//82	8C//82	8C	8C	8C//	8C//	8(4K//4C)	8(4K//4C)
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Força máx. (kN)	1,356	1,207	1,311	1,005	1,956	1,634	1,759	1,443	1,654	1,501
Deslocamento máx. (mm)	5,764	5,658	6,813	5,946	4,208	4,892	4,514	5,262	5,033	5,616
Energia int. absorvida (J)	4,738	3,730	4,384	4,174	3,820	3,473	3,399	3,392	3,003	3,117
Energia elástica (J)	0,286	1,302	0,646	1,152	1,340	1,531	1,535	1,582	1,946	1,891
Tempo contacto máx. (ms)	12,120	11,183	9,980	12,815	7,305	8,725	8,468	9,681	8,267	9,998

1. Em relação à resistência dos provetes, esta desceu em todos os provetes ensaiados no segundo impacto. O provete que registou uma menor perda de resistência foi o 8(4K//4C) com 9,3 %. O que perdeu mais resistência foi o 8C//82 com 23,3 % de diferença de força máxima aplicada entre o primeiro e segundo impacto. 8C82 desceu 10,9 %, 8C// registou 18,0 % e 8C desceu 16,5 %.
2. Analisando o deslocamento máximo, 8C// registou o maior deslocamento com 16,6 %. Os outros provetes a registar um aumento de deslocamento foram 8C e 8(4K//4C) (16,2 % e 11,6 %, respectivamente).
3. Analisando a energia absorvida em forma de dano dos provetes, esta desceu em todos os provetes ensaiados no segundo impacto menos no provete 8(4K//4C). O provete que absorveu menor energia foi o 8C// com quase nenhuma diferença assinalável em relação ao ensaio efectuado na parte central, não existindo assim mudança de comportamento no provete. O que registou uma maior diferença de comportamento foi o provete 8C82 que viu a sua energia absorvida diminuir 21,3 % em relação ao impacto central. Comparando 8C82 e 8C//82, 8C//82 também teve um decréscimo de energia absorvida menos acentuada. O que pode contribuir para este facto pode ser a presença de cortiça. 8(4K//4C) foi o único que aumentou a energia absorvida em forma de dano em cerca de 3,8 %.
4. Em relação à energia dissipada pelo provete, apenas no provete 8(4K//4C) ocorreu

- uma diminuição de energia do primeiro para o segundo impacto (2,8 %). 8C// registou um aumento muito baixo (3,1 %) e 8C e 8C//82 tiveram aumentos de energia dissipada 14,3 % e 78,3 %, respectivamente. 8C82 registou um aumento de 355 %.
5. Relativamente ao tempo de contacto, 8C, 8(4K//4C), 8C// e 8C//82 tiveram mais tempo de contacto com o penetrador (19,4 %, 20,9 %, 14,3 % e 28,4% respectivamente). 8C82 apresentou diminuição no tempo de contacto (7,7 %).

7.2.3. Impacto em provetes de 6 camadas

Nesta análise de primeiro impacto na zona central dos provetes para este conjunto de materiais são apresentados os resultados para os ensaios nas amostras 6(2C2K2C) (Figura 57), 6(2C2V2C) (Figura 59), 6(2C2B2C) (Figura 61), 6C (Figura 63) e 6(3K//3C) (Figura 65). São apresentados três gráficos diferentes para cada provete.

São apresentados, depois dos gráficos, as fotografias obtidas através da câmara de alta velocidade que mostram o deslocamento máximo que o penetrador tem em cada provete (Figura 58, 60, 62, Figura 64 e Figura 66).

- **6(2C2K2C) – 4 camadas de fibra de carbono + 2 camadas de kevlar (Diâmetro 106 mm)**

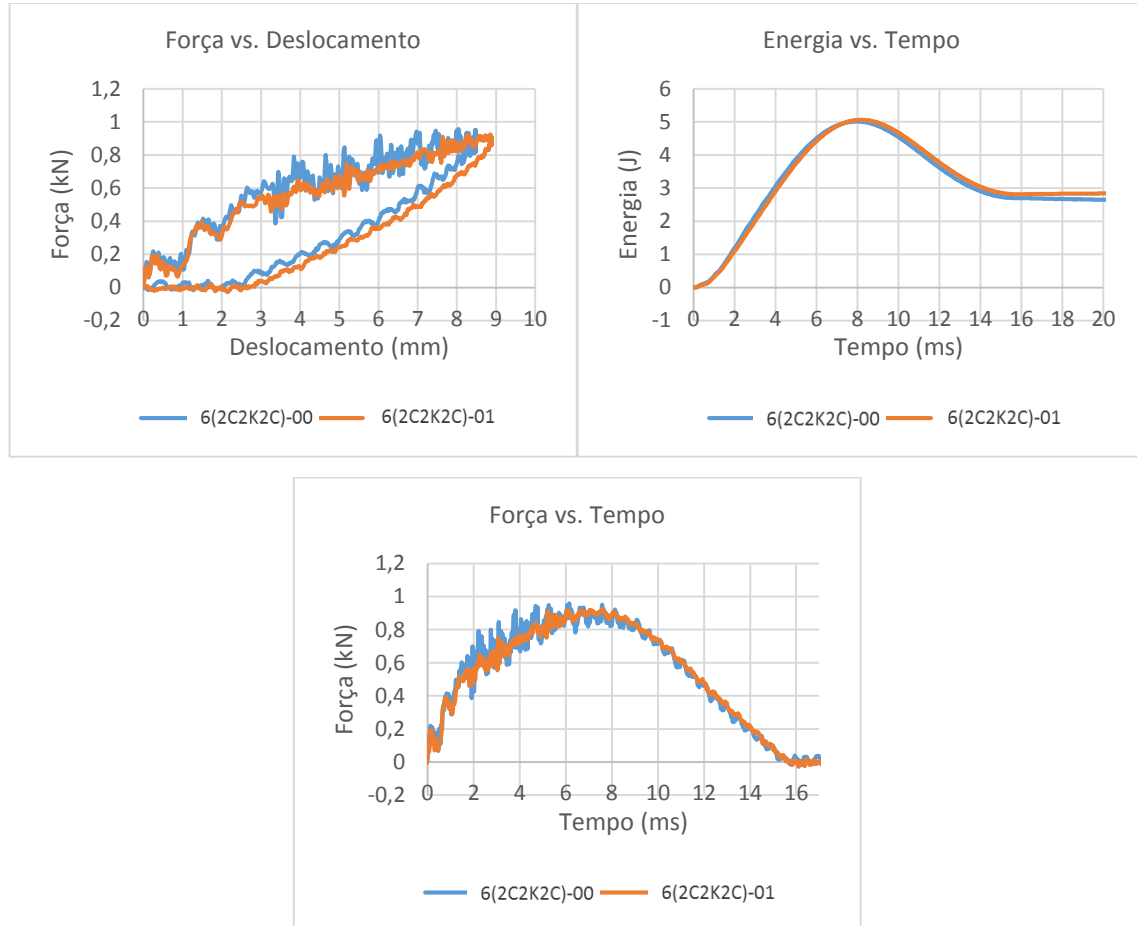


Figura 57- Conjunto de gráficos para os provetes 6(2C2K2C) ensaiados na zona central.

Força máxima: 0,941 kN

Deslocamento máximo: 8,676 mm

Energia absorvida: 2,740 J

Energia elástica: 2,347 J

Tempo de contacto: 15,485 ms

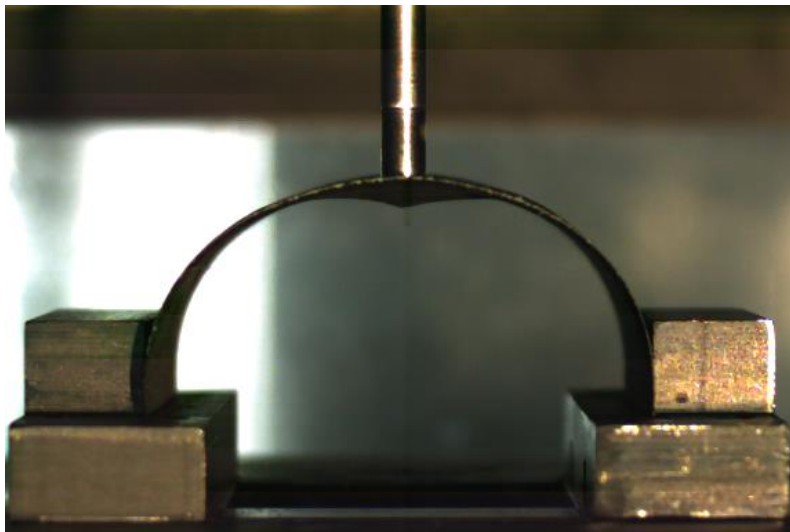


Figura 58- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 6(2C2K2C) num impacto na zona central.

- **6(2C2V2C) – 4 camadas de fibra de carbono + 2 camadas de fibra de vidro (Diâmetro 106 mm)**

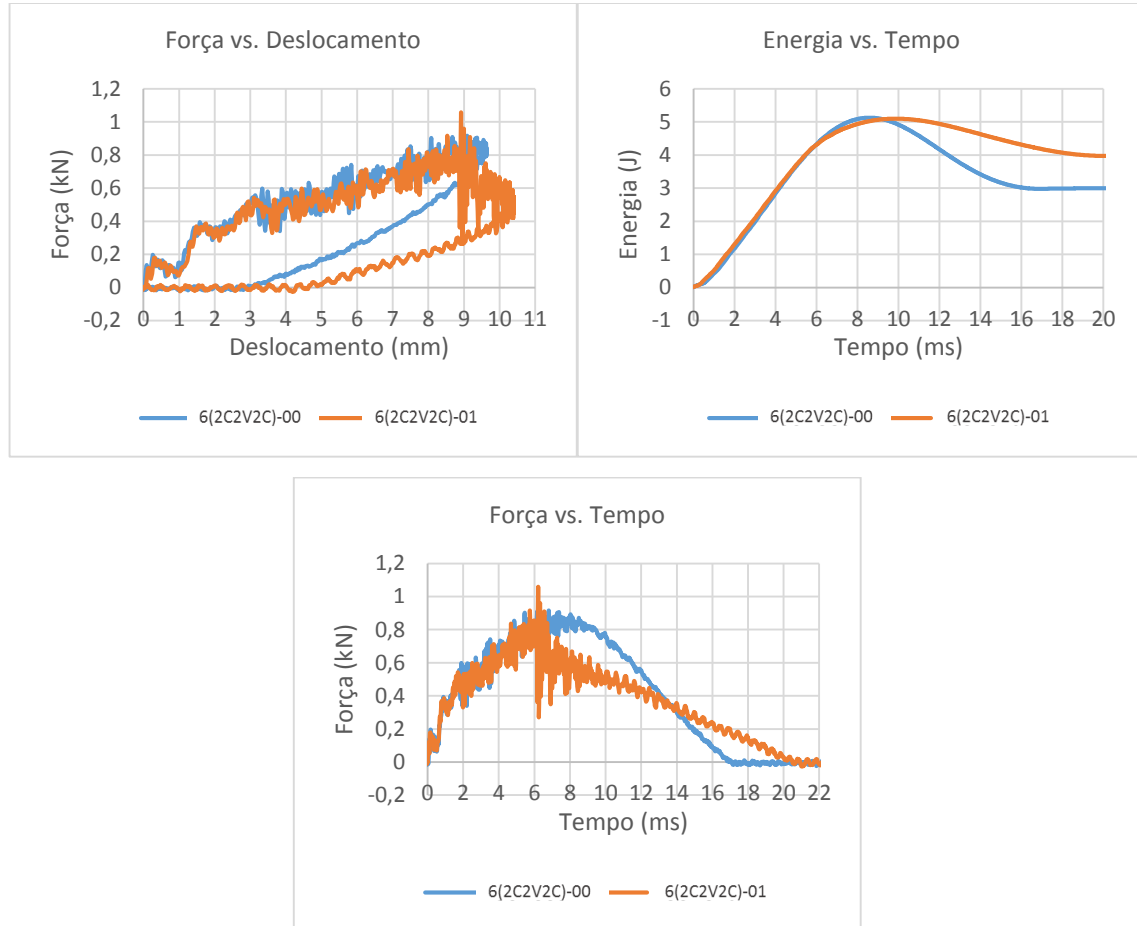


Figura 59- Conjunto de gráficos para os provetes 6(2C2V2C) ensaiados na zona central.

Força máxima: 0,987 kN

Deslocamento máximo: 9,887 mm

Energia absorvida: 3,482 J

Energia elástica: 1,657 J

Tempo de contacto: 18,748 ms

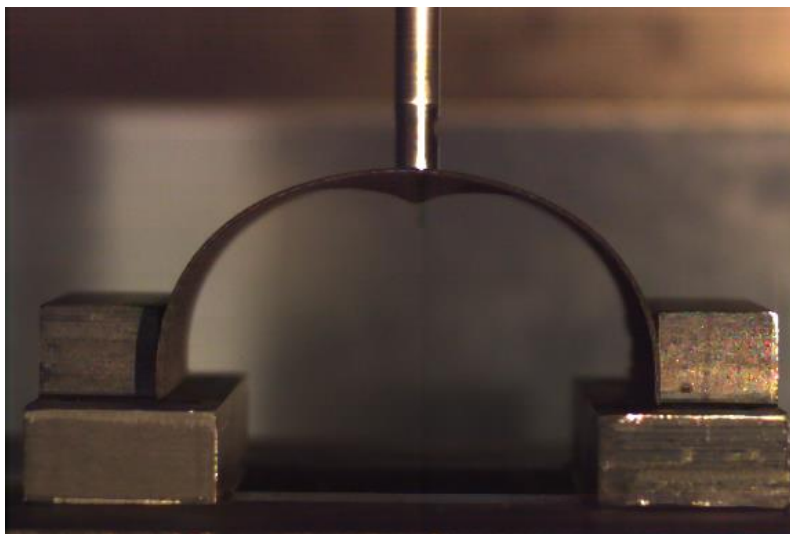


Figura 60- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 6(2C2V2C) num impacto na zona central.

- **6(2C2B2C) – 4 camadas de fibra de carbono + 2 camadas de fibra de basalto (Diâmetro 106 mm)**

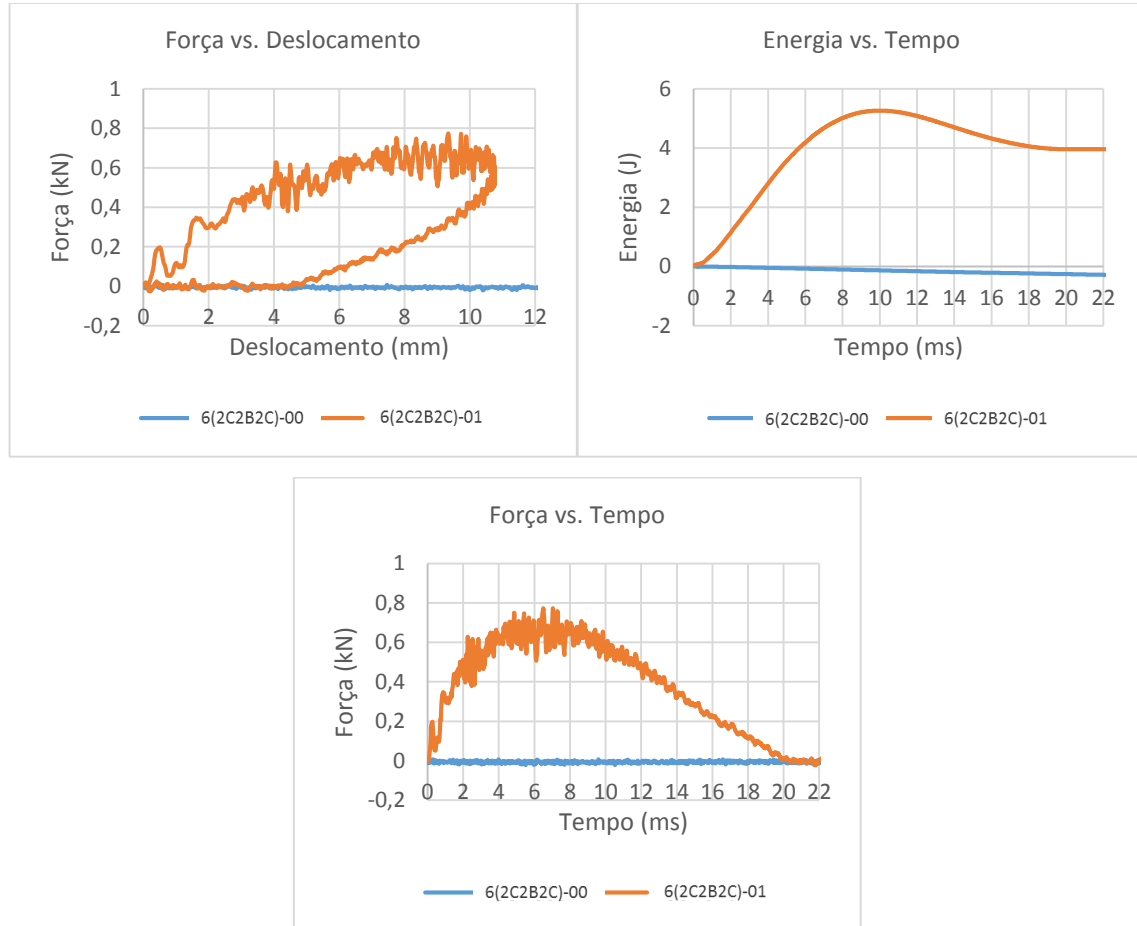


Figura 61- Conjunto de gráficos para os provetes 6(2C2B2C) ensaiados na zona central.

O provete 6(2C2B2C)-00 não possui o gráfico relativo ao impacto efectuado na zona central devido a um erro de recolha de dados por parte da máquina de impacto.

Força máxima: 0,774 kN

Deslocamento máximo: 10,547 mm

Energia absorvida: 3,965 J

Energia elástica: 1,295 J

Tempo de contacto: 18,495 ms

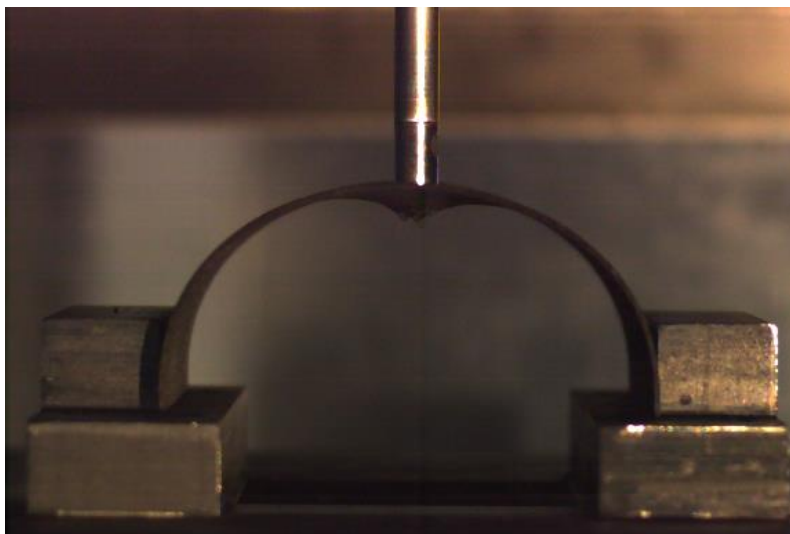


Figura 62- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 6(2C2B2C) num impacto na zona central.

- **6C – 6 camadas de fibra de carbono (Diâmetro 106 mm)**

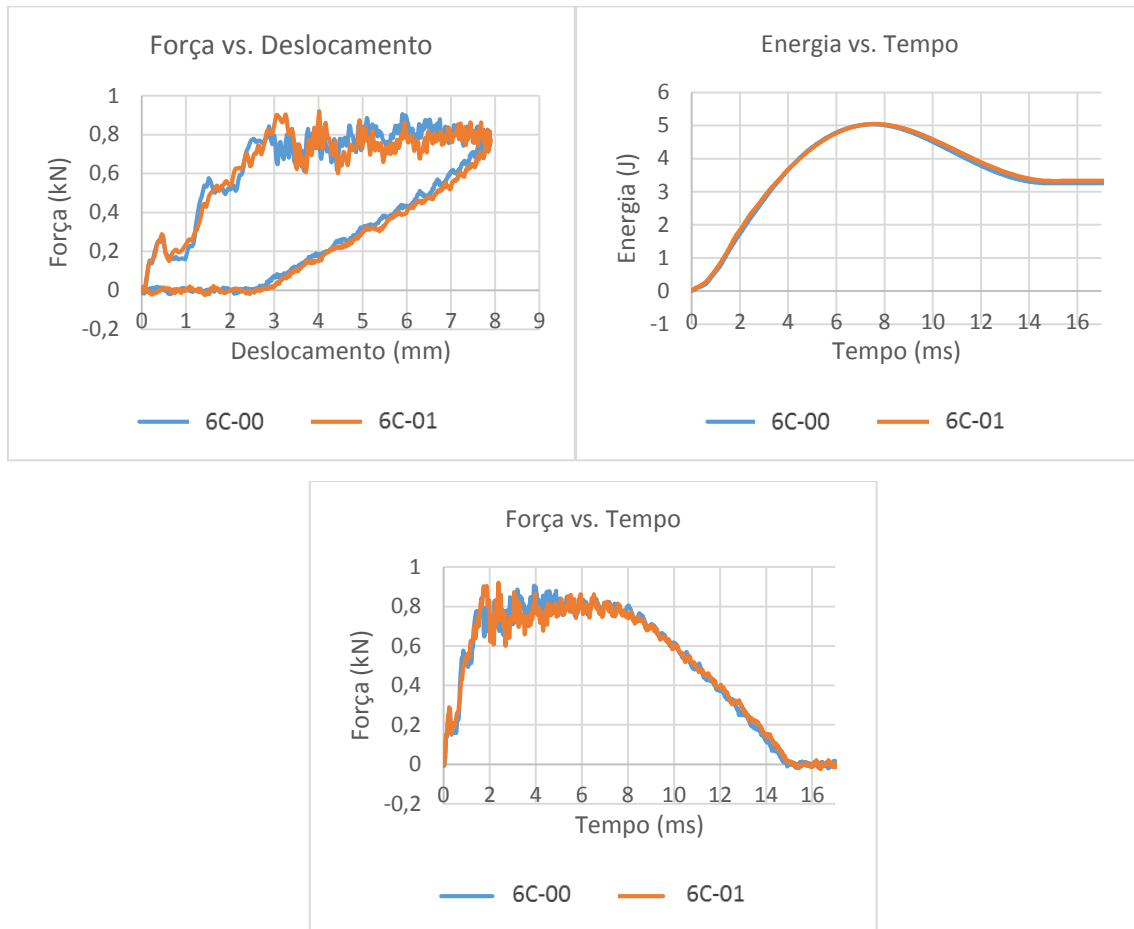


Figura 63- Conjunto de gráficos para os provetes 6C ensaiados na zona central.

Força máxima: 0,913 kN

Deslocamento máximo: 7,683 mm

Energia absorvida: 3,267 J

Energia elástica: 1,752 J

Tempo de contacto: 15,116 ms

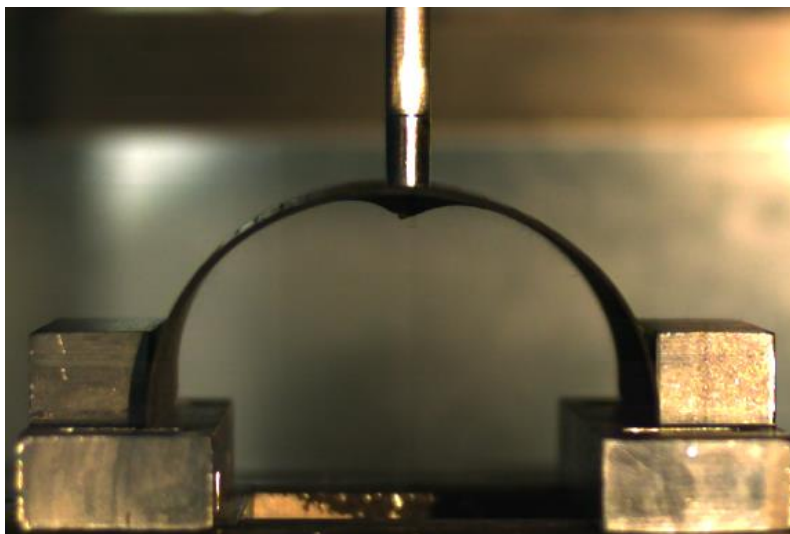


Figura 64- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 6C num impacto na zona central.

- **6(3K//3C) – 3 camadas de fibra de carbono + 3 camadas de kevlar + 1 camada de cortiça (Diâmetro 106 mm)**

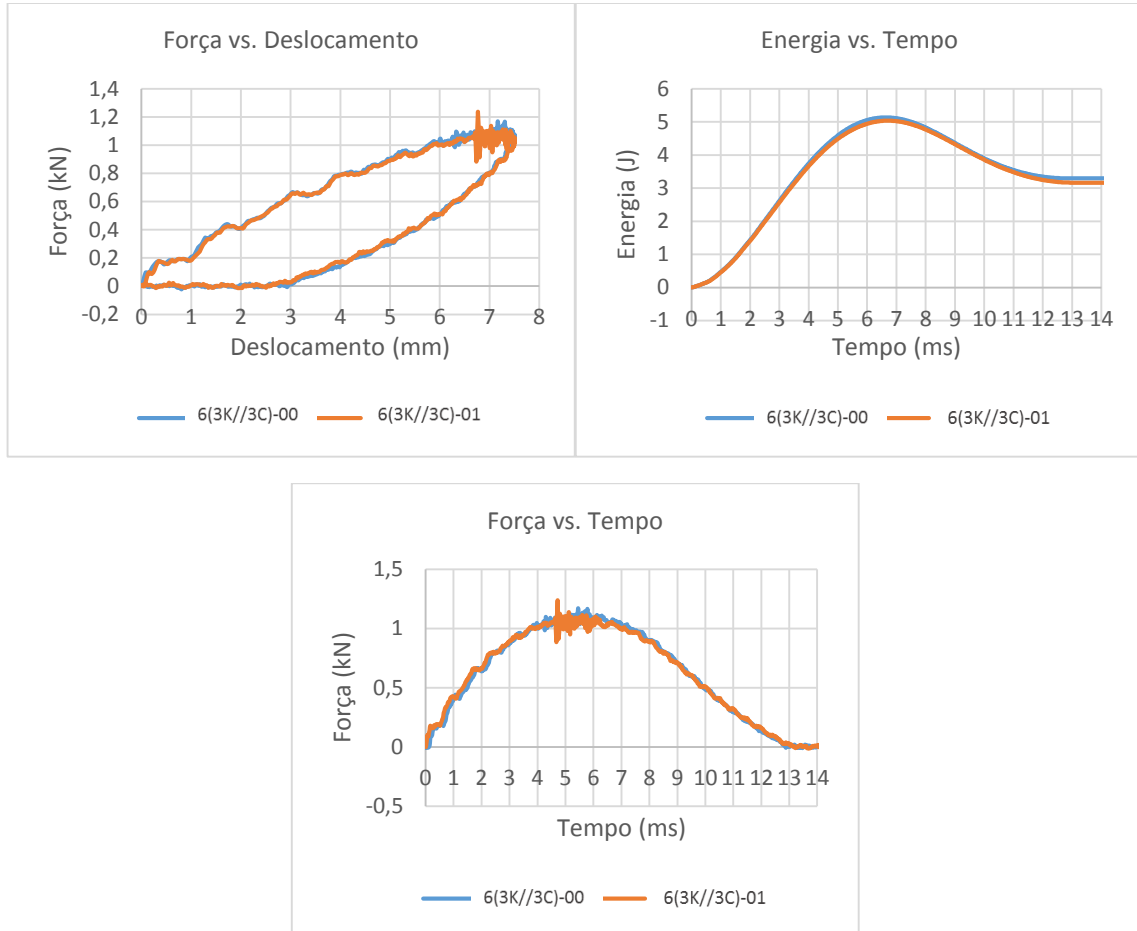


Figura 65- Conjunto de gráficos para os provetes 6(3K//3C) ensaiados na zona central.

Força máxima: 1,204 kN

Deslocamento máximo: 7,475 mm

Energia absorvida: 6,468 J

Energia elástica: 1,868 J

Tempo de contacto: 12,918 ms

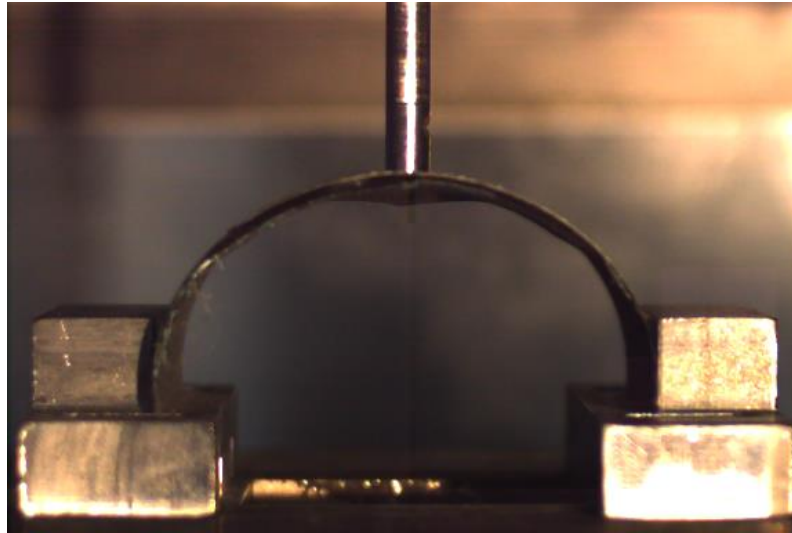


Figura 66- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 6(3K/3C) num impacto na zona central.

- **Comparação de propriedades entre provetes de 6 camadas no 1º impacto central**

Depois de obtidos todos os dados dos diferentes ensaios do conjunto de seis camadas para um impacto central, é possível fazer uma análise mais global, comparando os resultados dos vários provetes (Gráfico 22, 23 e 24), e compilando-os numa tabela (Tabela XI)

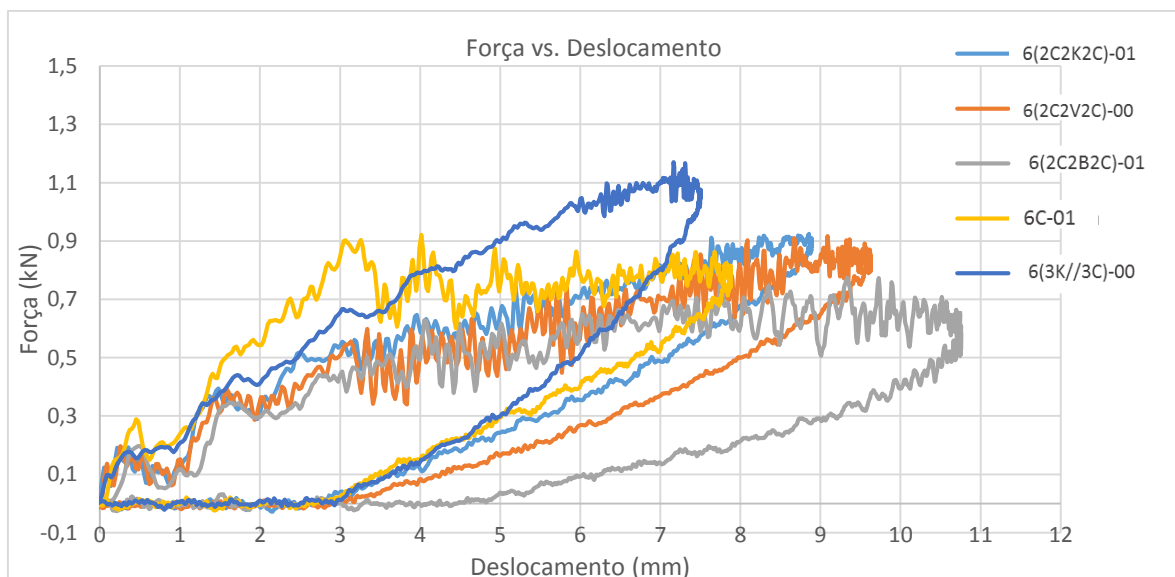


Gráfico 22- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) do impacto central dos provetes com 6 camadas.

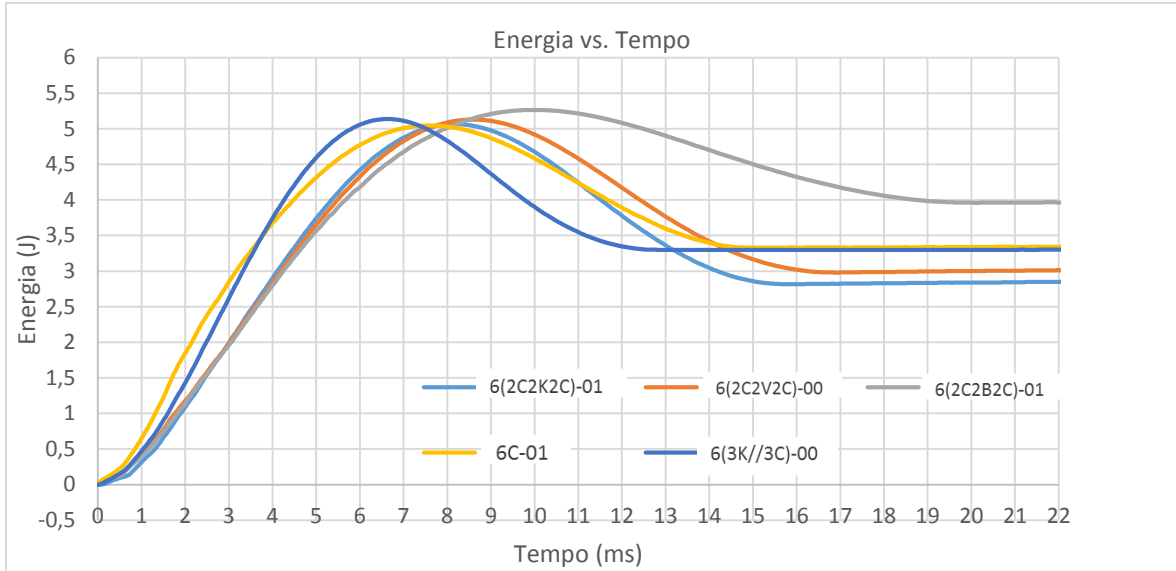


Gráfico 23- Gráfico Energia (J) x Tempo (ms) do impacto central dos provetes com 6 camadas.

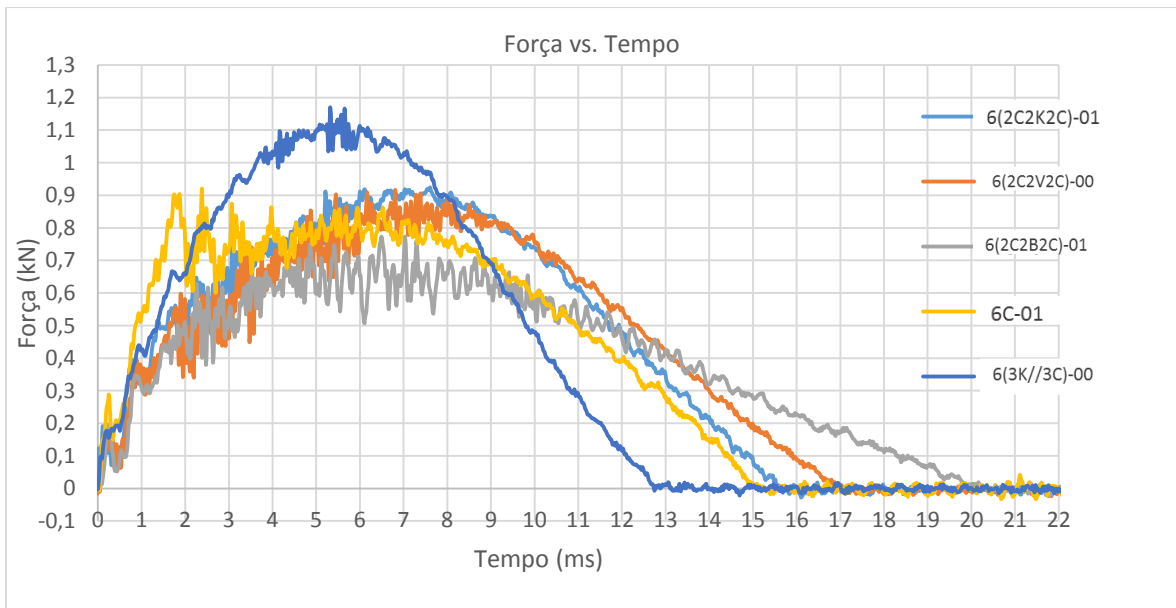


Gráfico 24- Gráfico Força (kN) x Tempo (ms) do impacto central dos provetes com 6 camadas.

Tabela XI- Síntese das propriedades dos provetes com 6 camadas no impacto central.

Resumo das propriedades dos provetes com 6 camadas no impacto central – Energia (5 J)					
Propriedade	6(2C2K2C)	6(2C2V2C)	6(2C2B2C)	6C	6(3K//3C)
<i>Força máx. (kN)</i>	0,941	0,987	0,774	0,913	1,204
<i>Deslocamento máx. (mm)</i>	8,676	9,887	10,547	7,683	7,475
<i>Energia int. absorvida (J)</i>	2,740	3,482	3,965	3,267	6,468
<i>Energia elástica (J)</i>	2,347	1,657	1,295	1,752	1,868
<i>Tempo contacto (ms)</i>	15,485	18,748	18,495	15,116	12,918

Depois de compilar os dados obtidos na anterior tabela, é possível fazer as seguintes análises:

1. 6(3K//3C) foi a peça que demonstrou ter uma maior resistência; seguida de 6(2C2V2C) e 6(2C2K2C), por ordem decrescente.
2. Em termos de deslocamento, a adição de fibra de carbono (6C) ajudou consideravelmente a baixar o nível de deformação. Não existe muita diferença neste campo entre a adição de fibra de vidro (6(2C2V2C)) e a adição de kevlar (6(2C2K2C)).
3. O material que absorve maior energia e o dissipa (energia elástica) foi a que teve a adição de kevlar (6(2C2K2C)).
4. Não existem grandes diferenças em termos de tempo de contacto entre 6(2C2K2C) e 6C, sendo que foi o 6C que tem o menor tempo de contacto (resultado da adição de fibra de carbono). 6(2C2V2C) foi o provete que revelou um maior tempo de contacto.;

7.2.4. 2º impacto entre zona de impacto central e o bordo em provetes de 6 camadas

Na análise de segundo impacto entre a zona de impacto central e o bordo dos provetes para este conjunto de materiais, são apresentados os resultados para os ensaios nas amostras 6(2C2K2C) (Figura 67), 6(2C2V2C) (Figura 70), 6(2C2B2C) (Figura 73), 6C (Figura 77) e 6(3K//3C) (Figura 79). São apresentados três gráficos diferentes para cada provete e também fotografias relativas a cada provete (Figura 68, 69, Figura 71, 72, 74, 75, 76, Figura 78 e Figura 80) a ilustrar o deslocamento máximo do provete efectuado pelo penetrador. De referir que alguns provetes apresentam mais do que uma foto porque houve rotura e falha do material. 6(2C2K2C), 4C//, 6(2C2B2C) e 6C apresentaram falhas no material.

- **6(2C2K2C) – 4 camadas de fibra de carbono + 2 camadas de kevlar (Diâmetro 106 mm)**

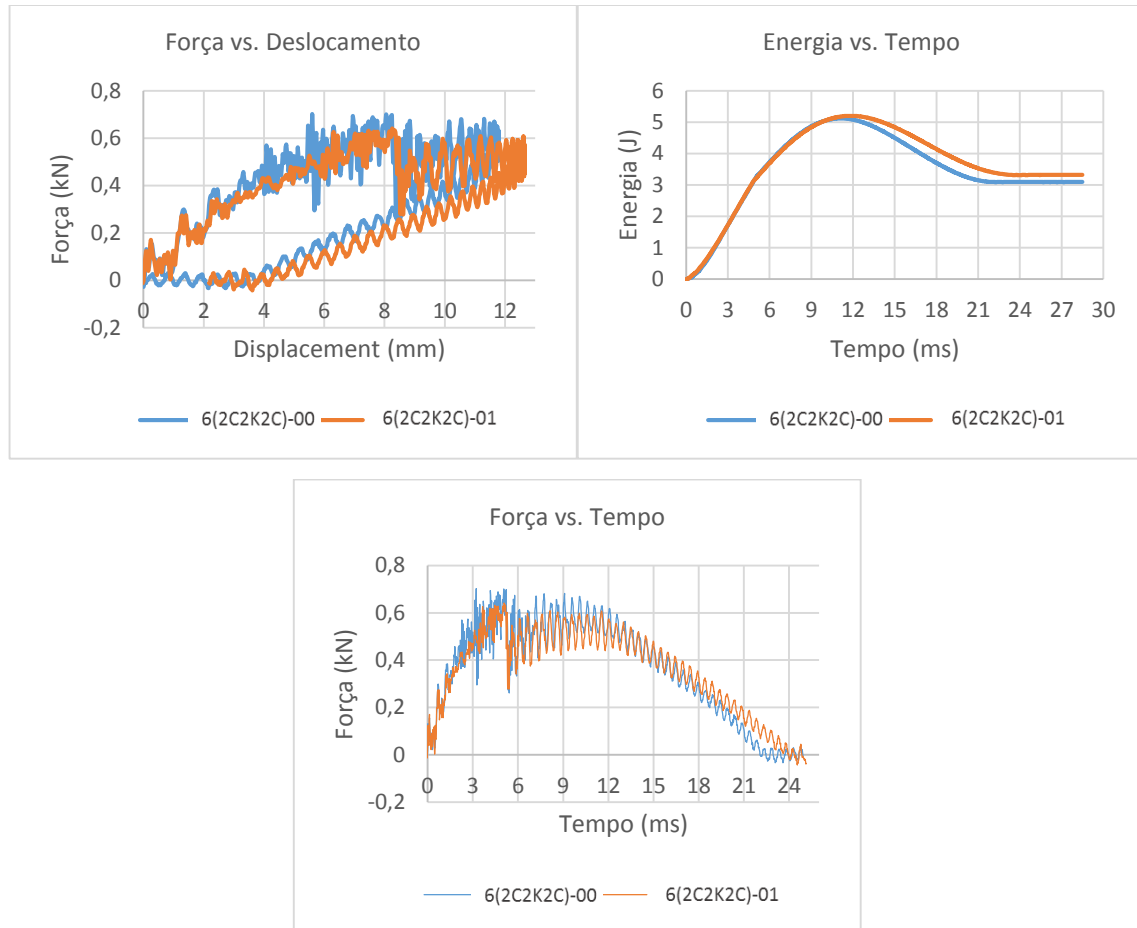


Figura 67- Conjunto de gráficos para os provetes 6(2C2K2C) ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.

Força máxima: 0,672 kN

Deslocamento máximo: 12,155 mm

Energia absorvida: 3,208 J

Energia elástica: 1,974 J

Tempo de contacto: 23,033 ms

De seguida apresentam-se duas fotografias em que é possível verificar o momento em que o provete atinge o seu deslocamento máximo antes de existir fratura do material (Figura 68) e o momento em que a rotura máxima no material é atingida (Figura 69).

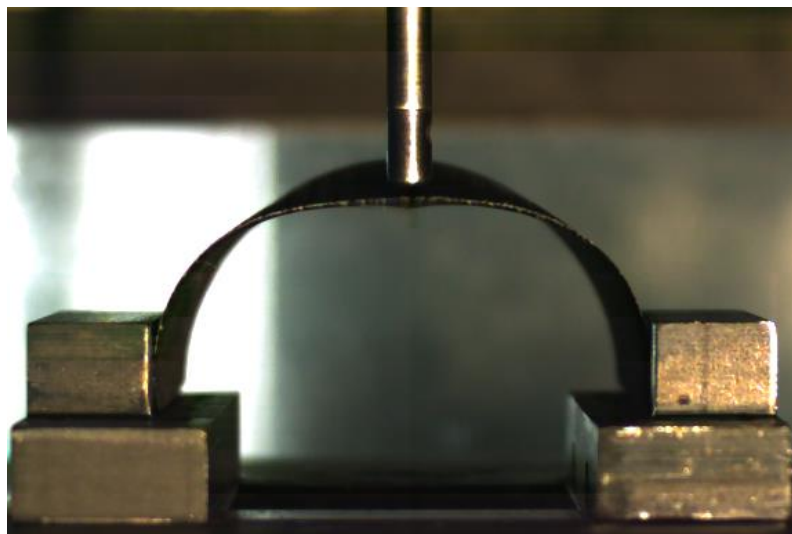


Figura 68- Fotografia no momento de deslocamento máximo antes da fratura de um provete 6(2C2K2C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

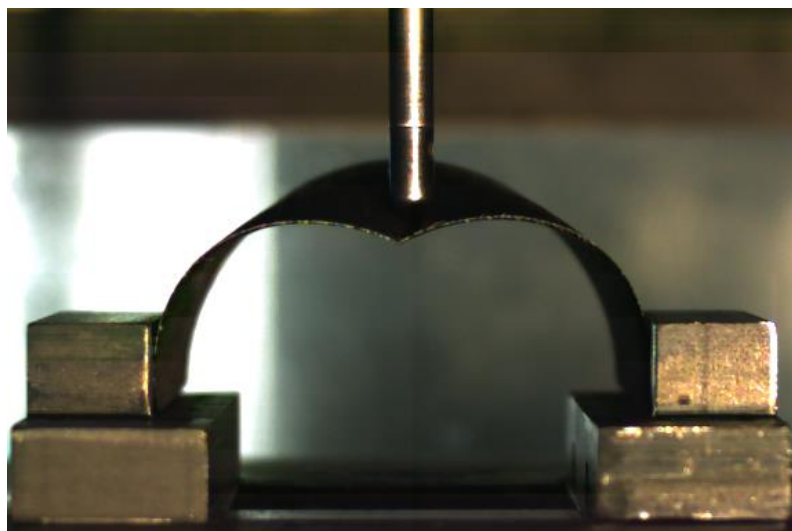


Figura 69- Fotografia no momento de rotura máxima do provete 6(2C2K2C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

- **6(2C2V2C) – 4 camadas de fibra de carbono + 2 camadas de fibra de vidro (Diâmetro 106 mm)**

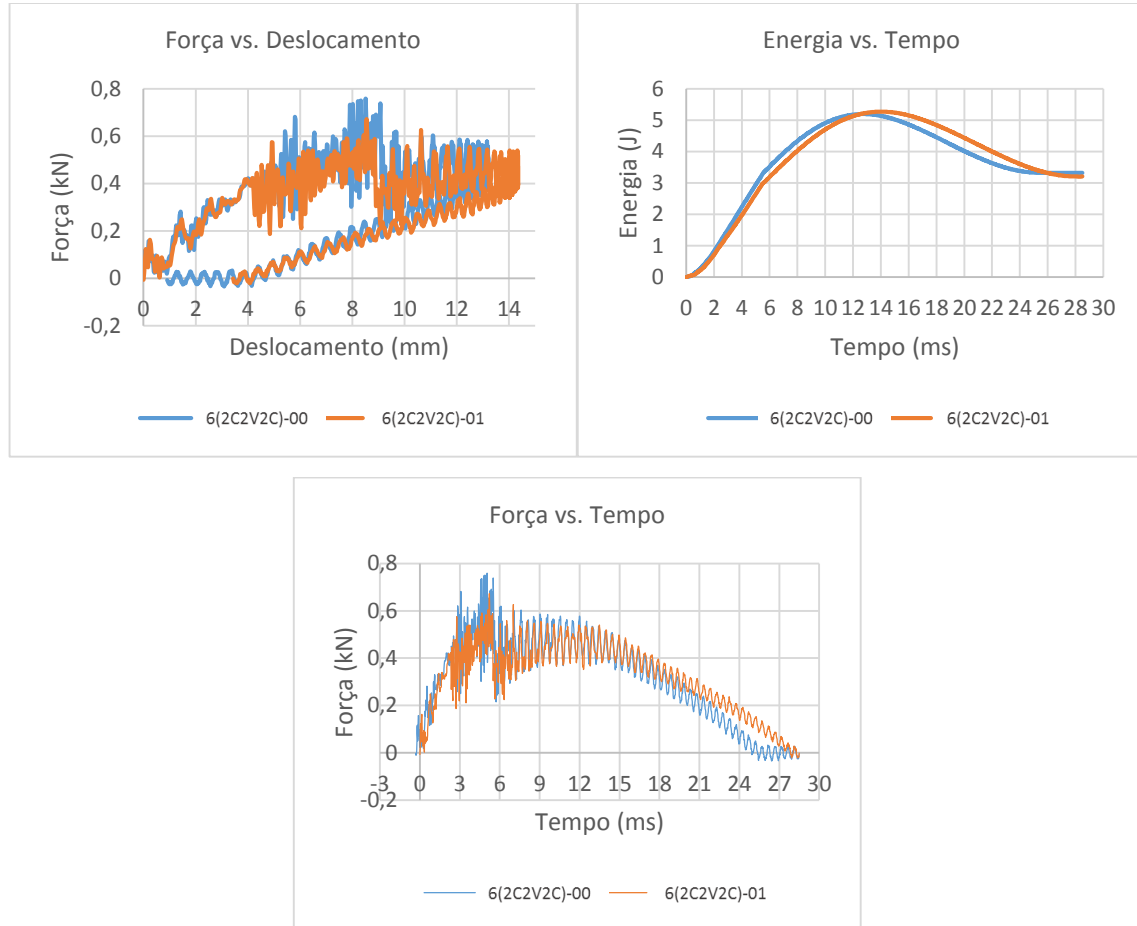


Figura 70- Conjunto de gráficos para os provetes 6(2C2V2C) ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo

Força máxima: 0,715 kN

Deslocamento máximo: 13,498 mm

Energia absorvida: 3,300 J

Energia elástica: 1,840 J

Tempo de contacto: 26,933 ms

De seguida mostra-se o momento em que o provete atinge o deslocamento máximo antes de haver falha no material (Figura 71) e momento logo a seguir em que a falha do provete se propaga até ao bordo livre do mesmo (Figura 72).

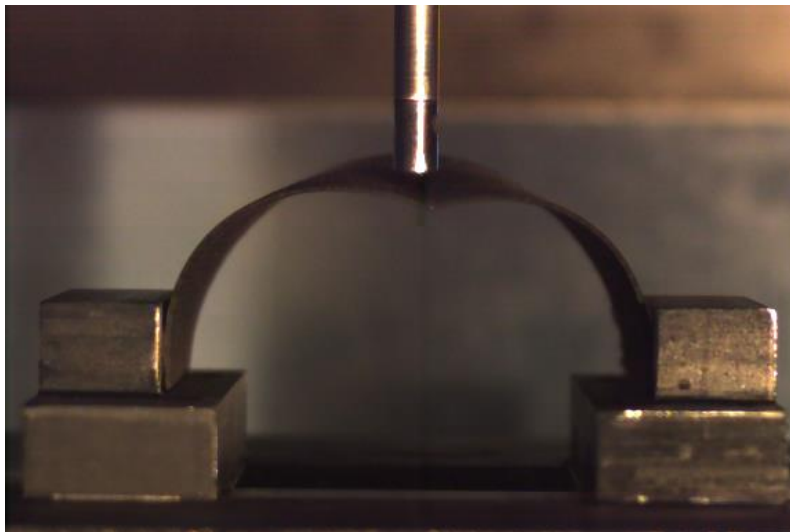


Figura 71- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 6(2C2V2C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

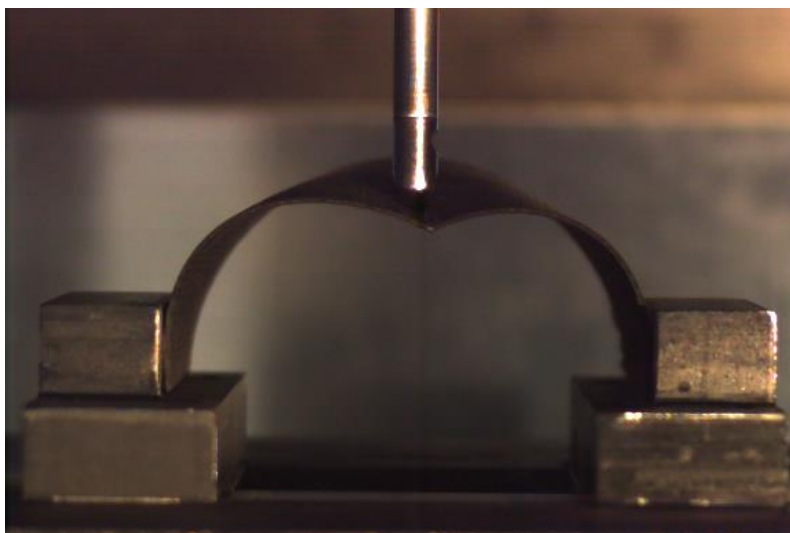


Figura 72- Fotografia no momento de rotura máxima do provete 6(2C2V2C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

- **6(2C2B2C) – 4 camadas de fibra de carbono + 2 camadas de fibra de basalto (Diâmetro 106 mm)**

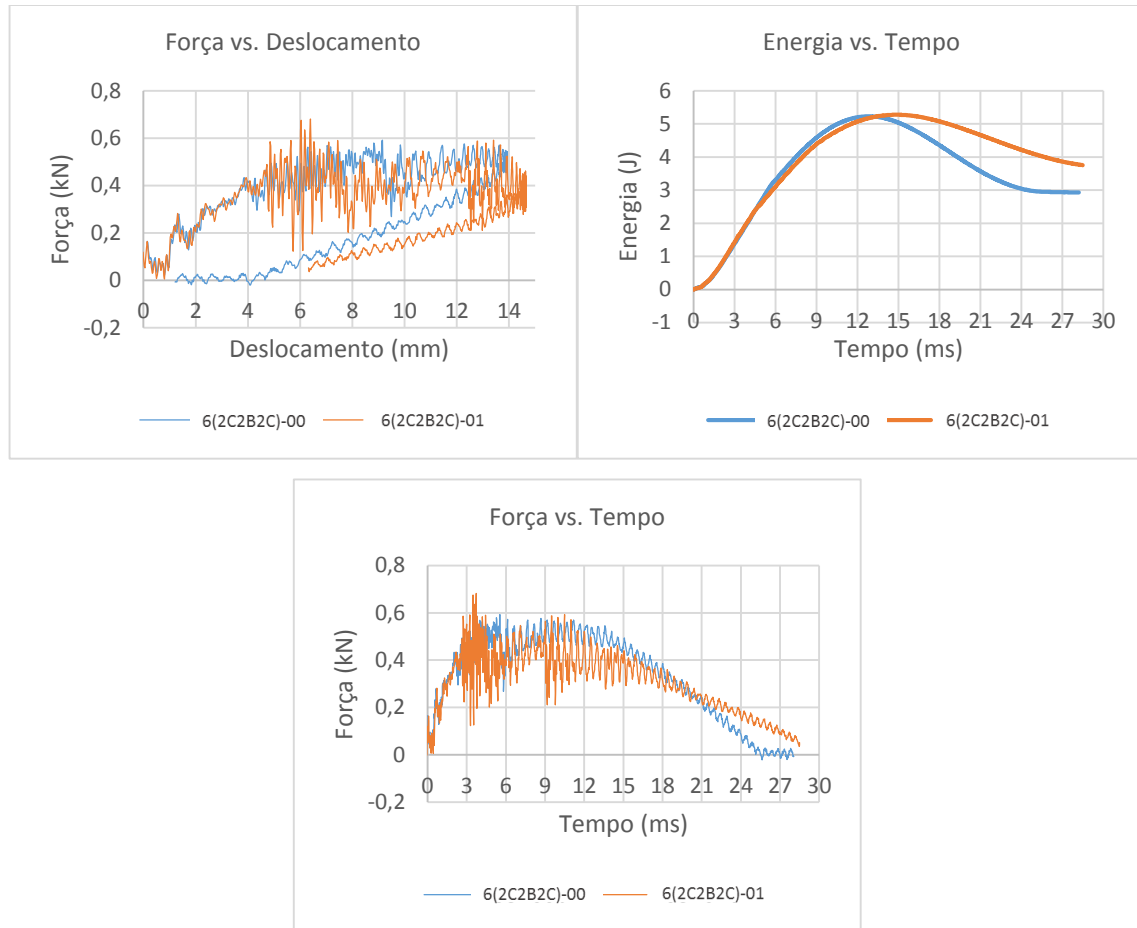


Figura 73- Conjunto de gráficos para os provetes 6(2C2B2C) ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo

Força máxima: 0,637 kN

Deslocamento máximo: 14,354 mm

Energia absorvida: 3,344 J

Energia elástica: 1,907 J

Tempo de contacto: 26,009 ms

De seguida mostram-se três fotografias que identificam três momentos distintos da solicitação do provete 6(2C2B2C). Primeiro existe um deslocamento máximo sem haver fratura do material até ao seu ponto máximo (Figura 74). Depois deste ponto existe falha do material e propagação desta até ao bordo livre do provete (Figura 75). Como a propagação

da falha até ao bordo não é suficiente para dissipar a energia restante, dá-se uma nova fratura junto do apoio do provete, próximo da sua extremidade (Figura 76).

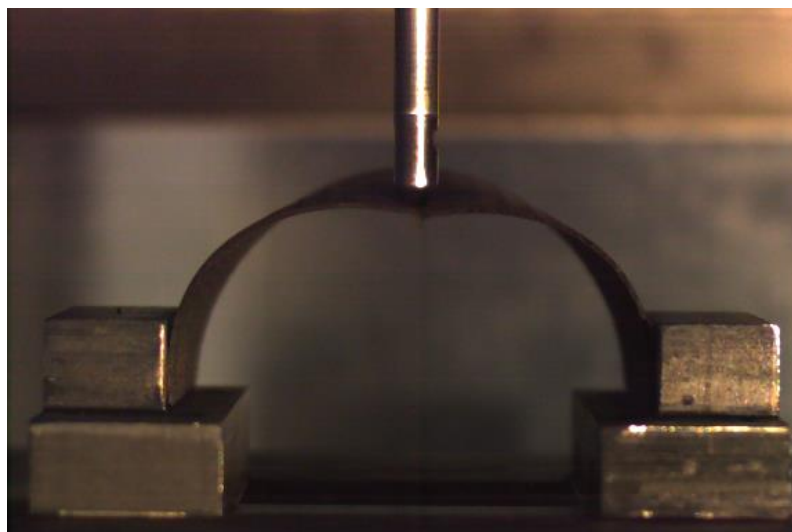


Figura 74- Fotografia no momento de deslocamento máximo e antes de haver rotura, de um provete 6(2C2B2C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

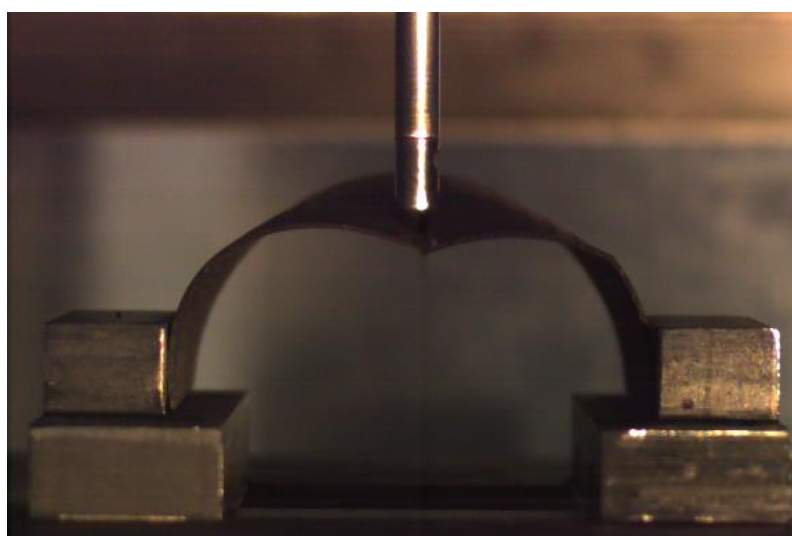


Figura 75- Fotografia no momento propagação da falha até à extremidade do provete 6(2C2B2C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

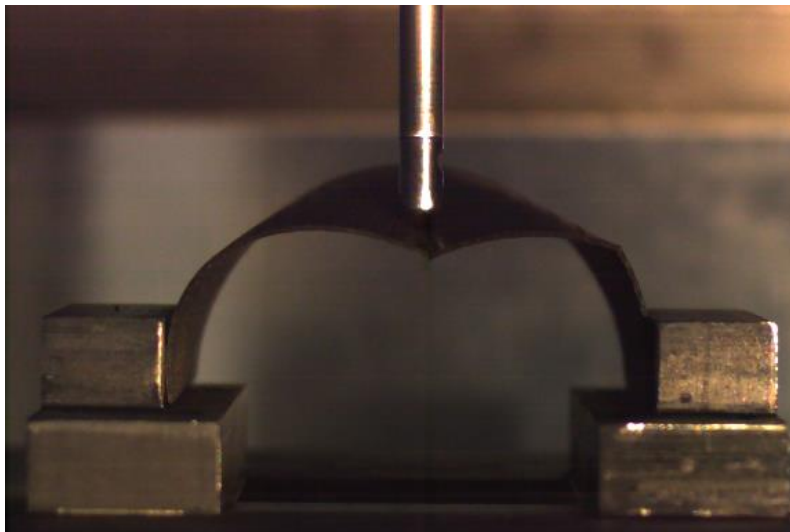


Figura 76- Fotografia de uma segunda rotura localizada na zona lateral do provete perto da superfície onde encosta o lado direito.

- **6C - 6 camadas de fibra de carbono (Diâmetro 106 mm)**

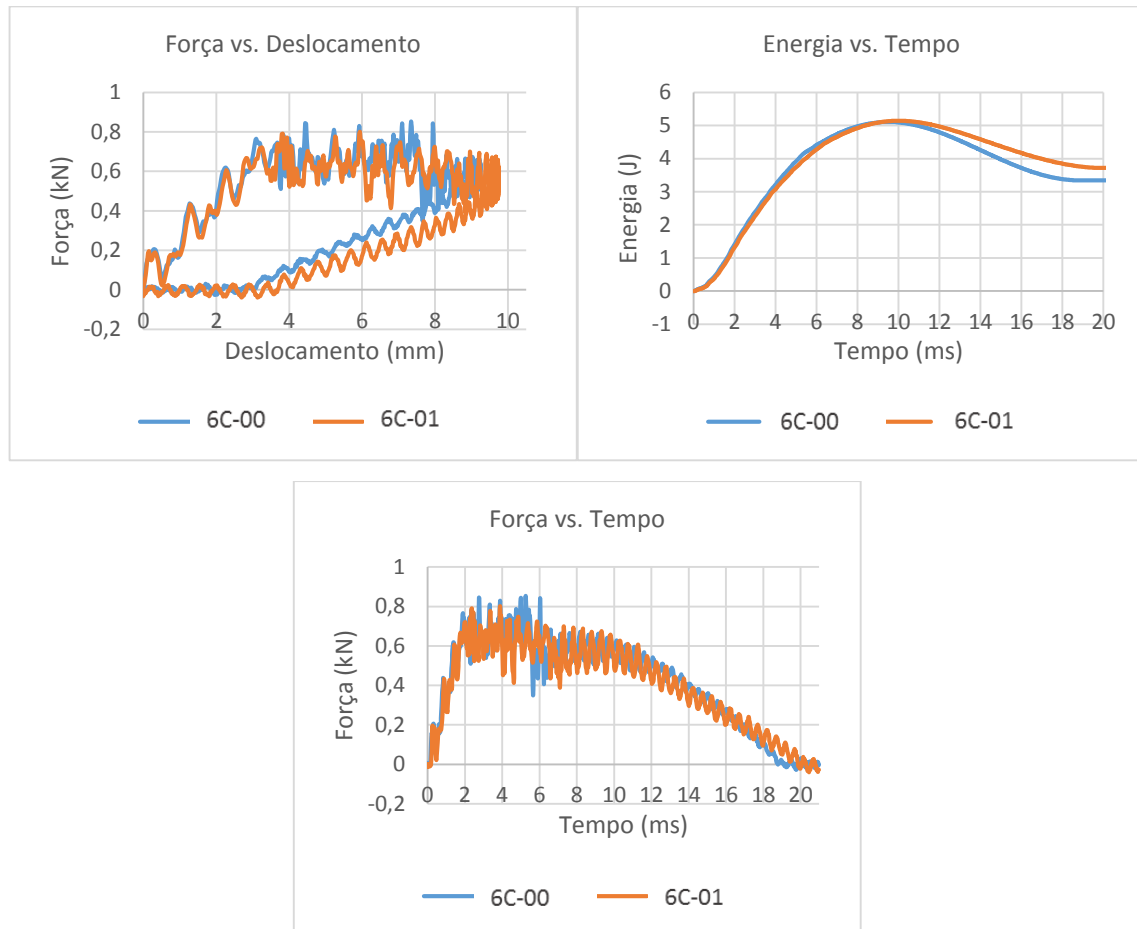


Figura 77- Conjunto de gráficos para os provetes 6C ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.

Força máxima: 0,828 kN

Deslocamento máximo: 9,442 mm

Energia absorvida: 3,540 J

Energia elástica: 1,598 J

Tempo de contacto: 19,383 ms

É possível verificar que existiu uma propagação da falha embora não se tivesse verificado uma rotura total do provete (Figura 78).

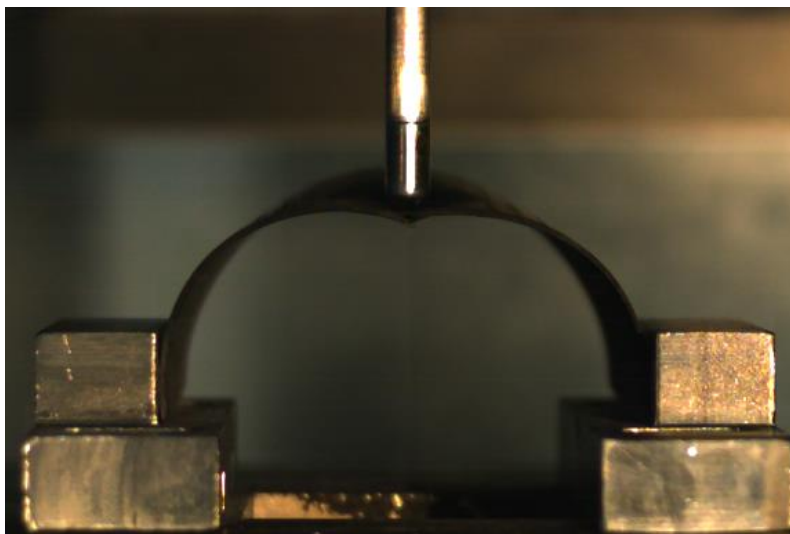


Figura 78- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 6C num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

- **6(3K//3C) - 2 camadas de fibra de carbono + 2 camadas de kevlar + 1 camada de cortiça (Diâmetro 106 mm)**

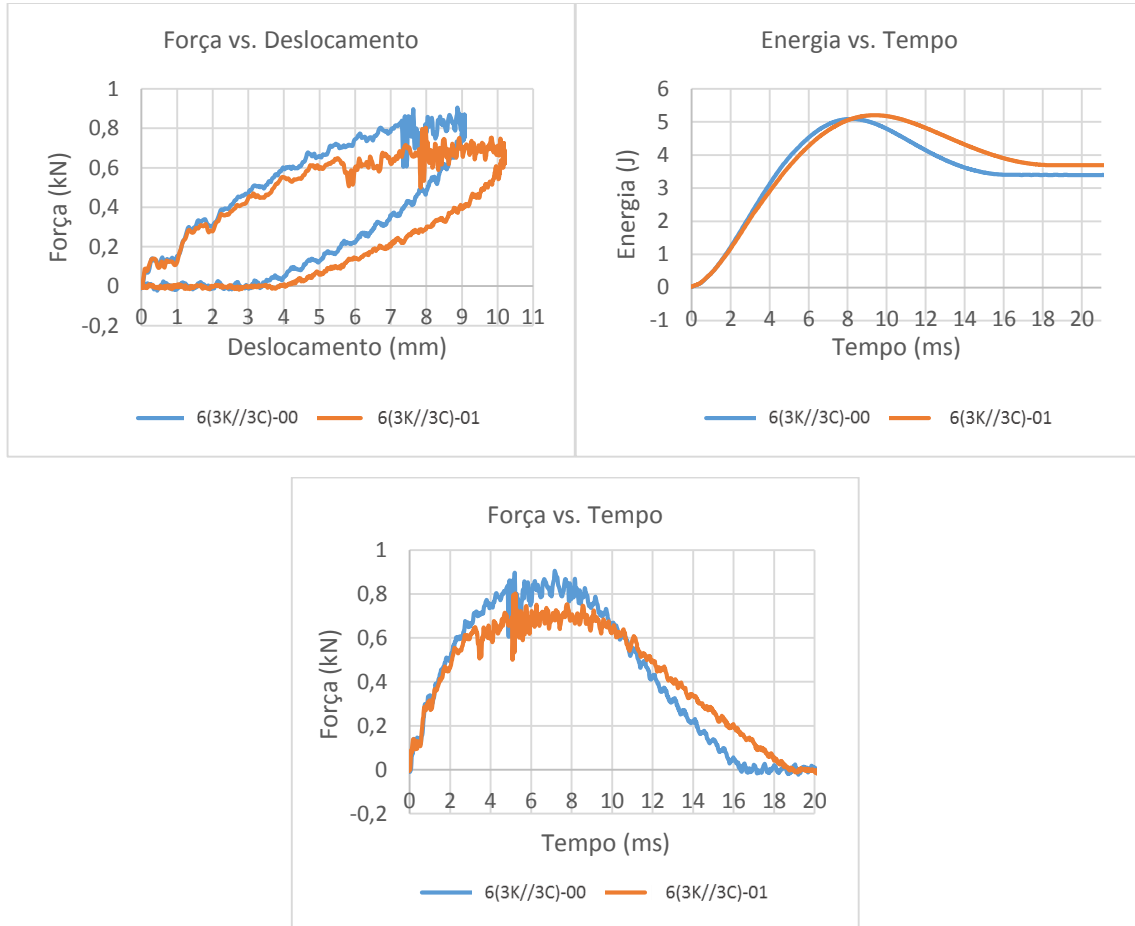


Figura 79- Conjunto de gráficos para os provetes 8(4K//4C) ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.

Força máxima: 0,854 kN

Deslocamento máximo: 9,592 mm

Energia absorvida: 3,546 J

Energia elástica: 1,527 J

Tempo de contacto: 9,781 ms

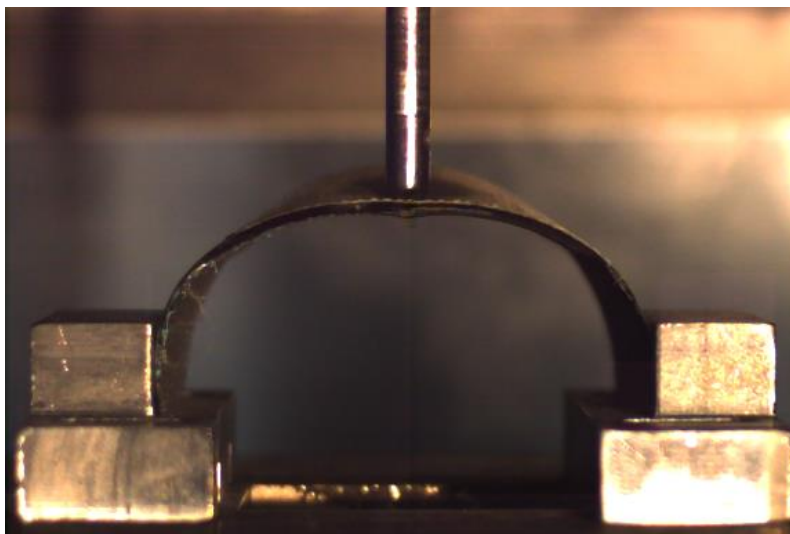


Figura 80- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 6(3K//3C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

- **Comparação de propriedades entre provetes de 6 camadas no 2º impacto no bordo**

Depois de obtidos todos os dados dos diferentes ensaios do conjunto de seis camadas para um impacto na zona entre o impacto central e o bordo, é possível fazer uma análise mais global, comparando os resultados dos vários provetes (Gráfico 25, 26, e 27), e compilando-os numa tabela (Tabela X).

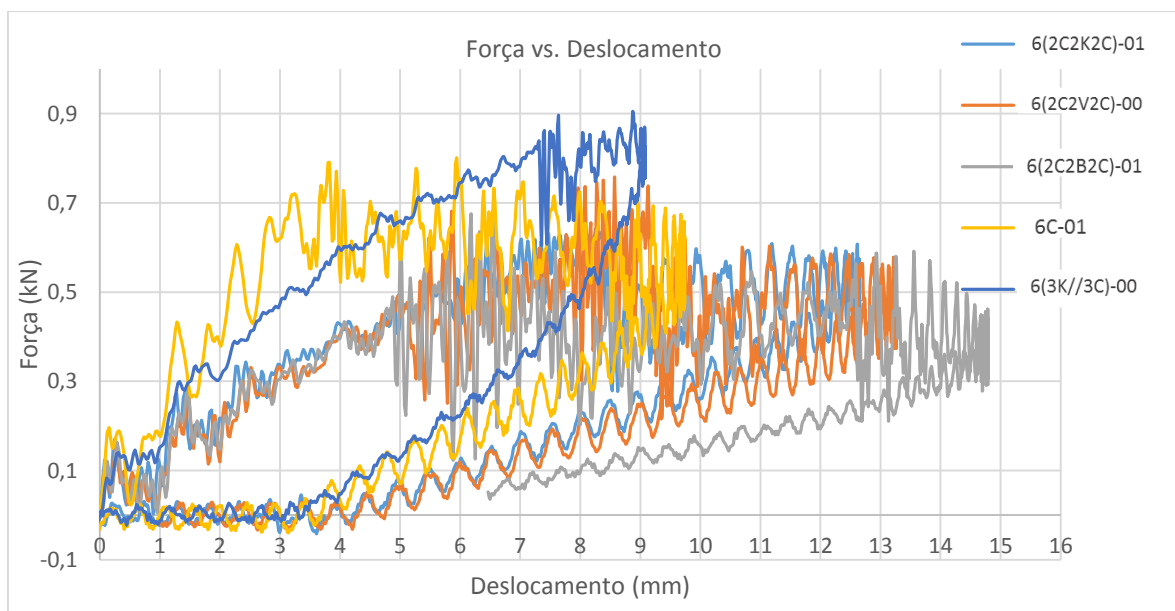


Gráfico 25- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) do impacto na zona entre o impacto central e o bordo dos provetes com 6 camadas.

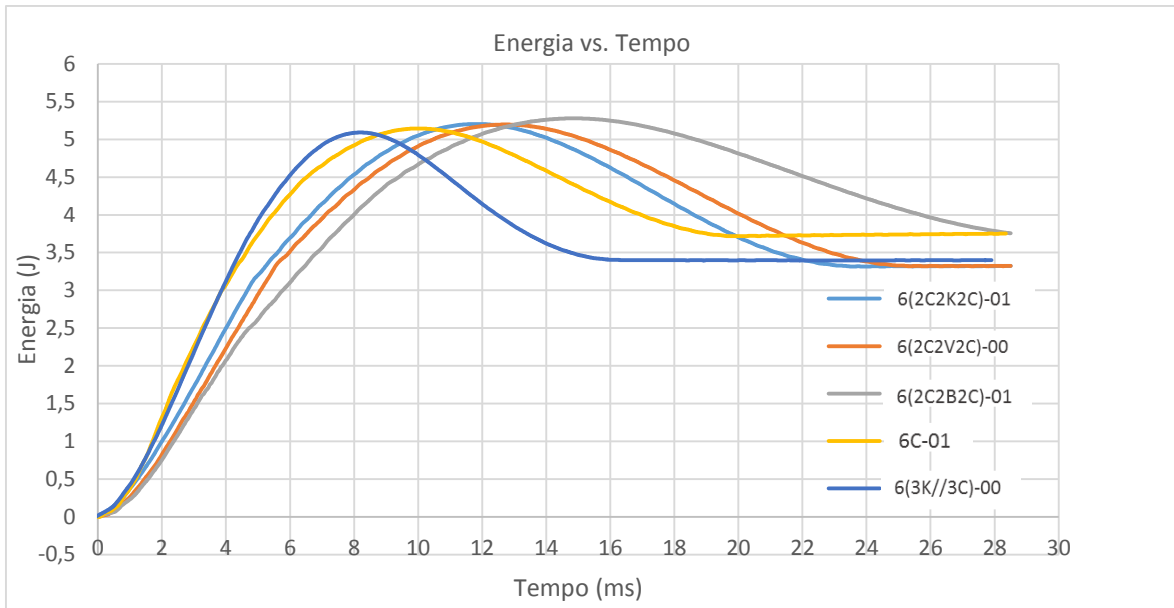


Gráfico 26- Gráfico Energia (J) x Tempo (ms) do impacto na zona entre o impacto central e o bordo dos provetes com 6 camadas.

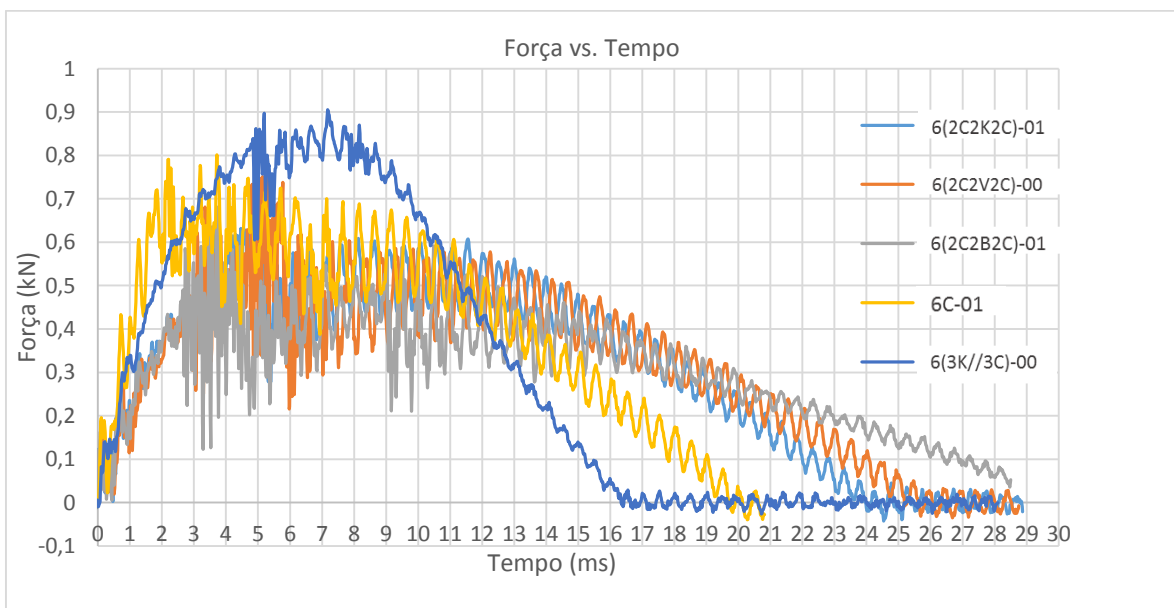


Gráfico 27- Gráfico Força (kN) x Tempo (ms) do impacto na zona entre o impacto central e o bordo dos provetes com 6 camadas.

Tabela XII- Comparação das propriedades das amostrass com 6 camadas no impacto central e no 2º impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

Resumo e comparação das propriedades dos provetes com 6 camadas no impacto central (A) e no 2º impacto na zona entre o impacto central e o bordo (B) – Energia (5 J)										
Propriedade	6(2C2K2C)	6(2C2K2C)	6(2C2V2C)	6(2C2V2C)	6(2C2B2C)	6(2C2B2C)	6C	6C	6(3K//3C)	6(3K//3C)
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Força máx. (kN)	0,941	0,672	0,987	0,715	0,774	0,637	0,913	0,828	1,204	0,854
Deslocamento máx. (mm)	8,676	12,155	9,887	13,498	10,547	14,354	7,683	9,442	7,475	9,592
Energia int. absorvida (J)	2,740	3,208	3,482	3,300	3,965	3,344	3,267	3,540	6,468	3,546
Energia elástica (J)	2,347	1,974	1,657	1,840	1,295	1,907	1,752	1,598	1,868	1,527
Tempo contacto máx. (ms)	15,485	23,033	18,748	26,933	18,495	26,009	15,116	19,383	12,918	17,735

1. Em relação à resistência dos provetes, esta desceu em todos os provetes ensaiados no segundo impacto. O provete que registou uma menor perda de resistência foi o 6C com 29,1 % de decréscimo. O que perdeu mais resistência foi o 6(3K//3C) com 29,1 % de diferença de força máxima aplicada entre o primeiro e segundo impacto. 6(2C2K2C) desceu 28,6%, 6(2C2V2C) registou 27,6 % e 6(2C2B2C) desceu 17,7 %.
2. Analisando o deslocamento máximo, todos os provetes registaram variações positivas, ou seja, todos aumentaram a sua quantidade de deformação em relação ao primeiro impacto no bordo. 6(2C2K2C) registou o maior deslocamento com 40,0 %, seguido de 6(2C2V2C) (36,5 %), 6(2C2B2C) (36,1 %), 6(3K//3C) (28,3 %) e 6C (22,8 %).
3. Analisando a energia absorvida em forma de dano dos provetes, esta subiu em todos os provetes ensaiados no segundo impacto menos no provete 6(2C2B2C) que registou uma variação de 15,6 % e no provete 6(3K//3C) com 45,2 % de variação. Dentro dos provetes que absorveram mais energia em relação ao primeiro impacto, o provete que teve uma menor variação de energia absorvida foi o 6(2C2V2C) com 5,2 % de variação. O que registou uma maior diferença de comportamento foi o

provete 6(3K//3C).

4. Relativamente ao tempo de contacto, todos os provetes registaram um aumento na variação do primeiro impacto central para o segundo impacto no bordo. Por ordem decrescente, o provete que registou uma maior diferença foi o 6(2C2K2C) (48,7 %), seguido de 6(2C2V2C) (43,8 %), 6(2C2B2C) (40,4 %), 6(3K//3C) (37,8 %) e 6C (28,2%).

7.2.5. Impacto em provetes de 4 camadas

Na análise de primeiro impacto na zona central dos provetes para este conjunto de materiais são apresentados os resultados para os ensaios nas amostras 4C (Figura 81), 4C// (Figura 84) e 4(2K//2C) (Figura 86). São apresentados três gráficos diferentes para cada amostra.

São apresentados, depois dos gráficos, as fotografias obtidas através da câmara de alta velocidade que mostram o deslocamento máximo que o penetrador tem em cada provete (Figura 82, Figura 83, 85 e 87). O provete 4C teve rotura no primeiro impacto na zona central.

- **4C – 4 camadas de fibra de carbono (Diâmetro 106 mm)**

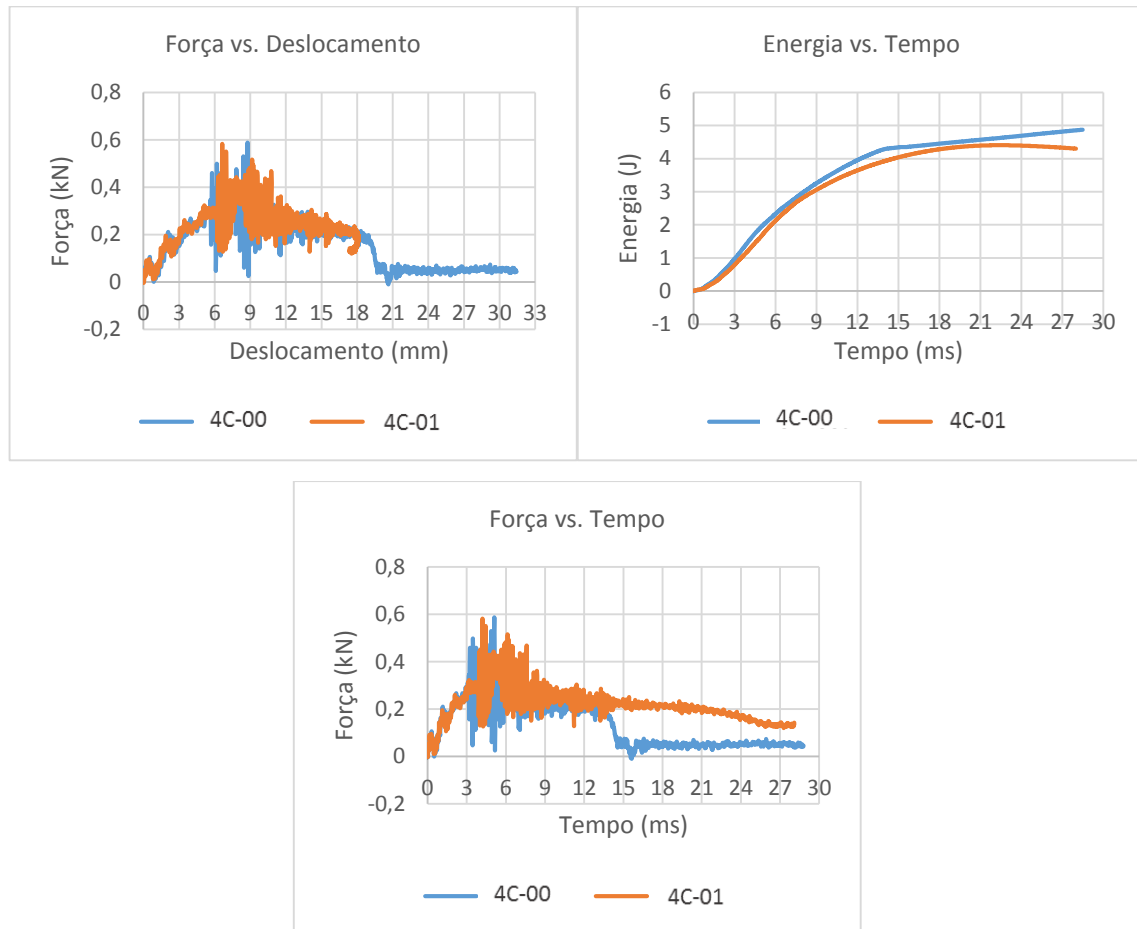


Figura 81- Conjunto de gráficos para os provetes 4C ensaiados na zona central.

Força máxima: 0,585 kN

Deslocamento máximo: 18,928 mm

Energia absorvida: 4,587 J

Energia elástica: 0,051 J

Tempo de contacto: 21,835 ms

Neste provete foi possível identificar uma rotura total logo no primeiro impacto central. Primeiro o provete atinge o seu deslocamento máximo sem fraturar (Figura 82) e logo a seguir dá-se a sua rotura completa (Figura 83).

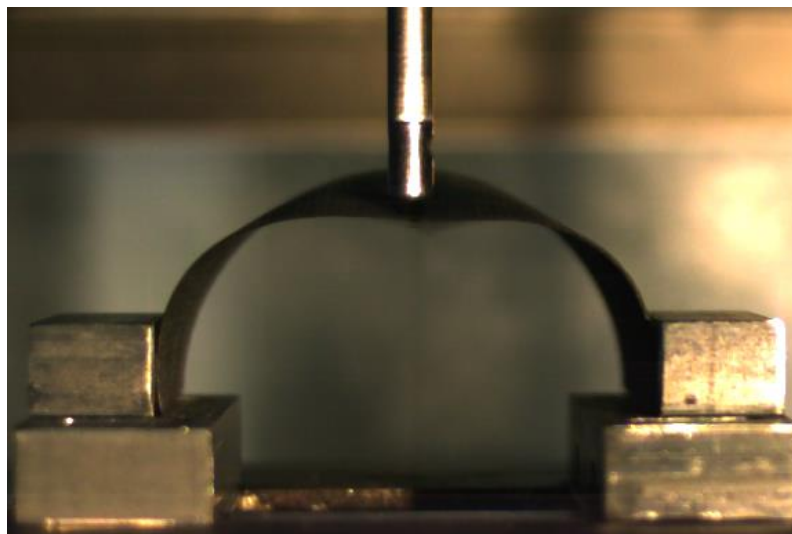


Figura 82- Fotografia no momento de deslocamento máximo antes da fratura de um provete 4C num impacto na zona central.

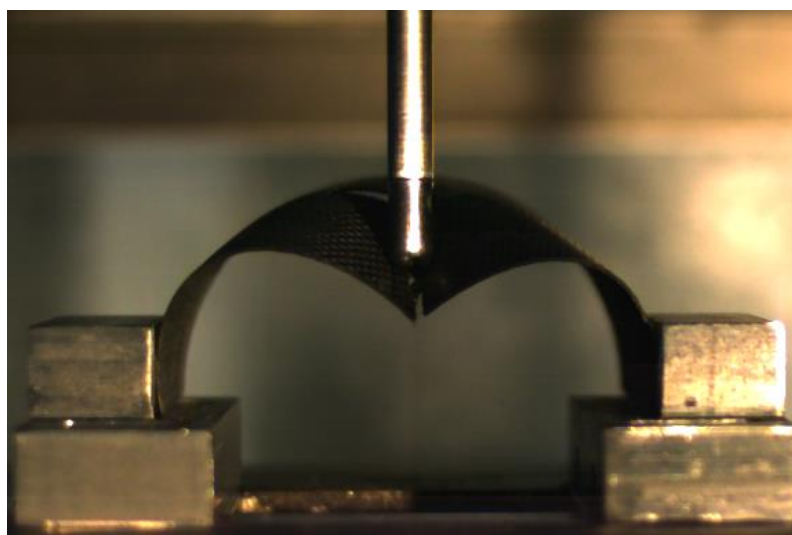


Figura 83- Fotografia no momento de rotura máxima do provete 4C num impacto na zona central.

- **4C// – 4 camadas de fibra de carbono + 1 camada de cortiça (Diâmetro 106 mm)**

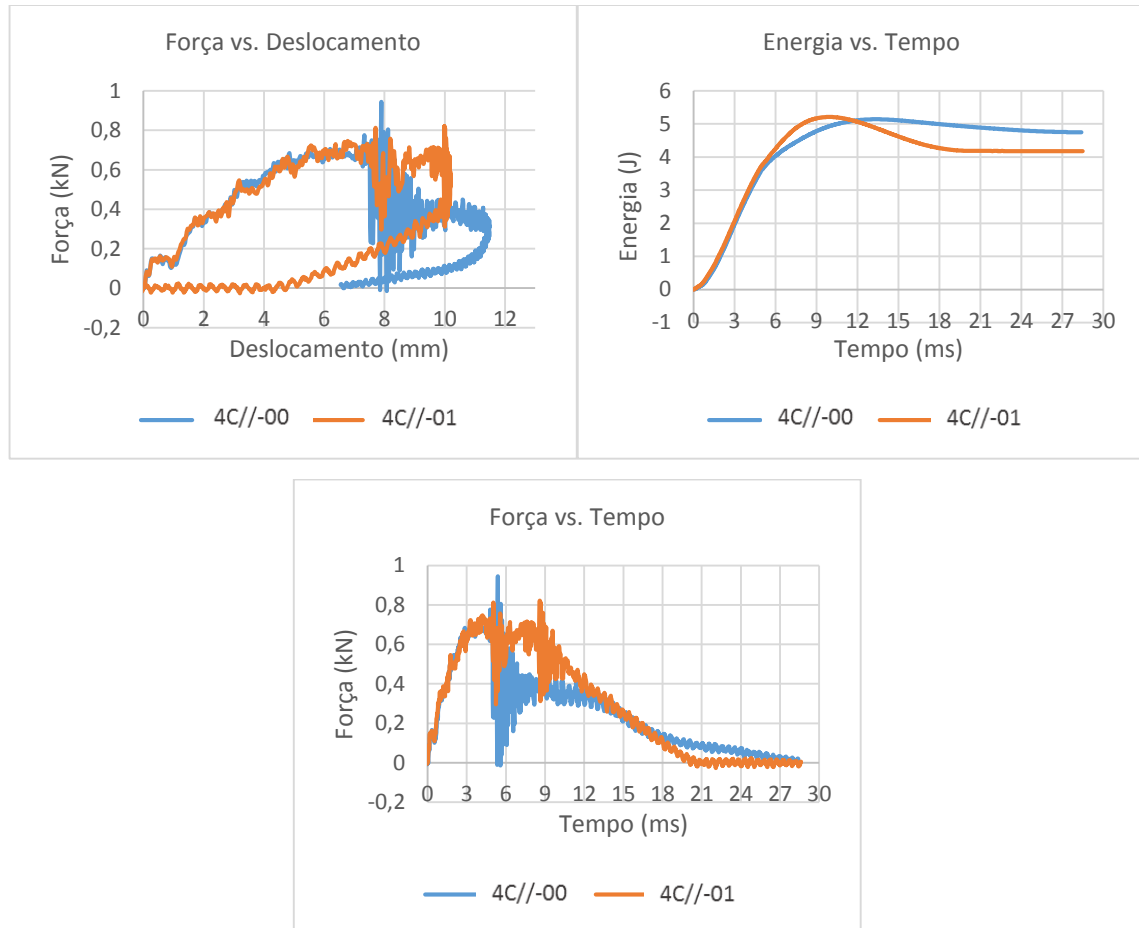


Figura 84- Conjunto de gráficos para os provetes 4C// ensaiados na zona central.

Força máxima: 0,883 kN

Deslocamento máximo: 10,733 mm

Energia absorvida: 4,464 J

Energia elástica: 0,694 J

Tempo de contacto: 23,258 ms

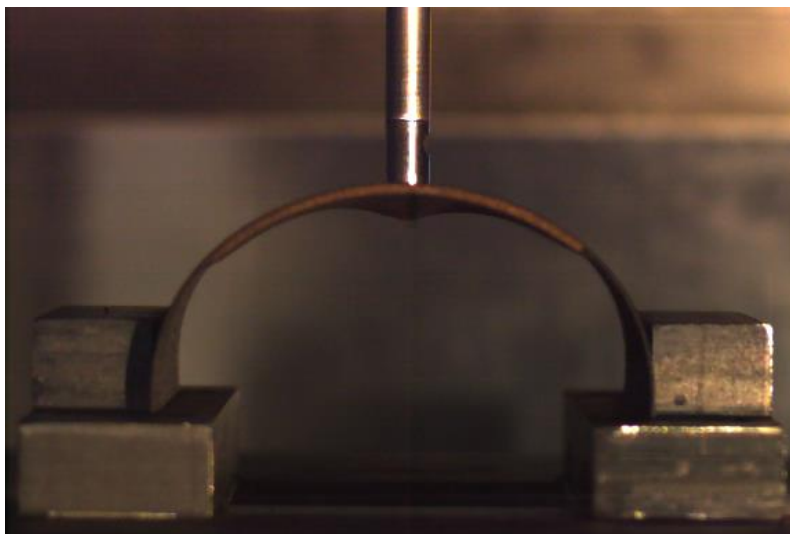


Figura 85- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 4C// num impacto na zona central.

- **4(2K//2C) – 2 camadas de kevlar + 1 camada de cortiça + 2 camadas de fibra de carbono (Diâmetro 106 mm)**

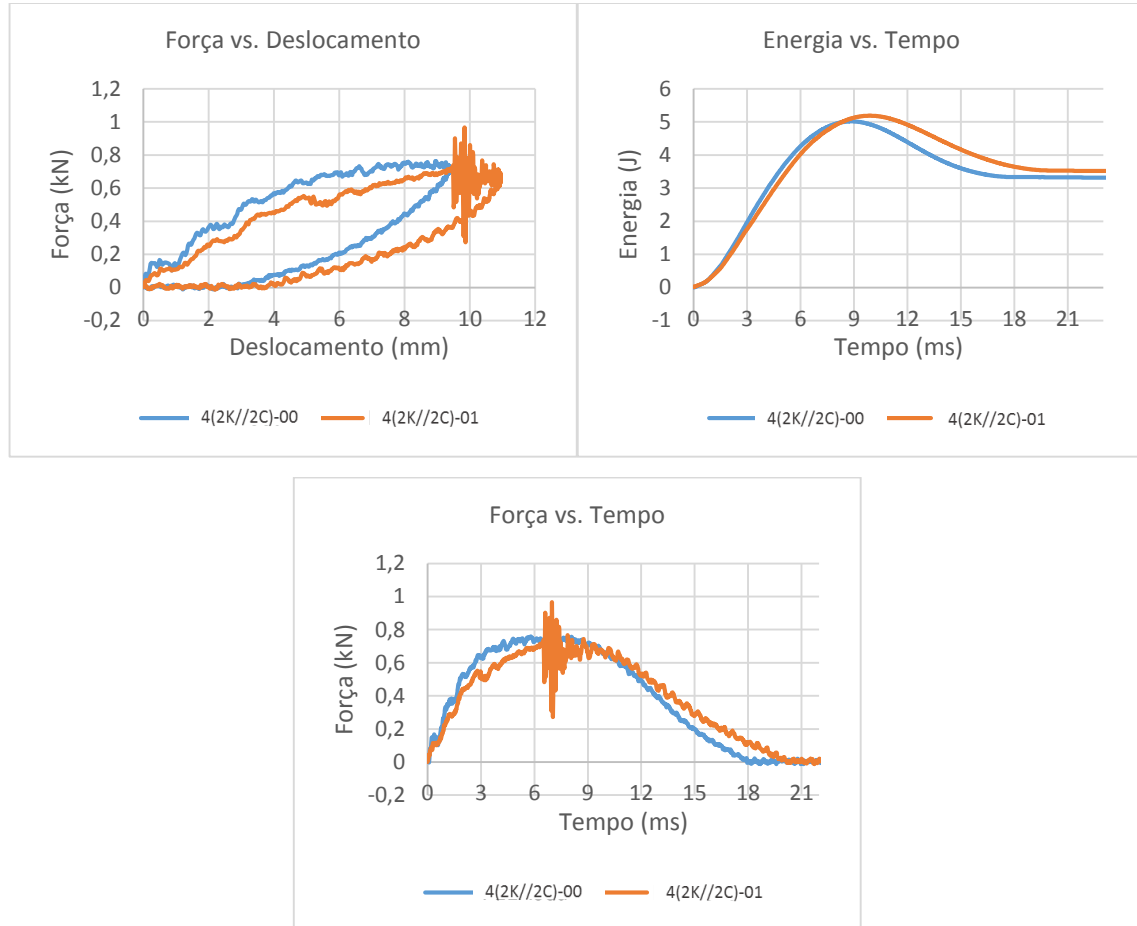


Figura 86- Conjunto de gráficos para os provetes 4(2K//2C) ensaiados na zona central.

Força máxima: 0,865 kN

Deslocamento máximo: 10,077 mm

Energia absorvida: 3,408 J

Energia elástica: 1,685 J

Tempo de contacto: 19,108 ms

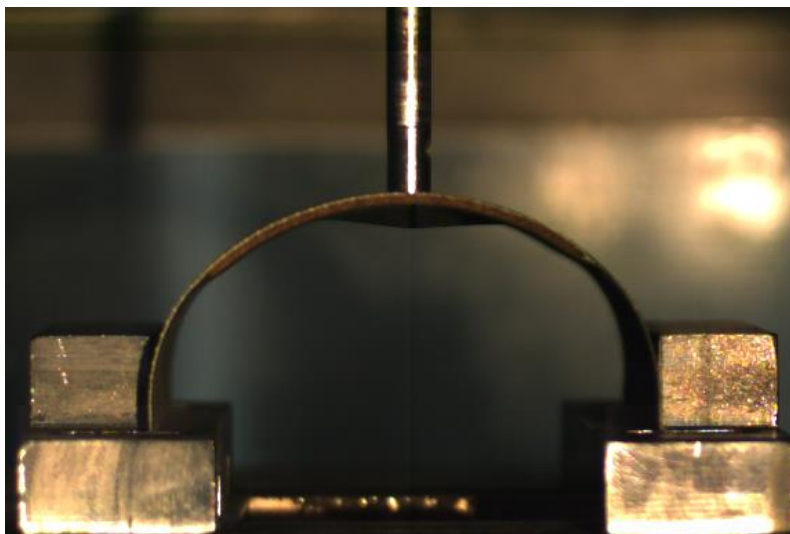


Figura 87- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 4(2K//2C) num impacto na zona central.

- **Comparação de propriedades entre provetes de 4 camadas**

Depois de obtidos todos os dados dos diferentes ensaios do conjunto de quatro camadas para um impacto central, é possível fazer uma análise mais global, comparando os resultados das várias amostras (Gráfico 28, 29 e 30), e compilando-os numa tabela (Tabela XIII).

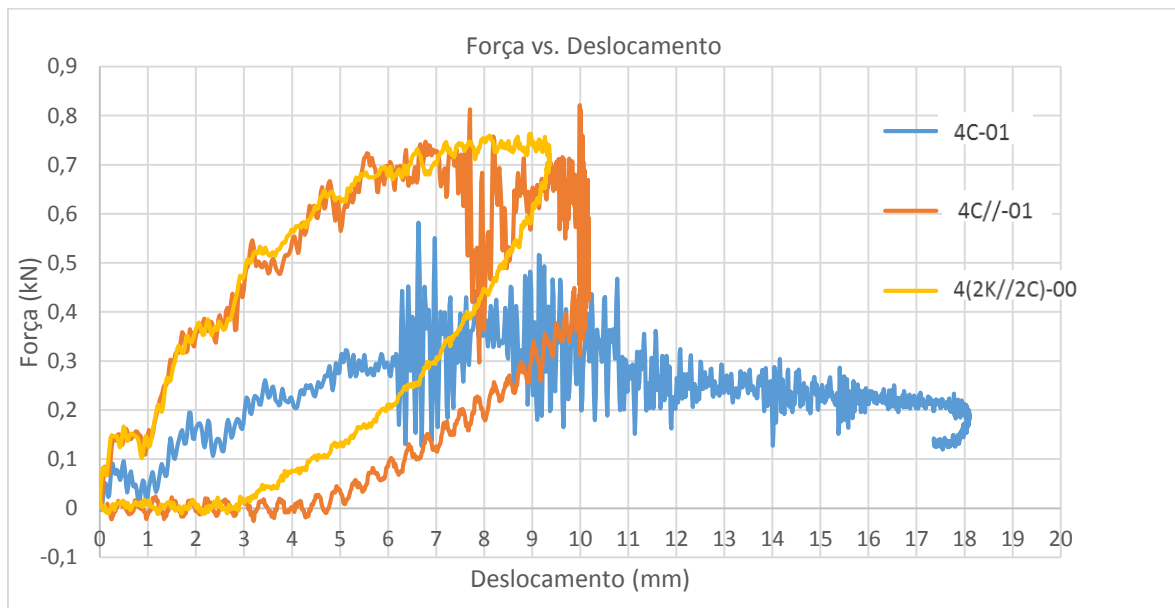


Gráfico 28- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) do impacto central dos provetes com 4 camadas.

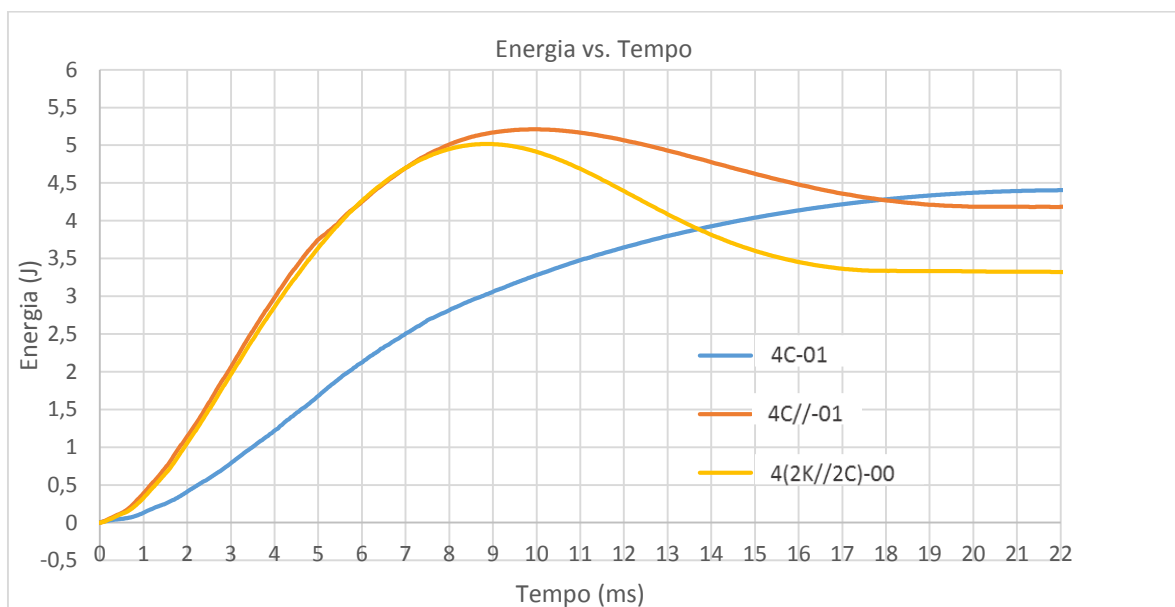


Gráfico 29- Gráfico Energia (J) x Tempo (ms) do impacto central dos provetes com 4 camadas.

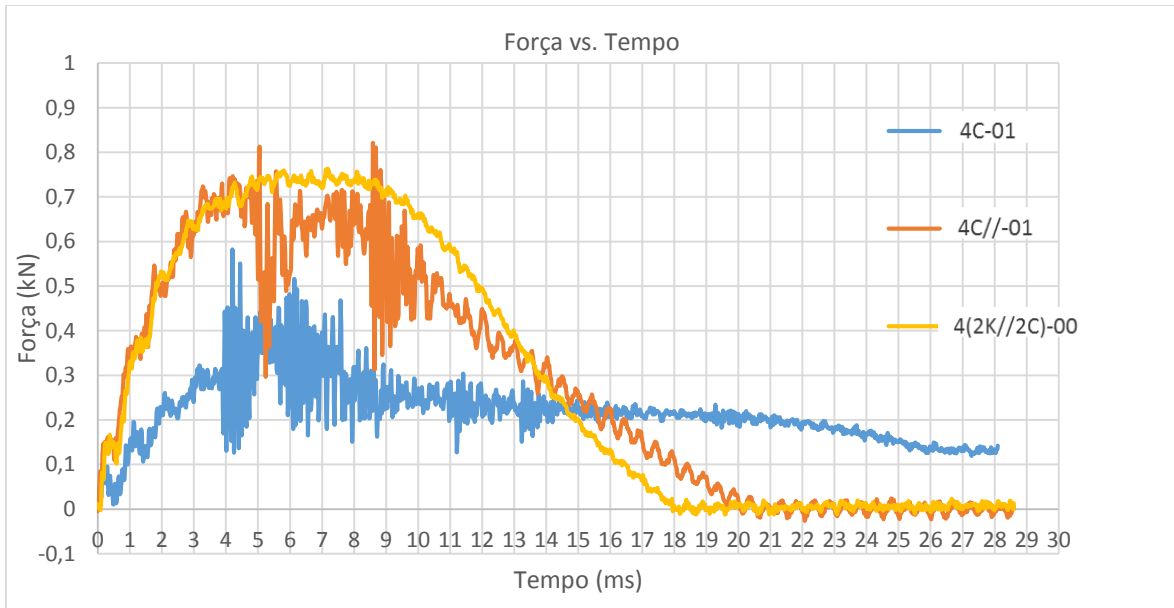


Gráfico 30- Gráfico Força (kN) x Tempo (ms) do impacto central dos provetes com 4 camadas.

Tabela XIII- Síntese das propriedades das amostras com 4 camadas no impacto central.

Propriedade	4C	4C//	4(2K//2C)
<i>Força máx. (kN)</i>	0,585	0,883	0,865
<i>Deslocamento máx. (mm)</i>	18,928	10,733	10,077
<i>Energia int. absorvida (J)</i>	4,587	4,464	3,408
<i>Energia elástica (J)</i>	0,051	0,694	1,685
<i>Tempo contacto (ms)</i>	21,835	23,258	19,108

Depois de compilar os dados obtidos na anterior tabela, é possível fazer as seguintes análises:

1. A amostra que revelou maior resistência foi a 4C//.
2. Contrariamente às oito e seis camadas, a adição cortiça (4C//) conduziu a um aumento de resistência, um aumento considerável de energia elástica, um menor deslocamento e um menor tempo de contacto em relação ao provete com apenas quatro camadas de fibra de carbono (4C). Estes fenómenos podem dever-se ao efeito geométrico da espessura entre os provetes (4C – 1,0 mm e 4C// – 2,7 mm) e não à variação das propriedades mecânicas da cortiça no material.
3. Através da observação dos gráficos e fotos verificou-se que houve fratura na peça 4C e analisando os valores obtidos, verifica-se que o nível de energia absorvida em forma de dano atingiu quase o valor de energia máxima.
4. 4C e 4C// apresentam bastante oscilação nos gráficos podendo isto ser o resultado de delaminações presentes nestes três materiais ou apenas vibração resultante da alta flexibilidade das peças (baixa resistência no sentido transversal);
5. 4(2K//2C) possui pouca oscilação, resultado mais provável da sua espessura e resistência. A sua espessura (2,8 mm) é quase igual a 4C// (2,7 mm) e 4C// apresenta alguma oscilação mostrando assim mais delaminações neste material;
6. 4(2K//2C) apresenta pouca oscilação mesmo quando a força máxima aplicada é

atingida. Ambas 4C// e 4(2K//2C) possuem quatro camadas de fibra mais uma de cortiça no plano médio. A única diferença está entre as duas primeiras camadas de kevlar à superfície de 4(2K//2C) que permitem uma maior absorção de energia elástica, menor tempo de contacto e menor deslocamento, apresentando no entanto menor resistência do que 4C//.

7.2.6. 2º impacto entre zona de impacto central e o bordo em provetes de 4 camadas

Na análise de segundo impacto na zona entre impacto central e o bordo livre dos provetes para este conjunto de materiais, são apresentados os resultados para os ensaios nas amostras 4C (Figura 88), 4C// (Figura 91) e 4(2K//2C) (Figura 93). São apresentados três gráficos diferentes para cada provete e também fotografias relativas a cada provete (Figura 89, 90, 92, 94, e 95) a ilustrar o deslocamento máximo do provete efectuado pelo penetrador. De referir que algumas amostras apresentam mais do que uma foto porque houve rotura e falha do material em todas os provetes ensaiados.

- **4C – 4 camadas de fibra de carbono (Diâmetro 106 mm)**

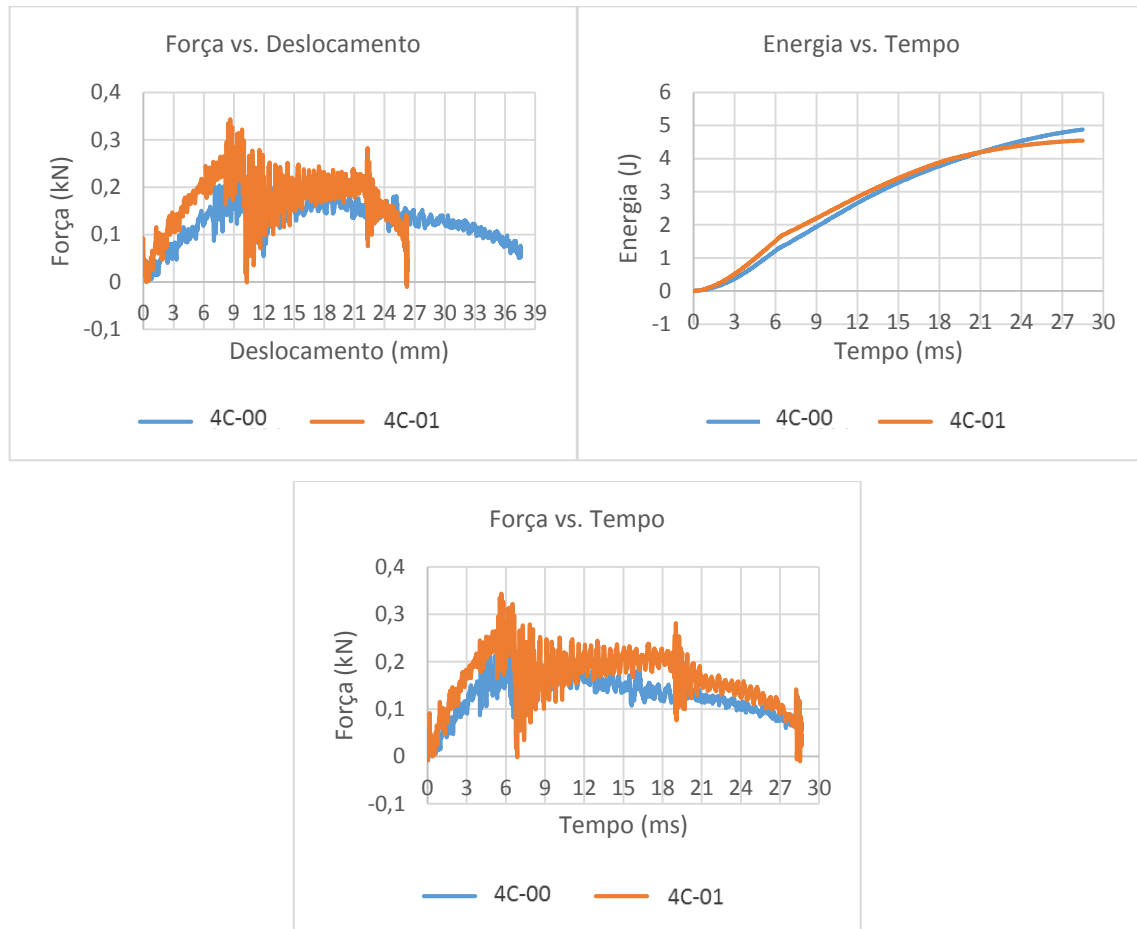


Figura 88- Conjunto de gráficos para os provetes 4C ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.

Força máxima: 0,287 kN

Deslocamento máximo: 28,065 mm

Energia absorvida: 4,948 J

Energia elástica: 0,000 J

Tempo de contacto: 28,455 ms

De seguida são apresentadas fotografias que representam o deslocamento máximo atingido pelo provete (Figura 89) e a rotura máxima atingida pelo mesmo (Figura 90).

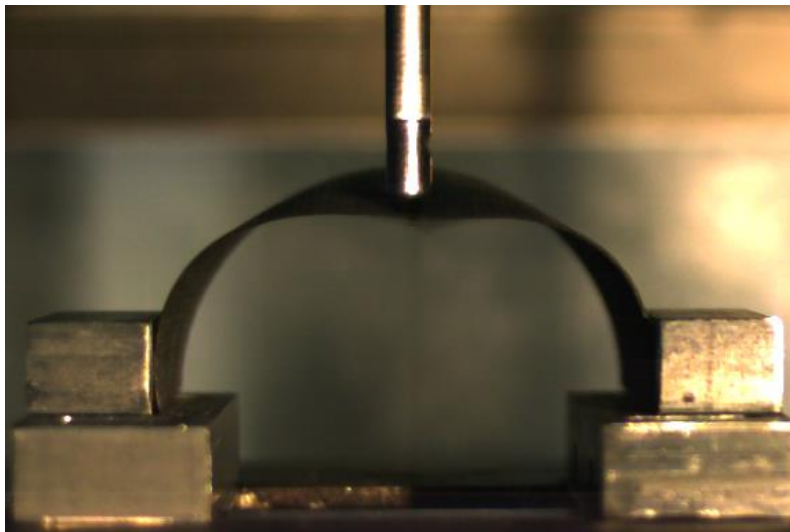


Figura 89- Fotografia no momento de deslocamento máximo antes da fratura de um provete 4C num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

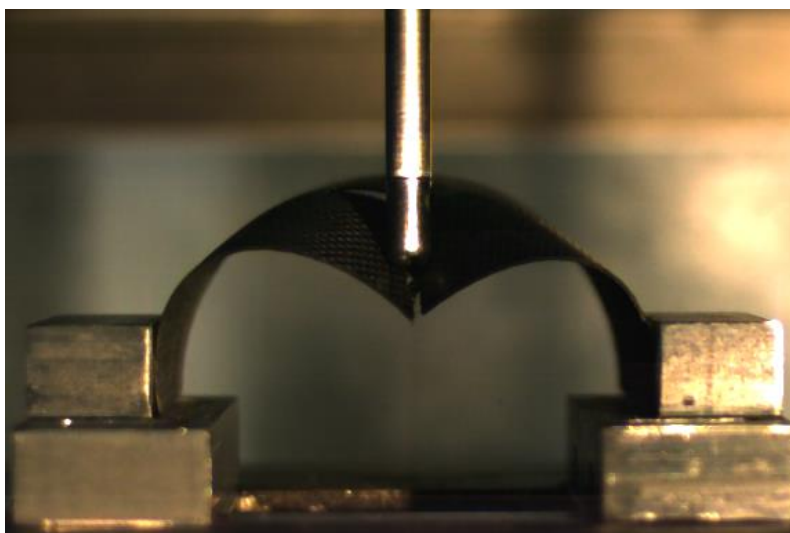


Figura 90- Fotografia no momento da fratura máxima do provete 4C num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

- **4C// – 4 camadas de fibra de carbono + 1 camada de cortiça (Diâmetro 106 mm)**

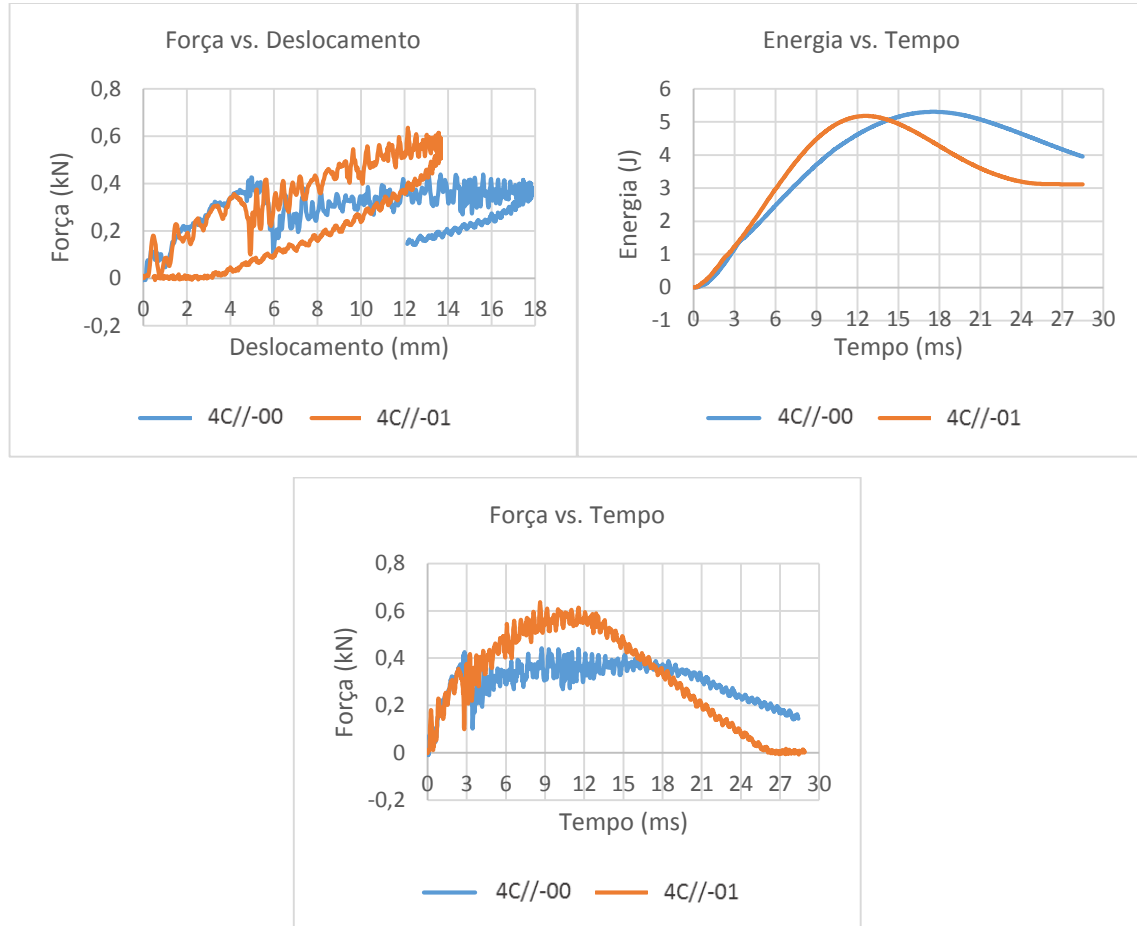


Figura 91- Conjunto de gráficos para os provetes 4C// ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.

Força máxima: 0,539 kN

Deslocamento máximo: 15,700 mm

Energia absorvida: 3,533 J

Energia elástica: 1,616 J

Tempo de contacto: 27,518 ms

A próxima fotografia mostra o ponto máximo de deslocamento do provete 4C// (Figura 92). É visível que existe dano no provete mas possivelmente a presença da cortiça evita que exista uma rotura maior ou progressão da falha.

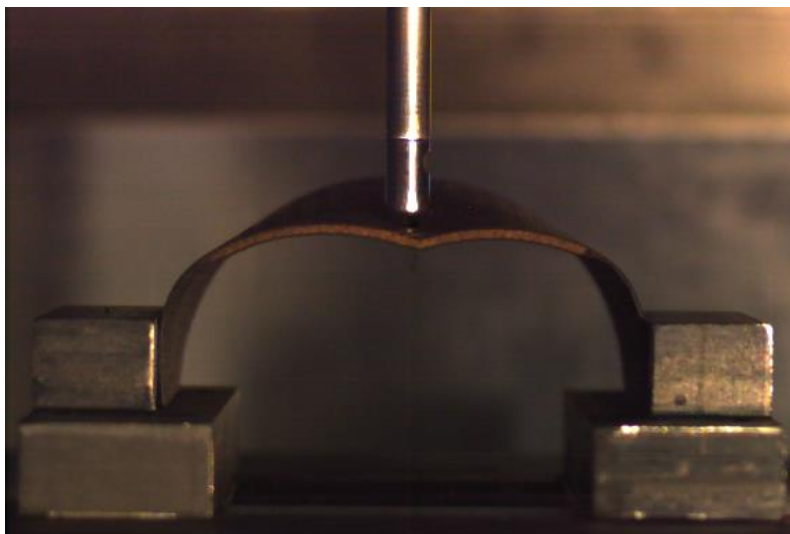


Figura 92- Fotografia no momento de deslocamento máximo de um provete 4C// num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

- **4(2K//2C) – 2 camadas de kevlar + 1 camada de cortiça + 2 camadas de fibra de carbono (Diâmetro 106 mm)**

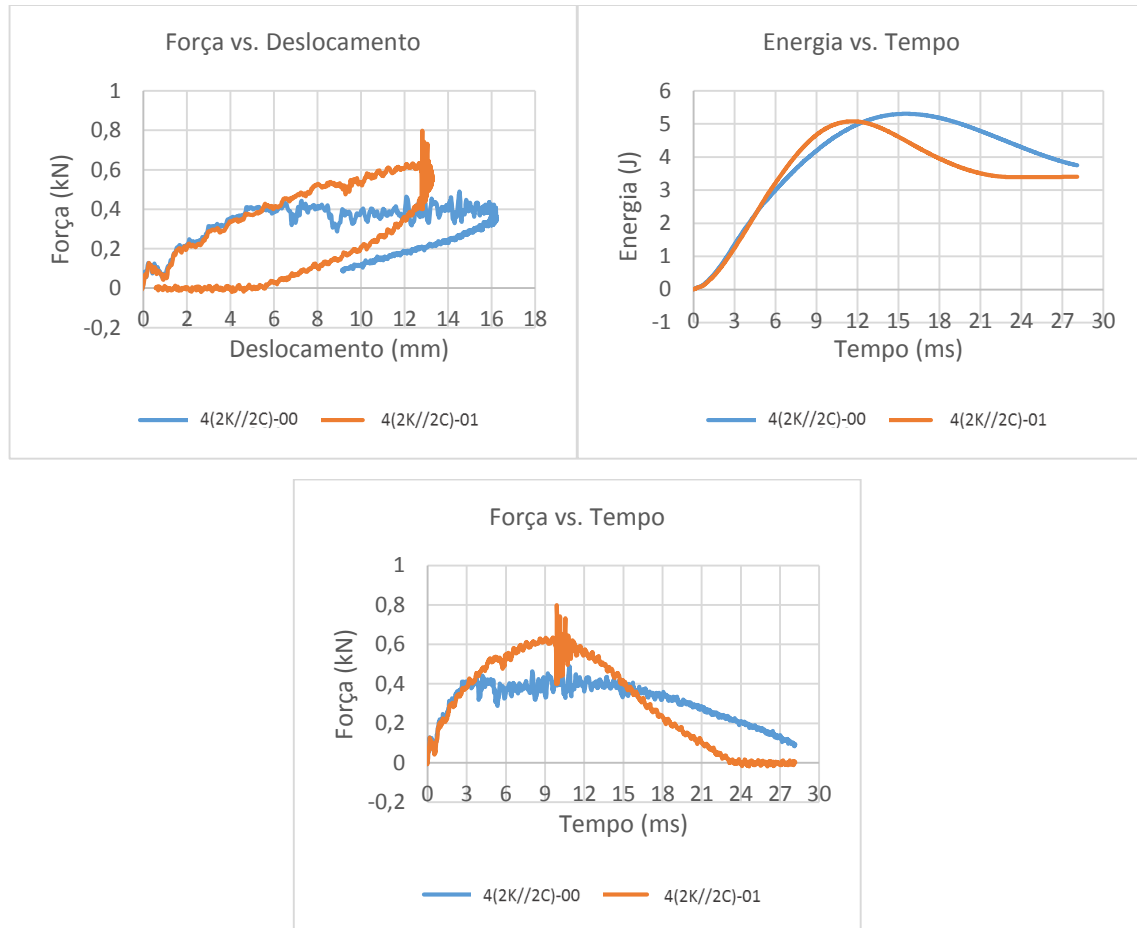


Figura 93- Conjunto de gráficos para os provetes 4(2K//2C) ensaiados na zona entre o impacto central e o bordo.

Força máxima: 0,645 kN

Deslocamento máximo: 14,569 mm

Energia absorvida: 3,575 J

Energia elástica: 1,730 J

Tempo de contacto: 26,588 ms

As fotografias seguintes mostram o deslocamento máximo do provete 4(2K//2C) antes de haver rotura do material (Figura 94). A rotura total do material surgiu através de delaminação na interface entre a cortiça e a fibra de carbono (Figura 95). Isto mostra que a interface era a zona menos resistente do material devido a talvez algum defeito instalado na

produção da amostra.

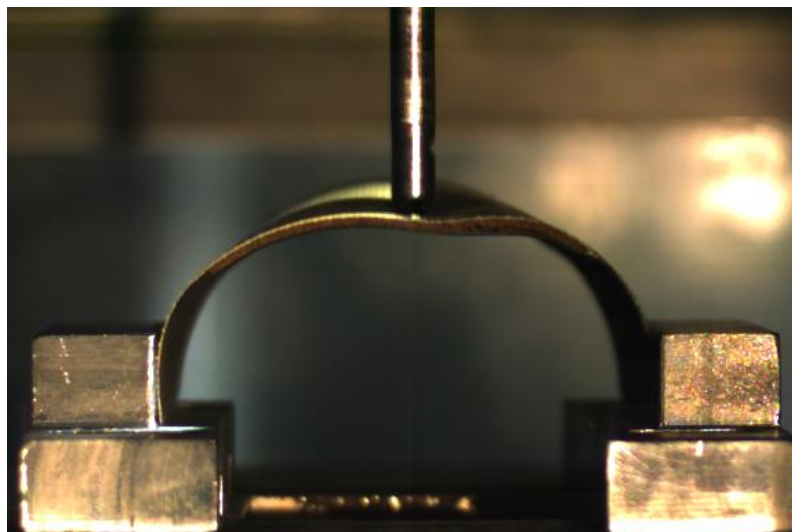


Figura 94- Fotografia no momento de deslocamento máximo antes da falha do provete 4(2K/2C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

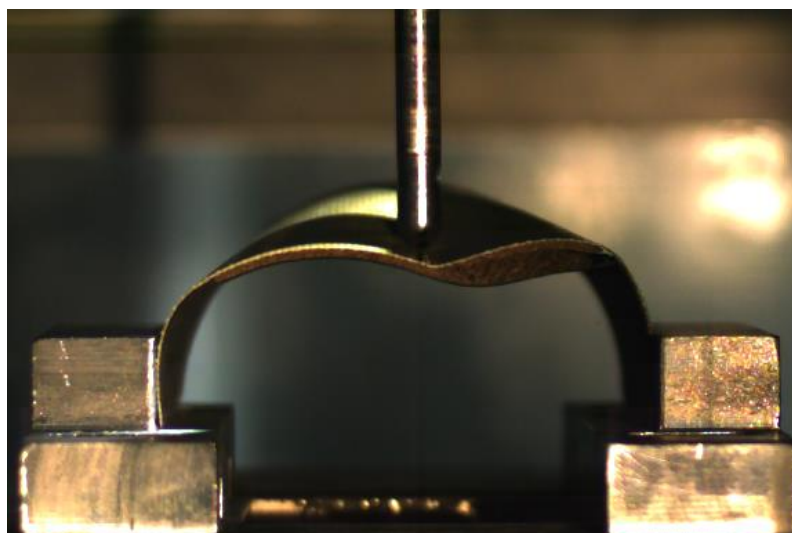


Figura 95- Fotografia no momento de falha do provete 4(2K/2C) num impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

- **Comparação de propriedades entre provetes de 4 camadas**

Depois de obtidos todos os dados dos diferentes ensaios do conjunto de seis camadas para um impacto na zona entre o impacto central e o bordo, é possível fazer uma análise mais global, comparando os resultados das várias amostras (Gráfico 31, 32 e 33), e compilando-os numa tabela (Tabela XIV).

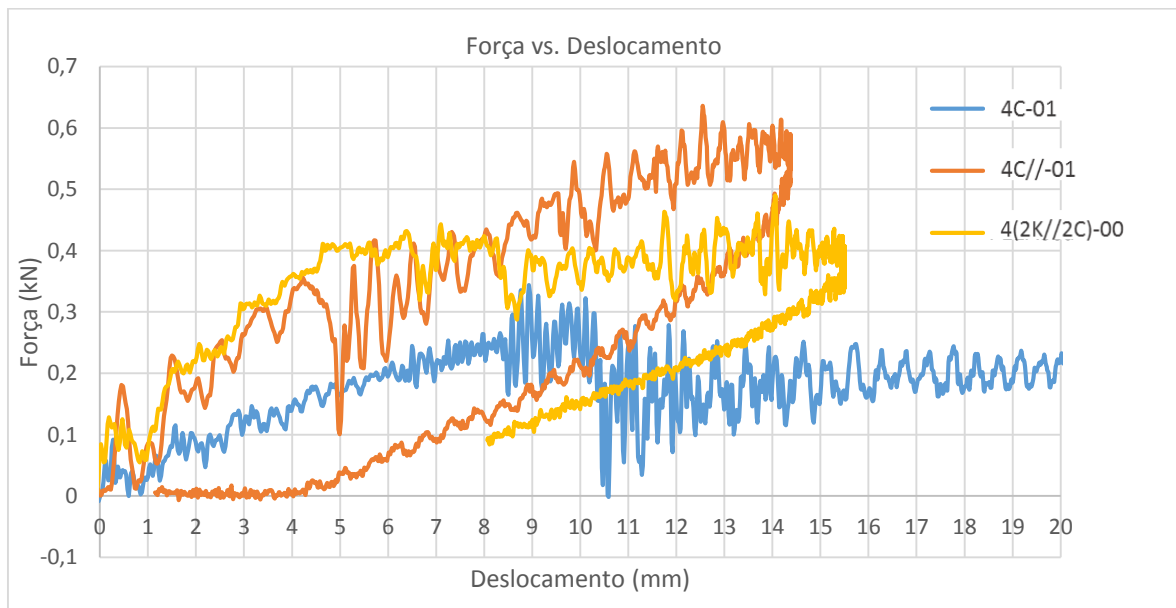


Gráfico 31- Gráfico Força (kN) x Deslocamento (mm) do impacto na zona entre o impacto central e o bordo dos provetes com 4 camadas.

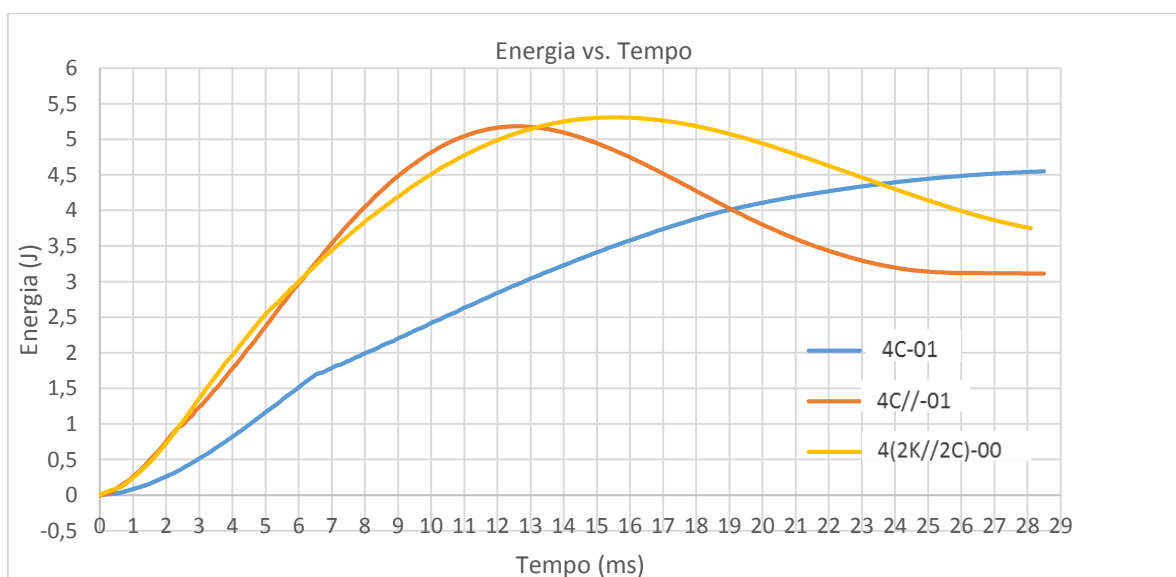


Gráfico 32- Gráfico Energia (J) x Tempo (ms) do impacto na zona entre o impacto central e o bordo dos provetes com 4

camadas.

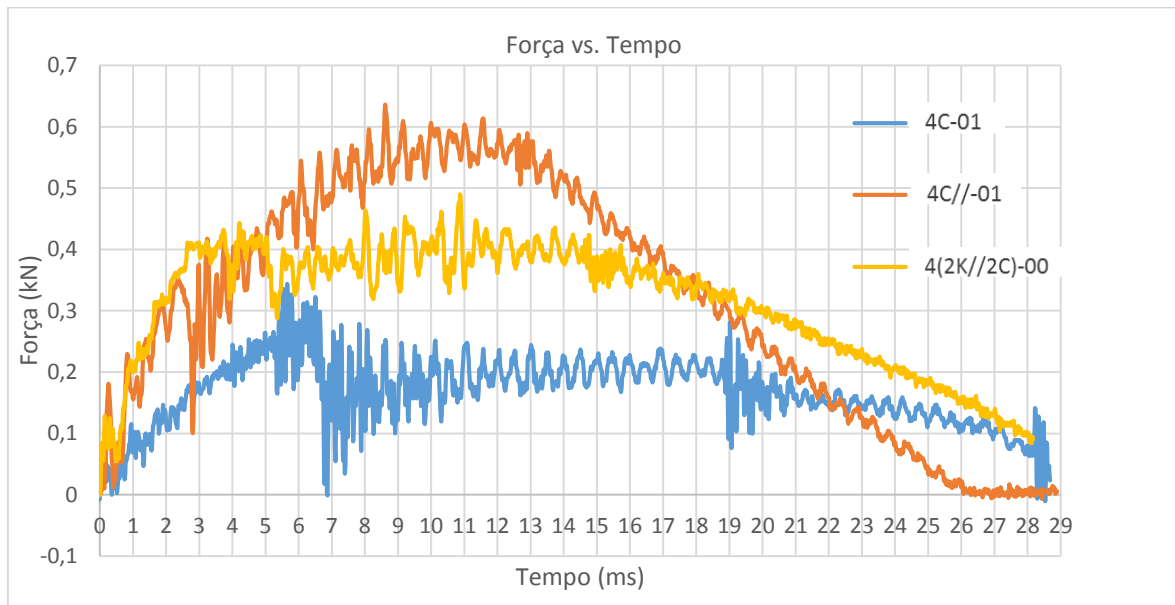


Gráfico 33- Gráfico Força (kN) x Tempo (ms) do impacto na zona entre o impacto central e o bordo dos provetes com 4 camadas.

Tabela XIV- Comparação das propriedades das amostras com 4 camadas no impacto central e no 2º impacto na zona entre o impacto central e o bordo.

Propriedade	4C	4C	4C//	4C//	4(2K//2C)	4(2K//2C)
	A	B	A	B	A	B
Força máx. (kN)	0,585	0,287	0,883	0,539	0,865	0,645
Deslocamento máx. (mm)	18,928	28,065	10,733	15,700	10,077	14,569
Energia int. absorvida (J)	4,587	4,948	4,464	3,533	3,408	3,575
Energia elástica (J)	0,051	0	0,694	1,616	1,685	1,730
Tempo contacto (ms)	21,835	28,455	23,258	27,518	19,108	26,588

1. Em relação à resistência dos provetes, esta desceu em todos os provetes ensaiados no segundo impacto. O provete que registou uma menor perda de resistência foi o 4(2K//2C) com 25,5 % de decréscimo. O que perdeu mais resistência foi o 4C com 50,9 % de diferença de força máxima aplicada entre o primeiro e segundo impacto.

- 4C// desceu 39,0 %.
2. Analisando o deslocamento máximo, todos os provetes registaram variações positivas, ou seja, todos aumentaram a sua quantidade de deformação em relação ao primeiro impacto no bordo. 4C registou o maior deslocamento com 48,6 %, seguido de, 4C// (46,2 %) e 4(2K//4C) (25,4 %).
 3. Analisando a energia absorvida em forma de dano dos provetes, esta subiu em todos os provetes ensaiados no segundo impacto menos no provete 4C// que registou uma variação de 20,9 %. O provete que teve uma menor variação de energia absorvida foi o 4(2K//2C) com 4,9 % de variação.
 4. Em relação à energia dissipada pelo provete, no provete 4C// ocorreu um aumento de energia do primeiro para o segundo impacto (133,0 %). 4C uma variação muito baixa porque no primeiro impacto o provete quase fraturou completamente, ou seja, 4C entrou em rotura completa absorvendo toda a energia disponível em forma de dano e não conseguindo dissipar nenhuma quantidade. 4(2K//2C) registou uma variação de 2,8 %.
 5. Relativamente ao tempo de contacto, todos os provetes registaram um aumento na variação do primeiro impacto central para o segundo impacto no bordo. Por ordem decrescente, o provete que registou uma maior diferença foi o 4(2K//2C) (39,3 %), seguido de 4C (30,2 %) e 4C// (18,2%).

7.2.7. Resumo das propriedades mecânicas dos materiais ensaiados

Para fazer uma análise às diferentes propriedades dos diferentes materiais elaborou-se uma tabela que possui os valores obtidos para os ensaios de primeiro impacto na zona central das amostras (Tabela XV).

Tabela XV- Síntese das propriedades das amostras ensaiadas através do impacto na zona central.

Amostra/ Propriedade	Nº Camadas	$F_{máx}$ (kN)	$l_{máx}$ (mm)	$E_{abs}(J)$	$E_{el}(J)$	$t_{máx}$	Espessura (mm)
8C	8	1,956	4,208	3,820	1,340	7,305	2,6
8C//		1,759	4,514	3,399	1,535	8,468	4,3
8(4K//4C)		1,654	5,033	3,003	1,946	8,267	4,1
6(2C2K2C)	6	0,941	8,676	2,740	2,347	15,485	1,4
6(2C2V2C)		0,987	9,887	3,482	1,657	18,748	1,2
6(2C2B2C)		0,774	10,547	3,965	1,295	18,495	1,3
6C		0,913	7,683	3,267	1,752	15,116	1,5
6(3K//3C)		1,204	7,475	3,234	1,868	12,918	3,4
4C	4	0,585	18,928	4,587	0,051	21,835	1,0
4C//		0,883	10,733	4,464	0,694	23,258	2,7
4(2K//2C)		0,865	10,077	3,408	1,685	19,108	2,8

Legenda:

Provete – Constituição apenas por fibra de carbono;

Provete – Constituição por fibra de carbono + cortiça;

Provete – Constituição por fibra de carbono + cortiça + kevlar;

Provete – Apenas um provete com a dada constituição (material).

Analisando a tabela, e tendo em conta os primeiros e segundos impactos para os diferentes conjuntos de materiais apresentados anteriormente, é possível fazer algumas análises.

1. É possível verificar também que todos os provetes que possuem apenas fibra de

carbono na sua constituição absorvem bastante energia em forma de dano dissipando apenas uma pequena parte.

2. Verificando os provetes que apenas possuem fibra de carbono, quanto maior o número de camadas, maior a sua resistência, maior a quantidade de energia absorvida em forma de dano, menor o deslocamento e menor o tempo de contacto.
3. A adição de cortiça nos provetes com apenas fibra de carbono faz diminuir a sua resistência, no entanto a energia elástica aumenta, o deslocamento aumenta e o tempo de contacto também aumenta.
4. A substituição das primeiras camadas de fibra de carbono por camadas de kevlar nos provetes 4(2K//2C), 6(3K//3C) e 8(4K//4C) não revelou exercer grandes diferenças no comportamento dos provetes com mesmo número de camadas de carbono, apenas existindo uma pequena redução nos tempos de contacto.
5. Analisando o conjunto dos materiais com oito camadas com a mesma geometria, é possível verificar que não existem grandes diferenças em termos de deslocamento e tempos de contacto. Em termos de resistência 8C possui alguma diferença em relação aos outros materiais, no entanto 8(4K//4C) apresenta uma dissipação de energia muito superior aos restantes materiais.
6. Analisando o conjunto dos materiais com seis camadas, tirando 6(2C2B2C), é possível verificar que não existem grandes diferenças em termos de resistência. Em termos de deslocamento 6C e 6(3K//3C) possuem os deslocamentos mais baixos, estando 6(2C2K2C) e 6(2C2V2C) num nível intermédio. O mesmo se passa com o tempo de contacto. Relativamente à energia dissipada, 6(2C2K2C) e 6(2C2V2C) apresentam os valores mais altos.
7. Analisando o conjunto dos materiais com quatro camadas, verifica-se que todos os provetes apresentam resistências baixas. O tempo de contacto de 4C é bastante alto mas isto acontece porque fraturou durante o ensaio.

Além das propriedades mecânicas, também é necessário ter em conta os custos de produção das caneleiras para verificar se pequenas diferenças em termos de propriedades justificam aumentos de custos (Gráfico 34). Estes custos reflectem apenas o custo do tipo de fibra utilizada e a quantidade. O outro material inerente ao processo é igual para todos os provetes.

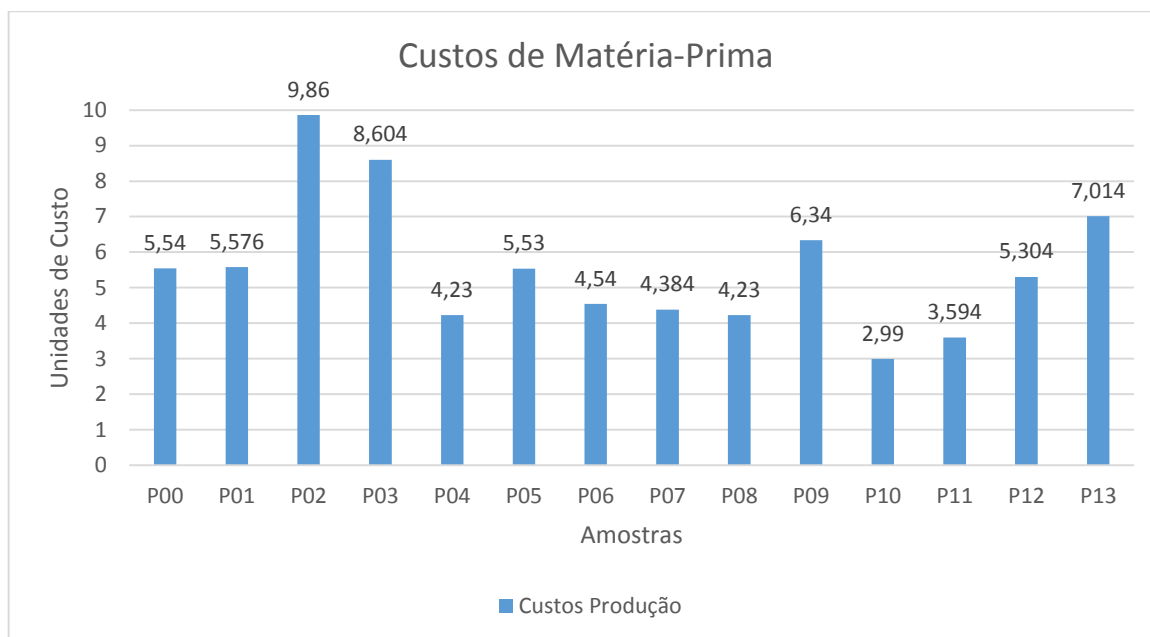


Gráfico 34- Custos da matéria-prima para produção das respectivas amostras com 300 mm de comprimento.

7.3. Comparação de Ensaios de Compressão Quasi-Estáticos e Ensaios no Impacto

Depois de realizar os ensaios de compressão quasi-estáticos e ensaios de impacto é possível comparar as resistências para os mesmos materiais através dos valores de força máxima alcançada por cada material em cada ensaio. Os dados para esta análise encontram-se compilados numa tabela (Tabela XVI).

Tabela XVI- Comparação das forças máximas de cada material em cada ensaio.

Amostra/ Propriedade	Nº Camadas	Ens. Compressão Quasi-Estático	Ens. Impacto	Variação (%)
		$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	
8C	8	1,800	1,956	8,000
8C//		1,476	1,759	16,090
8(4K//4C)		1,623	1,654	1,874
6(2C2K2C)	6	1,337	0,941	-42,080
6(2C2V2C)		0,722	0,987	26,850
6(2C2B2C)		0,680	0,774	12,150
6C		0,873	0,913	4,400
6(3K//3C)		1,304	1,204	-8,310
4C	4	0,533	0,585	8,900
4C//		0,733	0,883	17,000
4(2K//2C)		0,792	0,865	8,500

Depois de apresentada a tabela é possível fazer as seguintes análises:

1. De uma forma geral verifica-se que a resistência das amostras aumenta nos ensaios de impacto relativamente aos ensaios de compressão. As únicas amostras onde isto não se verifica são a 6(2C2K2C) (-42,1 %) e 6(3K//3C) (-8,1 %), havendo uma diminuição de resistência no impacto.
2. Verifica-se também que não existe uma grande variação de resistência das amostras entre os dois ensaios. O único caso onde isto não acontece, e verifica-se alguma diferença considerável é na amostra 6(2C2K2C) (-42,1 %).
3. Relativamente às amostras com 8 camadas, a 8C é a mais resistente nos dois ensaios (1,800 kN para compressão e 1,956 kN para impacto). Já a 8C// (1,759 kN), no impacto é mais resistente do que a 8(4K//4C) (1,654 kN), fenómeno inverso do que se verificava na compressão.
4. No grupo de amostras de 6 camadas, 6(2C2K2C) (1,337 kN) é a mais resistente nos ensaios de compressão mas nos ensaios de impacto a amostra com maior resistência é a 6(3K//3C) (1,204 kN). A amostra com menos resistência nos dois tipos de ensaios é a 6(2C2B2C) (0,680 kN para compressão e 0,774 kN para impacto).

5. No grupo de amostras de 4 camadas, 4(2K//2C) (0,792 kN) é a mais resistente nos ensaios de compressão mas nos ensaios de impacto a amostra com maior resistência é a 4C// (0,883 kN). A amostra com menos resistência nos dois tipos de ensaios é a 4C (0,533 kN para compressão e 0,585 kN para impacto).

7.4. Selecção de Materiais

Para haver um processo de selecção do melhor material a utilizar é necessário haver um compromisso entre as quatro propriedades analisadas neste trabalho (resistência, deslocamento, energia elástica e tempo de contacto) e o custo do material.

Para existir uma coerência na escolha do melhor material foi elaborada uma folha de cálculo (Figura 96) que possibilita a introdução do peso que cada propriedade vai ter na escolha final.

	Resistência máxima	Deslocamento máximo		max F/d	Custo	Min. Custo	Peso	Min. Peso	Energia absorvida	Min. Energia		
				0,465		3,594		20,500		2,740		
				w		w		w		w		Pontuação final
Amostra	Fmáx (kN)	dmáx(mm)	F/dmáx (kN/mm)	0,2	(€)	0,4	(g)	0,1	Energia Dano (J)	0,3	1,00	Classificação
8C	1,956	4,208	0,465	1,00	9,86	0,36	58,06	0,35	3,82	0,72		0,60
8C//	1,759	4,514	0,390	0,84	8,604	0,42	56,99	0,36	3,399	0,81		0,61
8(4K//4C)	1,654	5,033	0,329	0,71	7,014	0,51	55,55	0,37	3,003	0,91		0,66
6(2C2K2C)	0,941	8,676	0,108	0,23	5,53	0,65	30,64	0,67	2,74	1,00		0,67 2
6(2C2V2C)	0,987	9,887	0,100	0,21	4,54	0,79	30,39	0,67	3,482	0,79		0,66 3
6(2C2B2C)	0,774	10,547	0,073	0,16	4,23	0,85	28,18	0,73	3,965	0,69		0,65
6C	0,913	7,683	0,119	0,26	6,34	0,57	37,88	0,54	3,267	0,84		0,58
6(3K//3C)	1,204	7,475	0,161	0,35	5,304	0,68	36,80	0,56	3,2340	0,85		0,65
4C	0,585	18,928	0,031	0,07	4,23	0,85	20,50	1,00	4,587	0,60		0,63
4(2C//2C)	0,883	10,733	0,082	0,18	4,384	0,82	28,20	0,73	4,464	0,61		0,62
4(2K//2C)	0,865	10,077	0,086	0,18	3,594	1,00	30,63	0,67	3,408	0,80		0,75 1
					%w F/d	%w custo	%w peso	%w energia				
			Perfil de consumidor									
			Atleta profissional		0,7	0,05	0,15	0,1	8C, 8C//, 8(4K//4C)			
			Atleta amador		0,5	0,2	0,1	0,2	8C, 8C//, 8(4K//4C)			
			Atleta ocasional		0,2	0,4	0,1	0,3	4(2K//2C), 6(2C2K2C), 6(2C2V2C)			
			colocar aqui valores		Perfil a escolher	0,2	0,4	0,1	0,3			

Figura 96- Folha de cálculo de selecção do melhor material a utilizar.

A folha de cálculo foi construída tendo em conta que para todos os materiais, o objectivo seria ter a maior resistência para o menor deslocamento. Para além deste, os outros factores que entram na selecção do material são o custo, o peso do material e a menor quantidade de energia absorvida. Atribuindo diferentes pesos em termos percentuais a cada propriedade, é dada no final a classificação dos melhores materiais a utilizar.

Para facilitar o preenchimento da folha são apresentados três perfis (atleta profissional, atleta amador e atleta ocasional) e para cada perfil, diferentes pesos das propriedades são estabelecidos.

Para um atleta ocasional é possível verificar que os três melhores materiais são 4(2K//2C), 6(2C2K2C) e 6(2C2V2C).

7.5. Comparação do Material com a Literatura

Fazendo uma comparação das propriedades das amostras criadas neste trabalho com as amostras de determinados estudos científicos é possível verificar quais são as mais resistentes e se os níveis de energia são similares. Estas informações encontram-se compiladas num gráfico (Gráfico 35).

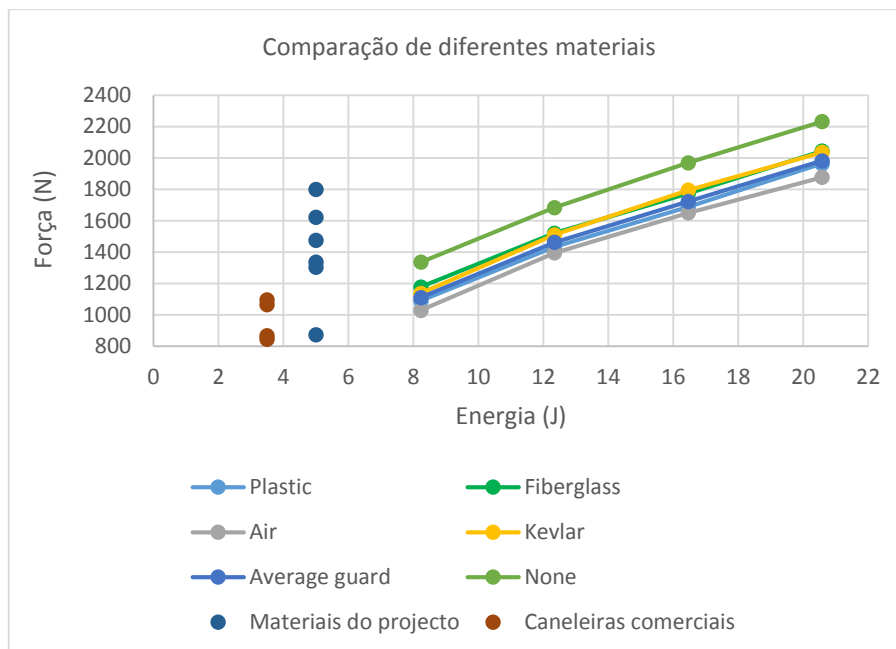


Gráfico 35- Comparação das amostras com outras referências na literatura.

Francisco, C. et al, realizaram ensaios de impacto em amostras de vários materiais (plástico, fibra de vidro, kevlar, etc.) para quatro níveis de energia diferentes [12]. Para cada material existe então uma curva de comportamento composta por quatro pontos. Estas curvas são aquelas que se encontram no gráfico anterior.

Ankrah, S. e Mills, N.J., realizaram ensaios de impacto em caneleiras disponíveis comercialmente (Adidas, Nike e Umbro) sempre com a energia de 3,5 J [8]. Estes valores estão representados no gráfico anterior através dos pontos a vermelho escuro.

Os resultados dos ensaios de impacto também estão colocados no gráfico. Para o

nível de energia de 5 J foram colocados os valores de força máxima atingida para cada material. Estes pontos estão representados no gráfico anterior através de pontos azuis escuro.

Se fossem adicionadas linhas de tendência no trabalho de *Francisco, C. et al.*, e essas linhas cruzassem os níveis de energia de 5 J e 3,5 J, seria possível verificar que, em termos de resistência, os melhores materiais para a construção de uma caneleira seriam os materiais deste trabalho, as caneleiras já comercializadas e os materiais ensaiados por *Francisco, C. et al.*

8. PRODUÇÃO DO PROTÓTIPO

Depois de ensaiar vários materiais, o próximo passo foi o desenvolvimento de um protótipo de uma caneleira e para isso foi necessário escolher o tipo de material a utilizar, escolher um processo para produzir as caneleiras, um processo para produzir um molde e ainda um processo de acabamento da superfície exterior da peça.

A escolha do material a utilizar, em termos de produção, recaiu sobre o provete 6(2C2K2C), que é um conjunto de quatro camadas de fibra de carbono, estando no meio destas, duas camadas de kevlar, ou seja no total, seis camadas de fibra. A escolha do material nesta fase do desenvolvimento do protótipo não era o aspecto mais importante porque o mais importante seria definir um baixo custo de processo e também identificar um processo simples de produção.

Para a produção do protótipo foi necessário realizar algumas alterações relativamente ao processo utilizado na produção dos provetes, mais concretamente na construção de um molde. Desta forma foi utilizado gesso em gaze como molde (com a forma da perna retirada anteriormente) (Figura 97).



Figura 97- Molde de uma perna com gaze engessada.

Depois de ter o molde, passou-se cera desmoldante na sua superfície e de seguida laminou-se as duas camadas de fibra de carbono, duas camadas de kevlar e finalmente as últimas duas camadas de fibra de carbono. Entre cada camada ia sendo adicionada a resina com o catalisador já misturado.

Depois de vinte e quatro horas de cura à temperatura ambiente mais oito horas na mufla a 60°C, procedeu-se à desmoldação da peça e do molde (Figura 98).



Figura 98- Peça em bruto desmoldada e molde após a desmoldação.

Para um melhor acabamento, é possível a aplicação de gel-coat que confere ao material um acabamento brilhante e superfície lisa (Figura 99).



Figura 99- Peça com gel-.coat aplicado.

Depois de efectuar o corte é possível ficar com a caneleira com um acabamento de fibra de carbono brilhante (Figura 100) ou com uma caneleira personalizada aplicando a imagem pretendida (Figura 101).



Figura 100- Caneleira com acabamento liso, brilhante e fundo com a aparência de fibra de carbono.



Figura 101- Caneleira com imagem colocada sobre superfície acabada.

9. CONCLUSÃO

É possível retirar várias conclusões relativamente aos resultados obtidos e suas análises mas também ao processo de produção de provetes, materiais utilizados e o seu papel no comportamento dos provetes.

1. O processo mais fácil para a criação de provetes deste tipo é a infusão. Como a peça é simétrica, é fácil de fazer a resina chegar a todos os pontos e também demonstra ser uma técnica limpa, não causando muita sujidade e limitando ao mínimo o contacto com a resina;
2. É necessário ter em atenção o aspecto da produção de peças e provetes pois um processo que não assegure uma boa homogeneidade de peças/ provetes pode comprometer os resultados, como foi o caso das peças 8C82 e 8C//82;
3. Na fase final vê-se que o processo inicial de produção não estava consolidado, pois os valores obtidos dos ensaios para provetes iguais aproximam-se bastante podendo dizer-se que têm um comportamento quase igual como se pode observar pela sobreposição de alguns gráficos dos últimos provetes produzidos;
4. A adição de kevlar faz aumentar o tempo de contacto entre o penetrador e a amostra;
5. Materiais com apenas fibra de carbono na sua constituição, absorvem grande parte da energia em forma de dano;
6. De uma forma geral, a adição de cortiça diminui um pouco a resistência do material, aumenta a sua deformação em forma de deslocamento, aumenta o tempo de contacto e também a energia elástica dissipada;
7. Para estes níveis de energia, a energia elástica dissipada teve um grande peso na escolha do material para utilizar nas caneleiras pois o objectivo passa por ter um produto que dure durante algum tempo com o menor dano possível, para estes níveis de energia.
8. Como se pode verificar, em todos os provetes houve queda de resistência no segundo impacto. Possivelmente o dano provocado pelo primeiro impacto foi suficiente para mudar as propriedades do material na zona do 2º impacto.
9. Tendo em conta o capítulo 6.5., o objectivo deste trabalho foi atingido, ou seja, em termos de propriedades de materiais foi possível criar um material compósito com melhores propriedades mecânicas do que as caneleiras que estão disponíveis

comercialmente.

10. Mediante a escolha e o peso das diferentes propriedades, chegou-se à conclusão que para um atleta que pratique desporto ocasionalmente, os três melhores materiais para a construção de uma caneleira são 4(2K//2C), 6(2C2K2C) e 6(2C2V2C).

10. SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Na área de compósitos o limite para concretizar, simular e analisar novas ideias é a imaginação. De qualquer forma é possível referir possíveis trabalhos que possam aproveitar já o desenvolvimento efectuado neste trabalho e também consolidar as suas conclusões.

1. Fazer ensaios de impacto e quasi-estáticos numa tibia artificial em material compósito e verificar qual a força máxima que se pode aplicar até ao início do dano.
2. De forma a confirmar a capacidade de protecção das caneleiras e do material aqui escolhido, fazer ensaios de impacto na tibia artificial protegida com a caneleira e haver registo da força transmitida do penetrador para a caneleira e da caneleira para o osso através de sensores de força. Isto daria a oportunidade de estudar o efeito do impulso na perna.
3. De forma a confirmar a capacidade de protecção das caneleiras e do material aqui escolhido, fazer ensaios de impacto na tibia artificial (Sawbones) protegida com a caneleira e haver registo da força transmitida do penetrador para a caneleira e da caneleira para o osso através de sensores de força. Isto daria a oportunidade de estudar o efeito do impulso na perna.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Cattermole, H.R., Hardy, J.R.W. and Gregg, P.J. *The footballer's fracture*. British Journal of Sports Medicine 30, 171-175 (1996)
- [2] Barrey, P.B. *Leg injuries and shin guards*. Clinics in Sports Medicine 17, 769-777 1998
- [3] Shaw, A. D., Gustilo, T. and Court-Brown, C.M. (1997) *Epidemiology and outcome of tibial diaphyseal fractures in footballers*. Injury 28, 365-367 (1997)
- [4] Boden, B.P., Lohnes, J.H., Nunley, J.A. and Garret, W.E. *Tibia and fibula fractures in soccer players*. Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy 7(4), 262-266. (1999)
- [5] Templeton, P.A., Farrar, M.J., Williams, H.R., Bruguera, J. and Smith, R.M. *Complications of tibial shaft soccer fractures*. Injury 31, 415-419 (2000)
- [6] Árnason, A. *Injuries in Football: Risk factors, injury mechanisms, team performance and prevention*. PhD Thesis. Oslo Sports Trauma Research Center, Norwegian University of Sport and Physical Education, Oslo, Norway. ISBN 82-502-0377-1 (2004)
- [7] Ekstrand, J. and Gillquist, J. *The frequency of muscle tightness and injuries in soccer players*. The American Journal of Sports Medicine 10, 75-78 (1982)
- [8] Ankrah, S. and Mills, N.J. *Performance of football shin guards for direct stud impacts*. Sports Engineering 6, 207-220 (2003)
- [9] Barrey, P.B. *Leg injuries and shin guards*. Clinics in Sports Medicine 17, 769-777 (1998)
- [10] Adrian, L. *The biomechanics of soccer surfaces and equipment*. In: Science and Soccer. 1st edition. Ed: Reilly, T. Taylor & Francis Group. 135-150 (1996)
- [11] Eugene, B. *The prevention of injuries in youth soccer*. Michigan Governor's Council on physical fitness, health and sports, November (2003)
- [12] Francisco, C., Nightingale, R.W., Guilak, F., Glisson, R.R. and Garret, W.E. *Comparison of soccer shin guards in preventing tibia fracture*. The American of Journal Sports Medicine 28, 227-233 (2000)
- [13] Lees, A. and Cooper, S. *The shock attenuation characteristics of soccer shin guards*. In: Sport leisure and ergonomics. Eds: Atkinson, G. and Reilly, T. London: E & FN Spon. 130-135 (1995)
- [14] Nyquist, G.W., Cheng, R., El-Bohy, A.A. and King, A.I. *Tibia bending: strength and response*. In: Proceeding of Society of 1985 Automotive Engineers, 29th Stapp Car Crash Conference, Warrendale, PA, USA. 240-253, (1985)

- [15] Yasar Tatar, Nusret Ramazanoglu, Asiye Filiz Camliguney, Evrim Karadag Saygi and Hasan Birol Cotuk. *The effectiveness of shin guards used by football players*. In: Journal of Sports Science and Medicine, 120-127 (2014)
- [16] S.N.A. Safri, M.T.H. Sultan, N. Yidris, and F. Mustapha. *Low Velocity and High Velocity Impact Test on Composite Materials – A review*. The International Journal Of Engineering And Science (IJES), (2014)
- [17] Marcelo F.S.F. de Moura, António G. de Magalhães e Alfredo B. de Moraes. *Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico* Applied Mechanics Reviews, 2ª edição (2011)
- [18] S. Abrate. *Impact on Laminated Composite Materials*. Applied Mechanics Reviews, (1991)

12. ANEXOS

12.1. Anexo A – Ficha de Produção (Materiais e Quantidades)