



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA -
PPGEM

RESISTÊNCIA RESIDUAL APÓS IMPACTO EM COMPÓSITOS HÍBRIDOS
DE MATRIZ ESTÉR VINÍLICA REFORÇADA POR FIBRA DE VIDRO E
KEVLAR

JAYNA KÁTIA DIONISIO DOS SANTOS

Tese de submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientadores: Prof. Dr. Raimundo Carlos Silverio Freire Júnior.

Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Natal, Abril de 2018

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Santos, Jayna Kátia Dionisio dos.

Resistência residual após impacto em compósitos híbridos de matriz ester vinílica reforçada por fibra de vidro e Kevlar / Jayna Kátia Dionisio dos Santos. - 2018.

135 f.: il.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Natal, RN, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Carlos Silverio Freire Júnior.

Coorientador: Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior.

1. Compósito híbrido - Tese. 2. Impacto drop test - Tese. 3. Compressão após impacto - Tese. 4. Resistência residual - Tese. 5. Vidro E - Tese. 6. Kevlar 49 - Tese. I. Freire Júnior, Raimundo Carlos Silverio. II. Amorim Júnior, Wanderley Ferreira de. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 620.1

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**RESISTÊNCIA RESIDUAL APÓS IMPACTO EM COMPÓSITOS HÍBRIDOS
DE MATRIZ ESTÉR VINÍLICA REFORÇADA POR FIBRA DE VIDRO E
KEVLAR**

JAYNA KÁTIA DIONISIO DOS SANTOS

Orientadores: Dr. Raimundo Carlos Silverio Freire Júnior.
Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Natal, 2018.

RESUMO

Ao longo da vida útil os materiais são submetidos a vários tipos de impacto devido a queda de elementos de alta ou baixa massa e velocidade. Dentre os impactos, o de baixa velocidade é considerado a solicitação mais comum, quando leva-se em consideração situações típicas de utilização onde esses impactos podem provocar danos internos no material comprometendo sua integridade. Além disso, deve-se especial atenção aos compósitos que são mais susceptíveis a danos por impacto do que os materiais convencionais. Diante disto, o presente estudo tem como objetivo fazer uma análise experimental e modelar a resistência residual à flexão em três pontos e compressão após o impacto (CAI), de dois tipos de laminados compósitos de matriz polimérica estér-vinílica, sendo um compósito híbrido reforçado com 11 camadas constituídas de 8 camadas de tecido bidirecional Vidro-E e 3 camadas de Kevlar 49, e para efeito de comparação, um outro laminado reforçado com 11 camadas de tecido bidirecional de Vidro-E, sujeitos a impactos de baixa velocidade (*Drop test*). Foram utilizadas várias energias de impacto (31J, 46J, 61J e 76J) nos dois laminados até a perfuração da amostra. Como resultado verificou-se que o laminado híbrido obteve maior resistência ao impacto, enquanto que apresentou um decréscimo tanto nas propriedades de compressão quanto em flexão em três pontos após impacto, em que, essa perda de integridade no híbrido pode ser justificada pela ocorrência de delaminação nas interfaces dos compósitos.

Palavras-chaves: Impacto *drop test*, Compressão Após Impacto, Resistência Residual, Compósito Híbrido, Vidro E, Kevlar 49

ABSTRACT

Throughout the use of a material it is subjected to various types of impact due to the fall of elements of high or low mass and speed. Among the impacts, the low speed is considered the most common request, when considering typical situations of use where these impacts can cause internal damage in the material compromising its integrity. In addition, special attention should be paid to composites that are more susceptible to impact damage than conventional materials. Therefore, the present study aims to make an experimental analysis and model the residual resistance to three-point flexural strength and compression after impact (CAI) of two types of composite laminates of sterile-vinyl polymer matrix, being a reinforced hybrid composite with 11 layers consisting of 8 layers of bidirectional E-Glass and 3 layers of Kevlar 49, and for comparison purposes, another laminate reinforced with 11 layers of bidirectional E-Glass fabric, subject to low-velocity impacts). Several impact energies (31J, 46J, 61J and 76J) were used in the two laminates until the drilling of the sample. As a result, it was found that the hybrid laminate obtained higher impact strength, while it showed a decrease in both compression and flexion properties at three points after impact, where this loss of integrity in the hybrid can be justified by the occurrence of delamination at the interfaces of the composites.

Keywords: Impact *drop test*, Compression after Impact, Residual Strength, Hybrid Composite, Glass E, Kevlar 49

Dedico este trabalho primeiramente a Deus que me abençoa com o seu amor todos os dias e aos meus pais João (*in memoriam*) e Francisca Dionisio, que são a base da minha vida e minha motivação diária.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas inúmeras bênçãos concedidas para realização desta etapa.

Aos meus pais, que me ensinaram pelo testemunho, valores e princípios que me fazem conquistar meus objetivos seguindo seus exemplos de fé, honestidade e dedicação.

À toda minha família, em especial minhas irmãs Janaina e Juliana Dionisio e à minha sobrinha Alice, pelo apoio incondicional e por serem motivação para mim.

A Marçal Akira Hanawa, pela colaboração em várias etapas deste trabalho, pelo incentivo nos dias difíceis, e em especial, pela compreensão e paciência.

Ao Prof. Dr. Raimundo Carlos S Freire Júnior, pelo incentivo, pelo apoio sempre paciente e disponibilidade para a orientação, fundamental na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Junior, pela co-orientação e em especial, pela grande ajuda na realização dos ensaios de impacto.

À instituição UFRN-PPGEM pela oportunidade para realizar este trabalho.

A todos que fazem o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Jaguaribe, pelo apoio e por toda colaboração, essenciais para a conclusão deste trabalho.

Ao IFRN, pela realização do ensaios de flexão, em especial, aos professores Renata Carla Tavares dos Santos Felipe e Raimundo Nonato Barbosa Felipe também pelas oportunidades concedidas e incentivos durante o meu tempo como pesquisadora.

Aos meus amigos, por todo apoio nesta jornada e principalmente, pelo carinho e paciência nos momentos mais difíceis.

A todos do grupo “Bolsistas de Raimundo”, em especial à Camila Cruz, Camilla Medeiros e Rayane Dantas, por toda ajuda durante o trabalho.

Ao Professor Dr. Evans Paiva da Costa Ferreira, pela grande ajuda na confecção dos laminados.

Ao laboratório de Ensaios mecânicos e metais da UFRN pelo apoio na realização dos ensaios.

Ao CNPQ pelo incentivo financeiro.

Sumário

1	Introdução, objetivos e contribuições.....	1
1.1	Introdução.....	1
1.2	Objetivos Gerais.....	2
1.2.1	Objetivos Específicos.....	3
1.3	Contribuições.....	3
2	Revisão bibliográfica.....	5
2.1	Introdução e definição de compósitos.....	5
2.2	Matérias primas utilizadas na obtenção do compósito.....	5
2.2.1	Matrizes.....	5
2.2.2	Reforços fibroso.....	8
2.3	Compósitos híbridos.....	14
	Interface.....	16
2.4	Caracterização mecânica.....	16
2.4.1	Ensaio de impacto em materiais compósitos.....	17
2.5	Tipos de Ensaio de Impactos em Compósitos.....	19
2.5.1	Impacto de alta velocidade.....	19
2.5.2	Impacto de média velocidade.....	21
2.5.3	Impacto de baixa velocidade.....	21
2.6	Ensaio de Flexão.....	26
2.7	Análise residual.....	26
2.7.1	Ensaio de Compressão após impacto.....	27
2.8	Mecanismo do dano.....	29
2.8.1	Análise macroscópica.....	29
2.9	Análise microscópica.....	33
2.10	Estudos em Compósitos impactados – Estado da arte.....	35

3.	Materiais e Métodos	42
3.1	Processo de fabricação dos laminados	42
3.2.2	Corte dos corpos de prova	45
3.3	Percentual de fibra e percentuais volumétrico das fibras	46
3.4	Ensaio de densidade	47
3.5	Ensaio de impacto	47
3.6	Ensaio de compressão (<i>Compression After Impact</i>).....	49
3.7	Ensaio de flexão	50
3.8	Análise da resistência residual	54
3.9	Análise do dano	53
4	Resultados e discussão	57
4.1	Ensaio de densidade e percentuais volumétrico das fibras.....	57
4.2	Ensaio de compressão	58
4.2.1	Análise do dano de compressão	60
4.3	Ensaio de flexão em três pontos	61
4.4	Ensaio de impacto	64
4.4.1	Análise visual do dano causado nos laminados.....	64
4.4.2	Avaliação da área do dano.....	76
4.4.2	Análise microscópica da fratura	82
4.5	Análise das propriedades mecânicas do compósito após o impacto	85
4.5.1	Ensaio de compressão após impacto (CAI).....	85
4.5.2	Ensaio de flexão em três pontos após impacto.....	91
4.5.2	Modelamento da resistência e do módulo após impacto.....	102
5	Conclusões.....	109
6	Sugestões para trabalhos futuros	112
7	Referências	114

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Classificação das matrizes mais utilizadas em compósitos.....	6
Figura 2.2: Aplicações de Materiais na Estrutura do avião Boeing 787	10
Figura 2.3: Esboço do processo de produção de fibras de vidro	11
Figura 2.4: Forma de Comercialização das Fibras de Vidro: a) Roving; b) Moída; c) Manta; d) Tapes; e) Tecido; f) Vêu de superfície.....	12
Figura 2.5: Principais formas comerciais da fibra de kevlar.	13
Figura 2.6: Uso e aplicações da fibra de Kevlar	14
Figura 2.7: Tipos de danos causados em função da velocidade de impacto.....	19
Figura 2.8: Barra de Hopkinson.....	20
Figura 2.9: Canhão de ar comprimido	21
Figura 2.10: Representação dos ensaios de impacto do tipo Charpy e Izod.....	22
Figura 2.11: Representação do ensaio <i>drop test</i>	24
Figura 2.12: Esquema representativo do ensaio do impacto por queda de peso.	25
Figura 2.13: Esquema do Ensaio de flexão à três pontos	26
Figura 2.14: Diferentes modos de colapso numa solicitação de compressão após impacto	28
Figura 2.15: Garra suporte para realização de CAI	29
Figura 2.16: Modos de falha de resistência residual à compressão aceitáveis comumente observados.....	30
Figura 2.17: Representação esquemática da progressão dos danos devido a: (a) Esforço de flexão; (b) Esforço de contato	32
Figura 2.18: Modos de dano comumente observados no impacto de queda de peso	33
Figura 2.19: Dano causado por impacto de velocidade intermediária. As setas indicam em (a) a direção da propagação de fissuras; em (b) a existência das fraturas adesiva e coesiva.	34
Figura 3.1 : Metodologia utilizada no trabalho.....	42
Figura 3.2: Disposição dos tecidos para a laminação do compósito reforçado por de fibra de vidro	43
Figura 3.3: Disposição dos tecidos para a laminação do compósito híbrido	43
Figura 3.4: Câmara de vácuo	44

Figura 3.5 : Laminação manual (a) Laminado Kevlar/Vidro. (b) Laminado Vidro/Vidro..	44
Figura 3.6: Disco diamantado da marca IRWIN	45
Figura 3.7: Máquina de corte à jato d'água.	46
Figura 3.8: Corte à jato d'água. (a) Corte dos corpos de prova de Impacto. (b) Corte dos corpos de prova de flexão.	46
Figura 3.9: Densímetro Digital	47
Figura 3.10: Máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.	48
Figura 3.11: Corpo de prova para o ensaio de impacto por queda de peso	48
Figura 3.12: Máquina de ensaios universal	50
Figura 3.13: Ensaio de flexão em três pontos	51
Figura 3.14: Representação dos corpos de provas para ensaio de flexão	52
Figura 3.15: Corpos de provas utilizados no ensaio de flexão	52
Figura 3.16: Esquema de representação da distância das amostras em relação à borda do impactador para análise do ensaio de flexão em três pontos residual.....	55
Figura 4.1: Curva tensão em função da deformação dos compósitos estudados. (a) CV (b) HKV	58
Figura 4.2: Tensão última à compressão dos laminados CV e HKV	60
Figura 4.3: Módulo compressivo efetivo dos laminados CV e HKV	60
Figura 4.4: Característica do dano nos laminados CV e HKV submetidos à compressão..	61
Figura 4.5: Curva tensão em função da deformação de ensaio de flexão em três pontos dos laminados CV e HKV , respectivamente.....	62
Figura 4.6: Tensão última à flexão dos laminados CV e HKV	63
Figura 4.7: Módulo de elasticidade à flexão dos laminados CV e HKV	63
Figura 4.8: Diagrama Energia x Número de impactos necessários para penetração total...	65
Figura 4.9: Danos no CV com a energia de impacto 31 J impactado 3 vezes: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto.....	66
Figura 4.10: Danos no CV com a energia de impacto 31 J: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto	67
Figura 4.11: Dano no HKV com a energia de impacto 31 J impactado 4 vezes: (a) Lado do impacto; (b)Lado oposto ao impacto.....	68
Figura 4.12: Dano no HKV com a energia de impacto 31 J: (a) Lado do impacto; (b)Lado oposto ao impacto	69

Figura 4.13: Dano no CV com a energia de impacto 46 J: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto	70
Figura 4.14: Dano no HKV com a energia de impacto de 46 J impactado 2 vezes: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto.....	71
Figura 4.15: Dano no HKV com a energia de impacto 46 J: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto	72
Figura 4.16: Dano no CV com a energia de impacto 61 J: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto	73
Figura 4.17: Dano no HKV com a energia de impacto 61 J: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto	74
Figura 4.18: Dano no CV com a energia de impacto 76 J: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto	75
Figura 4.19: Dano no HKV com a energia de impacto 76 J: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto do impacto	76
Figura 4.20 : Curvas da área do dano em função da energia de impacto no compósito de fibra de vidro (CV)	79
Figura 4.21: Curvas da área do dano em função da energia de impacto no compósito híbrido (HKV)	80
Figura 4.22: Curvas da área do dano do lado do impacto em função da energia de impacto nas placas vidro <i>versus</i> híbridos.....	81
Figura 4.23: Curvas da área do dano do lado oposto do impacto em função da energia de impacto nas placas vidro <i>versus</i> híbridos.....	82
Figura 4.24 : Microscopia da fratura dos compósitos CV : a) Região impactada; b) Fibras após fratura.....	83
Figura 4.25: Microscopia da fratura dos compósitos HKV : a) Região impactada; b) Interface Fibra de Vidro/Matriz/Fibra de Kevlar; c) Fibras após fratura	84
Figura 4.26: Curva tensão em função da deformação à compressão após impacto de 58J dos laminados: (a) CV e (b) HKV	86
Figura 4.27: Tensão última à compressão após impacto dos laminados CV e HKV	87
Figura 4.28: Módulo de elasticidade à compressão após impacto dos laminados CV e HKV	88

Figura 4.29: Comparativo da tensão última à compressão dos laminados CV e HKV antes e após impacto.....	89
Figura 4.30: Comparativo do módulo de elasticidade à compressão dos laminados CV e HKV antes e após impacto	90
Figura 4.31: Característica do dano nos laminados CV e HKV submetidos à compressão após impacto.....	90
Figura 4.32: Curva tensão em função da deformação à flexão do compósito reforçado por fibras de vidro ensaiado à flexão após impacto	92
Figura 4.33: Tensão última à flexão após impacto conforme a distância ao centro do dano do compósito reforçado por fibra de vidro.....	93
Figura 4.34: Módulo de elasticidade à flexão após impacto conforme a distância ao centro do dano do compósito reforçado por fibra de vidro	93
Figura 4.35: Curva tensão em função da deformação à flexão após impacto do compósito híbrido kevlar/vidro com 1 impacto de 46J, conforme a distância do centro do dano ...	95
Figura 4.36: Tensão última à flexão após impacto conforme a distância ao centro do dano do compósito híbrido kevlar/vidro	96
Figura 4.37: Módulo de elasticidade à flexão após impacto conforme a distância ao centro do dano do compósito híbrido kevlar/vidro	97
Figura 4.38: Curva tensão em função da deformação à flexão após impacto do compósito híbrido kevlar/vidro com 2 impactos à 46J	98
Figura 4.39: Tensão última à flexão após impacto conforme a distância ao ponto de impacto do compósito híbrido kevlar/vidro com 2 impactos à 46J	99
Figura 4.40: Módulo de elasticidade à flexão após impacto conforme a distância ao ponto de impacto do compósito híbrido kevlar/vidro	100
Figura 4.41: Comparativo da tensão última à flexão após impacto entre os compósitos de reforço de fibra de vidro e híbridos kevlar/vidro com diferentes de impactos	101
Figura 4.42: Comparativo do módulo de elasticidade à flexão após impacto entre os compósitos de reforço de fibra de vidro e híbridos kevlar/vidro com diferentes de impactos	102
Figura 4.43: Esquema de representação da distância das amostras em relação ao ponto de impacto para análise do ensaio de flexão em três pontos após impacto.	103

Figura 4.44: Tensões residuais de flexão empírica e experimental do CV e do HKV em função da distância da borda do impactador.	104
Figura 4.45: Tensões residuais de flexão empírica e experimental do HKV e do HKV2x em função da distância da borda do impactador.	105
Figura 4.46: Módulos residuais de flexão empírico e experimental do CV e do HKV em função da distância da borda do impactador.	106
Figura 4.47: Módulos residuais de flexão empírico e experimental do HKV e do HKV2x em função da distância da borda do impactador.	107

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Tipos de fibras mais utilizadas em compósitos poliméricos.....	9
Tabela 2.2: Comportamento do alvo associado à velocidade de impacto	18
Tabela 2.3: Código das características do modo de falha à CAI	31
Tabela 2.4: Características do modo de falha ao impacto de queda de peso	33
Tabela 3.1: Distância ao centro do dano	51
Tabela 4.1: Densidade volumétrica do CV e HKV	57
Tabela 4.2: Percentual de fibra nos laminados conforme reforço utilizado	57
Tabela 4.3: Propriedades mecânicas de compressão dos laminados CV e HKV	59
Tabela 4.4: Propriedades mecânicas de flexão em três pontos dos laminados CV e HKV	62
Tabela 4.5: Comparativo global do compósito reforçado com fibra de vidro para diferentes energias de impacto (CV)	64
Tabela 4.6: Comparativo global do compósito híbrido reforçado com fibras de vidro e kevlar para diferentes energias de impacto (HKV)	64
Tabela 4.7: Área do dano no ensaio de impacto por queda de peso nas placas CV	76
Tabela 4.8: Área do dano no ensaio de impacto por queda de peso nas placas HKV	77
Tabela 4.9: Propriedades mecânicas compressão após impacto dos laminados CV e HKV	86
Tabela 4.10: Propriedades mecânicas de flexão após impacto conforme a distância ao centro do dano para o compósito reforçado por fibra de vidro	92
Tabela 4.11: Propriedades mecânicas de flexão após impacto conforme a distância ao centro do dano para o compósito híbrido kevlar/vidro	96
Tabela 4.12: Propriedades mecânicas de flexão após impacto conforme a distância ao centro do dano para o compósito híbrido kevlar/vidro com 2 impactos à 46J.....	98
Tabela 4.13: Constantes α e β obtidas para resistência e módulo após impacto.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM – American Society of Testing and Materials

CV – Compósito reforçado por Tecido de Fibra de Vidro-E

HKV – Compósito híbrido reforçado por Tecido de Kevlar 49 e Tecido de Fibra de Vidro-E

HKV2x – Compósito híbrido reforçado por Tecido de Kevlar 49 e Tecido de Fibra de Vidro-E impactado duas vezes.

CAI – Compressão Após Impacto

CP – Corpo de Prova

IFRN – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

PPGEM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

LDM – Lateral no dano no meio

LGM – Lateral longe do dano no meio

SDM – Longo no dano no meio

DDM – Crescimento de delaminação (longitudinal) em dano no meio

WDM – Crescimento de delaminação (transversal) em dano no meio

Capítulo I

Introdução, Objetivos e Contribuições

1 Introdução, objetivos e contribuições

1.1 INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos tornaram-se ao longo dos últimos anos, essenciais ao desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente devido às suas características únicas, projetadas e fabricados para atender as necessidades específicas em cada aplicação, sendo utilizados extensivamente em novas tecnologias nas mais diversas indústrias como aeroespacial, automobilística, construção civil, petrolífera e de artigos esportivos. Este material é definido por Gay (1991) como sendo um material formado por diferentes materiais, que quando analisado macroscopicamente o mesmo é homogêneo, possuindo fibras contínuas ou não, que oferecem resistência mecânica; e, a matriz que dá forma ao produto final.

Compósitos poliméricos reforçados com fibras, como o vidro, Kevlar e o carbono, são cada vez mais utilizados na engenharia em aplicações estruturais, devido sua capacidade de absorção de energia e resistência ao dano mediante casos de impactos.

Entre estes materiais, destacam-se os compósitos híbridos, formados por dois ou mais materiais de reforço, diferentes, unidos pela mesma matriz. Esta hibridação permite aos designers adaptar as propriedades compostas às necessidades exatas da estrutura em consideração. Na maioria dos casos, o objetivo da hibridização é obter um novo material que contenha as vantagens de seus constituintes e, se possível, superar algumas das suas desvantagens. Além disso, sua utilização está relacionada ao custo, sendo um dos dois componentes geralmente mais barato que o outro (PEGORETTI, 2004).

Wang (2016) mostra que estes materiais fibrosos, cada vez mais utilizados em infraestrutura civil e engenharia de proteção para resistir a cargas dinâmicas, estão sujeitos a impacto de baixa velocidade de várias origens, dependendo da forma em que estão a sendo utilizados. A maioria destes compósitos se comportam de maneira frágil e, portanto, só pode absorver energia em deformação elástica e através de mecanismos de danos, e não através de deformação plástica (AZEVEDO, 2017).

Abrate (2005), define que que estes esforços de impacto podem provocar o aparecimento de uma área com dano, reduzindo consideravelmente a rigidez mecânica, podendo resultar na falha do material em diferentes modos: ruptura da matriz, ruptura da fibra, falha por compressão, microflambagem da fibra e delaminação.

Nesta perspectiva, o impacto de baixa velocidade tem ganhado grande atenção dos pesquisadores, visto que é considerado a solicitação de maior risco, em que os danos nem sempre são visíveis à olho nu; as delaminações causadas pelo impacto podem afetar de uma forma drástica a resistência residual da estrutura, principalmente quando submetido à compressão; e além disso, são as solicitações mais comuns de ocorrer, levando-se em consideração por exemplo, a queda de ferramentas durante a fabricação ou manutenção de estruturas, o manuseio, a queda de granizo, entre outras situações típicas de utilização. (MOURA *et al.*, 2011)

Pode-se citar como exemplo desta utilização, uma estrutura de composição aeronáutica, que permite-se voar se comprovado que, apesar da presença de danos no material - mesmo invisível na superfície - a estrutura pode sustentar as cargas. Para isto, os testes de CAI (compressão após impacto) geralmente são realizados, já que a compressão é o caso mais crítico para o dimensionamento de estruturas que foram submetidas a impacto. (RIVALLANT *et al.*, 2014)

Assim, o estudo do comportamento de materiais compósitos submetidos à essa solicitação torna-se imprescindível pelo fato de tentar conduzir ao aparecimento prematuro de instabilidade estrutural e a consequente restrição do seu uso, especialmente levando em consideração a análise de resistência residual.

Diante deste contexto, esta tese utilizará para estudo dois laminados compósitos constituídos de matriz polimérica, sendo um reforçado com tecidos de fibras de vidro-E e outro laminado híbrido reforçado por tecido de kevlar-49 e tecido de fibra de vidro-E, de forma que esses foram submetidos a impactos de baixa velocidade, utilizando 46J de energia para ambos materiais, por meio de uma máquina de ensaios do tipo *drop test*.

Os compósitos estudados foram ensaiados para verificação das propriedades de flexão em três pontos e compressão, antes e após o impacto, mostrando também a influência da hibridização nestes parâmetros, além disso, foram realizadas análises macroscópicas e microscópicas no dano com o intuito de caracterizá-los.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a resistência residual após impacto de dois laminados, um reforçado com fibra de vidro-E e o outro híbrido (kevlar 49/vidro-E) através do ensaio de compressão e flexão.

1.1.1 Objetivos Específicos

- ✓ Fazer um estudo do dano causado por impacto de baixa velocidade no compósito reforçado por tecido de fibra de vidro (**CV**) e no híbrido reforçado por tecidos de kevlar e de fibra de vidro (**HKV**).
- ✓ Estudar a influência dos impactos de baixa velocidade nas propriedades mecânicas de flexão em três pontos e compressão nos laminados **CV** e **HKV**.
- ✓ Analisar o efeito da hibridização para os ensaios realizados.
- ✓ Fazer uma análise comparativa entre as propriedades mecânicas dos dois materiais, antes e após o impacto.
- ✓ Analisar a característica da fratura para cada tipo de ensaio realizado.
- ✓ Modelar o comportamento à flexão dos compósitos estudados.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições do trabalho podem ser listadas a seguir:

- ✓ Desenvolvimento de novas configurações de compósitos laminados híbridos a base de fibras de vidro-E e kevlar com o objetivo de otimizar a absorção da energia de impacto;
- ✓ Confirmação de que a utilização de tecido de Kevlar 49 em camadas externas do laminado faz com que a hibridização utilizando também fibras de vidro, possua maior capacidade de absorção de energia de impacto do que o compósito reforçado por somente fibra de Vidro.
- ✓ Verificação que o dano se dissipa em uma área muito maior no compósito laminado híbrido do que o Vidro, modificando suas propriedades residuais de modo mais significativo, mesmo a grandes distâncias do ponto de impacto.
- ✓ Estudo da influência da hibridização na resposta mecânica de resistência residual à flexão em laminados compósitos poliméricos reforçados com tecidos híbridos;
- ✓ Desenvolvimento de uma equação que prevê o valor da resistência e do módulo residual à flexão em função do aumento da distância da borda do impactador, para casos em que não há penetração total do impactador, sugerindo que no ponto de impacto ainda haja resistência residual.

Capítulo II

Revisão bibliográfica

2 Revisão bibliográfica

2.1 INTRODUÇÃO E DEFINIÇÃO DE COMPÓSITOS

Com o advento do desenvolvimento econômico, aproximadamente a partir da década de 1950, uma série de novos materiais estruturais tem sido utilizados com sucesso. Os materiais compostos por plásticos reforçados por fibras, desenvolvidos e aplicados inicialmente na indústria aeroespacial-militar, difundiram-se posteriormente para outros tipos de componentes e sistemas que hoje se tornaram presença comum nos artigos consumidos e usados no dia-a-dia. (MENDONÇA, 2005)

Segundo a norma ASTM D3878 (2016), o material compósito é definido como um material que contém dois ou mais materiais, no entanto insolúveis, que se combinam formando um único material, possuindo propriedades únicas, diferentes das que contém seus elementos individuais. Além disso, é não homogêneo em escala microscópica mas ao se analisar macroscopicamente muitas vezes é homogêneo, sendo estes utilizados em certas aplicações de engenharia.

Podendo ser definidos também, como materiais multifásicos produzidos artificialmente que possuem uma combinação das melhores propriedades de suas fases constituintes (CALLISTER Jr., 2007). Tendo como característica básica a combinação, a nível macroscópico, de pelo menos duas fases distintas denominadas de matriz e reforço, segundo Pardini (2000). Esta matriz pode ser quanto à origem: cerâmica, metálica ou polimérica, enquanto o reforço pode ser na forma de partículas ou material fibroso, podendo este último ser apresentado na forma aleatória, como mantas de fios picados, ou de forma direcionada como tecidos unidirecionais, bidirecionais ou multicamadas, e o material particulado pode ainda possuir partículas pequenas ou grandes.

2.1 MATÉRIAS PRIMAS UTILIZADAS NA OBTENÇÃO DO COMPÓSITO

Conforme dito anteriormente, um material compósito é composto por um material que possui o intuito de reforçar a estrutura (reforço), e um material aglutinante (matriz). Neste item serão apresentados alguns destes materiais, dando-se ênfase aos utilizados nesta tese.

2.2.1 Matrizes

As matrizes em compósitos, têm como principal função transferir as solicitações mecânicas para o reforço e proteger o mesmo do meio em que se encontra.

Desta forma, é essencial que as forças de ligação adesivas entre a fibra e a matriz sejam adequadas, para minimizar o arranque das fibras. De fato, a aderência entre a fibra e a matriz influencia significativamente na resistência do compósito, já que é através desta aderência que se transfere o carregamento aplicado no compósito para o elemento de reforço.

As matrizes podem ser de origem, cerâmica, metálica e polimérica como pode ser observado na Figura 2.1.

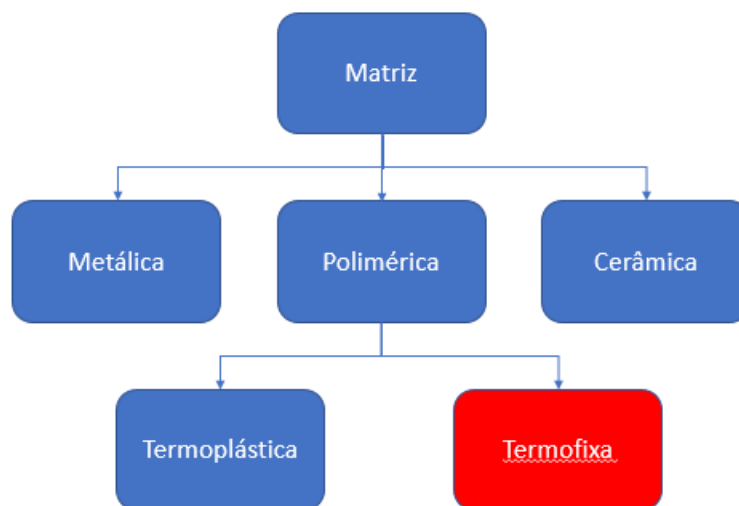


Figura 2.1: Classificação das matrizes mais utilizadas em compósitos.

Fonte: Adaptado de Castro, 2010

Matrizes poliméricas

Etimologicamente, a palavra polímero significa muitas partes. Um material polimérico pode ser considerado como constituído por unidades ligadas quimicamente entre si de modo a formar um sólido. Estes materiais são usados em uma ampla diversidade de aplicações de compósitos, bem como em grandes quantidades, em vista de suas propriedades sob temperatura ambiente, de sua facilidade de fabricação e de seu custo relativamente baixo.

A escolha pelo tipo de matriz polimérica, inicialmente é feita devido ao processo de fabricação a ser selecionado para a fabricação do compósito. No entanto outros parâmetros precisam ser levados em consideração ao se escolhê-la como: faixa de temperatura de serviço, propriedades mecânicas desejadas, geometria do produto, processo de fabricação, razão de produção, disponibilidade da matéria prima e custo, além da resistência química e umidade, conforme Gay

(1991). Dependendo do modo como estão ligados química e estruturalmente, as matrizes poliméricas podem ser divididas em duas classes: termoplásticos e termofixos.

Matrizes termofixas

As matrizes termofixas são constituídas por polímeros em que as moléculas formam estruturas tridimensionais bastante rígidas. Os termorrígidos, ao contrário dos termoplásticos não podem ser reprocessados. Uma vez que aquecidos assumem uma forma permanente. Estes polímeros, são frequentemente fornecidos para processamento sob a forma de uma mistura de dois ou três componentes: resina, acelerador e catalisador. Quando estes componentes são misturados na proporção adequada, dá-se a polimerização e a constituição da estrutura tridimensional, num processo que se designa habitualmente por cura, conforme Moura *et al.* (2011).

Marinucci (2011) afirma que os polímeros termofixos ou termorrígidos, na sua maioria, são líquidos à temperatura abaixo de 50 °C, que propicia vantagem de serem processados quando ainda líquidos, na temperatura ambiente. E ainda que, necessitam de baixo investimento nos meios de produção por dispensar equipamentos como injetoras e extrusoras, que são de alto custo.

Resina epóxi éster-vinílica

Dentre todos os plásticos, o epóxi, o poliéster, e em menor proporção, os fenólicos, são os mais utilizados como matrizes de laminados compostos reforçados por fibras. Isso se dá não só por causa das propriedades mecânicas, frequentemente superiores às dos termoplásticos, mas também por serem menos afetadas pela variação de temperatura. Peças e componentes de materiais compostos de plásticos termofixos podem ser produzidos inteiramente à temperatura ambiente, desde a montagem de fibra e matriz até o final de cura. Essa é uma vantagem sobre os termoplásticos. (MENDONÇA, 2005).

A empresa Azom disponibiliza um artigo no seu site comparando as propriedades como: propriedades adesivas, mecânicas, de resistência à microfissura e resistência à fadiga entre três tipos de resinas termofixas (poliéster, éster-vinílica e epóxi). Apresentando para todos os casos, a resina éster-vinílica como a matriz de valores intermediários entre a poliéster e a epóxi, porém a éster-vinílica apresenta algumas vantagens operacionais perante à epóxi, como nos processos de fabricação de laminas, onde podem ser feitos a cura em temperatura ambiente, diminuindo os custos de fabricação, mantendo uma das melhores propriedades do processo de cura das resinas epoxídicas, que

de acordo com Dias (2009), é acompanhado por uma baixa variância dimensional e que as superfícies de contato entre a resina líquida e os aderentes não sofrem perturbações, apresentando assim boa capacidade de impregnação. É importante destacar também que, para que a resina consiga transmitir ao material compósito todo o seu potencial, em termos de propriedades mecânicas, é necessário que haja uma boa impregnação das fibras e do material de núcleo.

Entre as opções existentes no mercado, a DERAKANE 411-350 é uma resina epóxi éster vinílica feita a partir de uma resina epóxi do bisfenol-A e se tornou uma “referência para a indústria”, devido à sua ampla gama de aplicações em processos industriais aliada à facilidade de utilização nas mais diversas técnicas de fabricação. Possui grande resistência química a uma ampla variedade de produtos químicos, tais como ácidos, álcalis, soluções branqueadoras e compostos orgânicos presentes em muitos processos industriais. A resina é projetada para atender diferentes processos de fabricação de compósitos disponíveis tais como: laminação manual, laminação por pistola, enrolamento filamental (filament winding), técnicas que usam moldagem por compressão e RTM, e aplicações em pultrusão e grades injetadas. Devido à sua excelente resistência a esses ambientes corrosivos, possibilita prolongar a vida útil de equipamentos, adiando a necessidade de reparos e substituição. Permite também trabalhos submetidos a grandes esforços de tensão sem apresentar riscos ao projeto, tornado possível sua aplicação em equipamentos de grande porte (Boletim Derakane, 2007).

2.2.2 Reforços fibroso

A fibra é o elemento constituinte que confere ao material compósito suas características mecânicas: rigidez, resistência à ruptura, etc. O tipo de reforço mais utilizado na fabricação de plásticos reforçados é o fibroso, podendo ser apresentado na forma de fibras contínuas ou curtas.

Herakovich (1998) afirma que uma grande variedade de fibras está disponível para uso em compósitos, e o número está aumentando. As fibras de vidro estão em uso desde a década de 1930; No entanto, foi apenas no final da década de 1950 que as fibras do tecido que apresentaram rigidez significativamente maior foram desenvolvidas para aplicações estruturais, especialmente levando em consideração as propriedades específicas (rigidez/densidade e tensão/densidade).

Conforme Marinucci (2011), na elaboração de um componente estrutural em material compósito procura-se otimizar o aproveitamento das propriedades mecânicas associadas aos reforços

fibrosos. A seleção do reforço leva em consideração aspectos que variam desde o custo desses materiais até o desempenho pretendido e a técnica de fabricação empregada.

Fibras podem ser definidas como sendo unidirecionais, quando orientadas segundo uma mesma direção; bidimensionais, com as fibras orientadas segundo duas direções ortogonais (tecidos) e tridimensionais, quando as fibras são orientadas no espaço tridimensional. Além disso, as fibras que são utilizadas como reforços são classificadas quanto a sua origem e natureza, como mostra a Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Tipos de fibras mais utilizadas em compósitos poliméricos

Fonte: Adaptado de Felipe , 2012 (b)

Tipos de fibras	Origem	Natureza
Vidro	Mineral	Sintética
Aramida	Orgânica	Sintética
Carbono	Mineral	Sintética
Sisal	Orgânica	Natural
Curauá	Orgânica	Natural
Juta	Orgânica	Natural

Fibra de vidro

As fibras de vidro apareceram pouco antes de 1930, com o desenvolvimento de sua técnica de produção, mas o uso intensivo só se deu a partir da segunda guerra mundial, em conjunção com as resinas de poliéster, para suprir restrições de projetos que excluía soluções utilizando materiais metálicos (MENDONÇA, 2005).

Felipe (2012, a) afirma que as fibras de vidro possuem excelente aderência fibra/matriz, excelentes propriedades elétricas, alto alongamento à ruptura, alta relação resistência/densidade, estabilidade dimensional, boa resistência ao impacto, elevada resistência química à corrosão, facilidade de processamento e baixo custo de processamento quando comparadas a outros tipos de reforços sintéticos.

Por combinar todas essas características em um só produto, a fibra de vidro é o tipo de reforço mais utilizado para a fabricação de compósitos, podendo ser encontrado nos mais diferentes segmentos, tais como:

- **Artigos náuticos:** boias de sinalização, pranchas de surf, cascos de embarcações e submarinos científicos e de prospecção.
- **Aviação:** hélice de helicópteros e aviões e fuselagem, como mostrado na Figura 2.2.
- **Automotivos:** discos de embreagem, pastilhas de freio, carrocerias, carenagens, revestimento interno, painéis de instrumentos e para-choques.
- **Recipientes para armazenamento:** tanques de armazenamento, caixas d' água e piscinas.
- **Equipamentos:** engrenagens, carenagens, carcaças de instrumentos e máquinas caseiras ou industriais;
- **Construção civil:** perfis estruturais, pisos, telhas, painéis decorativos, sistemas de isolamento térmico e elétrico.

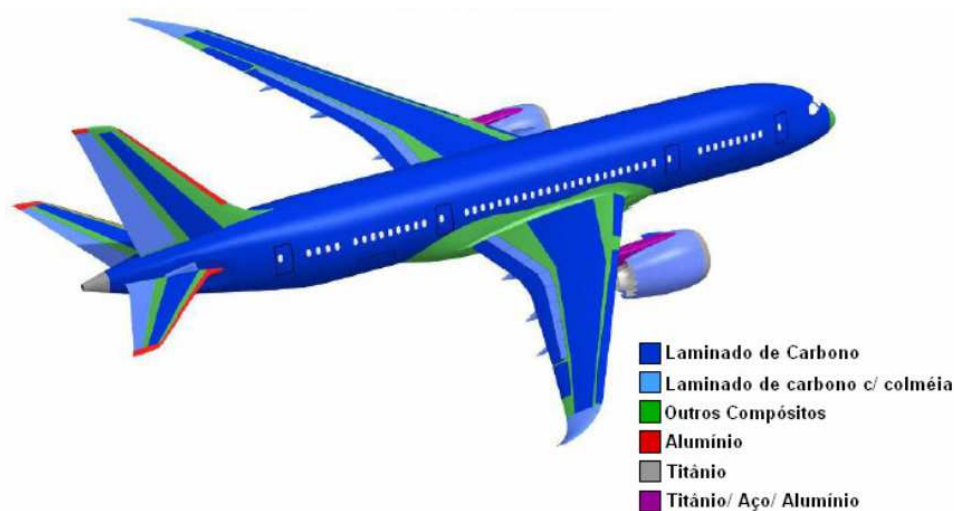


Figura 2.2: Aplicações de Materiais na Estrutura do avião Boeing 787

Fonte: Romariz, 2008

As fibras de vidro estão disponíveis em várias formas: Vidro-E, Vidro-D, Vidro-A, Vidro-C e Vidro-S. Porém o E e S são os mais comuns para aplicações estruturais. O vidro-E foi o primeiro tipo produzido, visando aplicações onde a alta resistividade elétrica eram necessárias, e por isso recebeu a nomenclatura com a sigla -E. O vidro-S foi um aprimoramento do -E para melhorar principalmente sua resistência, e assim, é usado em aplicações estruturais compostas que exigem alta resistência, como também, alto módulo e estabilidade em temperaturas extremas e ambientes corrosivos. (HERAKOVICH, 1998; MENDONÇA, 2005)

Para fabricação das fibras de vidro, ingredientes como areia, calcário e alumina são misturados a seco e derretidos em um forno refratário. A temperatura da massa fundida varia para cada composição de vidro, mas geralmente é de cerca de 1260 ° C. O vidro fundido flui por gravidade através de uma série de furos de uma placa de platina perfurada. Através do controle de temperatura e velocidade de escoamento do vidro se tem os vários tipos de filamentos com diâmetros variados, que são resfriados e em seguida passam por uma esteira para receber uma proteção superficial e lubrificante. Posteriormente, as fibras são unidas em 204 filamentos formando os *strands*, que são por fim, bobinados, como mostra a Figura 2.3. (AGARWAL, 2015; MENDONÇA, 2005)

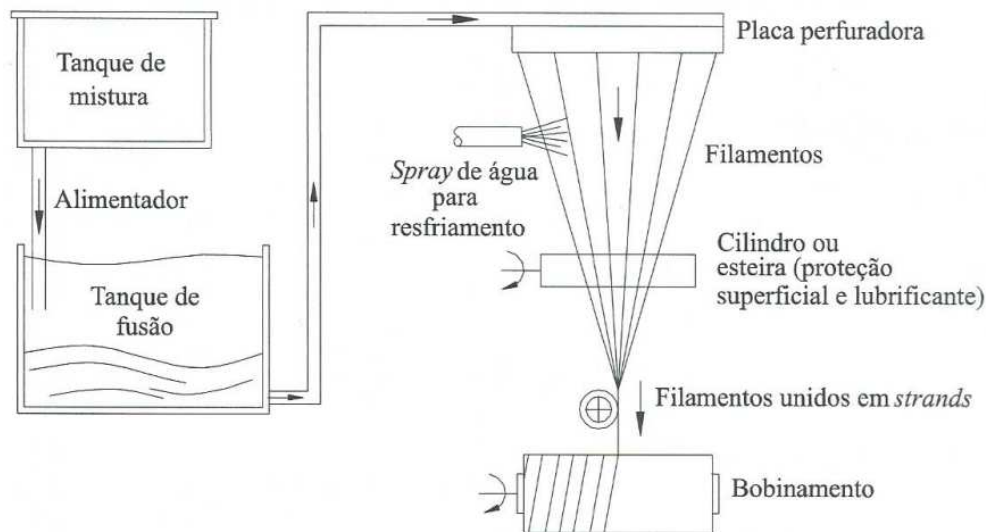


Figura 2.3: Esboço do processo de produção de fibras de vidro

Fonte: Mendonça (2005)

Após produzidas e bobinadas, as fibras são trabalhadas de forma a serem fornecidas em diversas configurações, mais adequadas ao uso, podendo ser comercializadas em forma de mechas (roving), moídas, mantas de fios picados, fitas (tapes), tecidos, ou ainda como véu de superfície, demonstrado na Figura 2.4.

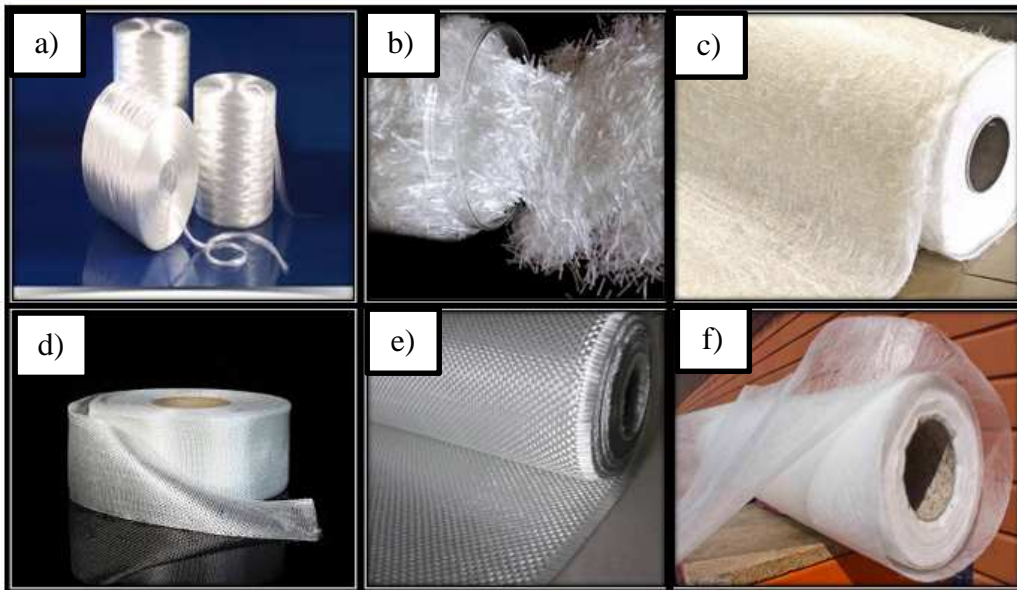


Figura 2.4: Forma de Comercialização das Fibras de Vidro: a) Roving; b) Moída; c) Manta; d) Tapes; e) Tecido; f) Véu de superfície

Fonte: Texiglass, 2017

Fibra de aramida

Historicamente vários tipos de fibras de polímero (por exemplo, nylon, poliéster, rayon) foram usados há muitos anos como reforços em pneus de automóveis, grandes balões, dirigíveis, armaduras e tecidos revestidos de borracha.

Porém, durante a Segunda Guerra Mundial, a equipe de pesquisa e desenvolvimento da DuPont começou a desenvolver materiais para novas versões de diferentes equipamentos antecipando uma possível crise mundial no fornecimento de materiais como metais e borracha. Assim, em 1971 surgiu fibra de Kevlar, designação comercial de uma fibra aramida, que é uma fibra orgânica, fundida por uma solução líquida de polímero, e que usando aditivos solventes, variando as condições de centrifugação e usando tratamentos térmicos pós-inserção, possibilita mudanças das propriedades da fibra.

As fibras Kevlar possuem propriedades únicas. A resistência à tração e o módulo são substancialmente maiores e o alongamento da fibra é significativamente menor para as fibras de Kevlar do que para outras fibras orgânicas. Elas possuem, porém, baixa resistência à compressão, sendo esta, apenas um oitavo da resistência à tração. Por outro lado, apresentam textura flexível, não frágil como as fibras de vidro ou de grafite, sendo bastante semelhantes às fibras têxteis de vestuário,

permitindo assim, serem tecidas em tramas muito menores e complexas que o permitido nos tecidos de vidro, e assim podem ser facilmente tecidas em teares para tecidos convencionais. (MENDONÇA, 2005; AGARWAL, 2015)

Após a fabricação, as fibras de kevlar são comercializadas de diferentes formas, sendo as principais em forma de fios, fitas (tapes) e tecidos, representados na Figura 2.5.

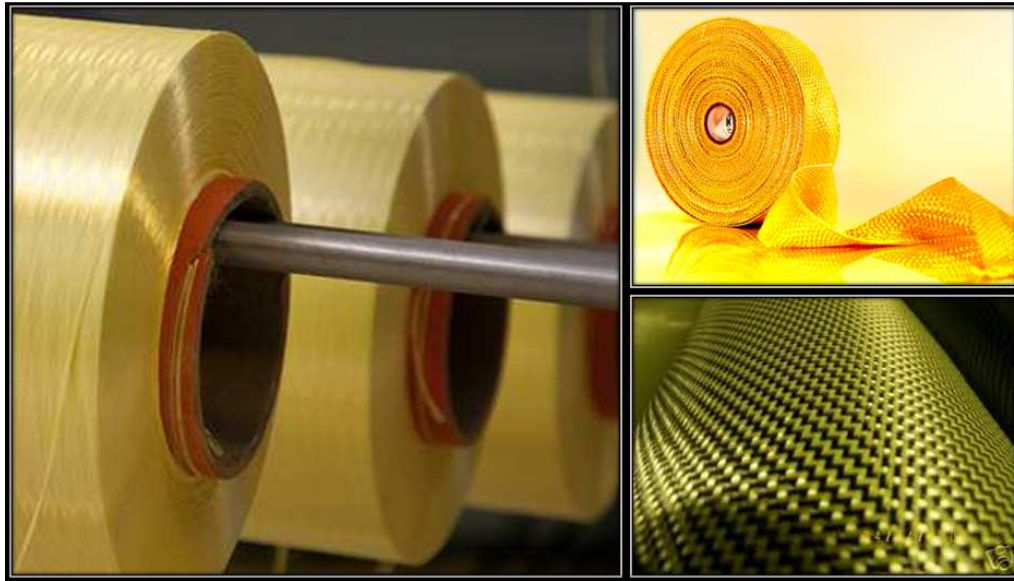


Figura 2.5: Principais formas comerciais da fibra de kevlar.

Fonte: Texiglass, 2017

Tendo em vista todas essas características, segundo a DuPont, o uso e aplicações das fibras de Kevlar, aqui em evidencia a Kevlar 49, são feitos em larga escala pelos mais diferentes segmentos ilustrados na Figura 2.6, podendo ser encontrados atualmente em:

- Luvas de proteção
- Correias transportadoras para mineração
- Componentes automotivos
- Blindagem
- Aplicações em petróleo e gás (mangueiras, tubos e tubulações)
- Proteção militar
- Cabos de fibra óptica
- Cintos de segurança



Figura 2.6: Uso e aplicações da fibra de Kevlar

Fonte: DuPont, 2017

2.3 COMPÓSITOS HÍBRIDOS

A escolha do tipo de reforço é muito importante, pois além de ter grande impacto nas propriedades finais do compósito, tem também grande importância no custo do produto final. Muitas vezes, é utilizado mais de um tipo de reforço com o objetivo de obter propriedades únicas e/ou reduzir custos, formando combinações híbridas. (DANTAS, 2012)

A palavra "híbrido" é de origem grego-latina e pode ser encontrada em inúmeros campos científicos. No caso dos compósitos poliméricos, os híbridos vêm se tornando comuns e são geralmente compostos de várias camadas (na forma de laminados), sendo definidos como sistemas nos quais dois ou mais materiais de reforço e enchimento estão presentes em uma única matriz (JAWAID, 2011).

Pegoretti *et al.* (2004), afirma que o tipo de hibridização depende da forma como os materiais constituintes são misturados, e classifica-os como:

- Híbridos *interply*: onde as camadas dos dois (ou mais) reforços homogêneos são empilhadas;
- Híbridos *intraply*: em que os fios dos dois (ou mais) tipos constituintes de fibras são misturados na mesma camada;

- Híbridos misturados: em que as fibras constituintes são misturadas o mais aleatoriamente possível, de modo que não existam diferenças de ambos os tipos no material;
- Inserção seletiva: em que os reforços são inseridos onde é necessária força adicional, sobre a camada de laminação de reforço de base;
- Componentes super-híbridos: compostos de folhas metálicas ou plugues metálicos empilhados em uma orientação e seqüência especificada.

Diante disto, os híbridos possuem uma melhor combinação global de propriedades do que os compósitos que contém somente um tipo de fibra. Jawaid e Abdul (2011) afirmaram que o comportamento dos compostos híbridos é uma soma pesada dos componentes individuais em que há um equilíbrio mais favorável entre as vantagens e desvantagens. Ao usar um composto híbrido que contém dois ou mais tipos de fibra, as vantagens de um tipo de fibra podem complementar com o que falta no outro. Como consequência, um equilíbrio no custo e desempenho poderia ser alcançado através do design de material adequado.

A resistência final dos compósitos híbridos depende das propriedades, teor, comprimento, orientação, extensão do entrelaçamento e disposição das fibras, além da ligação da interface com a matriz e também da tensão de falha das fibras. Os resultados híbridos máximos são obtidos quando as fibras são altamente compatíveis com a tensão.

Callister Jr. (2007) cita um exemplo usual dos compósitos híbridos, que é a incorporação de fibras de carbono e fibras de vidro, em uma matriz polimérica. Levando em consideração que as fibras de carbono são fortes e relativamente rígidas, em que proporciona um reforço de baixa densidade, porém de alto custo, enquanto que as fibras de vidro têm menor custo, mas necessitam da rigidez do carbono. Desta forma, o híbrido vidro-carbono é mais forte e resistente, possui maior resistência ao impacto e pode ser produzido a um custo menor do que compósitos de reforços feitos totalmente de fibra de vidro ou de carbono.

Assim os compósitos híbridos são cada vez mais utilizados nos vários segmentos da indústria, principalmente em componentes estruturais de transporte rodoviário, aquático e aéreo, equipamentos esportivos e componentes ortopédicos leves.

INTERFACE

A interface fibra/matriz comporta-se como um importante elo entre os materiais constituintes da estrutura dos compósitos poliméricos, pois transmite os esforços do carregamento da matriz para o reforço (as fibras) e pode ser definida como a região que está próxima à superfície das fibras e adjacente à matriz que as envolve. Porém, considerando a diferença significativa nas propriedades elásticas das matérias-primas do compósito, cabe à interface compatibilizá-las. Desta forma, se torna imprescindível para o entendimento das propriedades físicas e mecânicas dos materiais compósitos o conhecimento das propriedades da interface, que são específicas para cada sistema fibra/matriz.

Marinucci (2011) afirma que a resistência do acoplamento da fibra à matriz é garantida por ação mecânica e química, sendo esta última resultante da presença de grupos funcionais na superfície da fibra. O efeito das ligações químicas contribui para elevar a resistência da interface. No entanto, o efeito da contração da matriz (ação física) durante o processo de resfriamento no ciclo de cura, criando forças compressivas radiais, já seria suficiente para assegurar uma interação fibra/resina devido às forças de atrito. A contribuição da adesão física, no entanto, pode ser afetada pela característica da superfície da fibra. A morfologia da fibra pode afetar também a resistência transversal, pois nessa direção existe uma maior dependência da interação entre a fibra e a matriz polimérica.

O que ocorre, é que com o desenvolvimento alcançado na fabricação das fibras, tornando sua superfície receptiva às ligações químicas com a matriz, os dois fatores contribuem para um eficiente acoplamento, produzindo um aumento da resistência do compósito nas regiões intralaminares.

Visto isso, a resistência da ligação é uma consideração importante na seleção de uma combinação matriz-fibra. A resistência máxima do compósito depende em grande parte da magnitude dessa ligação; uma ligação adequada é essencial para maximizar a transmissão da tensão de uma matriz de baixa resistência para as fibras mais resistentes, como explica Callister Jr. (2007). Para tanto, os tratamentos superficiais permitem que sejam produzidas fortes ligações químicas entre os grupos reativos presentes na matriz e nas fibras.

2.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

A determinação das propriedades mecânicas do compósito é um aspecto indispensável, pois permite avaliar o potencial que o material possui para a aplicação estrutural. Ensaio mecânicos são

executados para a determinação destas propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material quando submetidos à ação de esforços.

Neste tópico serão abordados os ensaios de impacto, flexão em três pontos, bem como o ensaio para determinação da resistência residual à compressão após impacto (CAI), que representam alguns dos ensaios de maior utilização para caracterização dos materiais compósitos.

2.4.1 Ensaio de impacto em materiais compósitos

A resistência ao impacto é uma das mais importantes características do material em um projeto em que se queria prever as possibilidades de fratura prematura, neste trabalho utilizaremos o impacto como sendo a aplicação repentina de uma carga a qual leva o material à fratura.

Uma maneira muito comum de avaliar as propriedades de impacto é determinar a resistência do material medindo a energia necessária para quebrar um corpo de prova de geometria particular.

Abrate (2005) classifica o impacto em materiais compósitos em:

- Baixa velocidade
- Velocidade intermediária
- Alta velocidade (balística)
- Hipervelocidade

Galdino Jr. (2014) caracteriza o impacto de baixa velocidade em compósitos como sendo, o impacto de uma massa em um material, tendo como exemplo, a queda de uma ferramenta, onde normalmente ocorrem em velocidades inferiores a 10 m/s; Já de acordo com Abrate (2005), impactos de baixa velocidades ocorrem quando a velocidade do impactador é inferior a 100 m/s. Cantwell *et al.* (1991) caracterizam o impacto de baixa velocidade como impactos até de 10 m/s. Para Liu e Malvern (1987) o tipo de impacto pode ser classificado de acordo com o dano ocorrido no material. Enquanto Robinson e Davies (1992) definem impacto de baixa velocidade como sendo aquele no qual as ondas de tensão, que se propagam através da espessura, não têm comportamento significativo na distribuição de tensões e sugerem um modelo simples de transição para alta velocidade, aqui uma zona cilíndrica embaixo do impactador é submetida a uma deformação uniforme, enquanto a onda de tensão se propaga através da placa, resultando em uma deformação de compressão apresentada pela Equação 2.1:

$$\varepsilon_c = \frac{\text{Velocidade de impacto}}{\text{Velocidade do som do material}} \quad (2.1)$$

Ainda para Galdino Jr. (2014), os danos causados por impacto de velocidade intermediária ocorrem na faixa entre 10 e 50m/s, esse impacto é por vezes classificado como impacto de baixa e também como alta velocidade, e têm como exemplos objetos lançados por um furacão ou tornado, e objetos estranhos em estradas lançados contra veículos.

Já o impacto de alta velocidade, geralmente é resultado do impacto de pequenos fragmentos causado por armas de fogo (balística) ou fragmentos de ogivas explosivas. Este impacto ocorre pela propagação da onda de tensão através da espessura do material, em que a estrutura não tem tempo de responder, levando a um dano localizado. A velocidade desse impacto varia de 50m/s a 1.000 m/s.

Por fim, o impacto de hipervelocidade tem velocidades de 2 a 5 km/s, neste caso o projétil está se movendo em velocidades muito altas e o material alvo se comporta como um fluido. Este tipo de impacto é mais frequentemente estudado no desenvolvimento de proteção às espaçonaves contra o impacto de micrometeoritos, que pode causar grandes danos à estrutura. Para velocidades superiores a 12 km/s a propagação da energia ocorre a uma taxa tão elevada que ocorre vaporização dos materiais no instante da colisão (SANTOS, 2010).

A Tabela 2.2 apresenta os valores limites de baixa, alta e hipervelocidades de impacto. É preciso ter em atenção que estes limites dependem do material impactado, já que a reação e resposta do alvo ao impacto é o que realmente classifica a velocidade de impacto (JUSTO, 1996).

Tabela 2.2: Comportamento do alvo associado à velocidade de impacto

Velocidade	Classificação	Resposta do alvo
$\leq 250\text{m/s}$	Baixa velocidade	A estrutura do alvo responde globalmente ao impacto, o esforço de resistências à penetração é feito por toda estrutura do alvo.
Entre 500 a 2000 m/s	Alta velocidade	A estrutura do alvo responde ao impacto localmente, apenas uma pequena área ao redor do ponto de impacto oferece resistência à penetração e sofre dano.
$> 2000\text{m/s}$	Hipervelocidade	Entre 2000 e 3000m/s o alvo responde com um comportamento típico dos fluidos. Acima de 12000m/s observa-se vaporização do material ao ser impactado.

Fonte: Adaptado de Justo, 1996

Para Olsson (2000) a característica que diferencia os tipos de resposta ocorrentes durante o impacto é a razão definida pela massa do impactador em relação à massa da amostra. Em geral o impacto é caracterizado pela propagação de ondas elásticas de tensão a partir do ponto de impacto. Para impactos com um intervalo de tempo bem pequeno o resultado predominante é a propagação de ondas de tensão nas três direções do material (Figura 2.7a). Para intervalos maiores de tempo, a resposta é inicialmente seguida por ondas de flexão e ondas de cisalhamento (Figura 2.7b). Para impactos com intervalos de tempos muito maiores (Figura 2.7c) a resposta é dominada pelos modos mais baixos de vibração da lâmina.

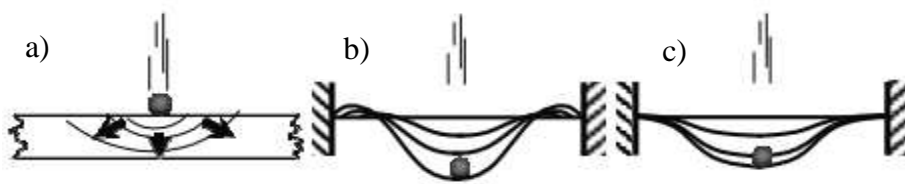


Figura 2.7: Tipos de danos causados em função da velocidade de impacto

Fonte: Olsson, 2000

2.5 TIPOS DE ENSAIOS DE IMPACTOS EM COMPÓSITOS

Para cada classificação de impacto apresentada anteriormente, há diferentes ensaios mecânicos que caracterizam o comportamento dos materiais compósitos quando submetidos às mais variadas formas de impactos. A seguir, serão apresentados alguns desses métodos.

2.5.1 Impacto de alta velocidade

2.1.1.1 Barra De Hopkinson

Pinto (2009), define a barra de Hopkinson como um dispositivo desenvolvido para caracterizar mecanicamente materiais a elevadas velocidades de deformação (normalmente entre 10^2 e os 10^4 s^{-1}). O modo de utilização mais conhecido da barra de Hopkinson é a *Split Hopkinson Bar*, apresentada na Figura 2.8. Esta consiste em duas longas barras cilíndricas com o mesmo diâmetro, designadas por barra incidente e barra transmissora, e uma barra cilíndrica de menor comprimento, designada por barra de impacto ou barra projétil, normalmente impulsionada por uma arma de pressão de ar comprimido contra a barra incidente. O ar é normalmente fornecido através de um reservatório de alta pressão e a pressão do disparo é controlada através de válvulas.

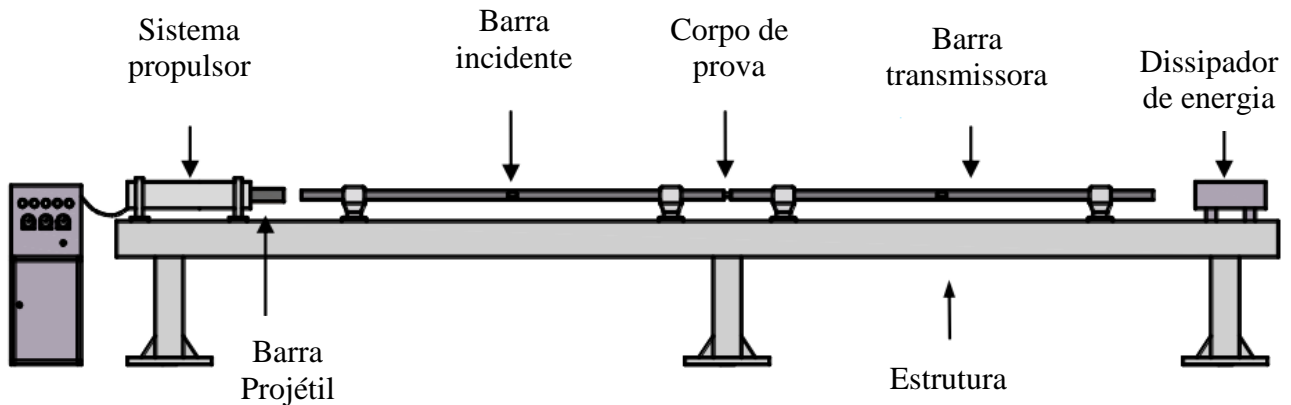


Figura 2.8: Barra de Hopkinson

Fonte: Pinto, 2009

2.1.1.2 Impacto balístico

Um impacto balístico é, um impacto a alta velocidade de um projétil de baixa massa contra um alvo, e é caracterizado por provocar elevadas taxas de deformação no alvo e no projétil. Durante o impacto é feita a transferência de energia cinética do projétil para o alvo, cuja principal função será maximizar a absorção dessa energia, em consequência às altas velocidades envolvidas, a resposta do alvo é de carácter localizado e predominam os efeitos da propagação das ondas de tensão compressiva criadas. (PASQUALI *et al* , 2015; SANTOS, 2016)

Teste de impacto nas taxas de deformação balísticas podem ser feitas através de armas de pressão a gás, como apresentado no esquema da Figura 2.9. Normalmente um gás como o nitrogênio alimenta uma câmara localizada no final de um tubo. O gás é restringido por um diafragma plástico. Quando este é um valor pré-determinado ou diafragma é queimado, acelerando o projétil em direção ao alvo, ou seja, ao corpo de prova. A velocidade de impacto pode ser utilizada em todos os sensores ópticos. Geralmente o teste não é completamente destrutivo, mas frequentemente resulta em um dano de larga escala ou perfuração do corpo de prova. Além disso, já existem armas de gás instrumentadas proporcionando uma obtenção de gráficos força x deslocamento e assim uma análise mais detalhada do evento de impacto. Armas de gás podem ser utilizadas para testar grandes estruturas que são bastante úteis para uma determinação de respostas ao impacto em alta velocidade de materiais compósitos. (SILVA, 2004)

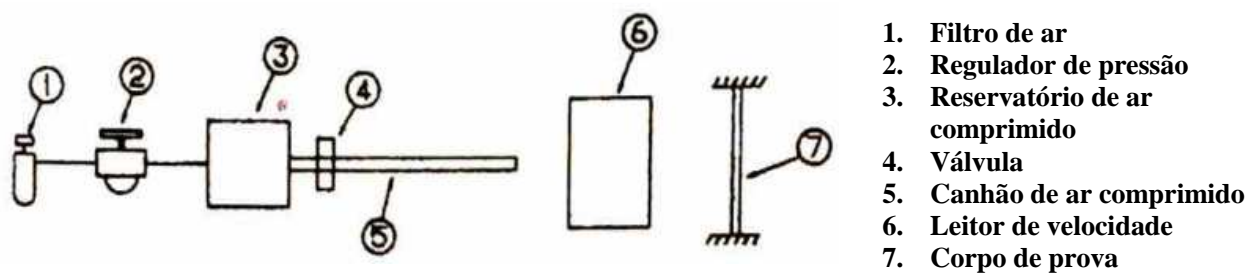


Figura 2.9: Canhão de ar comprimido

Fonte: Adaptação de Moura (2011)

2.5.2 Impacto de média velocidade

Esse impacto ocorre numa faixa de velocidade entre 10 e 100 m/s, ou seja, compreendido entre os regimes de alta e baixa velocidade. Dependendo da massa do projétil, um grande dano pode ocorrer na amostra testada nessa velocidade de ensaio, sem necessariamente danificar o impactador. A importância desse método não é somente a caracterização do dano, mas também investigar a dissipação da energia e o mecanismo de falha. O equipamento utilizado para este ensaio geralmente é o mesmo utilizado no ensaio para teste balístico, ou seja, com armas de gás de alta pressão (GALDINO Jr., 2014).

2.5.3 Impacto de baixa velocidade

Moura, *et al.* (2011), afirma que o impacto de baixa velocidade é, sem dúvida, a solicitação mais perigosa por duas razões. A primeira relaciona-se com extensas zonas danificadas e com o tipo de dano que provoca, que se caracteriza por delaminações entre camadas e por fissuras transversais. De forma que, as delaminações podem afetar de uma forma drástica a resistência residual da estrutura, principalmente quando submetida à solicitações de compressão. A segunda está ligada ao fato do dano não ser visível a olho nu, ou seja, não se observa geralmente penetração ou fissura superficial. Além disso, este tipo de solicitação é a mais comum, quando leva-se em consideração por exemplo, a queda de ferramentas durante a fabricação ou manutenção de estruturas, o manuseio descuidado, a queda de granizo, o impacto de aves nas aeronaves, entre outras situações típicas de utilização.

Para as mais diversas situações, existem ensaios de impactos de baixa velocidade adequados que podem-se agrupar em dois tipos: os dispositivos pendulares e os de queda de peso, podendo citar como mais utilizados os ensaios Charpy, Izod e Impacto por queda de peso (*Drop Test*).

2.5.3.1 Ensaio Charpy e Izod

Muitos dos primeiros estudos de impacto sobre materiais compósitos foram realizados usando o método de ensaio Charpy originalmente desenvolvido para ensaios de metais. A razão para esta escolha foi o fato de que o ensaio Charpy é simples de usar e pode ser instrumentado, portanto, pode produzir informações sobre os processos de absorção e dissipação de energia em compósitos. (GALDINO Jr., 2014)

Os ensaios Charpy e Izod estão incluídos nos dispositivos pendulares, de modo que no método de Charpy, segundo Dias *et al* (2009), a amostra é simplesmente apoiada nas duas pontas, e atingida por um pêndulo no seu ponto médio, transferindo para o corpo de prova parte da sua energia cinética, sendo a restante dissipada. Os corpos de prova utilizados têm geralmente a forma de uma viga espessa, possuindo um entalhe no seu ponto médio, como mostrado na Figura 2.10.

A diferença entre as técnicas Charpy e Izod, está na maneira como o corpo de prova é sustentado, em que diferente do Charpy, no método Izod, o corpo de prova é fixo numa extremidade e livre na outra.

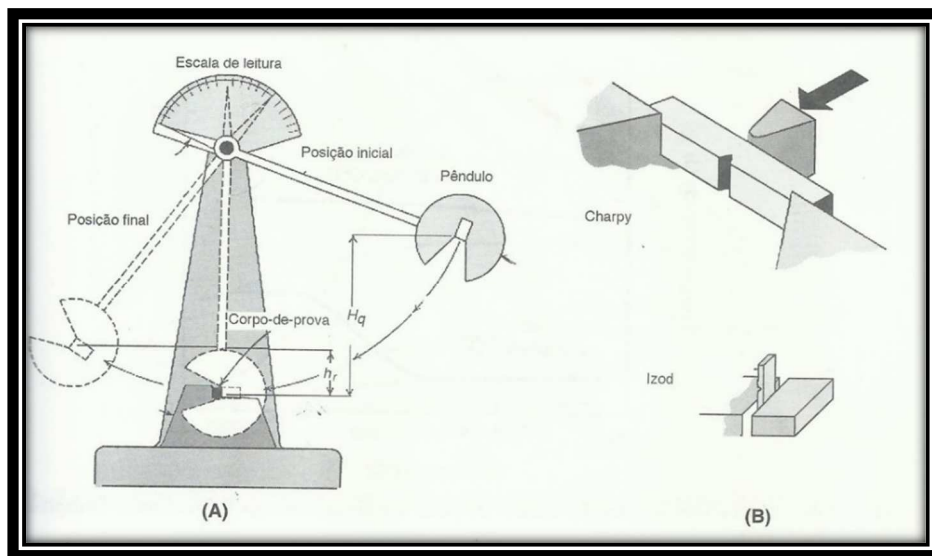


Figura 2.10: Representação dos ensaios de impacto do tipo Charpy e Izod.

Fonte: Callister (2007)

A energia absorvida pelo corpo de prova é geralmente indicada pela posição do ponteiro numa escala circular, anexada a máquina de ensaios. A escala deve ser calibrada de forma a que a posição do ponteiro indique a diferença entre a energia cinética do pêndulo no instante em que se dá o impacto e a energia cinética contida no pêndulo pós impacto.

O teste Charpy só é adequado para classificação de impacto dos compósitos de fibra contínua e como uma primeira etapa para determinar a resistência dinâmica destes materiais (AZEVEDO, 2017).

2.5.3.2 Ensaio de impacto por queda de peso

O ensaio de queda de um peso substituiu em muitas aplicações os ensaios de Charpy/Izod e é atualmente o mais utilizado na comunidade científica, que trabalha em estudos experimentais do impacto em estruturas de material compósito. Este tipo de teste permite obter informação sobre as propriedades dinâmicas na absorção da energia, resistência à fratura, mecanismos de falha, redução da resistência e sensibilidade ao entalhe. Aqui, um peso é permitido cair de uma altura predeterminada para atingir o corpo de prova ou placa suportada no plano horizontal. Cantwell e Morton (1991), afirmam que em geral, o evento de impacto não causa destruição completa da amostra de teste, mas rebotes, permitindo que uma energia residual seja determinada se necessário.

O ensaio normatizado pela ASTM D7136 (2015), determina a resistência ao dano das placas laminadas compostas de matriz polimérica multidirecional sujeitas a um evento de impacto de queda de peso. Segundo a norma, uma placa plana retangular de material compósito é sujeita a um impacto concentrado provocado por um peso ligado a um impactador semiesférico, conforme ilustrado na Figura 2.11. No ensaio de impacto por queda de peso pode ocorrer que o impactador atinja o corpo de prova várias vezes, causando um dano excessivo que não é representativo de um único impacto. Para evitar impactos repetidos, o equipamento para realização do ensaio de impacto por queda de peso é equipado com um dispositivo para evitar o segundo impacto, do qual chama-se de anti-rebote.

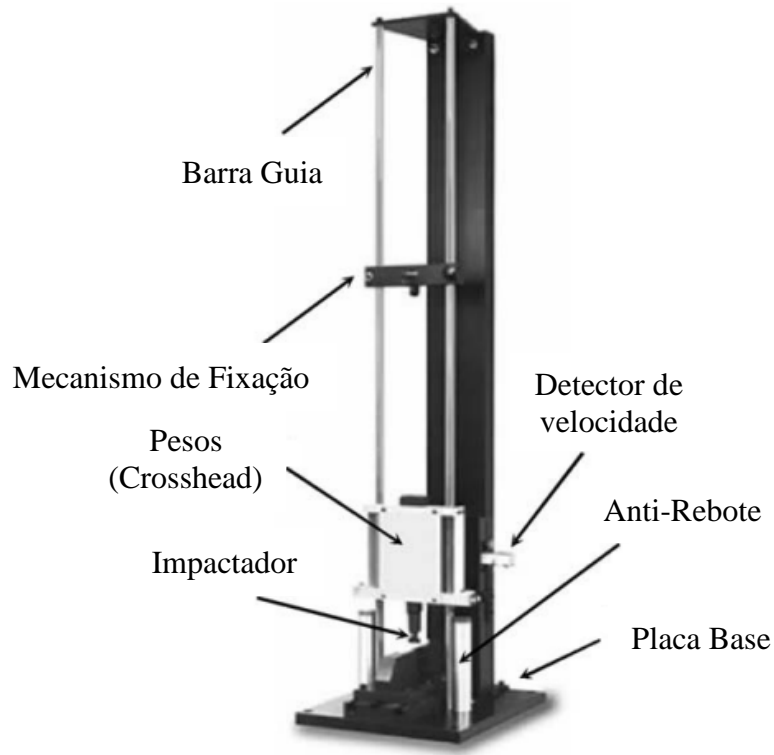


Figura 2.11: Representação do ensaio *drop test*.

Fonte: Adaptação ASTM D7136 (2015)

A norma ASTM D7136 também especifica que o tamanho da placa deve ser de 100 x 150 mm, como ilustrado na Figura 2.12, pois este corpo de prova pode ser utilizado no ensaio de Compressão após Impacto (CAI), utilizado para avaliar a resistência residual dos materiais compósitos após serem submetidos ao impacto de baixa velocidade, normatizado pela ASTM D7137.

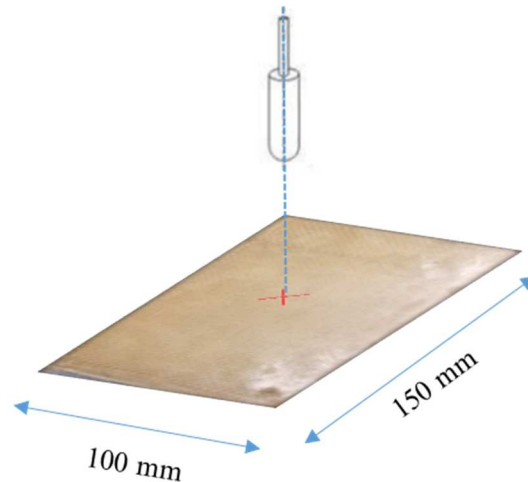


Figura 2.12: Esquema representativo do ensaio do impacto por queda de peso.

Fonte: Azevedo, 2017

Após o contato do impactador é esperado que o primeiro tipo de dano se manifeste no laminado por fissuras na matriz. As extremidades dessas fissuras atuam como pontos de iniciação da delaminação e quebra das fibras que podem afetar seriamente a rigidez local e global do laminado (FERREIRA, 2006). Segundo, a natureza e a extensão, os mecanismos de dano ocorrem em diferentes níveis, por um grande número de parâmetros: massa do impactador, velocidade do impactador, tipo de fibra e de matriz, tratamento interfacial, volume percentual de fibra, geometria do laminado, condições de contorno e tensões residuais (BIASE, 2009).

Uma das vantagens deste teste em relação aos testes Charpy e Izod é que uma maior variedade de geometrias podem ser testadas, permitindo que os componentes mais complexos sejam testados. Embora o teste seja geralmente realizado usando um impactador semi-esférico, é possível usar outras formas de impactadores, como cilindros contundentes ou pontos afiados. (CANTWELL e MORTON, 1991)

2.6 ENSAIO DE FLEXÃO

Os ensaios de flexão são muito utilizados, dada a simplicidade dos procedimentos e dos equipamentos necessários. O objetivo é geralmente obter o módulo E_I e a resistência longitudinal mínima. Estes ensaios são classificados em dois tipos, flexão em três pontos e flexão em quatro pontos, conforme o número de suportes e de pontos de carregamentos utilizados. (MOURA *et al.*, 2011)

O ensaio de flexão em 3 pontos que analisa o material submetido a cargas durante a sua fase elástica, e é normatizado pela ASTM D790 (2015), que especifica que o corpo de prova deve possuir dimensões retangulares e a largura deve ser calculada de acordo com a espessura do material. Além disso, define que para este ensaio são utilizados: dois roletes, cujos diâmetros dependem das dimensões do corpo de prova ensaiado; e um cutelo semicilíndrico, o qual ficará a parte superior e permitirá a aplicação da carga de ensaio, como apresentado na Figura 2.13.

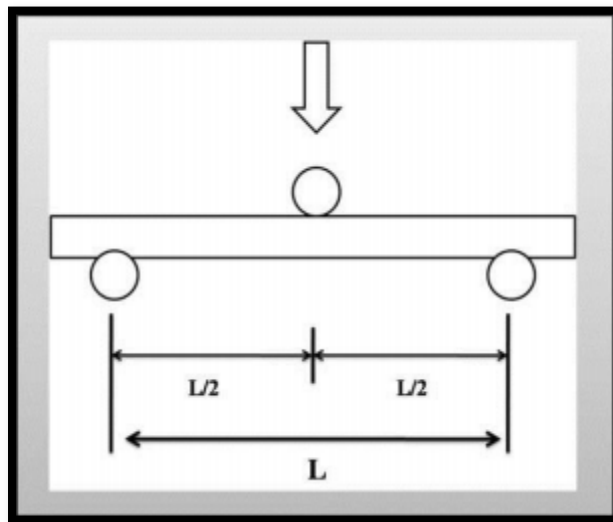


Figura 2.13: Esquema do Ensaio de flexão à três pontos

Fonte: Holanda, 2013

2.7 ANÁLISE RESIDUAL

Os materiais compósitos são muito sensíveis ao dano por impacto, assim tem-se uma redução drástica na resistência residual do material, perante solicitações de tração, compressão, flexão, corte e de fadiga (Moura, 2011), e com isso uma perda da sua integridade estrutural. Neste contexto, o

termo *tolerância ao dano* refere-se a capacidade de materiais compósitos manter suas propriedades mecânicas após o impacto.

Segundo Abrate (2005) os danos por impactos pouco visíveis podem causar reduções na resistência residual de até 50 %, onde a resistência residual em tensão, compressão, flexão e fadiga serão reduzidas em graus variáveis dependendo do tipo de danos causado.

Para avaliação das propriedades residuais dos materiais compósitos laminados, o ensaio de compressão após impacto (CAI) se apresenta como um dos meios mais utilizados.

2.7.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO APÓS IMPACTO

A resistência à compressão é, sem dúvida, a propriedade do material mais afetada pelas solicitações de impacto. Este tipo de solicitação pode reduzir a resistência do material à compressão em cerca de 60%, devido fundamentalmente à delaminações que provoca. Estas, afetam o comportamento do material à compressão em duas vias distintas: De uma forma direta diminuindo sua resistência residual; De uma forma indireta, em que são responsáveis pela alteração da distribuição de forças na estrutura, o que origina uma sobrecarga e uma consequente ruptura de zonas não danificadas. (MOURA *et al.*, 2011)

Diante disto, o CAI é um dos meios mais comuns de avaliação das propriedades residuais dos laminados compósitos. Isto deve-se principalmente à instabilidade local resultante da delaminação, causando grandes reduções na resistência à compressão. Como a delaminação pode ser produzida por impactos de baixa energia, podem ocorrer reduções de grandeza na compressão, visto que a delaminação divide o laminado em sub-laminados que possuem menor rigidez de flexão do que o laminado original e são menos resistentes às cargas de flambagem. (ABRATE, 2005).

Abrate (2005) descreve também que sob uma carga compressiva, uma delaminação pode causar flambagem em um dos três modos: instabilidade global/encurvatura do laminado, instabilidade local (flambagem do sub-laminado mais fino), ou uma combinação dos acima, apresentados na Figura 2.14. O modo de falha geralmente muda de modo global, local e modo misto à medida que o tamanho de delaminação aumenta. Em alguns casos, os guias anti-flambagem são usados para apoiar o corpo de prova para prevenir encolhendo, mas ao mesmo tempo não deve evitar a instabilidade local.

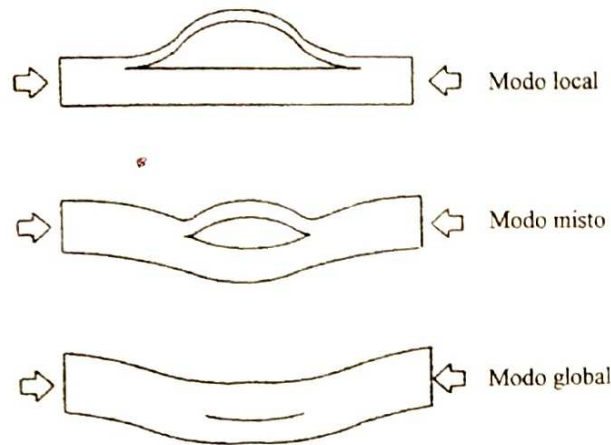


Figura 2.14: Diferentes modos de colapso numa solicitação de compressão após impacto

Fonte: Moura, 2011

O método de ensaio ASTM D7137 é utilizado como referência para medir a resistência residual compressiva de uma placa compósita de matriz polimérica reforçada com fibras. Esta norma é ligada ao padrão ASTM D7136, que é utilizada para o teste de impacto por queda de peso, como relatado no item anterior.

Nesse contexto, o ensaio CAI consiste em instalar o laminado danificado em uma fixação de suporte de peça múltipla, em seguida o conjunto da fixação do corpo de prova é colocado entre placas planas e carregado por extremidade sob força de compressão até a falha da amostra. O conjunto de teste de compressão padrão usa placas de retenção ajustáveis para suportar as bordas da amostra. Além disso, os apoios superior e inferior estendem o deslocamento compressivo para o corpo de prova. Esses suportes são planos e paralelos, e não fornecem nenhum aperto, mas uma certa restrição à rotação fora do plano devido à geometria da fixação. As bordas descarregadas do corpo de prova são restritas por suportes laterais que são suportes do tipo faca-ponta e não fornecem restrição rotacional (AZEVEDO, 2017), como apresentado na Figura 2.15.

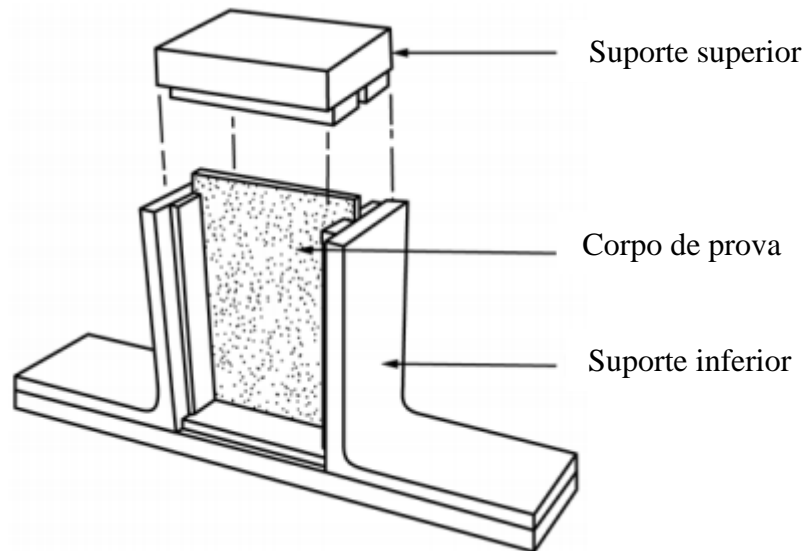


Figura 2.15: Garra suporte para realização de CAI

Fonte: Adaptado de ASTM D7137 (2012)

As propriedades que resultam da avaliação da resistência residual incluem as seguintes: resistência residual à compressão F^{CAI} , força de compressão em função do deslocamento do suporte e tensões superficiais como funções de deslocamento do suporte. (ASTM D3137 (2012))

2.8 MECANISMO DO DANO

O conhecimento das propriedades da interface, que são específicas para cada sistema fibra/matriz, é essencial para conduzir a um entendimento das propriedades físicas e mecânicas dos materiais compósitos, sendo um dos fatores mais importantes para avaliar o comportamento mecânico do laminado.

Para tanto, são necessárias análises macro e microscópicas da fratura final do compósito, afim de caracterizar o dano e assim, visualizar a interação fibra/matriz.

2.8.1 Análise macroscópica

São vários os fatores que podem influenciar no mecanismo de dano nos materiais compósitos que são a falta de molhabilidade do material de reforço, causando assim uma baixa aderência fibra/matriz e como consequência um baixo desempenho mecânico, além de fatores externos como:

Processo de fabricação do compósito; Propriedades físicas, químicas, mecânicas e térmicas da fibra e matriz; Interface fibra/matriz e teores de reforço, matriz e vazios; Configuração do compósito; Agentes externos tais como: umidade, temperatura e radiação ultravioleta; em que os compósitos podem ser submetidos durante o seu uso. (FELIPE (a), 2012)

Na análise macroscópica dos mecanismos de danos os mesmos são visíveis a olho nu. Dentro dessa análise pode-se destacar pelo menos duas formas de dano: quando o mesmo se dá por tempo de uso, principalmente em ambientes agressivos (desgaste no material), ou quando o mesmo é originado pela ação de carregamentos externos, ou seja, a fratura mecânica do elemento estrutural.

Segundo Felipe (a) (2012), quando o mecanismo de dano é originado por falha mecânica na estrutura proveniente da ação de um carregamento externo, a análise macroscópica pode iniciar caracterizando o tipo de fratura final. Como por exemplo, o caso dos elementos submetidos a um ensaio de compressão após impacto (CAI) onde essas formas de fraturas são estabelecidas pela norma, ASTM D7137 (2012) que ilustra as possíveis características da fratura final para um corpo de prova, de acordo com a Figura 2.16 e Tabela 2.3.

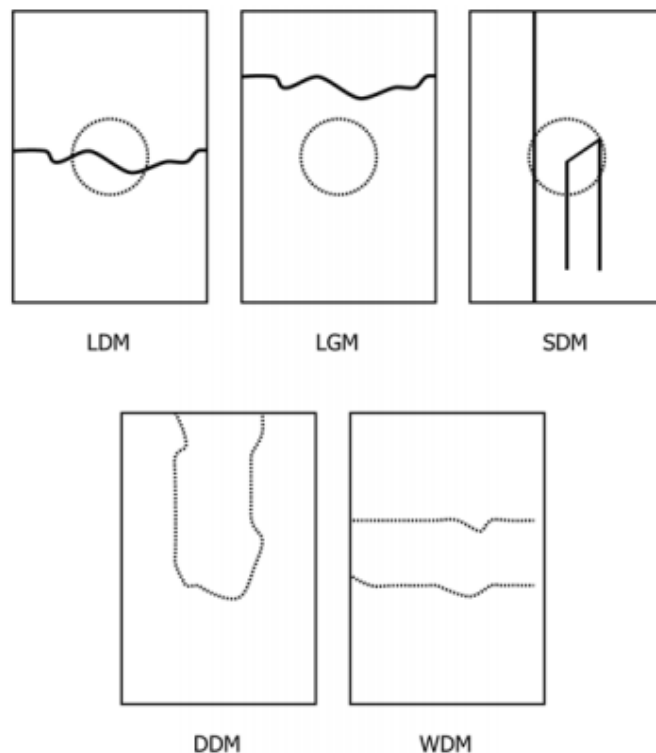


Figura 2.16: Modos de falha de resistência residual à compressão aceitáveis comumente observados

Fonte: ASTM D7137 (2012)

Tabela 2.3: Código das características do modo de falha à CAI

Código	Caracterização
LDM	Lateral no dano no meio
LGM	Lateral longe do dano no meio
SDM	Longo no dano no meio
DDM	Crescimento de delaminação (longitudinal) em dano no meio
WDM	Crescimento de delaminação (transversal) em dano no meio

Fonte: ASTM D7137 (2012)

No que se refere aos danos causados por impacto, os principais parâmetros que precisam ser conhecidos para analisa-los são: material, geometria, massa, velocidade, energia cinética do impactador e a máxima força de contato. Apenas quando esses aspectos são definidos pode-se analisar realmente quais os efeitos e consequências de um impacto em um compósito.

Azevedo (2017), afirma que deve-se analisar o possível modo de falha durante o impacto, onde ele poderá causar falhas dos tipos: Fissura/Trincas na matriz, delaminação, ruptura da fibra e perfuração.

O dano causado por impacto de baixa velocidade caracteriza-se por ruptura da matriz e delaminações entre camadas. A ruptura de fibras é limitada, e quando existe, está confinada à zona de contato. Enquanto o aparecimento de delaminações nas interfaces entre camadas está relacionada com diferença de rigidez existente entre elas, sobretudo à flexão. É importante salientar que o tamanho das delaminações aumenta com a diferença de orientação das camadas adjacentes à interface. Por outro lado, constata-se que nos laminados pouco espessos, o tamanho das delaminações aumentam nas interfaces situadas junto à superfície solicitada, quando comparadas às interfaces situadas mais longes dessa mesma superfície. (MOURA *et al.*, 2011)

Outro fato a ser considerado é que a sequência de empilhamento das camadas nos compósitos laminados desempenha um papel importante na tolerância ao dano. A propagação do dano pode ter início no lado do impacto ou no lado contrário conforme a rigidez da amostra. Para cargas de impacto que geram grandes tensões de flexão na camada mais afastadas do ponto de contato conduzem a danos na interface fibra-matriz que, por sua vez, induzem delaminações. Os níveis de energia que promovem o dano local (esforço de contato) dão origem essencialmente a falhas na interface fibra/matriz com a consequente delaminação (SANTOS, 2010), como apresentados Figura 2.17.

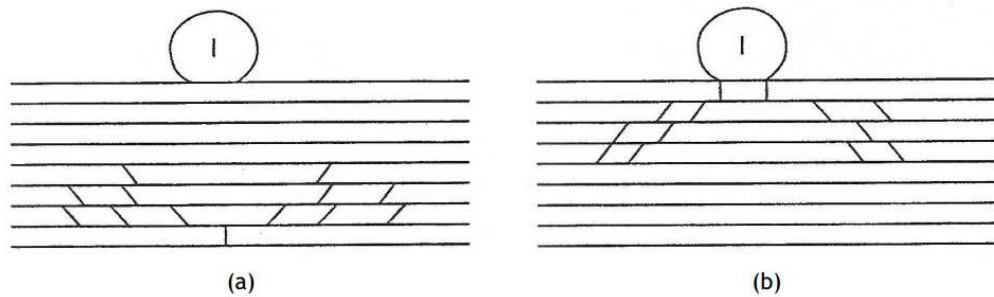


Figura 2.17: Representação esquemática da progressão dos danos devido a: (a) Esforço de flexão; (b) Esforço de contato

Fonte: Santos, 2010

Segundo Abrate (2005), o rompimento da fibra ocorre depois da trinca na matriz e da delaminação no processo de fratura. Este rompimento é localizado abaixo do impactador devido as elevadas tensões no local, e na face que não sofre impacto devido as elevadas tensões de flexão. O rompimento da fibra precede o modo de penetração total do corpo de prova, causando danos catastróficos.

A penetração é de um modo de falha macroscópico e ocorre quando o rompimento das fibras atinge um ponto crítico, permitindo que o impactador penetre completamente no corpo de prova. A energia de impacto para penetrar o corpo de prova aumenta de acordo com a espessura da amostra. Abrate (2005) descreve que as principais formas de absorção de energia durante a penetração em materiais compósitos laminados são: cisalhamento fora do plano, delaminação e flexão elástica. Dessas formas, o cisalhamento fora do plano corresponde de 50 a 60%, dependendo da espessura do corpo de prova. Vários fatores, incluindo o dimensionamento e a orientação da fibra, tipo de matriz e a interface fibra-matriz tem uma influência significativa na penetração da amostra.

As características de fratura aceitáveis para o ensaio de impacto por queda de peso são determinadas pela norma ASTM D7136 (2015), como mostram a Figura 2.18 e Tabela 2.4. Além disso, a norma garante que também permite que mais de um modo de danos pode estar presente em uma amostra ensaiada.

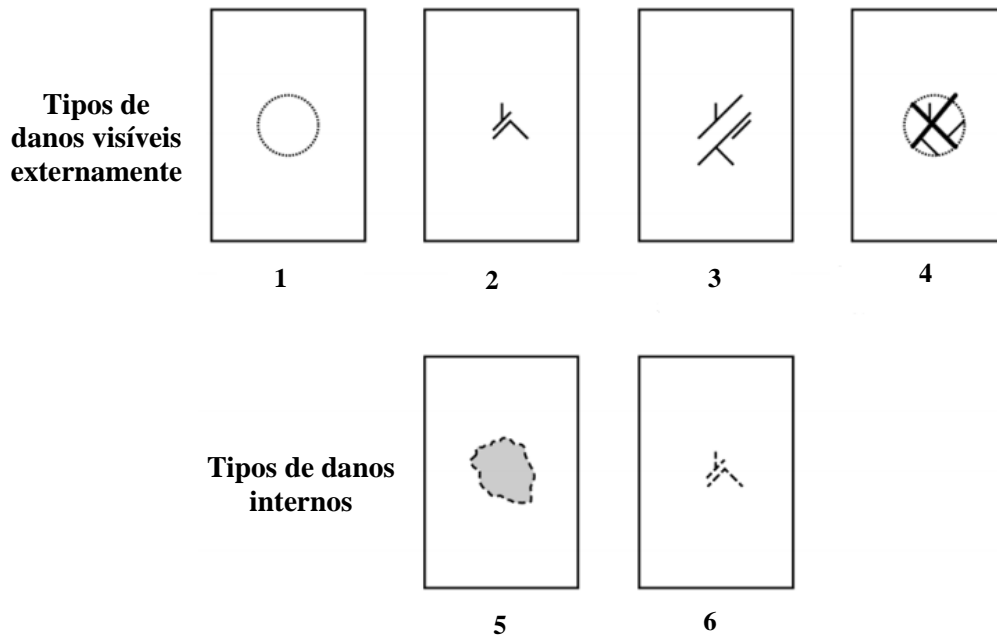


Figura 2.18: Modos de dano comumente observados no impacto de queda de peso

Fonte: ASTM D7136 (2015)

Tabela 2.4: Características do modo de falha ao impacto de queda de peso

Tipo de dano	Caracterização
1	Entalhe / Depressão
2	Fissuras / Quebras
3	Fissuras e delaminações combinadas
4	Fissuras, ruptura de fibras e perfuração combinados
5	Delaminações (Indicado por inspeção não destrutiva)
6	Fissuras (Indicado por inspeção não destrutiva)

2.9 ANÁLISE MICROSCÓPICA

Quando utilizada a análise microscópica, outros modos de falhas podem ser ressaltados, visto que esta análise identifica no material compósito a interação fibra/matriz, o comportamento mecânico do compósito, a determinação das razões de falhas assim como a propagação das trincas e fissuras nestes materiais. Através da microscopia ótica ou microscopia eletrônica de varredura podem ocorrer três tipos de falhas que auxiliam na análise da adesão fibra/matriz. Segundo Marinucci (2011) estas são:

- Falha adesiva entre as matérias-primas constituintes, provocando fratura na região que poderia ser delimitada pela interface;
- Falha coesiva, resultando em fratura da resina junto à interface;
- Falha coesiva, resultando em fratura da fibra junto à interface.

Um exemplo destas fraturas ocorridas em ensaio de impacto é apresentado na Figura 2.19.

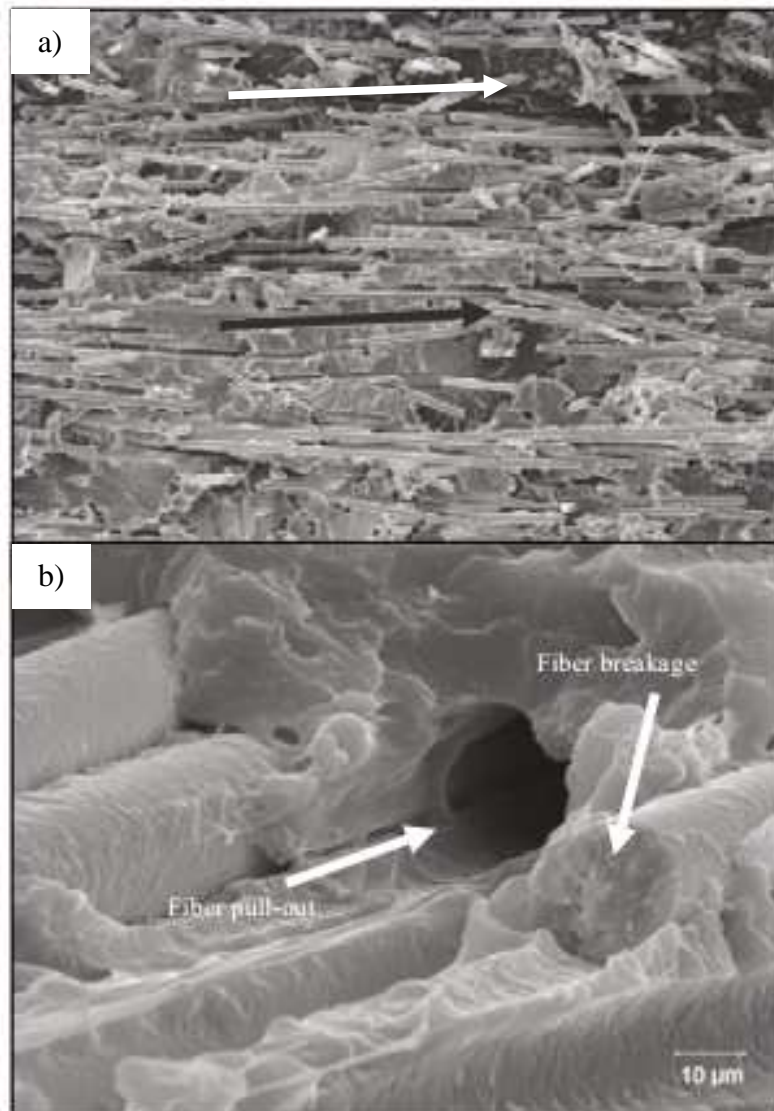


Figura 2.19: Dano causado por impacto de velocidade intermediária. As setas indicam em (a) a direção da propagação de fissuras; em (b) a existência das fraturas adesiva e coesiva.

Fonte: Abrate, 2005

2.10 ESTUDOS EM COMPÓSITOS IMPACTADOS – ESTADO DA ARTE

Os danos causados por impactos de queda de peso são dependentes de muitos fatores, como interface fibra/matriz, espessura do compósito, espessura da camada, hibridização, sequência de empilhamento, ambiente, geometria, massa do pêndulo, geometria da ponta do impactador, velocidade do impacto, energia de impacto, e condições do impacto. Estudos são desenvolvidos por vários pesquisadores tratando da influência desses fatores nos danos causados por impactos além de verificar a influência na resistência residual de compressão após impacto por queda de peso (CAI).

Com o intuito de apresentar a influência da utilização da fibra de kevlar na hibridização, Gustin, *et al.* (2005) desenvolveram um estudo em que o impacto, a compressão após o impacto e as propriedades de resistência à tração dos compósitos sanduíche de fibras de carbono e híbrido Kevlar foram investigados. Como resultado da pesquisa, foi concluído que a adição de Kevlar ou híbrido nas faces externas do compósito sanduíche melhorou o padrão deste durante e após o impacto, além de ter minimizado a redução na resistência à compressão após o impacto quando comparadas amostras não impactadas às em que ocorreu penetração total do impactador.

Outra pesquisa que analisou o impacto em compósitos híbridos, foi desenvolvida por Sayer *et al.* (2010). Neste estudo experimental, o comportamento de impacto de placas compostas híbridas foi investigado. A energia de impacto crescente foi realizada em dois tipos de placas compostas híbridas (vidro-carbono/epóxi) até a perfuração completa dos espécimes. Um método de perfil de energia, que mostra a relação entre energia de impacto e energia absorvida, foi usado em conjunto com curvas de desvio de carga para determinar os limiares de penetração e perfuração de compósitos híbridos. Os processos de falha de corpos de provas danificados para diferentes energias de impacto foram avaliados comparando curvas em função de carga-deflexão e imagens de amostras danificadas retiradas de lados impactados e lados não impactados. As secções transversais das especificações danificadas também foram inspecionadas visualmente e discutidas para avaliar a extensão do dano, como fratura de fibra em camadas, expansão de delaminações entre camadas adjacentes. O limiar de perfuração do composto híbrido impactado da superfície com fibras de carbono foi encontrado aproximadamente 30% maior que o da superfície com fibras de vidro.

Ainda analisando o impacto em compósitos híbridos, Aktas *et al.* (2014) investigaram o efeito do padrão de pontos no comportamento de impactos e compressão pós impacto (CAI) de placas compostas híbridas de malha tecida de oito camadas consistindo de tecidos 2D como camadas

externas e tecidos de malha de costela como camadas internas à base de vidro/epóxi. As camadas das placas compostas híbridas de malha tecida foram costuradas em forma circular, quadrada e diamante através da espessura, a fim de evitar a delaminação e deslizamento entre as camadas. Os testes foram realizados para determinar o impacto e a CAI das três diferentes estruturas compostas costuradas. Os resultados mostraram que a resistência ao impacto do laminado compósito aumentou 5,5%, 11% e 22% no caso de costuras quadradas, diamantes e costura circular, respectivamente. Verificou-se também que os compósitos híbridos de malha tecida com padrão quadrado possuem a maior força CAI e ainda que, o dano de CAI começa em torno da zona de danos de impacto e avança até a borda das placas compostas.

Pegoreti *et al.* (2004), também estudou o efeito de diferentes tipos de hibridização nas propriedades mecânicas de tração e impacto de compósitos híbridos de reforço em tecidos de vidro-E e poli (álcool vinílico) sendo utilizados nas configurações *interply*, em que camadas de diferentes reforços são empilhados, e *intraply* em que fios dos diferentes reforços são misturados numa mesma camada. As curvas tensão-deformação se mostram expressamente afetadas pelas seqüências de empilhamento. Foi comprovado que, através de um projeto apropriado de laminado, os híbridos vidro-E/PVA poderiam atingir propriedades de tração específicas comparáveis ou superiores às do laminado homogêneo de vidro-E, com um alongamento melhorado. Em particular, foram obtidos melhores desempenhos de tração a partir de híbridos de intercalação simétrica com camadas internas de vidro-E. Além disso, os dados de impacto mostram claramente que os compósitos híbridos *intraply* atingiram valores de índice de ductilidade mais elevados quando comparado com os de híbridos *interply* e compósitos homogêneos, provavelmente devido à maior eficiência em dificultar a propagação de fissuras, possuindo vidro-E e fibras de PVA misturados na mesma camada.

A influência da seqüência de empilhamento para o impacto e compressão após impacto, foi estudada por Ghelli *et al.* (2011). Nesta pesquisa, o impacto de baixa velocidade e CAI, foram realizados em laminados de carbono/epóxi de duas geometrias diferentes de acordo com dois padrões ASTM distintos, considerando também duas seqüências de empilhamento diferentes. A diferença nas dimensões da amostra e no dispositivo de suporte produziu diferentes impactos de resposta e danos, cujos corpos de provas circulares menores foram submetidos a uma delaminação mais prolongada que os retangulares maiores após o impacto na mesma energia. A espessura relativamente pequena dos laminados estudados levou à instabilidade elástica dos espécimes durante os testes de compressão, independentemente das dimensões e da orientação das fibras, isso afetou a medida da

resistência à compressão. O fato de que a delaminação produzida por impacto pode alterar o modo de encurvamento e/ou diminuir a carga crítica e a força máxima (até 25%), dependendo da configuração, é particularmente importante.

Gemi *et al.* (2016) investigou o impacto e o comportamento pós-impacto de 4 tubos de carbono/epóxi. Os tubos híbridos com classificação funcional foram submetidos a diferentes valores de pressão interna (4,16 e 32 bar), a resposta de impacto e a capacidade de absorção de energia foram estudadas com energias de impacto de 5, 10, 15 e 20 J. O efeito do dano de impacto na força de ruptura estática também foi medida. De acordo com os resultados obtidos, os testes de impacto de baixa velocidade revelam que características de impacto como força de contato máxima, deflexão máxima, e a energia absorvida teve aumento concomitante à aplicação de maior energia de impacto para as mesmas pressões internas aplicadas do composto. Contudo, o tempo de contato e a deflexão diminuíram com o aumento da pressão interna para os mesmos níveis de energia de impacto. O dano de impacto tende a aumentar com o aumento da energia de impacto, enquanto o dano diminuiu com o aumento da pressão interna para os mesmos níveis de energia de impacto. Além disso, o maior dano de impacto foi determinado para a energia de impacto de 20J sob 4 bar de pressão interna.

Ibekwe *et al.* (2007) desenvolveram um estudo em que, as vigas compostas unidirecionais e cruzadas reforçadas com fibra de vidro foram submetidas a um impacto de baixa velocidade e à compressão após o impacto (CAI) à baixas temperaturas. A temperatura teve um efeito significativo nas respostas de impacto de baixa velocidade de compósitos laminados, de forma que, mais danos ao impacto são induzidos em corpos de prova impactados à temperaturas mais baixas do que aqueles em temperaturas mais elevadas. O dano de impacto e a temperatura têm um efeito oposto sobre a força de flambagem compressiva residual e o módulo de elasticidade. O dano de impacto reduz a resistência residual, enquanto a temperatura baixa tende a aumentar a resistência residual se a temperatura for superior a 10°C. Embora os laminados cruzados tenham uma maior resistência ao dano de impacto de baixa velocidade que os laminados unidirecionais, os laminados unidirecionais têm maior resistência e rigidez à flambagem residual do que os laminados cruzados nas temperaturas investigadas.

Ainda analisando o efeito da temperatura na resposta ao impacto de laminados compósitos, Amaro *et al.* (2016), submeteu compósitos reforçados de fibra de vidro à único e múltiplos impactos com a mesma energia total (1J e 3J), sendo que estes experimentos foram realizados utilizando uma máquina de teste de queda de peso (*Drop test*) e três temperaturas diferentes (temperatura ambiente,

60°C e 90°C) foram selecionadas levando em consideração a temperatura de transição da resina. Verificou-se que a temperatura tem influência insignificante para as energias de maior impacto, enquanto ocorre um forte efeito para as energias mais baixas, além de que o número de impactos para a ruptura é muito dependente da temperatura, o que é explicado pela influência nas propriedades da matriz, como rigidez e força.

Breen *et al.* (2006), desenvolveram uma pesquisa em que, os laminados de fibra de carbono de 4 mm, 8 mm e 12 mm de espessura foram sujeitos à impactos de queda peso de até 375 J. Os impactos foram centralizados dentro de uma área suportada do laminado e também perto de uma borda não suportada. A geometria do dano foi medida usando C-scan e técnicas de decomposição. As resistências residuais e compressivas das amostras de teste cortadas dos laminados impactados foram avaliadas. Os danos resultantes dos impactos consistem em trincas e delaminação. Geralmente, um impacto próximo da borda dá uma maior área de delaminação e um impacto central uma maior densidade de fissuras de fibras. A resistência à compressão residual é consideravelmente menor para um impacto de borda do que para um impacto central e, para cada caso, é muito menor que a resistência à compressão de um laminado não danificado. Por outro lado, a resistência à tração residual para um impacto central é menor do que para um impacto de borda.

Na pesquisa desenvolvida por Sanchez-Saez, *et al.* (2005), em que a tolerância ao dano de diferentes layouts de laminados carbono/epóxi finos (1,6-2,2 mm de espessura) foi examinada por testes de compressão após impacto (CAI), usando um novo dispositivo de teste que se adapta às espessuras dos corpos de prova e não requer abas nem qualquer modificação da geometria da amostra. O estado de tensão de compressão não foi modificado pela presença do dispositivo, como foi verificado por simulação numérica. Com este dispositivo, os testes de CAI foram feitos de diferentes layouts de laminado de carbono/epóxi (quasi isotrópico, cruzados e tecidos) e os valores da resistência residual e a resistência residual normalizada dos laminados foram obtidos em função da energia de impacto. O laminado reforçado por tecido foi apresentou maior resistência residual sob todas as energias de impacto, e o laminado quase isotrópico a menor perda de força normalizada à medida que a energia de impacto foi aumentada.

Remacha *et al.* (2015), desenvolveram em sua pesquisa um novo dispositivo para estimar a força de compressão pós-impacto (CAI). Este dispositivo permite o teste de laminados mais finos do que os recomendados pelos padrões de teste CAI ASTM D7137. Para corpos de provas padrões, foram realizados testes com o dispositivo proposto e o dispositivo ASTM, obtendo resultados que

viabiliza a utilização do novo dispositivo. Em seguida foram obtidos resultados satisfatórios para laminados mais finos, em que maior estimulação CAI foi estimada com o dispositivo proposto por esta pesquisa, do que com o dispositivo ASTM, mostrando que a flambagem conseguiu ser evitada.

Shyr *et al.* (2003), apresentaram um estudo em que investigaram as características de dano e as forças de falha de laminados compostos em ensaios de impacto de baixa velocidade. Nesta pesquisa, três tecidos diferentes de vidro foram selecionados como reforços para os laminados compostos, a microscopia metalográfica foi utilizada para observar as características de dano da seção transversal perpendicular dos laminados impactados após um tratamento de polimento de micropólito. Na análise do dano, verificou-se que a quebra de fibras ocorreu antes dos maiores danos. Além de que, também foi possível concluir que quando a energia de impacto aumentou sobre a energia limiar do dano maior, a fissuração da matriz, a delaminação e a ruptura das fibras foram observadas na superfície oposta ao impacto, abaixo de uma zona quase intacta, que foram atribuídos aos esforços de flexão.

Afim de determinar a natureza e área de dano em laminados de fibras metálicas submetidos a impacto de baixa velocidade, Bienias *et al.* (2016), realizaram um estudo em que a análise detalhada dos danos em laminados de fibras metálicas com base em observações de seções transversais revelou a presença das principais formas de danos nos laminados, isto é, trincas da matriz e delaminações entre camadas. As fissuras da matriz e as delaminações prevaletentes nas camadas inferiores, podem ser causadas pelo estado de carga complexo em um laminado. Com base na observação de danos, pode-se concluir que os altos esforços de cisalhamento e flexão ocorrem no laminado como resultado do impacto. Além disso a mudança de espessura do laminado contribui para o seu grau de degradação, em que, os laminados com menor espessura são caracterizados por deformação macroscópica e trincas na camada metálica inferior, enquanto que o aumento da espessura do laminado é acompanhado pelo grau decrescente de sua deformação, além da ocorrência de delaminações entre as camadas do laminado.

Em pesquisa realizada por Zike *et al.* (2011), foi feita a validação de resultados experimentais e numéricos de testes de impacto de baixa velocidade de laminado de poliéster insaturado/fibra de vidro. Durante o teste de impacto, todas as amostras foram perfuradas, mostrando resposta frágil seguida de trincas e delaminação da matriz. Foi alcançado uma boa relação entre resultados experimentais e de simulação, comparando os parâmetros de caracterização de impacto como carga, energia e deflexão. Quanto ao dano, os corpos de provas ensaiados apresentaram grandes

regiões de ruptura e delaminação, onde a região de ruptura era cerca de 1,5 vezes maior do que a ponta do penetrador.

Com o intuito de conhecer a resistência residual de compósitos poliméricos submetidos ao impacto de baixa velocidade (*Droptest*), Azevedo (2017) fez uma análise experimental da resistência residual à flexão em três pontos e compressão após o impacto (CAI), de dois tipos de laminados compósitos de matriz polimérica ortoftálica, um reforçado por fibra de vidro-E e outro reforçado por fibras de kevlar. Neste trabalho verificou-se que no laminado reforçado por vidro, nas propriedades de compressão e de flexão em três pontos, a resistência se manteve praticamente inalterada enquanto que o módulo teve uma diminuição depois do impacto. Já no laminado reforçado por fibra de kevlar houve um decréscimo nas propriedades de compressão e flexão em três pontos após o impacto, perda esta justificada pela ocorrência de delaminação nas interfaces dos compósitos. Além disso, com o intuito de modelar o comportamento da resistência residual à flexão e do módulo de elasticidade à flexão com o aumento da distância do ponto de impacto, desenvolveu-se as equações empíricas demonstradas nas equações 2.2 e 2.3.

$$\frac{\sigma_{Rf}}{\sigma_{of}} = 1 - e^{-\left(\frac{d}{\beta}\right)^{\alpha}} \quad (2.2)$$

$$\frac{E_{Rf}}{E_{of}} = 1 - e^{-\left(\frac{d}{\beta}\right)^{\alpha}} \quad (2.3)$$

Nestas equações, σ_{Rf} e σ_{of} são, respectivamente, a tensão última residual à flexão e a tensão última sem o dano, E_{Rf} e E_{of} são, respectivamente, o módulo residual à flexão e o módulo à flexão sem o dano, α e β são constantes relacionadas ao material e d é a distância em relação a borda do impactador. Além disso, foi afirmado que quando d é igual a β tem-se uma resistência residual (ou o módulo residual) de exatamente 63,2 % do material sem impacto. Utilizando essa modelagem foi possível verificar que o laminado reforçado por fibra de vidro possui maior capacidade de concentrar o dano no material, já que o valor de β para este é muito inferior ao valor encontrado para o laminado reforçado por fibra de kevlar, em que indicou que a perda de 63 % do módulo no laminado de fibra de vidro concentrava-se somente a uma distância de 14,2 mm da borda do impactador enquanto que para o laminado reforçado por kevlar praticamente toda a amostra possui perda de resistência e rigidez com a aplicação do impacto de 76 J.

Capítulo III

Materiais e Métodos

3. Materiais e Métodos

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento dessa tese, todo o processo de fabricação dos laminados, os ensaios mecânicos e físicos, bem como as análises do dano. Um fluxograma demonstrando todos os passos realizados é apresentado na Figura 3.1

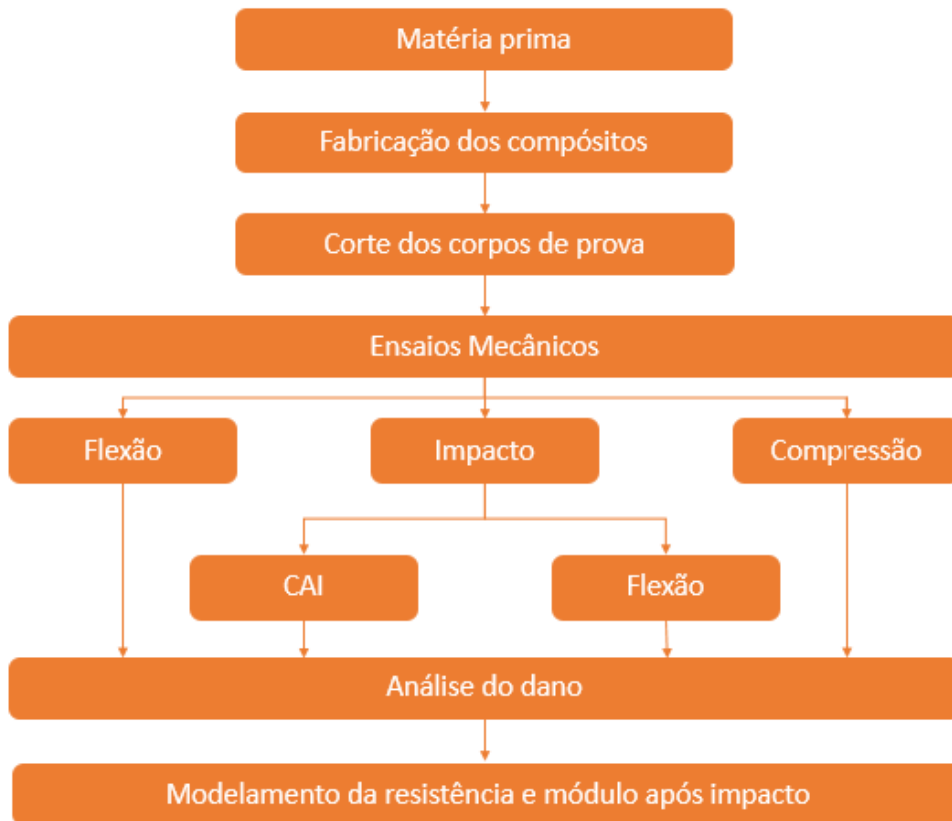


Figura 3.1 : Metodologia utilizada no trabalho

3.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS LAMINADOS

Os laminados foram fabricados através do processo de laminação manual (*hand lay-up*) (Figura 3.5), realizado no Laboratório de Materiais Compósitos do departamento de Engenharia dos Materiais da UFRN. Foi utilizada para fabricação das lâminas, a resina termofixa epóxi éster vinílica *Derakane 411-350*, e para catalisação se fez uso do peróxido de metil-etil-cetona (MEKP) numa proporção de 1% do volume de resina, bem como 0,2% de Naftenato de cobalto à 6%, de acordo com as exigências do catálogo da resina para laminação em temperatura ambiente.

Os laminados possuem onze camadas de tecido, um laminado reforçado somente com tecido de fibra de vidro-E, (ver Figura 3.2), e um laminado híbrido com três camadas de tecido de kevlar, uma no meio e duas nas extremidades, e entre estas, oito camadas de fibra de vidro, representado na Figura 3.3

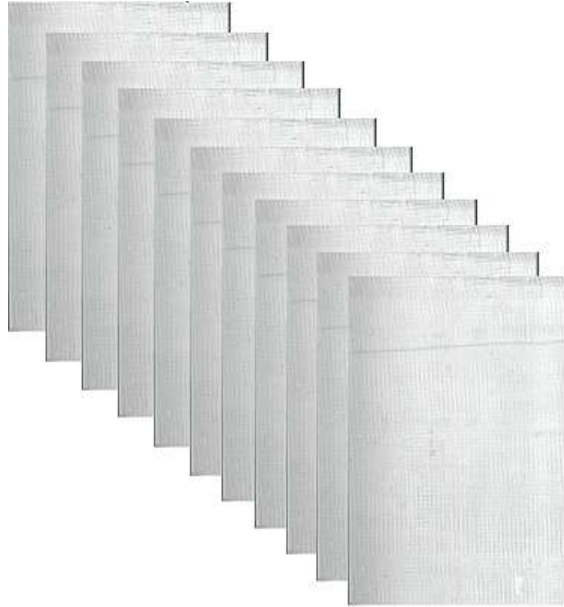


Figura 3.2: Disposição dos tecidos para a laminação do compósito reforçado por de fibra de vidro



Figura 3.3: Disposição dos tecidos para a laminação do compósito híbrido

Para realizar a laminação, inicialmente a resina foi dividida em quatro partes, e assim gradativamente foram adicionados os catalizadores afim de obter um tempo de gel suficiente para todo o tempo da laminação. Posteriormente foi necessário que a resina já catalisada fosse levada para uma câmara de vácuo (Figura 3.4), de modo a remover parte dos gases e vapores formados durante o processo de polimerização da resina, e evitar que esses gases fiquem retidos entre as camadas de tecido (consequentemente, formando vazios no interior do laminado).



Figura 3.4: Câmara de vácuo

Após finalizada a otimização da resina, foi dada inicio a laminação do compósito, utilizando rolos de aço para melhor distribuição da resina e compactação do conjunto fibra/matriz, conforme apresentado na Figura 3.5.

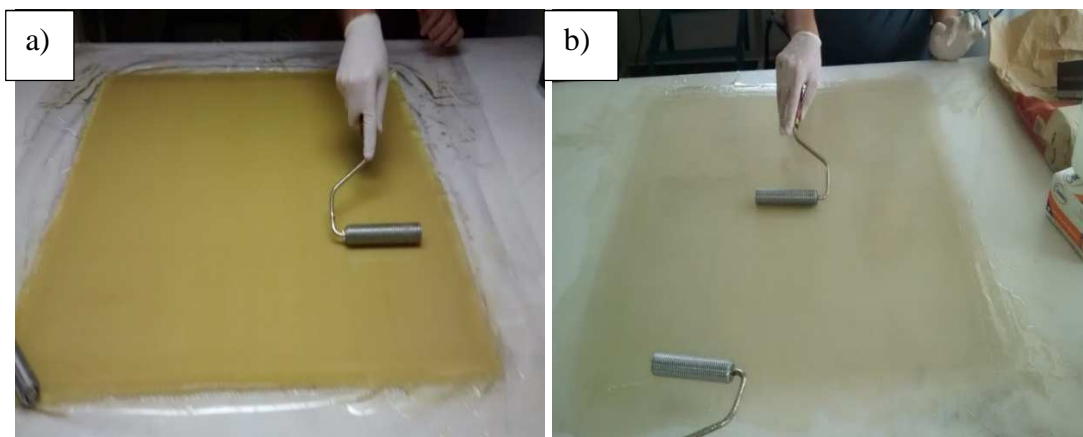


Figura 3.5 : Laminação manual (a) Laminado Kevlar/Vidro. (b) Laminado Vidro/Vidro

Ao final do processo de laminação, obteve-se duas placas com 600x600 mm² de área. A partir das placas confeccionadas, foram retirados todos os corpos de prova utilizados neste trabalho.

3.2.2 Corte dos corpos de prova

Os cortes dos corpos de prova reforçados por fibra de vidro (**CV**) foram feitos utilizando uma serra circular com disco diamantado, representado na Figura 3.6, onde a placa teve todos os corpos de prova previamente desenhados de forma a se obter as dimensões correspondentes às normas técnicas para os ensaios de densidade, impacto e flexão em três pontos.



Figura 3.6: Disco diamantado da marca IRWIN

Já os corpos de prova do laminado híbrido kevlar/vidro (**HKV**), foram cortados na máquina de corte à jato d'água TCI Waterjet SM-A 3-1020-1, na empresa Nordeste Laser, de acordo com as Figura 3.7 e Figura 3.8.



Figura 3.7: Máquina de corte à jato d'água.

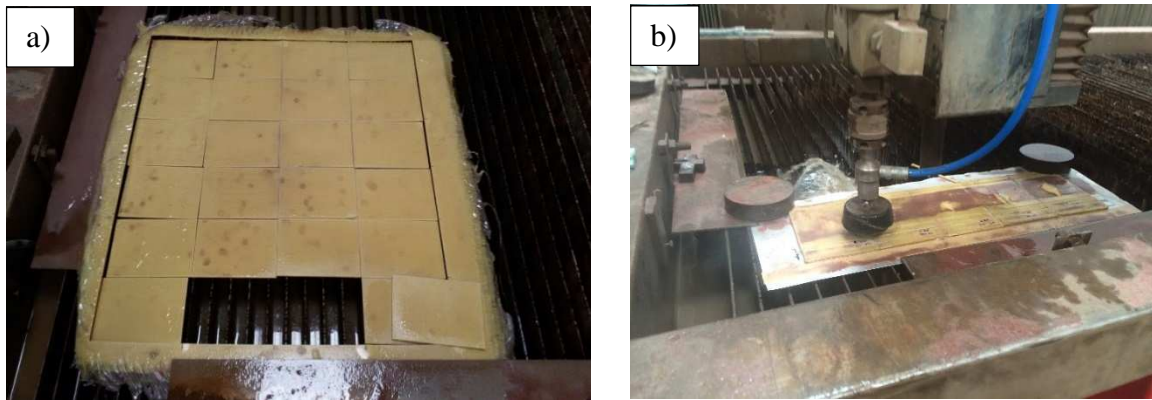


Figura 3.8: Corte à jato d'água. (a) Corte dos corpos de prova de Impacto. (b) Corte dos corpos de prova de flexão.

3.3 PERCENTUAL DE FIBRA E PERCENTUAIS VOLUMÉTRICO DAS FIBRAS

Sabendo que o percentual de fibras é de grande importância na resposta mecânica dos laminados compósitos, pois a variação destes percentuais influencia diretamente nas constantes elásticas do material, além do seu limite de resistência. Foi verificado o percentual mássico das fibras do material (P_{MF}), de acordo com a Equação 3.1

$$P_{mf} = \frac{m_f}{m_c} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Foram pesados os tecidos antes da laminação (m_f) e o laminado obtido no processo (m_c). Com o valor do percentual mássico e utilizando a densidade da fibra (ρ_f) e do compósito (ρ_c) foi possível calcular o percentual volumétrico (V_f) utilizando a Equação 3.2.

$$V_f = P_{Mf} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_f} \quad (3.2)$$

3.4 ENSAIO DE DENSIDADE

Para a realização do teste de densidade os corpos de provas foram cortados mediante a norma ASTM D 792 (2013), utilizando 5 corpos de prova, com dimensão de 25 x 25 mm para ambos os laminados confeccionados.

A densidade do compósito foi determinada utilizando o Densímetro Digital DSL 910 – Geahaka, pertencente ao Laboratório de Mecânica dos fluidos – UFRN, mostrado na Figura 3.9, de modo que após realizar a pesagem da amostra a seco, foi feita a pesagem do material imerso no fluido de referência (água destilada – $\rho = 1,040/\text{cm}^3$), apoiado em um cesto côncavo. Então, após as pesagens a seco e submerso, o equipamento forneceu diretamente o valor de densidade do sólido em análise.



Figura 3.9: Densímetro Digital

3.5 ENSAIO DE IMPACTO

O ensaio de impacto foi realizado em temperatura ambiente ($\pm 25^\circ\text{C}$), pela máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos no Laboratório de Projetos e Instrumentos (LPI) da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG (Figura 3.10), que possui um intervalo de energia de impacto entre 16J e 76J, obtida através de variação da massa de queda de impacto.



Figura 3.10: Máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos.

A realização deste ensaio foi mediante a norma ASTM D7136 (2015), em que o tamanho da placa deve ser de 100x150 mm, conforme mostrado na Figura 3.11, onde este corpo de prova também será utilizado no teste de Compressão após Impacto (CAI).

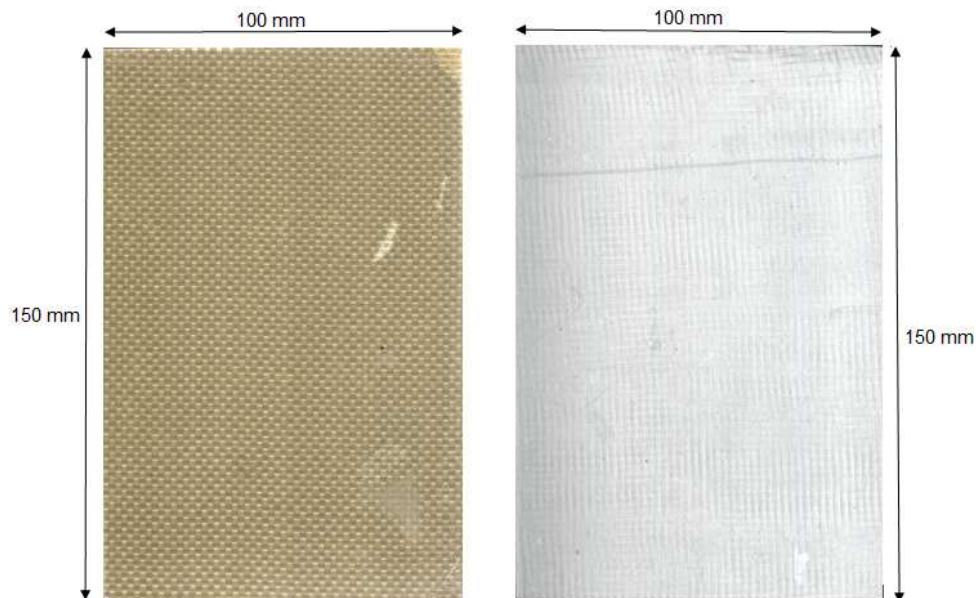


Figura 3.11: Corpo de prova para o ensaio de impacto por queda de peso

Para o ensaio de impacto foram utilizados 5 corpos de prova de cada material estudado.

Os ensaios realizados tiveram as seguintes configurações:

- Nível de energia de impacto – 31; 46; 61 e 76 J;
- Altura de queda dos pesos de 1,03 metros;
- Impactador de ponta semiesférica com diâmetro de 16 mm e dureza 57 HRC;

Sendo que para as energias 31J e 46J, foram realizados também ensaios de múltiplos impactos no compósito híbrido estudado.

Na preparação para realização do teste de impacto por queda de peso em placas compósitas foi necessária a limpeza e lubrificação das estruturas (mecanismo de guias) e o ajuste dos amortecedores de vibrações da base de sustentação da máquina para que a mesma ficasse nivelado com o solo.

É conhecido que no ensaio de impacto por queda de peso pode ocorrer que o impactador atinja o corpo de prova várias vezes causando múltiplos impactos, e com isso um dano excessivo na placa que não é representativo de um único impacto, assim para se evitar esse segundo impacto um obstáculo (placa de madeira) foi colocado manualmente entre a ponta do impactador e a placa impactada após a ocorrência do primeiro impacto.

3.6 ENSAIO DE COMPRESSÃO (*COMPRESSION AFTER IMPACT*)

Os ensaios de *CAI* foram realizados no laboratório de Metais e Ensaio Mecânicos da UFRN, mediante a norma ASTM D7137 (2012). Para cada tipo de laminado foram utilizados 5 amostras já impactadas à 46J e 5 amostras sem impacto, ensaiadas com velocidade de 1 mm/min. Após a realização dos ensaios obteve-se as constantes de engenharia destes materiais tal como a resistência residual à compressão e força de compressão em função do deslocamento, sendo utilizado os valores das 5 mostras para cálculo da média.

O equipamento de ensaio (máquina de ensaio universal) utilizado é de marca Shimadzu AG-X com capacidade máxima de 300 KN, mostrado na Figura 3.12.



Figura 3.12: Máquina de ensaios universal

Para o cálculo da resistência residual de compressão final, foi utilizada a Equação 3.3.

$$F^{CAI} = P_{max}/A \quad (3.3)$$

Onde F^{CAI} é a resistência residual à compressão final, P_{max} a força máxima antes da falha e A , representa a área transversal.

3.7 ENSAIO DE FLEXÃO

Os ensaios de flexão em três pontos (Figura 3.13) foram realizados no laboratório de Ensaios Mecânicos do IFRN, utilizando a máquina de ensaio universal *Shimadzu ServoPulser*, com capacidade máxima de 200 kN.

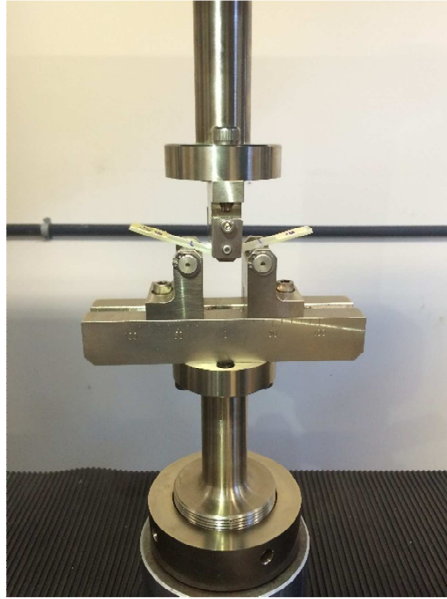


Figura 3.13: Ensaio de flexão em três pontos

Utilizando a norma ASTM D 790 (2015) e amostras já ensaiadas por impacto, os corpos de prova foram cortados levando em consideração a distância ao centro do dano de impacto utilizando de cada corpo de prova impactado, 2 corpos de prova de flexão para cada distância, possuindo estes as seguintes dimensões: 12,7 mm de largura, 100 mm de comprimento, conforme se apresenta nas Figura 3.14 e Figura 3.15, o intuito nesta análise é verificar como o impacto influencia na diminuição das propriedades mecânicas na região próxima ao ponto de impacto. Para cada situação se ensaiou três corpos de provas impactados, obtendo 6 amostras nas três distancias especificadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Distância ao centro do dano

Nomenclatura	Distância ao centro do dano (mm)
Distância 1	21
Distância 2	36
Distância 3	51

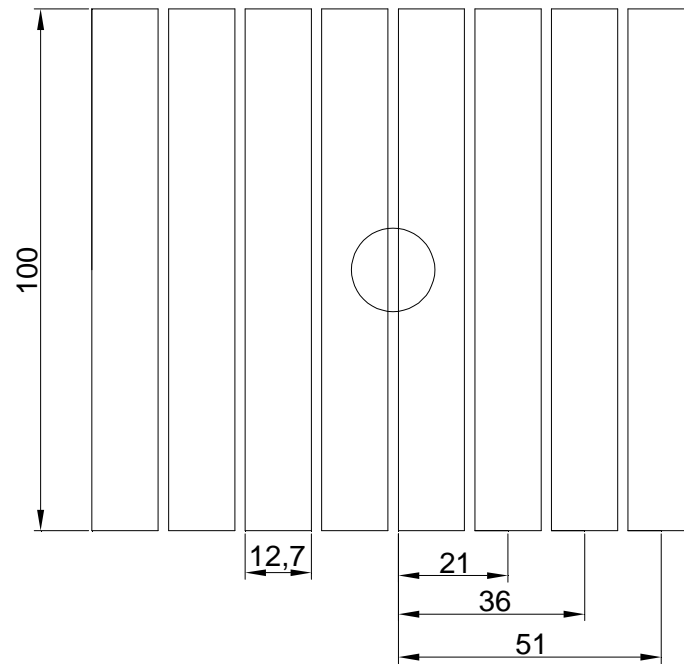


Figura 3.14: Representação dos corpos de provas para ensaio de flexão

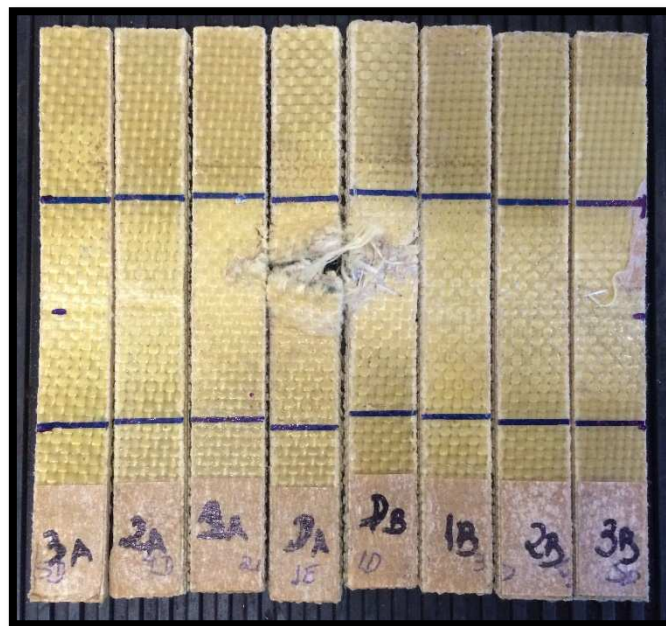


Figura 3.15: Corpos de provas utilizados no ensaio de flexão

Para determinação do limite de resistência à flexão e do módulo de elasticidade, foram utilizadas respectivamente as Equações 3.4 e 3.5.

$$\sigma_f = 3PL/2bd^2 \quad (3.4)$$

$$E_B = L^3m/4bd^3 \quad (3.5)$$

Onde σ é o resistência última à flexão (MPa), P corresponde a carga (N), L é a distância entre os apoios (mm), b e d são largura e espessura do CP(mm), respectivamente, E é o Módulo de elasticidade (MPa), m a inclinação da tangente formada pela curva carga (N) e deflexão (m).

3.8 ANÁLISE DO DANO

Após a realização dos ensaios, os corpos-de-prova foram submetidos ao estudo das características finais da fratura ocorridas em cada um. Consistiu de uma análise macroscópica do dano, com o objetivo de conhecer a formação e a distribuição do mesmo ao longo do corpo de prova. Em seguida foi realizada uma análise microscópica da falha de modo a determinar que o tipo de fratura ocorrida.

A análise macroscópica da fratura teve como objetivo identificar o modo como estas ocorreram após os ensaios mecânicos de impacto *drop-weight*, compressão após impacto e flexão em três pontos.

Para caracterizar o tipo da fratura conforme a classificação normatizada dos ensaios de impacto e compressão após impacto, foi realizada a análise macroscópica com a utilização das normas ASTM D7136 (2015) e D7137 (2012), respectivamente.

Além disso, para o ensaio de impacto, foram caracterizados os danos nos CP's impactados com energias de 31J, 46J, 61J e 76J, e ainda, por múltiplos impactos à 31 e 46J, utilizando o software aberto IMAGE J para o cálculo da área do dano nos lados comprimido e tracionado dos CPs após o impacto.

Para realização da análise microscópica, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo TM 3000 da empresa Hitashi, posicionando as amostras lateralmente no dano de impacto.

3.9 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA RESIDUAL

Com o intuito de modelar o comportamento da resistência residual à flexão e do módulo de elasticidade à flexão com o aumento da distância ao ponto de impacto, foram utilizadas as equações empíricas desenvolvidas por Azevedo (2017), demonstradas nas Equações 3.6 e 3.7.

$$\frac{\sigma_{Rf}}{\sigma_{of}} = 1 - e^{-\left(\frac{d}{\beta}\right)^\alpha} \quad (3.6)$$

$$\frac{E_{Rf}}{E_{of}} = 1 - e^{-\left(\frac{d}{\beta}\right)^\alpha} \quad (3.7)$$

Nestas equações, σ_{Rf} e σ_{of} são, respectivamente, a tensão última residual à flexão e a tensão última sem o dano, E_{Rf} e E_{of} são, respectivamente, o módulo residual à flexão e o módulo à flexão sem o dano, α e β são constantes relacionadas ao material e d é a distância em relação a borda do impactador, como mostrado na Figura 3.16. Vale salientar que a escolha deste tipo de equação ocorreu devido a mesma possuir um comportamento onde sua imagem (razão entre as resistências ou entre os módulos) varia obrigatoriamente entre 0 e 1 de modo contínuo e crescente. Além disso, pode-se ainda dizer que quando d é igual a β tem-se uma resistência residual ou o módulo residual de exatamente 63,2 % do material sem impacto. Para o caso em estudo os valores experimentais estudados possuíram amostras com distâncias em relação ao ponto de impacto de 21; 36 e 51 mm, considerando que o impactador possui 8 mm de raio então os valores da distância destas amostras em relação à borda serão de 13,0; 28,0 e 43,0, respectivamente.

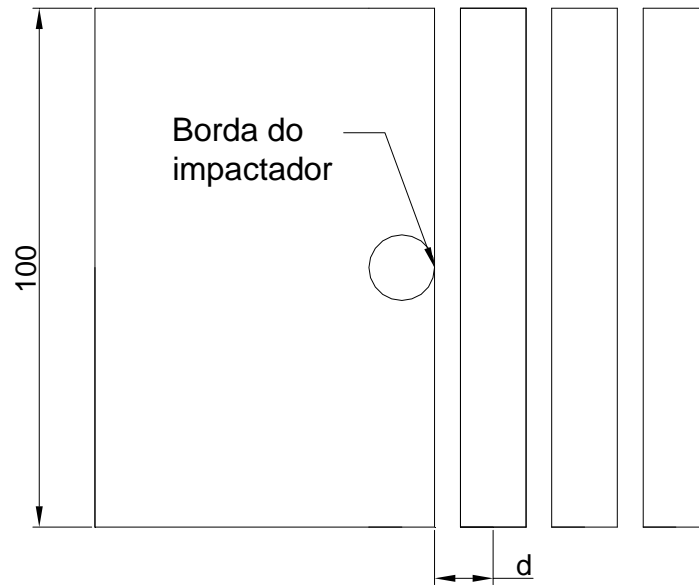


Figura 3.16: Esquema de representação da distância das amostras em relação à borda do impactador para análise do ensaio de flexão em três pontos residual.

Capítulo IV

Resultados e Discussão

4 Resultados e discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados de determinação da densidade volumétrica e das frações volumétricas de fibra, além dos resultados obtidos com as propriedades mecânicas dos laminados compósitos de reforço com tecido de fibra de vidro (**CV**) e do compósito híbrido kevlar/vidro (**HKV**) tanto para o ensaio de impacto do tipo *drop test*, compressão e flexão em três pontos, bem como o comportamento mecânico destes laminados quando submetidos a ensaios para análise da resistência residual em compressão após impacto (CAI) e flexão em três pontos. E ainda, será também apresentada a análise de dano e características da fratura final para todos os casos.

4.1 ENSAIO DE DENSIDADE E PERCENTUAIS VOLUMÉTRICO DAS FIBRAS

Apresenta-se na Tabela 4.1 as densidades médias dos compósitos **CV** e **HKV**, em que o compósito de fibra de vidro apresentou o maior valor de densidade, fato justificado por a fibra de vidro possuir maior densidade que a fibra de kevlar, influenciando assim na densidade do compósito.

Tabela 4.1: Densidade volumétrica do **CV** e **HKV**

Reforço	Densidade (g/cm ³)
Fibra de vidro	1,79
Híbrido Kevlar/Vidro	1,52

Na Tabela 4.2 têm-se os valores de percentual de fibra de cada laminado estudado neste trabalho. Por estes resultados, percebe-se que os percentuais obtidos entre os compósitos reforçados com fibra de vidro (**CV**) e o compósito híbrido vidro/kevlar (**HKV**), são muito semelhantes, podendo assim ser comparados entre si. E ainda, é importante destacar que no compósito híbrido, a fibra de kevlar foi utilizada substituindo as três camadas de fibra de vidro localizadas nas faces e no centro do laminado.

Tabela 4.2: Percentual de fibra nos laminados conforme reforço utilizado

	Compósito de Fibra de Vidro	Compósito Híbrido	
		Vidro	Kevlar
Percentual volumétrico de fibras	55,2	32,8	21,8
		54,6	

4.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO

Neste item serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de compressão realizados nos compósitos poliméricos conforme o tipo do reforço utilizado, discutindo o comportamento mecânico quanto à tensão última, módulo de elasticidade e deformação. Para a obtenção dos valores de todas as propriedades, foi feita uma média entre os valores de cinco corpos de prova fraturados e calculado o desvio padrão da respectiva média.

Apresentam-se na Figura 4.1 (a) e (b), as curvas tensão em função da deformação para os compósitos **CV** e **HKV**, respectivamente. Nas duas representações é possível verificar que os compósitos estudados possuíam comportamento linear no início do ensaio, até 50% do carregamento, e logo após, apresentaram comportamento não linear.

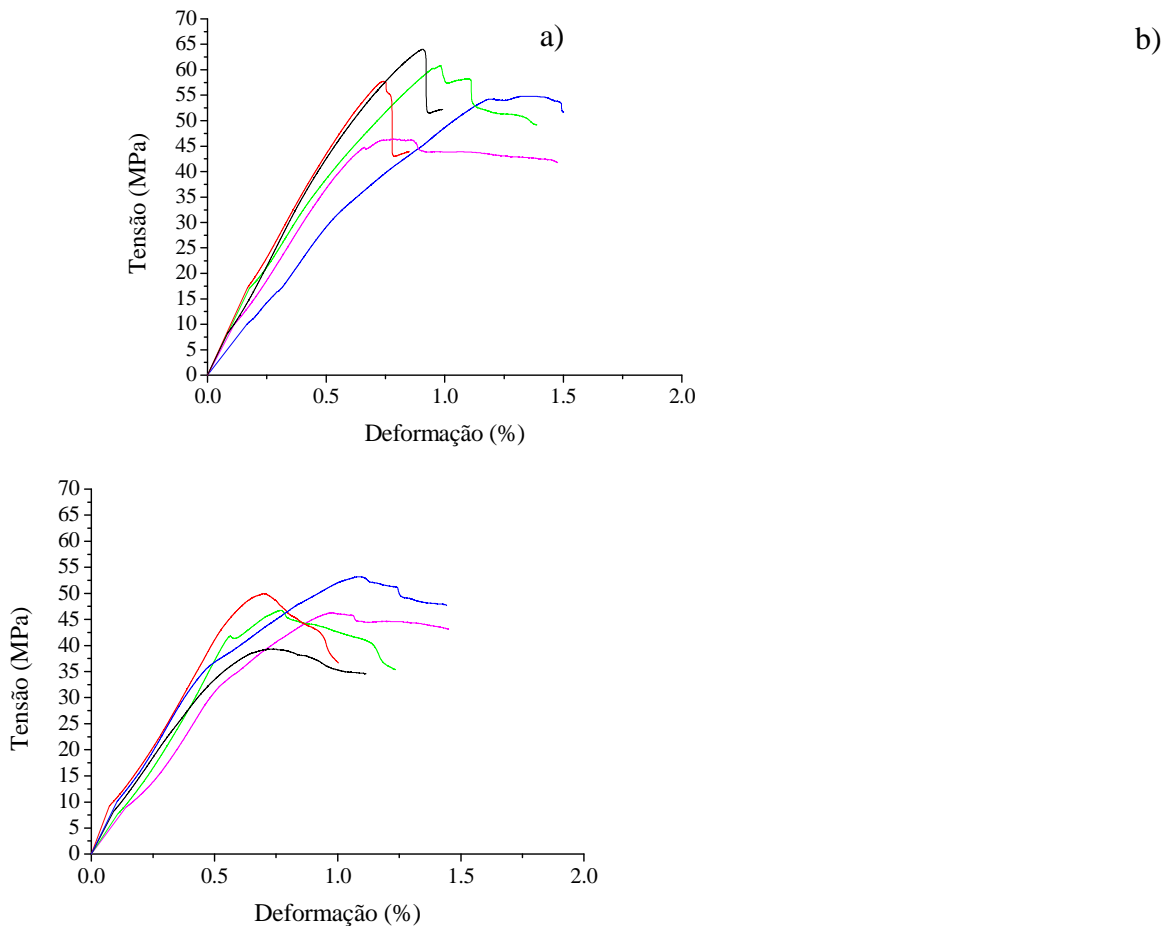


Figura 4.1: Curva tensão em função da deformação dos compósitos estudados. (a) **CV** (b)

HKV

A seguir, na Tabela 4.3 é possível observar os resultados das médias das propriedades mecânicas obtidas no ensaio de compressão. Pelos resultados percebe-se que o **HKV** apresenta, maiores valores de desvio padrão na tensão última, em que estas diferenças de comportamento entre as amostras foram causadas por delaminações ocorridas durante o ensaio, verificadas anteriormente na análise do dano. Também é possível observar que o laminado **CV** possui melhores propriedades mecânicas quando submetido a este tipo de esforço, apresentando assim maior resistência e módulo quando comparado ao **HKV**.

Tabela 4.3: Propriedades mecânicas de compressão dos laminados **CV** e **HKV**

Propriedades mecânicas	CV	HKV
Tensão última (MPa)	$56,74 \pm 6,73$	$43,90 \pm 11,85$
Módulo de elasticidade (GPa)	$7,03 \pm 1,36$	$6,68 \pm 1,27$
Deformação (%)	$2,20 \pm 0,70$	$1,85 \pm 0,71$

Com o objetivo de melhor visualização dos resultados das propriedades mecânicas, as Figura 4.2 e Figura 4.3 apresentam os comparativos entre os compósitos estudados para resistência e módulo. Na Figura 4.2 é possível observar a resistência última dos laminados **CV** e **HKV**, a imagem evidencia o maior valor de resistência alcançado pelo **CV**, sendo essa diferença de 22,63%.

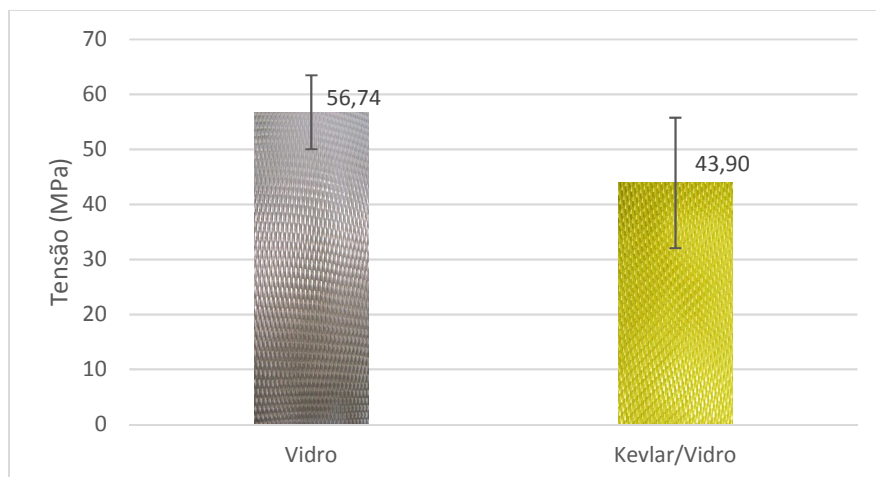


Figura 4.2: Tensão última à compressão dos laminados **CV** e **HKV**

Analisando agora a Figura 4.3, é possível observar que para o módulo, os valores foram muito próximos, tendo uma diferença percentual de apenas 4,98%, podendo ser considerados equivalentes quando comparados os desvios padrões das duas amostras. Este resultado evidencia que para esta propriedade, a hibridização não alterou o comportamento do material, ao ponto de ser relevante como justificativa de mudança de módulo.

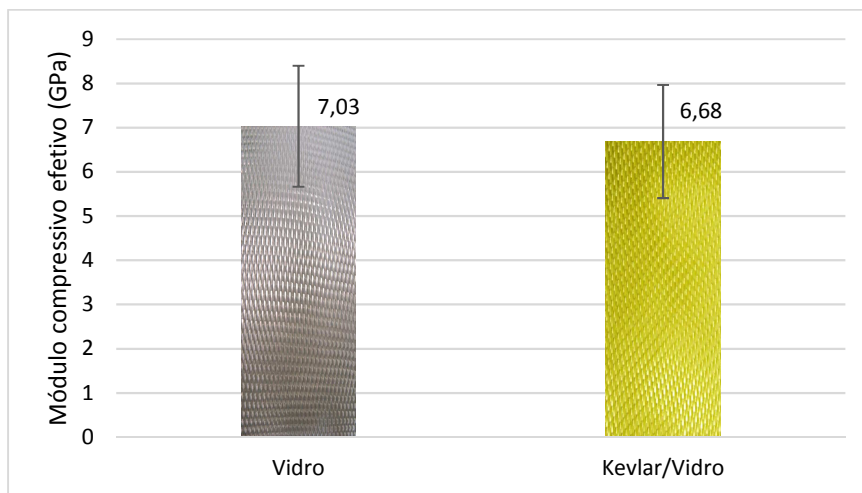


Figura 4.3: Módulo compressivo efetivo dos laminados **CV** e **HKV**

4.2.1 Análise do dano de compressão

Analisando a Figura 4.4, é possível ver que os laminados estudados apresentaram características diferentes para os danos, sendo estas classificadas segundo a norma ASTM D7137 (2012) como do tipo LGM para o **CV** e do tipo WDM para o e **HKV**.

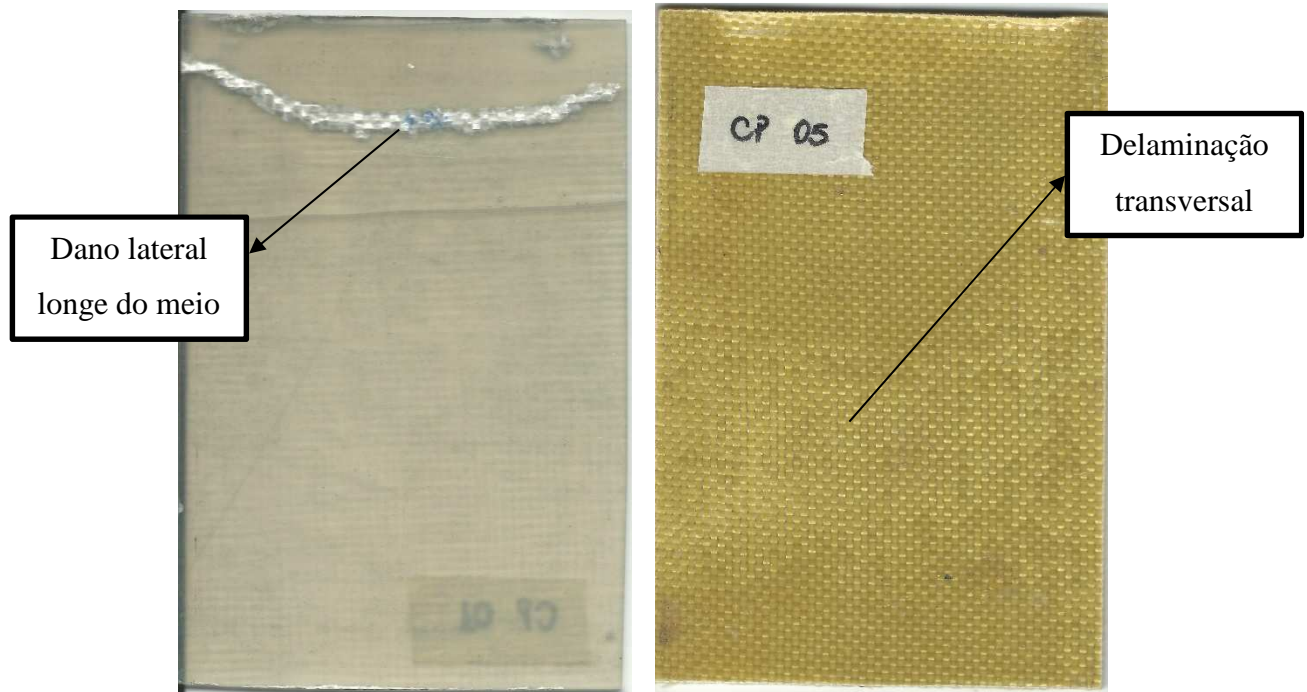


Figura 4.4: Característica do dano nos laminados **CV** e **HKV** submetidos à compressão

É importante salientar que a ocorrência de delaminação transversal no compósito híbrido (**HKV**) pode estar relacionada à baixa aderência fibra/matriz da fibra de kevlar, facilitando a delaminação e diminuindo as propriedades do material (como mostrado o item 4.2), este resultado também foi verificado no trabalho de Azevedo (2017) que utilizou um compósito de tecido de kevlar ensaiado à compressão.

4.3 ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS

A seguir serão apresentados os resultados apresentados pelos compósitos aqui estudados, quando submetidos ao ensaio de flexão em três pontos. Para este ensaio foram utilizadas 5 amostras de cada material e realizada as respectivas médias e desvio padrão para as propriedades de tensão última, módulo de elasticidade à flexão e deflexão.

Analisando a Figura 4.5 que apresenta a curva tensão em função da deformação dos compósitos **CV** e **HKV**, percebe-se que para este ensaio o comportamento do material é inicialmente linear e que, para esta propriedade os materiais alcançaram valores consideravelmente maiores do que os encontrados no ensaio de compressão, e além disso, apresentarem também uma menor dispersão nas curvas.

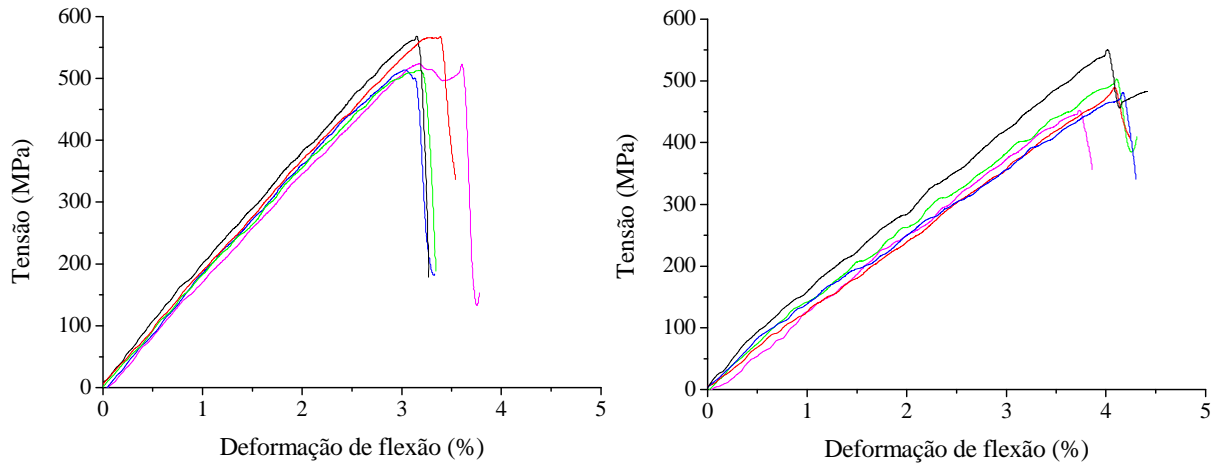


Figura 4.5: Curva tensão em função da deformação de ensaio de flexão em três pontos dos laminados **CV** e **HKV**, respectivamente.

Agora analisando a Tabela 4.4, que demonstra os valores médios e de desvio padrão para a tensão última, módulo de elasticidade e deformação, obtidos no ensaio de flexão em três pontos dos **CV** e **HKV**, é possível observar que assim como no ensaio de compressão, o **CV** apresentou maiores valores de tensão e módulo obtidas no ensaio, além de, apresentar também menores valores de desvio padrão, quando comparado ao **HKV**. Tal comportamento se dá principalmente pela delaminação entre as camadas do **HKV**, mais especificamente nas interfaces kevlar/epóxi.

Tabela 4.4: Propriedades mecânicas de flexão em três pontos dos laminados **CV** e **HKV**

Propriedades mecânicas	Vidro	Kevlar/Vidro
Tensão última (MPa)	$537,43 \pm 28,45$	$495,26 \pm 36,19$
Módulo de elasticidade (GPa)	$17,95 \pm 1,15$	$12,52 \pm 1,31$
Deformação (%)	$3,45 \pm 0,29$	$4,22 \pm 0,21$

Para efeito de comparação dos compósitos estudados, a Figura 4.6 apresenta os valores máximos de tensão à flexão dos **CVF** e **HKV**, respectivamente. Analisando este gráfico é possível perceber que o **CV** obteve melhor desempenho que o **HKV**, sendo esta diferença de 7,84%.

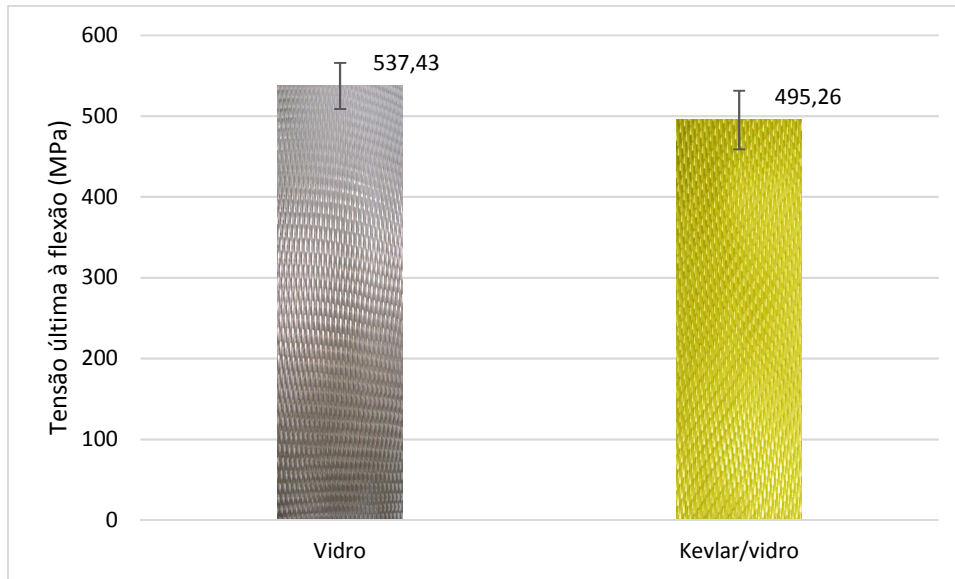


Figura 4.6: Tensão última à flexão dos laminados **CV** e **HKV**

Agora analisando a Figura 4.7, que mostra o gráfico de comparação entre os módulos de elasticidade obtidos para os materiais estudado, é possível observar que também nesta propriedade, o **CV** obteve maiores valores, e que para estas propriedades a diferença entre os dois materiais estudados foi ainda maior que para a tensão última, visto que na rigidez o **CV** alcançou um valor médio 30,25% maior que o **HKV**.

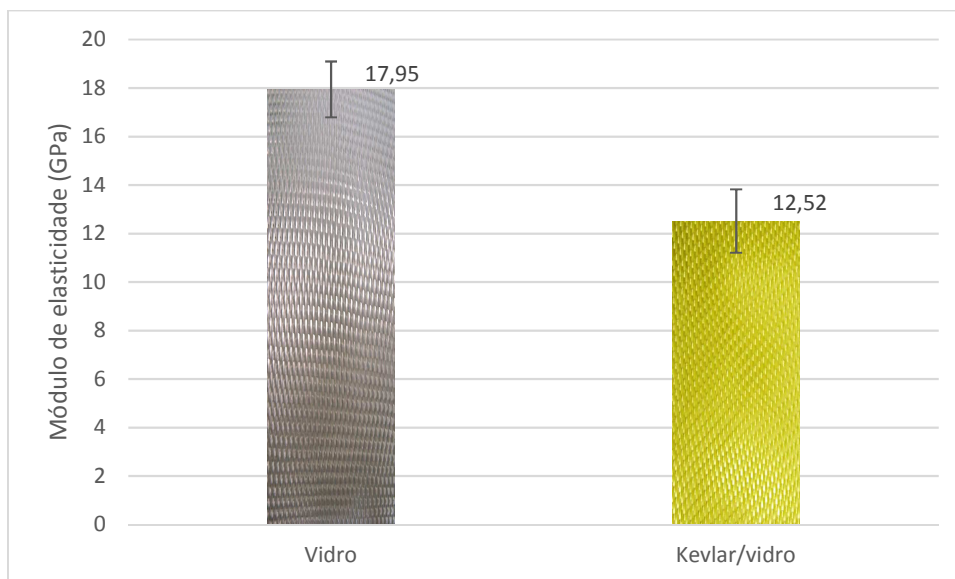


Figura 4.7: Módulo de elasticidade à flexão dos laminados **CV** e **HKV**

É importante salientar também que para o ensaio de flexão, a diferença entre os módulos de elasticidade dos dois materiais estudados foi maior que a diferença da resistência, fato que não ocorreu na análise do ensaio de compressão, em que a diferença dos valores alcançados na resistência entre os dois materiais foi maior que a diferença do módulo.

4.4 ENSAIO DE IMPACTO

Nesta seção serão apresentadas as análises realizadas nas amostras impactadas com 31J, 46J, 61J e 76J onde se verificará seu comportamento mecânico e o dano causado.

4.4.1 Análise visual do dano causado nos laminados

As Tabela 4.5 e Tabela 4.6, apresentam os comparativos da análise visual para compósitos reforçados com fibra de vidro e para o compósito híbrido kevlar/vidro, respectivamente. Analisando os acontecimentos para cada energia de impacto em cada laminado estudado. É possível ver que para ambos compósitos houve delaminação fibra/matriz em todas as energias estudadas, além disso que a ruptura de fibra ocorreu em todas as energias para o **CV**, enquanto que para o **HKV** as rupturas ocorreram apenas a partir de 3 impactos com 31J.

Tabela 4.5: Comparativo global do compósito reforçado com fibra de vidro para diferentes energias de impacto (**CV**)

Compósito reforçado por fibra de vidro						
Energia	31J			46J	61J	76J
Nº de impactos	1	2	3	1	1	1
Delaminação	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ruptura de fibras	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Penetração total			✓	✓	✓	✓

Tabela 4.6: Comparativo global do compósito híbrido reforçado com fibras de vidro e kevlar para diferentes energias de impacto (**HKV**)

Compósito híbrido reforçado por kevlar/vidro				
Energia	31J	46J	61J	76J

Nº de impactos	1	2	3	4	1	2	1	1
Delaminação	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ruptura de fibras			✓	✓		✓	✓	✓
Penetração total				✓		✓	✓	✓

Desenvolveu-se o gráfico da energia de impacto em função do número de impactos aplicados (Figura 4.8), para o caso onde ocorreu penetração total do corpo de prova, onde se verifica que o laminado híbrido kevlar/vidro (**HKV**) suportou maior quantidade de energia do que o laminado reforçado somente com vidro (**CV**). Isto demonstra a importância de se utilizar um reforço de kevlar na composição do laminado para aumentar sua resistência ao impacto. O aumento proporcionado foi de 31% de 46 J para 61 J na energia absorvida com o acréscimo de 3 camadas de tecido de fibra de kevlar ou o acréscimo de um número maior de impactos para a penetração total do corpo de prova.

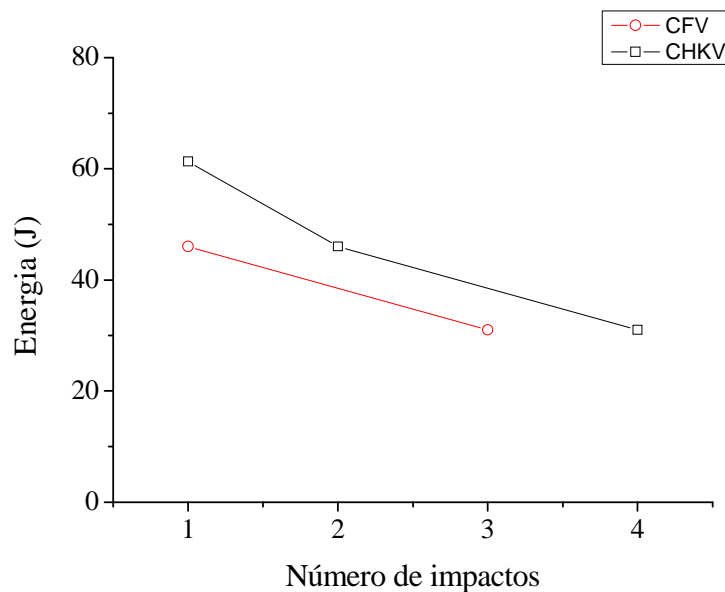


Figura 4.8: Diagrama Energia x Número de impactos necessários para penetração total

Com o intuito de demonstrar as características dos danos causados por cada energia nos materiais estudados, serão apresentados a seguir a análise visual referente a cada resultado obtido e apresentado nas Tabelas 4.5 e 4.6.

4.4.1.1 Energia de Impacto 31 J

O compósito reforçado por fibra de vidro apresentou uma boa capacidade para suportar o impacto com a energia de 31 J, pois foi preciso receber uma sequência de três impactos no mesmo corpo de prova para ocorrer penetração total do material.

Mostra-se na Figura 4.9 o resultado do dano com a energia de 31 J impactada por três vezes consecutivas na amostra do compósito de fibra de vidro. A análise visual vista na Figura 4.9(a), caracteriza-se o dano causado na área comprimida do compósito, observa-se que ocorreu uma delaminação fibra/matriz próximo do local de contato do impactador entre o corpo de prova e quebra da fibra de vidro no local da penetração. A Figura 4.9(b), mostra o dano causado na área tracionada, evidenciando um ressalto ocasionado pelo impactador e consequentemente a quebra das fibras de vidro.

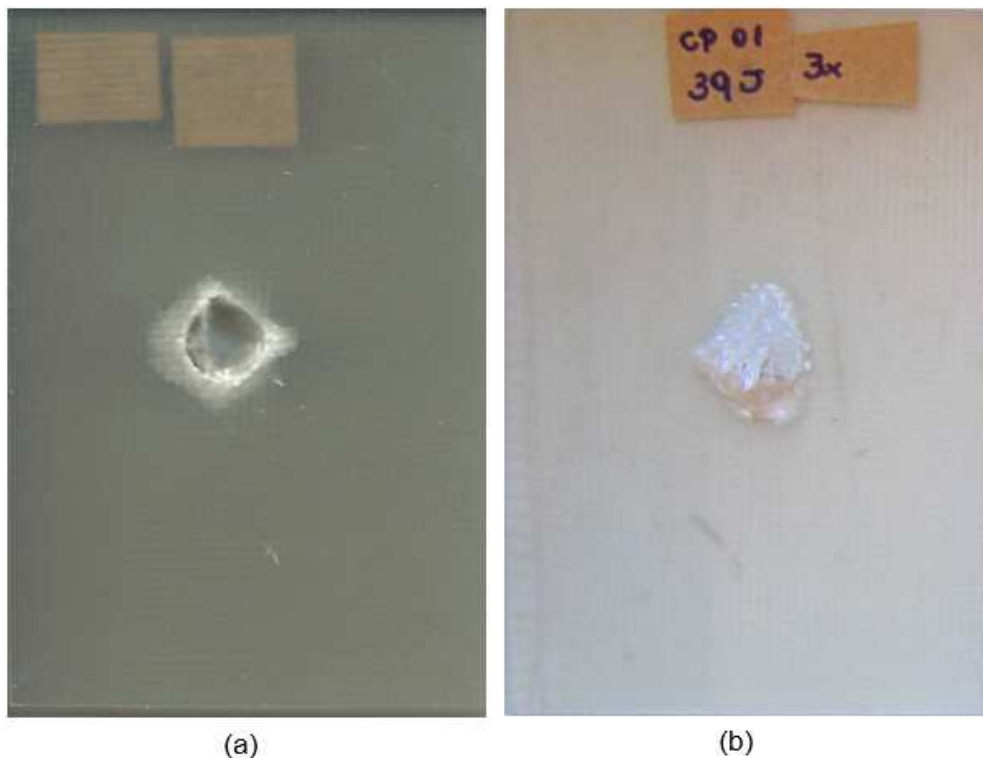


Figura 4.9: Danos no CV com a energia de impacto 31 J impactado 3 vezes: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto

(Fonte: Próprio Autor)

Para efeito de comparação, mostra-se na Figura 4.10 o resultado do dano com único impacto com a energia de 31 J no compósito de fibra de vidro. Nota-se que houve pequenos danos na estrutura final do corpo de prova. Na Figura 4.10 (a), observa-se que apenas uma pequena área foi danificada,

ocorrendo a delaminação fibra/matriz e pouco esmagamento do local que foi impactado, ou seja, o pêndulo chegou a penetrar apenas as camadas iniciais do laminado. Analisando a Figura 4.10 (b), vê-se também uma delaminação localizada, sem quebra das fibras no local do impacto, mas com a presença de um pequeno ressalto na espessura, ocorrência proveniente do esmagamento de parte do reforço fibroso.

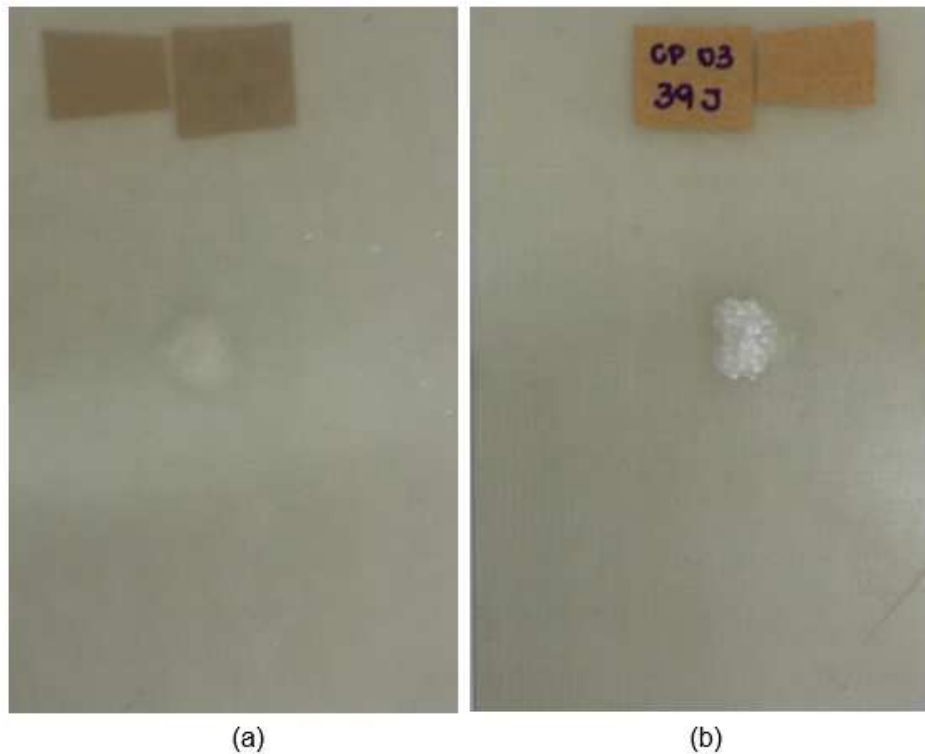


Figura 4.10: Danos no **CV** com a energia de impacto 31 J: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto

(Fonte: Próprio Autor)

Para o compósito híbrido com essa quantidade de energia precisou-se de uma sequência maior que 3 impactos no mesmo corpo de prova para chegar até a penetração total do impactador, o mostrando que o compósito híbrido tem maior capacidade de absorção de impacto comparado com o compósito de vidro.

Pode-se observar na Figura 4.11 o resultado do dano com a energia de 31 J impactada por 4 vezes seguintes até chegar a sua perfuração do compósito híbrido. Na Figura 4.11(a), que é o dano causado na face impactada, mostrando que houve uma delaminação ao longo de todo o corpo de prova no sentido do comprimento do mesmo e quebra das fibras de vidro e de kevlar no local da penetração. Logo analisando a Figura 4.11(b), que é o dano causado na área oposta do impacto, em que também

apresenta delaminação, sendo próxima do local de contato do impactador com o corpo de prova e quebra das fibras de vidro e de kevlar de todas as camadas no local da penetração do impactador, como consequência observa-se o grande ressalto de ruptura das fibras.

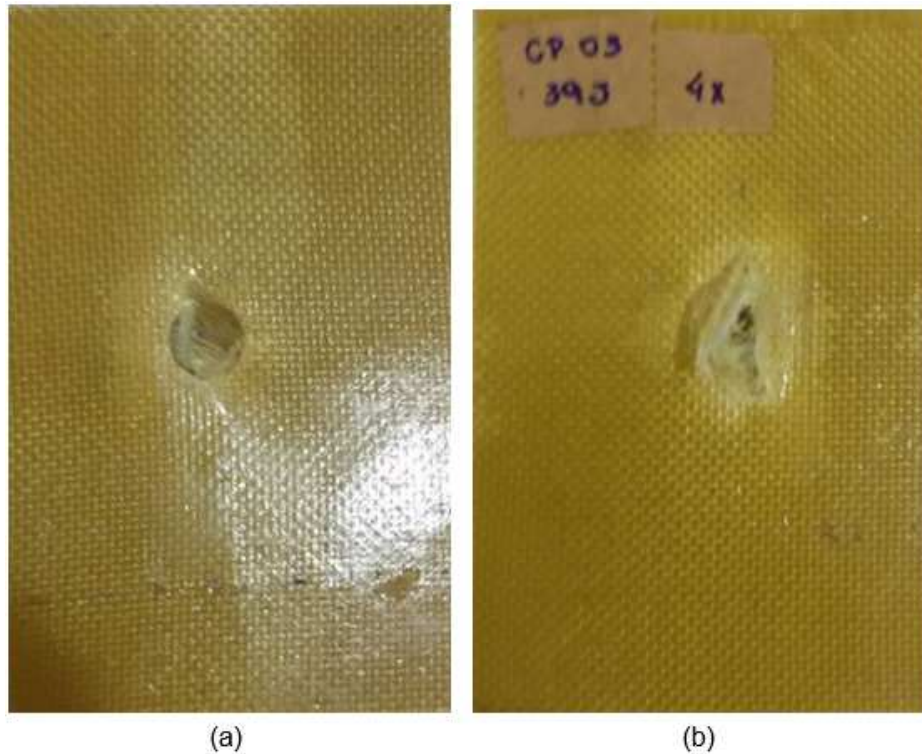


Figura 4.11: Dano no **HKV** com a energia de impacto 31 J impactado 4 vezes: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto

(Fonte: Próprio Autor)

Mostra-se na Figura 4.12 o resultado do dano com a energia de 31 J com um único impacto no compósito híbrido. Observa-se com isso, pouca variação na estrutura final do compósito, ou seja, essa quantidade de energia atrelada à única penetração não foi suficiente para que o impactador penetrasse no material. As Figura 4.12(a) e (b) trazem a ocorrência de pouca delaminação ao longo de todo o corpo de prova no sentido do comprimento do mesmo, a presença do esmagamento de algumas fibras no local de contato com o impactador, não houve a quebra total das fibras e observa-se um pequeno ressalto na área oposta ao impacto.

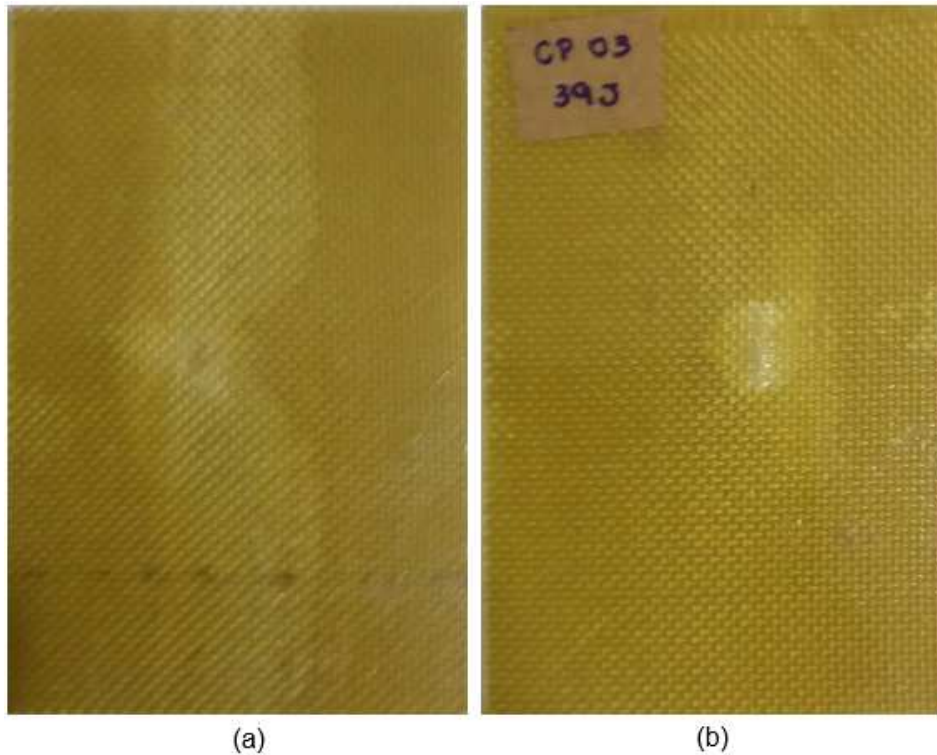


Figura 4.12: Dano no **HKV** com a energia de impacto 31 J: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto

(Fonte: Próprio Autor)

4.4.1.2 Energia de impacto 46J

No compósito reforçado com fibras de vidro, a energia de impacto de 46 J, foi suficiente para o impactador penetrar toda a espessura do corpo de prova com um único impacto, ocorrendo perfuração total do laminado, podendo afirmar assim, que essa energia de impacto ultrapassou o limite de energia necessária para a perfuração do material.

Mostra-se na Figura 4.13 o resultado do dano com a energia de impacto de 46 J para o compósito de fibra de vidro. Analisando a Figura 4.13(a), é possível observar a delaminação fibra/matriz próximo do local de contato do impactador com o corpo de prova com a ocorrência de quebra da fibra de vidro no local da penetração. Analisando a Figura 4.13(b), pode-se observar um ressalto ocasionado pelo impactador como consequência do rompimento de fibras ao longo de toda a espessura do corpo de prova e delaminação também próximo do local que recebeu impacto.

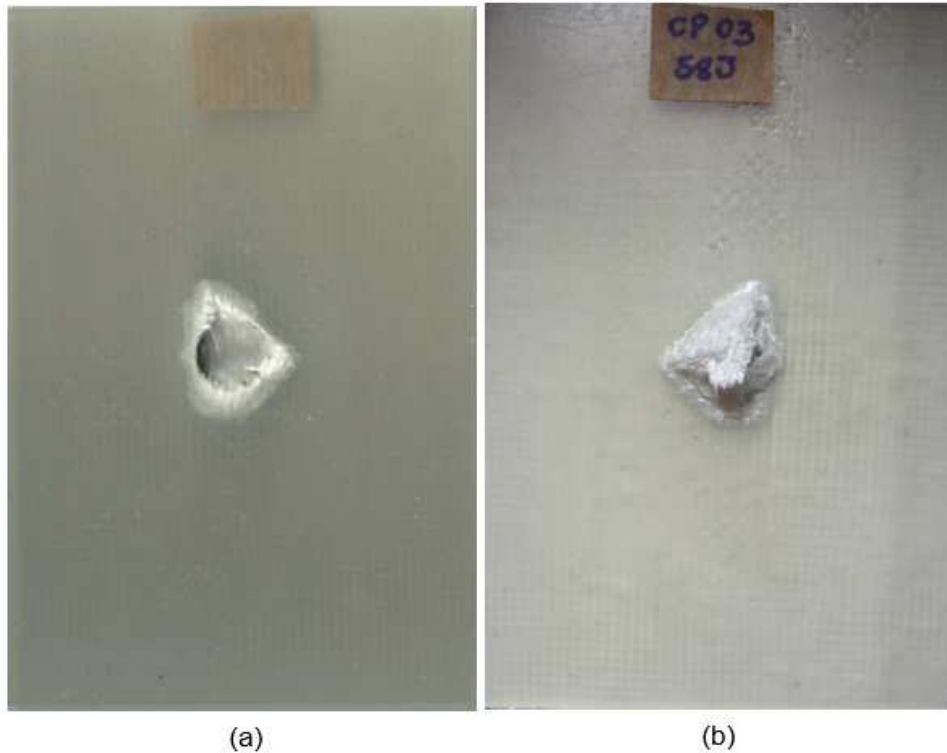


Figura 4.13: Dano no **CV** com a energia de impacto 46 J: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto

(Fonte: Próprio Autor)

Para o compósito híbrido com a quantidade de energia de 46 J precisou-se de uma sequência de dois impactos no mesmo corpo de prova para chegar até a penetração total do impactador, o que pode dizer que esse tipo de compósito necessita de uma maior energia de impacto para chegar no seu limite de perfuração, o que nos mostra que o compósito híbrido tem maior capacidade de absorção de impacto comparado com o compósito de vidro.

A Figura 4.14 nos apresenta o resultado do dano com a energia de impacto de 46 J impactado por duas vezes seguintes no compósito híbrido. Na Figura 4.14(a), observa-se que houve uma delaminação fibra/matriz ao longo de todo o corpo de prova no sentido do comprimento do mesmo e também houve quebra das fibras de vidro e de kevlar no local da penetração e analisando a Figura 4.14(b), é possível ver a delaminação próxima do local de contato do impactador com o corpo de prova e quebra de todas as fibras no local da penetração, como consequência o grande ressalto da ruptura das fibras ocasionado pelo impactador.

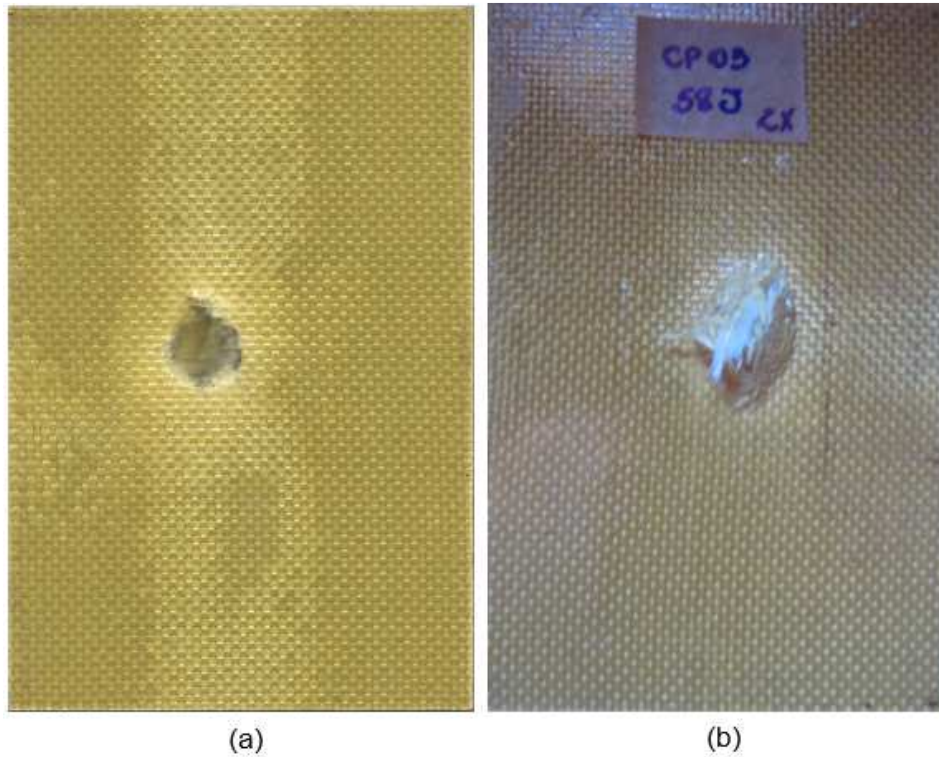


Figura 4.14: Dano no **HKV** com a energia de impacto de 46 J impactado 2 vezes: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto

(Fonte: Próprio Autor)

Mostra-se na Figura 4.15 o resultado do dano com a energia de 46 J com um único impacto no compósito híbrido. Pela figura é possível observar que houve poucos danos na estrutura do corpo de prova. Na Figura 4.15(a), que é o dano causado lado impactado, observa-se delaminação ao longo de todo o corpo de prova no sentido do comprimento do mesmo e também houve uma pequena penetração do impactador, ou seja, o impactador chegou a penetrar apenas as primeiras camadas do compósito. Analisando a Figura 4.15(b), que é o dano causado na área oposta do impacto, também nos mostra desaderência, sendo esta próxima do local de contato do impactador com o corpo de prova e início de quebra das fibras no local da penetração, como consequência o pequeno ressalto das fibras neste local.

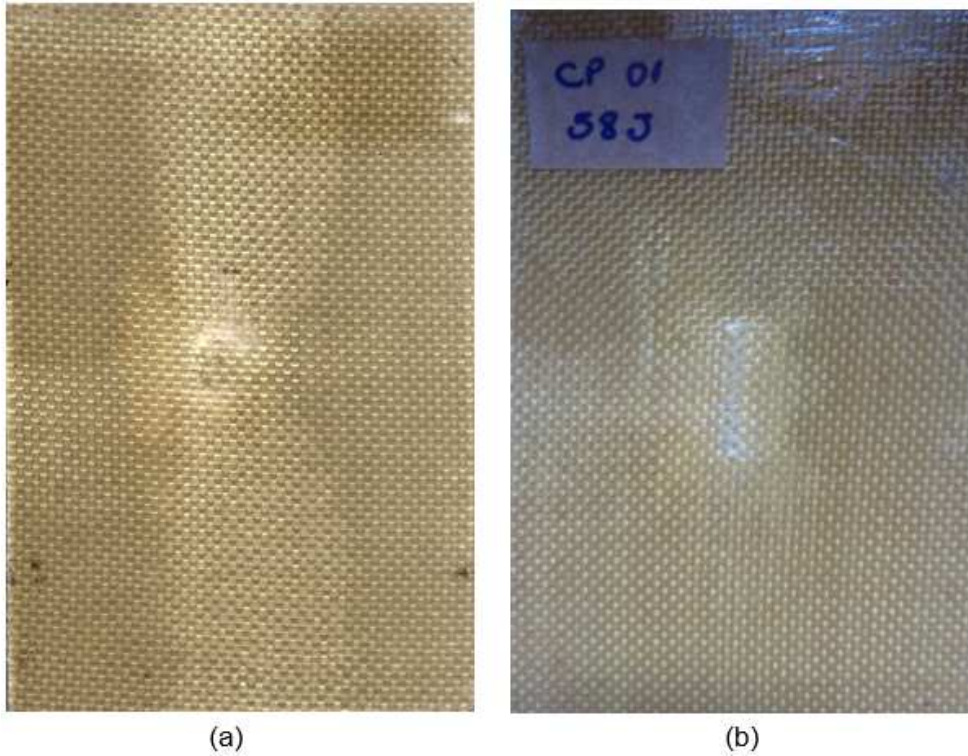


Figura 4.15: Dano no **HKV** com a energia de impacto 46 J: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto

(Fonte: Próprio Autor)

4.4.1.3 Energia de Impacto 61 J

No compósito reforçado com fibra de vidro, a energia de impacto de 61 J é superior a energia de limite de perfuração que é suficiente para o impactador penetrar toda a espessura do corpo de prova, o que se pode observar nas Figura 4.16 que não houve grande variação nas características do dano.

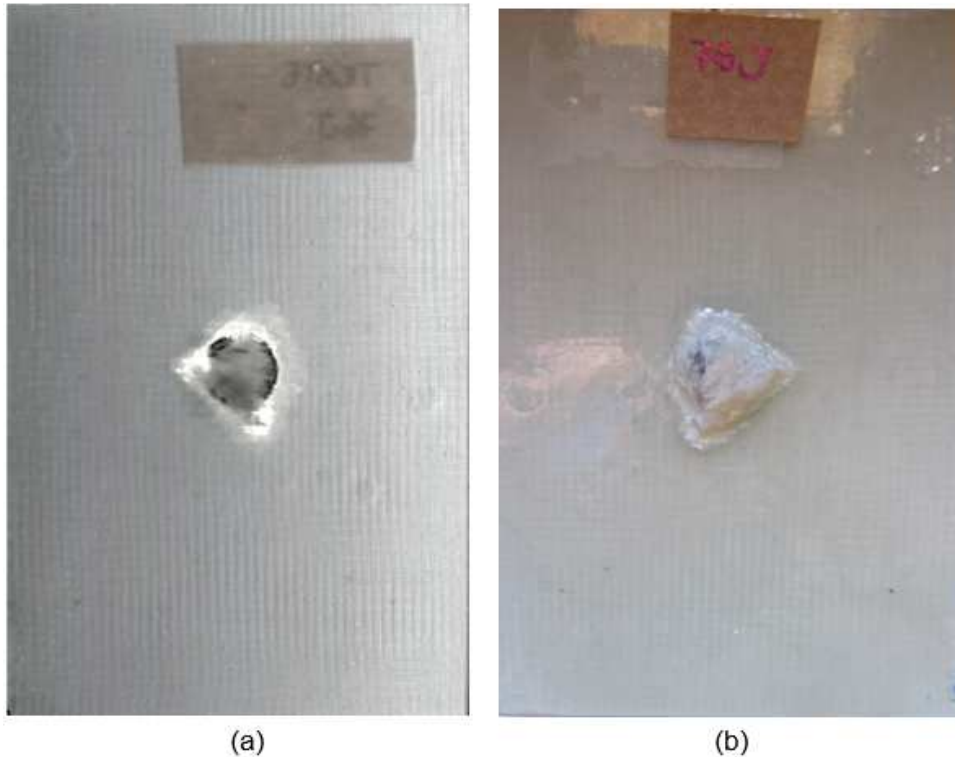


Figura 4.16: Dano no CV com a energia de impacto 61 J: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto

(Fonte: Próprio Autor)

Para o compósito híbrido kevlar/vidro, a energia de impacto de 61 J, foi suficiente para o impactador penetrar todas as camadas do corpo de prova, o que podemos caracterizar que essa energia de impacto ultrapassou o limite de energia necessária para a perfuração desse compósito. Comparando as Figura 4.15 e Figura 4.17, pode-se observar grande mudança nas características do dano.

Mostra-se na Figura 4.17 o resultado do dano com a energia de impacto de 61 J no compósito híbrido. Na Figura 4.17(a), verifica-se delaminação fibra/matriz ao longo de todo o corpo de prova no sentido do comprimento do mesmo e quebra das fibras de vidro e de kevlar de todas as camadas no local da penetração. Analisando a Figura 4.17(b), também é possível observar a delaminação, sendo esta concentrada próxima ao local de contato do impactador com o corpo de prova, e além disso, é possível observar também a quebra de todas as fibras no local da penetração, como consequência o grande ressalto de explosão das fibras ocasionado pelo impactador.

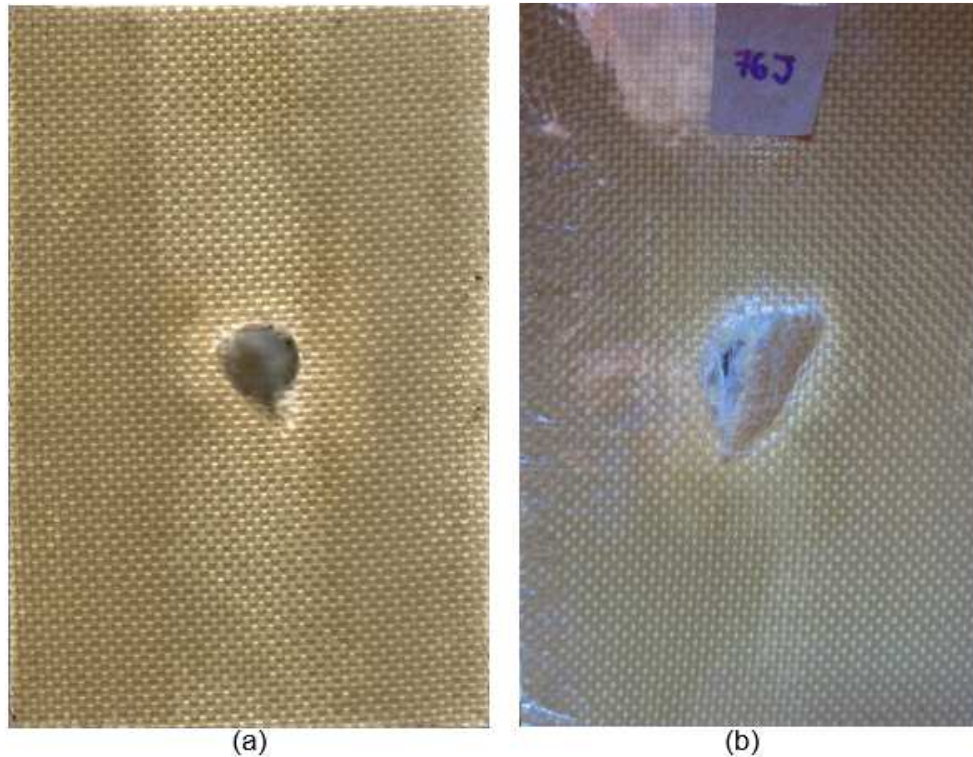


Figura 4.17: Dano no **HKV** com a energia de impacto 61 J: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto

(Fonte: Próprio Autor)

4.4.1.4 Energia de Impacto 76 J

No compósito reforçado por fibra de vidro, a energia de impacto de 76 J é superior a energia de limite de perfuração que é suficiente ocorrer a perfuração total da amostra, o que não apresentou mudança nas características do dano quando comparamos com as imagens que apresenta o impacto com a energia de 46 J. Mostra-se na Figura 4.18 que para ambos os lados houve a delaminação concentrada próximo do local do impacto, e rompimento de todas as fibras.

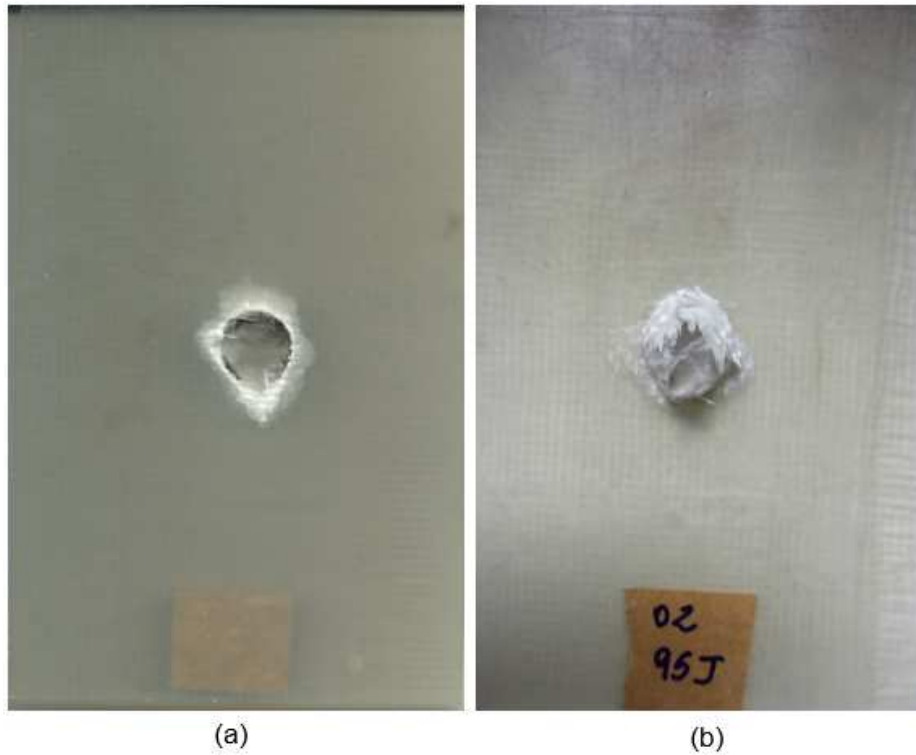


Figura 4.18: Dano no CV com a energia de impacto 76 J: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto ao impacto

(Fonte: Próprio Autor)

Para o compósito híbrido kevlar/vidro, a energia de impacto de 76 J é superior a energia de limite de perfuração desse compósito, que é suficiente para ocorrer a perfuração total da amostra, o que não apresentou mudança nas características do dano quando comparamos com as imagens que apresenta o impacto com a energia de 61 J. Mostra-se na Figura 4.19 a delaminação que se propagou no comprimento do corpo de prova na face que foi impactada e a quebra de todas as fibras no lado oposto ao impacto.

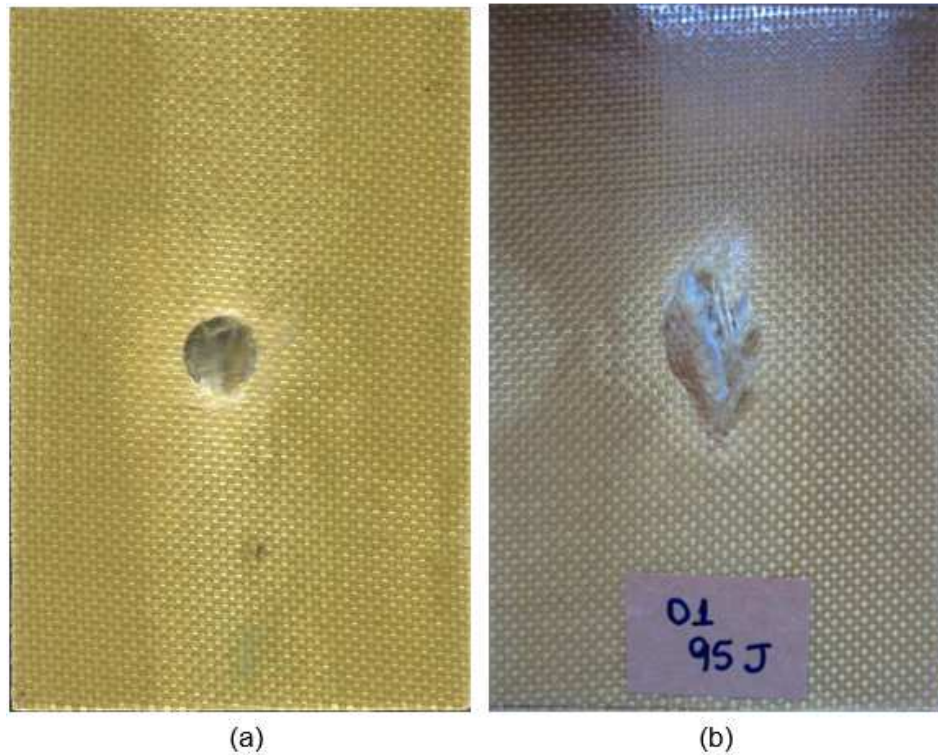


Figura 4.19: Dano no **HKV** com a energia de impacto 76 J: (a) Lado do impacto; (b) Lado oposto do impacto

(Fonte: Próprio Autor)

4.4.2 Avaliação da área do dano

Com o intuito de avaliar a delaminação dos corpos de prova verificando de modo indireto sua resistência residual, utilizando o software IMAGE J para esta finalidade, verificou-se a área das amostras, tanto na face impactada como no seu lado oposto e estes resultados são demonstrados nas Tabelas 4.7 e 4.8.

Verificou-se a área da delaminação ocorrida nos materiais através da imagem dos mesmos, a área foi medida na face impactada e a face oposta ao impacto. As duas faces apresentaram a delaminação ocorrida próxima a superfície do corpo de prova, na qual a face impactada ocorreu esta delaminação devido ao carregamento instantâneo compressivo e na face oposta devido ao carregamento instantâneo de tração.

Demonstra-se nas Tabela 4.7 e Tabela 4.8 os valores da área de delaminação obtidos para cada energia de impacto para o laminado de fibra de vidro (**CV**) e híbrido (**HKV**), respectivamente.

Tabela 4.7: Área do dano no ensaio de impacto por queda de peso nas placas **CV**.

Energia de Impacto (J)	Número de impactos	Área do dano na placa			
		Lado do impacto (cm ²)	Diâmetro médio (cm)	Lado oposto ao impacto (cm ²)	Diâmetro médio (cm)
31	1	3,7	2,2	3,2	2,0
	2	5,3	2,6	5,1	2,5
	3	7,9	3,2	7,4	3,0
46	1	7,6	3,1	7,1	3,0
61	1	7,8	3,2	7,3	3,0
76	1	7,9	3,2	7,5	3,1

Observamos na Tabela 4.7 que os valores da área impactada se comportaram de forma crescente passando de 3,7 cm² à 7,9 cm² no lado do impacto, e de 3,2 cm² à 7,5 cm² no lado oposto, apresentando assim uma variação quase que constante entre as áreas que receberam esforços compressivos (lado do impacto) e trativos (lado oposto) no ensaio de impacto.

Analisando a Tabela 4.8, que traz os valores da área danificada para ambos os lados do compósito híbrido, podemos inferir que por se tratar de um material híbrido e com a presença de camadas de fibra Kevlar, esse laminado obteve uma área de dano maior do que ao **CV**, isso fica claro, se compararmos os dados das Tabelas 4.7 e 4.8. Assim como o **CV**, o **HKV** apresentou um comportamento crescente para as áreas danificadas, porém apresentou maiores variações nas áreas do dano, em que a área do dano no lado do impacto variou de 64,7 cm² para 80,4 cm², correspondendo a uma variação de 15,7 cm², enquanto a área do lado oposto obteve uma variação da área 17,6 cm², representando uma diferença de 2 cm² na variação das áreas entre os lados estudados, essa variação entre os lados que receberam esforços compressivos e trativos também foi maior que a do **CV**, mostrando assim o efeito causado pela delaminação no compósito híbrido.

Tabela 4.8: Área do dano no ensaio de impacto por queda de peso nas placas **HKV**

Energia de Impacto (J)	Número de impactos	Área do dano na placa			
		Lado do impacto (cm ²)	Diâmetro médio (cm)	Lado oposto ao impacto (cm ²)	Diâmetro médio (cm)
31	1	64,7	9,1	15,7	4,5
	2	70,6	9,5	25,1	5,6
	3	84,7	10,4	38,2	7,0
	4	85,5	10,4	48,8	7,9
46	1	65,7	9,1	16,6	4,6
	2	77,0	9,9	46,7	7,7
61	1	72,4	9,6	31,9	6,4
76	1	80,4	10,1	33,3	6,5

Para melhor avaliar estes resultados, os gráficos de linhas vistos nas Figura 4.20 e Figura 4.21, mostra que para ambos os compósitos estudados, as áreas do dano do lado do impacto apresentam valores maiores quando comparados com a área do dano no lado oposto ao impacto para todas as energias de impacto utilizadas. É importante observar também, que a escala dos gráficos não são as mesmas devido à faixa da área de dano dos compósitos estudados serem diferentes, portanto usou-se uma faixa de entre 0 a 10 cm² para o **CV** e uma faixa de 0 a 100 cm² para o **HKV**.

Mostra-se na Figura 4.20 o **CV** com as diferentes energias de impacto usadas no estudo e a área de dano, o comportamento do material se deu de forma homogênea para as diferentes áreas analisadas sob o efeito dos diferentes lados (impactado e oposto ao impacto), vimos que para todas as energias de impacto impostas, a variação de área danificada ficou em torno de 0,5 cm². Esse comportamento homogêneo reflete também nas linhas vistas no gráfico, que com o aumento das energias de impacto teve um aumento nos valores das áreas danificadas, representando nas linhas gráficas um aumento expressivo, saindo de 3,7 para 7,6 cm², seguido de valores quase que constantes para as energias de 46, 61 e 76 J, com isso, pode-se concluir que o limite de perfuração foi ultrapassado para essas energias (46, 61 e 76 J), fazendo com que a área do dano continue constante, devido ao dano máximo no compósito provocado em toda sua estrutura.

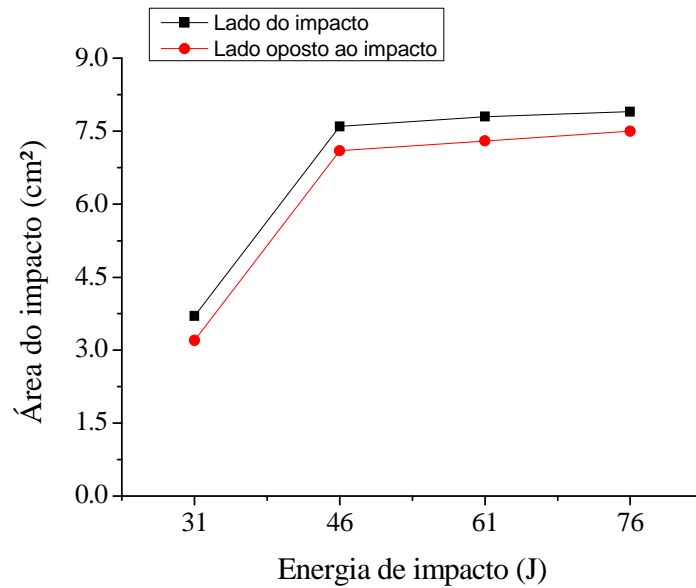


Figura 4.20 : Curvas da área do dano em função da energia de impacto no compósito de fibra de vidro (CV)

Na Figura 4.21, fica evidenciado que o comportamento do **HKV** foi diferente do **CV**, as linhas para as diferentes faixas de energias de impacto em relação às áreas danificadas foram distintas quando se relacionam com os lados impostos (lado do impacto e lado oposto ao impacto). A variação da área danificada entre ambos os lados do compósito foi diversificada, vejamos, para a faixa de energia de impacto entre 31 J e 46 J, a variação da área foi a mesma em torno de 49 cm², já a variação da área de dano para as energias de 61 J e 76 J, foram em torno de 40 cm² e 47 cm², respectivamente. Podemos ver na forma gráfica que na faixa entre as energias de 31 J e 46 J, uma linha constante para os valores das áreas em ambas as faces do **HKV**, já para a faixa de 46 J e 61 J, um aumento mais expressivo na face tracionada do material. E para a faixa de energia de impacto entre 61 J e 76 J, um comportamento constante para o lado oposto ao impacto do material e um pequeno aumento na área danificada do lado do impactado.

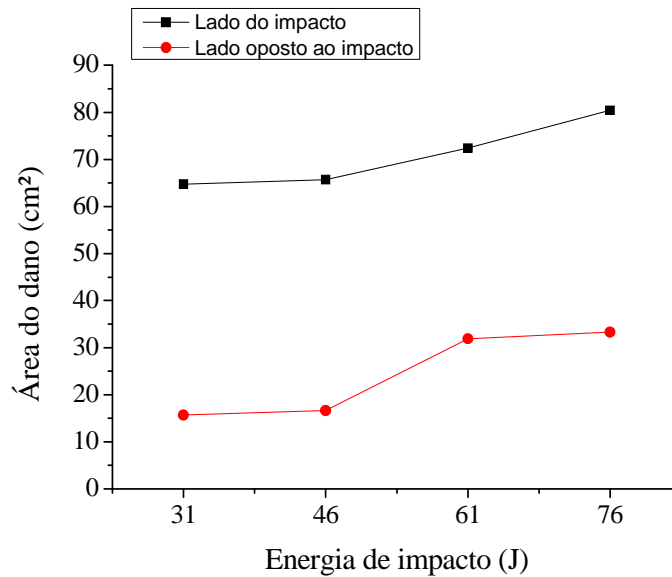


Figura 4.21: Curvas da área do dano em função da energia de impacto no compósito híbrido (HKV)

Para efeito de comparação entre os materiais estudados se apresenta nas Figura 4.22 e Figura 4.23 as áreas de dano na região comprimida e tracionada respectivamente, onde se verifica uma peculiaridade em comum nas placas de fibra de vidro: ambas apresentaram menores resultados em relação aos danos causados se comparado as placas híbridas, ou seja, o compósito de fibra de vidro ocasionou um o dano localizado, pois houve uma menor delaminação no decorrer do corpo de prova. Já no compósito híbrido as áreas foram maiores porque a delaminação se propagou em todo o comprimento do corpo de prova, como visto na literatura, que a delaminação ocorre de forma alongada ao longo do seu eixo principal coincidente com a orientação das fibras da camada abaixo da interface.

Uma característica que observamos na Figura 4.22, é o fato de que o **CV** se manteve praticamente constante em todas as faixas de energia impostas (31 J, 46 J, 61 J e 76 J), quando levamos em consideração o lado do impacto dos CP's. Diferente do que ocorreu com o **HKV**, esse apresentou uma forma crescente nos valores das áreas danificadas, para as diferentes energias de impacto.

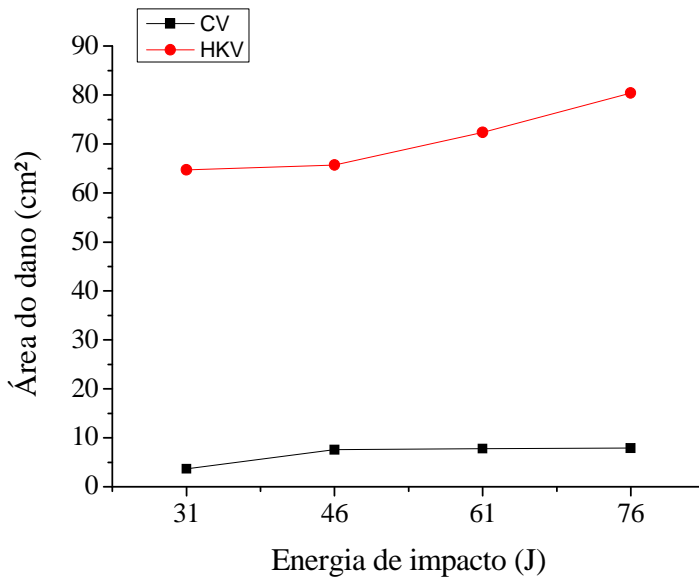


Figura 4.22: Curvas da área do dano do lado do impacto em função da energia de impacto nas placas vidro *versus* híbridos

No lado oposto ao impacto apresentado na Figura 4.23, o **CV** manteve-se praticamente constante assim como no lado do impacto, isso mostra que um comportamento mais homogêneo do material visto que é formado apenas um material de reforço fibroso. Já no **HKV** podemos notar que ocorreu um aumento considerável na área de dano no lado oposto ao impacto, na energia de impacto de 61 J, passando de 16,6 cm² para 31,9 cm², seguindo depois uma forma constante para a energia de 76 J. Esse aumento de área danificada, é justificado pelo o aumento da energia de impacto bem como pela presença das fibras de kevlar no compósito caracterizando-o como material híbrido.

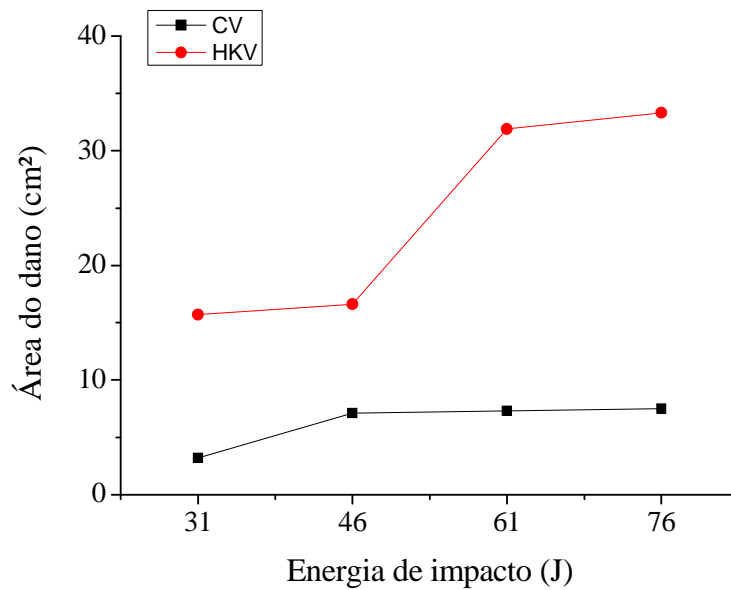


Figura 4.23: Curvas da área do dano do lado oposto do impacto em função da energia de impacto nas placas vidro *versus* híbridos.

4.4.2 Análise microscópica da fratura

Com o intuito de explicar o comportamento mecânico apresentado pelo **CV** e **HKV**, será apresentada a seguir a análise microscópica realizada através do MEV na região da fratura causada pelo ensaio de impacto com 46J de energia.

As Figura 4.24 (a) e (b) mostram a microscopia dos compósitos reforçados por fibras de vidro (**CV**). Na Figura 4.24 (a) é possível observar na região impactada a ruptura de fibras de vidro com alguns fragmentos da matriz ainda aderidos às fibras, além disso é possível ver também mechas de fibra de vidro com adesão da matriz em praticamente toda sua superfície. Na Figura 4.24 (b), é possível analisar as extremidades das fibras de vidro após a fratura, em que apresentam fratura coesiva na fibra, mostrando também a grande aderência da matriz nestas fibras.

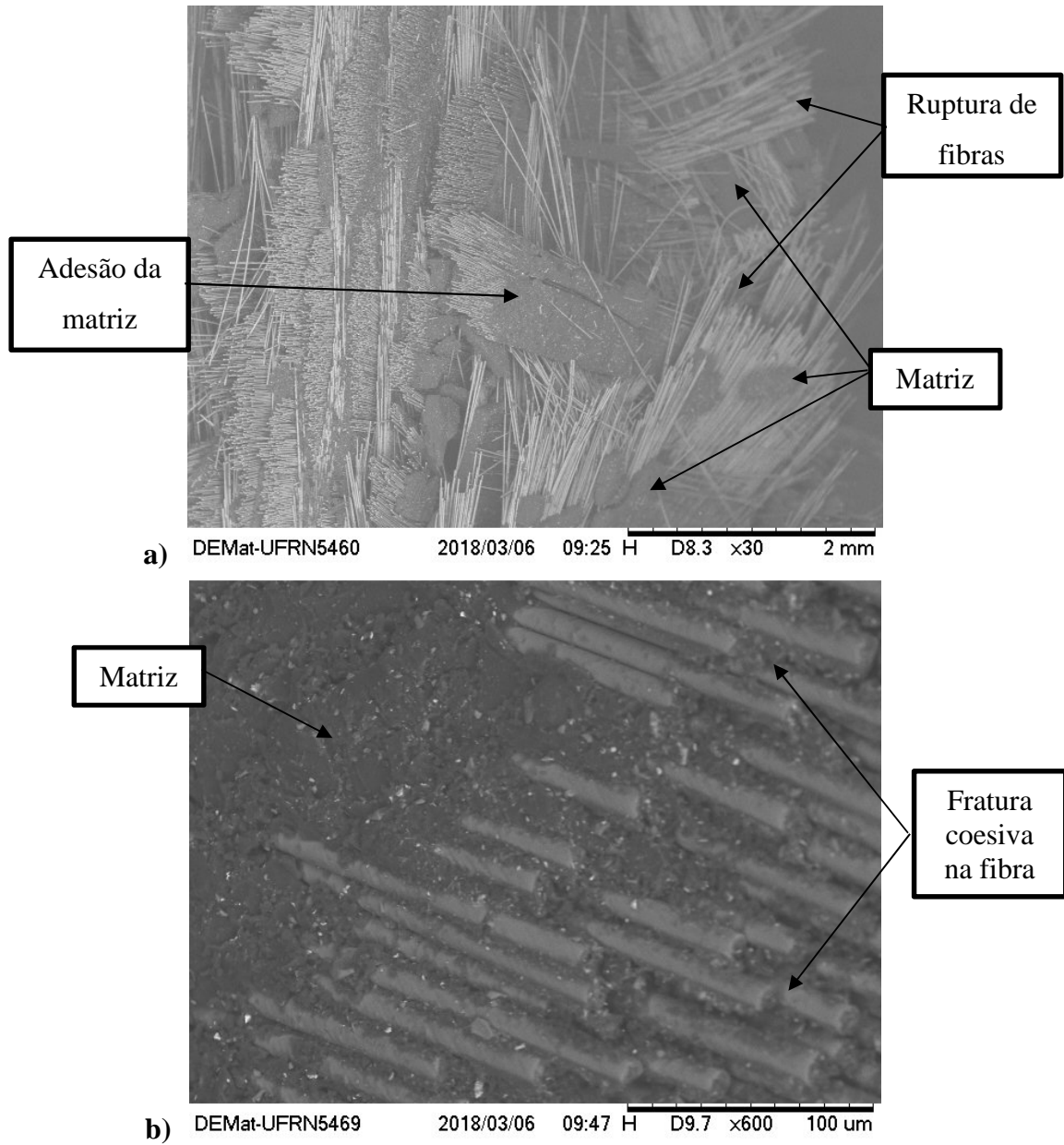


Figura 4.24 : Microscopia da fratura dos compósitos CV: **a)** Região impactada; **b)** Fibras após fratura

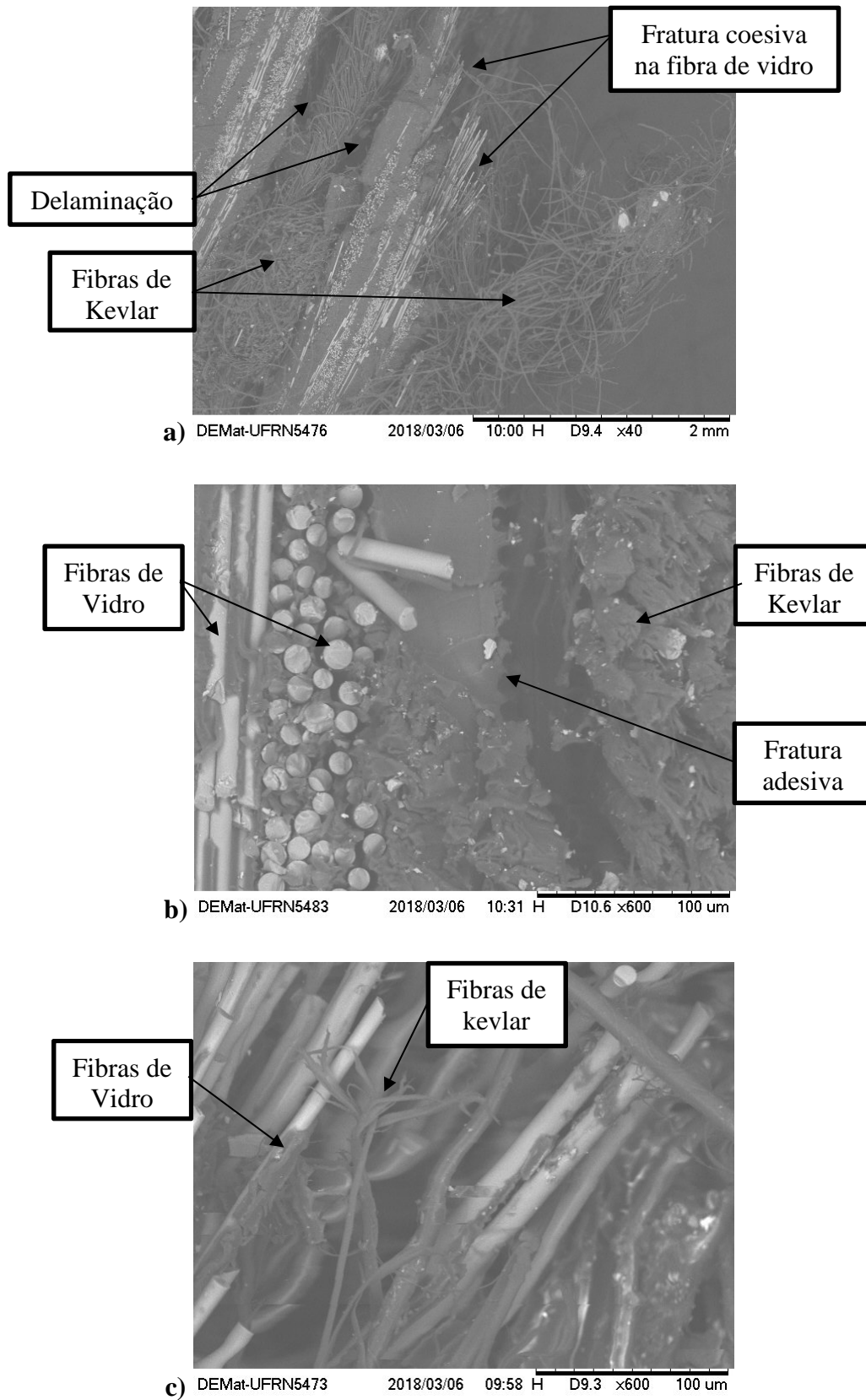


Figura 4.25: Microscopia da fratura dos compósitos **HKV**: **a)** Região impactada; **b)** Interface Fibra de Vidro/Matriz/Fibra de Kevlar; **c)** Fibras após fratura

Apresentam-se nas Figura 4.25 (a), (b) e (c), a microscopia da fratura dos compósitos híbridos reforçados com fibras de vidro e kevlar. A Figura 4.25 (a), apresenta a região do dano de impacto em que mostra principalmente fraturas coesivas ocorridas nas fibras de vidro, além de apresentar também delaminações entre as camadas de fibra de vidro e kevlar, mostrando que essas delaminações não ocorrem somente nas superfícies dos corpos de prova, como mostrado na análise macroscópica do dano, mas também internamente, confirmando a baixa aderência no conjunto kevlar/matriz.

Na Figura 4.25 (b) é possível notar na região da interface vidro/matriz/kevlar, fraturas adesivas ocorridas entre as camadas de kevlar e matriz, causadas pelas delaminações internas. Já na Figura 4.25 (c), é possível notar esgarçamento das fibras de kevlar e além disso, nota-se que ainda após a fratura há vários pontos de resinas aderidas nas fibras de vidro, que ainda permanecem aglomeradas e mostram assim, a boa qualidade da interface fibra/matriz nas camadas de vidro do compósito híbrido. Estes resultados confirmam os resultados obtidos na análise visual dos compósitos impactados.

4.5 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO COMPÓSITO APÓS O IMPACTO

Neste tópico serão apresentadas as propriedades mecânicas das amostras após impacto realizados à 46J, que foi a energia necessária para os dois laminados sofrerem penetração total do material, através dos ensaios de flexão em três pontos e compressão (CAI), comparando seus resultados com os obtidos aos materiais ensaiados sem impacto para a análise de suas propriedades residuais.

4.5.1 Ensaio de compressão após impacto (CAI)

Apresentam-se nas Figura 4.26 (a) e (b) o comparativo das curvas tensão em função da deformação dos compósitos estudados ensaiados à compressão após impacto, com 46J. Na Figura 4.26(a), é possível observar que todas as amostras do **CV** apresentaram comportamento homogêneo, linear durante quase todo o ensaio e de baixa dispersão, quando comparada a Figura 4.26 (b), que apresenta o comportamento do **HKV**. Neste último, as cinco amostras apresentaram comportamento linear à aproximadamente 50% do carregamento, além de apresentarem como nos ensaios realizados

sem impacto, apresentados no item 4.2, uma maior dispersão, desta vez causada principalmente pela delaminação ocorrida no ensaio de impacto.

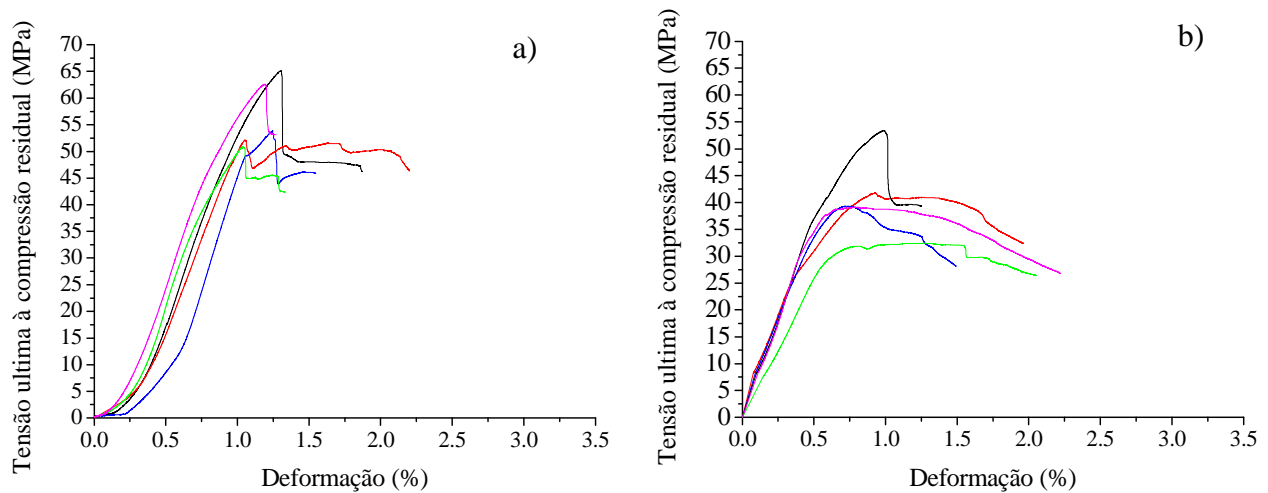


Figura 4.26: Curva tensão em função da deformação à compressão após impacto de 58J dos laminados: (a) **CV** e (b) **HKV**

A Tabela 4.9 apresenta os valores médios de tensão última à compressão após impacto, módulo de elasticidade e deformação máxima, além dos seus respectivos desvios padrão, obtidos no ensaio de compressão após impacto. Aqui é possível observar que para as propriedades de tensão e módulo de elasticidade, o **CV** alcançou maiores valores que o **HKV**, assim como aconteceu no ensaio de compressão sem impacto, além de apresentar os menores valores de desvio padrão nestas propriedades. Já na propriedade mecânica de deformação de ruptura, para os ensaios após impacto, o **HKV** apresentou maior resultado, sendo esta diferença de 17,12%.

Tabela 4.9: Propriedades mecânicas compressão após impacto dos laminados **CV** e **HKV**.

Propriedades mecânicas	Vidro	Kevlar/Vidro
Tensão última (MPa)	$56,49 \pm 5,86$	$41,19 \pm 7,64$
Módulo de elasticidade (GPa)	$7,87 \pm 0,76$	$6,48 \pm 1,46$

Deformação de ruptura (%) $1,84 \pm 0,79$ $2,22 \pm 0,72$

Na Figura 4.27 observa-se que para a propriedade de tensão última à compressão após impacto, o **CV** obteve maior valor médio, sendo 27,08% mais resistente que o **HKV**. Enquanto que na Figura 4.28 é possível observar que também no módulo de elasticidade após impacto, o **CV** alcançou maior valor, sendo de 17,66 % a diferença percentual quando comparado ao **HKV**.

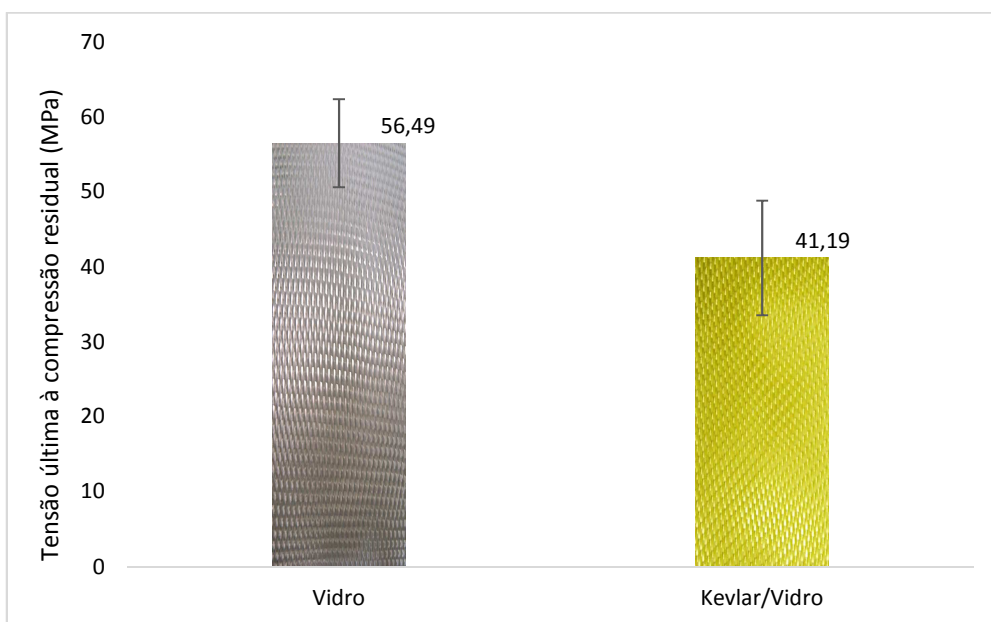


Figura 4.27: Tensão última à compressão após impacto dos laminados **CV** e **HKV**

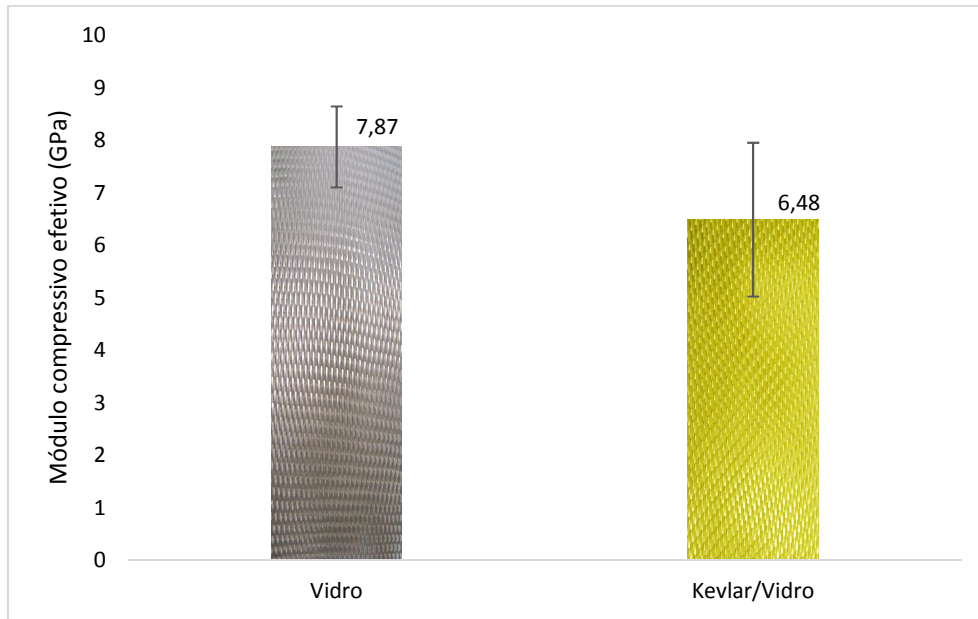


Figura 4.28: Módulo de elasticidade à compressão após impacto dos laminados **CV** e **HKV**

Analisando agora a Figura 4.29 que compara os valores de tensão última à compressão obtidos antes e após impacto realizados com 46J nos laminados estudados, é possível perceber que o dano de impacto não modificou o comportamento do **CV** para esta propriedade, visto que o resultado desta propriedade para o ensaio de compressão sem impacto é apenas 0,44% maior que o resultado obtido no ensaio realizado após impacto, podendo ser desprezada mediante o desvio padrão observado neste laminado. Já para o laminado **HKV**, o ensaio de impacto gerou uma diminuição na resistência final de 6,17%. Além disso, se verificou que após o impacto ocorreu uma diferença maior entre os laminados estudados, já que no ensaio sem impacto o **CV** foi 22,63% maior que o **HKV**, e no ensaio após impacto esta diferença foi de 27,08%. De maneira geral, é possível observar que o laminado **CV** possui resistência à compressão superior ao laminado **HKV**, nas duas condições estudadas.

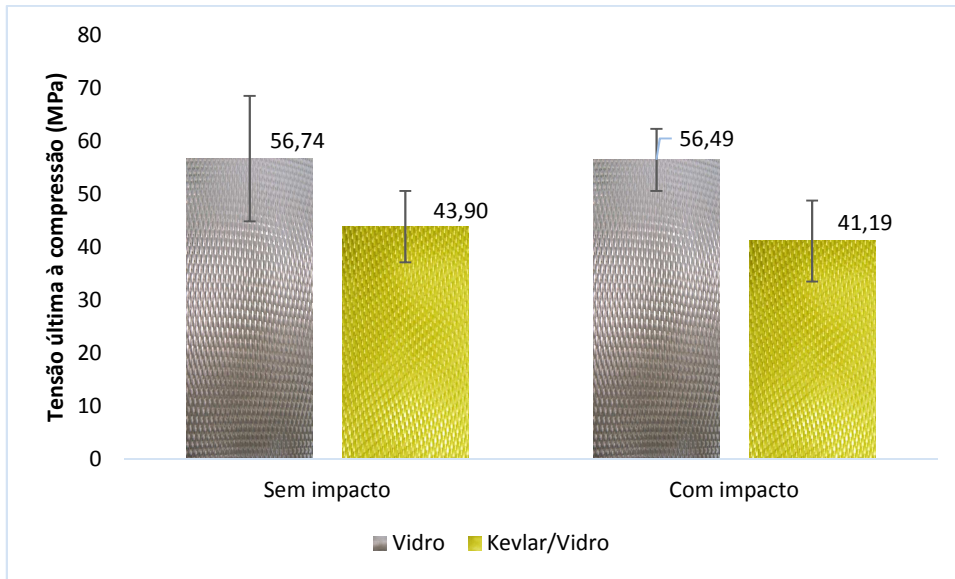


Figura 4.29: Comparativo da tensão última à compressão dos laminados **CV** e **HKV** antes e após impacto

A propriedade mecânica de módulo de elasticidade para as situações antes e após o impacto é apresentada na Figura 4.30. Aqui é possível observar que novamente o laminado **CV** obteve maiores valores que o **HKV**, antes e após impacto. Aqui também se verifica a pouca influência do impacto sobre o comportamento à compressão na rigidez dos dois laminados encontrando-se valores dentro dos limites do desvio padrão.

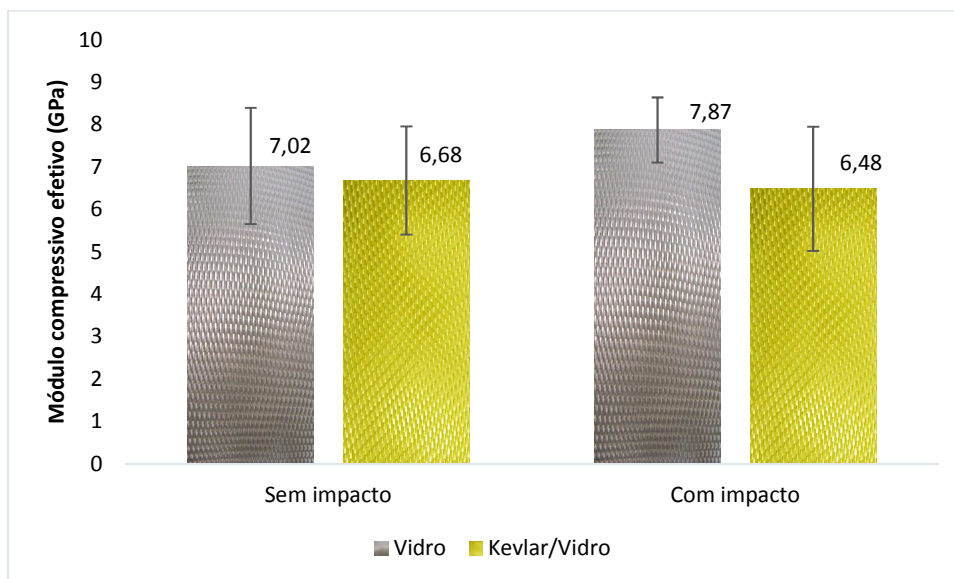


Figura 4.30: Comparativo do módulo de elasticidade à compressão dos laminados **CV** e **HKV** antes e após impacto

4.5.1.1 Análise do dano causado por Compressão após Impacto

Analisando a Figura 4.31, que apresenta as características do dano causado pelo ensaio de compressão após impacto (CAI), é possível ver que os laminados estudados apresentaram características diferentes tanto se compararmos os dois materiais estudados, quanto se compararmos ao dano apresentado pelo ensaio sem impacto. Os danos aqui apresentados foram classificados segundo a norma ASTM D7137 (2012), aqui o do **CV** foi do tipo LGM, em que caracteriza o dano de compressão como lateral longe do dano de impacto, enquanto que o **HKV** teve dano de compressão caracterizado como do tipo DDM em que ocorre o crescimento de delaminação (longitudinalmente) no meio do corpo de prova.

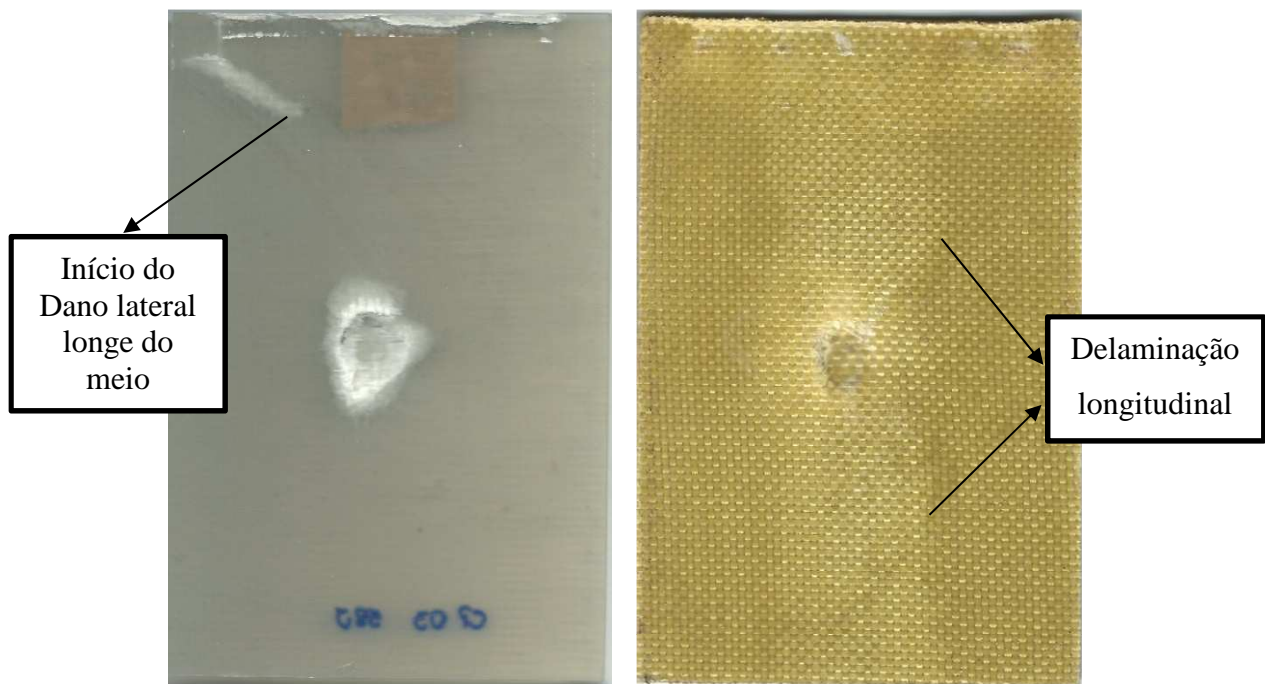


Figura 4.31: Característica do dano nos laminados **CV** e **HKV** submetidos à compressão após impacto

4.5.2 Ensaio de flexão em três pontos após impacto

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios de flexão em três pontos nos compósitos submetidos ao impacto de 46J de energia (energia limítrofe para penetração do impactador no compósito reforçado por fibra de vidro) no ensaio *drop weight*. Para esta análise, foram estudados os danos levando em consideração a distância ao centro do impacto, como demonstrado no tópico 3.7 desta tese.

4.5.2.1 Ensaio de flexão após impacto no compósito reforçado por fibra de vidro

Para demonstrar o comportamento dos laminados estudados, foram utilizadas quatro curvas médias obtidas nos ensaios de flexão em três pontos realizados, onde cada curva está relacionada ao resultado obtido de uma distância do ponto de impacto ensaiado com 46J de energia, sendo essas distâncias de: 21; 36 e 51 mm e sem impacto.

A Figura 4.32 apresenta as curvas médias da flexão após impacto para o laminado reforçado por fibra de vidro, analisando as quatro curvas é possível observar que no laminado à 21 mm de distância do dano houve o maior índice de perda da resistência, enquanto que, ao distanciar-se do dano, nas amostras de 36 mm e 51 mm de distância, a resistência permaneceu quase que intacta, quando comparado ao ensaio de flexão em corpos de prova sem impacto.

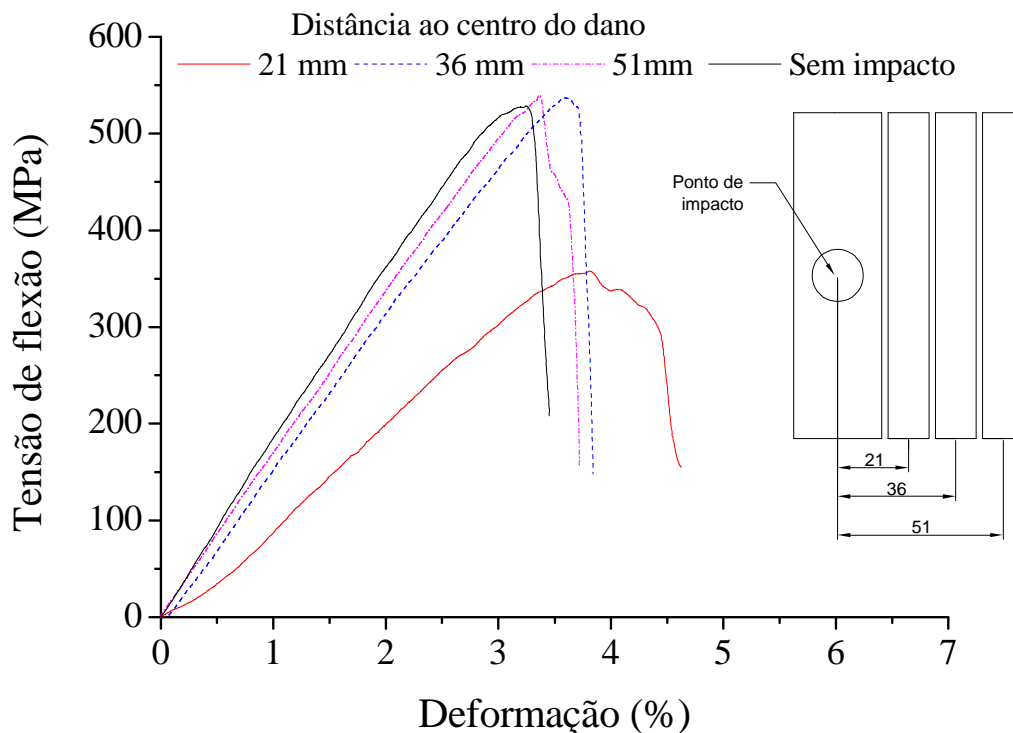


Figura 4.32: Curva tensão em função da deformação à flexão do compósito reforçado por fibras de vidro ensaiado à flexão após impacto

Analisando agora a Tabela 4.10, que apresenta as propriedades mecânicas de flexão após impacto de cada distância ao dano de impacto estudada, é possível observar um aumento gradativo das propriedades de tensão e módulo após impacto, à medida que aumenta a distância ao dano de impacto. É possível ver também que os desvios padrão encontrados também são maiores quando mais próximos ao dano, mostrando assim o efeito de irregularidade nas propriedades causados pelo impacto.

Tabela 4.10: Propriedades mecânicas de flexão após impacto conforme a distância ao centro do dano para o compósito reforçado por fibra de vidro

VIDRO COM IMPACTO 46J			
Distância (mm)	Tensão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação (%)
21	417,58 ± 140,58	12,85 ± 5,95	4,52 ± 0,46
36	539,16 ± 54,58	16,76 ± 2,84	3,80 ± 0,24
51	554,58 ± 55,16	16,63 ± 1,23	3,72 ± 0,29
Sem impacto	537,43 ± 48,36	17,95 ± 1,63	3,45 ± 0,29

Para melhor visualização, mostra-se na Figura 4.33 o comparativo entre as tensões últimas das amostras ensaiadas de acordo com a distância ao centro do dano. Aqui, é possível observar que a amostra mais próxima ao dano (21 mm) apresenta menor valor de tensão máxima bem como maior desvio padrão, e que, o valor máximo alcançado pela distância de 36 mm é 22,55% maior que a tensão máxima da amostra mais próxima ao dano.

Já na Figura 4.34 mostra-se o comparativo entre a rigidez alcançada para cada distância ao centro do dano estudada, aqui nota-se a amostra que mais sofreu influência do impacto foi a de 21 mm de distância do centro do impactador, visto que este dano reduziu a rigidez do material em 28,42% quando comparada à amostra sem impacto, além de apresentar o comportamento semelhante ao da tensão última no que se refere ao maior desvio apresentado entre as amostras estudadas, visto que a proximidade ao dano causou essa irregularidade nos resultados.

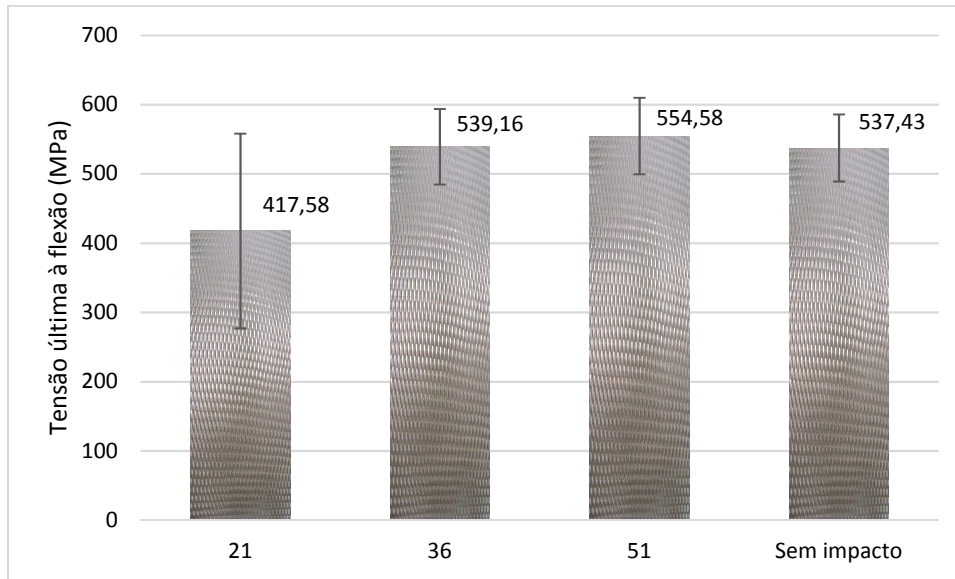


Figura 4.33: Tensão última à flexão após impacto conforme a distância ao centro do dano do compósito reforçado por fibra de vidro

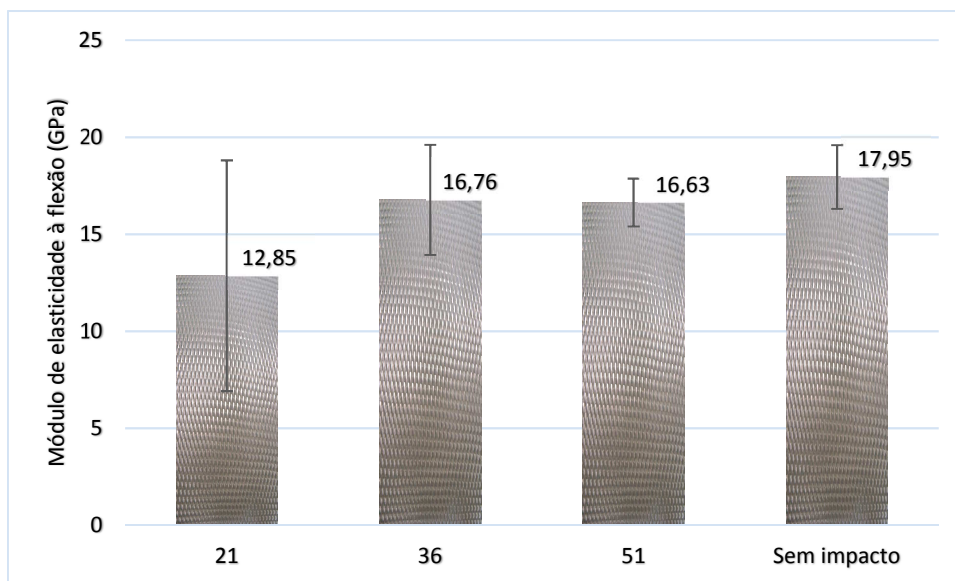


Figura 4.34: Módulo de elasticidade à flexão após impacto conforme a distância ao centro do dano do compósito reforçado por fibra de vidro

De maneira geral, é possível afirmar que para o **CV**, a partir de 36 mm de distância ao centro do impactador foram mantidos na média dos valores alcançados pela amostra sem impacto, considerando-se as tensões máximas e os módulos de elasticidade residuais, bem como os desvios

padrão. É importante salientar que o diâmetro médio do dano obtido para este caso (laminado **CV** com 1 impacto à 46J) tem aproximadamente 31 mm, como mostra a Tabela 4.7, ou seja, possui um raio de 15,5 mm que é próximo à distância do primeiro corpo de prova em relação ao ponto de impacto (21 mm) mais metade do corpo de prova (7,5 mm), ou seja, o próximo corpo de prova encontra-se fora da área de dano verificada visualmente.

4.5.2.2 Ensaio de flexão após impacto no compósito híbrido kevlar/vidro

Assim como foi feito para o **CV**, se analisará neste item os resultados do ensaio de flexão para o **HKV** após o impacto de 46J, que foram impactados uma e duas vezes, fazendo assim a análise nestas duas situações pois somente no segundo impacto ocorreu penetração total do impactador.

- **Flexão após impacto para compósito híbrido submetido à 46J de energia de impacto**

Com o intuito de analisar a influência do dano em relação as propriedades de flexão, mostra-se na Figura 4.35 o comportamento de flexão do **HKV** submetido à um impacto de 46J de energia em diferentes distâncias do ponto de impacto, inclusive na região de impacto, visto que para esta energia como mostrado no item 4.5.1, não houve penetração total do impactador, possibilitando assim que na região onde foi aplicado o impacto, o material ainda possua resistência à flexão.

Pela Figura 4.35 é possível verificar que à medida que se distância do ponto de impacto aumenta-se rapidamente a resistência e rigidez do material, porém diferente do que ocorreu para o laminado **CV**, mesmo à uma distância de 51 mm este valor não se iguala ao obtido no material não impactado ficando ainda com uma diferença de 9,51% para resistência e 13,90% para rigidez.

Este resultado é interessante pois demonstra que o uso de tecido de fibra de kevlar, apesar de suportar maior impacto quando usado, possui o inconveniente de diminuir a resistência e rigidez por uma área maior do laminado. Isto deve ocorrer principalmente devido a menor aderência fibra/matriz que o kevlar possui em relação ao vidro.

Este resultado também foi verificado no trabalho de Azevedo (2017) onde se utilizou somente fibra de kevlar e naquele caso, a perda foi mais pronunciada do que aqui onde o laminado possui os dois tipos de fibra, kevlar e vidro.

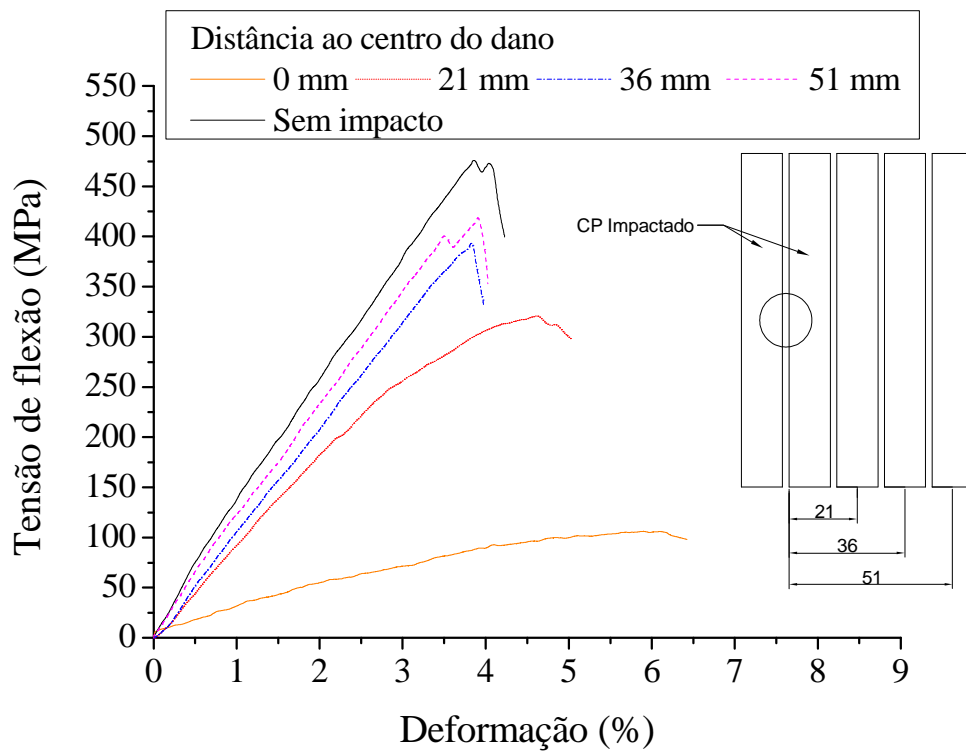


Figura 4.35: Curva tensão em função da deformação à flexão após impacto do compósito híbrido kevlar/vidro com 1 impacto de 46J, conforme a distância do centro do dano

Apresenta-se na Tabela 4.11 os valores médios obtidos nos ensaios de flexão em três pontos e seus respectivos desvios padrão, aqui é possível observar o aumento gradativo dos valores de tensão e módulo de elasticidade, à medida que a amostra ensaiada se afasta do dano. O aumento mais expressivo se deu entre a amostra na região impactada (0 mm) e a de 21 mm de distância, na resistência e no módulo com uma diferença percentual de 68,05% na resistência e de 53,94% no módulo de elasticidade. A partir daí, as diferenças entre as próximas distâncias diminuíram, mostrando a diminuição da influência do dano de impacto com o aumento da distância.

Tabela 4.11: Propriedades mecânicas de flexão após impacto conforme a distância ao centro do dano para o compósito híbrido kevlar/vidro

HIBRIDO KEVLAR/VIDRO COM IMPACTO 46J			
Distância (mm)	Tensão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação (%)
0	161,76 ± 71,01	3,91 ± 2,51	7,55 ± 2,20
21	342,09 ± 52,62	7,9 ± 3,54	5,04 ± 1,01
36	394,51 ± 32,45	10,28 ± 0,28	3,97 ± 0,08
51	421,44 ± 22,85	10,78 ± 0,98	4,09 ± 0,21
Sem impacto	465,71 ± 36,19	12,52 ± 1,31	4,22 ± 0,21

Analisando as Figura 4.36 e Figura 4.37, que apresentam gráficos comparativos da tensão última e módulo de elasticidade à flexão, é possível observar que o crescimento dessas propriedades se deu para todas as amostras ao distanciarem-se do dano. É importante salientar também a comparação entre os resultados das amostras mais distantes do dano (51,0mm de distância) e as amostras sem impacto, aqui verifica-se uma diferença percentual de 9,51% e 13,90% para resistência e rigidez, respectivamente. Essa diferença mostra que mesmo na amostra mais distante, o dano de impacto influencia nas propriedades mecânicas estudadas, isso pode ser explicado pela delaminação que ocorreu em toda extensão da amostra impactada.

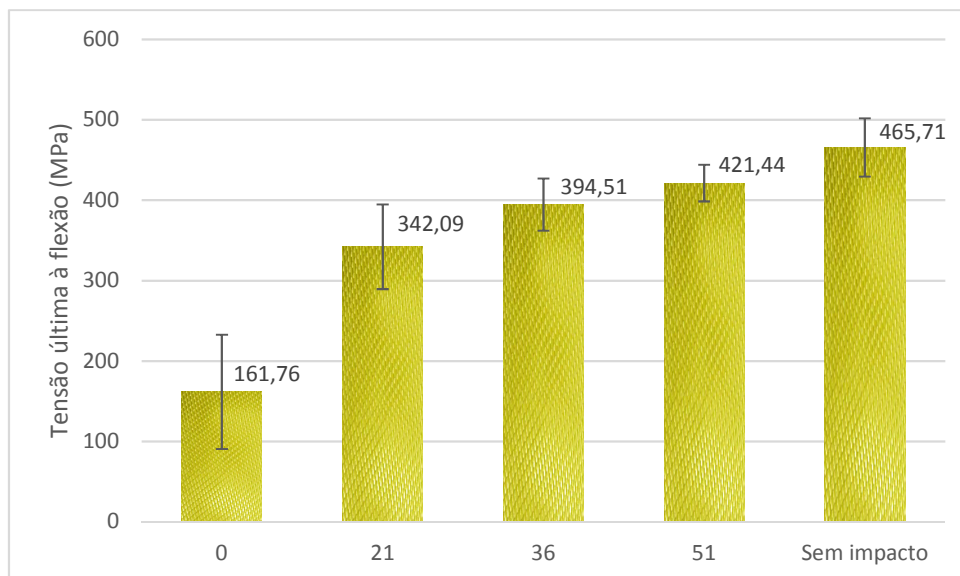


Figura 4.36: Tensão última à flexão após impacto conforme a distância ao centro do dano do compósito híbrido kevlar/vidro

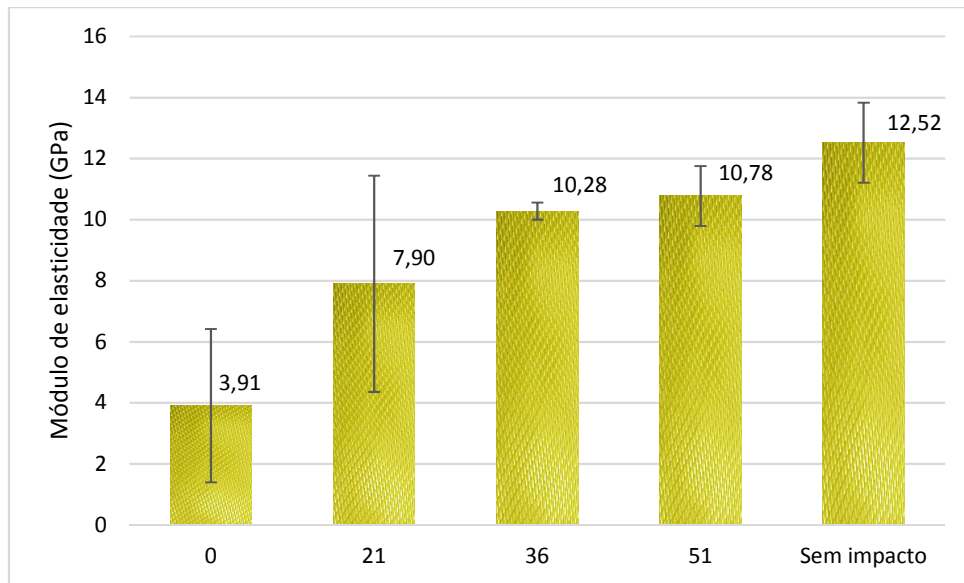


Figura 4.37: Módulo de elasticidade à flexão após impacto conforme a distância ao centro do dano do compósito híbrido kevlar/vidro

- **Flexão após impacto para compósito híbrido submetido à dois impactos com 46J de energia de impacto**

Com o intuito de analisar a influência do dano em relação as propriedades de flexão, será apresentado o comportamento de flexão do **HKV**, em diferentes distâncias do ponto de impacto de um CP submetido à dois impactos de 46J, visto que para esta energia como mostrado no item 4.5.1 foram necessários dois impactos para penetração total do impactador.

Analisando a Figura 4.38, que apresenta as curvas médias obtidas no ensaio de flexão em três pontos, é possível notar uma característica semelhante ao apresentado pelo **HKV** no que se refere ao aumento de resistência nas amostras ao se distanciar do dano.

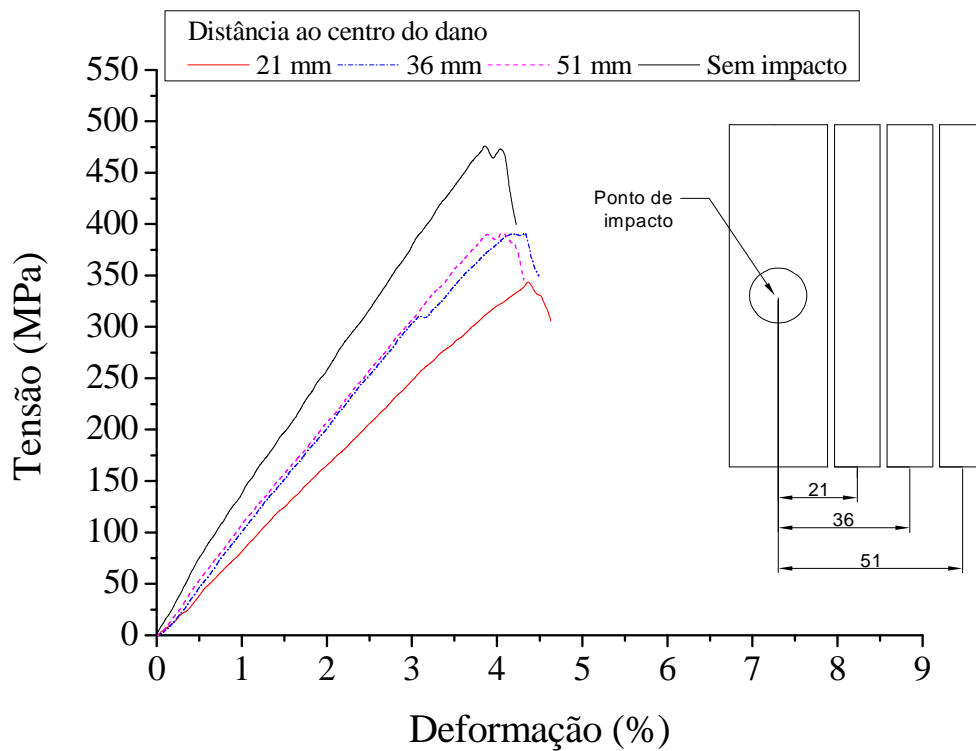


Figura 4.38: Curva tensão em função da deformação à flexão após impacto do compósito híbrido kevlar/vidro com 2 impactos à 46J

As propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 4.12, evidenciam o aumento das propriedades de resistência e rigidez do material com o aumento da distância do ponto de impacto, comparando estes valores aos obtidos no mesmo laminado **HKV** com um impacto (Tabela 4.12) percebe-se que praticamente se tem os mesmos resultados e a diferença entre eles ocorre somente devido à formação da penetração total da amostra.

Tabela 4.12: Propriedades mecânicas de flexão após impacto conforme a distância ao centro do dano para o compósito híbrido kevlar/vidro com 2 impactos à 46J

HIBRIDO KEVLAR/VIDRO COM 2X 46J

Distância (mm)	Tensão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação (%)
21	349,25 ± 48,30	8,81 ± 1,59	4,63 ± 0,96
36	399,79 ± 16,40	9,98 ± 1,23	4,49 ± 0,68
51	410,68 ± 33,26	10,18 ± 0,99	4,31 ± 0,26
Sem impacto	465,71 ± 36,19	12,52 ± 1,31	4,22 ± 0,21

Ilustra-se nas Figura 4.39 e Figura 4.40 os valores apresentados na Tabela 4.12 por meio de gráficos de barra , aqui é visível a melhoria crescente da resistência e rigidez do **HKV2x** com o aumento da distância do impacto, além de evidenciar também para este material, as maiores diferenças percentuais entre as distâncias estudadas, que são as obtidas quando comparado a amostra mais distante do ponto de impacto (51 mm) e a amostra sem impacto, para os valores de tensão última, essa diferença foi de 11,82% e para o módulo de elasticidade, de 18,69%.

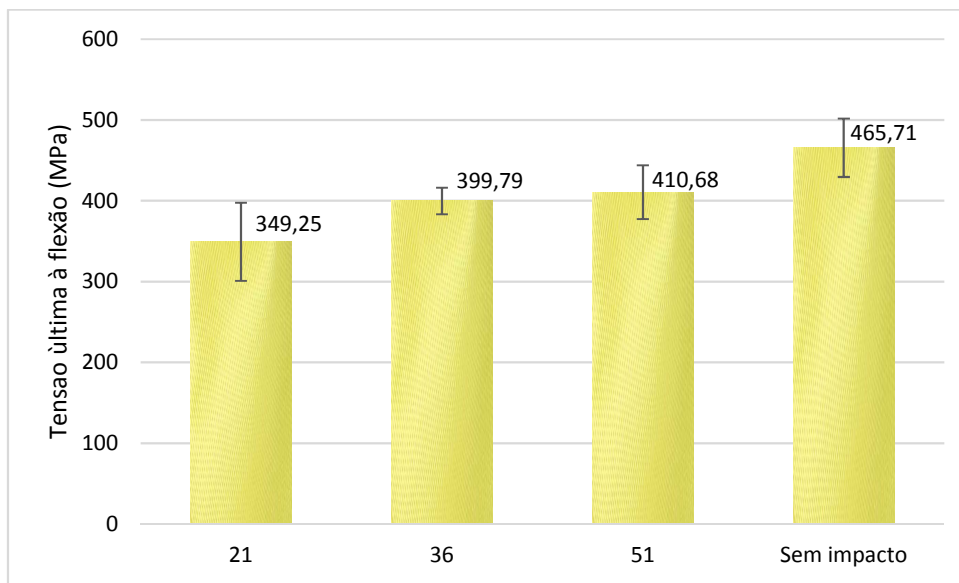


Figura 4.39: Tensão última à flexão após impacto conforme a distância ao ponto de impacto do compósito híbrido kevlar/vidro com 2 impactos à 46J

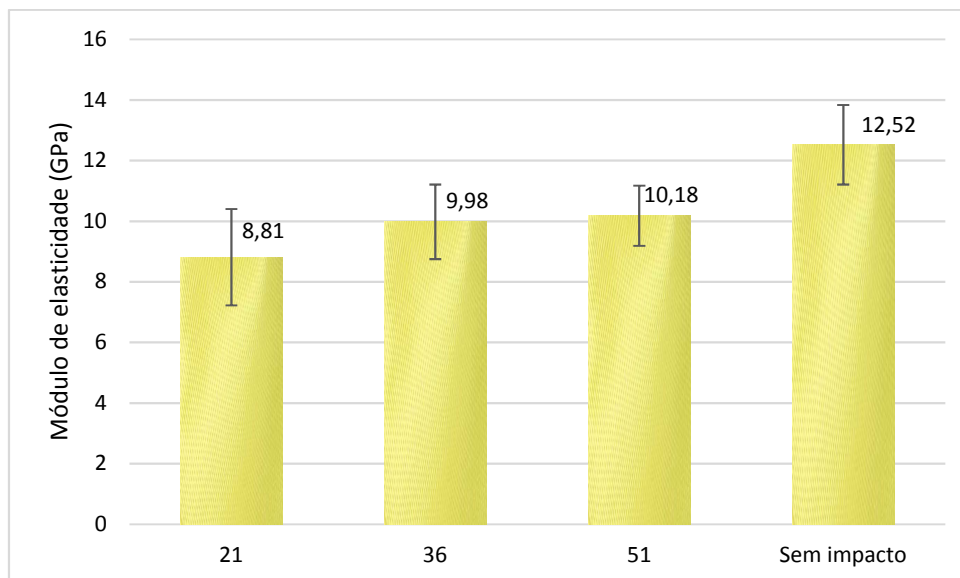


Figura 4.40: Módulo de elasticidade à flexão após impacto conforme a distância ao ponto de impacto do compósito híbrido kevlar/vidro

4.5.2.3 Ensaio de flexão após impacto: Comparativo entre compósito reforçado por fibra de vidro e compósito híbrido kevlar/vidro

Para melhor analisar os resultados obtidos nos ensaios de flexão após impacto, apresentam-se nas Figura 4.41 e Figura 4.42 os valores de resistência à flexão e módulo de elasticidade, respectivamente dos laminados **CV**, **HKV** e **HKV2x**. Nesses gráficos é possível observar que tal como verificado nos ensaios anteriores, o **CV** obteve o melhor resultado que os compósitos híbridos.

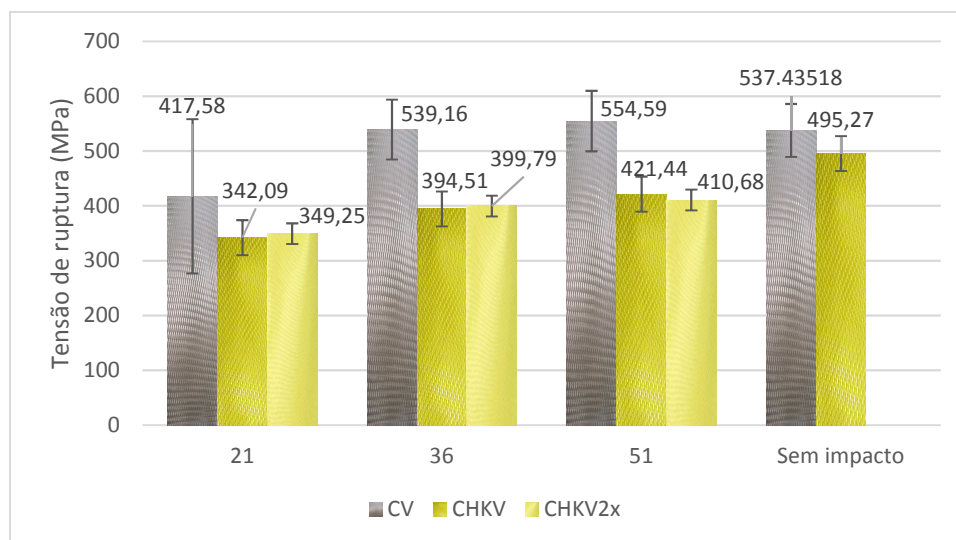


Figura 4.41: Comparativo da tensão última à flexão após impacto entre os compósitos de reforço de fibra de vidro e híbridos kevlar/vidro com diferentes de impactos

Comparando todos os materiais estudados, é possível notar um comportamento em comum, o da melhoria das propriedades mecânicas ao distanciar-se do dano, porém essa melhoria ocorreu de maneira diferente para cada material estudado. Para o **CV**, esse aumento foi expressivo entre 21,0 e 36,0 mm de distância, após isso, os valores permaneceram praticamente constantes, inclusive quando comparado aos resultados das amostras que não sofreram impacto. Já para o material híbrido, esses aumentos ocorreram de forma mais gradual com o aumento da distância do ponto de impacto, mostrando que o dano influencia nas propriedades mecânicas do material ao longo de todo o corpo de prova, comportamento este justificado pela análise do dano do impacto mostrado no item 4.4.1, em que apresenta delaminação longitudinal de forma que, diferente do que ocorre no **CV**, o dano se dissipa e atinge maior área, e assim, apresenta maior influencia nas propriedades estudadas.

Este resultado é interessante pois confirma que a área que perde propriedades mecânicas se reduz a área visualmente danificada (pelo menos para o laminado **CV**), facilitando seu reparo. Isto não ocorre e não é tão fácil verificar quando se utiliza fibras de kevlar, devido ao dano não ser concentrado como o do **CV**. Resultado semelhante a este foi encontrado também trabalho de Azevedo 2017, em que ao analisar compósitos de kevlar e de vidro, mostrou que os danos nas lâminas de vidro também se concentraram próximo ao ponto de impacto.

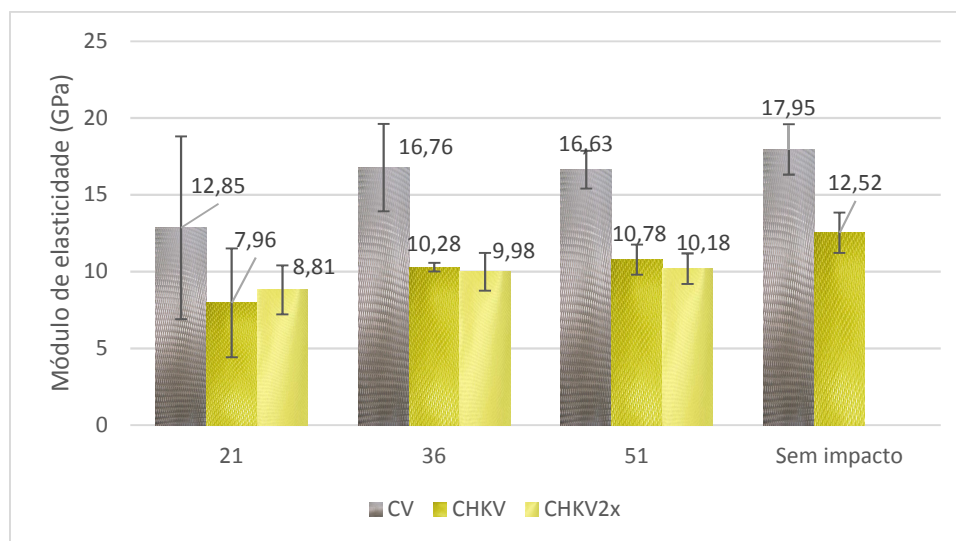


Figura 4.42: Comparativo do módulo de elasticidade à flexão após impacto entre os compósitos de reforço de fibra de vidro e híbridos kevlar/vidro com diferentes de impactos

4.5.2 Modelamento da resistência e do módulo após impacto

Com o intuito de modelar o comportamento mecânico à flexão dos materiais aqui estudados, foram utilizadas as Equações empíricas 4.1 e 4.2 adotadas por Azevedo (2017), conforme citadas na revisão bibliográfica. Aqui, estas equações serão utilizadas para modelar o comportamento dos materiais que sofreram penetração total do impactador, o **CV** e o **HKV2x**.

$$\frac{\sigma_{Rf}}{\sigma_{of}} = 1 - e^{-\left(\frac{d}{\beta}\right)^\alpha} \quad (4.1)$$

$$\frac{E_{Rf}}{E_{of}} = 1 - e^{-\left(\frac{d}{\beta}\right)^\alpha} \quad (4.2)$$

Para modelar o comportamento do **HKV**, em que não ocorreu penetração total do impactador e com isto ainda existe resistência e rigidez no ponto de impacto, deste modo fez-se uma modificação da equação considerando a existência de resistência (σ) e módulo (E_i) no ponto de impacto, conforme representado na Figura 4.43, desta forma utilizou-se para este caso, as Equações 4.3 e 4.4.

$$\frac{\sigma_{Rf}}{\sigma_{of}} = 1 + \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_o} - 1 \right) e^{-\left(\frac{d}{\beta}\right)^\alpha} \quad (4.3)$$

$$\frac{E_{Rf}}{E_{of}} = 1 + \left(\frac{E_i}{E_o} - 1 \right) e^{-\left(\frac{d}{\beta}\right)^\alpha} \quad (4.4)$$

Onde d é a distância em relação à borda do impactador, σ_i é a resistência após impacto no ponto de impacto, σ_o é a resistência do material sem impacto, σ_f é a resistência após impacto e α e β são constantes a serem obtidas. Para o módulo além dessas constantes, o termo E_i é o módulo após impacto no ponto de impacto, E_o é o módulo do material sem impacto e E_f é o módulo após impacto. É importante salientar também que para esta condição, com a modificação da equação, quando o valor de d for igual ao de β , o β deixa de representar um valor residual de 63,2%, como ocorre nas Equações 4.1 e 4.2.

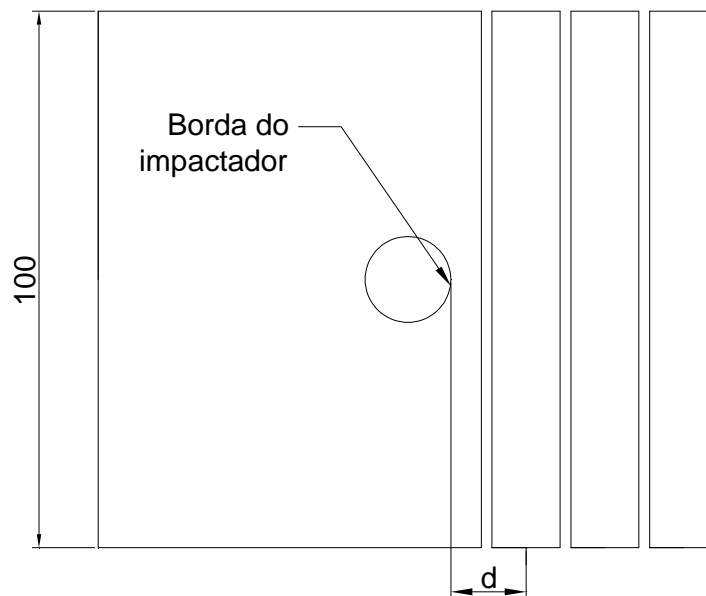


Figura 4.43: Esquema de representação da distância das amostras em relação ao ponto de impacto para análise do ensaio de flexão em três pontos após impacto.

Aplicando as equações aos dados obtidos nos ensaios de flexão já discutidos no item anterior, obteve-se os valores para as constantes apresentados na Tabela 4.13. Comparando os valores de CV e $HKV2x$, é possível verificar que o laminado $HKV2x$ possui um menor valor de β , indicando que

o valor residual de 63,2 % da tensão e do módulo deste laminado se concentra a uma distância menor da borda do impactador, sendo esta de até 6 mm aproximadamente, enquanto que para o **CV** o valor residual de 63,2% da resistência e rigidez são em 9,97 e 7,38 mm respectivamente.

Tabela 4.13: Constantes α e β obtidas para resistência e módulo após impacto

	Tensão após impacto (σ_{Rf}/σ_{of})			Módulo após impacto (E_{Rf}/E_{of})		
	α_i	α	β	E_i	α	β
CV	-	1,24	9,97	-	0,58	7,38
HKV	161,76	0,51	20,77	3,9	0,72	22,41
HKV2x	-	0,28	5,96	-	0,25	5,43

Nas Figura 4.44 à Figura 4.47 apresentam-se os dados obtidos nas equações em relação aos dados experimentais dos compósitos aqui estudados, onde serão comparados resistência e módulo após impacto dos que sofreram penetração total (**CV** e **HKV2x**) e também entre compósitos de mesmo reforço (**HKV** e **HKV2x**).

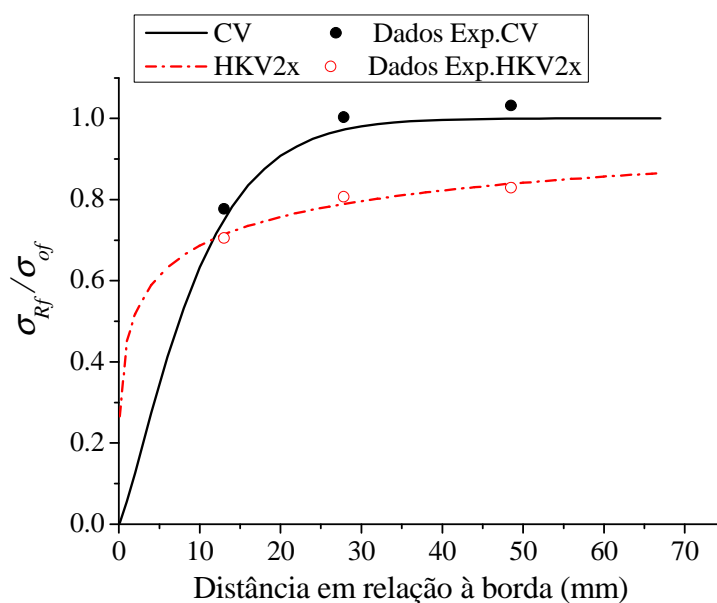


Figura 4.44: Tensões residuais de flexão empírica e experimental do **CV** e do **HKV** em função da distância da borda do impactador.

De acordo com a Figura 4.44, o **HKV2x** possuiu uma diminuição maior da resistência residual em relação ao laminado **CV**, ainda que este possua um menor β , como visto na Tabela 4.13. Essa afirmativa é possível pois ao analisar toda a curva apresentada, especificamente a distância

máxima à borda do impactador que é de 67mm, verifica-se que o **CV** alcança 99% da resistência original enquanto que o **HKV2x** atinge 82%, mostrando que a resistência deste material é influenciada pelo dano do impacto em toda a extensão do corpo de prova. Evidenciando assim a viabilidade do uso futuro do **CV**, de modo que este material pode prever a área de reparo de manutenção.

Já na Figura 4.45 que demonstra as tensões residuais do **HKV** e **HKV2x**, se verifica que estas amostras têm comportamentos semelhantes tendo apenas o ponto inicial como diferença, de forma que a curva do **HKV** inicia em σ_f e a do **HKV2x** no ponto 0.

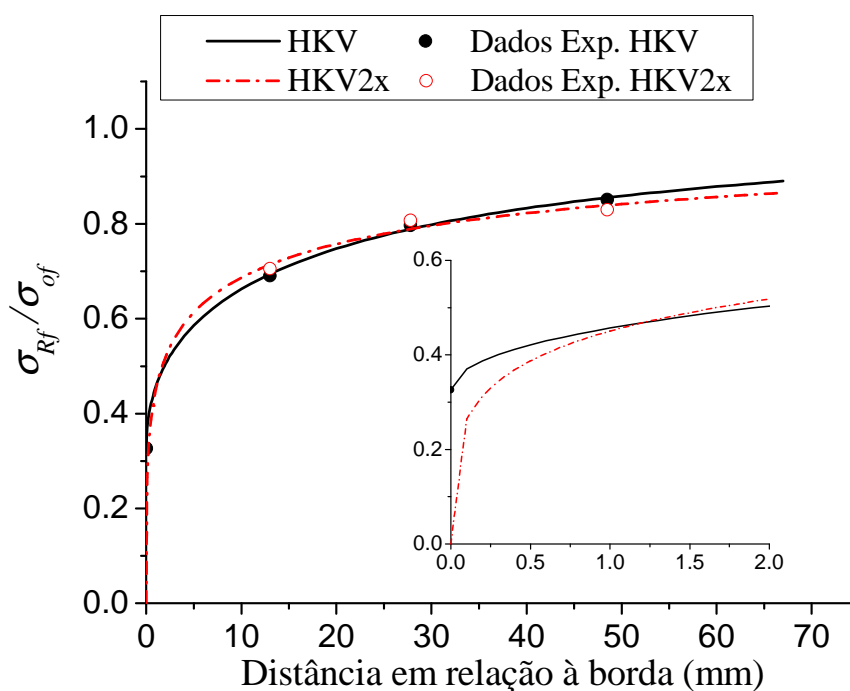


Figura 4.45: Tensões residuais de flexão empírica e experimental do **HKV** e do **HKV2x** em função da distância da borda do impactador.

Quanto ao módulo após impacto, pode-se verificar na Figura 4.46 que o **HKV2x** possuiu uma perda maior do módulo de elasticidade em relação ao laminado **CV**, visto que ao analisarmos todo o comportamento da curva é possível ver que na distância máxima à borda do impactador (67mm), o **CV** atinge aproximadamente 97% da rigidez original, enquanto que o **HKV2x** alcança 84%. Além disso, o comportamento do **CV** bem como o do **HKV2x** apresentam menor perda do

modulo de elasticidade se comparado aos resultados encontrados por Azevedo (2017), em que o compósito reforçado por fibra de vidro alcançou aproximadamente 82% de rigidez original na distância máxima à borda do impactador.

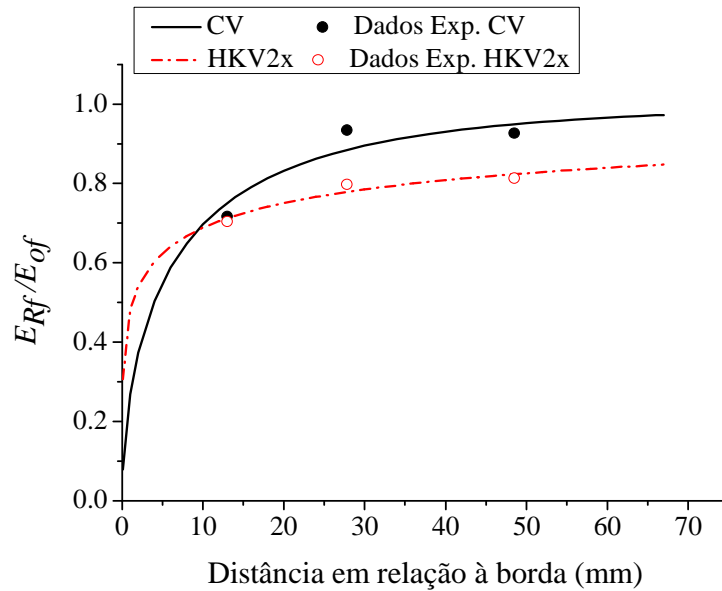


Figura 4.46: Módulos residuais de flexão empírico e experimental do **CV** e do **HKV** em função da distância da borda do impactador.

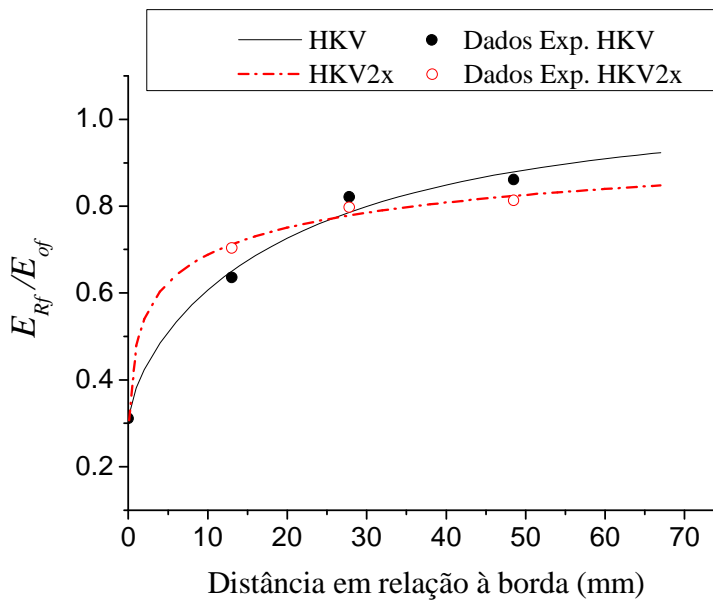


Figura 4.47: Módulos residuais de flexão empírico e experimental do **HKV** e do **HKV2x** em função da distância da borda do impactador.

Analisando as curvas dos módulos residuais dos híbridos aqui estudados que apresentam-se na Figura 4.47, é possível verificar que o **HKV2x** apresenta menores valores de módulo de elasticidade e ainda, pode-se notar diferente comportamento das curvas se comparadas às curvas de tensões residuais, de forma que aqui o **HKV** e **HKV2x** têm comportamentos distintos.

Relacionando a resistência e o módulo residual do **CV** e a área do dano apresentada na Tabela 4.7, se verifica que a resistência residual vai ocorrer para um valor de $d = 7,5$ mm, em que encontramos em torno de 60 % de resistência e módulo. Enquanto que para o híbrido **HKV2x** temos o d para a borda do dano equivalente a 37 mm, verificando-se a resistência e módulo em torno de 80%.

Assim a avaliação desses resultados se mostrou relevante à medida que, se confirmada uma conexão da resistência e rigidez residual do material com o dano devido ao impacto, será possível saber o seu comportamento através de uma simples inspeção visual.

Capítulo V

Conclusões

5 Conclusões

A partir dos resultados apresentados anteriormente pode-se concluir que:

- O laminado **CV** possui maior resistência e rigidez à compressão e flexão quando comparado ao **HKV** antes do impacto.
- O **CV** atingiu penetração total do impactador no corpo de prova com uma energia de impacto de 46 J.
- O **HKV** apresentou maior resistência ao impacto que o **CV**, perfurando o CP com uma energia de impacto de 61 J.
- As formas de danos para ambos os compósitos estudados, foram a delaminação fibra/matriz, ruptura de fibras e penetração total dos CPs.
- Os dois materiais estudados apresentaram maior delaminação no lado do impacto (lado comprimido) em relação ao lado oposto (lado tracionado).
- As áreas de dano na região comprimida e tracionada do **CV** foram menores em relação aos danos causados no **HKV**, mostrando que, o **CV** ocasionou um o dano localizado, enquanto que o **HKV** apresentou delaminação na extensão de todo corpo de prova.
- O impacto de 46J praticamente não alterou as propriedades de resistência e rigidez à compressão do **CV**.
- O impacto de 46J diminuiu a resistência em 6,17%, porém não alterou a rigidez à compressão do **HKV**.
- A resistência residual devido a flexão para o **CV**, demonstrou que o impacto influencia somente próximo ao dano, não alterando de forma significativa a resistência e rigidez do ao longo do corpo de prova.
- O laminado **CV** possui maior capacidade de concentrar o dano de impacto do que o híbrido **HKV**.
- Para o laminado híbrido, o impacto diminuiu as propriedades de resistência e rigidez de flexão de forma mais acentuada próximo ao dano, influenciando também toda extensão do corpo de prova, porém de forma menos significativa.

- A diminuição das propriedades do **HKV**, em compressão e flexão após impacto, pode ser atribuída à baixa aderência da matriz com as camadas de tecido de kevlar do híbrido.
- A aplicação de dois impactos no compósito híbrido (**HKV2x**), de forma geral, não alterou os resultados das propriedades mecânicas residuais se comparado ao laminado submetido a apenas um impacto (**HKV**).
- A aplicação da equação de modelagem, indicou com os valores de β , que o **HKV2x** recupera mais da metade da resistência e rigidez à flexão em uma distância menor do impactador, quando comparado ao **CV**.
- O **CV** recupera 99 % da resistência original na distância máxima à borda do impactador (67mm).
- Apesar do menor β , o **HKV** tem aumento da resistência e rigidez de forma mais lenta, recuperando somente 82% da resistência original na distância máxima à borda do impactador (67mm).

Capítulo VI

Sugestões para trabalhos futuros

6 Sugestões para trabalhos futuros

- Utilizar outros reforços para os compósitos híbridos.
- Utilizar outras formas de hibridização, como por exemplo de mecha híbrida (*intraply*);
- Usar extensômetros para medir a deformação causada no impacto;
- Utilizar impacto de alta velocidade.
- Impactar laminados com 1 ou 2 camadas de fibras picadas e uma sequência de fibras contínuas unidirecionais, como utilizadas em reservatórios.
- Utilizar outros planos de laminação.

Capítulo VII

Referências

7 Referências

- ABRATE, S. - Impact Engineering of Composite Structures, v.526, p. 104-132, 2005.
- AGARWAL, D. B.; BROUTMAN, L. J. and CHANDRASHEKHARA, K. - Analysis and performance of fiber composite. John Wiley & Sons, Inc., Third Edition, 2015.
- AKTAS, A.; AKTAS, M. and TURAN, F. - Impact and post impact (CAI) behavior of stitched woven–knit hybrid composites. Composite Structures, v. 116, 243-543, 2014.
- AMARO, A.M.; REIS, P.N.B. and NETO, M.A. - Experimental study of temperature effects on composite laminates subjected to multi-impacts. Composites Part B, v. 98, p. 23-29, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 3878 (2016): “Standard terminology for composite material”.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 7136 (2015), “Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber–reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event”, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D7137 (2012), A. Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D790 (2015): “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials|Standard Test Method for Tensile Properties of Oriented Fiber Composites”, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D792 (2013): “Specific Gravity and Density of Plastics by Displacement”, 2013.
- AZEVEDO, C. M. D. Estudo da resistência residual de compósitos poliméricos de fibra de vidro-E e kevlar 49 após sofrerem impacto de baixa velocidade. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal , 2017.
- AZOM. <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=997> , acesso em 08 de Junho de 2017.

- BIASE, E. H. C., *Análise Estrutural de Laminados Compósitos Sujeitos a cargas de Impacto*, ITA. São José dos campos, 2009.
- BIENIAS, J.; JAKUBCZAK, P. and DADEJ, K. - Low-velocity impact resistance of aluminium glass laminates – Experimental and numerical investigation. *Composite Structures*, v. 152, p. 339–348, 2016.
- BREEN, C.; GUILD, F. and PAVIER, M. - Impact damage to thick carbon fibre reinforced plastic composite laminates. *J Mater Sci*, v. 41, p. 6718–6724, 2006.
- CALLISTER Jr. W. D. – *Ciências e Engenharia de Materiais: Uma Introdução* Rio de Janeiro: Ltc, 7ª edição, 2007.
- CANTWELL, W.J.; MORTON, J. - The impact resistance of composites- a review. *Composites*, v.22, n.5, p. 347-362, 1991.
- CASTRO; D. O. – *Biocompósitos a partir de biopolietileno de alta densidade reforçado por fibras de curauá*. Dissertação de mestrado - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- DANTAS, C. M. - *Influência da quantidade de absorção de água nas propriedades mecânicas de compósitos poliméricos de manta de fibra de vidro, híbrido e tecido juta*. Dissertação de mestrado - UFRN. Natal, 2012.
- DERAKANE 411-350. - Resina epóxi éster-vinílica. *Boletim Técnico Derakane*, Abril de 2007.
- DIAS, D. - *Comportamento ao Impacto a baixa velocidade de laminados de epóxido/fibra de vidro, com camadas de cortiça*. Dissertação de mestrado - FEUP. Porto, 2009.
- DUPONT. <http://www.dupont.com.br/produtos-e-servicos/tecidos-fibras-e-nao-tecidos.html> , acesso em 18 de setembro de 2017.
- FELIPE (a), R. N. B. – *Efeitos da radiação UV, temperatura e vapor aquecido nos compósitos poliméricos: monitoramento, instabilidade estrutural e fratura*. Tese de doutorado - UFRN, Natal, 2012.
- FELIPE (b) , R. C. T. D. S. – *Envelhecimento ambiental acelerado em PRF a base de tecidos híbridos kevlar/vidro: propriedades e instabilidade estrutural*. Tese de doutorado – UFRN, Natal, 2012.

- FERREIRA, L. M. S., Avaliação do Dano em Compósitos Laminados Devido a Impactos de Baixa Velocidade. Tese de doutorado - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2006.
- GALDINO JUNIOR, F. - Desenvolvimento de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos. Dissertação de mestrado, UFCG - Campina Grande, 2014.
- GAY, D. – Matériaux Composites. Paris: Editions Hermès, 1991.
- GEMI, L.; KARA, M. and AVCI, A. - Low velocity impact response of prestressed functionally graded hybrid pipes. *Composites Part B*, v. 106, p.154-16, 2016.
- GHELLI, D. and MINAK, G. - Low velocity impact and compression after impact tests on thin carbon/epoxy laminates. *Composites: Part B*, v. 42, p. 2067–2079, 2011.
- GUSTIN, J.; JONESON, A.; MAHINFALAH, M. and STONE, J. - Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites. *Composite Structures*, v. 69, p. 396–406, 2005.
- HERAKOVICK, C. T. – Mechanics of fibrous composites. John Wiley & Sons, Inc., University of Virginia, 1998.
- HOLANDA, E.B.N. Morfologia e propriedades mecânicas da fibra de sisal unidirecional e em sobreposição de compósitos com resina epóxi. Dissertação de mestrado – UFRN. Natal, 2013.
- HULL, D. – An introduction to composite materials - Ed. Cambridge University Press, 1988.
- IBEKWE, S. I.; MENSAH, P. F.; LI, G.; PANG, S. and STUBBLEFIELD, M. A. - Impact and post impact response of laminated beams at low temperatures. *Composite Structures*, v.79, p.12–17, 2007.
- JAWAID, M. and ABDUL, K.H.P.S. - Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate Polymers*, v.86, p. 1–18, 2011.
- JUSTO, J. M. C. F. - Estudo do Comportamento ao Impacto de Alta Velocidade de Estruturas em Materiais Compósitos. Dissertação de mestrado, Universidade do Porto, Porto, 1996.

- LIU, D. and MALVERN, L.E. - Matrix cracking in impacted glass/epoxy plates. *Journal of Composite Materials*, v.21. p 594-609, 1987
- MARINUCCI, G. – *Materiais compósitos poliméricos fundamentos e tecnologia*. Artliber Editora. São Paulo, 2011.
- MENDONÇA, P. D. T. R. – *Materiais Compostos & Estrutura-Sanduíche*. Barueri: Manoele, 2005.
- MOURA, M. F. S. F., MORAIS, A. B., MAGALHÃES A. G. - *Materiais Compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, Porto: Publindústria, 2011.
- OLSSON, R. - Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates. *Composites: Part A*, v. 31, p. 879-887, 2000.
- PARDINE, L. C – *Preformas para compósitos estruturais*. *Revista Polímeros: Ciências e tecnologia*, v. 10, Nº 2, p.100 – 109, 2000.
- PASQUALI, M.; TERRA, C. and GAUDENZI, P. - Analytical modelling of highvelocity impacts on thin woven fabric composite targets. *Composite structures* v. 131, p. 951-965, 2015.
- PEGORETTI, A.; FABBRI, E.; MIGLIARESI, C. and PILATI, F. - Intraply and interply hybrid composites based on E-glass and poly(vinyl alcohol) woven fabrics: tensile and impact properties. *Polymer International*, v 53, p. 1290–1297, 2004.
- PINTO, J.M.G.T. - *Avaliação do comportamento mecânico de blindagens balísticas*. Dissertação de mestrado - Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2009.
- REMACHA, M.; SÁNCHEZ-SÁEZ, S.; LÓPEZ-ROMANO, B. and BARBERO, E. - A new device for determining the compression after impact strength in thin laminates, *Composite Structures*, v. 127, 99-107, 2015.
- RIVALLANT, S.; BOUVET, C., ABDALLAH, E. A.; BROLL, B. and BARRAU, J. - Experimental analysis of CFRP laminates subjected to compression after impact: The role of impact-induced cracks in failure. *Composite Structures*, v. 111, p. 147–157, 2014.

- ROBINSON, P.; DAVIES, G.A.O. - Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact off laminated composites. *International Journal Impact Engineering*, v. 12, n. 2, p. 189-207, 1992.
- ROMARIZ, L. A. - Dano em placas laminadas devido ao impacto a baixas velocidades. Dissertação de mestrado - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.
- SANCHEZ-SAEZ, S.; BARBERO, E.; ZAERA, R. and NAVARRO, C. - Compression after impact of thin composite laminates. *Composites Science and Technology*, v. 65, p. 1911–1919, 2005.
- SANTOS, J. A. S. - Métodos de Análise de Impactos Balísticos. Dissertação de mestrado – Universidade do Porto, 2016.
- SANTOS, P. S. P. - Resistência ao Impacto de Compósitos Híbridos. Dissertação de mestrado - Universidade da Beira Interior. Covilhã, 2010.
- SAYER, M.; BEKTAS, N. B. and SAYMAN, O. - An experimental investigation on the impact behavior of hybrid composite plates. *Composite Structures*, v. 92, p.1256–1262, 2010.
- SHYR, T.W. and PAN, Y.H. - Impact resistance and damage characteristics of composite laminates. *Composite Structures*, v. 62, p 193–203, 2003.
- SILVA, F. A. – Tenacidade de materiais compósitos não convencionais. Dissertação de mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC). Rio de Janeiro, 2004.
- TAN, W.; FALZON, B. G.; CHIU, L. N. S. and PRICE, M. - Predicting low velocity impact damage and Compression-After-Impact (CAI) behaviour of composite laminates. *Composites: Part A*. v. 71, p. 212–226, 2015.
- TEXIGLASS. <http://texiglass.com.br/produtos/>, acesso em 16 de setembro de 2017.
- WANG, W.; CHOUW, N. and JAYARAMAN, K. - Effect of thickness on the impact resistance of flax fibre-reinforced polymer. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 35(17), p. 1277–1289, 2016.
- ZIKE, S.; KALNINS. K.; OZOLINS, O. and KNITE, M. - An Experimental and Numerical Study of Low Velocity Impact of Unsaturated Polyester/Glass Fibre Composite. *Materials Science*, v.17, nº 4, 2011.