

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS KOTESKI CZEZACKI

**ANÁLISE DINÂMICA DE PLACAS UTILIZADAS EM
BLINDAGENS ANTI-PROJÉTIL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

LUCAS KOTESKI CZEZACKI

**ANÁLISE DINÂMICA DE PLACAS UTILIZADAS EM
BLINDAGENS ANTI-PROJÉTIL**

Projeto de Pesquisa apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Moura Belo

CURITIBA

2013

TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho, por meio deste termo, encaminhar para apresentação a Monografia do Projeto de Pesquisa “ANÁLISE DINÂMICA DE PLACAS UTILIZADAS EM BLINDAGENS ANTI-PROJÉTIL”, realizada pelo aluno LUCAS KOTESKI CZEZACKI, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Moura Belo
UTFPR - Damec

Curitiba, 28 de Junho de 2013.

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a Monografia do Projeto de Pesquisa “ANÁLISE DINÂMICA DE PLACAS UTILIZADAS EM BLINDAGENS ANTI-PROJÉTIL”, realizada pelo aluno LUCAS KOTESKI CZEZACKI, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Ivan Moura Belo
Damec - UTFPR
Orientador

Prof^a. Dr^a. Ana Paula Carvalho da Silva Ferreira
Damec - UTFPR
Avaliadora

Prof. Dr. Marcelo Maldaner
Damec - UTFPR
Avaliador

Curitiba, 27 de setembro de 2013.

RESUMO

CZEZACKI, Lucas K., Análise dinâmica de placas utilizadas em blindagens anti-projétil. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

O trabalho teve como objetivo a simulação e comparação, por meio do método dos elementos finitos, do comportamento de placas utilizadas em blindagens anti-projétil classificadas em diferentes níveis da norma americana NIJ 0180.01 sob impacto de um projétil. Foi pesquisado o histórico de estudos a respeito do tema, e avaliaram-se trabalhos realizados com caráter experimental, bem como um trabalho de simulação numérica do impacto de um projétil em uma placa. Este último trabalho utiliza um método estático para análise de comportamento da placa. Para fins de análise e comparação de resultados obtidos, as simulações computacionais foram desenvolvidas utilizando o modelo dinâmico linear de impacto de projéteis nas placas, utilizando para isso o programa computacional ANSYS®. O modelo se mostrou convergente, conforme o aumento da quantidade de elementos na malhas. Os resultados de deslocamento obtidos na melhor configuração de malha foram comparados com uma solução analítica para um caso estático, houve considerável diferença percentual, principalmente devido à diferença de caráter dos carregamentos.

Palavras-chave: Blindagens, Compósitos laminados, Impacto, Materiais cerâmicos, Método dos elementos finitos.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sequência de ações do projeto	12
Figura 2 – Locais de um veículo onde são introduzidas blindagens	16
Figura 3 - Classificação de materiais cerâmicos segundo aplicação	17
Figura 4 – Unidade básica dos cristais de SiC	18
Figura 5 – Coalescimento de partículas	18
Figura 6 – Representação de uma cadeia de polímeros.....	19
Figura 7 – Representação de estruturas moleculares (a) lineares, (b) ramificadas, (c) com ligação cruzada e (d) em rede	20
Figura 8 - Comportamento tensão deformação para polímeros frágeis (curva A), dúcteis (curva B) e altamente elásticos (curva C).....	21
Figura 9 – Grupo funcional carbonato.	23
Figura 10 – Estrutura do Bisfenol-A.....	24
Figura 11 – Diferentes tipos de orientação de fibras	25
Figura 12 – Placa laminada com fibras orientadas em diferentes direções	26
Figura 13 – Fluxograma para avaliação das propriedades de uma lâmina.....	27
Figura 14 – Sistema de coordenadas principal de uma lâmina.....	27
Figura 15 – Variação temporal de uma força de impacto.....	31
Figura 16 – Atuação das tensões na seção transversal de uma placa plana sujeita à flexão	35
Figura 17 – Elemento SHELL63.....	36
Figura 18 – Elemento SHELL99.....	37
Figura 19 – Estado (a) uniaxial de tensões e (b) plano de tensões.	39
Figura 20 – Placa utilizada nos ensaios	40
Figura 21 – Placa simplesmente apoiada sujeita a uma carga concentrada	42

Figura 22 – Valores de deslocamento máximo da placa de policarbonato e erro percentual em função da quantidade de elementos.....	43
Figura 23 – Valores de deslocamento da placa de policarbonato.....	44
Figura 24 - Valores de deslocamento máximo da placa de carbetto de silício e erro percentual em função da quantidade de elementos.....	45
Figura 25 - Valores de deslocamento da placa de carbetto de silício	46
Figura 26 – Distribuição de tensão principal na placa de policarbonato	47
Figura 27 - Distribuição de tensão principal na placa de carbetto de silício.....	48
Figura 28 – Curvas tensão x deformação para materiais dúcteis e frágeis.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Níveis balísticos segundo a norma NIJ 0108.01	13
Tabela 2 - Níveis balísticos segundo a norma ABNT NBR 15000/2005	14
Tabela 3 - Níveis balísticos segundo a norma DIN EM 1063	15
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do bisfenol-A	40
Tabela 5 - Propriedades mecânicas do carbetto de silício	41
Tabela 6 – Valores de deslocamento máximo e erros percentuais da placa de policarbonato	43
Tabela 7 - Valores de deslocamento máximo da placa de carbetto de silício	45

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DIN	Deutsches Institut für Normung
EPT	Estado plano de tensões
MEF	Método dos elementos finitos

NIJ National Institute of Justice

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Módulo de elasticidade
ν	Coefficiente de Poisson
G	Módulo de elasticidade cisalhantes
$\{\sigma\}$	Tensor de tensões
$[C]$	Matriz constitutiva
$\{\varepsilon\}$	Tensor de deformações
$[S]$	Matriz de flexibilidade
U_m	Energia cinética de uma massa m
m	Massa
v_0	Velocidade inicial
U_d	Trabalho de deformação máximo do placa
P_m	Carga estática equivalente
w_m	Deslocamento no ponto de impacto
w_{\max}	Maior deslocamento na placa
a	Dimensão na direção x da placa
b	Dimensão na direção y da placa
D	Módulo de rigidez a flexão da placa
h	Espessura da placa
$\phi(x)$	Função genérica de x
$\Phi(x)$	Interpolação da função genérica
$N_i(x)$	Função interpoladora

ϕ_i	Valor da interpolação no nó i de uma malha de elementos finitos
σ_u	Tensão de fratura do material
σ_1	Maior tensão principal atuante no material
σ_2	Menor tensão principal atuante no material
CS	Coefficiente de segurança
σ_{xx}	Tensão uniaxial atuante no material
σ_e	Tensão de escoamento do material
P	Carga aplicada a uma placa simplesmente apoiada
ξ	Distância do ponto de aplicação da carga em relação ao eixo y
η	Distância do ponto de aplicação da carga em relação ao eixo x
x	Coordenada na direção x do ponto para cálculo analítico de deslocamento
y	Coordenada na direção y do ponto para cálculo analítico de deslocamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Tema	9
1.2	Situação Problema	9
1.3	Objetivos	10
1.4	Justificativa	10
1.5	METODOLOGIA	11
2	Fundamentação Teórica	13
2.1	Normas Balísticas	13
2.1.1	Norma NIJ 0108.01 / NIJ 0101.04	13
2.1.2	Norma ABNT NBR 15000/2005	14
2.1.3	Norma DIN EM 1063 / DIN 52.290	14
2.2	Materiais para blindagem	15
2.3	Cerâmicas	16
2.3.1	Carbeto de silício	17
2.4	Polímeros	19
2.4.1	Policarbonato	23
2.5	Compósitos laminados	24
2.5.1	Comportamento mecânico de uma lâmina	26
2.6	Modelo dinâmico de carga	30
2.6.1	Cálculo do valor de pico de força em regime transiente	31
2.7	Método dos elementos finitos	32
2.7.1	Teoria de flexão para placas	34
2.7.2	Tipo de elemento	35
2.8	Critérios de falha	37
2.8.1	Critério de Rankine para falha de materiais frágeis	37
2.8.2	Critério de Von Mises para falha de materiais dúcteis	38
3	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	40
3.1	Propriedades mecânicas das placas	40
3.1.1	Placa laminada de policarbonato	40
3.1.2	Placa sinterizada de carbeto de silício	41
3.2	Máximo deslocamento da placa de Policarbonato	42
3.3	Máximo deslocamento da placa de Carbeto de Silício	44
3.4	Critérios de falha para ambas as placas	46
4	CONCLUSÕES	50
	REFERÊNCIAS	52
	APÊNDICE A – ARTIGO	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

Com o recente crescimento da violência nos centros urbanos do mundo, os cidadãos estão dando mais importância para a segurança de seus familiares e de si mesmos, canalizando investimentos em equipamentos de segurança pessoal, predial e também automotiva. A gama de produtos disponíveis para este fim é imensa, tendo-se desde um simples sistema de alarme para carros até blindagens sofisticadas e robustas utilizadas em prédios.

No caso de aplicação de blindagens, os materiais devem ser certificados pelo Exército Brasileiro e pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2005). Para isso, os produtos feitos pelos fabricantes deste ramo, devem ser submetidos a testes de validação e garantia da qualidade e vida útil do componente, que é feito geralmente de compósitos ou polímeros.

Cabe ao Engenheiro Mecânico fiscalizar o projeto, especificação e fabricação destes componentes, devido ao seu conhecimento no ramo de resistência dos materiais. Sendo assim, este ramo do mercado gera grandes oportunidades de emprego e pesquisa científica para o profissional.

1.2 Situação Problema

Os ensaios que são mais comumente utilizados para constatação das propriedades mecânicas de certo material são de natureza destrutiva, logo inutilizam o componente após serem realizados. Além disso, os equipamentos utilizados para este fim requerem uma alta frequência de manutenção, bem como um custo elevado, sem mencionar a suscetibilidade das máquinas a falhas.

Hoje em dia, a análise de comportamento de materiais blindados é feita por meio de ensaios destrutivos, como por exemplo, em testes para validação da comercialização destes itens. Muitas vezes o projetista não terá acesso a testes desta natureza de maneira fácil, o que acaba interrompendo o andamento do projeto de um componente. Como soluções para reduzir a quantidade de ensaios necessários são utilizados os métodos de simulação numérica e computacional, que

auxiliam na compreensão do comportamento do componente sob diversos tipos de solicitações mecânicas antes mesmo da sua fabricação.

1.3 Objetivos

O objetivo do presente trabalho foi analisar computacionalmente o comportamento de placas laminadas de policarbonato e de carbetto de silício, ambas utilizadas como materiais para blindagem automotiva, sob o impacto de um projétil, verificando a resistência das mesmas às solicitações impostas. Com o auxílio do programa computacional ANSYS, as situações foram simuladas considerando um carregamento dinâmico atuante sobre as superfícies, resultantes do impacto do projétil nas mesmas. Foram analisadas as tensões resultantes da solicitação, de modo a se utilizar como critério de falha das placas laminadas de policarbonato o critério de Von Mises para materiais dúcteis, já para as placas de carbetto de silício, o critério utilizado foi o de Rankine (materiais frágeis). Para a verificação da veracidade do modelo, os resultados obtidos serão comparados com o modelo numérico elaborado por Sarturi (2011) e os dados experimentais apresentados por Wéber (2004), bem como com a solução analítica proposta por Szilard (2004).

1.4 Justificativa

Um material com aplicação balística deve ter a sua integridade garantida em uma situação em que seja requisitado, para que possa cumprir a sua função de garantir a segurança de quem necessita dele para proteger sua vida ou bens. Estudos para compreensão e aprimoramentos destes materiais são de suma importância.

A simulação computacional representa uma alternativa muito atraente no que diz respeito a realização de ensaios e disponibilidade de material para realização, diminuindo a quantidade de testes necessários para estudos de comportamento do produto, em situação de uso. Economicamente, os estudos através de simulações computacionais se tornam atraentes no sentido de economia na compra de material para realização de ensaios, que em sua maior parte são de caráter destrutivo.

O projeto ainda apresenta uma importância acadêmica para o desenvolvedor. Para o completo entendimento e realização do trabalho, é necessário que se tenha conhecimentos desenvolvidos, dentro da Engenharia Mecânica, nas áreas de materiais, métodos numéricos e mecânica estrutural. Foi necessária, como pré-requisito, uma pesquisa para reunir as informações necessárias de cada área para a execução do projeto de pesquisa.

1.5 METODOLOGIA

Por conta da multidisciplinariedade do problema proposto, que envolve várias áreas da engenharia (materiais, resistência dos materiais e método dos elementos finitos), deve ser feita uma revisão bibliográfica sobre os assuntos abordados pelas áreas descritas. Também são levantados artigos científicos envolvendo problemas de impacto de projéteis e caracterização mecânica de materiais, podendo assim ser justificado o trabalho proposto, situando-o na gama de trabalhos já executados sobre o tema.

Depois de executada a revisão bibliográfica, é possível analisar o problema mais detalhadamente, sabendo as características relevantes de cada tipo de material e suas aplicações, bem como obter detalhes sobre valores de propriedades mecânicas, também disponíveis em trabalhos anteriores que serão utilizados para comparação de resultados.

A etapa de maior importância no projeto é a modelagem das placas anti-projétil no programa computacional ANSYS, bem como a simulação do impacto do projétil em suas superfícies. Outro aspecto a ser considerado são os tipos de elementos finitos que serão utilizados para a construção dos modelos, pois elementos diferentes proporcionam resultados mais ou menos precisos do que outros.

E por fim, a última etapa, conforme Figura 1, consiste na análise dos resultados obtidos e comparação com outros trabalhos que tenham executado experiências e/ou simulações numéricas do modelo tratado. Com isso, podem ser elaboradas conclusões a respeito da validade do método utilizado.

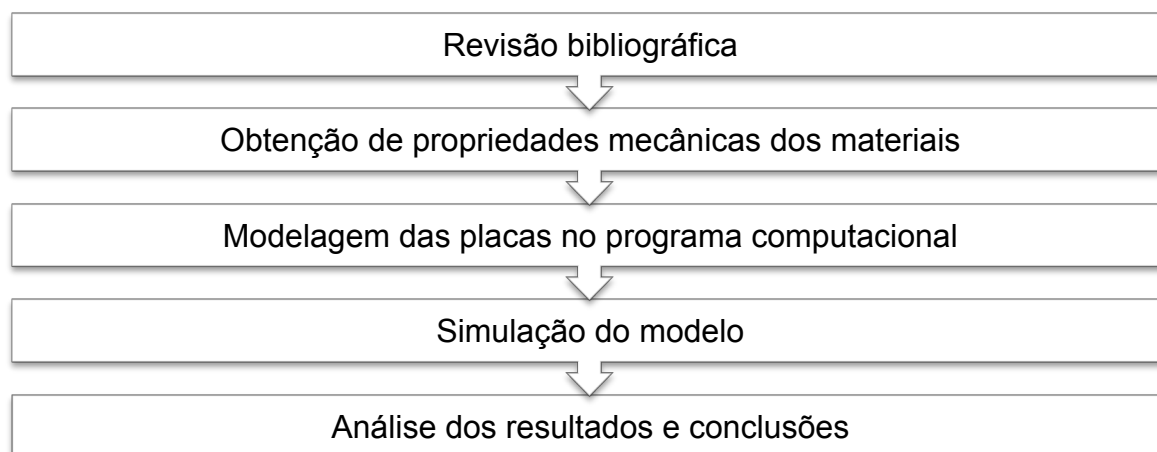


Figura 1 – Sequência de ações do projeto

Fonte: Autor

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Normas Balísticas

Para o controle dos materiais utilizados em blindagens, bem como a sua classificação, existem diferentes normas adotadas no mundo para dividir estes materiais em grupos distintos. Estes grupos diferem entre si nos seguintes quesitos:

- I. calibre e massa do projétil suportado;
- II. velocidade de impacto;
- III. distância entre o ponto de disparo do projétil e a placa de blindagem.

Para todas as normas descritas, o teste deve ser feito cinco vezes e deseja-se que não haja nenhuma penetração no material. A seguir serão detalhadas as normas mais utilizadas no mercado nacional e internacional.

2.1.1 Norma NIJ 0108.01 / NIJ 0101.04

A norma NIJ 0108.01 / NIJ 0101.04, criada pelo Instituto Nacional de Justiça (National Institute of Justice) dos Estados Unidos, serve como referência para os países da América Latina. Segundo essa norma, os materiais podem ser classificados em seis grupos, que são detalhados na Tabela 1.

Tabela 1 - Níveis balísticos segundo a norma NIJ 0108.01

Nível Balístico	Calibre (nome comercial)	Massa do Projétil (g)	Velocidade (m/s)	Distância (m)
I	.22 Caliber LR/LRN	2,6 ±0,1	329	5
	380 ACP FMJ/RN	6,2 ±0,1	322	5
II-A	9mm FMJ/RN	8,0 ±0,1	341	5
	.40 S&W FMJ	11,7 ±0,1	322	5
II	9mm FMJ/RN	8,0 ±0,1	367	5
	357 Magnum JSP	10,2 ±0,1	436	5
III-A	9mm FMJ/RN	8,0 ±0,1	436	5
	44 Magnum SJHP	15,6 ±0,1	436	5
III	7.62x51 NATO FMJ	9,6 ±0,1	847	15
IV	.30 caliber M2 AP	10,8 ±0,1	878	15

Fonte: Norma NIJ 0108.01

2.1.2 Norma ABNT NBR 15000/2005

A norma brasileira ABNT NBR 15000/2005, é adotada pelo DFPC (Departamento de Fiscalização de Produtos Controlados) do Exército Brasileiro, órgão que regulamenta os produtos balísticos produzidos e comercializados no Brasil. Assim como a norma americana, os materiais também são classificados em seis grupos, porém existem algumas diferenças em relação àquela norma (ver Tabela 2).

Tabela 2 - Níveis balísticos segundo a norma ABNT NBR 15000/2005

Nível Balístico	Calibre (nome comercial)	Massa do Projétil (g)	Velocidade (m/s)	Distância (m)
I	.22 LRHV Chumbo	2,6 ±0,1	329	5
	380 RN Chumbo	6,2 ±0,1	322	5
II-A	9mm FMJ	8,0 ±0,1	341	5
	357 Magnum JSP	11,7 ±0,1	322	5
II	9mm FMJ/RN	8,0 ±0,1	367	5
	357 Magnum JSP	10,2 ±0,1	436	5
III-A	9mm FMJ/RN	8,0 ±0,1	436	5
	44 Magnum SWC GC	15,6 ±0,1	436	5
III	.308 – Winchester	9,6 ±0,1	847	15
IV	.30 – 06 AP	10,8 ±0,1	878	15

Fonte: Norma ABNT NBR 15000/2005.

2.1.3 Norma DIN EM 1063 / DIN 52.290

A norma DIN EM 1063 / DIN 52.290, de origem alemã, que está em processo de implantação na União Europeia e que, se comparada com a norma americana, NIJ 0108, é mais rigorosa e mais qualitativa. Isso se deve ao fato de que, para utilizar uma munição de calibre, com massa de projétil e velocidade de disparo iguais, o espaçamento entre o disparo do projétil e a placa é menor. Outra diferença que pode ser percebida, analisando a Tabela 3, é o fato de esta norma classificar um tipo de munição apenas em cada classe.

Tabela 3 - Níveis balísticos segundo a norma DIN EM 1063

Nível Balístico	Calibre (nome comercial)	Massa do Projétil (g)	Velocidade (m/s)	Distância (m)
B1	.22 Caliber LR/LRN	2,6 ±0,1	329	4
B2	9mm FMJ/RN	8,0 ±0,1	322	4
B3	357 Magnum JSP	10,2 ±0,1	341	5
B4	.40 S&W FMJ	11,7 ±0,1	322	5
B5	44 Magnum SJHP	15,6 ±0,1	436	5
B6	7.62x51 FJ/PB/SC	9,6 ±0,1	847	15
B7	7.62x51 FJ/PB/SC	9,6 ±0,1	847	15

Fonte: Norma DIN EM 1063.

2.2 Materiais para blindagem

Seguindo como exemplo uma blindagem feita em um automóvel, vários materiais são utilizados para reforçar suas partes, destaque para o habitáculo do veículo, local onde ficam o motorista e os passageiros.

Entre os materiais utilizados para blindagem do local, estão fibras de aramidas, e materiais como Kevlar®, que colocadas entre a carroceria e a parte interna, protegem os passageiros de disparos de armas de mão, como pistolas e revólveres. Para se ter uma blindagem mais robusta, capaz de suportar tiros de fuzis, são adicionadas placas sinterizadas de carbeto de silício. Estes componentes, devido a sua elevada dureza reduzem a velocidade de impacto do projétil e podem até fragmentá-lo, diminuindo assim a força devida ao impacto atuante nas outras camadas da blindagem. Os materiais anteriormente descritos são classificados como blindagens opacas, pois são aplicadas nas partes do veículo onde não existem vidros, como pode ser visto na Figura 2.

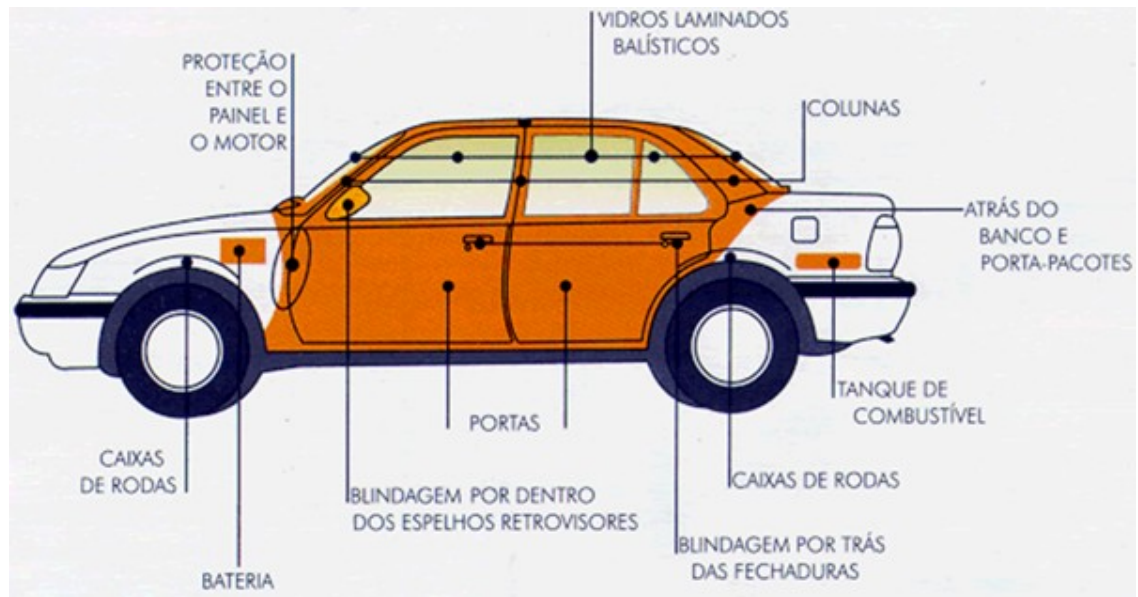


Figura 2 – Locais de um veículo onde são introduzidas blindagens

Fonte: <http://hypescience.com/25614-blindagem-carros-carro-blindado/>

Para a blindagem dos vidros, por motivos óbvios, são utilizados materiais transparentes para a constituição da proteção. Além dos vidros comuns do próprio automóvel, são adicionadas também placas laminadas de policarbonato, um polímero que possui baixa densidade e considerável absorção energética. Isso permite a absorção de estilhaços que venham a ser gerados pelo impacto do projétil nas camadas de vidro.

2.3 Cerâmicas

A palavra “cerâmica” origina-se da palavra grega *keramikos*, que significa “matéria queimada”. Segundo Callister Jr. (2007), isso indica que para se obter as propriedades desejadas do material na aplicação desejada, é necessário submetê-lo a um tratamento térmico a alta temperatura chamado cozimento.

Segundo Callister Jr. (2007), de acordo com a aplicação dos materiais cerâmicos, eles podem ser classificados de acordo com Figura 3.

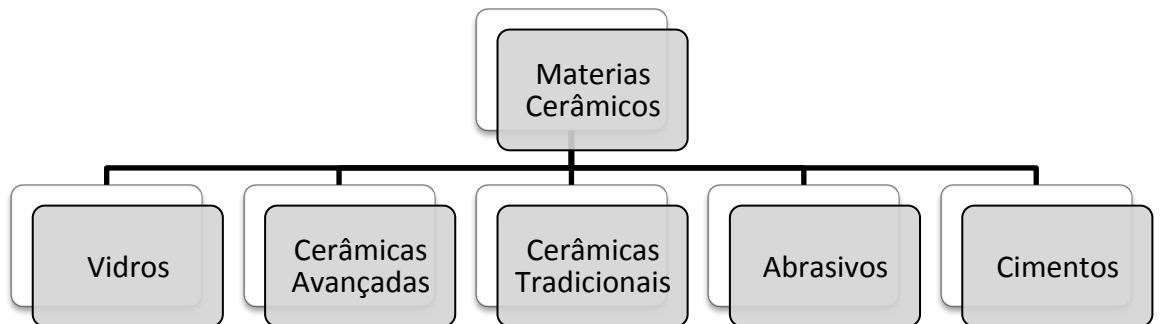


Figura 3 - Classificação de materiais cerâmicos segundo aplicação

Fonte: Adaptado de Callister, Jr. (2007)

A classe de interesse neste trabalho é a das cerâmicas avançadas, que são utilizadas em aplicações que exigem propriedades mecânicas bem desenvolvidas para uma resposta adequada às solicitações impostas. Vale salientar que um mesmo material pode ser enquadrado em diferentes classes, segundo a classificação apresentada, isso depende da aplicação para a qual o componente é desenvolvido.

2.3.1 Carbetto de silício

Dentre os materiais cerâmicos de engenharia, o carbetto de silício (SiC) é visto como o mais atraente devido à combinação única de propriedades apresentada. Huebner (2005) destaca as principais propriedades mecânicas deste material: excelente resistência à oxidação, resistência mecânica conservada a altas temperaturas, resistência ao desgaste, alta condutividade térmica e densidade relativamente baixa, quando comparada aos materiais metálicos. Estas propriedades se devem ao alto caráter covalente da ligação existente entre os átomos de carbono e de silício (Figura 4) (SILVA, 2009).

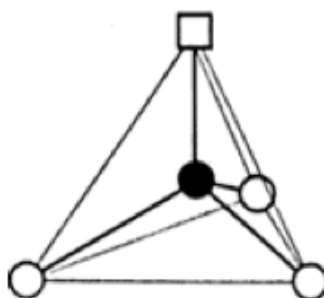


Figura 4 – Unidade básica dos cristais de SiC

Fonte: IZHEVSKYI et. al (2000)

Segundo Beltrão (2005), em caráter comercial, o pó de carbetto de silício, que será depois sinterizado, é obtido através de uma redução da sílica (SiO_2), processo conhecido como Acheson, Equação (1). Este método consiste na mistura, dentro de um forno, da sílica e uma fonte de carbono (geralmente carvão ou coque de petróleo). Essa mistura é aquecida, a temperaturas próximas a $2000\text{ }^\circ\text{C}$, pela passagem de uma corrente elétrica entre eletrodos que são posicionados nas extremidades do forno.



O carbetto de silício é obtido em forma de grandes blocos, que precisam ser posteriormente moídos para obtenção do pó. O tempo e o tipo de moagem adotados determinam a distribuição granulométrica resultante (BELTRÃO, 2005).

No processo de sinterização, executado com o carbetto de silício em estado sólido, ocorre transporte de material por difusão, a força motriz para esse processo é a redução da área superficial total através do aumento do tamanho das partículas, levando a um coalescimento, onde partículas pequenas tornam-se partículas grandes (BARSOUM, 2003).

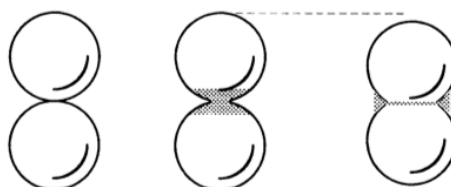


Figura 5 – Coalescimento de partículas

Fonte: BARSOUM, 2003

O composto de carbeto de silício resultante da sinterização do pó apresenta propriedades mecânicas extremamente importantes para aplicações estruturais, são elas: elevados módulo de elasticidade e dureza, alta condutividade térmica e resistência mecânica íntegra em temperaturas até 1600 °C, no entanto, como um material cerâmico, apresenta uma tenacidade a fratura muito pequena, características relevantes para aplicação em blindagens (SILVA, 2008).

2.4 Polímeros

A palavra polímero origina-se do grego *poli*, que significa muitos e *mero*, que quer dizer unidade de repetição. Sendo assim, o termo polímeros significa uma macromolécula composta por várias unidades de repetição denominadas meros, que estão ligados entre si por uma ligação covalente (CANEVAROLO, JR., 2002).

Pela capacidade que as cadeias poliméricas têm de se dobrar e espiralar de diversas formas (Figura 6), tem-se como consequência uma grande quantidade de características que são importantes para os polímeros, como por exemplo as grandes extensões elásticas típicas de materiais como a borracha (HALL, 1990).



Figura 6 – Representação de uma cadeia de polímeros

Fonte: CALLISTER, JR., 2007

As características físicas macroscópicas de um polímero dependem de vários fatores, entre eles o peso molecular, sua forma e a estrutura da cadeia. Callister Jr (2007) propõe a seguinte classificação em função da estrutura molecular:

Polímeros lineares: as unidades estão unidas ponta a ponta em cadeias únicas, sendo que essas cadeias apresentam boa flexibilidade, Figura 7a.

Polímeros ramificados: as cadeias de ramificações laterais encontram-se conectadas as cadeias principais, como indicado esquematicamente na Figura 7b. A compactação da cadeia é afetada pela presença de ramificações laterais, o que resulta em uma diminuição da densidade do polímero.

Polímeros com ligações cruzadas: as cadeias lineares adjacentes estão unidas umas às outras em várias posições através de ligações covalentes, como está representado na Figura 7c. Ligações cruzadas são típicas de materiais elásticos, como por exemplo as borrachas.

Polímeros em rede: as unidades mere possuem três ligações covalentes ativas, formando redes tridimensionais, Figura 7d. Esses materiais possuem propriedades mecânicas e térmicas distintas.

Para aplicação na área de materiais balísticos, em virtude das solicitações aplicadas ao material, são utilizados polímeros em rede, como por exemplo as placas de policarbonato descritas neste trabalho e que terão seu comportamento analisado.

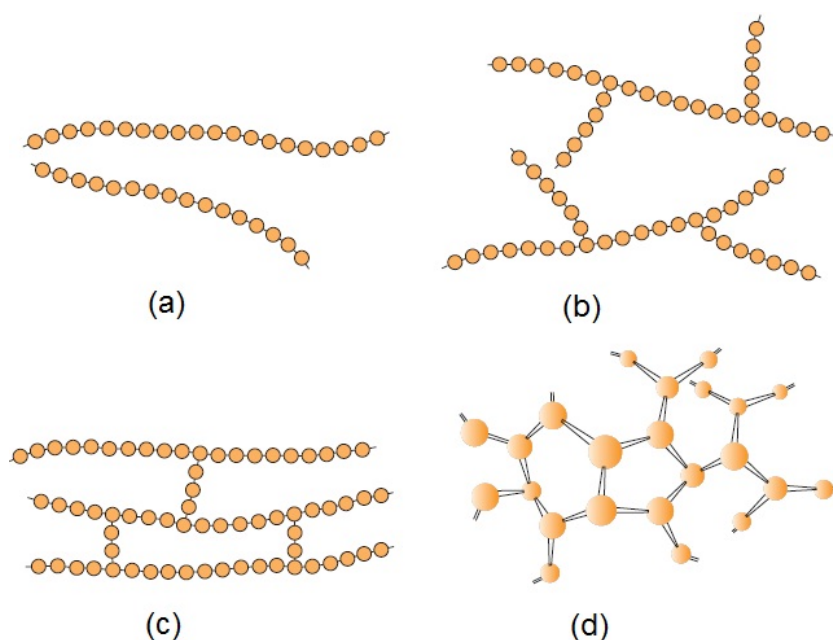


Figura 7 – Representação de estruturas moleculares (a) lineares, (b) ramificadas, (c) com ligação cruzada e (d) em rede

Fonte: CALLISTER, JR., 2007

As propriedades mecânicas expressam a resposta dos materiais às influências mecânicas externas, sendo manifestada pela capacidade desses materiais desenvolverem deformações reversíveis e irreversíveis, além de resistirem à fratura. A seguir são apresentadas algumas propriedades e características termomecânicas de grande importância, segundo Mano (1994):

- a) Comportamento Tensão-Deformação: basicamente são encontrados três tipos de comportamento tensão-deformação, como mostrado na Figura 8. O comportamento da Curva A corresponde ao de um polímero frágil, que apresenta pequena deformação antes da ruptura, assim como ocorre com os materiais cerâmicos. A Curva B representa o comportamento do material plástico parecido com aquele apresentado pelos metais, a deformação inicial é elástica, seguida por escoamento e por uma região de deformação plástica. Já a deformação apresentada pela Curva C é totalmente elástica, típica das borrachas, sendo que os polímeros que apresentam este comportamento são conhecidos como elastômeros.

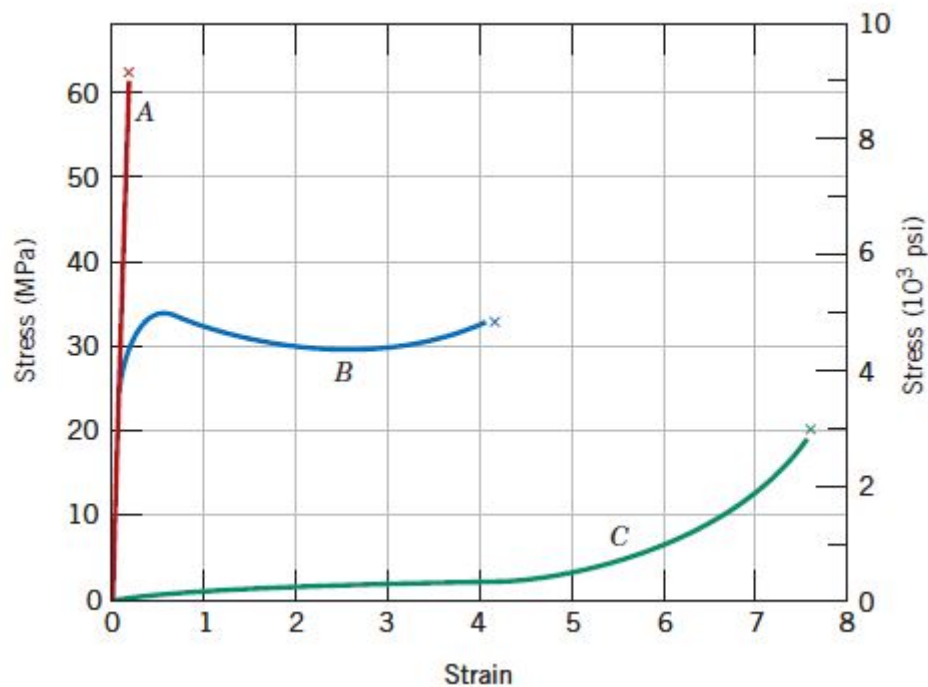


Figura 8 - Comportamento tensão deformação para polímeros frágeis (curva A), dúcteis (curva B) e altamente elásticos (curva C)

Fonte: CALLISTER, JR., 2007

- b) Resistência ao Impacto: a resistência ao impacto geralmente é avaliada pelo ensaio Charpy, e os polímeros podem apresentar fraturas dúcteis e frágeis quando submetidos a carregamento de impacto. Tanto os polímeros cristalinos como os amorfos são frágeis a baixas temperaturas, e ambos possuem resistência ao impacto relativamente baixa. Apresentam uma transição dúctil-frágil ao longo de uma faixa de temperaturas relativamente estreitas, semelhante à apresentada pelo aço. A temperatura alta a resistência ao impacto sofre uma diminuição gradual à medida que o polímero começa a amolecer.
- c) Fadiga: semelhantemente aos metais, os polímeros podem apresentar falha por fadiga, sendo que ela ocorre em níveis de tensão menores do que o limite de escoamento. Alguns polímeros possuem um limite de fadiga (um nível de tensão no qual a tensão no momento da falha se torna independente do número de ciclos) e outros polímeros não. O comportamento de fadiga dos polímeros é muito mais sensível à frequência de carregamento do que o dos metais. Quando submetidos a ciclos de alta frequência e/ou tensões relativamente grandes, pode ocorrer um aquecimento localizado, conseqüentemente, as falhas podem ser devidas a um amolecimento do material, e não um resultado de processos típicos de fadiga.
- d) Resistência à Ruptura e Dureza: a habilidade para resistir a ruptura é uma propriedade importante para polímeros que são aplicados em blindagens. Para se estudar a resistência à ruptura, o parâmetro mecânico que é medido é a energia exigida para romper uma amostra seccionada que possua uma geometria padrão. Já a dureza, como nos metais, representa a resistência de um material ao risco, à penetração e à marcação. Os ensaios Rockwell são usados com frequência para os polímeros.

O policarbonato que é classificado como um material termoplástico e, como citado anteriormente, possui propriedades de resistência ao impacto semelhantes aos metais. Essa característica, aliada à baixa densidade do material polimérico, é de grande importância para a aplicação de blindagens, visto que o aumento excessivo da massa total do veículo não é desejável, o que compromete seu funcionamento.

2.4.1 Policarbonato

Os policarbonatos são um tipo particular de poliéster, formados por grupos funcionais de carbonato, como mostra a Figura 9.

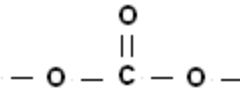


Figura 9 – Grupo funcional carbonato.

Fonte: Callister Jr., 1997.

Existem basicamente dois tipos de policarbonato: o alifático e aromático. A seguir serão apresentados as características básicas de cada um.

- a) Policarbonato alifático: são estruturas de cadeias abertas, sendo que o policarbonato alifático é preparado a partir de dois dióis e carbonatos, sendo que seu peso molecular varia entre 500 e 5000 g/mol. Em geral tem ponto de fusão menor que os aromáticos, sendo que o grupo carbonato pode ser decomposto pelo calor tendo então uma estabilidade térmica menor que os aromáticos. Devido ao seu baixo ponto de fusão e baixa estabilidade térmica, não são muito utilizados como termoplásticos.
- b) Policarbonato aromático: são estruturas que possuem anéis aromáticos e grupos carbonatos na estrutura, sendo a estrutura mais conhecida o Bisfenol-A, que pode ser vista na Figura 10. Um policarbonato pode ser composto por vários grupos Bisfenol-A, formando uma estrutura amorfa, insolúvel em água e ácido orgânicos, apresentando excelentes propriedades mecânicas relacionadas a tração e ao impacto, podendo ser empregados até temperaturas da ordem de 140°C. As propriedades apresentadas pelo policarbonato de Bisfenol-A o fazem um dos materiais mais empregados na engenharia, sendo que essas propriedades são: transparência, alta resistência ao impacto, excelente estabilidade dimensional ao calor, excelentes propriedades elétricas e é auto-extinguível à chama.

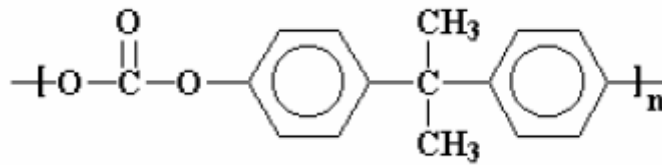


Figura 10 – Estrutura do Bisfenol-A.

Fonte: Shackelford, 2008.

Os policarbonatos são moldáveis quando aquecidos, sendo por isso chamados termoplásticos. Devido a todas as características apresentadas e a sua facilidade de moldagem, Shackelford (2008) cita várias áreas e segmentos da indústria onde são utilizados, tais como:

- área médica
- indústria automotiva;
- indústria de construção;
- produção de artefatos para instalações elétricas;
- produção de embalagens diversas;
- indústria de equipamentos óticos e fotográficos;
- indústria nuclear;
- indústria de material bélico (blindagens balísticas transparentes para proteção pessoal e para veículos de uso civil e militar).

Devido à sua estabilidade térmica, o policarbonato do tipo aromático é mais utilizado como termoplástico, sendo assim mais vantajoso para aplicações em placas de blindagem em relação ao do tipo alifático, que possui ponto de fusão e estabilidade térmica inferiores, o que dificulta a sua moldagem correta.

2.5 Compósitos laminados

Na engenharia, sempre busca-se materiais que possuam uma elevada relação desempenho/peso, uma boa alternativa encontrada foram os compósitos estruturais.

Materiais compósitos são combinados que apresentam juntos propriedades que nenhum dos componentes apresentaria individualmente (MENDONÇA, 2005).

Um material compósito tem suas propriedades definidas pela combinação e arranjo dos seus materiais constituintes, são eles a matriz e as fibras. A primeira representa o meio onde estão dispersas as fibras. A combinação dos constituintes em camadas formam os chamados compostos laminados, que possuem uma resistência e espessura únicos.

Para Reddy (1992), as fibras podem ser contínuas ou descontínuas, quanto a sua disposição podem ser unidirecionais, bidirecionais, na forma de tecidos ou distribuídas aleatoriamente, como pode ser visto na Figura 11.

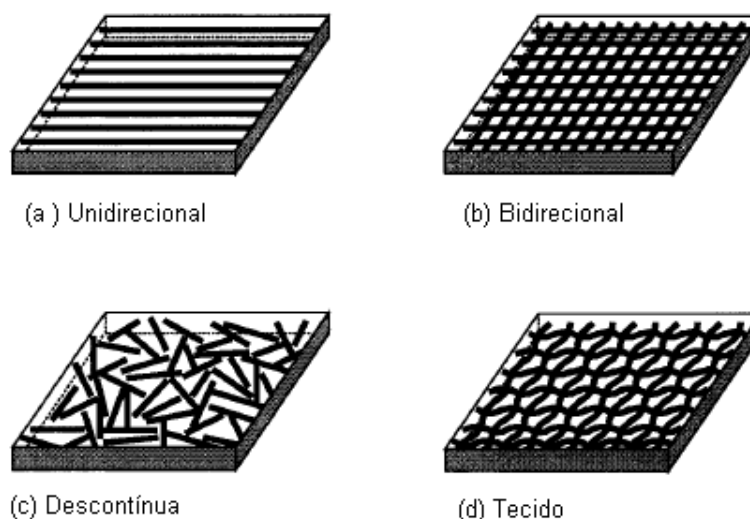


Figura 11 – Diferentes tipos de orientação de fibras
Fonte: Reddy, 1997

Quando se tem o empilhamento das lâminas, as fibras de cada uma podem estar orientadas na mesma ou em diferentes direções, o que é chamado de sequência de empilhamento. A Figura 12 mostra um exemplo de lâminas empilhadas com suas fibras orientadas em diferentes direções. Uma determinada sequência de empilhamento visa atender um determinado requisito de projeto ou fabricação que não seria factível utilizando materiais não compósitos.

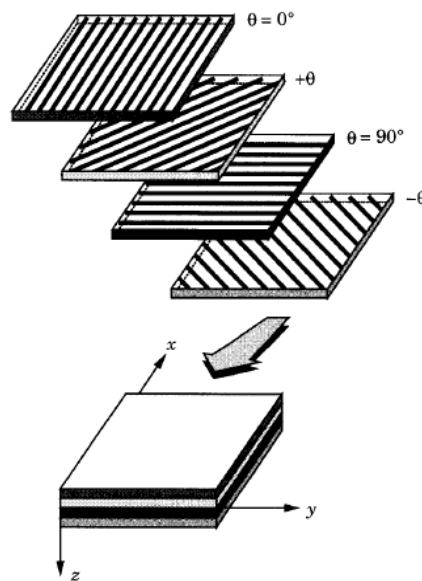


Figura 12 – Placa laminada com fibras orientadas em diferentes direções

Fonte: Reddy, 1997

É possível obter uma gama muito extensa de propriedades mecânicas diferentes combinando matrizes com fibras nas mais diversas orientações. Na indústria moderna, as fibras mais utilizadas são as de vidro, carbono, Kevlar® e fibras cerâmicas, já as matrizes mais comuns são as de materiais metálicos, cerâmicos ou resinas poliméricas.

2.5.1 Comportamento mecânico de uma lâmina

Existem dois tipos de comportamento que podem ser avaliados em uma lâmina: macromecânico e micromecânico.

Utilizando-se a abordagem da micromecânica, são realizados ensaios experimentais considerando as propriedades mecânicas de cada componente, fibra e matriz, e ainda as interações que ocorrem entre si, assim tem-se uma estimativa das principais características elásticas e de resistência. Em contrapartida, no caso de uma abordagem macromecânica, parte-se de uma premissa que a lâmina é um meio contínuo e que possui comportamento elástico, podendo-se então considerar a lei de Hooke generalizada para avaliar seu comportamento sob um determinado estado de tensão ou deformação.

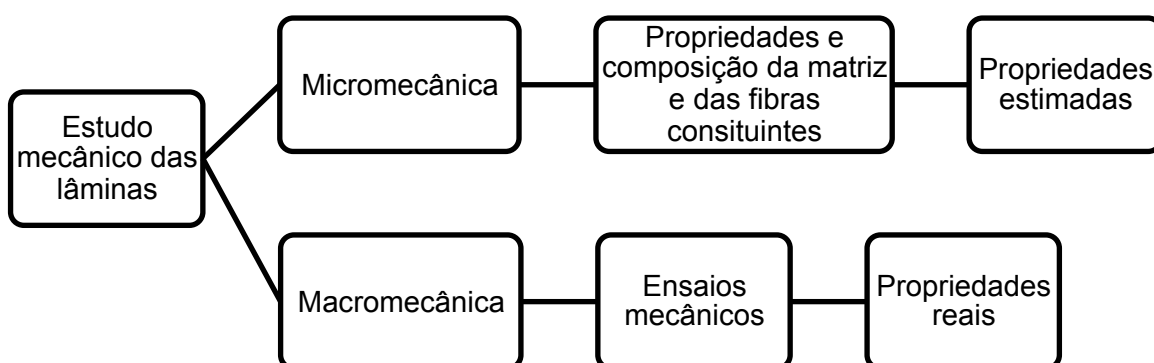


Figura 13 – Fluxograma para avaliação das propriedades de uma lâmina

Fonte: Adaptado de Mendonça, 2005

Os ensaios mecânicos visam determinar as constantes de engenharia que representam as propriedades elásticas do material. Os módulos de Young E_1 , E_2 , E_3 , os coeficientes de Poisson (ν_{12} , ν_{23} , ν_{31}) e os módulos de elasticidade transversais, G_{12} , G_{23} , G_{31} são geralmente avaliados no sistema de coordenadas principal do material (PEREIRA, 2003). Na Figura 14, estão representados os eixos de coordenadas principais de uma lâmina, sendo o primeiro eixo paralelo às fibras, o segundo transversal e o último eixo ortogonal aos outros dois eixos.

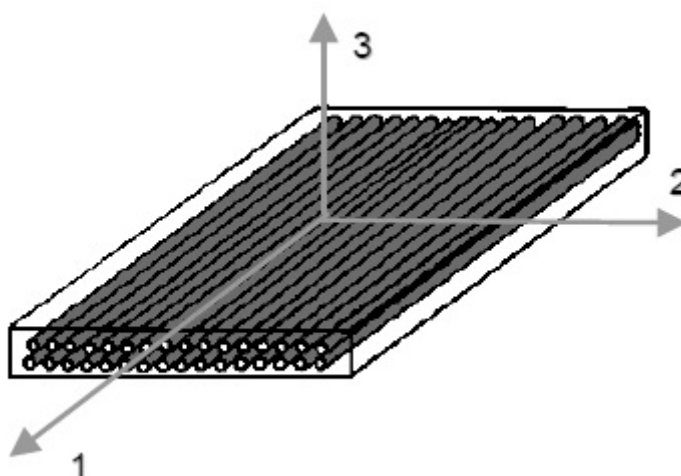


Figura 14 – Sistema de coordenadas principal de uma lâmina

Fonte: Pereira, 2003

Na forma matricial, a lei de Hooke generalizada pode ser representada na seguinte forma, para um material elástico-linear em condições de temperatura constante:

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \quad (2)$$

Ou pode ser representada na forma expandida, onde a matriz constitutiva com os coeficientes C_{ij} e “sim” indica uma matriz simétrica.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Como a matriz $[C]$ é não-singular, podendo ser invertida, tem-se a chamada matriz de flexibilidade $[S]$, que relaciona a deformação com a tensão, representada na forma matricial por:

$$\{\varepsilon\} = [S]\{\sigma\} \quad (4)$$

Na forma expandida:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ & & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ & & & S_{45} & S_{45} & S_{46} \\ & & & & S_{55} & S_{56} \\ & & & & & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Com relação à direção preferencial das propriedades mecânicas, pode-se classificar um material como isotrópico, ortotrópico ou anisotrópico. Os isotrópicos apresentam as mesmas propriedades em todas as direções, já os ortotrópicos são aqueles onde existem dois planos ortogonais de simetria de propriedades do material, e por último o material anisotrópico apresenta variação de suas propriedades em todas as direções estudadas (BEER, 1995).

Para um material isotrópico, caso abordado no trabalho, as seguintes relações entre as constantes de engenharia podem ser extraídas:

$$\begin{aligned}
 E_1 &= E_2 = E_3 = E \\
 \nu_{12} &= \nu_{23} = \nu_{13} = \nu \\
 G_{23} &= G_{31} = G_{12} = G
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Resultando nos seguintes coeficientes para a matriz constitutiva [C]:

$$\begin{aligned}
 C_{11} &= C_{22} = C_{33} = \frac{E}{1-\nu^2} \\
 C_{12} &= C_{13} = C_{21} = C_{23} = C_{31} = C_{32} = \frac{\nu E}{1-\nu^2} \\
 C_{44} &= C_{55} = C_{66} = \frac{E}{2(1+\nu)}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Fazendo a análise para a matriz de flexibilidade [S] tem-se:

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= S_{22} = S_{33} = \frac{1}{E} \\
 S_{12} &= S_{13} = S_{21} = S_{23} = S_{31} = S_{32} = -\frac{\nu}{E} \\
 S_{44} &= S_{55} = S_{66} = \frac{1}{G}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Os coeficientes não informados valem zero.

Substituindo-se (8) em (5), tem-se a matriz de flexibilidade [S] resultante para um material isotrópico em termos das constantes elásticas de engenharia:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

(9)

2.6 Modelo dinâmico de carga

Diferente do modelo estático de carga, onde a carga aplicada ao elemento é invariante no tempo, o modelo dinâmico de simulação admite que há variação temporal da carga aplicada ao elemento. Dentro dessa classificação, existem quatro tipos usuais de análise:

- a) **Análise Modal:** permite o cálculo das frequências naturais e dos modos de vibração do elemento.
- b) **Análise Harmônica:** permite análise da resposta da estrutura em regime permanente a um carregamento harmônico.
- c) **Análise Transitória:** análise da resposta de uma estrutura sujeita a um carregamento geral, que varia no tempo, por exemplo cargas de impacto.
- d) **Análise Espectral:** utilizada para análise de situações onde tem-se um carregamento aleatório, que não pode ser abordado pelas análises anteriores.

A análise adotada neste trabalho será a de caráter transitório, visto que pode ser aplicada para carregamentos que variam no tempo e não são de caráter harmônico. Com a utilização de um modelo de carga dinâmica é esperado obter-se resultados mais próximos dos valores reais, se comparados a um modelo de carga estática equivalente.

Como uma aproximação para a modelagem da força num regime transiente, será utilizada a aproximação de um carregamento estático equivalente para cálculo do valor de pico da força, o valor de pico é atingido seguindo uma reta inclinada, como ilustrado genericamente na Figura 15.

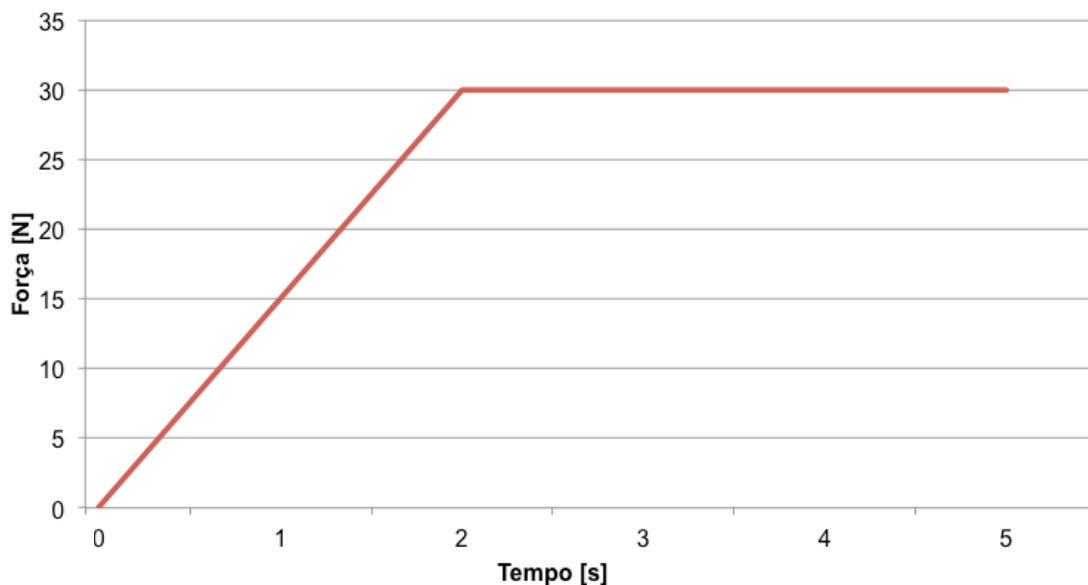


Figura 15 – Variação temporal de uma força de impacto

Fonte: Autor

Uma estimativa é feita do impacto de um projétil em um anteparo, de modo que o valor inicial é de 0 N para $t = 0$ s, e o valor de pico da força é atingido em um determinado valor de tempo, e depois mantém-se constante até o instante de tempo final do impacto.

2.6.1 Cálculo do valor de pico de força em regime transiente

Segundo Beer e Johnston (1995), um corpo de massa m , movendo-se a uma velocidade v_o , quando se choca contra um corpo qualquer impõe uma carga de impacto sobre o segundo corpo. Para determinar a força resultante do impacto, algumas hipóteses são consideradas:

1. Não ocorre dissipação de energia durante o impacto
2. O corpo que se choca não ricocheteia na estrutura e volta, conservando assim parte da sua energia. Por sua vez, essa condição exige que a inércia da estrutura possa ser desprezada em relação à inércia do corpo em movimento.

Satisfazendo essas condições, tem-se um dimensionamento para aumento da segurança, maximizando a força gerada realmente, pois sabe-se que na prática nenhuma das condições é plenamente satisfeita, pois não é toda a energia do corpo que é transferida para a estrutura.

A carga estática equivalente é determinada igualando-se a energia cinética do projétil antes do impacto como trabalho de deformação máximo da placa:

$$U_m = \frac{1}{2}mv_0^2 = U_d = P_m w_{\max} \quad (10)$$

onde P_m é a carga estática equivalente e w_{\max} representa a deformação no ponto de máximo impacto da placa.

Mendonça (2005) propõe a seguinte relação para avaliar o deslocamento máximo de uma placa quadrada, feita de material isotrópico, simplesmente apoiada e sujeita a uma carga concentrada:

$$w_{\max} = \frac{0,0116P_m a^2}{D} \quad (11)$$

onde a é a dimensão do lado da placa e D é o módulo de rigidez flexural da placa, dado pela seguinte expressão:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (12)$$

Rearranjando as expressões anteriores, tem-se uma expressão final para o cálculo da carga estática equivalente provocada por um carregamento dinâmico:

$$P_m = \frac{9,28v_0}{a} \sqrt{mD} \quad (13)$$

2.7 Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) consiste na análise de problemas físicos em meios contínuos, através da discretização do domínio em pequenas regiões que são denominados elementos finitos, sendo assim, obtém-se um domínio discreto. A

esta divisão do domínio se dá o nome de malha, do inglês *mesh*, que é composta por elementos que contém arestas e nós, estes últimos são os pontos de interseção das suas arestas (ASSAN, 2003).

Para a abordagem do problema deste trabalho, análise de placas, existem vários tipos de modelos a serem aplicados. O modelo mais utilizado em produtos comerciais é o modelo compatível. Também conhecido como modelo baseado nos deslocamentos, este modelo é baseado no princípio da Energia Potencial Mínima. Sobre cada elemento é adotado um campo de deslocamento, de tal maneira que haja continuidade dos deslocamentos nodais, e eventualmente de suas derivadas. As incógnitas deste modelo são os deslocamentos nodais.

Segundo Cook (1990), para cada elemento finito, a equação que governa o problema é aproximada por uma combinação linear de funções pré-escolhidas, muitas vezes polinomiais. Para um elemento, representando a solução como o seu valor nos nós, identifica-se a solução como uma interpolação polinomial apropriada, podendo-se escrever:

$$\phi(x) \approx \Phi(x) = \sum_{i=1}^n N_i(x) \phi_i \quad (14)$$

onde Φ representa a interpolação de ϕ em um elemento do domínio em questão, ϕ_i é o valor de Φ no nó i da malha, e N_i é a função interpoladora adotada.

Sendo assim, o MEF é um método numérico onde uma dada equação diferencial é reescrita em uma forma equivalente, conhecida como integral de ponderação ou formulação variacional, sendo que os parâmetros ϕ_i são determinados de tal forma que a formulação variacional seja atendida em cada elemento. A satisfação da formulação variacional conduz a um conjunto de equações algébricas entre os parâmetros ϕ_i de um elemento. Como o domínio é dividido entre um conjunto de elementos, eles são agrupados nas suas posições originais baseando-se na continuidade do elemento na interface.

Para a obtenção de uma formulação adequada utilizando o método dos elementos finitos, é necessário, além da formulação matemática da grandeza em questão, ter conhecimento dos aspectos referentes à geometria dos elementos

utilizados, a aplicação das cargas no modelo, bem como o refino da malha dos elementos, em caso de se desejar uma solução mais precisa.

Reddy (1992) propõe as seguintes recomendações para a geração de uma malha de elementos finitos: a malha deve representar a geometria do domínio e as cargas envolvidas de forma precisa, representar também grandes variações de tensões ou deformações. Os elementos da malha não devem apresentar grandes razões de aspectos (i.e., razão entre o lado maior e o menor do elemento), especialmente em regiões de grandes variações de tensões e/ou deformações.

O refino da malha pode ser feito de diversas formas. Subdividindo-se os elementos já existentes em duas ou mais partes do mesmo tipo, substituindo-se elementos existentes por elementos de ordem maior. Deve-se ter o cuidado para não se ter elementos muito pequenos conectados com elementos muito grandes. Quando se utiliza elementos com diferentes graus de liberdade, devem-se construir elementos de transição para conectar esses elementos.

As cargas no problema real em uma determinada fronteira são substituídas por cargas nodais equivalentes. Isto é feito de tal forma que o trabalho realizado pelas cargas nodais no modelo de elementos finitos é o mesmo que aquele realizado pelas cargas distribuídas do problema.

2.7.1 Teoria de flexão para placas

Segundo Cook (1990), uma placa plana, assim como uma viga reta, suporta cargas transversais devido à ação da flexão sofrida. Considera-se para a formulação um elemento diferencial de placa com dimensões dx , dy e espessura t , constituída de material homogêneo e linearmente elástico, sujeito a um carregamento q (força por unidade de área), ilustrado na Figura 16.

As tensões normais σ_x e σ_y variam linearmente com z e estão associadas com os respectivos momentos fletores M_x e M_y , a tensão de cisalhamento τ_{xy} também varia linearmente com z e está associada com o momento de torção M_{xy} . A tensão normal σ_z pode ser negligenciada no modelo devido a sua baixa magnitude em

comparação com σ_x , σ_y e τ_{xy} , já as tensões de cisalhamento τ_{yz} e τ_{zx} apresentam uma variação quadrática em função de z .

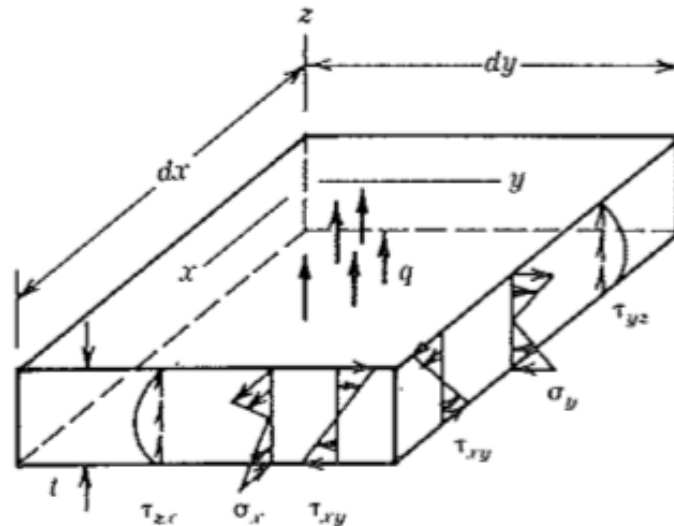


Figura 16 – Atuação das tensões na seção transversal de uma placa plana sujeita à flexão

Fonte: COOK, 1990

Como se trata de um caso de flexão pura, q , que representa forças de superfície e de corpo, atua apenas na direção de z , isso significa que não existem forças atuando paralelamente ao plano xy , sendo assim, σ_x , σ_y e τ_{xy} valem zero na linha média da placa ($z = 0$).

2.7.2 Tipo de elemento

Vários tipos de elementos podem ser utilizados para executar simulações no programa computacional ANSYS, dentro dos elementos para modelagem de placas, por exemplo existem tipos de elementos que possuem diferentes quantidades de nós e graus de liberdade distintos para cada nó considerado.

Os elementos que foram utilizados para desenvolver as simulações neste trabalho são os do tipo SHELL. Para o modelo da placa de Carbetto de Silício, foi escolhido o elemento SHELL63, um elemento quadrado, bidimensional, com quatro nós e que possui 6 graus de liberdade em cada nó, sendo 3 rotações e 3

translações. É possível utilizar esse elemento também na configuração triangular, com três nós, como mostrado na Figura 17.

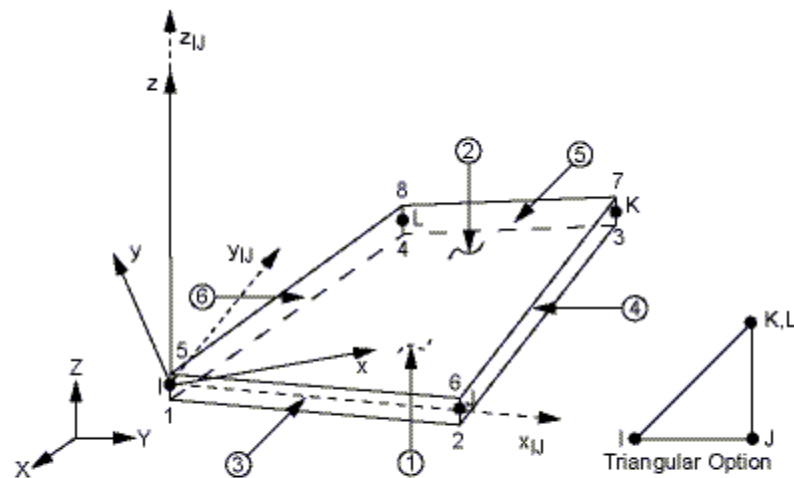


Figura 17 – Elemento SHELL63

Fonte: ANSYS Tutorial, 2012

Para definição de um elemento SHELL63, são necessários dados de entrada requisitados pelo programa computacional ANSYS, são eles:

- I. Espessura dos elementos;
- II. Rigidez elástica;
- III. Rotação do eixo X;
- IV. Taxa de momento de inercia de flexão;
- V. Distância da linha neutra até o topo;
- VI. Distância da linha neutra até a borda inferior;
- VII. Quantidade de massa por unidade de área.

Devido à geometria do problema, é necessária a definição da espessura dos elementos, tendo em vista que as outras propriedades são necessárias quando se tem um modelo mais avançado, que abrange também rotação de sistemas de coordenadas e elementos com espessuras distintas na malha.

Para a modelagem da placa feita de Policarbonato, um material composto por lâminas, é necessário lançar mão do elemento SHELL99 (Figura 18), que é muito similar ao anterior, porém possui oito nós, com seis graus de liberdade cada um.

Adicionalmente, este tipo de elemento permite a definição de camadas (até 250) do material que o compõem no sentido da sua espessura.

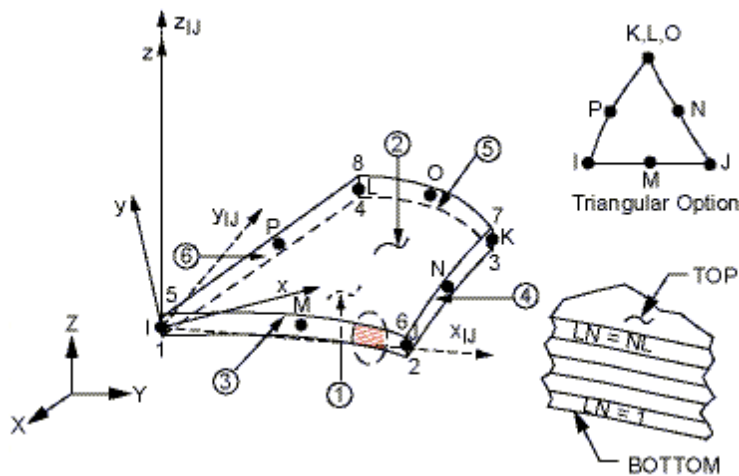


Figura 18 – Elemento SHELL99

Fonte: ANSYS Tutorial, 2012

Para definição de um elemento SHELL99, os dados que são necessários para definição são os mesmos do elemento anterior, em adição:

- I. Quantidade de camadas que compõem o material;
- II. Espessura de cada camada.

2.8 Critérios de falha

Todos os componentes que são utilizados nos dias de hoje são projetados de modo que o material que os compõe, sendo ele dúctil não venha a escoar em decorrência dos carregamentos impostos ao componente. De maneira semelhante, um material frágil não deve se romper durante uma solicitação a que é submetido. Para isso, no momento do projeto de um determinado componente, é estabelecido um limite superior para o estado de tensões que defina a falha do material.

2.8.1 Critério de Rankine para falha de materiais frágeis

Diferentemente de um material dúctil, que apresenta escoamento antes da sua ruptura, um material frágil apresenta uma ruptura repentina, sem prévio escoamento. Testes feitos em corpos de prova frágeis mostraram que o valor da tensão normal no

plano de fratura para um estado biaxial de tensões é muito próximo do valor da tensão de fratura (σ_u) em um ensaio de tração uniaxial.

Portanto o critério de falha de Rankine, também conhecido como critério da máxima tensão normal, considera que um elemento constituído de um material frágil falha quando a tensão principal máxima no material atinge o valor da tensão máxima que o material pode suportar em um teste de tração uniaxial (BEER, 1995).

Sendo assim, pode-se formular as seguintes expressões para analisar o critério de falha em termos do coeficiente de segurança, considerando σ_1 e σ_2 como sendo as tensões principais no material:

$$CS = \frac{\sigma_u}{|\sigma_1|} \quad (15)$$

ou

$$CS = \frac{\sigma_u}{|\sigma_2|} \quad (16)$$

Diz-se então que o material falhou se em uma das duas condições apresentadas por (15) e (16) o valor de CS for inferior a unidade.

2.8.2 Critério de Von Mises para falha de materiais dúcteis

Segundo Beer e Johnston (1995), quando um corpo está submetido a um estado uniaxial de tensão (Figura 19a), pode-se estabelecer que o mesmo estará seguro enquanto a tensão uniaxial não atingir a tensão de escoamento ($\sigma_{xx} < \sigma_e$). O presente critério de falha é utilizado para avaliação da placa feita de policarbonato. Entretanto, quando o corpo estiver submetido a um estado plano de tensões (Figura 19b), deve-se estabelecer algum critério que leve em conta o real mecanismo de ruptura do material.

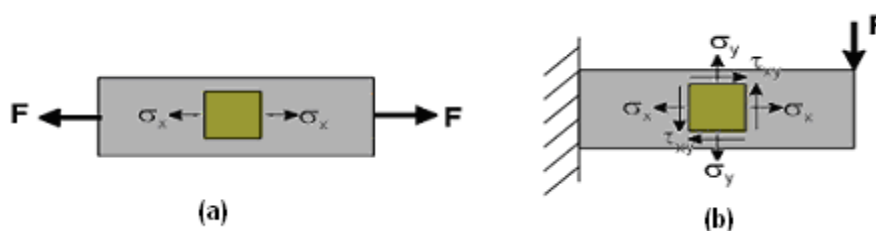


Figura 19 – Estado (a) uniaxial de tensões e (b) plano de tensões.

Fonte: Beer e Johnston, 1995

Um dos critérios de resistência mais utilizados para materiais dúcteis é o critério da máxima energia de distorção, ou critério de Von-Mises. Por este critério, um componente estrutural estará em condições de segurança enquanto o maior valor de energia de distorção por unidade de volume do material permanecer abaixo da energia de distorção por unidade de volume necessária para provocar o escoamento no corpo de prova de mesmo material submetido a ensaio de tração uniaxial (BEER e JOHNSTON, 1995).

O critério de Von-Mises para o Estado Plano de Tensões (EPT) pode ser expresso pela seguinte inequação:

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 < \sigma_e^2 \quad (17)$$

onde σ_1 e σ_2 são as tensões principais do material e σ_e é a tensão de escoamento do material.

$$CS = \frac{\sigma_e}{\sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}} \quad (18)$$

O coeficiente de segurança da Equação 18 permite avaliar se o material está apto a suportar o carregamento imposto ($CS \geq 1$) ou não ($CS < 1$).

3 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

3.1 Propriedades mecânicas das placas

3.1.1 Placa laminada de policarbonato

No trabalho realizado por Wéber (2004), foram utilizadas placas laminadas fabricadas pelo Grupo Inbra, para uso como blindagem Nível I, segundo norma NIJ 0108.01. A placa quadrada possui as seguintes dimensões: 300mm de lado e espessura de 12,7mm, sendo que há 3 camadas de policarbonato interligadas por um filme de poliuretano. A Figura 20 abaixo mostra a placa em questão e que será modelada neste trabalho.

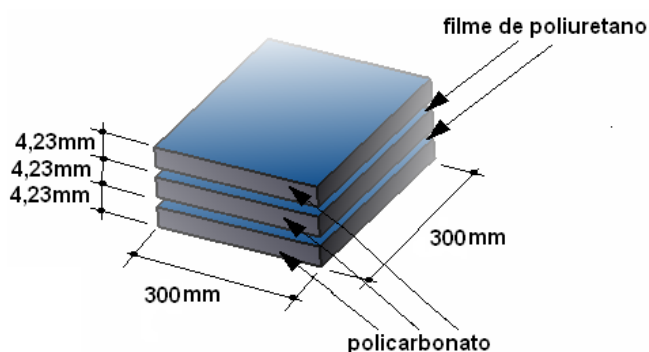


Figura 20 – Placa utilizada nos ensaios

Fonte: Adaptado de Wéber, 2004

Para levantamento das propriedades mecânicas do bisfenol-A, componente do policarbonato utilizado na placa, foram feitos ensaios mecânicos por Wéber (2004), os valores estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do bisfenol-A

Limite de escoamento (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson
65	1,585	0,37

Fonte: Adaptado de Wéber, 2004

3.1.2 Placa sinterizada de carbeto de silício

Para fins de comparação entre a resistência de placas de blindagens cerâmicas, confeccionadas de carbeto de silício (Nível III da norma NIJ) com as de policarbonato (Nível I) serão modeladas placas com as mesmas dimensões da citada na seção 3.1.1, sendo 300mm de lado por 12,7mm de espessura.

Os dados de propriedades mecânicas informados pelo fabricante Accuratus (2013) de placas sinterizadas de carbeto de silício estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do carbeto de silício

Limite de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Coeficiente de Poisson
550	424	0,14

Fonte: Adaptado de Accuratus, 2013.

Para construção de ambos os modelos, serão usadas configurações de malhas com quantidades crescentes de elementos, a fim de ser avaliada a convergência dos valores encontrados para o deslocamento máximo de cada placa. Para isso foram adotadas as seguintes configurações de malhas uniformes: 2x2, 4x4, 8x8, 16x16, 32x32, 64x64 e 128x128 elementos. Como condições de contorno, considera-se que a placa está simplesmente apoiada em seus quatro lados, sendo assim, nas arestas é possível apenas a rotação em torno dos eixos X e Y.

Os valores de deslocamento do ponto central da placa, onde ocorre o máximo valor, para cada configuração de malha serão comparados com o valor obtido pela solução analítica proposta para cálculo do deslocamento num caso estático, via séries de Navier.

Segundo Szilard (2004), para uma placa retangular com lados a e b , simplesmente apoiada nos quatro lados e sujeita a uma carga concentrada P situada às distâncias ξ e η dos eixos Y e X e com um módulo de rigidez flexural D , (Figura 21) o deslocamento de qualquer ponto dessa placa pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$w(x,y) = \frac{4P}{\pi^4 abD} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(m\pi\xi/a)\sin(n\pi\eta/b)}{[(m^2/a^2)+(n^2/b^2)]^2} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (19)$$

Como trata-se de uma placa quadrada com 300 mm de lado, os lados a e b assumem esse valor, as variáveis ξ e η valem 150 mm, bem como as coordenadas do ponto de interesse para cálculo do deslocamento (x e y), visto que o maior deslocamento ocorre no centro da placa, no mesmo local de aplicação da força.

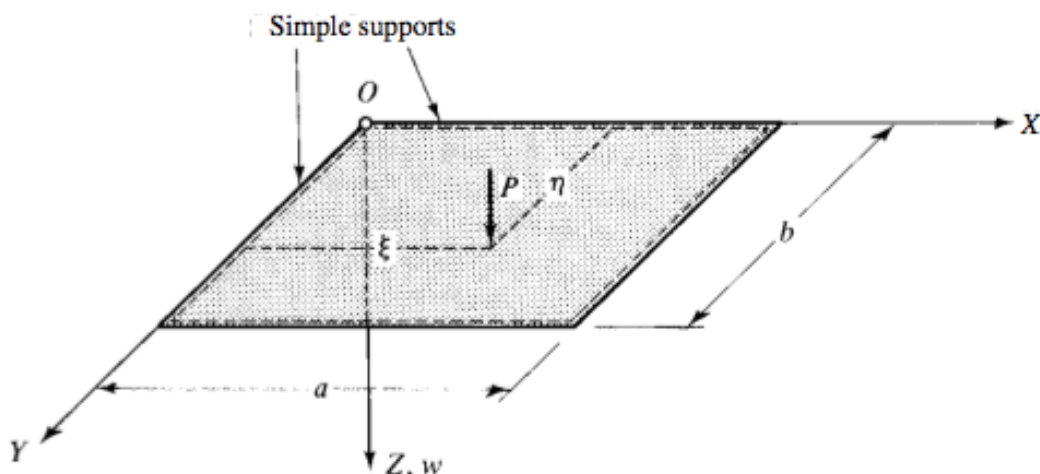


Figura 21 – Placa simplesmente apoiada sujeita a uma carga concentrada
Fonte: Szilard, 2004.

Os valores de P para cada caso podem ser calculados pelas Equações (12) e (13) apresentadas na seção 3.6.1, e foram considerados para cálculo dos deslocamentos máximos os valores de pico das forças em cada modelo. Para a placa de policarbonato, o valor obtido foi de 14,33 kN, já para a placa de concreto de silício, foi de 697,50 kN.

3.2 Máximo deslocamento da placa de Policarbonato

Utilizando os dados disponíveis na Tabela 1 a respeito do projétil e as propriedades mecânicas da placa na Tabela 4 utilizando as equações (10), (11), (12) e (13) foram obtidos os seguintes valores para cada configuração de malha. Os resultados estão mostrados na Tabela 6, bem como um modelo feito com uma malha de 128x128 elementos considerando um modelo estático de força, tal comportamento pode ser avaliado graficamente na Figura 22.

Tabela 6 – Valores de deslocamento máximo e erros percentuais da placa de policarbonato ¹

Modelo	Deslocamento (mm)	Erro percentual (%)
Solução analítica	42,100	-
2x2	51,812	23,07
4x4	49,965	18,68
8x8	48,549	15,31
16x16	47,685	13,26
32x32	47,104	11,88
64x64	47,066	11,79
128x128	47,054	11,76
128x128 estático	45,343	7,70

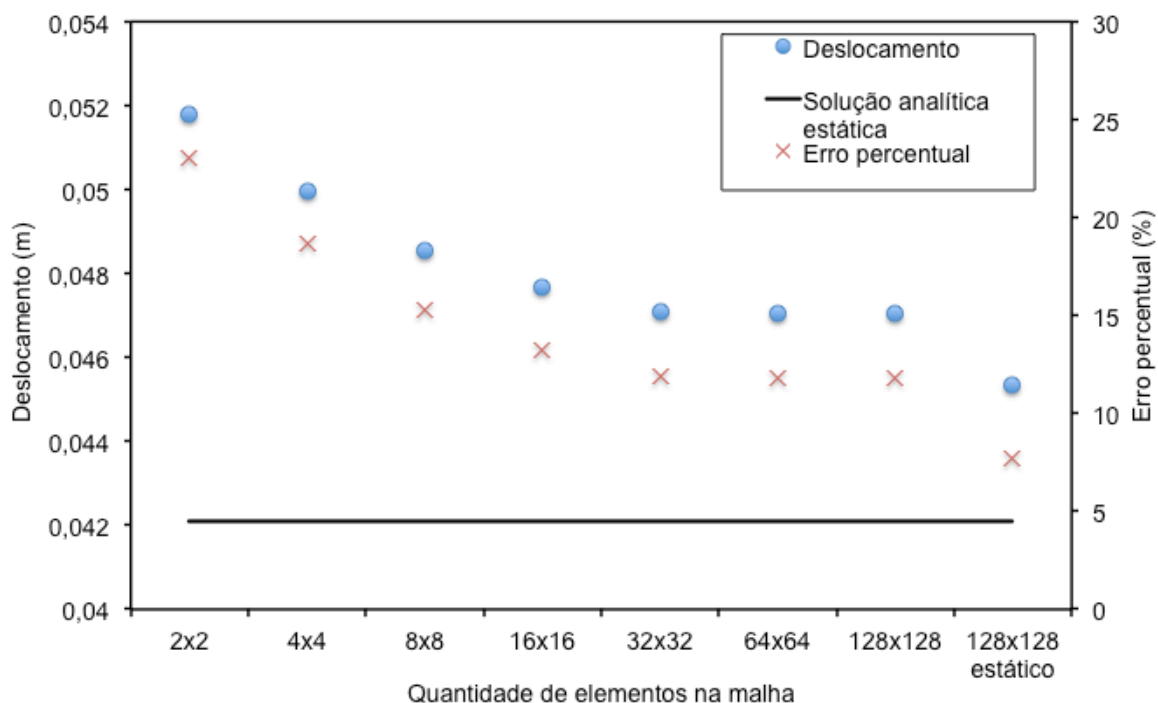


Figura 22 – Valores de deslocamento máximo da placa de policarbonato e erro percentual em função da quantidade de elementos

¹ Todas as figuras, quadros e tabelas que não possuem especificação de fonte foram feitas pelo autor.

Pode ser percebido que os valores obtidos para o máximo deslocamento da placa estão convergindo para 47 mm, devido a uma redução muito pequena do erro percentual em relação à solução analítica, na Figura 23 é mostrada a distribuição de deslocamentos na placa para a malha 128x128. O valor de erro percentual obtido na melhor configuração é de 11,76%, que é um valor relativamente grande, contudo deve ser lembrado que no modelo de elementos finitos foi feita uma abordagem de força dinâmica, logo, há fatores decorrentes dessa natureza que impedem uma resposta mais próxima da solução analítica, que considera um caso estático.

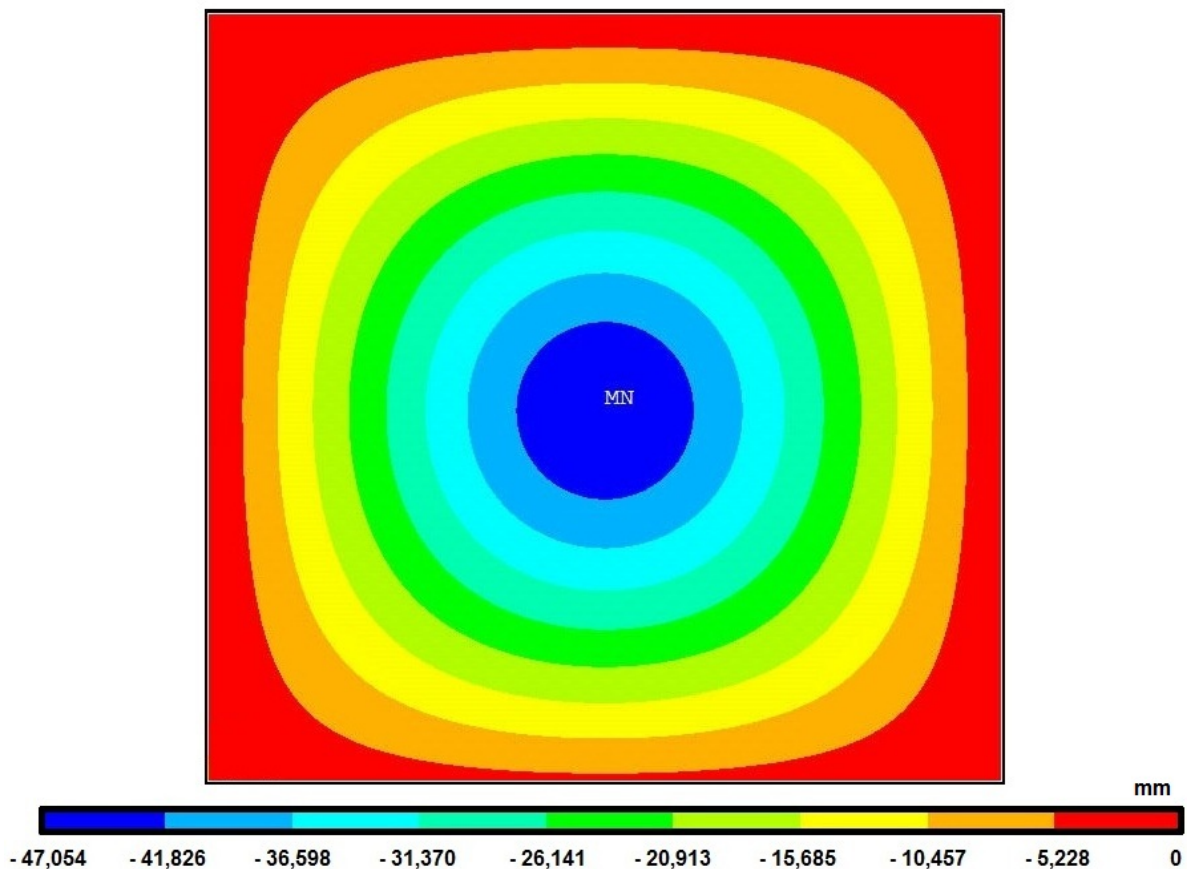


Figura 23 – Valores de deslocamento da placa de policarbonato

3.3 Máximo deslocamento da placa de Carbetto de Silício

Com os dados obtidos na Tabela 1 para o projétil e as propriedades mecânicas do material na Tabela 5, utilizando as equações (10),(11), (12) e (13) foram obtidos os seguintes valores de deslocamento máximo para cada configuração de malha utilizada. Os resultados estão mostrados na Tabela 7, assim como o resultado obtido

como modelo estático de força avaliado em uma malha de 128x128 elementos, o comportamento pode ser avaliado graficamente na Figura 24.

Tabela 7 - Valores de deslocamento máximo da placa de carbeto de silício

Modelo	Deslocamento (mm)	Erro percentual (%)
Solução analítica	8,700	-
2x2	11,048	26,99
4x4	10,261	17,94
8x8	10,005	15,00
16x16	9,926	14,09
32x32	9,901	13,80
64x64	9,894	13,72
128x128	9,892	13,70
128x128 estático	9,532	9,56

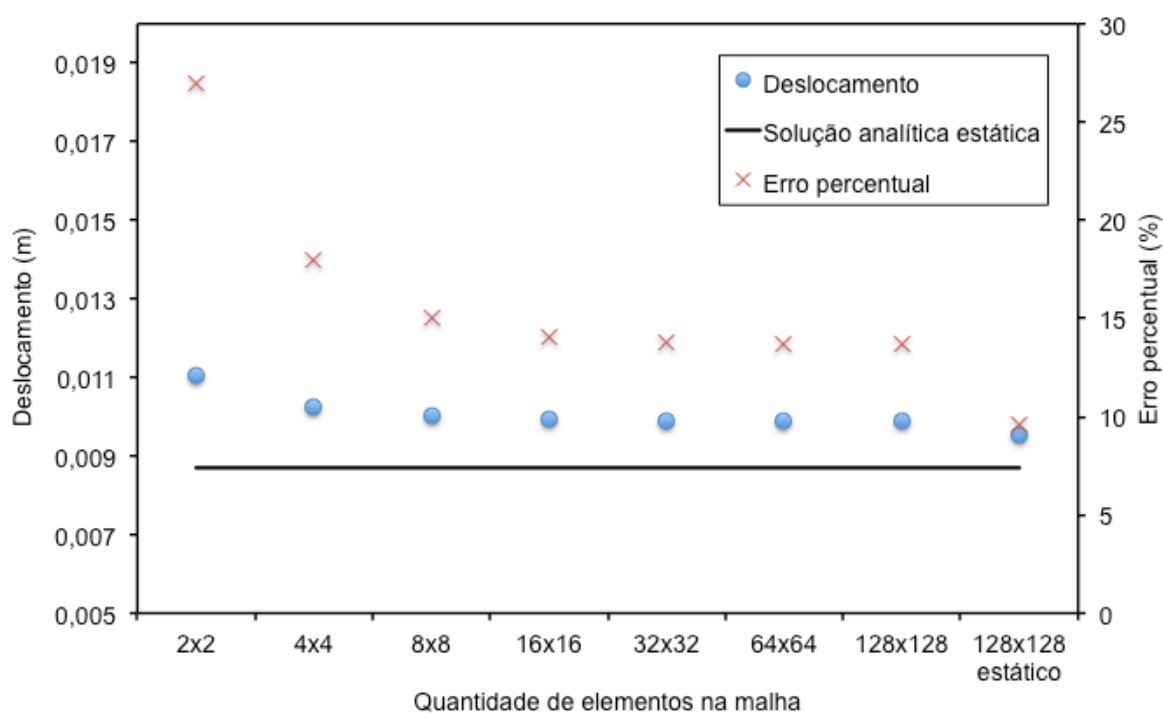


Figura 24 - Valores de deslocamento máximo da placa de carbeto de silício e erro percentual em função da quantidade de elementos

O mesmo comportamento do erro percentual com a aumento do número de elementos da malha pode ser observado no caso da placa de Carbetto de Silício, sendo observada a tendência de estabilização do erro percentual em uma configuração anterior (16x16). O melhor valor de erro percentual obtido foi de 13,70% para a configuração de 128x128 elementos, com a distribuição dos deslocamentos da placa representados na Figura 25. O valor de erro é um valor relativamente alto, principalmente comparando-se com o valor obtido para o modelo estático de MEF, porém deve-se ao uso do modelo dinâmico de força.

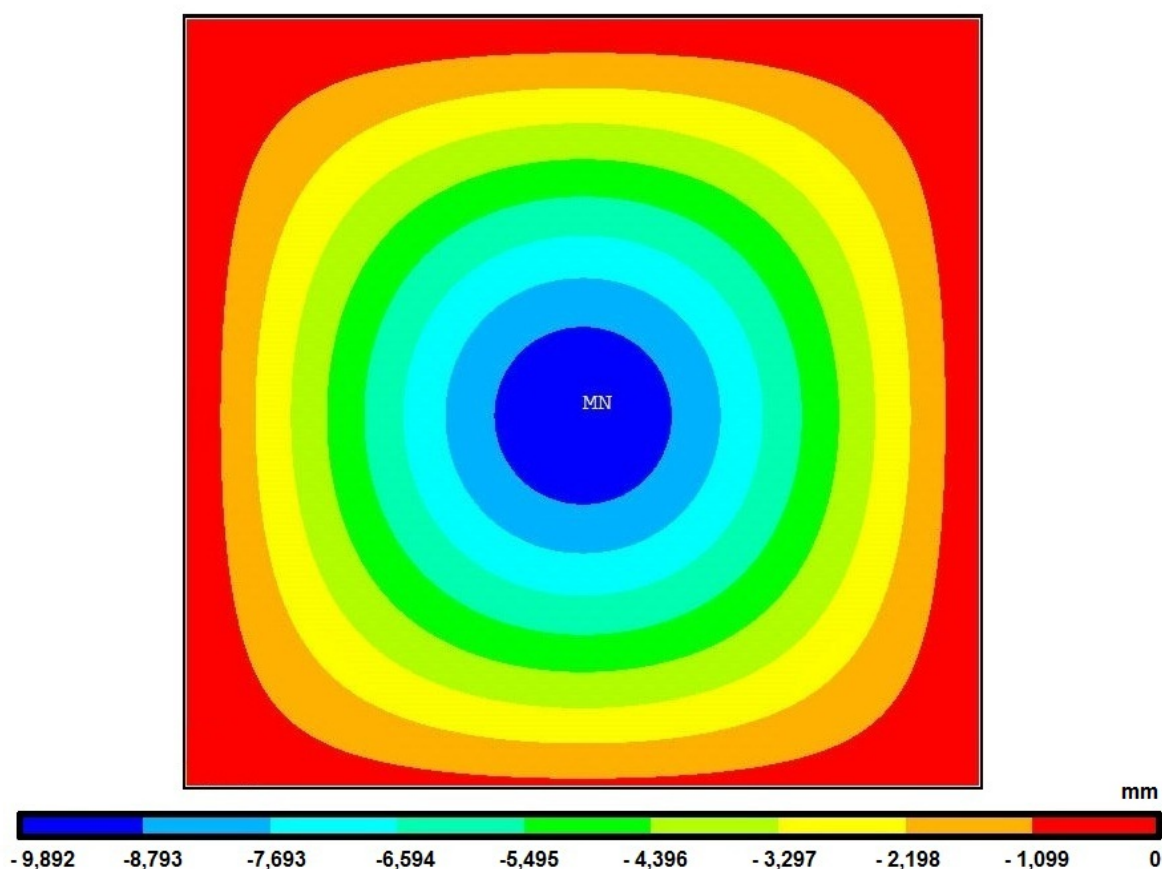


Figura 25 - Valores de deslocamento da placa de carbetto de silício

3.4 Critérios de falha para ambas as placas

Para avaliação da resistência das placas segundo os critérios de falha descritos na seção 3.8, serão utilizados os valores de tensões obtidos nas simulações feitas com a maior quantidade de elementos (128x128).

Para a placa de policarbonato, sabendo que os valor da tensão de escoamento σ_e é igual a 65 MPa e as tensões principais máximas σ_1 e σ_2 são iguais a 212 MPa, retiradas da Figura 26, o valor obtido para o coeficiente de segurança, conforme Equação (18), é de 0,09.

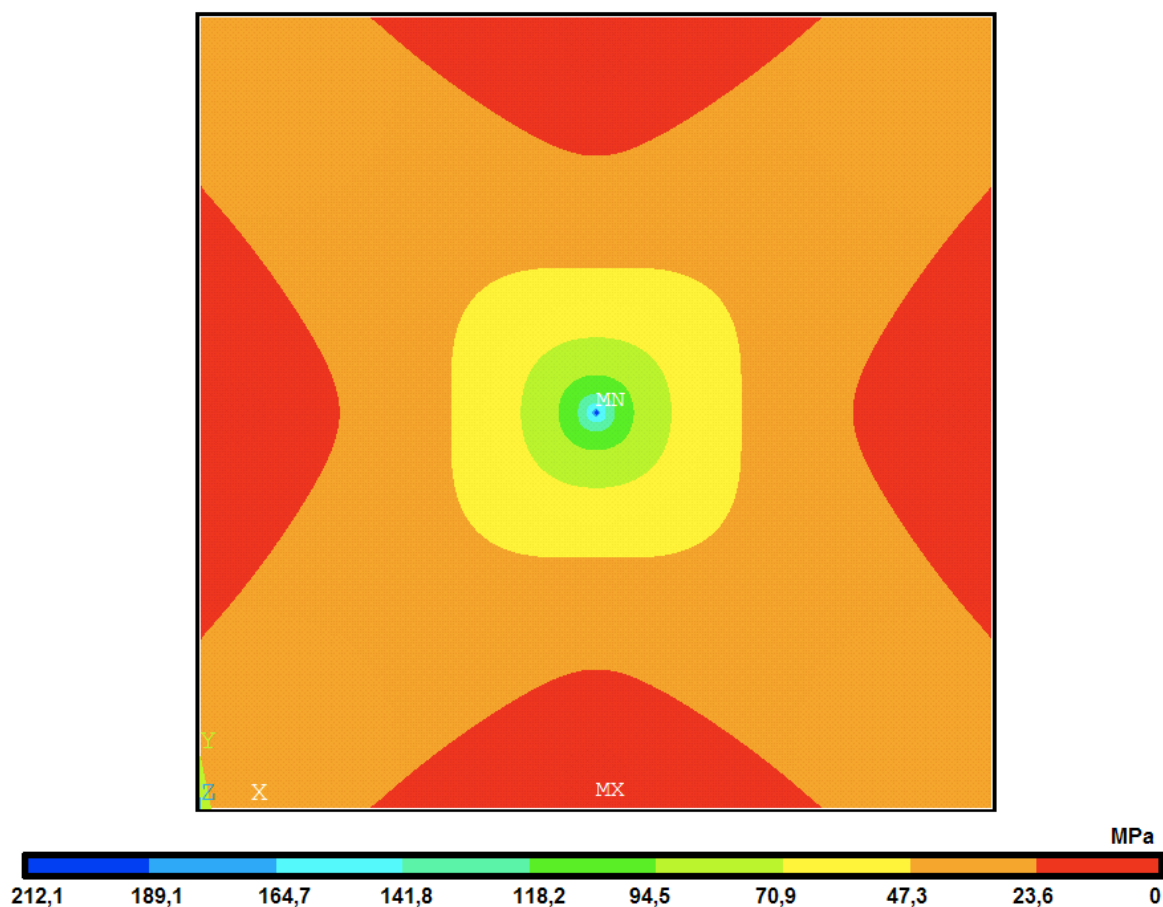


Figura 26 – Distribuição de tensão principal na placa de policarbonato

No caso da placa de carbetto de silício, como a tensão de ruptura do material σ_u é igual a 550 MPa e as tensões principais máximas σ_1 e σ_2 são iguais a 1480 MPa (Figura 27) conforme Equação (16) o valor do coeficiente de segurança obtido foi de 0,37.

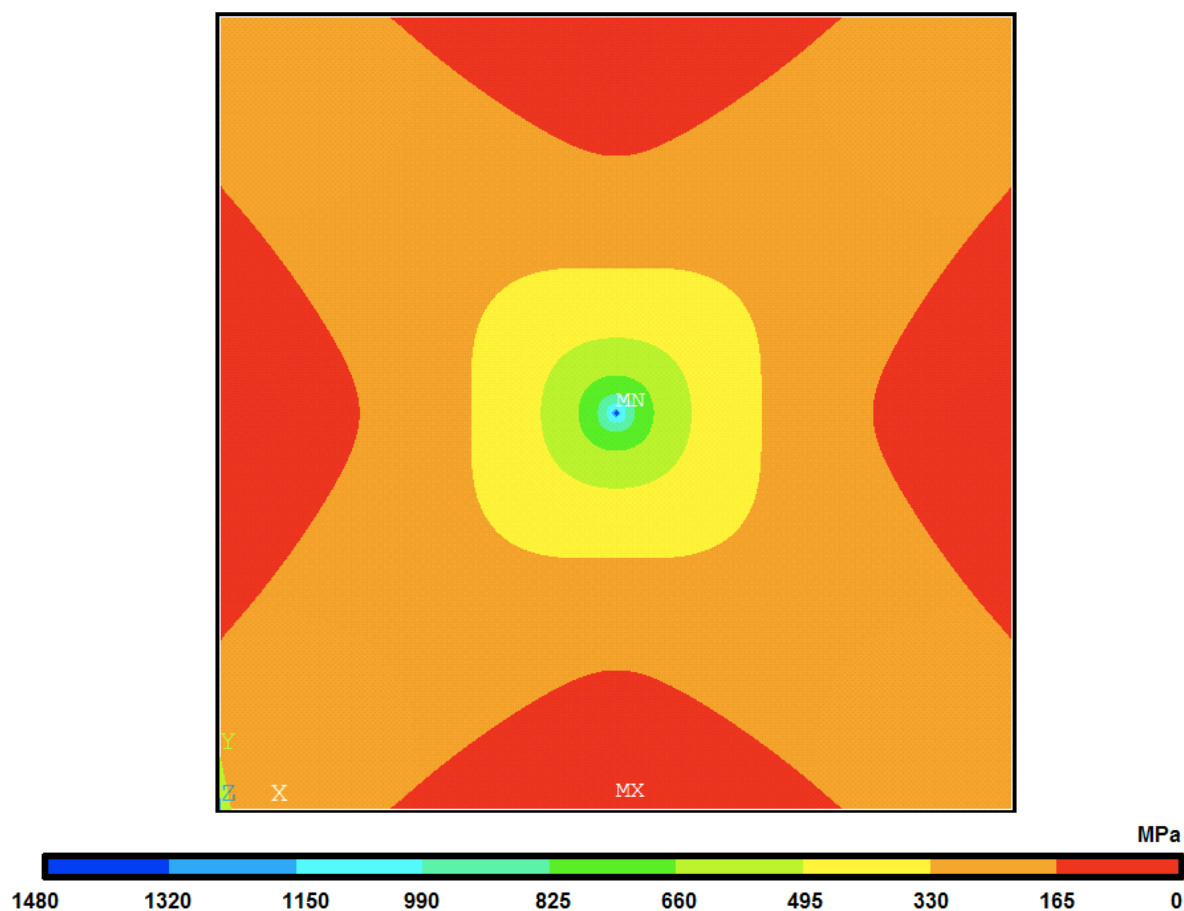


Figura 27 - Distribuição de tensão principal na placa de carbeto de silício

Em ambos os casos os componentes falharam ao carregamento aplicado, seguindo os critérios de falha descritos, porém como o modelo elaborado aborda uma análise dinâmica linear, a parcela de deformação plástica do material não foi considerada. De acordo com a Figura 28, a área abaixo da curva vermelha entre os pontos A e C representa a energia absorvida por um material dúctil antes da ruptura devido à deformação elástica, já a segunda área, abaixo da mesma curva, porém entre os pontos C e C', é a parcela de energia absorvida devido à deformação plástica. Enquanto isso a área abaixo da curva azul, entre os pontos A e C representa a parcela de energia absorvida durante a deformação elástica para um material frágil.

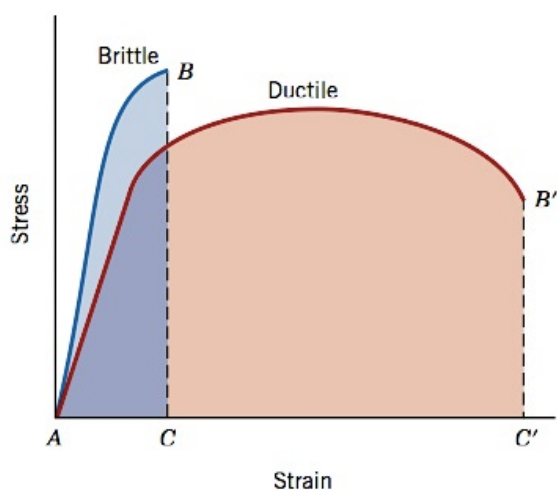


Figura 28 – Curvas tensão x deformação para materiais dúcteis e frágeis

Fonte: Callister, Jr, 2007

É elementar observar a grande quantidade de energia que não foi considerada no modelo da placa de Policarbonato, material dúctil, o que leva a um resultado de coeficiente de segurança muito menor do que 1. Já um material frágil, que sempre fratura antes de que haja qualquer deformação plástica em resposta a uma carga imposta (CALLISTER JR., 2007), pode ser observado que o valor de CS foi mais elevado do que para o caso de um material dúctil, neste caso há outras simplificações que tem um efeito mais considerável no resultado, como por exemplo a ausência de vibração da estrutura durante impacto e a conservação da energia cinética do projétil.

4 CONCLUSÕES

A base de conhecimentos necessários para o desenvolvimento das atividades foi estabelecida através da revisão bibliográfica, o que permitiu o prosseguimento das etapas seguintes. A revisão bibliográfica foi realizada de forma a priorizar as obras e autores de destaque no assunto, como Reddy (1997) e Mendonça (2005).

O modelo de elementos finitos proposto no trabalho pode ser considerado eficaz, porém insuficiente para o estudo do caso. Sua eficácia pode ser avaliada pela convergência dos dados, que quando comparados com a solução analítica apresentaram valores de erro percentual dentro de uma faixa admissível, e um valor de erro muito pequeno no caso de um modelo estático de elementos finitos, realizado para comparação com a solução analítica.

Entretanto, o modelo é insuficiente, pois realiza apenas uma análise elástico-linear da placa, a qual se prova eficiente apenas em casos onde se tem pequenos valores de deslocamento, o que não ocorreu nesse trabalho. Em vez disso, para a completa modelagem do problema, a formulação mais adequada deveria ser de caráter não-linear, considerando também as deformações plásticas decorrentes.

Devido às limitações do modelo de elementos finitos, não se pode afirmar que cada placa suportará ou não ao carregamento previsto, devido aos efeitos que não foram levados em conta no modelo e que têm influência comprovada no resultado. Porém, são questões a serem exploradas em trabalhos futuros, onde o modelo de elementos finitos deve ser aprimorado para realizar análises não-lineares e plásticas da estrutura.

É possível perceber a diferença resultante entre a aplicação do modelo usado nesse trabalho em casos de materiais dúcteis e materiais frágeis. A mínima presença de deformações plásticas antes da ruptura dos últimos implica num coeficiente de segurança mais próximo da unidade, comparado com um material dúctil.

Outro aspecto que já foi abordado neste trabalho e pode ainda ser melhorado é o caráter dinâmico da força de impacto atuante, foi considerado no modelo apenas o comportamento dinâmico da força durante o tempo de contato, mas há

consequências disso que devem ser levadas em conta, como por exemplo a vibração da estrutura. Decorrente da falta de informação sobre a variação da força durante o impacto, foi assumido um comportamento do tipo “rampa” nos instantes iniciais e depois um valor constante, isso é outro aspecto que pode ser reavaliado.

Sendo assim, com base nas informações que foram levantadas na revisão bibliográfica, tanto para os materiais estudados quanto para os modelos a serem utilizados, foi possível criar um modelo para a resolução da situação-problema proposta, que mostrou eficácia ao analisar os resultados obtidos. No entanto, o modelo adotado não foi suficientemente robusto para a resolução do problema e apresenta pontos de melhoria que podem ser abordados em trabalhos futuros de modo a se obter um resultado mais próximo da situação-problema real.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15000, **Norma do Exército Brasileiro**. Exército Brasileiro, Rio de Janeiro, 2005.

ACCURATUS, Ceramic Corporation. **Silicon Carbide Datasheet**, disponível em: <<http://accuratus.com/pdf/sicprops.pdf>>. Acesso em: 09/02/2013

ASSAN, Aloisio. E. **Método dos Elementos Finitos – Primeiros Passos**, Ed. Unicamp, Campinas, 2003.

BARSOUM, Michel W. **Fundamentals of Ceramics**, McGraw Hill, Nova York, 2003.

BEER, Ferdinand Pierre; JOHNSTON JR., E. Russell. **Resistência dos materiais**. 3. ed. São Paulo, SP: Makron, c1995.

BELTRÃO, Marilia S.S. **Sinterização em estado sólido do carbeto de silício em presença de carbeto de boro, carbono e zircônia**. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PEMM), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

COOK, Robert D. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. John Wiley and Sons, Madison, 1990.

CALLISTER JR. , William **Materials Science and engineering: an introduction**, 7^a ed., LTC, Nova Iorque, 2007.

CANEVAROLO JR., Sebastião V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros** 2^a ed. rev. e atual, São Paulo: Artliber, 2002.

DIN EM 1063, **Ballistic Resistant Materials**, Deutsches Institut für Normung, Berlim, 2000.

HALL, Christopher. **Polymermaterials** 2nd ed, Nova Iorque, 1990.

HUEBNER, Michael. **Material selection for mechanical seals**. Proceedings of the twenty second international symposium, pp 127-135,2005.

IZHEVESKYI, V.A., GENOVA, L.A., BRESSIANI, J.C.. **Reviewarticle: Silicon Carbide. Structure, Properties and Processing.** Cerâmica v. 46, 297, pp 1-34, São Paulo, 2000.

LAWRENCE, Kent L. **ANSYS® Tutorial - Release 11.0**, University of Texas in Arlington, 2012.

MANO, Eloisa Biasotto. **Introdução a polímeros**. 5.reimpr. São Paulo: Edgard Blucher, 1994.

MENDOÇA, Paulo de Tarso R. **Materiais compostos e estruturas-sanduiche: projeto e análise**. 1. Ed. Barueri: Manole, 2005.

NIJ 0108.01, **Ballistic Resistant Protective Materials**.U.S. Department of Justice, Washington DC, 1985.

PEREIRA, José Carlos. **Curso de projeto estrutural com materiais compostos**. Apostila do curso de Engenharia Mecânica. Florianópolis: UFSC, 2003.

REDDY, Junuthula N. **Finite element analysis of composite laminates**.Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992.

SARTURI, Francis D.M. **Modelagem numérica de uma placa laminada utilizada em blindagem anti-projétil**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

SHACKELFORD, James F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2008

SILVA, Cristiane E.R. **Processamento de carbetos de silício ligado por reação**. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PEMM), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SILVA, Rodrigo P. **Estudo do processamento e microestrutura do carbetos de silício ligado por reação**. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SOUZA, Sergio de. **Blindagem de Carros: Materiais para o seu carro blindado**. disponível em: <<http://hypescience.com/25614-blindagem-carros-carro-blindado/>>.

SZILARD, Rudolph, **Theories and applications of plate analysis: classical, numerical and engineering methods**. John Wiley & Sons, New Jersey, 2004.

WÉBER, Ricardo Pondé. **Comportamento mecânico e balístico de um compósito laminado de policarbonato**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2004.

APÊNDICE A – ARTIGO

DYNAMIC ANALYSIS OF PLATES USED IN ANTI-PROJECTILE ARMORS

CZEZACKI, Lucas Koteski

BELO, Ivan Moura

Federal Technological University of Paraná (UTFPR)

Sete de Setembro Avenue, 3165, Curitiba – Paraná - Brazil

lucaskcze@gmail.com

ivanbelo@utfpr.edu.br

***Abstract:** In the present work the simulation and comparison, via Finite Elements Method, of anti-projectile armors mechanical behavior under the impact of a projectile is made. The analyzed shields are classified in different levels of the American standard NIJ 0108.01. Studies in this field were searched and were evaluated two works regarding this issue, the first one had an experimental nature, and the other one is a numerical simulation of the projectile's impact on an armor. The last one uses a static method to analyze the armor's behavior. In order to analyze and compare the found results, in the present work computational simulations using the linear dynamic model of impact at the armors will be carried out, for this, the ANSYS software is be used.*

Keywords: Armors, Ceramic materials, Finite elements method, Laminated composites.

1. INTRODUCTION

With the recent violence rising in almost every urban center in the world, citizens search for alternatives to increase their relatives safety, using for this investments in personal, buildings and automotive protection devices. Just like every other product in the market, these devices must be certified by regulatory standards, in the case of anti-projectile armors sold in Brazil, the responsible organ for the certification is the Brazilian Army and the Brazilian Technical Codes Association (ABNT).

The mechanical analysis of these kinds of devices are made, mostly, with destructive tests, thus the component is not proper for use after the test. For the materials selection and design, most of the times, the engineer will not have easy access to such tests, which can delay the component project. In order to reduce the quantity of destructive tests, the numerical and computational solution methods are a good alternative for the design team analyze the component behavior under various types of mechanical solicitations, even before its manufacturing process begin.

One particular type of anti-projectile are the transparent armors, used to protect glasses of vehicles, which are made from a combination of plates of Polycarbonate used together with the common material, glass. There are combinations of glass and Polycarbonate that can be used in specific cases. The arrangements of these materials are performed to assure that a large amount of the impact energy is absorbed by the Polycarbonate layer, due to its high resilience, which helps increasing the resistance of the composite, when compared to the plate made only of glass. Wéber (2004) raised the mechanical and ballistic behavior of a sample of protection shield constructed in the following configuration: three layers of polycarbonate united by a Polyurethane film, for this it was performed a test of projectile shooting against the plate, using as reference the data present in the American standard NIJ 0108.01.

On a research of the choices offered by security equipment factories, another material that is used in automotive armors was raised, the Silicon Carbide, it is a different type of armor, because it is not transparent, so it is used in other parts of the car. In the case of a ceramic plate, a brittle material, it is used behind the metallic parts of the car, in such a configuration that a large amount of the projectile impact energy is absorbed by the bodywork and, if it is able to pass through, the projectile will not pass the ceramic armor, thus keeping the important parts of the car safe. Due to the manufacturing process of this plate, sintering from the powdered carbide, its mechanical properties are very important for this application: high Young modulus, hardness and thermal conductivity, and the most important, these properties are not affected in temperatures up to 1600° C, but as a ceramic material it has a low fracture toughness (SILVA, 2008).

The present work analyses the behavior of shields made of Polycarbonate composite and Silicon Carbide, which are classified in different levels of the American standard NIJ 0108.01 used as automotive armors. The

first one is classified as NIJ level I, and the second, NIJ level III, The results are compared to a static analytical solution proposed by Szilard (2004), such as performed by Sarturi (2011), that raised a static numerical solution via finite elements method for modeling the impact test made by Wéber (2004) on the Polycarbonate plate sample for the mechanical and ballistic behavior raise.

2. SIMULATION PARAMETERS DEFINITION

2.1 American standard NIJ 0108.01

This standard was created by the United States National Institute of Justice and rules the armors materials for the Latin America countries, by the way, the Brazilian Army and the Brazilian Technical Codes Association use this standard as a basis for their certifications. According to NIJ 0108.01, the materials are classified in six groups, as shown in Tab. 1.

Table 1. Ballistic levels according to NIJ 0108.01

Ballistic Level	Caliber	Projectile Mass (g)	Shooting speed (m/s)
I	.22 Caliber LR/LRN	2.6 ± 0.1	329
II-A	9mm FMJ/RN	8.0 ± 0.1	341
	.40 S&W FMJ	11.7 ± 0.1	322
II	9mm FMJ/RN	8.0 ± 0.1	367
	357 Magnum JSP	10.2 ± 0.1	436
III-A	9mm FMJ/RN	8.0 ± 0.1	436
	44 Magnum SJHP	15.6 ± 0.1	436
III	7.62x51 NATO FMJ	9.6 ± 0.1	847
IV	.30 Caliber M2 AP	10.8 ± 0.1	878

2.2 Impact force modeling

The dynamic behavior of the impact force is approximated by a ramped load starting in zero when $t=0$ and reaching its peak value when $t=0.1s$ and then maintaining this value until the end of contact, $t=0.5s$. For the maximum force value obtained, the method proposed by Beer and Johnston (1995) is used. According to the method, when a moving body with mass m and velocity v_0 reaches another body, the first one imposes an impact load to the second one. For the following deductions, two hypothesis must be carried out:

- I. The energy is preserved during the impact;
- II. The second body inertia in comparison to the moving body's must be scorned.

The equivalent static load for the impact is obtained by equaling the projectile kinetic energy (U_m) before impact to the plate maximal displacement work:

$$U_m = \frac{1}{2}mv_0^2 = U_d = P_m w_m$$

(1)

where P_m is the equivalent static load and w_m is the maximal plate displacement due to the impact.

According to Mendonça (2005), the maximal displacement of a square plate simply supported and subject to a concentrated load can be evaluated as:

$$w_m = \frac{0.0116P_m a^2}{D}$$

(2)

where a is the side dimension of the plate and D flexural rigidity modulus, that is given by the following equation:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

(3)

where h is the plate thickness, E is the material Young modulus and ν is the Poisson coefficient. Rearranging the equations (1) to (3), there is a final expression for the equivalent static load due to a dynamic impact:

$$P_m = \frac{9.28v_0}{a} \sqrt{mD}$$

(4)

2.3 Mechanical properties of Polycarbonate and Silicon Carbide plates

The necessary mechanical properties for the simulations execution are: the dimensions of the plates, the Young modulus, Poisson coefficient and material density, this last one is necessary for the dynamic model calculation, required by the software ANSYS. For both plates, the properties are shown in Tab. 2. It is important to mention that the Polycarbonate plate is consisted of three layers of the material, each one 4.23mm thick, as the sample used by Wéber (2004).

Table 2. Mechanical properties of Polycarbonate and Silicon Carbide plates

Material	Side dimension (mm)	Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Young modulus (GPa)	Poisson coefficient
Polycarbonate	300	12.69	1200	1.585	0.37
Silicon Carbide	300	12.69	3100	424	0.14

3. SIMULATIONS AND RESULTS

In order to obtain the force value resulting in each case of impact, the data available in Tables 1 and 2 were used in equations (3) and (4), known that the Polycarbonate plate is classified in Level I by the NIJ 0108.01 standard, and the Silicon Carbide in Level III. The impact force values for the plates are 14,33 kN and 697,5 kN, respectively.

The finite elements simulations were performed considering the following grids: 2x2, 4x4, 8x8, 16x16, 32x32, 64x64 and 128x128 elements, for the contour conditions, the plate was considered simply supported at all sides. The element chosen for performing the analysis were the SHELL elements available in ANSYS software. For the model of the Silicon Carbide shield, it was chosen the element SHELL63, a four sided element, bidimensional, with four nodes and six degrees of freedom in each node (rotation and translation in X, Y and Z directions). As the polycarbonate plate is made of a composite layered material, it was necessary to use a different kind of element, SHELL99, which is very similar to the previous, despite the fact that it has eight nodes with six degrees of freedom at each one and additionally, this element allows the creation of layers of material in its thickness direction, this last feature helps the representation of the three layers that compound the plate.

The results of maximal plate displacement were compared to a static analytical solution proposed by Szilard (2004) for a plate simply supported at all sides subject to a concentrated load. The values of displacement for each grid configuration are shown in Tables 3 and 4 and the model convergence in comparison to the analytical solution is represented in Figs. 1 and 2.

Table 3. Displacement values for the Polycarbonate Plate

Model	Analytical solution	2x2	4x4	8x8	16x16	32x32	64x64	128x128
Displacement (mm)	42.100	51.812	49.965	48.549	47.685	47.104	47.066	47.054
Percentage error (%)	0	23.07	18.68	15.31	13.26	11.88	11.79	11.76

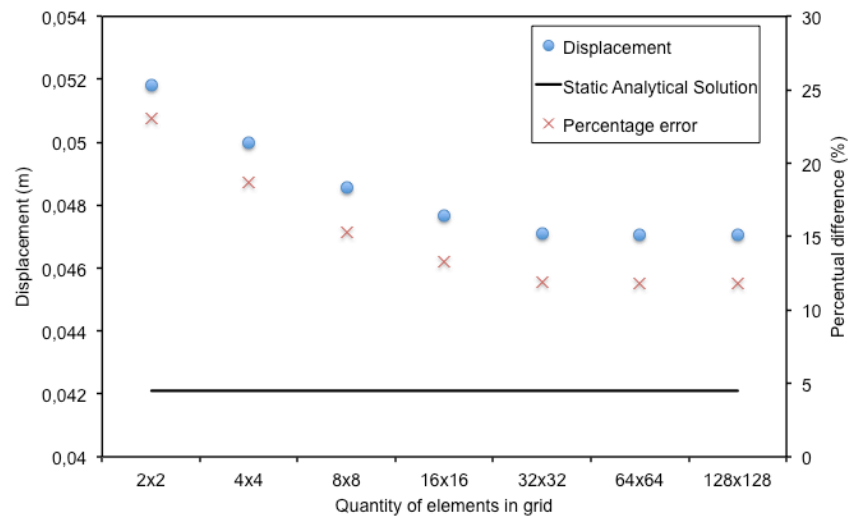


Figure 1. Model converging for the Polycarbonate plate

It is possible to notice that the values obtained for the plate maximum displacement are converging to 47 mm, due to the minimal reduce of the percentage error in comparison to the static analytical solution. The best value of error obtained in the elements grid configuration is 11.76%, it is relatively a large difference to the analytical solution, but not at all if it is considered that there are effects of the dynamic nature of the load in this analysis.

Table 4. Displacement values for the Silicon Carbide Plate

Model	Analytical solution	2x2	4x4	8x8	16x16	32x32	64x64	128x128
Displacement (mm)	8.700	11.048	10.261	10.005	9.926	9.901	9.894	9,892
Percentage error (%)	0	26.99	17.94	15.00	14.09	13.80	13.72	13.70

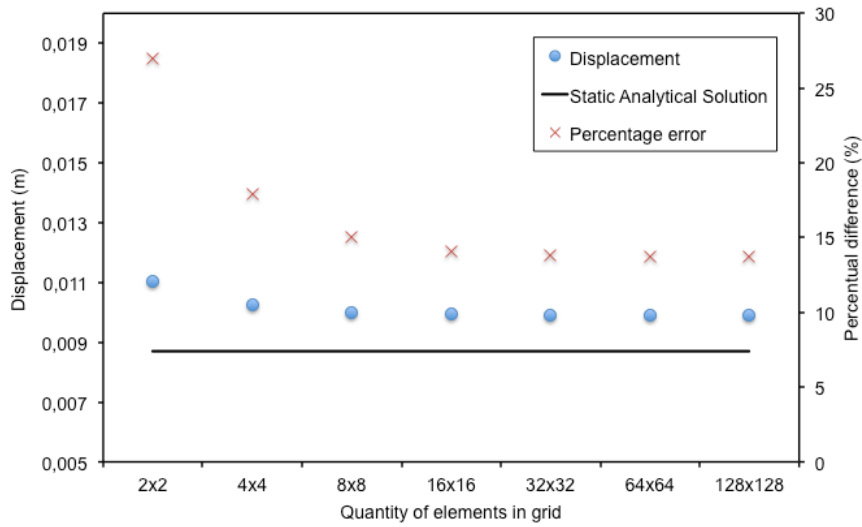


Figure 2. Model converging for the Silicon Carbide plate

The same behavior of the percentage error can be noticed at the simulations performed for the Silicon Carbide plate, but there is a difference compared to the previous case, the percentual error showed a tendency to stabilize in a previous grid configuration (16x16). The best value of error obtained in the elements grid configuration is 13.70%, again it is a relatively large value, although the dynamic nature of the load contributes for this difference to the static solution.

For both cases, it is also chosen an appropriate failure criteria to evaluate the resistance of the plate to the impact force. For the polycarbonate plate, Von Mises criteria is carried out, due to the fact it is a ductile material, and for the silicon carbide one the adopted criteria is Rankine, for brittle materials.

According to the Von Mises criteria, a structural component is in safety conditions while the higher distortion energy per volume does not exceed the value of the same energy necessary to cause the material yielding during a uniaxial tractive test (BEER, 1995). The safety coefficient allows the evaluation of the component resistance, according to:

$$SC = \frac{\sigma_y}{\sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}} \quad (5)$$

The Rankine failure criteria is also known as the Maximal Normal Strength Criteria, according to it, a brittle material is in safety conditions when its maximal normal strength value is not higher than the material break strength during the uniaxial tractive test (BEER, 1995). For this case, the safety coefficient is represented by:

$$SC = \frac{\sigma_b}{|\sigma_1|} \quad (6)$$

or

$$SC = \frac{\sigma_b}{|\sigma_2|} \quad (7)$$

To assure the material resistance, the value of the SC must be equal or superior to 1, if it is minor than this, it is said that the material failed. For the polycarbonate plate, known that the yield strength (σ_y) value is 65 MPa and that the strengths σ_1 and σ_2 are 212 MPa, the obtained value for SC is 0.09. At the silicon carbide plate case, the break strength of the material (σ_b) is 550 MPa and both values of σ_1 and σ_2 are 1480 MPa, thus the safety coefficient value obtained for this case is 0.37.

In both cases, the components have failed to the loads, but as the work is focused on a linear dynamic analysis, the plastic strain that was not considered in the model. According to the Fig. 3, the area under the red curve between A and C is the energy absorbed by a ductile material before the break due to the elastic strain, and the second area, C to C', represents the energy absorbed due to the plastic strain. The elastic strain energy for brittle material is represented by the area above the blue curve, between the points A and C.

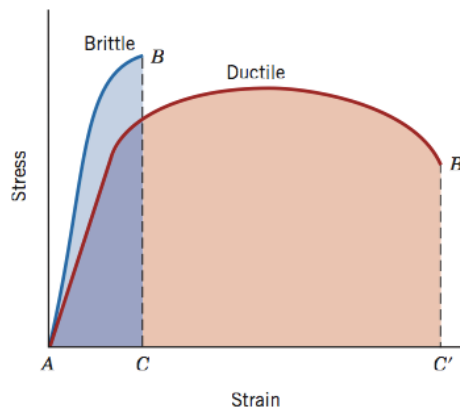


Figure 3. Strength-strain diagram generic ductile and brittle materials

It is clear that a large amount of energy strain was not considered in the model, this is the reason why the safety coefficient for the polycarbonate plate was much minor than 1. Otherwise, for the silicon carbide plate, that is a brittle material, the value of SC obtained was higher than the polycarbonate due to the inexistence of plastic strain before the material break, in this case, there are other simplifications that affected the result, for example, the absence of vibration during the impact, the projectile kinetic energy conservation.

4. CONCLUSIONS

The finite elements model proposed on the work is considered effective, but not sufficient for the case. Its effectiveness can be evaluated by the convergence of the data and an expected percentage error when compared to a static analytical solution. However, the model is not sufficient, because of the elastic-linear analysis that is performed, and not a complete non-linear analysis, that considers both elastic and plastic strains.

Regarding the model limitations, it cannot be assumed if the plates can resist to the load or not, due to effects that were not considered and have contribution to the result, as discussed in the previous session. This is a question that might be explored in future works, where the model can be improved, in order to consider the plastic strains in the structure.

Another aspect already considered in this work that can be improved is the dynamic character of the load, it was considered just the force behavior during the impact, but there are consequences of this model that must be also carried on, for example the structure vibration. Due to the lack of information about the variation of the force during the impact, it was assumed the ramped behavior in the initial instants, and then a constant value, this can be also reevaluated, in order to obtain a more accurate result.

5. REFERENCES

- BEER, Ferdinand Pierre; JOHNSTON JR., E. Russell, 1995. *Resistência dos materiais*. 3. ed. São Paulo, SP: Makron, c1995.
- MENDONÇA, Paulo de Tarso R., 2005. *Materiais compostos e estruturas-sanduiche: projeto e análise*. 1. Ed. Barueri: Manole.
- SARTURI, Francis D.M. *Modelagem numérica de uma placa laminada utilizada em blindagem anti-projétil*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.
- SILVA, Cristiane E.R. *Processamento de carbeto de silício ligado por reação*. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PEMM), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- SILVA, Rodrigo P. *Estudo do processamento e microestrutura do carbeto de silício ligado por reação*. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- SZILARD, Rudolph., 2004. *Theories and applications of plate analysis: classical, numerical, and engineering methods*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- WÉBER, Ricardo Pondé. *Comportamento mecânico e balístico de um compósito laminado de policarbonato*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2004

6. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.