

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UM ESTUDO DA DISSIPAÇÃO DE ENERGIA EM MATERIAIS CERÂMICOS SUBMETIDO A
IMPACTO UTILIZANDO A BARRA DE HOPKINSON

por

Guilherme Augusto Jacometo

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho de 2018.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

UM ESTUDO DA DISSIPAÇÃO DE ENERGIA EM MATERIAIS CERÂMICOS SUBMETIDO A
IMPACTO UTILIZANDO A BARRA DE HOPKINSON

por

Guilherme Augusto Jacometo

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler

Comissão de Avaliação:

Prof. Daniel De Leon

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Rogério José Marczak

Porto Alegre, Junho de 2018.

AGRADECIMENTOS

Sou grato aos meus pais, Everson e Janaina e aos meus irmãos por me darem suporte e por possibilitarem esta caminhada evolutiva que é a vida. Vocês me deram forças nos momentos em que mais precisei.

Aos meus compatriotas da República do Chai, Glauco, Lemos, Utz e William que são alicerce do meu desenvolvimento pessoal. Obrigado pelo companheirismo, pelos concelhos, pelas conversas amigas sempre acompanhadas de um bom chá e pelas partidas de Age.

Ao glorioso grupo (perfeito e alado), que me acompanhou durante toda esta jornada acadêmica. Querol, Dani e Laura: quero que saibam que meus dias foram mais iluminados e doces na presença de vocês.

Ao professor Jakson, por aceitar e acreditar na orientação e desenvolvimento deste trabalho. E ao GMAp, por me fornecer a estrutura necessária.

Ao todo, por imaginar.

JACOMETO, G. A. **Um estudo da dissipação de energia em materiais cerâmicos submetidos à impacto utilizando a barra de Hopkinson.** 2018. 18p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma metodologia para avaliar, quantitativamente, a resposta mecânica de diferentes teores de alumina usada em blindagem balística. A fim de avaliar essa resposta, foram conduzidos ensaios mecânicos a alta taxa de deformação utilizando o aparato Barra de Hopkinson que, por concepção, excita ondas compressivas longitudinais. Foram avaliados três teores de alumina (90, 96 e 99%), ensaiando-se cinco corpos de prova para cada teor. A metodologia empregada baseia-se na relação entre as áreas dos pulsos incidente, refletido e transmitido e, através de um parâmetro de percentual dissipado, avalia-se a resposta mecânica entre os diferentes teores estudados. Os resultados levam a conclusão de que, frente a ondas compressivas longitudinais geradas pelo ensaio, não há diferença de capacidade de absorção. Além disso, uma avaliação visual foi feita sobre os corpos de prova depois de fragmentados pelo ensaio. Os três teores apresentaram uma pequena diferença nos fragmentos entre si.

PALAVRAS-CHAVE: cerâmica, balística, barra de Hopkinson.

JACOMETO, G. A. **A study of energy dissipation in ceramics submitted to the impact using the split-Hopkinson pressure bar.** 2018. 18p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

The present work presents a methodology to evaluate, quantitatively, the mechanical response of different levels of alumina used in ballistic shielding. In order to evaluate this response, high strain rate mechanical tests were conducted using the Hopkinson Bar apparatus which, by design, excites longitudinal compressive waves. Three levels of alumina were evaluated (90, 96 and 99%), and five specimens were tested for each content. The methodology used is based on the relation between the areas of the incident, reflected and transmitted pulses and, through a parameter of percentage dissipated, the mechanical response between the different contents is evaluated. The results lead to the conclusion that, under influence of longitudinal compressive waves generated by the test, there is no difference in absorption capacity. In addition, a visual evaluation was made on the specimens after being fragmented by the assay. The three contents presented a small difference in the fragments between them.

KEYWORDS: ceramic, ballistics, split-hopkinson pressure bar.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo.....	1
2. BLINDAGEM CERÂMICA.....	2
2.1 Mecanismos de Dissipação de Energia por Blindagem Cerâmica	3
3. ENSAIO DE ALTA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO	5
3.1 A Barra de Hopkinson	6
4. MATERIAIS E MÉTODO	8
4.1 Materiais	8
4.2 Método.....	9
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	12
6. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APÊNDICE A	16

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Impacto de um projétil em um cerâmico (Santos, 2016).	3
Figura 2.2 - Impacto de um corpo balístico em um alvo cerâmico (Santos, 2016).	4
Figura 2.3 – Vista frontal da pastilha cerâmica (evidenciando tipos de falha, pulverização no centro e fraturas radiais e circulares adjacentes) após impacto balístico (Da Silva, 2013).	4
Figura 2.4 - Geometrias das pontas dos projéteis: da esquerda para a direita, hemisférica, cônica, cônica com ponta cortada, ogival e ogival com ponta cortada (Sasikumar e Sundareswaran, 2011).	5
Figura 3.1 - Faixa de taxa de deformação aplicável aos diferentes métodos de ensaios mecânicos (Hiermaier, 2007).	6
Figura 3.2 - Esquema simplificado do aparato Barra de Hopkinson (Pinto, 2009).	6
Figura 3.3 - Propagação do pulso de tensão pelas barras no tempo (a) e pulso típico capturado pelos <i>strain gauges</i> pelo tempo, tensão elétrica por tempo (b) (Ramesh, 2008).	7
Figura 3.4 - Esquema do aparato modificado da Barra de Hopkinson para aplicação balística (Pinto, 2009).	8
Figura 4.1 - Corpos de prova (CP) cerâmicos, da direita para a esquerda, com teores de 90, 96 e 99% de alumina.	8
Figura 4.2 - Aparato barra de Hopkinson no laboratório do GMAp.	9
Figura 4.3 - Arma de gás comprimido com disparo por válvula solenoide.	9
Figura 4.4 - Corpo de prova posicionado entre as barras incidentes de transmitida.	10
Figura 4.5 - Amplificadores/condicionadores de sinal para <i>strain gauges</i> e módulos de aquisição de dados.	10
Figura 4.6 - Esquema das regiões onde foram integradas para cálculo das áreas incidente, refletida e transmitida.	11
Figura 5.1 - Gráfico caixa estreita comparando os resultados para cada teor de alumina.	13
Figura 5.2 - Amostras quebradas após ensaio. 90% (a), 96% (b) e 99% (c).	13
Figura A.1 – Pulsos dos três ensaios realizados sem corpo de prova (barra-barra).	16
Figura A.2 – Pulsos dos ensaios dos cinco corpos de prova para o teor de 90%.	17
Figura A.3 – Pulsos dos ensaios dos cinco corpos de prova para o teor de 96%.	18
Figura A.4 – Pulsos dos ensaios dos cinco corpos de prova para o teor de 99%.	18

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1 - Propriedade do material e seu efeito no desempenho balístico (Da Silva <i>et al.</i> , 2014).....	2
Tabela 5.1 - Valores de áreas e percentual de dissipação para o teor de 90%.	12
Tabela 5.2 - Valores de áreas e percentual de dissipação para o teor de 96%.	12
Tabela 5.3 - Valores de áreas e percentual de dissipação para o teor de 99%.	12
Tabela A.1 - Valores das áreas e percentual de dissipação efetuado o impacto barra-barra....	16
Tabela A.2 - Resultados sem tratamento de <i>outliers</i> para o teor de 99% de alumina.	17

1. INTRODUÇÃO

Tanto a indústria bélica quanto pesquisadores têm demonstrado grande interesse no desenvolvimento de melhorias em sistemas de blindagem militar e pessoal contra quaisquer tipos de ameaças. Geralmente, a blindagem visa proteger a integridade de um bem ou da vida humana contra impactos oriundos de projéteis a altas velocidades. A eficiência da blindagem está diretamente atrelada à sua capacidade de absorver e/ou dissipar a energia gerada durante o impacto, garantindo a integridade do alvo protegido a qualquer custo. Dentre os materiais mais comuns para tal aplicação estão as malhas de aramida, materiais cerâmicos tais como alumina, carbetos de silício, carbetos de boro, metais e compósitos produzidos de diversas matrizes (Da Silva *et al.*, 2014). A seleção dos materiais de blindagem bem como combinações entre eles, geralmente, depende de suas aplicações.

A norma brasileira ABNT NBR 15000 apresenta uma classificação segundo uma escala para os níveis de proteção contra projéteis de diferentes calibres, pois se sabe que a energia cinética do projétil depende de sua massa e velocidade. Para armas pequenas, por exemplo, pistolas calibre 9mm, exigem uma proteção macia, materiais como Kevlar®. Já para calibres maiores e de maior massa tais como rifles, exigem uma proteção rígida, geralmente fabricada de compósitos de matriz cerâmica (Haro *et al.*, 2016). Logo, projetos mais eficientes do ponto de vista de absorção de energia dependem da escolha apropriada dos materiais empregados na blindagem.

Uma das formas de propor melhorias em sistemas de blindagens é o uso de materiais mais aptos na absorção e/ou na dissipação de energia. Materiais cerâmicos vêm sendo muito utilizados em aplicações balísticas em coletes, veículos, aeronaves e satélites devido a sua baixa massa específica (Da Silva *et al.*, 2014). O desenvolvimento destes materiais, bem como seu processo de fabricação, tem sido tema de pesquisa na área de engenharia de materiais, pois podem ter sua composição manipulada de forma a melhorar suas características frente a impacto. Um ponto que tem sido muito especulado é o percentual de alumina em sua composição, que, em teoria, poderia melhorar significativamente a absorção de energia.

A melhor forma de avaliar a capacidade de absorção de impacto são os testes experimentais. Porém, para aplicações balísticas, estes normalmente são qualitativos e não permitem avaliar apenas o material, mas sim o sistema inteiro de blindagem frente à ação de um projétil. Neste caso, os testes são feitos diretamente sobre a blindagem, com o objetivo de verificar se esta desempenha o papel protetivo, avaliando a penetração ou perfuração do projétil e, quando possível, avaliando a energia entregue a blindagem. A resposta deste tipo de teste é altamente dependente da geometria da blindagem e do projétil, não sendo possível avaliar exclusivamente o material frente um único mecanismo de falha (como nos ensaios estáticos), que absorveria/dissiparia, em teoria, parte da energia de impacto.

Assim, quando se trata da obtenção de informações relacionadas exclusivamente ao comportamento de um determinado material sob a ação de uma carga de impacto, a avaliação não é trivial e não existem ferramentas quantitativas consolidadas para esta análise. Vale destacar que propriedades mecânicas em eventos dinâmicos podem ser muito diferentes dos obtidos de forma estática devido os mecanismos de deformação e falha que são excitados. Portanto, metodologias experimentais que venham a fornecer informações úteis para o seu desenvolvimento de novos materiais são de grande importância nesta área.

1.1 Objetivo

Neste trabalho, o objetivo principal é estudar e desenvolver uma metodologia experimental capaz de fornecer informações quantitativas sobre a capacidade que um material cerâmico tem de dissipar energia de impacto, de forma a auxiliar no desenvolvimento de novos materiais que teria por finalidade ser implantado em sistemas de blindagem balística.

Além disso, propõe-se usar desta metodologia para avaliar, quantitativamente, a suposição que diferentes teores de alumina na composição do cerâmico poderiam ser benéficos na dissipação de energia. Nesta primeira abordagem, estuda-se o uso de um aparato experimental baseado na Barra de Hopkinson, que permite obter informações de comportamento de materiais submetidos a esforços uniaxiais (longitudinais) com alta taxa de deformação (impacto).

2. BLINDAGEM CERÂMICA

Há registros do uso de cerâmicos como método de blindagem para aeronaves e pessoas desde os anos 1960, que consistia em um compósito de carvão de boro ligado a fibra de vidro ou aramida, coberto por um tecido de proteção (Da Silva *et al.*, 2014). A cerâmica, quando utilizada em associação com um laminado polimérico em blindagens rígidas, tem a finalidade de aumentar a eficiência do painel balístico sem comprometer a leveza requerida (Alves *et al.*, 2010).

O material cerâmico é utilizado em situações especiais devido a sua baixa massa específica, alta resistência à compressão e alta dureza, sendo aplicado normalmente na primeira camada das combinações de materiais. Ele recebe o impacto e, através de mecanismos de dano, dissipa parte da energia cinética do projétil. A substituição de materiais metálicos por cerâmicos, além de aumentar a capacidade de blindagem, também reduziu massa do sistema, garantindo melhor autonomia e capacidade de transporte como, por exemplo, em aeronaves (Da Silva *et al.*, 2014).

A utilização desses materiais em equipamentos de proteção dá-se normalmente de modos específicos. São aplicados sob a forma de insertos – placas que são inseridas em certas partes do equipamento base. Esses insertos são, na sua generalidade, utilizados em pontos vitais do corpo humano e das estruturas dos veículos. Os materiais mais comuns utilizados para a fabricação de insertos cerâmicos nas armaduras são o carboneto de boro ou o carboneto de silício prensado a quente, uma técnica que permite dar forma ao produto final com o objetivo de melhorar a ergonomia, possibilitando um conforto maior ao utilizador. (Santos, 2016)

Apesar de os cerâmicos serem materiais frágeis, quando usados em conjugação com polímeros conseguem absorver grandes quantidades de energia devido à deformação e fragmentação que provocam no projétil. No entanto, têm a limitação de ter um número muito limitado de impactos que conseguem sustentar, uma vez que os danos causados por cada impacto nas placas são elevados. (Da Silva *et al.*, 2014)

Da Silva *et al.* (2014), também apresenta quais propriedades do material estão atreladas ao seu papel no desempenho balístico. A Tabela 2.1 mostra essa relação entre propriedade e desempenho.

Tabela 2.1 - Propriedade do material e seu efeito no desempenho balístico (Da Silva *et al.*, 2014).

Propriedade do material	Efeito no desempenho balístico
Densidade	Peso do sistema de proteção
Dureza	Dano ao projétil
Módulo de elasticidade	Propagação das ondas de tensão
Resistência mecânica	Resistência a múltiplos impactos
Tenacidade à fratura	Resistência a múltiplos impactos e durabilidade em campo
Modo de fratura (inter ou trasgranular)	Absorção de energia

Dentre os materiais mais empregados, a alumina é o material estrutural de engenharia com a melhor relação custo/benefício das cerâmicas avançadas. As matérias-primas utilizadas na produção desta cerâmica técnica de alto desempenho são de fácil disponibilidade e de custo relativamente baixo. A alumina em sua fase α (coríndon) é considerada o material de serviço por excelência da indústria da cerâmica industrial (Da Silva *et al.*, 2014). Além da fase, outra característica analisada é a porcentagem em massa de alumina presente no cerâmico. Em teoria, determinadas porcentagens de alumina poderiam ser benéficas na absorção/dissipação de energia de impacto. Da Silva (2013) estudou o processamento e propriedades como resistência mecânica, dureza de diversas amostras de alumina com formulação de 92, 96 e 99% em peso, buscando o melhor nível energético para aplicações balísticas. Ele realizou disparos em cinco placas de alumina com espessuras diferentes, que foram fabricadas com teor de 92%, suportando impactos com mais de 4000 Joules de energia cinética. O autor do trabalho sugere uma investigação sobre o desempenho dos teores de 96 e 99%, que é o tema deste estudo, mas em condições diferentes.

2.1 Mecanismos de Dissipação de Energia por Blindagem Cerâmica

Na literatura especializada, encontra-se a informação de que os principais mecanismos de dissipação de energia que ocorrem em materiais cerâmicos submetidos a impacto são a compressão de material na zona diretamente atingida pelo projétil, compressão na zona envolvente ao local de impacto, formação de fissuras radiais e anelares conduzindo a quebra por tensão de ruptura, *shear plugging*, pulverização do material cerâmico, deformação do projétil e geração de calor (Santos, 2016).

Quando um projétil colide em um alvo cerâmico com certa espessura, nota-se uma ampla zona de distribuição de carregamento logo após o impacto da ponta do projétil. Mesmo este carregamento sendo, de maneira geral, predominantemente compressivo, localmente surge tensões trativas nas regiões de concentração de tensões do material (contornos de grãos, defeitos e qualquer outro tipo de descontinuidade) que darão início a múltiplas trincas e eventualmente o pulverizará. Conforme o projétil penetra na placa, os fragmentos pulverizados do cerâmico a frente dele escoam intensamente em volta de sua ponta e, então, são ejetados ao longo de seu corpo, o que causa a erosão do projétil. (Chen e Luo, 2004). Esses fenômenos são mostrados de maneira mais detalhada nas Figuras 2.1 e 2.2 e na Figura 2.3 vê-se a vista frontal de um painel balístico após um tiro.

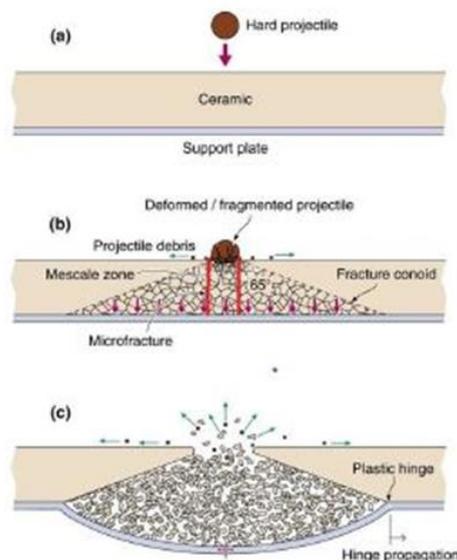


Figura 2.1 Impacto de um projétil em um cerâmico (Santos, 2016).

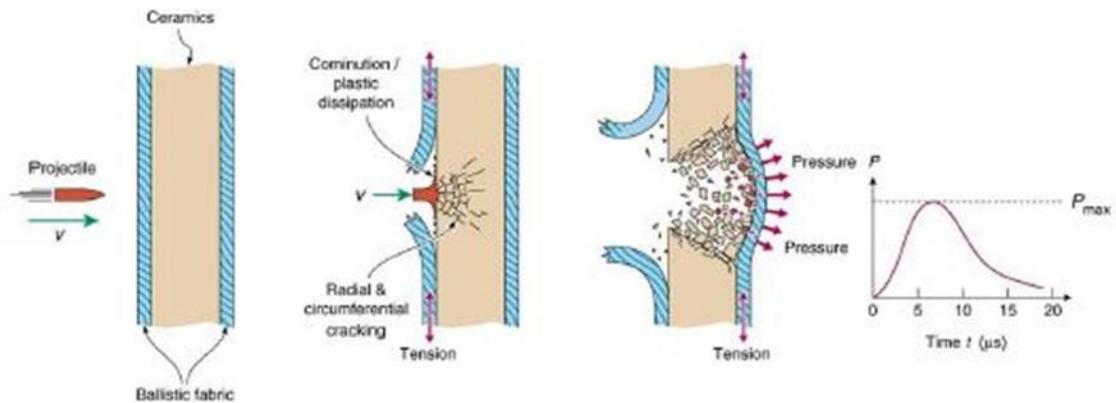


Figura 2.2 - Impacto de um corpo balístico em um alvo cerâmico (Santos, 2016).



Figura 2.3 – Vista frontal da pastilha cerâmica (evidenciando tipos de falha, pulverização no centro e fraturas radiais e circulares adjacentes) após impacto balístico (Da Silva, 2013).

Além disto, a geometria do projétil pode modificar a forma como a blindagem absorve/dissipa energia. O objetivo de um projétil é alcançar o alvo com energia suficiente para penetrá-lo e produzir o dano esperado. A energia de impacto é definida como a energia cinética do projétil ao atingir o alvo, e é mostrada na Equação (2.1)

$$E_c = 0,5 \cdot m_p \cdot v_p^2 \quad (2.1)$$

Segundo a literatura, essa energia cinética $E_c(J)$, onde $m_p(kg)$ e $v_p(m/s)$ são massa e velocidade do projétil respectivamente, é parcialmente dissipada ao realizar um trabalho sobre o alvo (Da Silva, 2013). Entretanto, além de sua massa e velocidade, a geometria do projétil também é importante quando se trata do dano causado no alvo.

Outro ponto importante na dissipação do impacto e na eficiência da blindagem, como um todo, é o fator geométrico. Sasikumar e Sundareswaran (2011) estudaram a influência do formato da ponta do projétil, Figura 2.4, sobre material compósito avaliando limite balístico, absorção de energia e as combinações de falhas causadas no material (fratura, delaminação, falha da matriz, etc.). No limite balístico, o projétil de ponta cônica cortada apresentou uma maior absorção de energia, seguido por ogival ponta cortada, hemisférica,

cônica e ogival. Isto se dá devido a maior face de contato durante o impacto. Além disso, notaram que os projéteis de ponta cônica e ogival penetraram na blindagem com menores velocidades, pois criam uma zona menor de tensão cisalhante, diferentemente das pontas cortadas que criam uma zona cisalhante ampla. A absorção de energia aumenta conforme o aumento da área danificada.

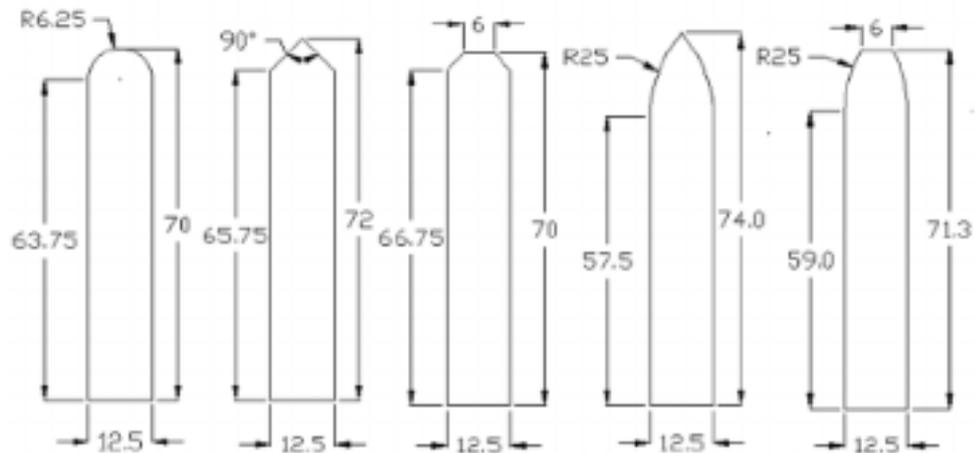


Figura 2.4 - Geometrias das pontas dos projéteis: da esquerda para a direita, hemisférica, cônica, cônica com ponta cortada, ogival e ogival com ponta cortada (Sasikumar e Sundareswaran, 2011).

Em ensaios balísticos, a avaliação do material usado na blindagem é geralmente qualitativa, avaliando não apenas a capacidade de um material específico dissipar energia, mas sim de todo o sistema. Ou seja, nestas análises, avalia-se a resposta de dissipação para a configuração da blindagem (todas as camadas, podendo haver diferentes materiais) para um tipo de projétil (geometria, massa e velocidade). Por fim, a resposta é no sentido de avaliar se ele foi capaz de desempenhar o seu papel protetivo verificando se o projétil danificou a placa testemunha que se localiza atrás da blindagem. Em ensaios com cerâmicos, por exemplo, as placas são conjugadas a uma placa de metal dúctil responsável por suportar a tensão de flexão gerada durante o impacto. Também, diversas espessuras da blindagem são testadas, o que altera propriedades importantes como rigidez da placa. Assim, fica evidente que não é trivial, em um teste balístico convencional, avaliar quantitativamente apenas um material de interesse e como mudanças específicas em sua composição podem afetar algumas características mecânicas.

3. ENSAIO DE ALTA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO

Existem vários tipos de ensaios mecânicos para obter respostas mecânicas exclusivamente de materiais submetidos a diferentes velocidades de deformação. Máquinas servohidráulicas podem realizar testes a altas taxas de deformação e, em sua maioria, trabalham em taxas na ordem de $10^0 - 10^1 \text{ s}^{-1}$, podendo ser realizados ensaios de tração, compressão e flexão. Há, também, as torres de queda, que fazem parte do grupo de máquinas especializadas. Entretanto deve-se tomar um grande cuidado na análise dos dados obtidos, pois pode ocorrer o acoplamento das ondas propagadas induzidas pelo impacto e vibrações da máquina (Ramesh, 2008). A figura 3.1 apresenta qual experimento se aplicaria a uma determinada taxa de deformação e em qual aplicação prática seria indicado.

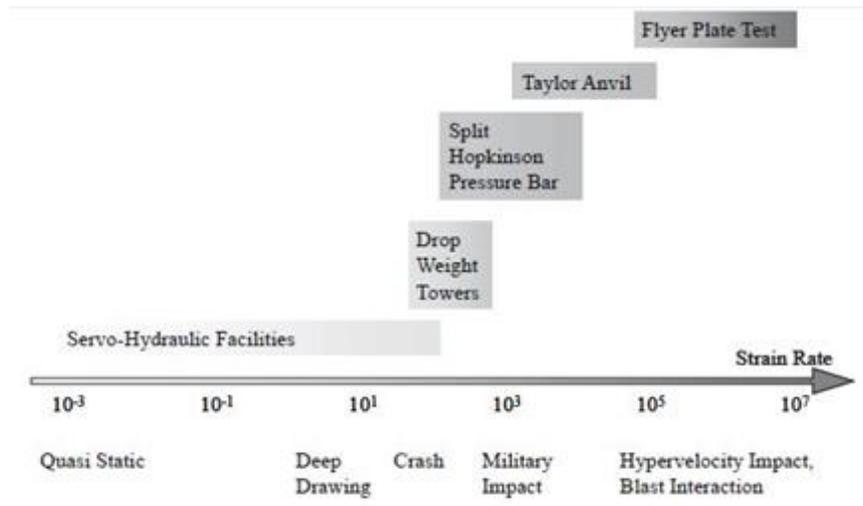


Figura 3.1 - Faixa de taxa de deformação aplicável aos diferentes métodos de ensaios mecânicos (Hiermaier, 2007).

No grupo de barras de Kolsky, encontram-se ensaios de compressão, tração e torção. A Barra de Hopkinson, que se enquadra no ensaio de compressão, é um dos aparatos experimentais que permite chegar a velocidades de deformação observada em impactos de projéteis oriundos de eventos balísticos, velocidades essas em torno de 1 a 2 quilômetros por segundo, que alcançam taxas de deformação na ordem de 10^3 a 10^5 s⁻¹ (Hiermaier, 2007).

3.1 A Barra de Hopkinson

Klosky, em 1949, desenvolveu um dispositivo para obter a resposta dinâmica do material, diferente dos até então testes convencionais em que o corpo de prova sofria o impacto direto. Em vez disso, Klosky posicionou o corpo de prova entre duas barras elásticas - chamadas barra incidente e barra transmitida - e o impacto, agora realizado de maneira externa, era aplicado na face livre da barra incidente. Este conceito é mostrado na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Esquema simplificado do aparato Barra de Hopkinson (Pinto, 2009).

Uma das versões mais conhecidas da barra de Klosky é a barra de Hopkinson, que é o dispositivo mais usado para caracterizar mecanicamente materiais submetidos à alta taxa de deformação. O aparato é composto por duas barras longas, chamadas de barra incidente e barra transmitida, fabricadas de material linear elástico com alta tensão de escoamento para garantir sua elasticidade durante o teste. O material das barras pode ser adequado ao material a ser ensaiado conforme sua ductilidade (Ramesh, 2008). O corpo de prova (CP), de formato geralmente cilíndrico, é posicionado entre as barras e alinhado ao eixo axial. A face livre da barra incidente é atingida por um projétil de igual seção transversal e mesmo material das barras (Chen e Song, 2011), gerando uma onda de choque longitudinal compressiva, que se propaga pela barra incidente, sendo transmitida através do CP para a

barra transmitida. Uma fração dessa onda pode ser refletida de volta à barra incidente, e quando ocorre é chamado pulso refletido.

A medição da onda propagada é realizada por *strain gages* que são posicionados simetricamente no comprimento médio das barras e, devido à altíssima velocidade da propagação da onda, utiliza-se um sistema de rápida taxa de aquisição de dados. Para seu funcionamento, um projétil é lançado contra a barra incidente. Este procedimento pode ser feito por uma arma de gás comprimido, onde um tanque é pressurizado e conectado a um cano. O projétil é introduzido e acelerado ao longo do mesmo quando a pressão é liberada pela abertura da válvula. Este processo gera o impacto do projétil sobre uma das faces livres da barra incidente. A Figura 3.3 apresenta a propagação do pulso devido ao impacto do projétil e o formato típico dos pulsos medidos pelos *strain gages*.

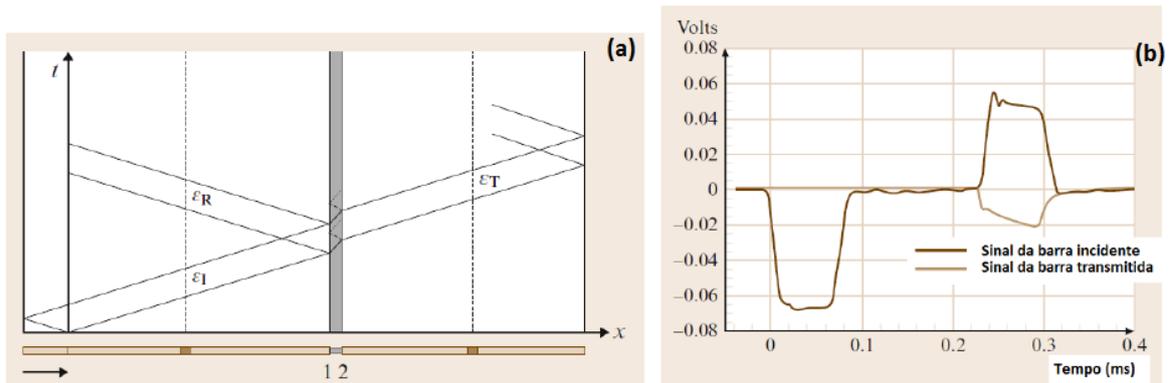


Figura 3.3 - Propagação do pulso de tensão pelas barras no tempo (a) e pulso típico capturado pelos *strain gauges* pelo tempo, tensão elétrica por tempo (b) (Ramesh, 2008).

A duração do carregamento, ou seja, a largura do pulso é proporcional ao comprimento do projétil, parâmetro esse capturado pela deformação dos *strain gauge* que está relacionado à deformação das barras conforme a onda se propaga por elas. Essa informação está diretamente associada à energia empregada no sistema pelo impacto do projétil.

A concepção original do aparato é a obtenção de uma curva real de tensão-deformação, onde para isto, no teste experimental, deve-se respeitar uma série de hipóteses de forma a poder utilizar as equações de propagação de ondas unidimensionais e, então, obtenção do histórico de tensões e deformações. Por exemplo, todos os componentes do experimento (barras, projétil e compor de prova) devem estar muito bem alinhados e concêntricos. Deve-se controlar o lançamento do projétil até a barra para garantir um impacto a velocidade constante (Chen e Song, 2011). Neste caso, a velocidade do projétil é facilmente controlada pela pressão do gás no tanque ou pela posição do projétil ao longo do cano. É preferível usar este tipo de aparato para o disparo do projétil, pois ele permite um processo controlado e de alta repetitividade.

Existem diversas propostas de modificação da barra de forma a obter a curva de tensão-deformação em diferentes materiais ou mesmo avaliar situações de teste de impacto onde a resposta de interesse não é mais a do material, mas sim do sistema. Por exemplo, existe uma Barra de Hopkinson modificada para as mesmas condições de energia cinética encontradas em situações reais de tiro por arma de fogo, que consiste em substituir a barra incidente por um projétil (Pinto, 2009). O esquema do aparato modificado é mostrado na Figura 3.4.

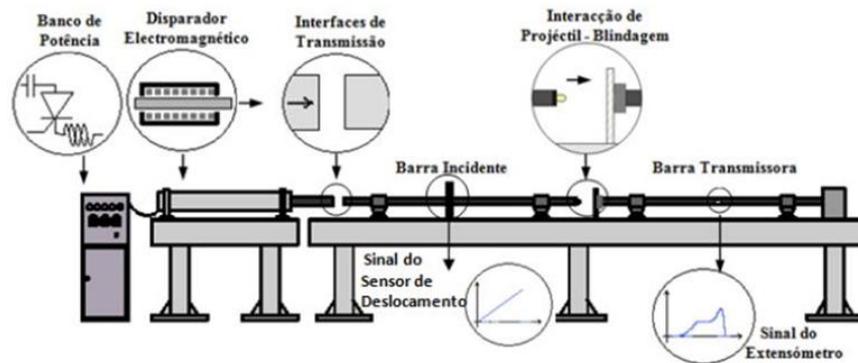


Figura 3.4 - Esquema do aparato modificado da Barra de Hopkinson para aplicação balística (Pinto, 2009).

Assim, o aparato original, devido a sua concepção, permite isolar e caracterizar experimentalmente apenas o material frente a carregamentos de impacto com ondas longitudinais. Porém, através de sua resposta, é possível chegar a outros tipos de resposta, como a razão entre a energia incidente, refletida e transmitida, que permitiria obter uma resposta quantitativa de energia dissipada.

4. MATERIAIS E MÉTODO

Nesta seção, são apresentados os materiais utilizados como corpos de prova nos ensaios de impacto no aparato Barra de Hopkinson e a metodologia empregada na avaliação de uma possível variação da resposta mecânica à impacto entre os diferentes teores de alumina.

4.1 Materiais

Para o estudo da relação entre o teor de alumina na composição do cerâmico e dissipação de energia, foram obtidos corpos de prova de alumina com teor de 90, 96 e 99% de pureza em massa. Estes foram fornecidos pela empresa Ceraltec Cerâmica Técnica Ltda. Todos os corpos de prova possuem formato cilíndrico com 17 milímetros de diâmetro e 10 milímetros de espessura. Foram ensaiados cinco corpos de prova de cada teor de alumina para viabilizar um tratamento estatístico dos dados. Uma amostra de cada teor de alumina é mostrada na Figura 4.1.



Figura 4.1 - Corpos de prova (CP) cerâmicos, da direita para a esquerda, com teores de 90, 96 e 99% de alumina.

4.2 Método

Neste trabalho é utilizado o aparato Barra de Hopkinson para quantificar, experimentalmente, uma possível variação na resposta dos sinais da onda incidente, refletida e transmitida, através do material cerâmico, fabricados com diferentes teores de alumina, durante um ensaio de impacto. O aparato encontra-se no laboratório do Grupo de Mecânica Aplicada (GMAp) da UFRGS, tendo ambas as barras de aço, incidente e transmitida, de 2 metros de comprimento e 20mm de diâmetro. Abaixo é apresentado na Figura 4.2 o aparato Barra de Hopkinson.



Figura 4.2 - Aparato barra de Hopkinson no laboratório do GMAp.

O projétil, também de aço, possui o mesmo diâmetro das barras, 241,5 milímetros de comprimento e 513,5 gramas. O projétil é lançado através do acionamento de uma válvula solenoide, onde este é disparado com uma pressão a 1,0kgf/cm² em um volume de 20L, e colide na face livre da barra incidente. Pode-se ver na Figura 4.3 a arma de gás comprimido que efetua o disparo do projétil e, na ponta do cano, o projétil encostado na face livre da barra incidente. A Figura 4.4 mostra o corpo de prova posicionado entre as barras incidente e transmitida.



Figura 4.3 - Arma de gás comprimido com disparo por válvula solenoide.

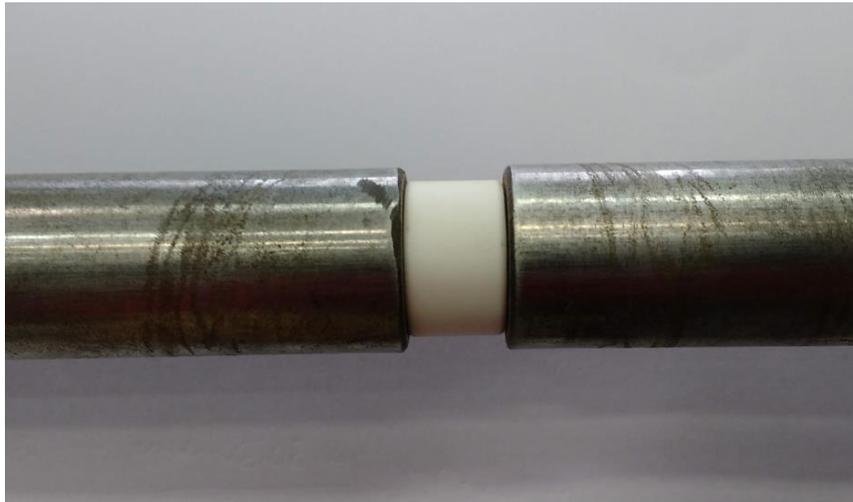


Figura 4.4 - Corpo de prova posicionado entre as barras incidentes de transmitida.

O sistema de aquisição de dados utilizado possui resposta de frequência superior a 200kHz, sendo este superior ao necessário para aquisição de propagação de ondas em materiais sólidos metálicos (Chen e Song, 2011). Os módulos de aquisição são da marca OMEGA, modelo OM-USB-1208HS, e os *strain gauges* ligados em meia ponte de Wheatstone em um amplificador/condicionador de sinal EMBSGB200-M da marca Tacuna Systems. O conjunto de aquisição de dados é apresentado na Figura 4.5.

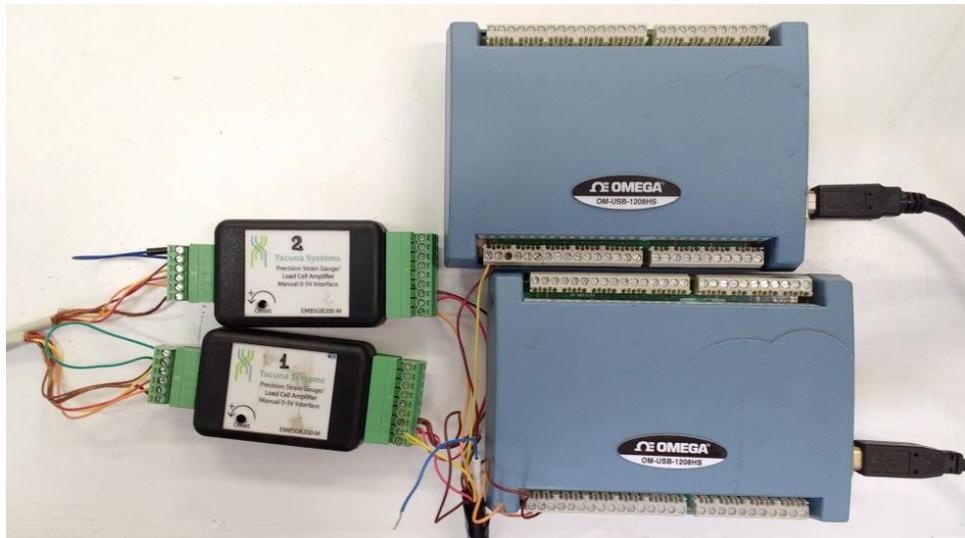


Figura 4.5 - Amplificadores/condicionadores de sinal para *strain gauges* e módulos de aquisição de dados.

O parâmetro usado para quantificar uma possível alteração de comportamento do material cerâmico segundo seu teor de alumina é baseado nas áreas dos pulsos transmitido, refletido e incidente através da Equação 4.1.

$$\text{Percentual de Dissipação (\%)} = D_{\%} = \left(\frac{A_i - A_r - A_t}{A_i} \right) \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Onde $D_{\%}$ é a dissipação percentual e A_i , A_r e A_t são as áreas sob as curvas incidente, refletida e transmitida respectivamente.

Visto que se espera um sinal de reflexão devido à natureza dinâmica do fenômeno, e que são usados dois módulos de aquisição independentes para obter os sinais nas duas barras, um procedimento de calibração é necessário para trabalhar sobre o mesmo referencial para obtenção do sinal e cálculo das áreas. Vale ressaltar ainda que diversos são os fatores que podem levar a um sinal de reflexão, como efeitos geométricos: i) não completo contato de todos os pontos nas extremidades das barras e do corpo de prova; ii) diferença entre os diâmetros das barras e corpo de prova; ou devido as propriedades dos materiais: iii) diferença da impedância do material da barra e do cerâmico.

Para encontrar um referencial adequado para obtenção da razão entre áreas e uma consequente calibração do sistema para tal fim, foram realizados ensaios sem corpo de prova, ou seja, a barra incidente em contato direto com a barra transmitida. A área do pulso transmitido de todos os ensaios dos materiais cerâmicos foi corrigida por um fator f obtido através da Equação 4.2. Os resultados desta calibração, para obtenção das áreas, são apresentados no Apêndice A.1.

$$f = \frac{A_i - A_r}{A_t} \quad (4.2)$$

A Figura 4.6 mostra uma figura esquemática, com os sinais nas duas barras sobrepostos, indicando as áreas usadas no cálculo. A obtenção da área foi feita por integração numérica, baseado no intervalo de integração selecionado nos ensaios de calibração. Os intervalos são de 140 pontos para A_i e A_t e 68 pontos para A_r . O ponto inicial de integração foi determinado na base inicial do pulso e o ponto final quando o pulso já está estabilizado conforme apresentado, indicados na Figura 4.6 através dos marcadores em forma de losango. O mesmo intervalo foi utilizado para os cálculos das áreas dos demais ensaios.

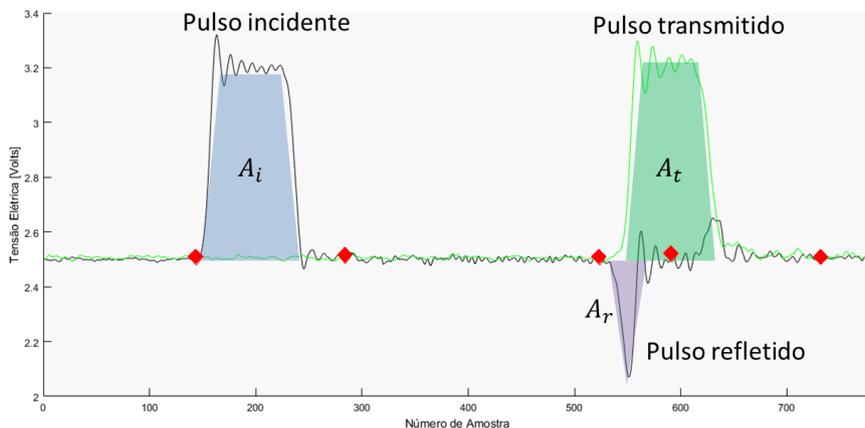


Figura 4.6 - Esquema das regiões onde foram integradas para cálculo das áreas incidente, refletida e transmitida.

Após a obtenção dos dados de ensaio, um tratamento estatístico para eliminar *outliers* é recomendado. Neste trabalho, utilizou-se a norma técnica ASTM designação E178-16a (2016) usando o critério de amostra única. Neste caso, para uma amostragem de $n = 5$, com um percentual de 5% de segurança, a única amostra é duvidosa se $T > 1,672$. O critério é utilizado apenas para o parâmetro de interesse, o percentual de dissipação $D\%$. O valor de T é obtido pela Equação 4.3 sendo x_n o valor da amostra duvidosa, \bar{x} a média e s o desvio padrão ambos da amostragem.

$$T = (x_n - \bar{x})/s \quad (4.3)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o tratamento estatístico para eliminar valores *outliers*, somente o CP04 para o teor de alumina de 99% ($T = 1,709$) foi eliminado. Os dados completos para este teor de alumina são apresentados na Tabela A.2.

As Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam os valores obtidos de área incidente, área refletida, área transmitida, e o percentual de dissipação $D_{\%}$ para as amostras de 90, 96 e 99% de teor de alumina, respectivamente. Todos os sinais obtidos com a barra de Hopkinson, medidos com *Strain-gauges*, são apresentados no Apêndice A.3.

Deve-se notar que os valores de $D_{\%}$ apresentaram dispersão significativa (desvios padrão relativamente altos) frente à média. A dispersão era esperada por se tratar de um fenômeno dinâmico envolvendo caracterização de parâmetro relacionado à falha (que possui grande dispersão mesmo em ensaios quase-estáticos). Entretanto, as médias de $D_{\%}$ para quase todos os teores de alumina possuem valores próximos, e neste estudo, próximo de zero.

Tabela 5.1 - Valores de áreas e percentual de dissipação para o teor de 90%.

90%	A_i	A_r	A_t	$D_{\%}$
CP01	57,5367	7,0839	51,6121	-2,0148
CP02	57,4656	8,2637	49,9217	-1,2526
CP03	58,4908	5,9447	51,8708	1,1546
CP04	58,9248	7,4735	51,3088	0,2419
CP05	55,9723	6,4412	49,5255	0,01002
Média	57,6800	7,0414	50,8478	-0,3722
Desvio Padrão	1,1390	0,9008	1,05465	1,2577

Tabela 5.2 - Valores de áreas e percentual de dissipação para o teor de 96%.

96%	A_i	A_r	A_t	$D_{\%}$
CP01	56,2482	8,7926	47,0985	0,6348
CP02	57,2564	13,6684	43,9750	-0,6760
CP03	57,4060	7,3519	50,0063	0,0832
CP04	58,1418	7,5116	51,0090	-0,6515
CP05	57,6228	8,9325	48,1128	1,0022
Média	57,3350	9,2514	48,0403	0,0785
Desvio Padrão	0,6939	2,5718	2,7430	0,7525

Tabela 5.3 - Valores de áreas e percentual de dissipação para o teor de 99%.

99%	A_i	A_r	A_t	$D_{\%}$
CP01	57.7594	7.6884	50.2395	-0.2918
CP02	57.4464	8.5765	48.6476	0.3870
CP03	57.4237	11.3846	46.1976	-0.2760
CP05	59.0731	9.0858	49.8768	0.1871
Média	57.9257	9.1838	48.7404	0.0016
Desvio Padrão	0.7802	1.5767	1.8270	0.3397

Para analisar de forma gráfica os resultados, pode-se recorrer ao gráfico em caixa estreito para os três teores de alumina, apresentado na Figura 5.1.

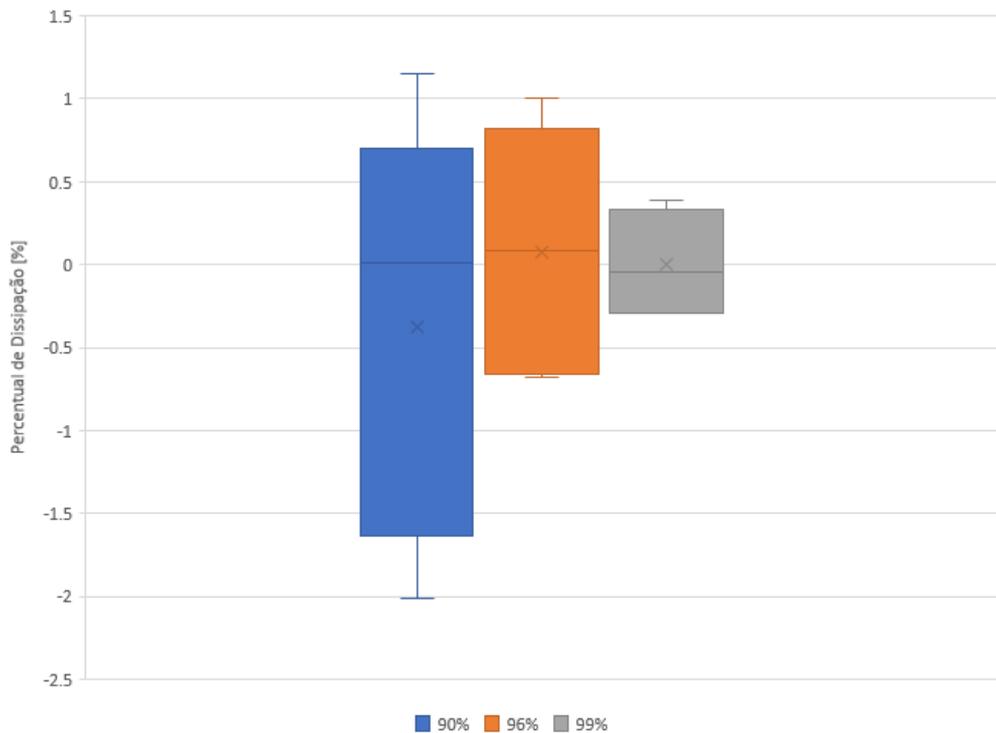


Figura 5.1 - Gráfico caixa estreita comparando os resultados para cada teor de alumina.

Nesta análise gráfica, pode-se perceber que os resultados não apresentam diferenças estatisticamente significativas de variação da resposta de absorção de impacto para os diferentes teores de alumina estudados. Todos os resultados estão dentro de uma mesma faixa de valores.



Figura 5.2 - Amostras quebradas após ensaio. 90% (a), 96% (b) e 99% (c).

Na Figura 5.2, são apresentados corpos de prova após o ensaio, onde todas as amostras tiveram comportamento similar de ruptura/fragmentos. Visualmente, é evidente que a amostra com teor de 99% fragmentou-se muito mais após o impacto do que os CPs de 90 e 96%. Segundo Da Silva (2013), nas amostras com menor teor de alumina (90 e 96%), outras fases cristalinas são formadas além da fase coríndon (fase α) devido à presença significativa de outros elementos, sendo a fase α , em quase sua totalidade, presente para altos níveis de pureza (99%). Isto poderia explicar este comportamento. Porém, deve-se destacar que nenhum corpo de prova apresentou pulverização do cerâmico, comumente reportado em testes de balísticas e, segundo literatura, é um dos mecanismos responsáveis pela dissipação de energia em cerâmicos durante evento balístico.

6. CONCLUSÕES

Com este trabalho foi possível realizar ensaios de impacto e avaliar quantitativamente uma grandeza relacionada a absorção/dissipação de energia ocasionada por um material cerâmico submetido a impacto, através de um parâmetro, aqui chamado de percentual de dissipação $D_{\%}$.

Também, foi possível, através da metodologia proposta, analisar se existe alguma relação da resposta de dissipação com três teores de alumina diferentes, pela propagação de ondas compressivas longitudinais no material em testes de impacto controlado.

Ensaando cinco corpos de prova para cada teor de alumina (sendo usado quatro para 99% para a análise final), não houve diferença estatisticamente significativa para afirmar que o percentual em massa de alumina no material cerâmico estudado (teores de 90, 96 e 99%) modifica sua resposta quando submetido ao ensaio de impacto. Os resultados levam a conclusão que, frente a ondas compressivas longitudinais, para os teores de alumina ensaiados, não há diferença de capacidade de absorção.

Na análise da ruptura dos corpos de prova, apesar dos diferentes teores de alumina apresentarem pequenas diferenças nos fragmentos gerados, as ondas longitudinais de compressão não levaram a pulverização do material. Pode-se especular que o mecanismo de falha relacionado a este tipo de comportamento seja excitado por estados de tensões triaxiais, que não são gerados na barra de Hopkinson (em teoria).

Para trabalhos futuros propõe-se aumentar o número de amostras visto a natureza do fenômeno estudado, onde se espera que os dados sigam uma distribuição Gaussiana. Mais amostras devem melhorar a análise estatística realizada, e dar segurança no uso da distribuição Gaussiana aqui escolhida. Além disso, deve-se considerar realizar ensaios que excitem o mecanismo de falha que possa levar a pulverização das amostras cerâmicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, J. T., Assis, J. M. K., Melo, F. C. L., Lopes, C. M. A., **“Produção e Caracterização de Cerâmicas para Blindagem Balística”**, 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, 21 a 25 de novembro de 2010, Campos do Jordão, SP, pp 1993-2001, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 15000 **“Blindagens para Impactos Balísticos - Classificação e Critérios de Avaliação.”** Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

ASTM International **“Standard Practice for Dealing With Outlying Observations E178-16a”**, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2016.

Chen, W. e Song, B. **“Split Hopkinson (kolsky) Bar: Design, Testing and Applications.”** Nova Iorque: Springer, 2011.

Chen, W., e Luo, H. **“Dynamic Compressive Responses of Intact and Damaged Ceramics from Single Split Hopkinson Pressure Bar Experiment”**, Society for Experimental Mechanics, Vol. 44, Nº 3, junho 2004

Da Silva, M. V. **“Processamento e Caracterização de Cerâmica a Base de Alumina para Uso em Blindagem Balística”**, Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

Da Silva, M. V., Stainer, D., Al-Qureshi, H. A., Hotza, D. **“Blindagens Cerâmicas para Aplicações Balísticas: uma revisão”**, Cerâmica vol. 60, pp 323-331, 2014.

Haro, E. E., Szpunar, J. A., Odeshi, A. G. **“Ballistic impact of laminated hybrid materials made of 5086-H32 aluminum alloy, epoxy and Kevlar® fabrics impregnated with shear thickening fluid”**, Composites part A 87, pp 54-65, 2016.

Hiermaier, S. J. **“Structures under Crash and Impact: Continuum Mechanics, Discretization and Experimental Characterization”**, Springer Science & Business Media, 2007

Júnior, W. F. A., Santos. M. A., Bastian, F. L., Suarez, J. C. M., Cardoso, A. L. V., Chaves, G. Q., **“Comportamento sob impacto balístico de um sistema compósito para blindagem”**, Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.1, pp 12-18, 2006.

Pinto, J. M. G. T **“Avaliação do Comportamento Mecânico de Blindagem Balística”**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

Santos, J. A. S. **“Métodos de Análise de Impactos Balísticos”**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2016.

Sasikumar, M. e Sundareswaran, V. **“Influence of Projectile Nose Shape on Ballistic Limit and Damage to Glass/Vinyl Ester Composite Plates”**, Advanced Composites Letters, 20 (5); 126 – 133, 2011.

Ramesh, K. T. **“High Rates and Impact experiments”**, Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics, 2008.

APÊNDICE A

A.1. Resultados da Calibração

Os resultados de três disparos efetuados com a barra incidente em contato direto com a barra transmitida (Barra-barra) são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela A.1 - Valores das áreas e percentual de dissipação efetuado o impacto barra-barra.

Barra-barra	A_i	A_r	A_t	$D_{\%}$
1	60.5017	5.4759	59.0040	-6.5754
2	56.3645	7.5331	54.9582	-10.8700
3	60.0345	6.6312	57.4464	-6.7346
Média	58.9669	6.5467	57.1362	-8.0600
Desvio Padrão	2.2658	1.0312	2.0407	2.4348

Nota-se que os valores de percentual de dissipação resultaram em números negativos, não condizendo com a física do sistema, pois, como a área sob a curva pode ser relacionada com a energia, este valor dissipado deveria ser maior ou igual à zero. Porém, como mencionado, os sistemas de aquisição de dados são independentes para cada barra, podendo cada um dos sistemas possuir um ganho diferente na tensão de alimentação. Portanto, utilizaram-se as médias para realizar o cálculo do fator f calculado pela Equação 4.2. Sendo o fator $f = 0.9175$.

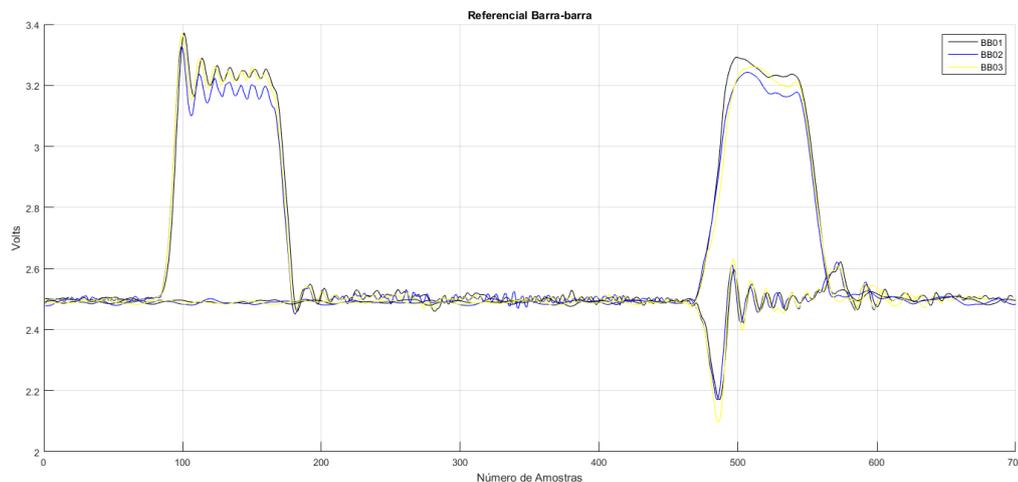


Figura A.1 – Pulsos dos três ensaios realizados sem corpo de prova (barra-barra).

A.2. Dados para Teor de 99% sem Tratamento Estatístico

Seguem os resultados para as amostras de 99% de alumina sem tratamento estatístico.

Tabela A.2 - Resultados sem tratamento de *outliers* para o teor de 99% de alumina.

99%	A_i	A_r	A_t	$D_{\%}$
CP01	57,7594	7,6884	50,2395	-0,2918
CP02	57,4464	8,5765	48,6476	0,3870
CP03	57,4237	11,3846	46,1976	-0,2760
CP04	58,1978	11,4647	47,9680	-2,1219
CP05	59,0731	9,0858	49,8768	0,1871
Média	57,9801	9,6400	48,5859	-0,4231
Desvio Padrão	0,6865	1,7044	1,6195	0,9942

A.3. Imagem dos Pulsos

Na Figura A.2, A.3 e A.4, são apresentados de maneira sobre posta os pulsos adquiridos dos cinco corpos de provas ensaiados utilizando a barra de Hopkinson para os três teores de alumina (90, 96 e 99%).

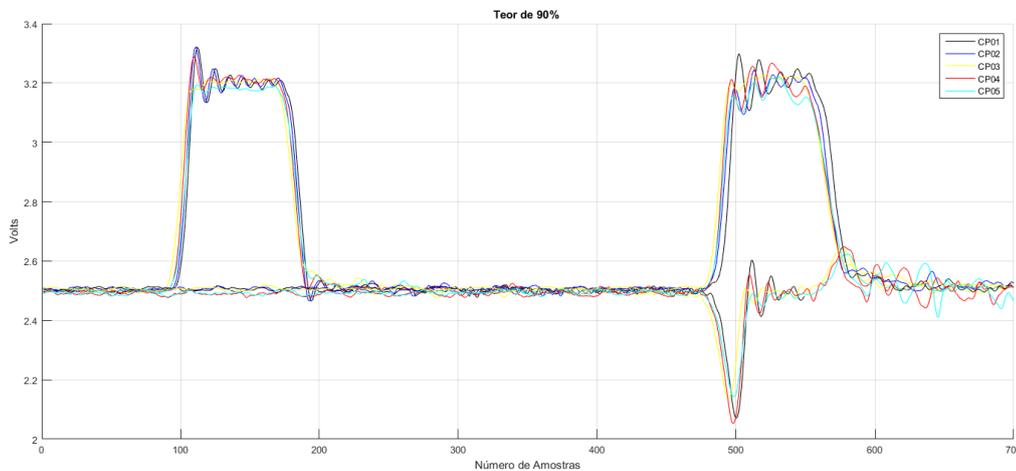


Figura A.2 – Pulsos dos ensaios dos cinco corpos de prova para o teor de 90%.

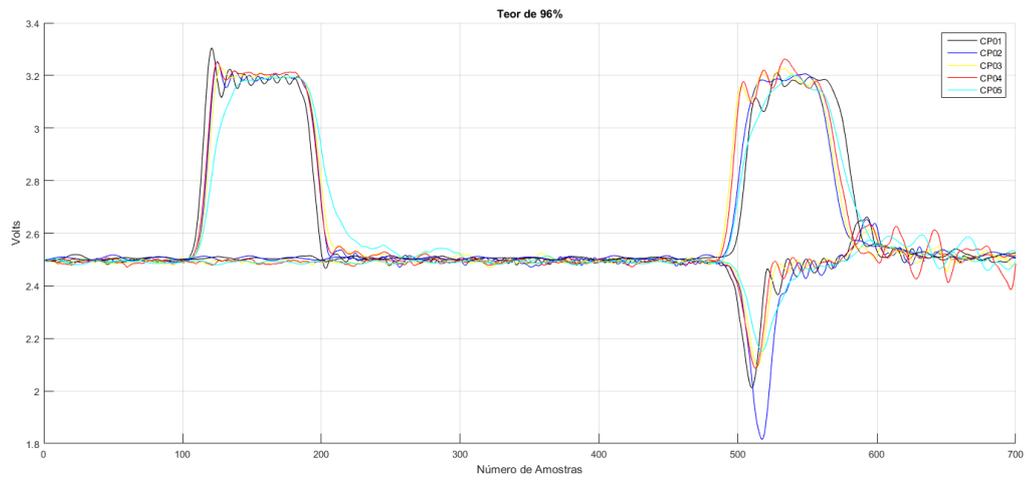


Figura A.3 – Pulsos dos ensaios dos cinco corpos de prova para o teor de 96%.

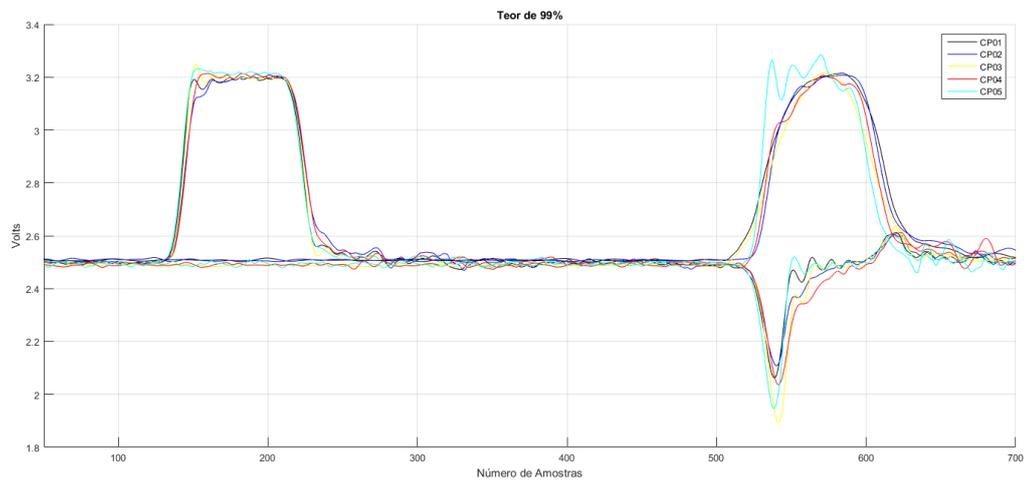


Figura A.4 – Pulsos dos ensaios dos cinco corpos de prova para o teor de 99%.