



Fabrico e caracterização de escudos cerâmicos para sistemas de dupla camada.

(versão final após defesa)

Massochy dos Santos Ventura

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Abílio Manuel Pereira da Silva

Maio de 2023

Declaração de Integridade

Eu, Massochy dos Santos Ventura, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M10096 do curso de Mestrado em Engenharia Eletromecânica da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã __08__ / __05__ / __2023__

Massochy dos Santos Ventura

Dedicatória

Em primeiro lugar dedico este trabalho aos meus pais por tudo o que eles representam para mim.

A minha primogénita Bernarda Cassanda Ventura, por ser uma das minhas maiores alegrias e motivação ao longo da minha formação.

Aos meus irmãos Edson Amando, Clinton Ventura, Leonor Adão, Maria de Lurdes por estarem sempre comigo ao longo deste tempo que estive distante da família.

Aos meus sobrinhos Cecília Salvador, Edson Salvador, Elisandro Ventura que apesar da distância estiveram sempre presentes.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por me ter concedido a graça de concluir a formação com sucesso.

Gostaria de agradecer sinceramente ao Prof. Abílio Silva, cuja experiência e apoio ao longo de todo o trabalho realizado foi inestimável.

Ao Departamento de Engenharia Eletromecânica pela disponibilidade das instalações, equipamentos e logística.

Ao C-MAST - Centro de Ciências e Tecnologias Aeroespaciais (www.aerospace.ubi.pt; Unidade FCT #151) pela disponibilidade das matérias-primas e acesso a equipamentos complementares necessários para o trabalho.

Ao Prof. Pedro Rosa, responsável do laboratório do núcleo de oficinas do departamento de Engenharia Mecânica no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, pela disponibilidade dos equipamentos para os ensaios de compressão com velocidade variável e impacto balístico, ajuda nas atividades experimentais e ajuda inestimável da análise de resultados.

À minha família, especialmente aos meus pais pelo apoio dado durante a minha formação.

Aos meus amigos e colegas que fizeram parte dessa linda caminhada e a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para que este sonho se tornasse em realidade.

Resumo

A proteção de pessoas e veículos através de escudos é uma estratégia usada com sucesso há muitos séculos mesmo em situações de elevada exigência mecânica como é um impacto balístico. Os sistemas de blindagem de dupla camada, com uma proteção cerâmica sobre um substrato, apresentam elevada eficiência na dissipação de energia em impacto balístico. Neste trabalho, desenvolveu-se e caracterizou-se uma placa cerâmica de alumina reforçada por zirconia (ZTA). Foram fabricados sistemas de dupla camada onde a placa de ZTA foi aplicada em diferentes substratos, por forma a obter sistemas de: ZTA/aço, ZTA/titânio e ZTA/compósito de carbono. Os ensaios de flexão em 3 pontos mostram que a presença do escudo cerâmico na face exterior promove a deformação elástica, sendo o sistema CFRP/ZTA o mais leve e resistente. Para os ensaios de compressão com velocidade variável, os resultados mostram que o sistema de dupla camada ZTA/CFRP tem uma capacidade absorção de energia superior ao ZTA/aço com uma média de 13 % para diferentes velocidades a que foi submetida contra uma média de 8 % do sistema ZTA/aço. Ensaios balísticos preliminares mostram que o sistema ZTA/CFRP permitiu dissipar 94 % da energia do projétil aumentando consideravelmente a área de dano do substrato.

Palavras-chave: Escudos cerâmicos; blindagem; sistemas de dupla camada; compósito cerâmico; ZTA; CFRP; impacto balístico, compressão com velocidade variável.

Abstract

The protection of people and vehicles through shields is a strategy successfully used for many centuries even in situations of high mechanical requirement as it is a ballistic impact. Dual layer shielding systems, with a ceramic shield on a substrate, have high efficiency in dissipating energy in ballistic impact. In this work, a zirconia reinforced ceramic alumina plate (ZTA) was developed and characterized and manufactured and double layer systems were manufactured where the ZTA plate was applied to different substrates, to obtain: ZTA/steel, ZTA/titanium, and ZTA/carbon composite (CFRP). The 3-point bending tests show that the presence of the ceramic shield on the outer face promotes elastic deformation, and the ZTA /CFRP system is the lightest and most resistant. For compression tests with variable speed, the results show that the ZTA/CFRP double layer system has an energy absorption capacity higher than the ZTA/steel with an average of 13 % for different speeds to which it was subjected against an average of 8 % of the ZTA/steel system. Preliminary ballistic tests show that the ZTA/CFRP system allowed the dissipation of 94% of the projectile's energy and attenuated the damage in a larger area of the substrate.

Keywords: Ceramic shields; shielding; double layer systems; ceramic composite; ZTA; CFRP; ballistic impact, flexible with variable speed.

Índice

Declaração de Integridade	iii
Dedicatória.....	iv
Agradecimentos	v
Resumo.....	vi
Abstract	vii
Índice.....	viii
Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xii
Lista de Acrónimos	xiii
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Enquadramento e motivação	1
1.2 Objetivos do trabalho	4
1.3 Questões da investigação	4
1.4 Organização do documento de dissertação	5
Capítulo 2 - Estado da arte	6
2. Estado da arte.....	6
2.1 Introdução.....	7
2.2 Escudos protetores	10
2.2.2 Ensaios típicos em escudos com materiais cerâmicos	16
Capítulo 3 - Desenvolvimento experimental	18
3.1 Materiais	18
3.1.1 Alumina e zircónia.....	18
3.1.2 Aço.....	19
3.1.3 Titânio	20
3.1.4 CFRP	20
3.2 Fabrico das amostras	21
3.2.1 ZTA.....	21
3.2.2 Sistema de dupla camada.....	23
3.3 Metodologias de caracterização	23
3.3.1 Densidade aparente e porosidade aparente	23
3.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico	24
3.3.3 Ensaio de flexão em três pontos.....	25
3.3.4 Ensaio de Dureza.....	27
3.3.5 Microestrutura.....	28

3.3.6	Ensaio de compressão com velocidade variável	28
3.3.7	Ensaio de projétil balístico	34
Capítulo 4	– Análise de resultados	36
4.1	Resultados e Discussão.....	36
4.1.1	Propriedades da ZTA.....	36
4.1.2	Ensaio de flexão dos materiais individualmente.....	38
4.1.3	Ensaio de flexão do sistema de dupla camada ZTA/aço	40
4.1.4	Ensaio de flexão do sistema de dupla camada ZTA/titânio	41
4.1.5	Ensaio de flexão do sistema de dupla camada ZTA/CFRP	42
4.1.6	Ensaio de Dureza.....	45
4.1.7	Ensaio de compressão com velocidade variável	46
4.1.8	Ensaio balístico	54
Capítulo 5	– Conclusão	58
5.1	Considerações finais	58
5.1.1	Conclusões	58
5.1.2	Proposta de trabalhos futuros	60
Bibliografia	62

Lista de Figuras

Figura 1: Veículo blindado de roda. [4].....	2
Figura 2: Veículo de combate de esteira (BMP-1). [5].....	3
Figura 3: Veículo de combate de esteira MARK IV. [9].....	8
Figura 4: Tanque modelo T-72. [11]	9
Figura 5: Veículo de combate autopropulsado de roda. [12]	10
Figura 6: Tanque modelo T-72. [13].....	11
Figura 7: Vaso cerâmico no moinho de alta energia	21
Figura 8: Processo de polimento das barras cerâmicas; a) vista da polidora; b) ilustração do polimento de uma amostra.	22
Figura 9: a) esquema da secção do sistema de dupla camada: ZTA/aço e ZTA/titânio; b) secção do sistema de dupla camada ZTA/CFRP.....	23
Figura 10: Vista geral da máquina de ensaio flexão em três pontos.....	25
Figura 11: Ilustração dos ensaios de flexão em três pontos; a) ZTA/aço, b) ZTA/CFRP.....	26
Figura 12: a) Micro durometro Vickers; b) Marca da dureza Vickers	28
Figura 13: Componentes estruturais da máquina: (a) Estrutura base; (b) Estrutura Suporte. [27]	29
Figura 14: Principais elementos que compõe a máquina. [27].....	29
Figura 15: Carrinho móvel com sistema de aquisição de dados	31
Figura 16: Configuração final do aparato experimental. a) vista geral; b) detalhe da amostra preparada para ensaio.	31
Figura 17: Extremidades das barras transmissoras com hastes de compressão (a) Hastes longas; (b) Hastes com provete.....	32
Figura 18: Esquema da máquina laboratorial de ensaios balístico.....	34
Figura 19: Imagem do aparato de ensaio balístico. a) Projétil esférico usado no ensaio balístico; b) vista geral do ensaio.	35
Figura 20: Evolução do tamanho de partícula com o tempo de moagem.....	36
Figura 21: Microestruturas características do material ZTA: a) com menor ampliação (2000×); b) com maior ampliação (5000×)	37
Figura 22: Comportamento mecânico em flexão em 3 pontos dos diferentes materiais ensaiados individualmente	38
Figura 23: Comportamento mecânico em flexão em 3 pontos do sistema de dupla camada: sistema ZTA - aço	40
Figura 24: Comportamento mecânico em flexão em 3 pontos do sistema de dupla camada: sistema ZTA/titânio	41
Figura 25: Comportamento mecânico em flexão em 3 pontos do sistema de dupla camada: sistema ZTA/CFRP	42
Figura 26: Ilustração da rutura no adesivo polimérico de resina epóxi. As setas indicam a região da interface onde ocorreu a rutura e visualizam-se diversas fissuras na superfície da resina que reveste superficialmente a cerâmica.....	43
Figura 27: Comportamento mecânico em flexão em 3 pontos do sistema de dupla camada constituídos pelos sistemas ZTA/Aço, ZTA/Ti e ZTA/CFRP	44
Figura 28: Diagrama de sinais elétricos	46
Figura 29: Resposta individual do ZTA no sistema ZTA/aço	47
Figura 30: Resposta individual do aço no sistema ZTA/aço	48
Figura 31: Resposta individual do ZTA no sistema ZTA/CFRP	48

Figura 32: Resposta individual do CFRP no sistema ZTA/CFRP	49
Figura 33: Desempenho mecânico da ZTA no sistema ZTA/aço para velocidades distintas.	49
Figura 34: Desempenho mecânico do aço no sistema ZTA/aço para.....	50
Figura 35: Desempenho mecânico da ZTA no sistema ZTA/CFRP	52
Figura 36: Desempenho mecânico da CFRP no sistema ZTA/CFRP	52
Figura 37: Comparação entre as velocidades de entrada e saída do projétil no sistema de armadura de dupla camada CFRP/ZTA.....	55
Figura 38: a) Face de entrada; b) Face de saída	55
Figura 39: a) Face de entrada; b) Face de saída	56

Lista de Tabelas

Tabela 1: Características dos principais blindados da I guerra mundial e do período entre guerras [2].	8
Tabela 2: Características principais do tanque T-72. [13].....	12
Tabela 3: Propriedades mecânicas de cerâmica ZTA [8]	16
Tabela 4: Propriedades físicas dos materiais cerâmicos (ZTA).....	19
Tabela 5: Composição química do aço. [24].....	19
Tabela 6: Propriedades mecânicas do aço. [24]	19
Tabela 7: Composição química da liga de Titânio Ti25. [25].....	20
Tabela 8: Propriedades mecânicas do Titânio Ti25. [25].....	20
Tabela 9: Propriedades mecânicas do CFRP. [21].....	21
Tabela 10: Sistema de dupla camada ZTA/aço	33
Tabela 11: Sistema de dupla camada ZTA/CFRP.....	33
Tabela 12: Característica do projétil e condições de ensaio	35
Tabela 13: Resultados obtidos experimentalmente	37
Tabela 14: Resumo de propriedades mecânicas dos materiais ensaiados individualmente	39
Tabela 15: Resumo das propriedades mecânicas dos ensaios dos materiais compostos. Onde (1) e (2) correspondem à rigidez média na etapa 1 e 2, respectivamente, do sistema ZTA/CFRP	45
Tabela 16: Dureza dos materiais individualmente	46
Tabela 17: Energia de impacto para velocidades distintas no sistema de dupla camada ZTA/aço	51
Tabela 18: Energia remanescente para velocidades distintas no sistema de dupla camada ZTA/aço	51
Tabela 19: Energia remanescente para velocidades distintas do sistema de dupla camada ZTA/CFRP	53
Tabela 20: Balanço energético dos ensaios balístico	54

Lista de Acrónimos

AP	<i>Armor – Piercing shot and shell</i>
RHA	Armadura homogénea laminada
SiC	Silício de carbono
ZTA	<i>Zirconia toughened alumina</i>
DWE	<i>Dwell</i>
DPT	Transição de permanência e penetração
FTG	Geometria de destino fixo (alvo)
TAD	Densidade da área do alvo
NDP	Penetração não deformante
PEN	Penetração semi-infinita
DOP	Profundidade de penetração
VBL	Velocidade limite balístico
DEF	Fator de eficiência diferencial
PO	Referência de profundidade de penetração
Pb	Profundidade residual de penetração
YSZ	Zirconia estabilizada com ítria
3PB	<i>Three Point bending</i> (flexão em 3 pontos)
GB	Grande Bretanha (Reino Unido)
RS	Rússia
SLA	<i>Stereolithography Apparatus</i>
SiC	Carboneto de silício
B ₄ C	Carboneto de boro
Al ₂ O ₃	Alumina
VBL	Velocidade limite balística

Lista de Símbolos

A (%)	Absorção da água
B (g/cm ³)	Densidade aparente
b (mm)	Largura da barra
D (g)	Peso Seco
E (GPa)	Módulo de elasticidade
F (N)	Força
ff (Hz)	Frequência fundamental de ressonância
H (GPa)	Dureza
HV	Dureza Vickers
J (mm)	Comprimento entre apoios
k (mm)	Deformação do centro da barra
L (mm)	Comprimento da barra
m (g)	Massa da barra
P (%)	Porosidade aparente
S (g)	Peso imerso
T (%)	Gravidade específica aparente
t (mm)	Espessura da barra
T ₁	Fator de correção para uma barra de espessura finita
U (mm)	Média do comprimento das diagonais
V (cm ³)	Volume exterior
V _{IP} (cm ³)	Volume de porção impermeável
V _{OP} (cm ³)	Volume de poros abertos
v (mm)	Espessura do provete
W (g)	Peso saturado
Z (MPa)	Tensão de rotura a flexão
ε (%)	Taxa de deformação da viga
d ₁ (mm)	Deslocamento à esquerda
d ₂ (mm)	Deslocamento à direita
V _v (m/s)	Velocidade variável
m _p (kg)	Massa do projétil
E _I (J)	Energia de impacto
ε' (%)	Extensão

Capítulo 1 - Introdução

Neste capítulo faz-se o enquadramento do tema a desenvolver, e descreve-se a motivação para a realização do trabalho. Enunciam-se os principais objetivos e as respetivas questões de investigação.

1.1 Enquadramento e motivação

Os sistemas, de proteção de pessoas e veículos, em particular os de forças militares remontam a civilizações ancestrais. Estes sistemas funcionam como escudos e têm como objetivo proteger os seus utilizadores de ações hostis, nomeadamente impactos causados por flechas, balas ou morteiros. A proteção de pessoas é usual ao nível do tronco superior através de colete de proteção, de um capacete que protege a cabeça e de perneiras que protegem os membros inferiores. O princípio de proteção tem por base a adição de um revestimento de uma camada protetora suplementar.

Também a proteção de veículos segue o mesmo princípio. Adição de um revestimento que aumenta a proteção com a adição de painéis aumentando consideravelmente a espessura e conseqüentemente a massa do próprio veículo.

Os veículos militares geralmente são utilizados no combate e no apoio à mobilidade das tropas, bens e serviços. Assim, os veículos militares classificam-se em veículos de transporte e veículos blindados [1].

- Veículos de transporte: veículos pesados, veículos ligeiros para transporte de militares, veículos de transporte de carga líquida e sólida;
- Veículos blindados: Tanques, artilharia autopropulsada, transportadores blindados e auxiliares de tanques.

Os veículos blindados utilizam uma proteção estrutural (blindagem) que visa proteger os ocupantes contra tiros e explosões. A blindagem pode ser utilizada tanto em carros de transporte de pessoas, veículos de transporte de valores, bens

ou em veículos militares, como os carros de combate [2]. No presente trabalho pretende abordar-se em particular os escudos de proteção de veículos blindados de combate, tendo em conta a sua importância no teatro operacional.

Os veículos blindados (Fig. 1, Fig. 2) garantem a proteção da tripulação e as equipas instaladas no interior, contra os fatores destrutivos derivados do uso de armas convencionais e de armas nucleares. Os veículos blindados de combate podem ser de rodas ou de esteira.[3]



Figura 1: Veículo blindado de roda. [4]

No teatro operacional os veículos blindados de combate garantem o poder de fogo fundamentalmente nas ações ofensivas. Muitas vezes fazem parte de um sistema de fogo com um objetivo próprio, que pode ser de artilharia, antiaérea ou antitanque.



Figura 2: Veículo de combate de esteira (BMP-1). [5]

A blindagem, armadura ou escudo protetor é na maioria das vezes composta por um reforço metálico, isto é, uma placa de dupla camada bimetálica. Usualmente a camada exterior é mais resistente que a camada interior, sendo a sua espessura maior na parte frontal e menor no restante da viatura. A proteção blindada oferecida por essa camada bimetálica está principalmente relacionada com a sua espessura, assegurando-se proteção perforante até um determinado calibre. [6]

O projeto de uma armadura depende da proteção pretendida, da área da superfície a proteger, densidade dos materiais e custo da aplicação específica. As importâncias relativas desses requisitos influenciam a escolha dos materiais, como aço, liga de alumínio, liga de titânio, cerâmica e polímeros (isolados ou reforçados). Nos últimos anos aumentou o uso de materiais cerâmicos para aplicações em armaduras. [7]

Atualmente, os materiais cerâmicos são amplamente utilizados em sistemas de armaduras, com aplicações específicas em veículos de combate e tanques, pelas vantagens de baixa densidade, elevada resistência à compressão, dureza e resposta mecânica ao impacto de um projétil em alta velocidade. [8]

1.2 Objetivos do trabalho

Com este trabalho pretende estudar-se uma composição cerâmica (material) com potencial para ser usado numa armadura como escudo protetor. Para isso define-se um conjunto de objetivos de modo a cumprir com sucesso o trabalho de Dissertação:

- Analisar a literatura e selecionar uma composição para a cerâmica que possa ser proposta para um escudo protetor;
- Fabricar amostras usando um sistema de dupla camada com uma placa cerâmica exterior sobre diversos substratos;
- Caracterizar as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais dos sistemas de dupla camada fabricados;
- Discutir os resultados comparando as propriedades dos diferentes sistemas fabricados e comparando-os com a literatura;
- Apresentar as conclusões e proposta de trabalhos futuros.

1.3 Questões da investigação

Por forma a cumprir os objetivos apresenta-se um conjunto de questões de investigação que serão respondidas ao longo do trabalho, nomeadamente:

Qual a composição cerâmica a estudar para o sistema protetor exterior da armadura?

Quais os materiais a escolher para o substrato do sistema de dupla camada?

Quais os ensaios de caracterização adequados para obter as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais do sistema protetor?

Quais as vantagens e limitações de cada um dos sistemas de proteção de dupla camada?

Quais vantagens e limitações de ensaios de projétil balístico e de compressão com velocidade variável?

1.4 Organização do documento de dissertação

No capítulo 1 faz-se o enquadramento do tema a desenvolver. Descreve-se a motivação para a realização do trabalho. Enunciam-se os objetivos e as principais questões de investigação.

No capítulo 2 apresenta-se um resumo do estado do conhecimento científico da área bem como resultados publicados no emprego da cerâmica como escudo protetor.

No capítulo 3 faz-se o desenvolvimento experimental da cerâmica, os materiais utilizados, a metodologia de fabrico, metodologia de caracterização e experimental. São feitos ensaios estáticos (flexão em 3 pontos), ensaio de tiro passante e ensaio de compressão com velocidade variável.

No capítulo 4 é feita a análise dos resultados e discussões com base nos ensaios que foram realizados nos materiais.

No capítulo 5 apresenta-se na conclusão um sumário dos principais resultados e uma lista de propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Estado da arte

Neste capítulo apresenta-se um resumo do estado do conhecimento científico da área dos sistemas de proteção balística, em particular descreve-se um conjunto de trabalhos publicados onde a cerâmica é usada como revestimento exterior num escudo protetor de dupla camada.

2. Estado da arte

As Forças Armadas são o garante da soberania de uma nação. Sendo este o benefício mais óbvio para um país, manter as Forças Armadas com equipamento moderno, com meios bélicos adequados, proporcionando a proteção da população e das tropas garantindo a segurança da nação contra ameaças estrangeiras.

As diferentes atuações das Forças Armadas, quer seja em tempo de paz como em situações de guerra, visam dar proteção à população, garantir a paz e proporcionar as condições de segurança para o desenvolvimento de uma nação. As Forças Armadas também têm um papel importante em operações de emergência civil, particularmente em larga escala, como são o caso do socorro de emergência a vítimas de acidentes em zonas remotas e organização de socorro em catástrofes.

As Forças Armadas são constituídas por tropas com elevado grau de especialidade, com uma hierarquia bem definida, e dispõem de equipamentos específicos disponíveis para responderem a situações de vida ou de morte, onde o erro e as falhas em procedimentos pré-definidos são treinados exaustivamente para não ocorrerem. Assim, as Forças Armadas necessitam de desenvolvimento de sistemas tecnológicos e de procedimentos de vanguarda, que não são usados apenas em atos bélicos, mas são cada vez mais aplicados no apoio da proteção de bens e de civis.

2.1 Introdução

A tradição militar anterior à I Guerra Mundial tinha arraigada a cultura da ofensiva desde os tempos das campanhas napoleônicas, passando por Clausewitz e pelas campanhas russianas, como exemplos de sucesso. Até o surgimento dos veículos a motor, a força de cavalaria tinha a seu cargo impor a mobilidade no campo de batalha. Quando a grande guerra se iniciou, a tendência óbvia foi a de todos os exércitos adotarem a postura ofensiva, buscando o combate decisivo. Porém, a crença na ofensiva começou a esvanecer-se, principalmente na frente ocidental, devido ao alto número de baixas, à ineficácia dos ataques em obter a ruptura das linhas inimigas e a abertura da brecha necessária para o avanço e conquista de objetivos. O poder de fogo da artilharia e das metralhadoras passaram a dominar o campo de batalha e estabeleceram a guerra de posições fixas ou de trincheiras [2].

Em face desse impasse surgiu o carro de combate, chamado tank (tanque), por iniciativa dos ingleses, para apoiar o avanço da infantaria na ruptura das posições defensivas inimigas e permitir que a cavalaria finalmente tivesse uma oportunidade de mobilidade. Os primeiros carros de combate apresentavam baixas velocidades, pouca proteção blindada e pouca confiabilidade mecânica. A extrema vulnerabilidade ao fogo direto do inimigo fez com que muitos observadores se convencessem de que os blindados jamais poderiam operar de forma independente da infantaria. Um dos primeiros veículos de combate com algum sucesso em campo de batalha, Fig.3, foi o MARK IV. Embora já fosse um resultado de sucessivas melhorias das versões anteriores, este veículo possuía sérios defeitos: A potência do motor (105 HP) era insuficiente para fazê-lo deslocar-se em terrenos difíceis; as rodas duplas existentes na cauda, pouco facilitavam a passagem das trincheiras. Mas, além das restrições de caráter técnico, o emprego tático inadequado também contribuiu para que estes veículos de combate não obtivesse o desempenho esperado [2].

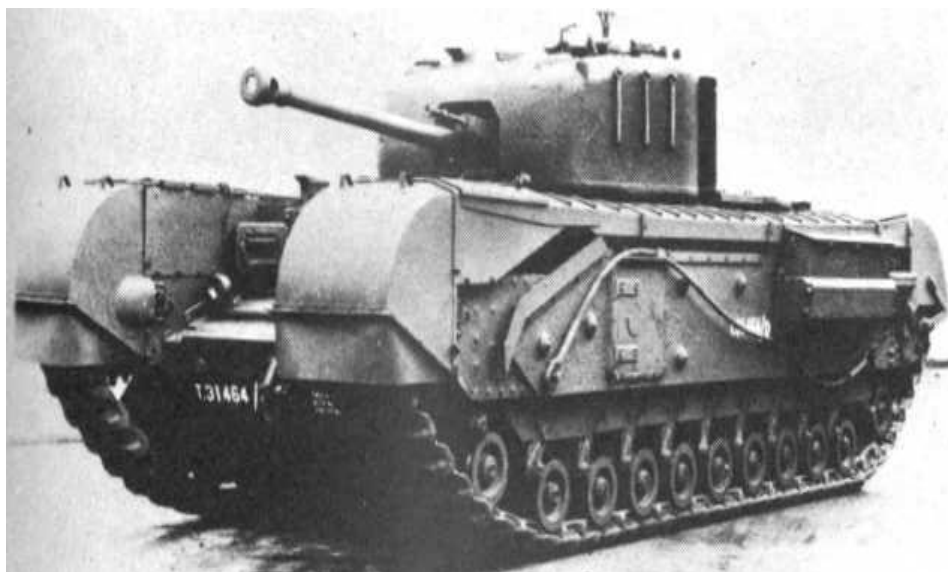


Figura 3: Veículo de combate de esteira MARK IV. [9]

Na tabela 1 apresentam-se exemplos de diferentes tipos de tanques e características. Da análise da tabela 1 observa-se que:

Tabela 1: Características dos principais blindados da I guerra mundial e do período entre guerras [2].

Modelo	País	Blindagem (mm)	Vel. (km/h)	Peso (T)	Potência do motor (HP)
Mark I, pesado, 1916	GB	5 – 11	5,2	31	105
Mark V, pesado 1918	GB	6 – 15	7,5	37	150
Mark A, médio, 1918	GB	6 – 14	12,5	14	90
Mark II, médio, 1929	GB	8 – 15	26	31	105
Mark A, médio, 1918	GB	6 – 14	12,5	14	90

Desenvolvimentos técnicos

Os avanços tecnológicos do período, ainda na cauda da segunda Revolução Industrial, prosseguiram e propiciaram o aperfeiçoamento contínuo dos armamentos, inclusive dos blindados. Nesse período, foram desenvolvidas motorizações mais potentes, ligas metálicas, que melhoraram a blindagem dos veículos, equipamentos de rádio com transdutores em diversas frequências e alcance, que ajudaram a mobilidade dos blindados, tornando melhor a

coordenação e disposição destes veículos no cenário de guerra. Além disso, foram aperfeiçoados os sistemas de armas, maior raio de viragem e autonomia, visibilidade e os sistemas de ventilação para proporcionar maior conforto à tripulação [2]. Com a instalação de aparelhos óticos (periscópios) para melhoria da visibilidade dos condutores e cúpulas de comando especiais para o comandante, permitiram que os blindados tivessem avanços nos sistemas de direção e da capacidade de mobilidade através do campo de batalha. Foram desenvolvidos blindados para as diversas unidades de apoio: comunicações, artilharia, infantaria, engenharia e logística.[3]

Diferentes tipos de veículos de combate

Os tanques (Fig.4) são veículos de combate, de esteiras, com potencial para múltiplo emprego em combate, são equipados com um potente e variado armamento e possuem uma elevada proteção contra os meios convencionais de armamento e, em alguns casos, contrafatores destrutivos avançados como armas nucleares. Atualmente, são caracterizados por uma elevada mobilidade e utiliza-se fundamental para realizar ações ofensivas e as características técnico-combativa varia de acordo os modelos. As instalações autopropulsadas (Fig.5), fazem parte dos veículos de combate, no qual se instala um sistema de fogo de emprego único, que pode ser de artilharia, antiaéreo ou antitanque.[10]



Figura 4: Tanque modelo T-72. [11]

Enquanto os veículos de transporte blindados destinam-se principalmente, para o transporte de tropas de infantaria até ao campo de combate, podendo ser em geral utilizados de igual modo para o cumprimento de outras missões de mobilidade de homens. Sendo que a maior parte destes veículos de combates são anfíbios e aerotransportáveis. [10]



Figura 5: Veículo de combate autopropulsado de roda. [12]

2.2 Escudos protetores

A proteção das tropas no teatro operacional, em combate, bem como suas instalações estruturais, como veículos, aeronaves e outros equipamentos de segurança, continua a atrair atenção da pesquisa, principalmente na busca de novas soluções que permitam encontrar um equilíbrio entre o peso do veículo e a proteção contra os impactos do armamento do inimigo.

Geralmente os escudos protetores que definem a blindagem são conseguidos com a aplicação de placas metálicas, cerâmicas, placas (folhas) laminadas comprimidas ou compósitos que incorporam dois ou mais desses materiais em sucessivas camadas para aumentar a eficácia e resistência balística sem comprometer demasiado o peso global do veículo.

Abordando como exemplo o escudo protetor do tanque T-72, Fig. 6, observa-se que possui uma proteção anti canhão diferenciado. O revestimento

blindado do tanque é uma estrutura semelhante a uma caixa rígida montada a partir de placas (folhas) de aço de elevada dureza, dando origem a uma blindagem homogênea fruto das camadas combinadas de aço laminado. A parte frontal da blindagem do tanque é a região mais exposta ao fogo inimigo, é constituída por duas placas de aço convergindo em cunha: a superior, com uma inclinação de 68° com a vertical, e a inferior com uma inclinação de 60° . No tanque T-72, a placa superior possui uma armadura combinada, consistindo numa camada externa de 80 mm de espessura de aço e de uma camada de fibra de vidro de 10 mm. Além disso, há camadas internas de aço de 20 mm, e a placa inferior é feita de aço blindado homogêneo laminado de 85 mm [13].



Figura 6: Tanque modelo T-72. [13]

A espessura do sistema protetor (casco) frontal superior é de 550 mm e a sua capacidade defensiva, de acordo com várias fontes, é equivalente à de 305 a 410 mm. O índice de resistência do tanque americano “M1 Abrams” contra projéteis é superior a 550 mm na testa da torre devido à armadura de aço homogênea contra sub-calibre e de 450 a 600 mm. O restante revestimento (do casco) é feito inteiramente em armadura de aço homogêneo de camada dupla. Os

lados verticais do revestimento têm 80 mm de espessura na área do compartimento de controlo e do compartimento de combate e 70 mm na área da transmissão do motor. O sistema de rodagem em esteira que permite a mobilidade do casco está protegido com placas de aço que proporcionam uma blindagem superior e inferior e duas caixas de velocidades estampadas. O teto do casco consiste num revestimento de blindagem com duas camadas (placas) de aço, e a base inferior (fundo) tem uma forma semelhante a uma calha e consiste em três placas estampadas com uma série de estampados sucessivos para aumentar a rigidez. O compartimento do motor-transmissão, é separado do compartimento de combate por uma partição blindada em aço de dupla camada transversal. Em cada um dos lados do tanque para proteção contra munição cumulativa, estão instaladas quatro placas giratórias em folhas de liga de alumínio estampadas de 3 mm. Na tabela 2 faz-se um resumo de algumas características do tanque T-72. [13]

Tabela 2: Características principais do tanque T-72. [13]

Modelo	País	Blindagem	Vel. (km/h)	Peso (T)	Potência do motor (HP)
T-72	RS	O casco é reforçado com placas duplas de aço laminado, aço fundido e aço combinado com fibra de vidro	45 – 50	45,6	780

Na literatura encontram-se diversos trabalhos sobre análise e proposta de sistemas de blindagem de armaduras que podem ser aplicáveis em veículos militares. Os compostos de dupla camada, de cerâmica-metal foram integrados recentemente tendo em vista a melhoria de sistemas de blindagem. Os objetivos da substituição de um sistema de blindagem em aço, habitualmente constituídos por sucessivas camadas de diferentes tipos de aço estampados (e ou laminados), por um sistema de dupla camada quase sempre de materiais diferentes são sempre dois: 1) promover sistemas de proteção mais leves; 2) obter armaduras com maior resistência ao impacto.

Sanusi et. al [14] usou com sucesso um sistema de proteção blindado de dupla camada: cerâmica–metal, de alumina–aço, para obter uma melhor proteção contra projéteis balísticos. A placa cerâmica está colocada na face exterior numa posição oblíqua contra o projétil iminente. No entanto, os autores descrevem que é necessário mais trabalho para se compreender a relevância da interação interfacial e de diferentes configurações estruturais em função da eficiência ao impacto balístico.

Diversas configurações de alvo destes compósitos laminados de dupla camada de cerâmica e aço carbono médio foram analisadas contra o mesmo projétil de acordo com a norma NIJ-0108.01. [15]

Pawar et. al [16] compararam a influência de painéis cerâmicos de alumina (Al_2O_3) e de nitreto de alumínio (AlN) sobre o padrão de deformação da placa composta com substrato metálico. Dos resultados obteve-se que a placa cerâmica de AlN cria menos protuberância na placa de suporte em comparação com a placa cerâmica de Al_2O_3 . Tal facto deve-se à maior resistência ao esforço de corte do nitreto de alumínio que suprime a formação de fissuras aquando da aplicação de uma força de compressão. Assim, concluiu-se que a deformação na placa de suporte (substrato) é dependente da composição da placa cerâmica exterior na face sujeita ao projétil.

Jinzhu et. al [17] investigou a penetração do projétil de liga de tungstênio num sistema blindado composto por um sistema de dupla camada de alumina - aço. Verificou-se que a profundidade de penetração no sistema de dupla camada diminuiu com o aumento da espessura da placa cerâmica da face exterior. Acresce que a placa cerâmica foi fragmentada no ponto de impacto, o que a fez dividir-se em diversos fragmentos, de pequeno tamanho, em função da distância ao ponto de impacto.

Thomas et. al [18], fez-se a comparação do comportamento balístico de alumina convencional, com outra alumina sinterizada com aditivos, onde a tecnologia de fabricação quase líquida é relativamente imatura em comparação com a sinterização convencional de uma cerâmica. Neste estudo, o desempenho balístico de uma série de telhas de alumina fabricadas aditivamente (impressão 3D) com 97,2% da densidade, foram investigados usando técnica balística direta

e reversa. Os ensaios foram realizados com armas de gás comprimido, empregaram a técnica de profundidade de penetração e Raio-X como diagnóstico primário para avaliar a eficiência de penetração e interação projétil-alvo, respetivamente. Os resultados de ambos os conjuntos de ensaios foram complementares e indicaram claramente o potencial de tais materiais obtidos por prototipagem rápida para desempenhar um papel ativo no fornecimento de soluções de blindagem corporal do mundo real, desde que o controlo de qualidade do material obtido por impressão 3D possa ser mantido.

A armadura constituída por camadas com uma placa cerâmica exterior é normalmente fabricada através de uma rota de sinterização sob pressão, em diferenças temperaturas, o que influencia o tamanho final do grão da microestrutura cerâmica, e consequentes das propriedades do material. Grãos grandes permitem obter propriedades de caracter mais anisotrópico, enquanto grãos pequenos permitem obter materiais mais homogéneos com maior rigidez (módulo de elasticidade) e mais densos. No entanto, as vantagens de novas técnicas de fabrico como a prototipagem rápida, através de impressão 3D, permite obter novas geometrias com a superfície cerâmica. Existem várias rotas diferentes, em particular a estereolitografia (chamada em língua inglesa de SLA, *Stereolithography Apparatus*), onde a cura da pasta cerâmica é realizada camada a camada, usando processos fotoquímicos do polímero usado como aglutinante.

2.2.1 Materiais cerâmicos usados em escudos

Sabe-se que a principal função da proteção, tanto para coletes de proteção individual quanto para veículos, é evitar que projéteis, quase sempre balísticos, atravessem a armadura e, no caso de proteção individual, penetrem no corpo humano. No entanto, a seleção do material depende de vários critérios, como peso, capacidade de absorção de energia, resistência a danos e resistência a impactos múltiplos. Outras características podem ser consideradas como a combinação de propriedades físicas (como a porosidade) e a microestrutura (tamanho e distribuição do grão), além disso, é sempre importante a otimização dos processos de fabrico. Finalmente, o custo, quer do material como do fabrico é um fator quase sempre decisivo na escolha dos materiais para um escudo protetor. Portanto, o uso de um material cerâmico em armadura para proteção

balística depende das suas propriedades, avaliadas para cada aplicação, e das condições disponíveis para o fabrico, consoante a geometria, da armadura.

Dresch et. al [19], fez a análise de propriedades mecânicas em ensaios balísticos, em blindagens com placas cerâmicas e suas aplicações. Conclui-se que a face exterior de cerâmica é excelente para aplicação em armaduras balísticas, principalmente, por causa de elevada resistência mecânicas à compressão e baixa densidade. Assim, obtém-se uma elevada relação de resistência mecânica específica (resistência/densidade) em comparação com outros materiais usados para a mesma finalidade.

Embora as cerâmicas primárias usadas em aplicações balísticas sejam alumina, carboneto de silício e carboneto de boro, outros compostos cerâmicos também são propostos para escudos de proteção balísticas, como o compósito de alumina (Al_2O_3) – zirconia (ZrO_2). Este compósito cerâmico designa-se por ZTA e consiste numa alumina enrijecida por zirconia. Esta cerâmica possui uma resistência mecânica superior, como uma maior tenacidade à fratura, comparadas com outras cerâmicas, devido à transformação de fase de zirconia tetragonal para zirconia monoclinica. Esta transformação de fase está associada a um aumento de volume da fase monoclinica que estrangidas entre os grãos da fase tetragonal geram tensões de compressão que dificultam a abertura e propagação de fendas. Embora a alumina seja um material de cerâmica de engenharia amplamente utilizado, ela sofre com sua menor tenacidade à fratura. A alumina endurecida com zirconia nada mais é do que o composto de alumina e zirconia que melhorou a tenacidade à fratura. O aumento na tenacidade é devido à transformação de fase da zirconia da forma de cristal tetragonal para monoclinica e a expansão de volume associada e geração de tensões compressivas. [20]

Apesar das excelentes propriedades físicas e mecânicas das cerâmicas, as principais desvantagens são sua fragilidade, grande dispersão de resistência e fácil crescimento de fendas. A fragilidade inerente da cerâmica torna necessárias considerações especiais no projeto com esses materiais como sistemas de armadura. Em metais dúcteis, tensões localizadas que excedem o ponto de escoamento geralmente são aliviadas pela deformação plástica local que

redistribui a tensão em uma área mais ampla, evitando a fratura. A cerâmica, no entanto, não tem esse ponto de escoamento, elas falham quando as tensões localizadas excedem a resistência do material.

Normalmente, o comportamento elástico é linear até o ponto de fratura. Além disso, eles geralmente têm alto módulo de elasticidade, o que resulta em fratura em deformações relativamente pequenas. Um esforço considerável foi despendido com o objetivo de aumentar a ductilidade, ou tenacidade, dos materiais cerâmicos.

A cerâmica de alumina endurecida com zirconia (ZTA) é o material cerâmico de óxido mais importante, amplamente utilizado e de baixo custo baseado no método de aumento da tenacidade por transformação de fase. Possui resistência ao desgaste e à corrosão, juntamente com alta resistência e tenacidade, e o teor típico de zirconia em ZTA está entre 10% e 20%. Com os valores apresentados na tabela 3 nos vai permitir fazer análise comparativa com os resultados experimentais obtidos no capítulo 4.

Tabela 3: Propriedades mecânicas de cerâmica ZTA [8]

Propriedades	90% Alumina	10% Zirconia
Densidade (g/cm^3)	3,543	3,7320
Porosidade inicial	0,0910	0,088
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	277	272
Resistência à tração (MPa)	220	667
Coefficiente de Poisson (ν)	0,23	0,20

2.2.2 Ensaios típicos em escudos com materiais cerâmicos

Santos et al. [21], são realizados testes estáticos de flexão em três pontos (3PB) foram realizados em temperatura ambiente e usando corpos de prova cortados nominalmente em ($60 \times 10 \times 3 \text{ mm}^3$ e $60 \times 10 \times 2 \text{ mm}^3$) dessas placas, respectivamente, para laminados de resina e compósitos. Os provetes foram ensaiados com vãos de 50 mm e 40 mm, respectivamente, para laminados de resina e compósitos, de acordo com a Norma Europeia EN ISO 178:2003. Uma máquina de teste universal Autograph AGS-X, da Shimadzu, com uma célula de

carga de 10 kN e uma taxa de deslocamento de 2 mm/min foi usada para testar seis amostras diferentes para cada configuração.

Rahbek et al. [22], realizou ensaio de teste balístico onde o projétil usado para teste foi um padrão 7,62 × 63 mm (M2 AP). O projétil tem um núcleo de aço endurecido perfurante (AP) de 5,19 g, um enchimento de chumbo de 0,7 g na frente do núcleo de aço. A massa total dos projéteis utilizados para os testes foi em média 10,56 g. O principal objetivo dos ensaios foi isolar as possíveis diferenças no desempenho balístico ao adicionar tampas frontais ou traseiras em placas cerâmicas.

Wuma et al. [23], implementou testes dinâmicos de impacto axial de amostras em sistema de camadas e foram conduzidos na máquina de teste de queda de peso Instron 9250 HV com uma massa de 18,41 kg altura máxima de queda de 1,25 m. As velocidades de impacto correspondentes (0,8; 1,2 ou 1,6 m/s) podem ser geradas com diferentes alturas de queda controladas pela máquina de teste automática.

Capítulo 3 - Desenvolvimento experimental

Neste capítulo é feita a descrição de processo de fabrico da cerâmica (ZTA) bem como o processo de fabrico dos materiais compostos constituídos pela colagem da cerâmica com os diferentes substratos (metálicos de aço e titânio) e de compósitos CFRP.

3.1 Materiais

Para a realização do trabalho experimental utilizou-se cinco matérias – primas de base: alumina, zirconia, aço inoxidável 304, titânio Ti grade 30, e laminado de CFRP.

3.1.1 Alumina e zircónia

Alumina (Al_2O_3), da ACROS Organics™ de acordo com o fabricante tem um grau de pureza de 99,7%, massa molar de 101,96 g/mol, e uma massa específica de 3,897 g/cm³. A zirconia estabilizada com 3 mol % de ítria (Y_2O_3), designada abreviadamente por (YSZ, *yttria stablized zirconia*) foi fornecida pelo fabricante TOSOH EUROPE B.V., com densidade de 6,05 g/cm³. A estabilização da zirconia com a ítria permite que a fase cristalina predominante seja a fase tetragonal. Estes dois materiais: alumina e zirconia foram combinados, na ponderação de 90% e 10% em volume, que corresponde a uma fração mássica de 85,6 g e 14,4 g (alumina e zirconia), por forma a obter um compósito cerâmico designado por ZTA, *zirconia toughened alumina* (em português: alumina enrijecida com zirconia). As propriedades físicas da alumina e zirconia, de acordo o fabricante, está detalhada na tabela 4.

Tabela 4: Propriedades físicas dos materiais cerâmicos (ZTA)

Materiais	Massa específica (g/cm^3)	Fração mássica (%)
Alumina	3,87	85,6
Zircônia	6,05	14,4

3.1.2 Aço

A composição do aço inoxidável 304 de acordo o fabricante é representado na tabela 5.

Tabela 5: Composição química do aço. [24]

Elementos	Fração mássica (%)
Ferro	68,7 ± 3,7
Crómio	17,4 ± 1,0
Níquel	7,4 ± 0,51
Carbono	4,2 ± 2,0
Manganês	1,25 ± 0,15
Oxigénio	0,79 ± 0,47
Silício	0,32 ± 0,09

As propriedades mecânicas do aço de acordo o fabricante é representado na seguinte tabela 6.

Tabela 6: Propriedades mecânicas do aço. [24]

Materiais	Tensão limite de elasticidade à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento à rutura (%)
Aço	215	193	70

O aço inoxidável 304 é da família dos aços austeníticos e é caracterizado pelo seu excelente comportamento à corrosão, boa deformabilidade plástica, com elevada capacidade de deformação, embora com uma massa específica elevada ($\rho = 8,0 \text{ g/cm}^3$).

3.1.3 Titânio

A composição do titânio Ti25 de acordo o fabricante é representado na seguinte tabela 7.

Tabela 7: Composição química da liga de Titânio Ti25. [25]

Elementos	Fração mássica (%)
Titânio	97,0 ± 5,9
Ferro	0,19 ± 0,09
Carbono	2,42 ± 1,38
Silício	0,43 ± 0,1

As propriedades mecânicas do titânio Ti25 de acordo com o fabricante são sumariados na tabela 8.

Tabela 8: Propriedades mecânicas do Titânio Ti25. [25]

Materiais	Tensão limite de elasticidade Tensão de cedência (MPa)	Módulo Elástico (GPa)	Alongamento até à rutura (%)
Ti	350	110	23

A liga Ti25 é um titânio quase puro onde a fase alfa é predominante (estrutura cristalina hexagonal compacta), com menor resistência mecânica e maior ductilidade. Possui excelente resistência à corrosão e boas propriedades ao impacto.

3.1.4 CFRP

A descrição das matérias-primas utilizadas para o fabrico do compósito laminado: resina usada (fornecedor), fibra de carbono (fornecedor), método de fabrico sucinto.

Tabela 9: Propriedades mecânicas do CFRP. [21]

Materiais	Tensão de ruptura (MPa)	Modulo de elasticidade (GPa)	Deslocamento (%)
CFRP	808,5	54,9	1,6

3.2 Fabrico das amostras

3.2.1 ZTA

Colocou-se num vaso cerâmico, 100 g da mistura, 100 g de álcool e 100 g de bolas de alumina com 2 mm de diâmetro. Em seguida foi colocado no moinho de alta energia de marca *Fritsch* (figura 7), modelo *pulverisette 6*, com peso geral da mistura de 2,650 kg, durante três horas com a velocidade de 500 rpm. Para comparação do efeito da moagem no tamanho de partícula, retirou-se uma amostra no início do processo e após as 3 horas de moagem.



Figura 7: Vaso cerâmico no moinho de alta energia

Após as 3h a mistura cerâmica foi retirada do moinho de alta energia e secada na estufa de marca *Carbolite* durante 24h a uma temperatura de 40°C. Depois utilizamos o equipamento de peneiração *Retsch* (agitador de peneiros modelo AS200), para remover as bolas de moagem e eventuais aglomerados, com uma malha de 75 micras.

O pó fino obtido foi prensado com uma pressão de 25 MPa, na forma de placas com dimensões aproximadas de 60 mm x 60 mm x 6 mm, recorrendo a uma matriz de aço endurecido e a uma máquina de ensaio *Instron 8800* com célula de carga de 100 KN. As placas foram colocadas num forno elétrico *Termolab*, onde foi feita uma pré-queima a 1200°C, durante 2 horas. Numa máquina de corte *Struers Accutom-2* fez-se o corte da placa em barras paralelepipedas. Após o corte fez-se um pré-polimento, de modo a minimizar os riscos e outros defeitos do corte e prensagem, recorrendo a polidora *Struers*, modelo *DAP-V*. As barrinhas cerâmicas foram depois sinterizadas a 1600°C durante 2 horas.

Todas as barras cerâmicas foram polidas (Figura 8) usando uma sequência de 3 lixas (#400, #1000 e #2400), durante aproximadamente 10 minutos cada uma das lixas em cada uma das faces das barras. No final obteve-se barras com dimensões aproximadas 47 x 5 x 4 mm³.



(a) (b)
Figura 8: Processo de polimento das barras cerâmicas; a) vista da polidora; b) ilustração do polimento de uma amostra.

3.2.2 Sistema de dupla camada

Após a obtenção das barras cerâmicas contruiu-se três tipos de sistemas de dupla camada, nomeadamente: substrato de aço e revestimento de ZTA, substrato de titânio e revestimento de ZTA e substrato de CFRP e revestimento de ZTA. Na Fig.9 ilustra-se através de um esquema os diferentes sistemas. A colagem entre os substratos e o revestimento de ZTA foi realizado com recurso a um adesivo de epóxi Biresin® CR122 com endurecedor Biresin® CH122-9, com cura de 24 horas à temperatura ambiente e uma pós-cura de 12h a 55°C.

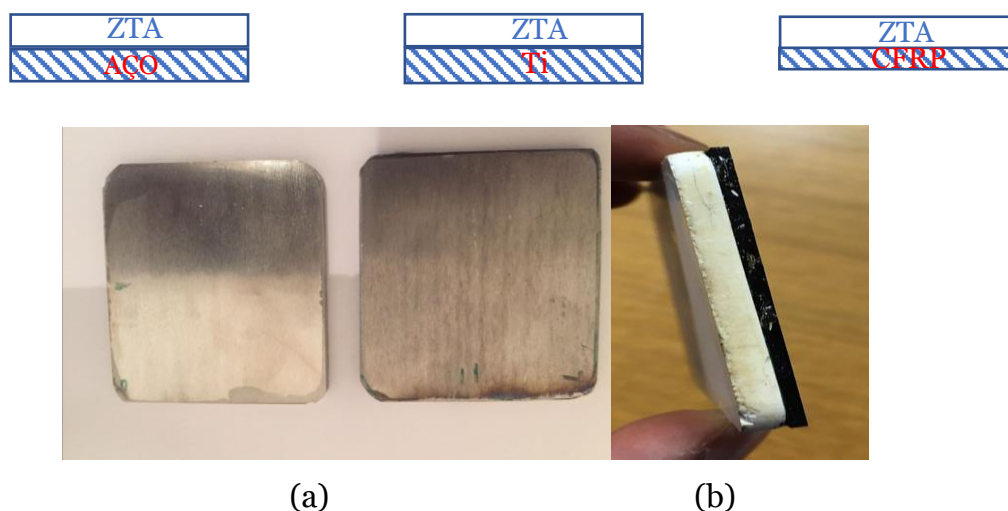


Figura 9: a) esquema da secção do sistema de dupla camada: ZTA/aço e ZTA/titânio; b) secção do sistema de dupla camada ZTA/CFRP.

3.3 Metodologias de caracterização

3.3.1 Densidade aparente e porosidade aparente

A densidade aparente, a porosidade aparente e a absorção da água foram determinadas seguindo a norma ASTM C20, baseada no princípio de Arquimedes, para tal foi preciso determinar três massas diferentes: Massa seco das amostras, e duas outras massas: i) massa saturada – correspondendo à massa das amostras após 24 imersa em água destilada; ii) massa imersa – correspondendo à massa da amostra quando imersa em água destilada. Nos

cálculos com as equações seguintes a densidade (ou massa específica) da água destilada foi sempre considerada de 1 g/cm³.

Com a equação (1) determinou-se o volume exterior:

$$V = W - S \text{ [cm}^3\text{]} \quad (1)$$

Onde V é o volume exterior, W é a massa saturada e S é a massa imersa. O volume de poros abertos determinou-se com a equação (2):

$$V_{OP} = W - D \text{ [cm}^3\text{]} \quad (2)$$

Onde D é a massa a seco. O volume de porção impermeável é obtido pela equação (3):

$$V_{IP} = D - S \text{ [cm}^3\text{]} \quad (3)$$

A porosidade aparente (P) determina-se pela equação (4):

$$P = \frac{W-D}{V} \text{ [%]} \quad (4)$$

A absorção de água (A) determina-se pela equação (5):

$$A = \frac{W-D}{D} \text{ [%]} \quad (5)$$

A gravidade específica aparente (T) determina-se pela equação (6):

$$T = \frac{D}{D-S} \text{ [%]} \quad (6)$$

A densidade aparente (B) determina-se pela equação (7):

$$B = \frac{D}{V} \text{ [} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\text{]} \quad (7)$$

3.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico

Os ensaios para determinar o módulo de elasticidade foram determinadas à temperatura ambiente através de ensaios não destrutivos. Seguiu-se a norma ASTM C1198-01, e o princípio de vibração por ultrassons, através do equipamento GrindoSonic Mk7. O cálculo do módulo de elasticidade dinâmico é determinado pela equação (8):

$$E = 0,9465 \times \frac{m \times ff^2}{b} \times \frac{L^3}{t^3} \times T1 \quad (8)$$

Onde E é o Módulo de Elasticidade [GPa], m é a Massa da barra [g], b é a Largura da barra [mm], L é o Comprimento da barra [mm], t é a Espessura da barra [mm], ff é a Frequência fundamental de ressonância da barra [Hz], e T1 é o Fator de correção para uma barra de espessura finita. A leitura do equipamento permite obter uma lista de valores para o módulo de elasticidade tendo por base a frequência fundamental de ressonância. Cabe ao utilizador seleccionar os valores estatisticamente adequados.

3.3.3 Ensaio de flexão em três pontos

Os testes estáticos de flexão de três pontos (3PB, *3 point bending*) Fig.10, segundo a norma C 1161 foram realizados à temperatura ambiente usando as barras cerâmicas de ZTA com dimensões aproximadas de $47 \times 5 \times 4 \text{ mm}^3$.



Figura 10: Vista geral da máquina de ensaio flexão em três pontos.

Também foram realizados ensaios em corpos de prova compostos (figuras 11 (a) e 11 (b)), isto é, substrato de aço e revestimento cerâmico de ZTA, substrato

de titânio e revestimento cerâmico de ZTA, substrato de CFRP e revestimento cerâmico de ZTA. Durante os ensaios dos sistemas de dupla camada foi usado um filme polimérico por forma a promover uma superfície de contato suave entre os apoios, punção e as amostras.

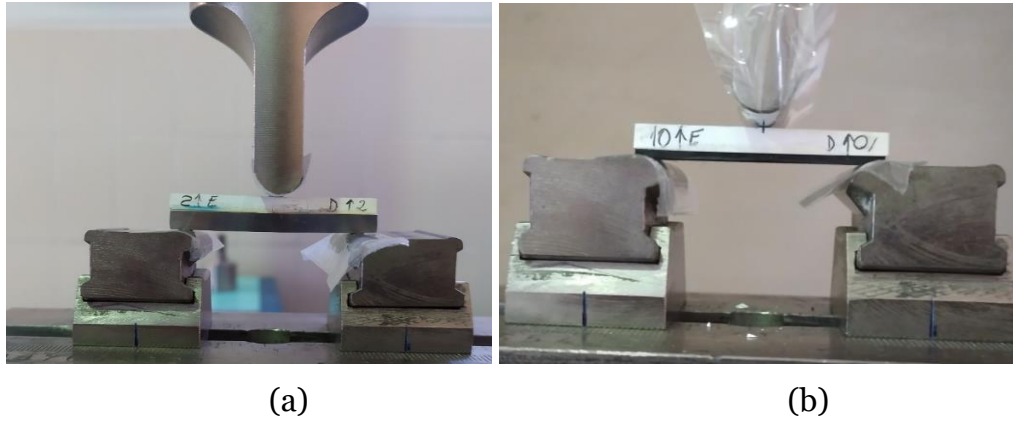


Figura 11: Ilustração dos ensaios de flexão em três pontos; a) ZTA/aço, b) ZTA/CFRP.

Os ensaios foram realizados numa máquina de teste universal AGS-X, da Shimadzu, com célula de carga de 10 kN e taxa de deslocamento de 5mm/min. Foram usadas cinco amostras diferentes de cada conjunto.

Para calcular a tensão de flexão usou-se a equação (9):

$$Z = \frac{3 F J}{4 b t^2} \quad (9)$$

Onde Z é a Tensão de rutura à flexão [MPa], F é a Força [N], J é a distância entre apoios [mm], b é a Largura da barra [mm] e t é a Espessura da barra [mm].

A taxa de deformação foi determinada pela norma ASTM D790, aplicando a equação (10):

$$\varepsilon = \frac{6 k \times v}{j^2} \quad (10)$$

Onde ε é a taxa de deformação da viga [%], k é a deformação do centro da barra [mm], v é a Espessura do provete [mm] e j é o Comprimento entre apoios

[mm]. A rigidez (módulo de elasticidade) de cada material individualmente e dos sistemas de dupla camada foi determinado pelo declive, na região elástica, da curva tensão/deformação.

3.3.4 Ensaio de Dureza

As metades das amostras cerâmicas resultantes dos ensaios de flexão em 3 pontos foram embutidas em resina EpoxiCure-2. Depois foram polidas usando uma sequência de panos MD, comuns no polimento cerâmico até menos de 1 micra, na polidora RotoPol-21, Struers.

O cálculo da dureza de *Vickers* (HV) foi determinado através das equações (11):

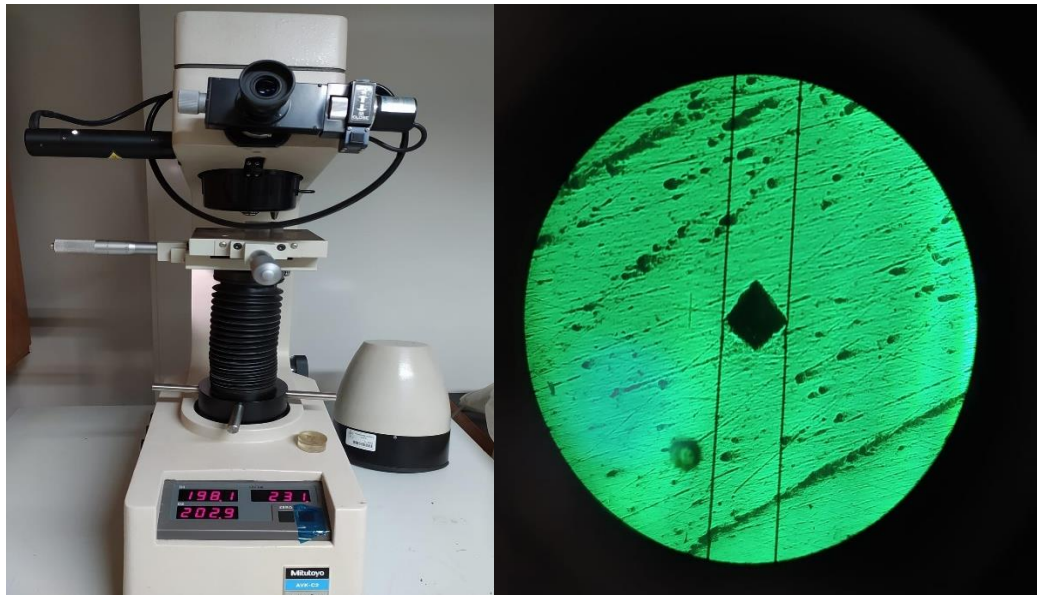
$$HV = 0,102 \times 1,8544 \times \frac{F}{U^2} \quad (11)$$

Onde HV é a dureza de *Vickers* [HV], F é a força utilizada [N] e U é a média do comprimento das diagonais (mm) da marca que resulta da indentação na superfície do material.

A dureza, em GPa, foi obtida através da equação (12):

$$H = HV \times 0,009807 \quad (12)$$

Onde H é a dureza [GPa] e HV é a dureza de *Vickers* [HV], fazendo recurso da máquina micro durometro *Vickers* da marca *Mitutoyo* figura 12.



(a)

(b)

Figura 12: a) Micro durometro Vickers; b) Marca da dureza Vickers

3.3.5 Microestrutura

As microestruturas da superfície cerâmica, foram obtidas após polimento e ataque térmico de realce do contorno de grão. As superfícies foram analisadas através do microscópio eletrônico SEM (*scanning electron microscopy*) Hitachi S-3400 N, aplicando uma tensão de aceleração de 20 kV. O ataque térmico foi realizado durante 30 min a 1440 °C com uma taxa de aquecimento e arrefecimento de 10 °C/min. As superfícies analisadas foram previamente revestidas com um filme de ouro, usando uma bomba turbo molecular Quorum Technologies, Q150 T Plus.

3.3.6 Ensaio de compressão com velocidade variável

Descrição da máquina

A máquina é composta por uma estrutura base constituída por um perfil em I soldado a 3 pilares fixos ao chão do laboratório e 2 perfis em U ligados através de cordões de soldadura a meia altura dos pilares, de forma a criar um anel estrutural que não sofra deformação elástica quando solicitado com os carregamentos necessários para a execução de ensaios de compressão. Esta estrutura pode ser observada na figura 13 (a). Acoplados a esta estrutura base estão os componentes que constituem a chamada estrutura de suporte, estes

encontram-se fixos a estrutura base. Na figura 13 (b) diferenciam-se duas zonas: “Zona de Ensaio” onde ocorre se coloca a amostra e esta sofre a compressão com velocidade variável e a “Zona de Dissipação” onde é dissipada a energia fornecida às barras.[26]

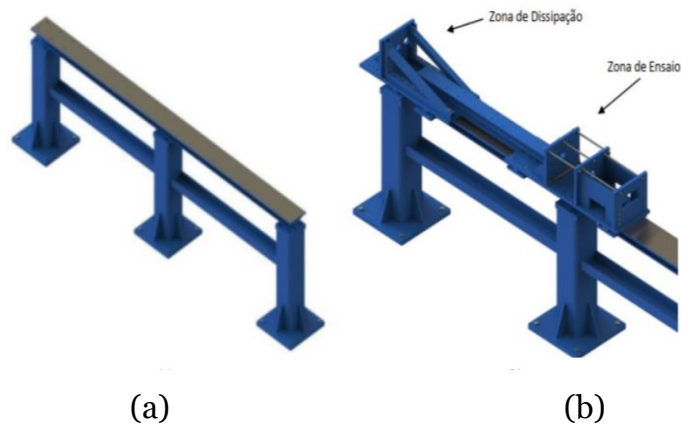


Figura 13: Componentes estruturais da máquina: (a) Estrutura base; (b) Estrutura Suporte. [27]

Estas duas zonas são conectadas através de um perfil em I aparafusado as placas que se encontram fixas a mesa superior da viga em I da estrutura base. Esta viga serve também de apoio a instalação dos rolamentos lineares da barra transmissora. Na figura 14 fez-se a descrição dos principais elementos que compõe a máquina. [27]

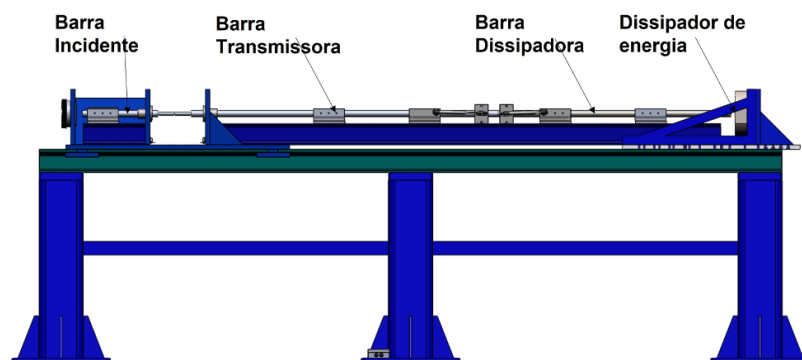


Figura 14: Principais elementos que compõe a máquina. [27]

O ar pressurizado dentro da câmara, aquando da abertura da válvula, escoia através do tubo devido ao diferencial de pressão com a atmosfera empurrando o projétil impulsionando-o contra a barra incidente a velocidades elevadas. A barra transmissora transmite onda para a barra dissipadora nas extremidades das barras onde acontecem os ensaios, foram introduzidas hastes de compressão, fabricadas em Carboneto de Tungsténio com matriz de Cobalto com 18mm de diâmetro, a barra dissipadora, cujo propósito passa por receber a onda que seria transmitida pela barra transmissora e dissipar esta onda. Para a realização dos ensaios de compressão desejados é necessário fornecer uma grande quantidade de energia as barras, energia esta que necessita de ser dissipada na zona de dissipação por forma a não danificar nenhum componente bem como para reduzir o ruído detetados nos extensómetros causado pela onda refletida na interface da barra transmissora.

Sistema de Aquisição de Dados

Para a aquisição dos dados, foi necessário aliar aos sensores referidos anteriormente uma placa de aquisição de dados. Nesta implementação utilizou-se uma placa de aquisição de dados do fabricante *National Instruments*, modelo PCI 6115, que permite a aquisição simultânea de 4 canais até 10 MHz, 16MS, 12bits até 42V. Esta placa foi conectada por cabo, bidireccionalmente, a uma caixa de ligações do fabricante *National Instruments*, modelo BNC-2120, que permite a utilização dos cabos coaxiais vindos dos sensores de deslocamento e do sensor de força. Os dados são depois visualizados e registados recorrendo ao software LabView com recurso a programas desenvolvidos pelo autor. Os sistemas necessários à aquisição e tratamento de dados foram acomodados num carrinho movel apresentado na figura 15, onde se pode observar o PC e a placa de conexões utilizados, bem como o amplificador de sinais. [27]



Figura 15: Carrinho móvel com sistema de aquisição de dados

Disposição final do aparato

A construção de um aparato experimental capaz de realizar ensaios de compressão uniaxiais com uma vasta gama de velocidades de deformação e de temperaturas.

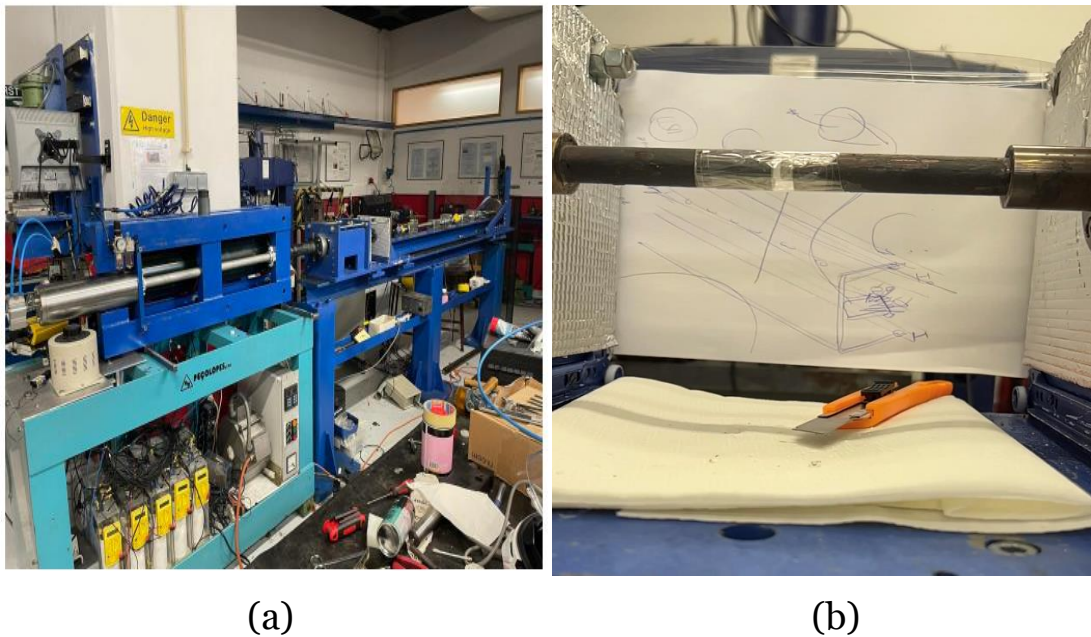


Figura 16: Configuração final do aparato experimental. a) vista geral; b) detalhe da amostra preparada para ensaio.

Método de ensaio

Para realização do ensaio de impacto considerado exploratório utilizou-se oito (8) provetes do sistema de dupla camada formado por ZTA/aço e ZTA/CFRP com dimensões variáveis e geometria retangular.

As amostras do sistema de dupla camada usadas neste ensaio foram barras paralelepípedas sobrepostas de ZTA/aço e ZTA/CFRP, com dimensões apresentadas nas tabelas 10 e tabela 11 para cada uma das amostras.

Para a compressão dos provetes a máquina tem um sistema de dois pratos (superfície da haste como mostra figura 16), com um comprimento saliente de 80 mm e diâmetro de 18 mm a direita e a esquerda, que entra em contacto com os provetes figura 17 (a). Cada prato contém um sensor que permite avaliar os respetivos descolamentos depois do impacto.

Os provetes foram colocados na vertical onde a zona de contato com a prato de compressão(esquerda) era a ZTA para todos os ensaios e utilizamos fita-cola para manter fixo os provetes de forma a ajustar-se as condições da máquina. Figura 17 (b).



Figura 17: Extremidades das barras transmissoras com hastes de compressão
(a) Hastes longas; (b) Hastes com provete

Os ensaios foram realizados com diferentes pressões e de forma a obter respostas do sistema de dupla camada em diferente sistema ZTA/aço e ZTA/CFRP como mostra as tabelas 10 e tabela 11 utilizou-se um projétil 3,23 kg.

Tabela 10: Sistema de dupla camada ZTA/aço

	Numeração dos Provetes	Pressão (bar)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
ZTA	2	2	47,05	4,14	3,75
Aço			48	48	5
ZTA	9	4	46,91	4,51	4,37
Aço			48	48	5
ZTA	17	3	47,03	4,19	3,03
Aço			48	48	5

Tabela 11: Sistema de dupla camada ZTA/CFRP

	Numeração dos Provetes	Pressão (bar)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
ZTA	24	2	46,6	4,35	3,8
CFRP			47	47	2
ZTA	28	4	46,7	4,40	4,37
CFRP			47	47	2
ZTA	32	3	46,8	4,45	3,67
CFRP			48	47	2

Como resultados destes ensaios vamos obter a resposta a curva de tensão em função da extensão.

A Energia de impacto descrito na tabela 17, foi obtida a partir da seguinte equação:

$$E_i = \frac{1}{2} * m_p * V_v^2 \quad (13)$$

Onde E_i energia de impacto (J), m_p massa do projétil (kg) e V_v velocidade variável (m/s). Os cálculos da área representam a energia remanescente, de cada material que formam os sistemas de duplas camadas (J). Com os materiais a apresentarem respostas de forma individual, a energia remanescente total dos sistemas de dupla camada (ZTA/aço e ZTA/CFRP) resulta da soma entre as energias remanescente dos materiais de forma individual que formam o sistema de dupla camada descrito na tabela 18.

A taxa de absorção (%), resulta da relação entre a Energia remanescente total dos sistemas de duplas camadas (ZTA/aço e ZTA/CRFP) e a Energia remanescente dos materiais de forma individual.

A extensão foi obtida a partir da seguinte equação:

$$\varepsilon' = \ln (d_2/d_1) \quad (14)$$

Onde ξ representa a extensão (%), d_1 e d_2 representam deslocamento a direita e a esquerda respetivamente (mm).

3.3.7 Ensaio de projétil balístico

Estes ensaios foram realizados em corpos de prova sistema de dupla camada, isto é substrato e revestimento cerâmico. Na qual utilizou-se uma máquina laboratorial de ensaios balísticos (Fig. 18), cuja características é constituído por dois módulos, um ambiente isolado do exterior, gaiola de segurança, em perfil *Bosch*. [28]

Os ensaios realizados para caracterizar os materiais não foram realizados nos sistemas de dupla de camada formado por ZTA/aço e ZTA/Ti. A razão desta decisão prende-se com o facto dos ensaios, de natureza destrutiva para esses sistemas possuem um custo elevado.



Figura 18: Esquema da máquina laboratorial de ensaios balístico

A gaiola de segurança era constituída por janela de acrílico com 5mm de espessura e dentro desta encontram-se os cronógrafos, onde o cronógrafo 1 mede a velocidade incidente (em m/s) e o cronógrafo 2 a velocidade residual após impacto do projétil com a amostra e os suporte de provetes. Encontra-se um orifício em cada uma das janelas laterais de gaiola, que possibilitam a passagem do projétil para o sistema de dissipação de energia destes. O dissipador de energia cinética que anima os projéteis caracteriza-se por uma pirâmide quadrangular que corrige eventuais alterações de trajetória do projétil em aço com 5mm de espessura. O acesso ao interior é realizado elevando os perfis frontal e superior da gaiola, com o auxílio de amortecedores hidráulicos.

Utilizou-se um projétil de aço de forma esférica (Fig. 19 (a)) durante os ensaios para um total de 4 amostras.



Figura 19: Imagem do aparato de ensaio balístico. a) Projétil esférico usado no ensaio balístico; b) vista geral do ensaio.

Os valores de velocidade foram conseguidos custa de uma carabina de ar comprimido na ordem dos 150 bar, que impôs energia cinética ao projétil.

Tabela 12: Caraterística do projétil e condições de ensaio

	Tipo	Massa (g)	Diâmetro (mm)	Velocidade incidente (m/s)	Velocidade residual (m/s)
Projétil	Esférico	2,056	8	-	-
CFRP	-	-	-	397,35	345,40
ZTA/CFRP	-	-	-	398,95	48,8

Capítulo 4 – Análise de resultados

Neste capítulo é feita análise discussão dos resultados obtidos com base nos ensaios realizados.

4.1 Resultados e Discussão

4.1.1 Propriedades da ZTA

A figura seguinte representa o tamanho das partículas dos pós usados no fabrico da cerâmica no início e no fim da moagem. O processo da moagem visa a diminuição do tamanho da partícula e a homogeneização da composição. Com a diminuição do tamanho das partículas melhora-se as condições de sinterização da cerâmica.

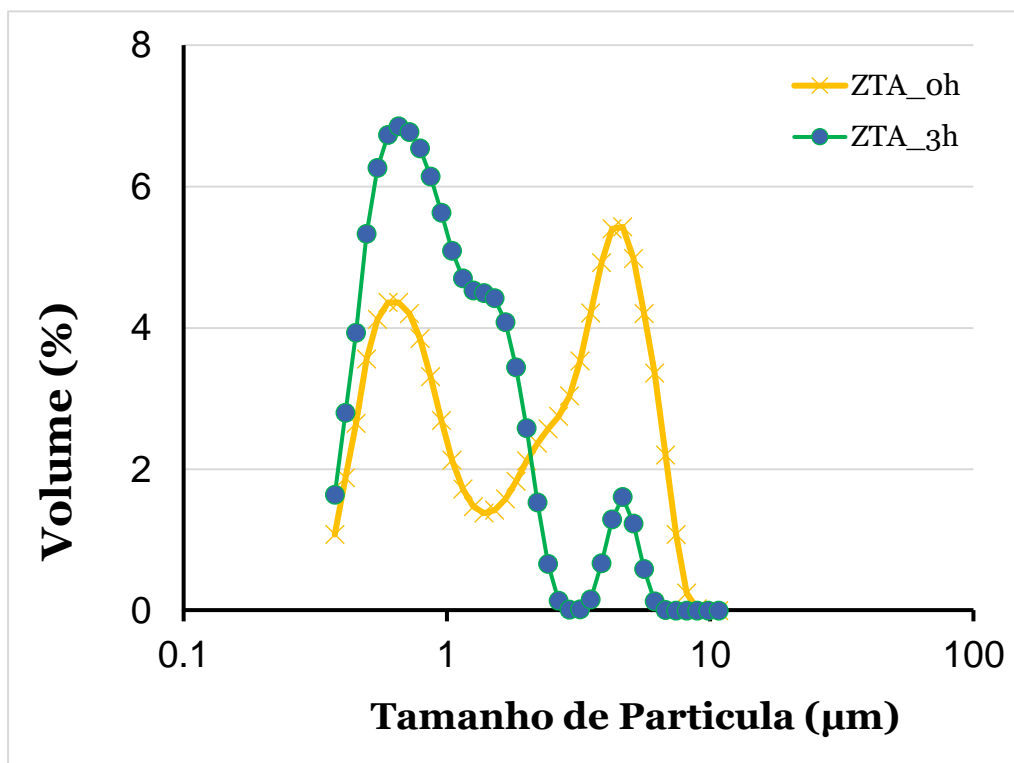


Figura 20: Evolução do tamanho de partícula com o tempo de moagem

É possível analisar que os tamanhos maiores das partículas diminuíram de (5,4 para 1,61 µm) e os tamanhos finos aumentaram de (4,36 a 6,85 µm) com o passar do tempo de moagem, quando se tem partículas mais finas tem se mais pontos de contatos e quando se faz a sinterização a difusão acaba por ser mais

eficiente. Após a sinterização obteve-se as placas de ZTA que foram cortadas em barras paralelepípedas e caracterizadas.

Tabela 13: Resultados obtidos experimentalmente

Material	Porosidade aparente (%)	Densidade aparente (g/cm^3)	Densidade relativa (g/cm^3)
ZTA	$0,195 \pm 0,003$	$3,942 \pm 0,003$	$94,0 \pm 0,003$

Os resultados apresentam um baixo desvio padrão o que é resultado de amostra com grande homogeneidade e do elevado grau de acuidade na metodologia de fabrico das amostras cerâmicas. A porosidade aparente é muito reduzida, inferior a 1%, no entanto a densidade relativa fica-se pelos 94 %. Assim, em teoria haverá 6% de porosidade. Como a densidade aparente é uma medida que é obtida como resultado da existência de poros abertos, esta porosidade terá de ser fechada, isto é, dentro da cerâmica. Tal fato está de acordo com a microestrutura apresentada na figura 21 onde se observam poros fechados.

Os resultados obtidos da densidade aparente e porosidade aparente apresentam uma diferença de 5,63% e 10% respetivamente quando comparados com os resultados da literatura do Zhang et. al [8].

Microestrutura

A análise da microestrutura da ZTA (Fig. 21) permite visualizar a superfície das diferentes fases que constituem a composição do material.

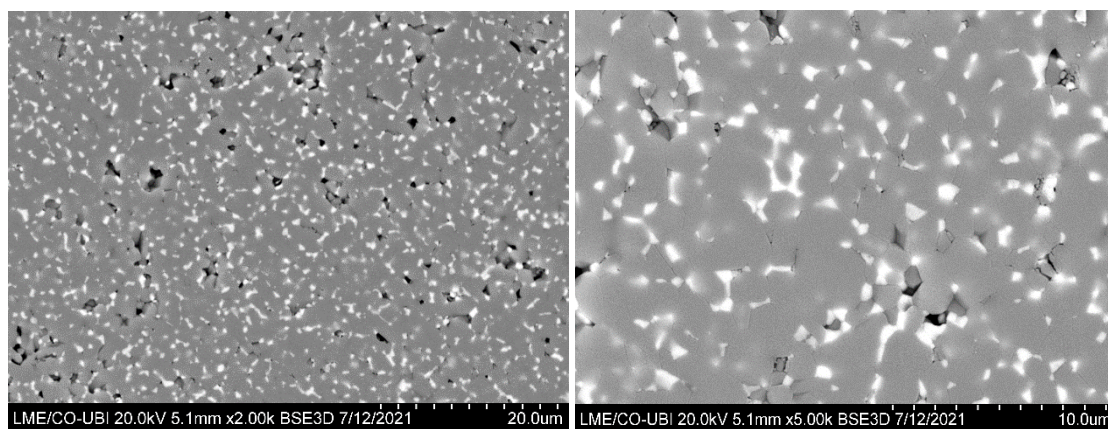


Figura 21: Microestruturas características do material ZTA: a) com menor ampliação (2000 \times); b) com maior ampliação (5000 \times)

A imagem de menor ampliação permite uma visualização geral da distribuição homogênea dos grãos de zirconia ao longo dos grãos de alumina, algumas regiões com poros de dimensão reduzida e também algumas regiões de elevada densificação (sem poros). Para ampliação mais elevada (5000×) observam-se detalhes da forma e tamanho de grão bem como a definição das fronteiras entre grãos.

4.1.2 Ensaio de flexão dos materiais individualmente

Na (Fig. 22) apresentam-se os resultados dos ensaios de flexão em 3 pontos realizados aos materiais individualmente: cerâmica (ZTA), os metais titânio (Ti) e o aço e o compósito laminado de carbono (CFRP).

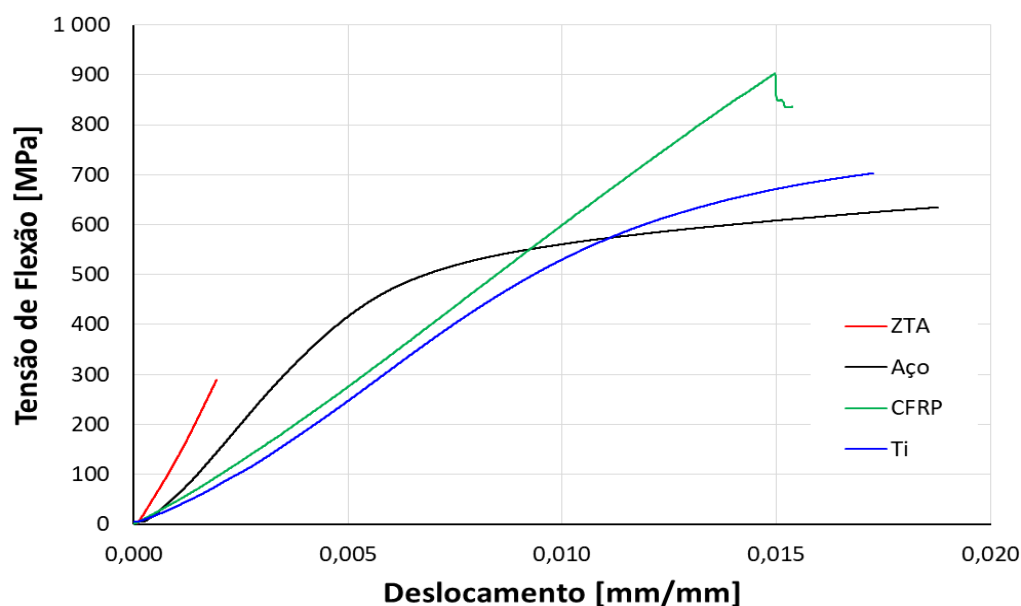


Figura 22: Comportamento mecânico em flexão em 3 pontos dos diferentes materiais ensaiados individualmente

Observa-se que a cerâmica ZTA apenas apresenta comportamento linear elástico, isto é, como esperado não apresenta deformação plástica e a sua rutura é total (catastrófica). No caso das ligas metálicas (Ti e Aço), como esperado, observa-se um comportamento linear elástico e posteriormente um comportamento plástico não linear e durante o ensaio não ocorreu rutura. O

material compósito de fibra de carbono (CFRP) tem um comportamento linear elástico e ocorre rutura por etapas, isto é, o laminado sofre primeiro uma rutura parcial das camadas superiores sujeitas a forças de compressão. Ao analisarmos os valores de resistência mecânica (tensão de flexão) conclui-se que a ZTA tem uma menor resistência com uma tensão máxima de 370,5 MPa e o CFRP tem um valor de resistência mecânica próximo de 900 MPa. Nos metais considerou-se a tensão limite de elasticidade onde o aço tem um valor aproximado de 396,6 MPa e a liga de titânio apresenta uma tensão de 562,3 MPa.

Da análise da taxa de deformação observa-se que a ZTA tem a menor deformação de 0,00193 enquanto a maior taxa de deformação é para o CFRP com um valor de 0,01496. Da análise do declive (proporcional à rigidez do material) observa-se que a ZTA apresenta um maior valor e o CFRP e a liga de titânio os menores valores. Na Tabela 14 apresenta-se um sumário dos valores médios obtidos.

Tabela 14: Resumo de propriedades mecânicas dos materiais ensaiados individualmente

Materiais	Tensão à Flexão (MPa)	Rigidez (GPa)	Taxa de Deformação $\times 10^{-3}$ (mm/mm)
ZTA	301,1 \pm 13,9	166,6 \pm 22,1	1,93 \pm 0,0001
Aço	392,0 \pm 8,9	100,3 \pm 10,3	4,65 \pm 0,0001
Ti	522,6 \pm 8,3	59,4 \pm 8,7	7,68 \pm 0,0001
CFRP	884,5 \pm 37,6	61,4 \pm 7,8	14,96 \pm 0,001

Os valores obtidos nos ensaios dos materiais individualmente são similares aos encontrados nas literaturas. Por exemplo, para o CFRP, Santos et. al [21] obteve uma tensão de flexão de 808,48 MPa, uma rigidez de 54,89 GPa e um deslocamento de 15,7 mm/mm. As pequenas diferenças são explicadas pelas condições de ensaios distintas (por exemplo, o valor da velocidade de ensaio foi de 2mm/min e a distância entre apoios foi maior, 40 mm). No caso da ZTA Huang et. al [20] obteve uma rigidez de 370 GPa. Enquanto o aço [24] e o Ti [25],

segundo os fabricantes tiveram 110 e 193 GPa respectivamente. O módulo de elasticidade da ZTA é duas vezes maior comparando com o valor na literatura Zhang et al [8]. A tensão à flexão do CFRP é cerca de 24,6 e 59,4% maior que os valores apresentados por Alfredo et al. [28] que utilizou fibras de vidro e aramida.

4.1.3 Ensaio de flexão do sistema de dupla camada ZTA/aço

Os resultados dos ensaios de flexão em 3 pontos do sistema de dupla camada por um substrato de aço com material cerâmico (ZTA) sobreposto estão ilustrados na Fig. 23. Para facilitar a comparação representa-se também as curvas resultantes dos ensaios individuais do aço e da cerâmica (ZTA).

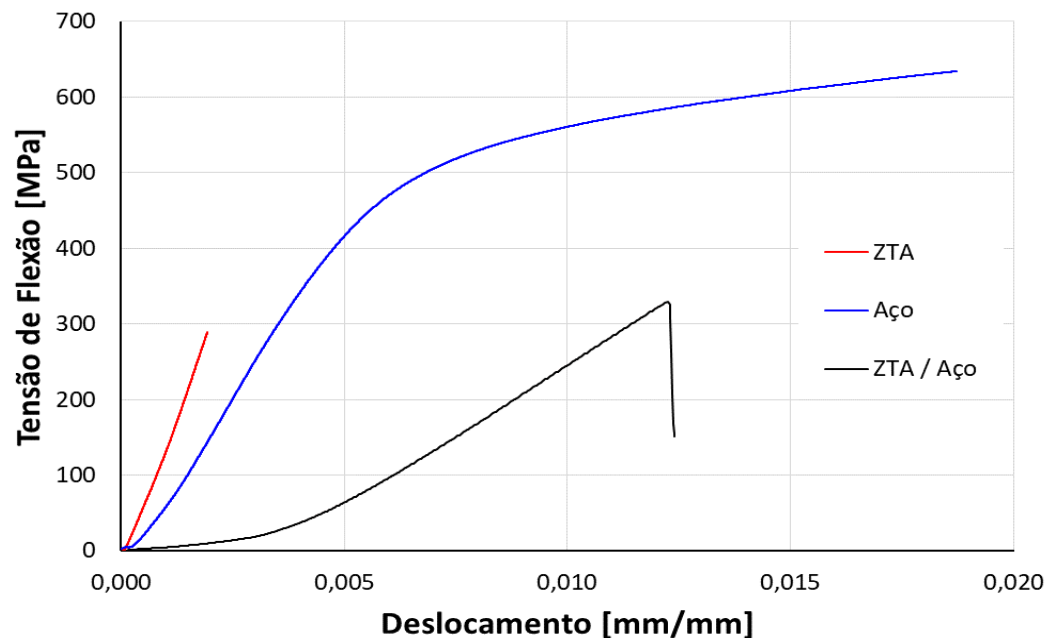


Figura 23: Comportamento mecânico em flexão em 3 pontos do sistema de dupla camada: sistema ZTA - aço

O sistema de dupla formado pelo ZTA/Aço, apresenta um comportamento inicial não linear, explicado pela deformação dos apoios e da compliância do sistema de ensaio, após o qual se observa um comportamento linear-elástico seguido de rutura total. A rutura total ocorre apenas no revestimento cerâmico, pelos 332 MPa, mantendo-se intato o substrato de aço.

Observa-se que sistema de dupla camada apresenta maior taxa de deformação elástica (aproximadamente 0,01225 mm/mm) que o aço e o ZTA quando ensaiados individualmente. Isto é, a presença da cerâmica vai distribuir a força por uma área do aço maior e observa-se uma maior capacidade de deformação elástica da liga de aço. Consequência da maior capacidade de deformação a rigidez do composto ZTA/Aço é menor do que para os materiais individualmente, observando-se um valor de 36,6 GPa, correspondendo a uma redução de 63% quando comparada com o valor obtido para o aço individualmente.

4.1.4 Ensaio de flexão do sistema de dupla camada ZTA/titânio

Os resultados dos ensaios de flexão em 3 pontos do sistema de dupla camada compostos por um substrato de titânio com material cerâmico (ZTA) sobreposto estão ilustrados na Fig. 24. Para facilitar a comparação representa-se também as curvas resultantes dos ensaios individuais da cerâmica (ZTA) e da liga de titânio (Ti).

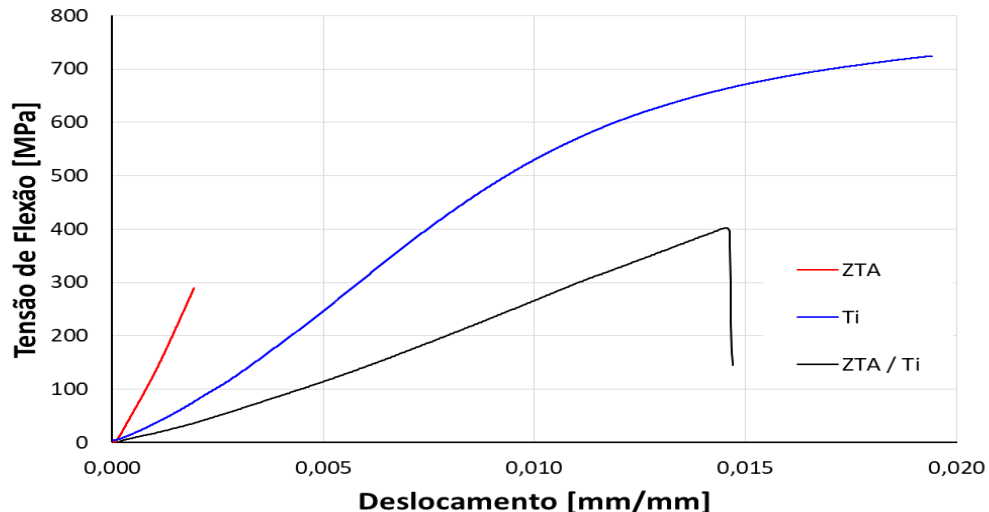


Figura 24: Comportamento mecânico em flexão em 3 pontos do sistema de dupla camada: sistema ZTA/titânio

O sistema de dupla camada formado por ZTA/titânio apresenta um comportamento linear seguido de ruptura total. A ruptura total ocorre apenas no revestimento cerâmico, aproximadamente a 402,1 MPa, mantendo-se intato o

substrato de titânio. Observa-se que o material composto apresenta maior deformação linear elástica do que a liga de titânio e o ZTA individualmente, com uma taxa de deformação aproximada de 0,01457 mm/mm. Isto é, tal como no composto anterior a presença da armadura de cerâmica vai distribuir a força por uma área maior do substrato de titânio.

A rigidez do composto de ZTA/titânio reduz-se para 29,5 GPa, isto é, uma diminuição de 50% quando comparada com a liga de titânio ensaiada individualmente.

4.1.5 Ensaio de flexão do sistema de dupla camada ZTA/CFRP

Os resultados dos ensaios de flexão em 3 pontos do sistema de dupla camada compostos por um substrato de compósito laminado de carbono com material cerâmico (ZTA) sobreposto estão ilustrados na Fig. 25. Para facilitar a comparação representa-se também as curvas resultantes dos ensaios individuais da cerâmica (ZTA) e do compósito laminado de carbono (CFRP).

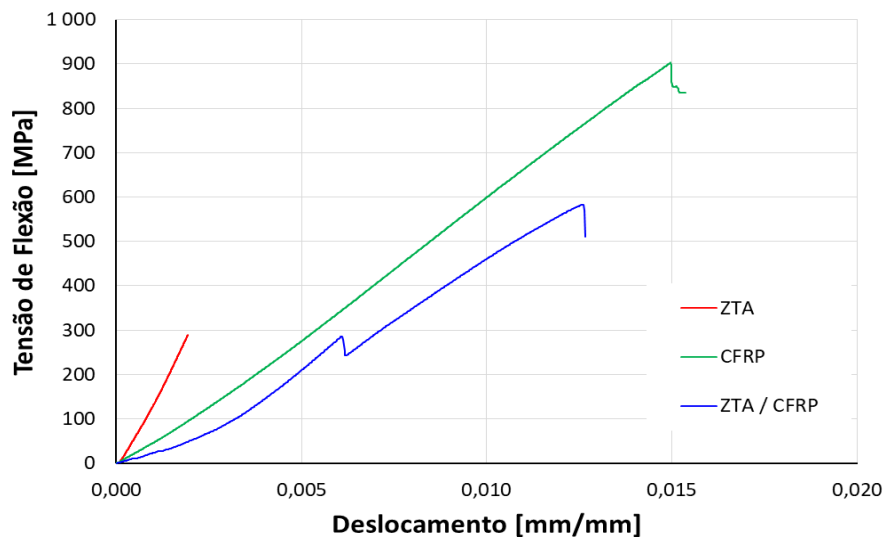


Figura 25: Comportamento mecânico em flexão em 3 pontos do sistema de dupla camada: sistema ZTA/CFRP

O sistema de dupla camada formado por ZTA/CFRP apresenta um comportamento típico linear dividido em duas etapas. Ao fim da primeira etapa

dá-se uma primeira rutura pelos ~ 285 MPa, seguido de um comportamento novamente linear e posterior rutura total. A primeira rotura corresponde à fratura do adesivo de resina epóxi utilizada na junção da armadura cerâmica de ZTA com o substrato de CFRP (ver Fig. 26). Isto é, observa-se uma série de ruturas no adesivo polimérico colocado na interface entre a armadura de cerâmica e o substrato de CFRP. Este fenómeno deve-se à diferença de deformações entre o substrato de CFRP, que possui maior capacidade de deformação elástica ($14,96 \times 10^{-3}$ mm/mm) e a reduzida deformação do material cerâmico da armadura ($1,96 \times 10^{-3}$ mm/mm). A rotura total ocorre ~ 583 MPa no material cerâmico mantendo-se também intato o substrato de CFRP.

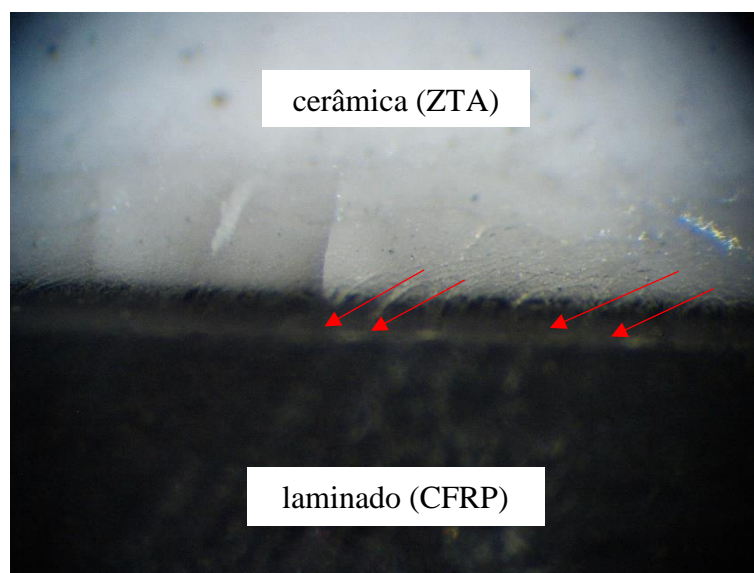


Figura 26: Ilustração da rutura no adesivo polimérico de resina epóxi. As setas indicam a região da interface onde ocorreu a rutura e visualizam-se diversas fissuras na superfície da resina que reveste superficialmente a cerâmica

Para a rigidez do sistema de dupla camada ZTA/CFRP observa-se na primeira etapa uma rigidez de 57,4 GPa e na segunda etapa 54,6 GPa, isto é, uma pequena redução em relação ao valor médio de 61,4 GPa observado para o CFRP ensaiado individualmente. A redução da rigidez na segunda etapa deve-se à maior deformação na interface devido à rutura do adesivo polimérico.

Na Fig. 27 apresenta-se, num mesmo diagrama, por forma a facilitar a comparação o comportamento mecânico dos três sistemas compostos constituídos pela armadura cerâmica de ZTA e os três substratos estudados de

aço, titânio e CFRP. Na tabela 15 faz-se um resumo dos valores médios da tensão de rutura, rigidez e taxa de deformação para cada um dos três sistemas de dupla camada.

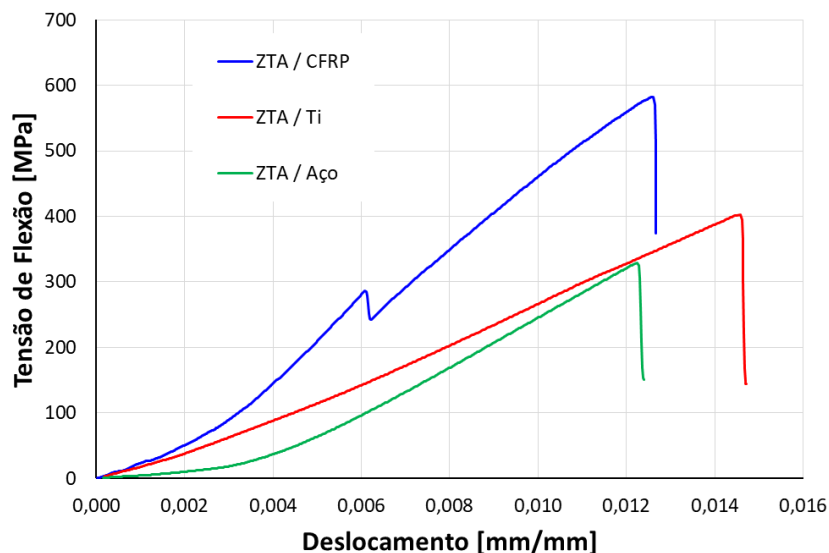


Figura 27: Comportamento mecânico em flexão em 3 pontos do sistema de dupla camada constituídos pelos sistemas ZTA/Aço, ZTA/Ti e ZTA/CFRP

Da comparação entre os três sistemas de duplas camadas observa-se que a maior tensão de rutura correspondendo à fratura da armadura cerâmica ocorre para ZTA/CFRP. Comparativamente com o ZTA/CFRP a tensão de rutura no sistema ZTA/Ti é 31% inferior e no sistema ZTA/Aço é 43% inferior.

Tabela 15: Resumo das propriedades mecânicas dos ensaios dos materiais compostos. Onde (1) e (2) correspondem à rigidez média na etapa 1 e 2, respectivamente, do sistema ZTA/CFRP

Sistema composto	Tensão à Flexão (MPa)	Rigidez (GPa)	Taxa de Deformação $\times 10^{-3}$ (mm/mm)
ZTA/Aço	$332,2 \pm 36,8$	$36,6 \pm 2,4$	12,25
ZTA/Ti	$402,1 \pm 34,2$	$29,5 \pm 2,4$	14,57
ZTA/CFRP	$582,6 \pm 8,8$	$57,4 \pm 4,6^{(1)}$ $54,6 \pm 12,9^{(2)}$	12,56

A taxa de deformação é semelhante verificando-se um valor 16% superior para o sistema ZTA/Ti e um valor inferior para o sistema ZTA/Aço de 2,5%. Para a rigidez observa-se uma maior rigidez no sistema ZTA/CFRP, assim, considerando a etapa inicial há uma redução de 36% na rigidez do sistema ZTA/Aço e uma redução de 49% na rigidez para o sistema ZTA/Ti.

4.1.6 Ensaios de Dureza

E para os resultados de dureza constatou-se que a ZTA é maior relativamente aos metais, atingindo um valor de 1407 HV. A dureza obtida da ZTA é cerca de 21.4% menor comparando com a literatura Savio et. Al [7] e o Ti e o aço tiveram 165,2 e 186,5 HV, respectivamente. Não foi possível fazer a caracterização da dureza através do sistema Vickers no laminado de carbono CFRP.

Tabela 16: Dureza dos materiais individualmente

Material	Dureza (HV)	Dureza (GPa)
ZTA	1407 ± 12,12	13,8
Ti	165,2 ± 4,83	1,6
Aço	186,5 ± 5,02	1,8

4.1.7 Ensaio de compressão com velocidade variável

Para o tratamento dos resultados fez-se o recurso ao Excel de modo a obter o diagrama de sinais elétricos em volts e dos movimentos relativos à esquerda e à direita (Fig. 28), que posteriormente foram convertidos em força. A força foi obtida multiplicando a tensão elétrica pela constante 11109,26 valor da fornecido pelo laboratório fruto da calibração por eles feito.

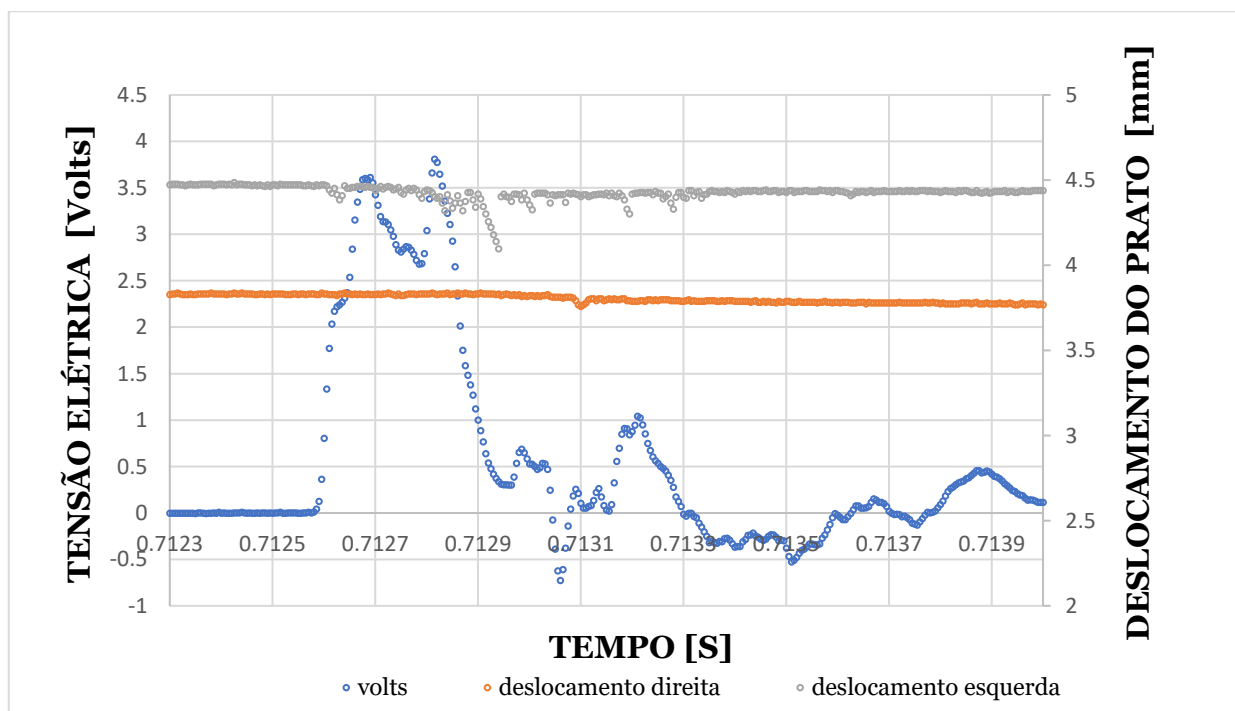


Figura 28: Diagrama de sinais elétricos

Os sistemas de dupla camada ZTA/Aço e ZTA/CFRP foram submetidos a ensaios de impacto para três velocidades distintas (6,85 m/s, 7,9 m/s e 8,95 m/s). Avaliar a sensibilidade da resposta mecânica da blindagem a condições de ensaio

dinâmica a diferentes velocidades de impacto, assim sendo os materiais apresentaram seguintes comportamentos:

- i. Resposta individual dos materiais;
- ii. Resposta do sistema de dupla camada ZTA/aço;
- iii. Resposta do sistema de dupla camada ZTA/CFRP;

I. Resposta individual dos materiais

Como resultado da análise do diagrama da figura 28, isto é, dos movimentos (à esquerda e à direita) e da intensidade do sinal elétrico obteve-se as respostas individuais (figuras 29 a 32) de cada material constituinte do sistema de dupla camada.

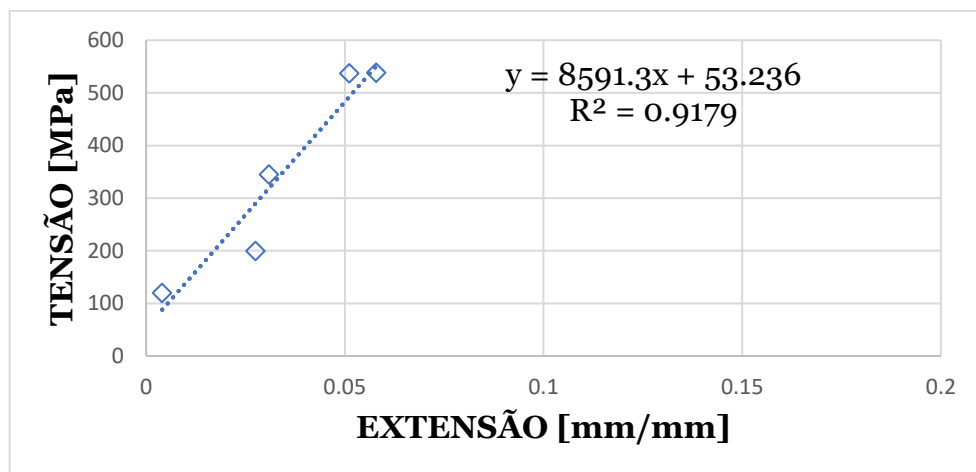


Figura 29: Resposta individual do ZTA no sistema ZTA/aço

De modo a entender a resposta de cada sistema para diferentes velocidades, a figura 29 ilustra o comportamento mecânico (em diagrama tensão de compressão versus extensão) da ZTA quando submetida a uma velocidade de 6,85 m/s no sistema de dupla camada ZTA/aço.

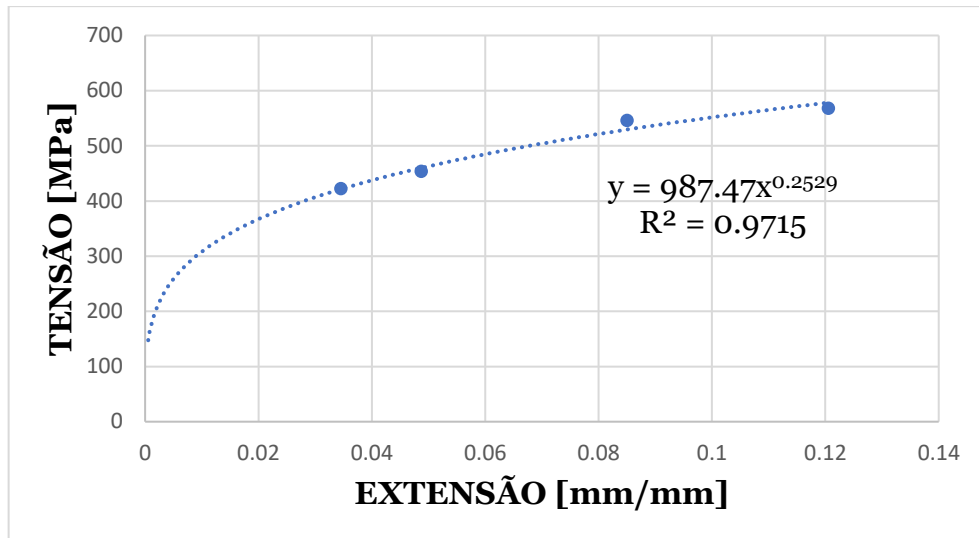


Figura 30: Resposta individual do aço no sistema ZTA/aço

Na figura 30, observa-se a resposta do aço quando submetida a uma velocidade de 6,85 m/s no sistema de dupla camada ZTA/aço.

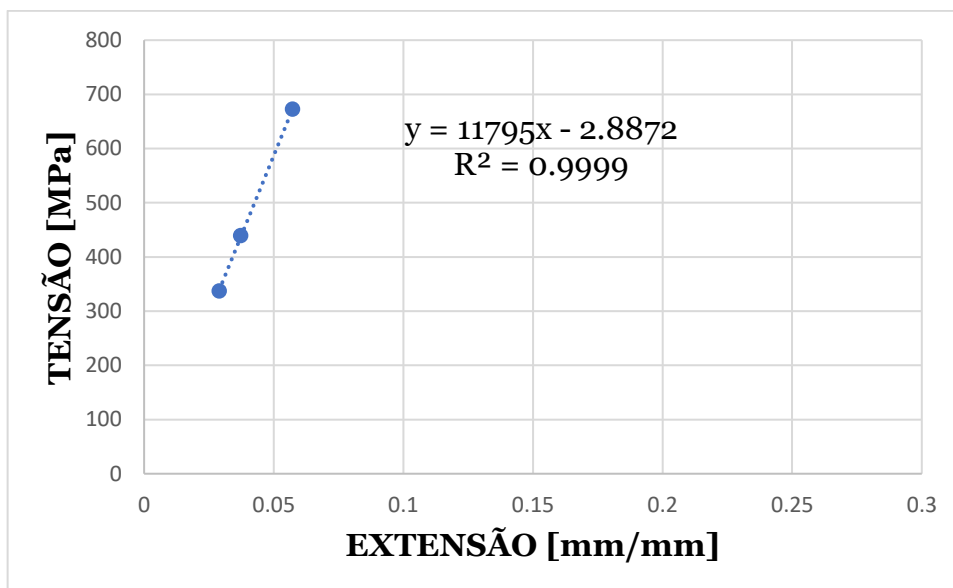


Figura 31: Resposta individual do ZTA no sistema ZTA/CFRP

Para diferentes substratos ou sistemas de dupla camada, a figura 31 analisa-se o comportamento da ZTA no sistema ZTA/CFRP, para uma velocidade de impacto de 6,85 m/s.

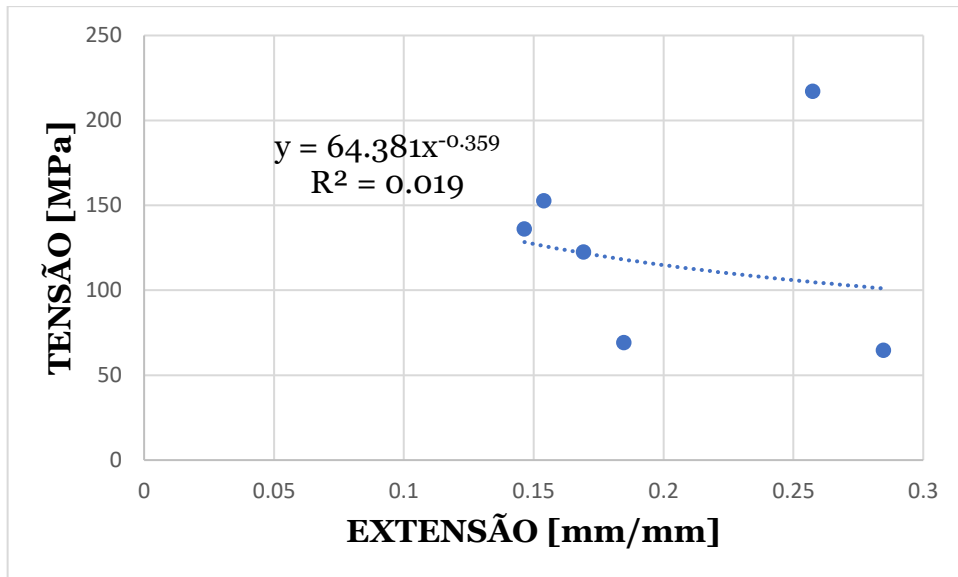


Figura 32: Resposta individual do CFRP no sistema ZTA/CFRP

Para diferentes substratos ou sistemas de dupla camada, na figura 32 observa-se o comportamento do CFRP no sistema ZTA/CFRP, para uma velocidade de impacto de 6,85 m/s.

II. Sistema de dupla camada ZTA/aço

O ensaio do sistema ZTA/aço (figura 33) mostra a resposta da ZTA quando submetidos a velocidades de 6,85 m/s, 7,90 m/s e 8,95 m/s respectivamente.

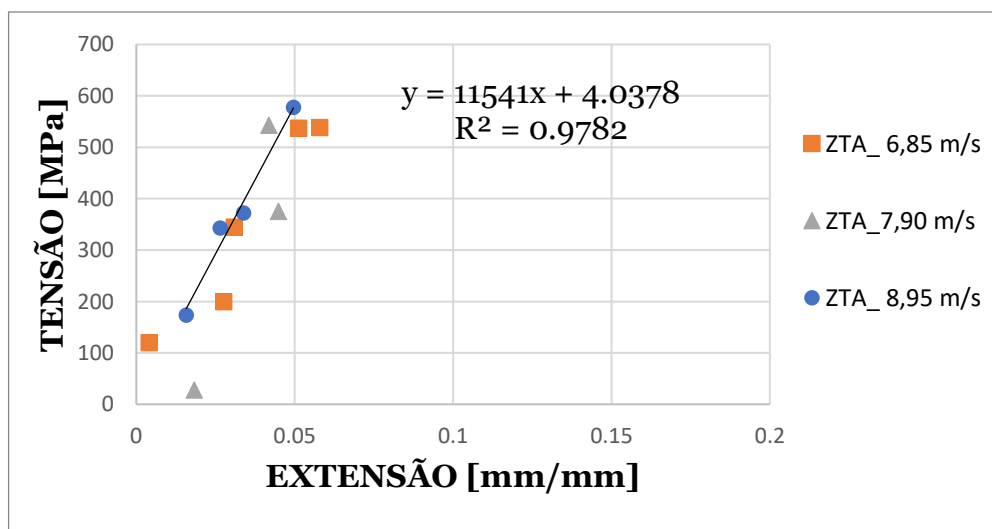


Figura 33: Desempenho mecânico da ZTA no sistema ZTA/aço para velocidades distintas.

A figura 33 mostra a evolução da tensão de compressão nominal com a extensão efetiva para três velocidade de impacto. Observa-se uma evolução linear da ZTA elástica até a fratura total, na (figura 34) observa-se que a relação tensão/extensão acaba por não ser linear e isto faz com que ocorra uma deformação plástica do aço sem rotura total. Tal fato deve-se ao movimento do prato de compressão enquanto ocorre a destruição da ZTA.

Os resultados seguem a linha tendência dada pela equação descrita no gráfico correspondente a equação da reta com declive de 11541 e um grau de ajuste de 0,9782. De igual modo obteve-se uma curva matemática teórica de aproximação do tipo de potência (figura 34) com um grau de ajuste 0.9734 que acaba por representar uma deformação plástica.

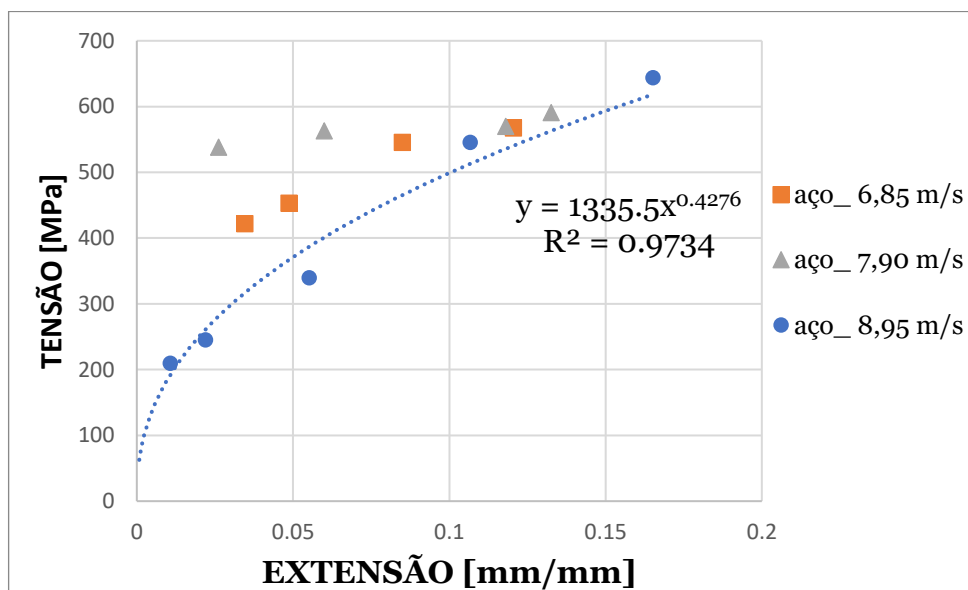


Figura 34: Desempenho mecânico do aço no sistema ZTA/aço para velocidades distintas.

Análise da Energia de impacto no sistema de dupla camada ZTA/aço

Na tabela 17 é possível analisar a energia de impacto quando submetidas a distintas velocidades. Para o cálculo de energia de impacto recorreu-se à equação de acordo com a metodologia descrita em 3.3.6.

Tabela 17: Energia de impacto para velocidades distintas no sistema de dupla camada ZTA/aço

Velocidade (m/s)	massa do projétil (kg)	Energia (J)
6,85	3,23	75,78
7,90	-	100,79
8,95	-	129,36

Logicamente a energia de impacto aumenta com o aumento da velocidade de impacto. Na tabela 18 observa-se a resposta do sistema de dupla camada ZTA/aço, para o cálculo de Energia remanescente recorreu-se à relação das Energias de acordo com a metodologia descrita em 3.3.6.

Tabela 18: Energia remanescente para velocidades distintas no sistema de dupla camada ZTA/aço

	Velocidades (m/s)	Energia (J)
ZTA	6,85	15,59
Aço		55,35
ZTA	7,90	11,35
Aço		73,77
ZTA	8,95	4,53
Aço		121,22

Para velocidades distintas foi possível analisar a capacidade de resposta dos materiais tendo em conta a energia de impacto. O aço apesar da deformação e sem rotura total mostrou uma maior capacidade de absorção de energia em todos os casos. O aço apresentou uma taxa de absorção de 78,10 %, 86,66 % e 96,39 % respetivamente, a taxa de absorção de energia foi determinada pela relação entre a Energia remanescente total dos sistemas de duplas camadas e a Energia remanescente dos materiais de forma individual, descrita em detalhe na secção 3.3.6. Onde a energia remanescente dos sistemas é de 4,85 %, 15,55 % e 2,79 % respetivamente para velocidades distintas.

III. Sistema de dupla camada ZTA/CFRP

O comportamento mecânico (tensão/extensão) do sistema ZTA/CFRP (figura 35) mostra a resposta da ZTA quando submetidos a velocidades de 6,85 m/s, 7,90 m/s e 4 8,95 m/s respectivamente.

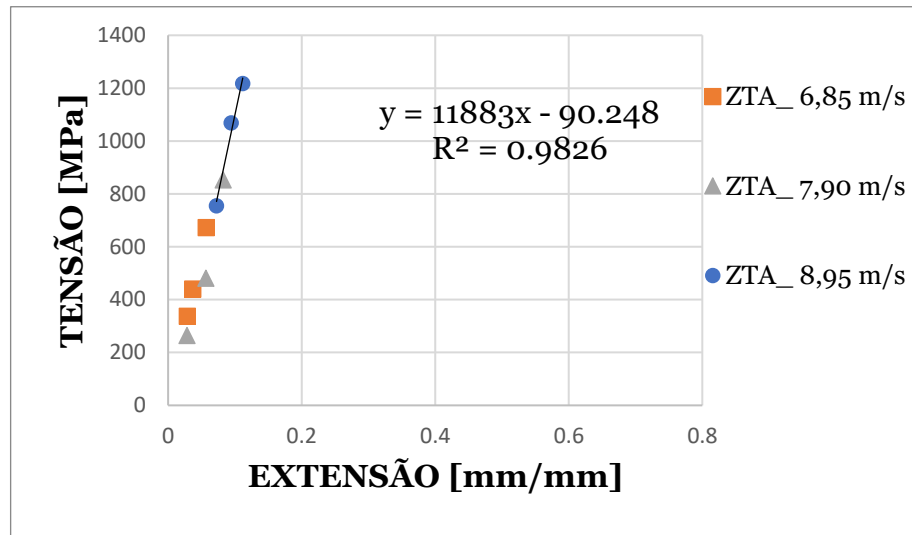


Figura 35: Desempenho mecânico da ZTA no sistema ZTA/CFRP

A figura 35, mostra a evolução da tensão nominal com a extensão efetiva para três velocidade de impacto. Observa-se uma evolução linear da ZTA elástica até a fratura total a medida que o prato de compressão foi avançando enquanto ocorre a destruição do CFRP.

Os resultados seguem a linha tendência dada pela equação descrita no gráfico correspondente a equação da reta com declive de 11883 e um grau de ajuste de 0,9826.

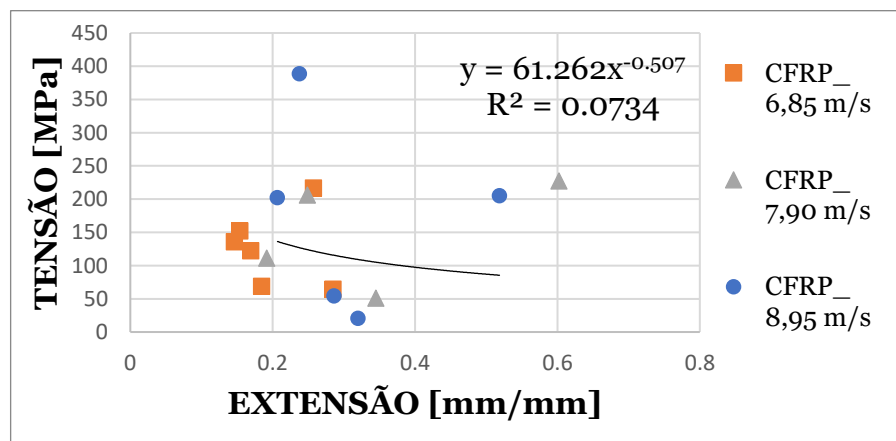


Figura 36: Desempenho mecânico da CFRP no sistema ZTA/CFRP

Na (figura 36) observa-se os picos e cavas para diferentes etapas comportamento semelhante a literatura Wu et. al [23] onde começou pela fratura do adesivo epóxi entre os materiais de cada sistema e posteriormente dos laminados CFRP até a fratura total. obteve-se uma curva teórica de aproximação de potência com um grau de ajuste 0.0734.

Análise da Energia remanescente no sistema de dupla camada ZTA/CFRP

Na tabela 17 é possível analisar a energia de impacto quando submetidas a distintas velocidades. Na tabela 19 observa-se a resposta do sistema ZTA/CFRP, face ao impacto para distintas velocidades.

Tabela 19: Energia remanescente para velocidades distintas do sistema de dupla camada ZTA/CFRP

Velocidades (m/s)	Energia (J)
6,85	ZTA= 19,27
	CFRP= 42,09
7,90	ZTA= 13,67
	CFRP = 71,32
8,95	ZTA= 5,32
	CFRP = 118,01

Para velocidades distintas foi possível analisar a capacidade de resposta das materiais tendo em conta a energia de impacto, onde o CFRP mostrou uma maior capacidade de absorção de energia em todos os casos. Onde o laminado representou uma taxa de absorção de 68,59 %, 80,83 % e 95,69 % respetivamente.

A ZTA no sistema ZTA/CFRP obteve um declive e coeficiente de ajuste superior relativamente a ZTA no sistema ZTA/aço cerca de 2,89 % e 0,45 % respetivamente. Onde se observa uma diminuição gradual da energia remanescente dos sistemas é de 19,024 %, 15,68 % e 4,66 % respetivamente para velocidades distintas.

Apesar de não ser possível fazer uma comparação direta das energias entre os dois sistemas (ZTA/aço e ZTA/CFRP), isto porque os provetes não tiveram o mesmo peso por unidade de volume, mas ainda assim, os resultados mostram que o sistema de dupla camada ZTA/CFRP teve uma taxa de absorção de energia superior ao ZTA/aço com uma média de 13 % contra 8 % do sistema ZTA/aço.

A resposta da ZTA foi diferente os dois sistemas (ZTA/aço e ZTA/CFRP) onde teve uma taxa de absorção em média de 18,29 % no sistema ZTA/CFRP quando comparado com os 12,95 % do sistema ZTA/aço.

4.1.8 Ensaio balístico

Os valores de apresentados na tabela abaixo correspondem aos resultados obtidos nas amostras dos CFRP de forma individual e do sistema de dupla camada (ZTA/CFRP).

Tabela 20: Balanço energético dos ensaios balístico

	Energia cinética incidente (J)	Energia cinética residual (J)
CFRP	162,3	122,6
ZTA/CFRP	163,6	2,36

Na (Fig. 37) ilustra-se a evolução deste comportamento na relação entre velocidade de entrada e saída.

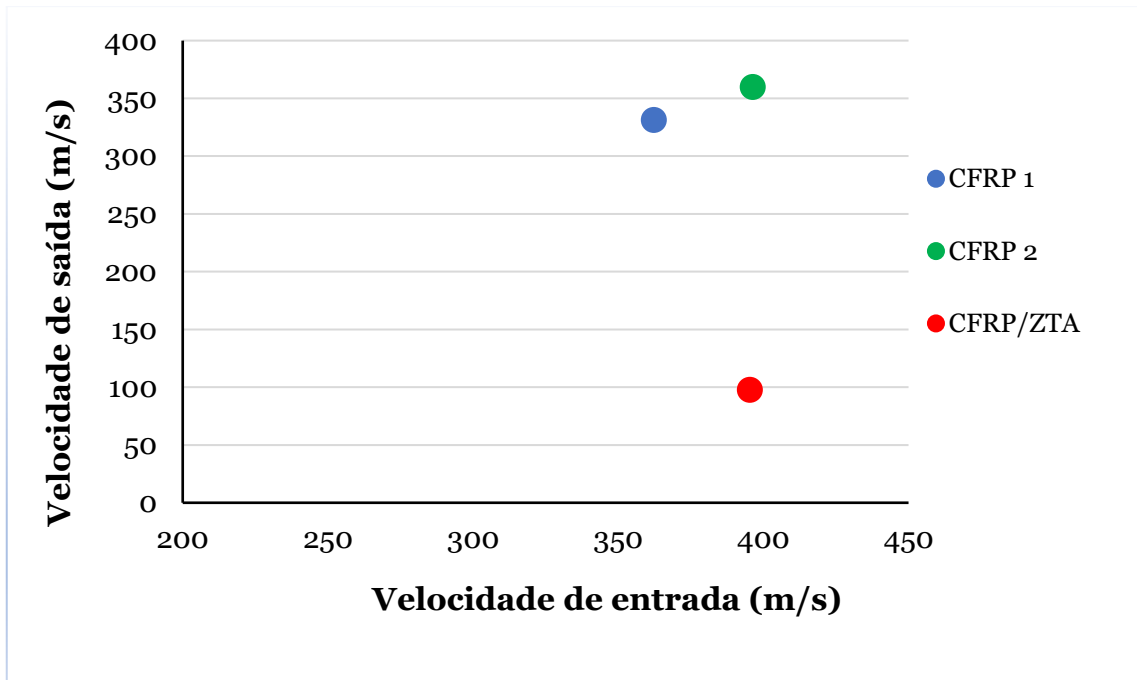


Figura 37: Comparação entre as velocidades de entrada e saída do projétil no sistema de armadura de dupla camada CFRP/ZTA

Nas (Fig. 38 e 39) apresentam-se imagens das faces de entrada e de saída de uma amostra de CFRP simples e de uma amostra de dupla camada CFRP/ZTA.

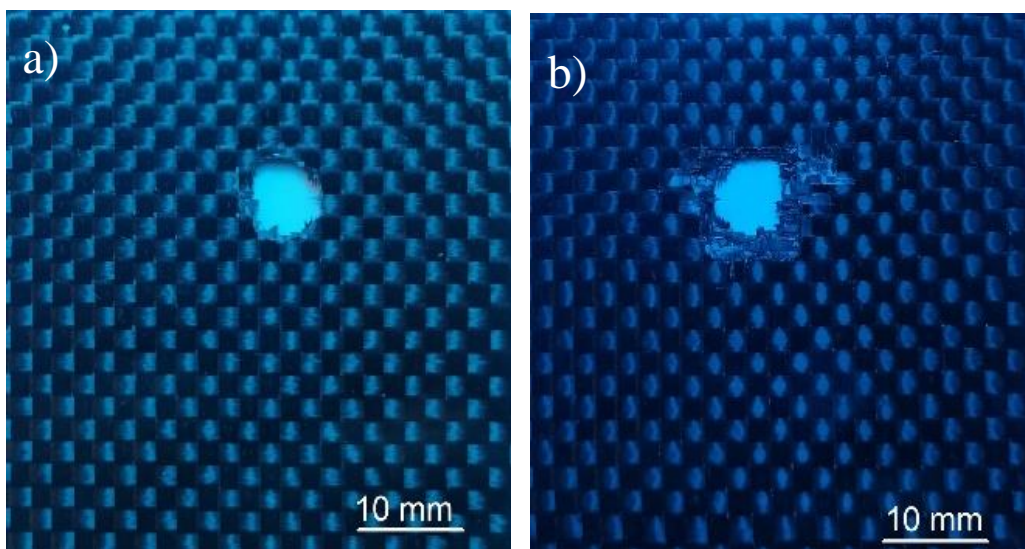


Figura 38: a) Face de entrada; b) Face de saída

Nos ensaios balísticos da placa de CFRP de forma individual, absorção cerca de 24% da energia, correspondendo a valores de energia antes do impacto de 162,3 J e após impacto de 122.6 J, resultados superiores com a literatura

Alfredo et al [28] onde foram utilizados aramididas e fibras de vidros que tiveram uma capacidade de absorção de 11,99 e 15,37% respetivamente.

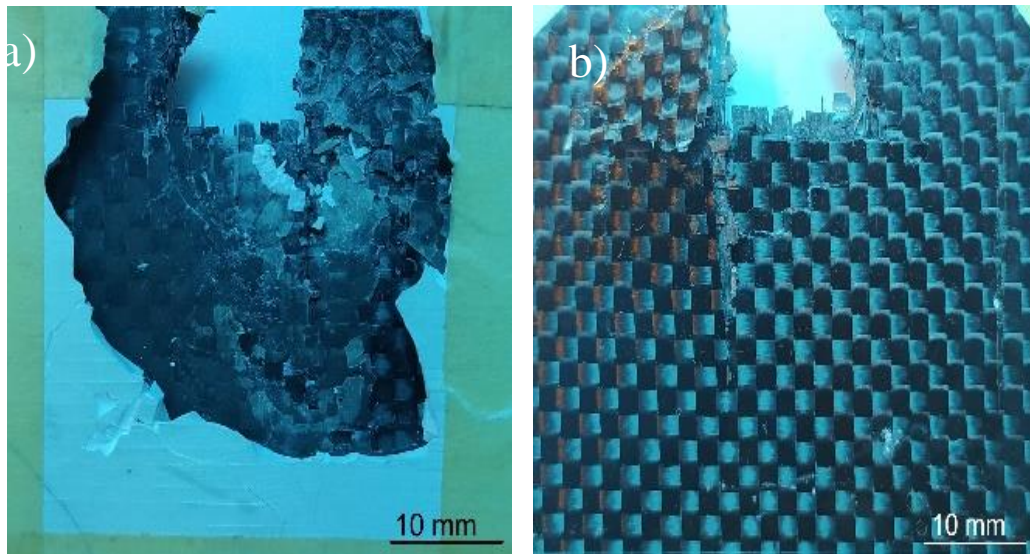


Figura 39: a) Face de entrada; b) Face de saída

Para a placa de CFRP simples observa-se um dano, coincidente com a área de contacto com o projétil análise semelhante ao da literatura Sanusi et al [14], de forma circular com diâmetro similar ao projétil ($\phi = 8$ mm). Na face de saída (Fig. 38), observa-se um dano mais vasto com destaque de camadas exteriores do laminado. Mas, em redor do furo não se observa deformação no laminado de carbono.

Para o sistema de dupla camada ZTA/CFRP observou-se uma absorção de 98% da energia, correspondendo a valores de energia antes e após o impacto de 163,6 e 2,4 J, respetivamente. Apesar de serem resultados preliminares o sistema ZTA/CFRP mostrou-se ser bastante eficaz com uma capacidade de absorção de energia 39,8% maior comparando com os resultados da literatura Rahbek et al [22] que utilizaram ZTA/fibra de vidro que absorveu 58,9 % na energia incidida.

No sistema de dupla camada ZTA/CFRP a cerâmica absorveu grande parte da energia ficando em múltiplos pedaços, descolando-se do substrato. A área afetada do substrato de CFRP é muito superior ao diâmetro do projétil e a deformação residual é elevada.

A capacidade que absorver a energia incidente no sistema ZTA/CFRP é maior comparando a literatura Pawar et. [16] na qual utilizou um sistema de dupla camada formado por Alumina pura e um metal em que conseguiu absorver 27% da energia nela incidida, apesar dos ensaios realizados na ZTA/CFRP são preliminares.

Capítulo 5 – Conclusão

5.1 Considerações finais

Neste trabalho fez-se uma introdução sobre a importância da proteção balística e a relevância da sua aplicação em particular em contexto militar, como são exemplos os veículos blindados, mas não só, mas também pode ser em contexto de proteção pessoal.

Projetou-se uma cerâmica do tipo ZTA, composto de alumina (Al_2O_3) enrijecida por zirconia (ZrO_2) muito elogiada na literatura, e seguindo uma metodologia de moagem, prensagem por compressão unidirecional e sinterização no estado sólido, obteve-se placas cerâmicas com baixa porosidade de 0,195 %, dureza de 14 GPa e resistência mecânica de 300 MPa. Com essas placas como material de revestimento fabricou-se diversos sistemas de dupla camada, nomeadamente sistema ZTA/aço, ZTA/titânio e ZTA/CFRP. Nos diferentes ensaios a estes sistemas de dupla camada observou-se que ensaios de impacto balístico são ensaios de análise rápida, mas com informação limitada (velocidade antes e após impacto) enquanto os ensaios de compressão variável são ensaios de difícil análise, mas com muita informação associada.

5.1.1 Conclusões

Da análise de resultados pode-se retirar as seguintes conclusões:

A compressão do aglomerante entre as duas placas do sistema ZTA/aço fez com que o sistema apresenta um comportamento inicial não linear, a presença da cerâmica fez com que houvesse uma distribuição da força por uma área do aço maior.

Os resultados dos ensaios de flexão em 3 pontos realizados aos materiais individualmente observou-se que a cerâmica ZTA apenas apresenta

comportamento linear elástico, isto é, como esperado não apresenta deformação plástica e a sua rutura é total (catastrófica). No caso das ligas metálicas (Ti e Aço), como esperado, observa-se um comportamento linear elástico e posteriormente um comportamento plástico não linear e durante os parâmetros de ensaios não ocorreram ruturas. O material compósito de fibra de carbono (CFRP) tem um comportamento linear elástico e ocorre rutura por etapas, isto é, o laminado sobre primeiro uma rutura parcial das camadas superiores sujeitas a forças de compressão. A ZTA apresentou uma menor resistência com uma tensão máxima de 370 MPa e o CFRP tem um valor de resistência mecânica próximo de 900 MPa. Nos metais considerou-se a tensão limite de elasticidade onde o aço tem um valor aproximado de 397 MPa e a liga de titânio apresenta uma tensão de 562 Mpa.

Os resultados dos ensaios de flexão em 3 pontos do sistema de dupla camada por um substrato de aço com material cerâmico (ZTA). O sistema de dupla formado pelo ZTA/Aço, apresentou um comportamento inicial não linear, explicado pela deformação dos apoios e da compliância, do sistema de ensaio, após o qual se observa um comportamento linear-elástico seguido de rutura total. A rotura total ocorre apenas no revestimento cerâmico, pelos 332 MPa, mantendo-se intato o substrato de aço.

Os resultados dos ensaios de flexão em 3 pontos do sistema de dupla camada compostos por um substrato de titânio com material cerâmico (ZTA). O sistema de dupla camada formado por ZTA/titânio apresentou um comportamento linear seguido de rutura total. A rotura total ocorre apenas no revestimento cerâmico, aproximadamente a 402 MPa, mantendo-se intato o substrato de titânio.

Os resultados dos ensaios de flexão em 3 pontos do sistema de dupla camada compostos por um substrato de compósito laminado de carbono com material cerâmico (ZTA). O sistema de dupla camada formado por ZTA/CFRP apresentou um comportamento típico linear dividido em duas etapas. Ao fim da primeira etapa dá-se uma primeira rutura pelos 285 MPa, seguido de um comportamento novamente linear e posterior rutura total.

Os ensaios de compressão variável de alta velocidade, apesar de não ser possível fazer uma comparação direta das energias entre os dois sistemas

(ZTA/aço e ZTA/CFRP), isto porque os provetes não tiveram o mesmo peso por unidade de volume, mas ainda assim, os resultados mostram que o sistema de dupla camada ZTA/CFRP teve uma taxa absorção de energia superior ao ZTA/aço com uma média 13 % contra 8 % do sistema ZTA/aço.

A ZTA manteve uma resposta análoga quer seja de forma individual e nos sistemas ZTA/aço e ZTA/CFRP, onde foi possível observar que apresenta comportamento linear elástico, isto é, como esperado não apresenta deformação plástica e a sua rutura é total (catastrófica).

Os ensaios de compressão com velocidade variável, permitiu caracterizar a resposta dos materiais onde tiveram resposta de forma individual, Este ensaio não analisa o produto do sistema, mas sim a capacidade de resposta dos materiais quando submetidos a impactos de velocidades variáveis.

Apesar de não ser possível fazer uma comparação direta das energias entre os dois sistemas (ZTA/aço e ZTA/CFRP), isto porque os provetes não tiveram o mesmo peso por unidade de volume, mas ainda assim, os resultados mostram que o sistema de dupla camada ZTA/CFRP teve uma capacidade absorção de energia superior ao ZTA/aço com uma média de 13,12 % para diferentes velocidades a que foi submetida contra uma média de 7,72 % do sistema ZTA/aço.

Os ensaios de impacto balístico, necessitam de um maior número de ensaios e análises para todos os sistemas, foram feitos ensaios no ZTA/CFRP e o CFRP de forma individual onde apesar de serem resultados preliminares observou-se que 94 % da energia é dissipada na armadura com ZTA, em comparação com os 17 % na placa de CFRP simples.

5.1.2 Proposta de trabalhos futuros

A compreensão da importância do contexto de utilização e o domínio das metodologias de fabrico e de caracterização permite propor os seguintes trabalhos:

- i. Fabricar e caracterizar sistemas de dupla camada com diferentes espessuras de revestimento cerâmico por forma a avaliar o efeito da espessura;

- ii. Usar diferentes tipos de adesivos entre o revestimento cerâmico e o substrato, com caracter mais dúctil e mais frágil por forma a avaliar a importância na resposta ao impacto;
- iii. Desenvolver o modelo numérico que permita extrapolar diferentes condições de teste;
- iv. Realizar teste de impacto balístico com maior poder de energia de modo a avaliar o comportamento dos diferentes sistemas de dupla camada;
- v. Realizar ensaios de compressão com velocidade variável em provetes com geometria circular de modo ajustar-se as características da máquina os provetes devem ter o mesmo peso por unidade de volume de modo a fazer uma comparação direta entre os sistemas.

Bibliografia

[1] Manual da disciplina Veículo Militar TOMO I, disponibilizado pelo centro de informação para defesa do Ministério das Forças Armadas “Cuba”, primeira edição 1999.

[2] Miguel da Silveira; A Evolução dos Veículos Militares Blindados no período entre guerras.

[3] Manual da disciplina Veículo Militar TOMO II, disponibilizado pelo centro de informação para defesa do Ministério das Forças Armadas “Cuba”, primeira edição 1999.

[4] <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2-72> acessado em 19/01/2023

[5] <https://www.google.com/search?q=BMP&tbm=isch&ved=2ahUKEwjy6IXb8> acessado em 19/01/2023

[6] Luiz Silva, Capacidade operacional das viaturas blindadas de transporte de pessoal empregadas pelo exército brasileiro no Contexto das operações e comparação com a viatura blindada de combate de infantaria, Tese de mestrado em Ciências Militares, Academia Militar das Agulhas Negras, Brasil, 2019.

[7] S. Savio, V. Madhu e A. Gogia (2014): Ballistic performance of alumina and Zirconia-toughened alumina against 7.62 armour piercing projectile, Defence Science journal, vol. 64, 477-483.

[8] X. Zhang, Y. Li (2010): On the comparison of the ballistic performance of 10% zirconia toughened alumina and 95% alumina ceramic target, Journal of Materials and Design, vol.31, 1945-1952.

[9] <https://www.google.com/search?q=veiculo+de+combate+MARK+IV&tbm=isch&ved=2ahUKEwjEt8zakqHtAhWF34UKHWX1AiQQ2-> acessado em 19/01/2023

[10] Manual de tanque e transporte MINFAR, GeoCuba La Habana 2000.

[11] https://www.google.pt/search?q=t+72&sxsrf=AJOqlzXOrTIMqidhuSXqAysjWnaAB3sxIw:1673459270067&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiEl9rKicD8AhWfhfoHHc8TAa0Q_AUoAXoECAEQAw&biw=1536&bih=714&dpr=1.25#imgsrc=EX3xitmG_b3FzM acessado em 19/01/2023

- [12] <https://www.google.com/search?q=ve%C3%ADculo+de+combate+de+rodabAQ2-> acedido em 19/01/2023
- [13] <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2-72> acedido em 19/01/2023
- [14] O. Sanusi, O. Oyelaran, J. Badmus (2020): Ballistic study of alumina ceramic-steel composite for structural applications; *Journal of Ceramic Processing Research*; vol. 21, 501-507.
- [15] Ballistic Resistant Protective Materials. Norma NIJ Standard 0108.01, National Institute of Justice, U.S Department of Justice, Washington, DC 20531, September 1985.
- [16] M. Pawar, A. Patnaik, S. Biswas (2016): Comparison of ballistic performances of Al₂O₃ and AlN ceramics, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 98, 42-51.
- [17] L. Jinzhu, Z. Liansheng, H. Fenglei (2016): Experiments and Simulations of Tungsten Alloy Rods Penetrating into Alumina Ceramic/603 Armor Steel Composite Targets, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 16, 734-743.
- [18] G. Thomas, K. Jaansalu, A. Hameed, J. Painter, J. Shackel, J. Rowley (2020): A comparison of the ballistic behaviour of conventionally sintered and additively manufactured alumina; *Journal of Defence Technology*; vol. 16, 275-282.
- [19] A. Dresch, J. Venturini, S. Arcaro, O. Montedo, C. Bergmann (2020): Ballistic ceramics and analysis of their mechanical properties for armour applications, *Ceramics International*, vol. 47, 8743-8761.
- [20] C. Huang, Y. Chen (2016): Design and impact resistant analysis of functionally graded Al₂O₃-ZrO₂ ceramic composite, *Materials and Design*, vol. 91, 294-305.
- [21] P. Santos, A. Maceiras, P.N.B. Reis (2021): Influence of manufacturing parameters on the mechanical properties of nano reinforced CFRP by carbon nanofibers, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1126.
- [22] D. Rahbek, B. Johnsen (2019): Fragmentation of an armour piercing projectile after impact on composite covered alumina tiles, *International Journal of Impact Engineering*, vol.133, 103332.
- [23] Y. Wu, Q. Liu, J. Fu, Q. Li, D. Hui (2017): Dynamic Crash Responses of Bio-Inspired Aluminum Honeycomb Sandwich Structures with CFRP Panels, *Composites Part B: Engineering*, vol. 121, 122-133.

[24] [Aço AISI 304 Propriedades Químicas e Mecânicas rev. 2022 \(gelsonluz.com\)](http://www.gelsonluz.com)
acedido em 19/01/2023

[25] <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Grade-30-R53530>
[Titanium](https://www.makeitfrom.com/material-properties/Grade-30-R53530) acessido em 19/01/2023

[26] C. Silva, P. Rosa, P. Martins (2014): Innovative Testing Machines and Methodologies for the Mechanical Characterization of Materials, Society for Experimental Mechanics, vol. 40, 569-581.

[27] Pedro Freitas, Nova Técnica de Amortecimento para a Onda refletida em Ensaios de Compressão Uniaxial a Alta Taxa de Deformação, Tese de mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal, 2021.

[28] Alfredo Passanha, Avaliação da Energia Dissipada em Placas Compósitas em Condições de Tiro Passante, Tese de mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2022.