

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

TITO MAGNO LAVORATO ALVES DACAL

**ESTUDO DE PLACAS DE TITÂNIO COM SUPERFÍCIE POLIONDULAR PARA
APLICAÇÃO BALÍSTICA**

**RIO DE JANEIRO
2021**

TITO MAGNO LAVORATO ALVES DACAL

ESTUDO DE PLACAS DE TITÂNIO COM SUPERFÍCIE POLIONDULAR
PARA APLICAÇÃO BALÍSTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como
requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciên-
cia dos Materiais.

Orientador(es): Alaelson Vieira Gomes, D.Sc. do IME
Achille Arantes Bassi, D.Sc. do IME
Tiago Alegretti Zucarelli, D.Sc. do IAE

Rio de Janeiro

2021

©2021

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Dacal, Tito Magno Lavorato Alves.

Estudo de placas de titânio com superfície poliondular para aplicação balística / Tito Magno Lavorato Alves Dacal. – Rio de Janeiro, 2021.

138 f.

Orientador(es): Alaelson Vieira Gomes, Achille Arantes Bassi e Tiago Alegretti Zucarelli.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Ciência dos Materiais, 2021.

1. Ti6Al4V. 2. Elementos finitos. 3. Poliondular. 4. Autodyn. 5. Comportamento dinâmico. 6. Proteção balística. 7. Ensaio balístico. i. Gomes, Alaelson Vieira (orient.) ii. Bassi, Achille Arantes (orient.) iii. Zucarelli, Tiago Alegretti (orient.) iv. Título

TITO MAGNO LAVORATO ALVES DACAL

ESTUDO DE PLACAS DE TITÂNIO COM SUPERFÍCIE POLIONDULAR PARA APLICAÇÃO BALÍSTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência dos Materiais.

Orientador(es): Alaelson Vieira Gomes, Achille Arantes Bassi e Tiago Alegretti Zucarelli.

Aprovado em Rio de Janeiro, 31/08/2021, pela seguinte banca examinadora:



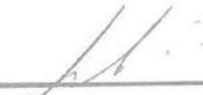
Prof. Alaelson Vieira Gomes - D.Sc. do IME - Presidente



Prof. Achille Arantes Bassi - D.Sc. do IME



Prof. Tiago Alegretti Zucarelli - D.Sc. do IAE




Prof. André Ben-Hur da Silva Figueiredo - D.Sc. do IME



Prof. Carlos Nelson Elias - D.Sc. do IME



Prof. Simone Izabel Vieira de Santana - D.Sc. do IME



Prof. Rubens Lincoln Santana Blazutti Marçal - D.Sc. do IPqM

Rio de Janeiro

2021

A ciência é luz que não se pode deixar apagar, por mais escura que sejam as trevas, o saber deve prevalecer

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus orientadores pelo incentivo e confiança depositados em mim e neste trabalho. Em especial ao professor Alaelson Vieira Gomes, por ter me aceito como orientando quando fui transferido da SE/4 para a SE/8, sempre incentivando e apoiando no decorrer deste trabalho. Ao Major Achille Arantes Bassi, pelas diversas orientações e ajudas cedidas durante o mestrado e no decorrer deste trabalho. Ao 1º Ten Tiago Alegretti Zucarelli, por ter aceito o convite para ser meu orientador e pela sua disponibilidade e vontade de auxiliar-me nesta jornada. Gostaria de agradecer, igualmente, ao Major Édio Pereira Lima Júnior pelo auxílio na realização dos ensaios balísticos no Centro de Avaliações do Exército. Finalmente, gostaria de agradecer a minha família em especial aos meus pais, Francisco Magno Lavorato alves e Maria Dolores Dacal Mattos Nunes, a minha irmã Raissa Maria Lavorato Alves Dacal, a minha madrinha Dirce Carvalho e Silva e meu padrinho Maximiano de Carvalho e Silva, por sempre acreditarem em mim e por todo amor e carinhos dedicados. Agradeço a minha namorada Anira Palomo Vergara, pela compreensão, incentivo e parceria durante esta jornada. Agradeço ao Prof.Dr. Vicente Bergamini Puglia e a Prof. Dr. Ana Claudia Costa de Oliveira pelo incentivo em adentrar a vida acadêmica. Aos meus colegas e amigos que participaram desta trajetória.

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,
mas transformai-vos pela renovação da mente,
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é avaliar a capacidade de proteção balística de placas polionduladas da liga Ti ASTM B265 Grau 5. Fez-se a avaliação do comportamento dinâmico através da modelagem matemática e ensaios balísticos. Para as simulações foi empregado o pacote AUTODYN do software ANSYS. A partir da simulação preliminar, foram determinados parâmetros para os ensaios balísticos. As análises das simulações e do ensaio balístico indicaram um ganho de desempenho de proteção e comportamentos distintos, da fratura, em função da região do perfil poliondular analisado. A caracterização desenrolou-se investigando rotas de processamento e buscando possíveis alterações decorrentes do processo de conformação em geometria poliondular, sendo descartada essa hipótese. Por fim, concluiu-se que a geometria poliondular se apresenta como uma solução relativamente simples para redução de peso de blindagens balísticas e ganho de eficiência, se comparada as geometrias convencionais. A comparação das modelagens numéricas da liga de Ti-6Al-4V com a utilizada por Cunha (2018), em aço ABNT 4340, permitiu a análise e revisão dos dados, possibilitando concluir sobre o desempenho balístico. Constatou-se que a liga de Ti-6Al-4V pode ser uma alternativa para blindagens multicamadas, reduzindo o peso.

Palavras-chave: Ti6Al4V. Elementos finitos. Poliondular. Autodyn. Comportamento dinâmico. Proteção balística. Ensaio balístico.

ABSTRACT

The main objective of this dissertation was to evaluate the performance of ballistic protection of the ASTM B265 Grade 5 Titanium alloy using poly wave geometry. For this, the dynamic behavior resulting from ballistic impacts was assessed, through the simulation of flat and poly wave plates through ANSYS's software, using the AUTODYN package. Thus, after the preliminary simulation, parameters for ballistic tests were determined. The analysis of the simulations and the ballistic test indicated an improvement in the protection performance and distinct behavior of the fracture, as a function of the region of the analyzed polywave profile. The characterization was carried out investigating processing routes and looking for possible changes resulting from the conformation process in polywave geometry, this hypothesis being discarded. Finally, it was concluded that the polywave geometry presents itself as a relatively simple solution to reduce the weight of ballistic armor and gain efficiency, when compared to conventional geometries. The numerical modeling analysis of the Ti-6Al-4V alloy with the one used in ABNT 4340 steel per Cunha (2018), allowed the comparison and revision of the data, allowing for conclusions about the ballistic performance. It was found that the Ti-6Al-4V alloy reveals itself as an alternative to compose multilayer shields, aiming to amplify the weight reduction resulting from the use of the poly wave profile.

Keywords: Ti6Al4V. Finite Element. Poly wave. Autodyn. Dynamic Behavior. Ballistic Protection. Ballistic Test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.2.1– Dados referentes a apreensões de armas na cidade do Rio de Janeiro.	23
Figura 1.2.2– Dados referentes a apreensões de fuzis, na cidade do Rio de Janeiro.	23
Figura 2.2.1– Esquemática da linha Beta Transus para o Titânio puro.	28
Figura 2.2.2– Esquemática da faixa de formação do Ti-6Al-4V para 4 % de Vanádio.	31
Figura 2.2.3– Sistemas de escorregamento de metais HC: basal (B), prismático (P) e primeira ordem piramidal (Π_1) para os planos contendo o vetor de burgers a; primeira ordem e segunda ordem (Π_2) de sistemas de deslizamento piramidal contendo burgers c+a.	33
Figura 2.2.4– Planos de deslizamento e direções para estrutura cristalina, cúbica de corpo centrado.	33
Figura 2.3.1– Modos de falhas passíveis para materiais sobre impacto balístico.	36
Figura 2.3.2– Exemplificação da propagação de ondas no meio material.	37
Figura 2.3.3– Dispersão de ondas, forma da frente de onda plástica e elástica propagando no meio em função do tempo.	39
Figura 2.3.4– Perfil idealizado da onda de choque.	39
Figura 2.3.5– Analogia da propagação de onda de choque a partir do movimento das partículas impulsionadas por um pistão em um cilindro com fluido compressível: (a) antes do choque; (b) Instante t_1 após o choque; (c) instante t_2 após t_1	40
Figura 2.3.6– Curvas de Hugoniot para alguns materiais.	42
Figura 2.3.7– Evento de impacto, (a) Projétil de material 1 viajando a velocidade (v); (b) instante do impacto, projétil material 1 no alvo material 2; (c) Instante após o impacto, propagação de ondas.	45
Figura 2.3.8– (A) método de cruzamento das impedâncias; (B) Demonstração do método de ajuste segundo à impedância sônica.	46
Figura 2.3.9– Exemplificação da interação da onda de choque na interface de contato, de um projétil com impedância menor	47
Figura 2.3.10– Exemplificação da interação da onda de choque na interface de contato, de um projétil com impedância maior.	47
Figura 2.3.11– Exemplo de malha ajustada a um corpo.	51
Figura 2.3.12– Exemplificação da malha Lagrangeana.	56
Figura 2.3.13– Exemplificação da malha Euleriana.	57
Figura 3.0.1– Conformação das chapas. A) Prensa hidráulica Nowak, durante a conformação das chapas; B) Matriz utilizada.	58
Figura 3.2.1– Modelo geometria tridimensional reduzida adotado, A) modelo integral; B) Modelo utilizado para as simulações de placa plana.	62
Figura 3.2.2– Projétil 7.62x51 FMJ modelado para simulação numérica.	62

Figura 3.2.3– Malha utilizada, análise preliminar.	63
Figura 3.2.4– Esquematisação das zonas de impacto nas placas poliondulares. a) Pico; b) Intermediária; c) Vale.	64
Figura 3.2.5– Malha refinada para os modelos finais.	64
Figura 3.3.1– Esquema de posicionamentos para o ensaio balístico, segundo norma NBR 15000 (2005).	66
Figura 3.3.2– Esquematisação dos posicionamentos geométricos para impacto balístico nas chapas planas e poliondulares.	66
Figura 3.3.3– Esquema do ensaio balístico.	67
Figura 3.3.4– Provete utilizado para o projétil 7.62x51 FMJ.	67
Figura 3.3.5– Equipamento presente no CAEx, módulo registrador e fixador.	68
Figura 3.4.1– Máquina de tração MTS 810, presente no IAE.	69
Figura 3.4.2– Geometria dentro dos padrões ASTM-E8M.	69
Figura 3.4.3– Corpos de prova confeccionados;A) Perpendicular ao sentido da laminação;B) No sentido da laminação.	70
Figura 3.4.4– Adaptado de ASTM E111/04 ;A) Módulo da corda entre dois pontos;B) Módulo de Young entre a tensão P abaixo do limite de proporcionalidade e R.	70
Figura 3.4.5– Politriz AROPOL-2V.	72
Figura 3.4.6– Microscópio óptico Olympus.	73
Figura 3.4.7– Microscópio eletrônico de varredura, SE8 IME.	74
Figura 3.4.8– Esquematisação do Ensaio de Dureza Vickers.	75
Figura 3.4.9– Durômetro Shimadzu HVM-G21.	75
Figura 4.1.1– Gráfico de Tensão x Deformação dos corpos de prova confeccionados no sentido perpendicular a laminação; A) Corpo de prova perpendicular 1; B) Corpo de prova perpendicular 2; C) Corpo de prova perpendicular 3; D) Corpo de prova perpendicular 4.	76
Figura 4.1.2– Gráfico de Tensão x Deformação dos corpos de prova confeccionados no sentido da laminação; A) Corpo de prova Laminação 1; B) Corpo de prova Laminação 2; C) Corpo de prova Laminação 3.	77
Figura 4.1.3– Imagens com aumento ótico da superfície de fratura do corpos de prova Perpendicular, P1;a) escala em 0,5 mm; b) escala em 0,2 mm.	79
Figura 4.1.4– Visão Longitudinal do corpo de prova P1.	79
Figura 4.1.5– Microscopia eletrônica de varredura da região central, P1.	80
Figura 4.1.6– Imagens com aumento ótico da superfície de fratura do corpos de prova Perpendicular, P2; a) escala em 1,0 mm; b) escala em 0,5 mm.	80
Figura 4.1.7– Visão Longitudinal do corpo de prova P2.	81
Figura 4.1.8– Imagens com aumento ótico da superfície de fratura do corpos de prova Perpendicular, P3; a) escala em 1,0 mm; b) escala em 0,5 mm.	81
Figura 4.1.9– Visão Longitudinal do corpo de prova P3.	81

Figura 4.1.10– Microscopia eletrônica da superfície de fratura do corpo de prova P3, magnificação de 80x.	82
Figura 4.1.11– Microscopia eletrônica da superfície de fratura do corpo de prova P3, zona central; a) magnificação 300x; b)magnificação de 600x.	82
Figura 4.1.12– Microscopia ótica de fratura do corpo de prova P4; a) escala em 1,0 mm ; b) escala em 0,5 mm.	83
Figura 4.1.13– Visão Longitudinal do corpo de prova P4.	83
Figura 4.1.14– Microscopia ótica de fratura do corpo de prova P4; a) Seção 1, da metade fraturada,com escala de 1,0 mm ; b) Seção 2, da metade fraturada, com escala de 1,0 mm.	83
Figura 4.1.15– Microscopia ótica de fratura do corpo de prova P4; a) Seção 1, da metade fraturada,com escala de 1,0 mm ; b) Seção 2, da metade fraturada, com escala de 1,0 mm.	84
Figura 4.1.16– Microscopia ótica de fratura do corpo de prova P4; a) Seção 1, da metade fraturada,com escala de 1,0 mm ; b) Seção 2, da metade fraturada, com escala de 1,0 mm.	84
Figura 4.1.17– Difratograma do material com indexação dos picos.	85
Figura 4.1.18–Microscopia ótica, Ti-6Al-4V; a) Aumento de 200x, escala 20 μm ; b) Aumento de 500x, escala de 10 μm	87
Figura 4.1.19–Microscopia ótica, Ti-6Al-4V; a) Aumento de 500x, escala 10 μm ; b) Aumento de 1000x, escala de 5 μm	87
Figura 4.1.20–Microscopia ótica, Ti-6Al-4V; a) Aumento de 500x, escala 10 μm ; b) Aumento de 1000x, escala de 5 μm	88
Figura 4.2.1–Placa plana 2 mm; A) Simulação do projétil à 800 m/s; B) Superfície de fratura decorrente do projétil a 800 m/s, Dano; C) Simulação projétil à 850 m/s; D) Superfície de fratura decorrente do projétil a 850 m/s, Dano.	89
Figura 4.2.2–Placa placa 3mm; A) Simulação da placa plana de 3 mm projétil à 800 m/s; B) Superfície de fratura decorrente do projétil a 800 m/s, Dano; C) Simulação projétil à 850 m/s; D) Superfície de fratura decorrente do projétil a 850m/s, Dano.	90
Figura 4.2.3–Placa poliondular de 3mm de espessura; A) Impacto do projétil na região intermediária do perfil à velocidade de 800 m/s; B) Superfície de fratura decorrente do projétil a 800 m/s, Dano; C) Impacto do projétil na região intermediária do perfil à velocidade de 800 m/s; D) Superfície de fratura decorrente do projétil a 850 m/s, Dano.	92

Figura 4.2.4– Placa poliondular de 3mm de espessura; A) Impacto do projétil na região do vale do perfil à velocidade de 800 m/s; B) Superfície de fratura decorrente do projétil a 800 m/s, Dano; C) Impacto do projétil na região do vale do perfil à velocidade de 850 m/s; D) Superfície de fratura decorrente do projétil a 850 m/s, Dano.	92
Figura 4.2.5– Placa poliondular de 3mm de espessura; A) Impacto do projétil na região do vale do perfil à velocidade de 800 m/s; B) Superfície de fratura decorrente do projétil a 800 m/s, Dano; C) Impacto do projétil na região do vale do perfil à velocidade de 850 m/s; D) Superfície de fratura decorrente do projétil a 850 m/s, Dano.	93
Figura 4.2.6– Chapa poliondular de 3 mm de espessura após o ensaio balístico;(a) face de entrada dos projéteis; (b) face de saída dos projéteis.	98
Figura 4.2.7– Imagens da superfície de entrada e saída do projétil para a perfuração número 4. Para o impacto na zona de transição entre o topo e zona intermediária do perfil ondular da placa de 3mm de espessura e na placa testemunha.	99
Figura 4.2.8– Disparo 4, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 300X escala 300 μm ; C) Aumento 600X escala 100 μm ; D) Aumento 1200X escala 40 μm	100
Figura 4.2.9– Disparo 4, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 600X escala 100 μm ; D) Aumento 1200X escala 50 μm	101
Figura 4.2.10– Imagens da superfície de entrada e saída do projétil para a perfuração número 5. Para o impacto na zona de transição entre o vale e a zona intermediária do perfil ondular da placa de 3mm de espessura e na placa testemunha.	102
Figura 4.2.11– Disparo 5, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 600X escala 100 μm	102
Figura 4.2.12– Disparo 5, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm	103
Figura 4.2.13– Imagens da superfície de entrada e saída do projétil para a perfuração número 6. Para o impacto na zona de pico do perfil ondular da placa de 3mm de espessura e na placa testemunha.	104
Figura 4.2.14– Disparo 6, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm	105
Figura 4.2.15– Disparo 6, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm	106

Figura 4.2.16–Chapa plana de 3 mm de espessura, após o ensaio balístico;(a) face de entrada dos projéteis; (b) face de saída dos projéteis.	106
Figura 4.2.17–Imagens da superfície de entrada e saída do projétil, para a perfuração número 1. Para o impacto na placa plana de Ti-6Al-4V de 3 mm de espessura e na placa testemunha.	107
Figura 4.2.18–Disparo 1, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm	108
Figura 4.2.19–Disparo 1, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm	109
Figura 4.2.20–Imagens da superfície de entrada e saída do projétil, para a perfuração número 2. Para o impacto na placa plana de Ti-6Al-4V de 3 mm de espessura e na placa testemunha.	110
Figura 4.2.21–Disparo 2, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 600X escala 100 μm ; D) Aumento 1200X escala 50 μm	110
Figura 4.2.22–Imagens da superfície de entrada e saída do projétil, para a perfuração número 3. Para o impacto na placa plana de Ti-6Al-4V de 3 mm de espessura e na placa testemunha.	111
Figura 4.2.23– Disparo 3, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm	112
Figura 4.2.24– Disparo 3, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm	113
Figura 4.2.25–Chapa plana de Ti-6Al-4V com 2 mm de espessura, após o ensaio balístico;(a) face de entrada dos projéteis; (b) face de saída dos projéteis.	113
Figura 4.2.26–Imagens da superfície de entrada e saída do projétil, para a perfuração número 7. Para o impacto na placa plana de Ti-6Al-4V de 2 mm de espessura e na placa testemunha.	114
Figura 4.2.27–Disparo 7, chapa plana de 2 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm ; E) Área em maior aumento.	115
Figura 4.2.28–Imagens da superfície de entrada e saída do projétil, para a perfuração número 8. Para o impacto na placa plana de Ti-6Al-4V de 2 mm de espessura e na placa testemunha.	115

Figura 4.2.29–Disparo 8, chapa plana de 2 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 300X escala 300 μm ; C) Aumento 600X escala 100 μm ; D) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm F) Área em maior aumento, da região da trinca.	116
Figura 4.2.30–Imagens da superfície de entrada e saída do projétil, para a perfuração número 9. Para o impacto na placa plana de Ti-6Al-4V de 2 mm de espessura e na placa testemunha.	117
Figura 4.2.31–Disparo 9, chapa plana de 2 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 300X escala 300 μm ; C) Aumento 600X escala 100 μm ; D) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm F) Área em maior aumento, da região da trinca.	118
Figura 4.2.32–Chapa poli nodular de 2 mm de espessura, após o ensaio balístico;(a) face de entrada dos projéteis; (b) face de saída dos projéteis.	119
Figura 4.2.33–Imagens da superfície de entrada e saída do projétil para a perfuração número 10. Para o impacto na zona de pico do perfil ondular da placa de 2mm de espessura e na placa testemunha.	120
Figura 4.2.34–Disparo 10. A) Área foco 1, 80x ; B) Área foco 1, 300x; C) Área foco 1, 600x; D)Área foco 2, 80x; E) Área foco 2, 300x; F)Área foco 2, 600x; H) Área foco 3, 80x; I) Área foco 3, 300x F) Área foco 3, 600x.	121
Figura 4.2.35–Imagens da superfície de entrada e saída do projétil para a perfuração número 11. Para o impacto na zona de vale do perfil ondular da placa de 2mm de espessura e na placa testemunha.	122
Figura 4.2.36–Disparo 11, A)Área foco 1, 80x ; B) Área foco 1, 300x ; C) Área foco 1, 600x ; D) Área foco 2, 80x; E) Área foco 2, 300x; F) Área foco 2, 600x. . .	123
Figura 4.2.37– Imagens da superfície de entrada e saída do projétil para a perfuração número 12. Para o impacto na região intermediária do perfil ondular da placa de 2mm de espessura e na placa testemunha.	123
Figura 4.2.38–Disparo 12, A) Aumento de 80x; B) Aumento de 300x ; C) Aumento de 600x.	124
Figura 4.3.1– Ilustração da modelagem geométrica das chapas.	124
Figura 4.3.2– A) Disparo 4; B) Disparo 5 ; C) Disparo 6.	130
Figura 4.3.3– A) Disparo 10; B) Disparo 11 ; C) Disparo 12.	132
Figura 4.3.4– Ilustração do projétil após o evento de impacto. A) Placa poliondular de 3 mm de espessura; B) Placa poliondular de 2 mm de espessura.	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2.1– Densidade de alguns metais.	27
Tabela 2.2.2– Classificação do titânio c.p.	28
Tabela 2.2.3– Classificação do titânio c.p pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM). Segundo propriedades mecânicas.	29
Tabela 2.2.4– Principais elementos utilizados em ligas de titânio.	30
Tabela 2.2.5– Propriedades da liga ASTM B265, titânio grau 5.	31
Tabela 2.3.1– Classificação dos métodos de teste segundo a taxa de deformação.	35
Tabela 2.3.2– Dimensões de ajuste característicos dos elementos.	55
Tabela 3.1.1– Parâmetros para as equações de estado de choque de Mie-Gruneisen.	59
Tabela 3.1.2– Parâmetros para o modelo constitutivo de Steiberg-Cochran-Guinan.	60
Tabela 3.1.3– Parâmetros do modelo constitutivo de Johnson-Cook.	60
Tabela 3.1.4– Constantes para o método de falha de Johnson-Cook.	61
Tabela 3.2.1– Parâmetros padrões para as simulações.	63
Tabela 3.3.1– Nível de proteção balística referente ao impacto balístico.	65
Tabela 3.4.1– Parâmetros de varredura utilizados	71
Tabela 4.1.1– Ensaio de tração, dados corpos de prova perpendiculares	78
Tabela 4.1.2– Ensaio de tração, dados corpos de prova sentido de laminação	78
Tabela 4.1.3– Parâmetros de rede ajustado, método de Rietveld.	85
Tabela 4.1.4– Indexação dos picos e distâncias interplanares (d).	86
Tabela 4.1.5– Resultado e análise do ensaio de dureza Vickers	88
Tabela 4.2.1– Modelagem numérica preliminar, placas planas.	90
Tabela 4.2.2– Velocidade residual do projétil após o impacto na chapa de Ti-6Al-4V com espessura de 2 e 3 mm.	91
Tabela 4.2.3– Modelagem preliminar, placa poliondular de 3 mm de espessura, energia total referente aos impactos a 800 e 850 m/s	94
Tabela 4.2.4– Modelagem preliminar, placa poliondular de 3 mm de espessura, energia de trabalho plástico referente aos impactos a 800 e 850 m/s	95
Tabela 4.2.5– Simulação poliondular de 2 mm, velocidade de impacto de 800 m/s, energia total e trabalho plástico dos materiais.	96
Tabela 4.2.6– Simulação, comparativo entre as velocidades residuais.	97
Tabela 4.2.7– Comparativo entre as velocidades residuais aço ABNT 4340 e Titânio ASTM grau 5.	98
Tabela 4.2.8– Resultado do ensaio balístico para placa poliondular de 3 mm de espessura.	99
Tabela 4.2.9– Resultado do ensaio balístico para placa plana de 3 mm de espessura.	107
Tabela 4.2.10– Resultado do ensaio balístico para placa plana de 2 mm de espessura.	114

Tabela 4.2.11– Chapa poli nodular de 2 mm de espessura, após o ensaio balístico;(a) face de entrada dos projéteis; (b) face de saída dos projéteis.	119
Tabela 4.3.1– Comparativo entre a energia (J) do sistema projétil-proteção-testemunha, chapas planas.	125
Tabela 4.3.2– Comparativo entre a energia (J) do sistema projétil-proteção-testemunha, chapa poliondular de 2 mm de espessura.	125
Tabela 4.3.3– Comparativo entre a energia (J) do sistema projétil-proteção-testemunha, placa poliondular 3 mm de espessura.	126
Tabela 4.3.4– Simulação, energia de trabalho plástico, modelagem com testemunha.	127
Tabela 4.3.5– Comparativo entre as velocidades residuais do projétil, inclusão da chapa testemunha.	128
Tabela 4.3.6– Simulação conforme ensaio balístico, Velocidades residuais.	129
Tabela 4.3.7– Velocidades residuais.	129
Tabela 4.3.8– Comparativo, Velocidades residuais.	130
Tabela 4.3.9– Simulação conforme ensaio balístico da energia total, chapas poliondulares.	131
Tabela 4.3.10– Simulação conforme ensaio balístico da energia de trabalho plástico, chapas poliondulares.	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AMCSD	Data base de estruturas cristalinas da Sociedade Mineralógica da América (<i>American Mineralogist Crystal Structure Database</i>).
ANM	Associação Nacional de Mineração.
ASTM	Sociedade Americana para testes de Materiais (<i>American Society for Testing and Materials</i>).
ASM	Sociedade Americana de Metais (<i>American Society for Metals</i>).
CAE	Engenharia Assistida por Computação (<i>computer assisted engineering</i>).
CAEx	Centro de Avaliações do Exército.
FAA	Administração da Aviação Federal (<i>Federal Aviation Administration</i>), EUA .
FEA	Análise em elementos finitos (<i>Finite element analysis</i>).
FMJ	Jaqueta completa de metal (<i>Full Metal Jacket</i>).
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço.
ICDD	Centro Internacional para Dados de Difração (<i>The International Centre for Diffraction Data</i>).
IME	Instituto Militar de Engenharia.
ISP	Instituto de Segurança Pública.
MDC	Método das diferenças centrais.
MEV	Microscopia eletrônica de varredura.
MEF	Método dos Elementos Finitos.
NBR	Norma Brasileira.
OTAN	Organização do Tratado do Atlântico Norte.
PDF	Arquivo de Difração de Pó (<i>Powder Diffraction File</i>).
PVC	Problema de valor de contorno no espaço.
PVI	Problema de Valor Inicial.

LISTA DE SÍMBOLOS

Γ_0	Parâmetro de Gruneisen, para o valor de referência.
Γ	Parâmetro de Gruneisen.
λ	Primeiro parâmetro de Lamé.
μ	Módulo de cisalhamento segundo Lamé.
K	Módulo de compressibilidade.
E	Módulo de Elasticidade.
ν	Coefficiente de Poisson.
ρ	Densidade.
C_0	Velocidade do som no meio material.
$V_{Long} = C_1$	Velocidade da frente de onda longitudinal.
$V_{Cis} = C_s$	Velocidade da frente de onda cisalhante.
$V_{Sup} = C_R$	Velocidade da frente de onda superficial.
σ	Tensão.
C_p	Velocidade da frente de onda plástica.
P_0	Pressão inicial.
U_0	Velocidade inicial.
U_S	Velocidade da onda.
U_P	Velocidade da partícula.
t	Tempo.
E_{cn}	Energia Cinética.
e	Energia Interna.
e_H	Energia interna segundo parâmetros de Hugoniot.
S	Inclinação da curva experimental de Rankine-Hugoniot.
P	Pressão.

P_H	Pressão segundo parâmetros de Hugoniot.
V_s	Volume específico.
α	Coefficiente de expansão térmica de volume.
k_T	Coefficiente de compressibilidade isotérmica.
C_v	Calor específico a volume constante.
C_P	Calor específico a pressão constante.
V_{proj}	Velocidade do projétil.
A	Tensão de escoamento inicial, Johnson-Cook.
B	Constante de encruamento, Johnson-Cook.
n	Expoente de encruamento.
C_n	Constante da taxa de deformação.
m_t	Coefficiente de amolecimento térmico.
T	temperatura instantânea.
T_m	temperatura de fusão.
T_{amb}	Temperatura ambiente.
$\bar{\epsilon}$	Deformação plástica equivalente.
$\bar{\epsilon}_0$	Taxa de deformação plástica equivalente, valor de referência.
Υ	Tensão de escoamento.
Υ_0	Tensão de escoamento de referência (P=0, $\epsilon=0$ e T=300K).
Υ'_p	Derivada de $d\Upsilon/dP$, a máxima tensão de escoamento.
η	Compressão, definida pela razão entre o volume específico inicial e o volume específico no instante.
G'_T	Derivada de dG/dT , sendo G o módulo de cisalhamento.
\bar{G}_0	Módulo de cisalhamento na condição de referência (P=0, $\epsilon=0$ e T=300K).
G'_p	Derivada de dG/dP .
β	Coefficiente de encruamento.
ϵ	Deformação plástica no instante.
ϵ_i	Deformação plástica inicial equivalente.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	POSICIONAMENTO	22
1.2	JUSTIFICATIVA	23
1.3	OBJETIVO	24
1.3.1	OBJETIVO GERAL	24
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
2	REVISÃO DA LITERATURA	26
2.1	BLINDAGEM BALÍSTICA	26
2.2	TITÂNIO E SUAS LIGAS	27
2.2.1	TITÂNIO COMERCIALMENTE PURO	27
2.2.2	LIGAS DE TITÂNIO	29
2.2.2.1	LIGAS ALFA, BETA E ALFA-BETA	29
2.2.2.2	LIGA DE TI-6AL-4V	30
2.3	MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DINÂMICO	34
2.3.1	ONDAS ELÁSTICAS	36
2.3.2	ONDAS PLÁSTICAS	38
2.3.3	ONDAS DE CHOQUE	39
2.3.4	MODELOS CONSTITUTIVOS DE MATERIAIS EM EVENTOS DINÂMICOS	48
2.3.4.1	MODELO DE JOHNSON-COOK	48
2.3.4.2	MODELO DE STEIBERG-COCHRAN-GUINAN	49
2.3.4.3	MODELO DE DANO DE JOHNSON-COOK	50
2.3.5	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	51
2.3.5.1	DESCRIÇÃO DO MOVIMENTO	55
2.3.5.1.1	FORMULAÇÃO DE LAGRANGE	56
2.3.5.1.2	FORMULAÇÃO DE EULER	56
3	MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1	MODELAGEM NUMÉRICA	59
3.2	ANÁLISE NUMÉRICA COMPUTACIONAL	61
3.3	ENSAIOS BALÍSTICOS	65
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E CORPOS-DE-PROVA BALÍSTICOS	68
3.4.1	ENSAIO DE TRAÇÃO	68
3.4.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS X	71
3.4.3	MICROSCOPIA ÓTICA	72

3.4.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	73
3.4.5	ENSAIO DE DUREZA	74
4	RESULTADOS	76
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA LIGA	76
4.1.1	ENSAIO DE TRAÇÃO	76
4.1.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS X	84
4.1.3	MICROESTRUTURA	86
4.1.4	ENSAIO DE DUREZA	88
4.2	ENSAIO BALÍSTICO	89
4.2.1	MODELAGEM NUMÉRICA PRELIMINAR	89
4.2.2	ANÁLISE DA FRATURA	98
4.3	MODELAGEM NUMÉRICA AJUSTADA	124
4.3.1	SIMULAÇÃO CONFORME ENSAIO BALÍSTICO	128
5	CONCLUSÃO	134
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	135
	REFERÊNCIAS	136

1 INTRODUÇÃO

1.1 Posicionamento

Com os avanços tecnológicos das indústrias bélicas e com a escalada da violência urbana, torna-se de interesse civil e militar a busca por novas tecnologias de segurança e medidas de proteção. A indústria de blindagens aumentou seu mercado e a competitividade impulsiona pesquisas na área de materiais. O desenvolvimento de alternativas às blindagens convencionais busca principalmente a redução de peso dos veículos e, conseqüentemente, a redução de consumo de combustíveis sem penalização da durabilidade e segurança.

Conquanto, a economia global demanda a utilização consciente dos recursos, sejam estes: matérias primas, insumos, energia, processos de produção e força de trabalho. Com o desenvolvimento tecnológico e a implementação da engenharia assistida por computação (CAE), tornou-se possível desenvolver, simular e analisar peças, máquinas e estruturas de alta complexidade em tempo e custos reduzidos. Obtendo parâmetros importantes dos elementos quando submetidos aos diversos cenários de carregamentos e sobrecargas. Reduzindo os custos com prototipação e retrabalho.

A balística terminal teve seu campo de pesquisa, inicialmente, respaldado através de dados empíricos, devido à alta complexidade das interações que ocorrem em eventos de elevadas taxas de deformação. Conforme Rosenberg e Dekel (2012), balística terminal é um nome genérico para a ciência que estuda os impactos com a área de interesse em proteções balísticas para as faixas de velocidades relevantes de impacto, faixa de velocidade de artilharia, que variam entre 0,5 e 2,0 km/s. As análises numéricas permitiram a expansão desta área através do poder de processamento de dados e resolução de problemas complexos. Entretanto, dados empíricos ainda devem ser utilizados como forma de ajuste dos parâmetros dos modelos numéricos.

O emprego do titânio torna-se interessante devido às suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, apresentando baixa densidade resultando na redução de peso das blindagens balísticas, sendo este o quarto metal mais presente na crosta terrestre (ASM, 2015). A liga de titânio, foco desde trabalho, é a Ti-6Al-4V, sendo esta uma liga comercial e comumente encontrada. Imperioso destacar que a mesma apresenta excelentes propriedades mecânicas devido ao titânio apresentar comportamento alotrópico, o que permite a utilização de elementos estabilizadores, resultando na formação das fases α e β em temperatura ambiente.

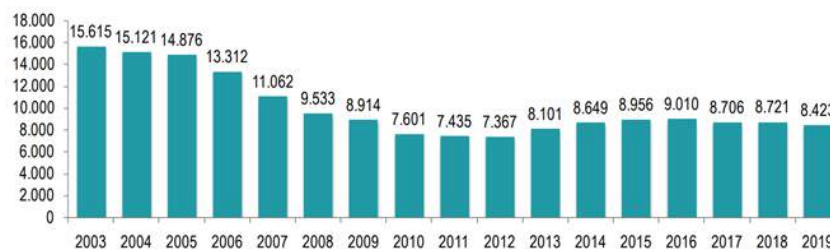
Não obstante, ligas de titânio também apresentam alta coesão atômica, devido ao titânio pertencer aos metais de transição que, por sua vez, apresentam elevadas temperaturas de fusão. Fator interessante para materiais submetidos à carregamentos dinâmicos, sendo a temperatura de fusão uma parcela do modelo constitutivo proposto por Johnson e Cook (1983). Nesta

dissertação, propõe-se o estudo da liga Ti6Al4V como superfície poliondular para aplicação balística. Prosseguindo o estudo sobre a geometria poliondular, realizado por Cunha, Gomes, et al., 2018, em que analisaram a influência da geometria poliondular em blindagens de aço Maraging.

1.2 Justificativa

A escalada da violência do país, principalmente nos grandes centros urbanos. Como o Estado do Rio de Janeiro apesar da redução na apreensão de armas de fogo (revólveres, pistolas, espingardas, metralhadoras, fuzis entre outras categorias) como indicado na Figura 1.2.1

Figura 1.2.1 – Dados referentes a apreensões de armas na cidade do Rio de Janeiro.



Fonte: ISP,2020.

Observa-se um aumento nas apreensões de fuzis, como indicado na Figura 1.2.2, tornando evidente a presença de armas de fogo com maior poder de dano, em mãos de bandidos. Segundo ISP, houve em 2019 um total de 4166 vítimas de crimes violentos letais intencionais e 39749 roubos de veículos no Estado do Rio de Janeiro.

Figura 1.2.2 – Dados referentes a apreensões de fuzis, na cidade do Rio de Janeiro.



Fonte: ISP, 2020.

Apesar da estatística indicar uma redução nos índices de violência, o poder bélico dos bandidos aumentou, sendo equivalente à de regiões de guerra e a grupos terroristas. Desta forma, buscam-se alternativas para promover a segurança e o resguardo da vida, seja de funcionários do segmento de segurança pública ou de cidadãos.

A utilização do Ti-6Al-4V busca uma redução de peso e, conseqüentemente, redução de consumo de combustível, aliado à sua resistência a corrosão natural. O Titânio presente na liga também é o quarto metal mais presente na crosta terrestre e, segundo ANM (2017), o Brasil em 2016 deteve 1% da produção mundial de titânio, sendo o maior produtor da América do Sul. Porém, ainda segundo dados do autor, de 2015 a 2016 houve uma redução na produção de 80975 para 66507 toneladas, indicando uma retração.

O emprego da geometria poliondular almeja promover um nível equivalente ou superior de segurança de uma chapa plana, porém com aplicação de espessuras menores. Tornando blindagens baseadas em Ti-6Al-4V economicamente mais atraentes, impulsionando o mercado interno brasileiro.

As vantagens da geometria poliondular foram comprovadas por Gomes (2004) em materiais cerâmicos e, posteriormente, por Cunha, Gomes, et al., (2018) em aço maraging. Tornando interessante avaliar e mensurar as vantagens para outros materiais.

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta dissertação é avaliar o desempenho da liga de titânio ASTM B265 grau 5 (Ti-6Al-4V, UNS-R56400) como proteção balística e as vantagens da utilização da geometria poliondular.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar simulação numérica através do método dos elementos finitos do impacto balístico de um projétil M80 FMJ:
 - A análise numérica prévia em placa plana e poliondular de Ti6Al4V, avaliando ambas para espessuras de 2 e 3 mm;
 - Análise conforme a configuração do ensaio balístico, simulando as placas planas e poliondulares de 2 e 3mm de Ti-6Al-4V em conjunto com a chapa testemunha de alumínio de 3mm;
- Realizar ensaio balístico;
- Caracterizar o material recebido através de ensaio tração, microscopia ótica, ensaio de dureza e difração de raios X;
- Caracterizar corpos de prova conformados através de ensaio de dureza e microscopia ótica;
- Caracterizar os corpos de prova após o ensaio balístico, através de microscopia eletrônica de varredura;

- Analisar e comparar o desempenho balístico das placas com geometrias e espessuras distintas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Blindagem Balística

O conceito de blindagem pode ser entendido como uma barreira de proteção, sendo o efeito de proteger uma pessoa ou estrutura, seja ela qual for.

Por costume, muitas vezes associamos blindagem à armas de fogo, mas a origem da blindagem surgiu muito antes da fabricação das primeiras armas de fogo, visto que o homem sempre fez uso de escudos de madeira e vestimentas de couro de animais para se proteger de ameaças, fossem elas de animais selvagens, pedras ou lâminas (GOMES, 2004).

Segundo Boardman, Griffin e Oswyn (2001), deu-se início a blindagem com materiais metálicos na Idade do Bronze, pois as armas de combate começaram a ser confeccionadas com metais, tornando-as mais cortantes e altamente perfurantes, como os machados e flechas. As armaduras mistas surgiram, pois, buscava-se um equilíbrio entre resistência e flexibilidade, misturando o bronze e o couro na confecção das armaduras, técnica muito utilizada pelos gregos.

Ainda sobre Boardman, Griffin e Oswyn (2001), pode-se perceber a evolução da blindagem na Idade do Ferro, quando o bronze utilizado nas armaduras passa a ser substituído pelo ferro.

Um grande problema recorrente no uso desse tipo de blindagem era o peso da armadura, que acabava dificultando a mobilidade e agilidade em batalhas. Com o passar do tempo e o aperfeiçoamento de armas de fogo, a blindagem precisou se aperfeiçoar, razão pela qual iniciou-se a busca por novos materiais e tecnologias.

Mas de acordo com Gonçalves (2000), somente no início do século XXI, tornou-se foco de estudo a utilização de blindagens a base de tecidos, uma vez que este material se apresentou eficaz contra fragmentos de explosões, granadas e até mesmo bombas. Diversos materiais foram utilizados, tais como fibra de vidro, nylon e aramida até chegar às fibras de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) que atualmente podem ser encontradas em aeronaves e mísseis, visto que apresentam alta resistência e rigidez simultaneamente combinados a um baixo peso na estrutura.

Atualmente encontramos blindagens nos mais diversos elementos e estruturas, formadas pelos mais diversos materiais. Como todo produto, a blindagem ideal busca a combinação de três fatores: peso, custo e eficiência balística. Contudo, esse equilíbrio ainda é um desafio para as indústrias, visto que os materiais baratos, tais como o aço, apresentam uma ótima eficiência. Em contrapartida, trata-se de um dos materiais mais pesados, de acordo com o entendimento de Torres (2005).

No Brasil, o Exército Brasileiro determina que a eficácia de proteções balísticas destinadas ao mercado civil e de segurança pública seja atestada, conforme cada nível de proteção, segundo a norma ABNT NBR 15000:2005

2.2 TITÂNIO E SUAS LIGAS

Neste trabalho o material foco da investigação é a liga de titânio Ti6Al4V, também conhecida como ASTM grau 5. Esta liga combina resistência mecânica e à corrosão aliada a boa usinabilidade e conformabilidade. A sua relativa baixa densidade, Tabela 2.2.1 resulta em uma ótima relação resistência-peso, tornando a utilização desta liga interessante em diversos projetos de engenharia.

Tabela 2.2.1 – Densidade de alguns metais.

Metal	Símbolo	Densidade (g/cm^3)	Peso Atômico (uma)	Temperatura de Fusão ($^{\circ}C$)
Alumínio	Al	2,7	26,97	660
Prata	Ag	10,5	107,88	960
Titânio	Ti	4,54	47,9	1820
Molibdênio	Mo	10,21	95,95	2600
Vanádio	V	6,07	50,95	1700
Ferro	Fe	7,88	55,85	1920

Fonte: Adaptado de Jones e Atkins (1999).

Neste tópico, serão apresentadas características e propriedades do titânio comercialmente puro e algumas observações das ligas com ênfase no material foco deste estudo.

2.2.1 TITÂNIO COMERCIALMENTE PURO

O titânio é um material interessante, pois este apresenta alotropia, ou seja, apresenta distintas fases em que algumas destas são estáveis somente em certas faixas de temperatura. ASM (2015), destaca que essa transformação permite a utilização de tratamentos térmicos para variar a microestrutura. Em baixas temperaturas apresenta a fase estável alfa (α), tem seu arranjo atômico na forma de estrutura cristalina hexagonal compacta (HC). Vale ressaltar duas faixas de temperaturas características para essas ligas, a alfa transus e a beta transus, abaixo da alfa transus o material apresenta, em sua totalidade, fase alfa. Acima desta temperatura haverá as duas fases, alfa e beta, coexistindo até que seja alcançado a temperatura beta transus, por sua vez, acima desta o titânio apresentará somente a fase beta (β), caracterizada pelo seu arranjo atômico em estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), ilustrado na 2.2.1.

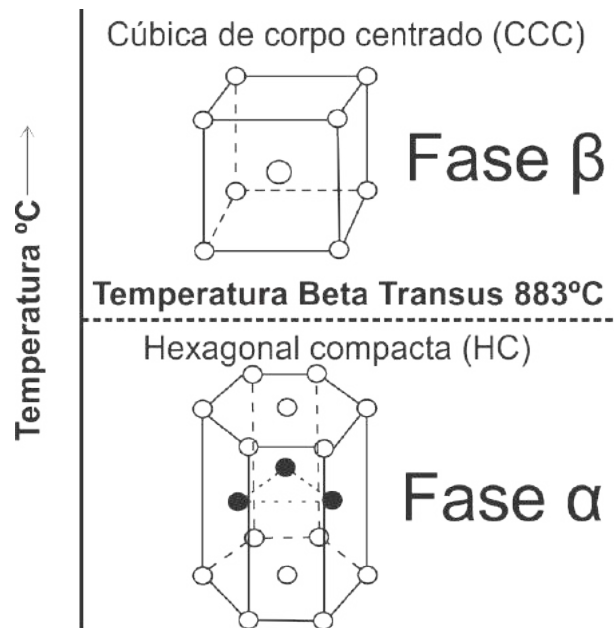


Figura 2.2.1 – Esquemática da linha Beta Transus para o Titânio puro.

O titânio comercialmente puro (c.p.) é classificado segundo a ASTM em quatro graus, ilustrados na Tabela 2.2.2 .

Tabela 2.2.2 – Classificação do titânio c.p.

Componentes (%)	Grau ASTM			
	1	2	3	4
Fe máx.	0,20	0,30	0,30	0,50
C máx.	0,10	0,10	0,10	0,10
O máx.	0,18	0,25	0,35	0,40
N máx.	0,03	0,03	0,03	0,03
H máx.	0,015	0,015	0,015	0,015
Σ máx.	0,525	0,695	0,795	1,045
Ti (%)	99,475	99,305	99,205	98,955

Fonte: Adaptado de ASTM F67, 2017.

O titânio c.p. é utilizado em projetos que requerem moderada resistência mecânica, formabilidade e resistência à corrosão a um custo relativamente baixo, se comparado com as ligas de titânio. Segundo apontamentos na ASM (2015), em decorrência da variação da composição de impurezas intersticiais presentes neste material, torna-se conveniente distinguir os vários graus do titânio através de propriedades mecânicas, demonstrados na Tabela 2.2.3.

Tabela 2.2.3 – Classificação do titânio c.p pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM). Segundo propriedades mecânicas.

Grau ASTM	Condição	Limite de resistência a tração (σ_u)	Limite de escoamento (σ_e)	Alongamento	Redução em área	Dureza
		MPa	MPa	%	%	HB
Grau 1	Recozido	240 á 331	170 á 241	30	55	120
Grau 2		340 á 434	275 á 345	28	50	200
Grau 3		450 á 517	380 á 448	25	45	225
Grau 4		550 á 662	480 á 586	20	40	265

Fonte: Adaptado de ASM, 2015.

A adição de ferro e outros elementos intersticiais melhora a resistência à oxidação do titânio, inclusive em ambiente com a presença de cloretos. O titânio ASTM grau 2 apresenta um aumento das impurezas, quando comparado ao grau 1, e pode ser observado na Tabela 2.2.3, que o aumento das concentrações de ferro e oxigênio resultaram em um aumento da resistência. O titânio ASTM grau 3, detém ótima relação força-peso, pois apresenta menos ferro que o Ti grau 4 e a segunda maior composição de oxigênio.

2.2.2 LIGAS DE TITÂNIO

As ligas de titânio podem ser classificadas em três tipos básicos: α , β e α - β . A adição de elementos de liga pode auxiliar na estabilização das fases e na alteração da temperatura de transformação alotrópica. Elementos de liga que elevam a beta transus são chamados de estabilizadores da fase α e elementos que reduzem a alfa transus de estabilizadores da fase β .

2.2.2.1 Ligas Alfa, Beta e Alfa-Beta

As ligas alfa são caracterizadas pela presença da estrutura cristalina hexagonal compacta, esta, por sua vez, é encontrada abaixo da beta transus, ou seja, a temperaturas abaixo de 885 °C em titânio puro (c.p.) ou em ligas com estabilizadores desta fase. Estas ligas apresentam um custo relativamente baixo se comparada às demais ligas de titânio, apresentando boa resistência mecânica, resistência à fadiga, tenacidade a fratura e soldabilidade. Entretanto segundo ASM (2015), estas ligas não podem ser endurecidas através de tratamentos térmicos diferentemente de ligas de titânio beta e alfa-beta.

As ligas beta apresentam a estrutura cristalina cúbica de corpo centrado que segundo ASM (2015), podem existir em baixas temperaturas se forem adicionadas quantidades suficientes de elementos de liga estabilizadores, podendo alcançar até 100 % da fase β .

Conforme ASM (2015), todas estas ligas β apresentam grandes quantidades de uma ou mais de adições formadoras de beta-isomorfos como o vanádio, nióbio, tântalo e molibdênio, ressalta-se que estas adições não formam compostos intermetálicos.

Estas ligas metaestáveis são usualmente envelhecidas (450 °C á 650 °C) buscando obter uma transformação parcial do composto metaestável em fase α , esta, por sua vez, se forma como partículas finas e dispersas na fase β retida, resultando no aumento da resistência mecânica da liga.

A característica das Ligas alfa-beta é a presença de ambas as fases α e β em temperatura ambiente. A estabilidade das fases é obtida pela adição de elementos de liga estabilizadores, a Tabela 2.2.4 dispõem alguns elementos mais usuais. Ligas com maior percentual de fase alfa, também são conhecidas como “quase alfa” e ligas com maior percentual de fase beta como “quase beta”.

Tabela 2.2.4 – Principais elementos utilizados em ligas de titânio.

Elemento de Liga	Efeito	Classe
Alumínio		-
Estanho		-
Gálio	Estabilizante fase α .	-
Carbono		-
Nitrogênio		-
Oxigênio		-
Germânio		-
Vanádio	Estabilizante fase β .	Beta isomorfo
Molibdênio		Beta isomorfo
Cromo		Beta eutetóides
Cobre		Beta eutetóides
Zircônia	Endurecimento das fases α e β . Elevação da resistência a fluência.	Neutro
Silício	Elevação da resistência a fluência em ligas quase alfa.	Beta eutetóides

Fonte: Baseado em dados de ASM, (2015).

ASM (2015) expõem, que a adição de elementos isomorfos, resulta em excelente estabilidade das propriedades após a exposição a altas temperaturas e tensões. Enquanto a adição de elementos beta-eutetóides causa certa instabilidade, devido à formação de compostos intermetálicos, embora, estes sejam excelentes contribuintes para a resistência.

2.2.2.2 Liga de Ti-6AL-4V

A liga de titânio ASTM B265, grau 5, apresenta 6% de Alumínio e 4 % de Vanádio em peso. A densidade da liga é de aproximadamente 4,4 g/cm^3 . Esta pode ser classificada como uma liga alfa-beta e apresenta, em temperatura ambiente, principalmente a fase hexagonal compacta (α) com algumas estruturas cúbicas de corpo centrado, fase β , retidas. A adição de vanádio estabiliza a fase beta tornando possível o endurecimento por precipitação. Segundo ASM

(2015), a adição do alumínio (estabilizador α), melhora a resistência a tração em temperaturas elevadas, sendo que, a resistência mecânica da liga alfa-beta é substancialmente melhorada quando comparada à uma liga alfa contendo alumínio ou uma liga alfa-beta sem a presença deste. A Tabela 2.2.5 apresenta as propriedades da liga foco.

Tabela 2.2.5 – Propriedades da liga ASTM B265, titânio grau 5.

Liga α - β	σ_u min (MPa)	σ_e min (MPa)	Fe Máx. (%)	C Máx. (%)	O Máx. (%)	N Máx. (%)	H Máx. (%)	Al Máx. (%)	V Máx. (%)
Ti-6Al-4V	895	828	0,40	0,08	0,20	0,05	0,015	5,5-6,75	3,5-4,5

Fonte: Adaptado de ASTM Specification, 2011

Conforme destacado, as propriedades da liga Ti-6Al-4V são controladas através de suas composições químicas, tratamentos térmicos e mecânicos. A Figura 2.2.2, apresenta um mapeamento do diagrama de fases da liga, segundo temperatura e concentração de estabilizadores beta.

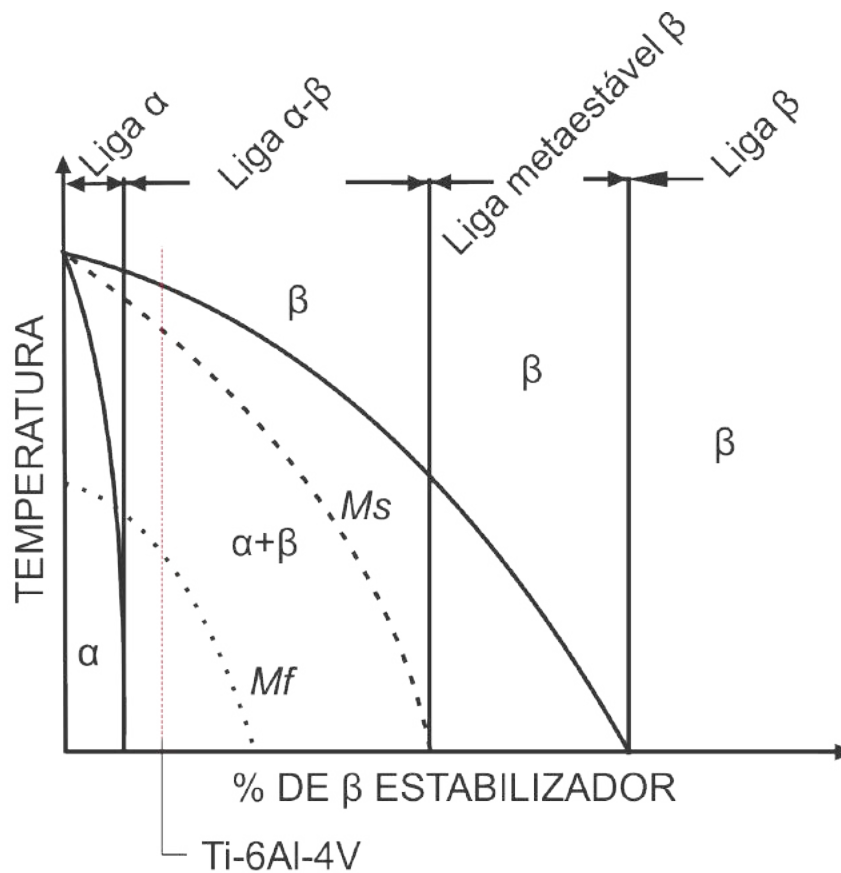


Figura 2.2.2 – Esquemática da faixa de formação do Ti-6Al-4V para 4 % de Vanádio.

Fonte: Adaptado de ASM, 2004

Constata-se que em decorrência da taxa de resfriamento, trabalhos térmicos e das condições prévias da microestrutura do material, se pode obter distintas microestruturas. Inclusive a ocorrência de transformações martensíticas, onde a temperatura de início da transformação martensítica (M_s) está esquematizado na Figura 2.2.2. A linha M_s se refere a força motor requerida para o início do processo de transformação, martensítica, por cisalhamento da fase β em fase α' (ASM, 2004). Sendo este um processo complexo de reestruturação estrutural, onde ocorre por meio de cisalhamento de planos atômicos e não sendo um processo difusional, resulta em martensita (α').

Conforme Kobayashi (2004, apud Lopes, 2009), a utilização de tratamentos térmicos de envelhecimento nas fases α' resultam na otimização mecânica destas ligas. Diferentemente ao processo de formação de martensita em aços, em ligas de titânio a formação ocorre pela saturação da estrutura cristalina com elementos de liga, substitucionais. O envelhecimento resulta na retirada destes átomos substitucionais de soluto, que coalescem e formam fases intermetálicas ricas nestes.

No âmbito dos mecanismos de deformação plástica, metais com estrutura cristalina hexagonal compacta apresentam reduzido número de discordâncias em sistemas de escorregamento. Sendo assim, a baixa mobilidade destas discordâncias, que é em função da temperatura, e para valores abaixo de $0,3T_m$ favorecem o mecanismo de maclação (apresenta relativa independência da temperatura). Para valores acima de $0,3T_m$ a tensão crítica de cisalhamento é reduzida favorecendo o escorregamento e conforme Meyers (1978), impactos de alta velocidade podem promover a elevação da temperatura, e a propagação da onda de choque no meio material a nucleação e mobilidade de discordâncias.

Conforme Serra, Bacon e Pond (2002), observa-se uma dificuldade na determinação de mecanismos predominantes, devido aos diversos presentes em corpos com estrutura cristalina hexagonal compacta, sendo estes dependentes de fatores como composição química, temperatura, orientação cristalográfica e morfologia. Caracterizando complexa concorrência entre os sistemas de escorregamento.

Bridier, Villechaise e Mendez (2005), estudaram a caracterização da deformação para a liga Ti-6Al-4V, constatou que o escorregamento nos planos prismáticos, basal ou piramidais de primeira ordem com vetor de burgers $a = 1/3 \langle 11\bar{2}0 \rangle$, bem como sistemas piramidais de primeira e segunda ordem com vetor de burgers de $c + a = 1/3 \langle 11\bar{2}3 \rangle$, Figura 2.2.3, está relacionado com a tensão crítica de cisalhamento. Sendo os planos basal e prismáticos os que apresentam menor tensão crítica.

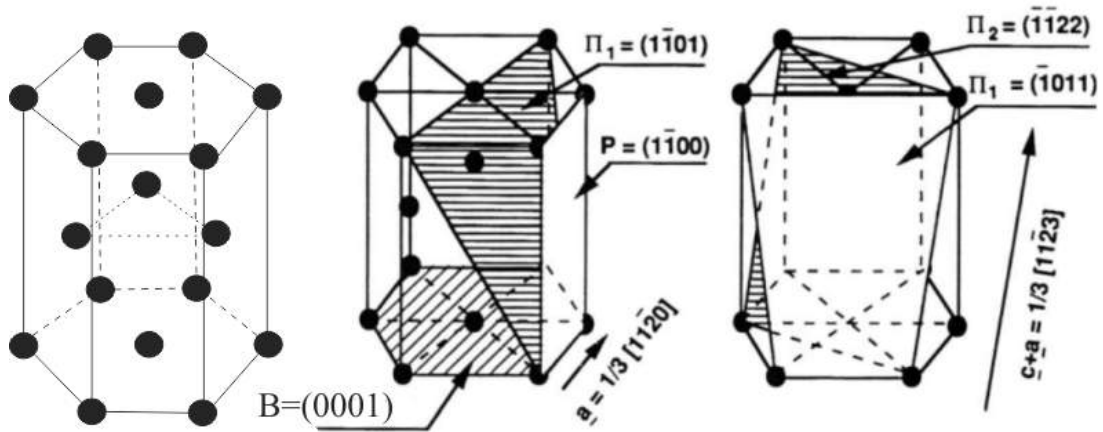


Figura 2.2.3 – Sistemas de escorregamento de metais HC: basal (B), prismático (P) e primeira ordem piramidal (Π_1) para os planos contendo o vetor de burgers a; primeira ordem e segunda ordem (Π_2) de sistemas de deslizamento piramidal contendo burgers c+a.

Fonte: Adaptado de Bridier et al, (2005).

Conforme ASM (2015), A fase beta, em decorrência de sua estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), apresenta mais planos de deslizamento disponíveis, tornando esta fase mais dúctil do que a fase alfa, ilustrado na Figura 2.2.4. Inclusive, como as estruturas CCC apresentam maior simetria na rede braval do que as HC, o arranjo combinado destas, resulta em anisotropia do material. Entretanto, conforme ASM (2015) a pequena diferença nos volumes específicos das estruturas cristalinas das fases α (HC) e β (CCC), resultam em ótima acomodação das redes bravais, apresentando relações de orientação destas redes após procedimentos de recristalização, tornando o plano α (0001) paralelo ao plano β (110), e a direção de deslizamento em α $\langle 1120 \rangle$ paralela à direção de deslizamento $\langle 111 \rangle$ em β .

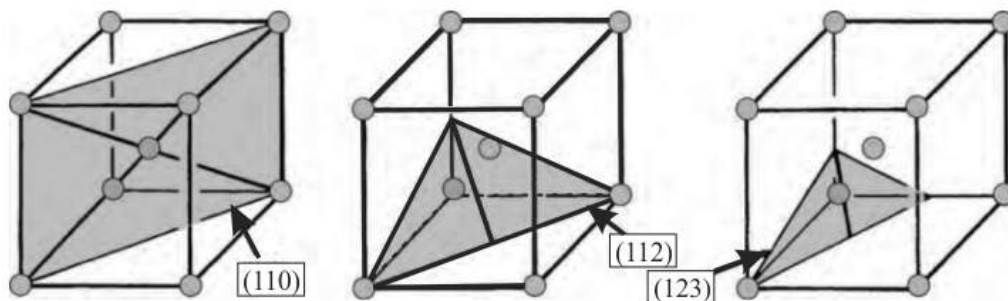


Figura 2.2.4 – Planos de deslizamento e direções para estrutura cristalina, cúbica de corpo centrado.

Fonte: Adaptado de ASM, (2015).

2.3 MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DINÂMICO

O estudo do comportamento dinâmico dos materiais é foco de diversas pesquisas em uma ampla gama de áreas da ciência e da engenharia. O entendimento da resposta do material quando submetido a processos de carregamentos em curtos intervalos de tempo é imprescindível, pois o material pode responder de maneira significativamente diferente se comparado à carregamentos estáticos ou quase estáticos, resultando em eventos de altas taxas de deformação (MEYERS, 1994).

O efeito dinâmico presente nas propriedades mecânicas dos materiais, são relevantes para projetos que apresentem carregamentos resultantes de impactos, ou que operem com aplicação em pequenos intervalos de tempo. A influência da energia cinética e sua taxa de aplicação de carregamento em função do evento de choque entre materiais são de alta complexidade e, em muitos casos, alteram a resposta ao carregamento dos diversos mecanismos de deformação dos materiais. Segundo Meyers (1994), em eventos desta magnitude de energia cinética, quando a deformação no material se dá por esta interação de impacto, os átomos presentes na interface do impacto estarão submetidos a uma tensão, enquanto os demais átomos do material ainda não alteraram seu estado de equilíbrio.

Conforme Rosenberg e Dekel (2012), o termo “propriedades dinâmicas” é referente às propriedades físicas e mecânicas dos sólidos que apresentam sensibilidade a altas taxas de deformação, altas pressões e temperaturas, sendo que pressões superiores a 10 GPa e taxas de deformações acima de 10^2 s^{-1} caracterizam esse cenário dinâmico.

Em eventos de impactos em altas velocidades, em que energia cinética do projétil é transformada em dano no alvo e ao projétil, esta interação de choque induz altas pressões e temperaturas em frações de segundos, no projétil e no alvo, através do rápido movimento das ondas de choque (MEYERS, 1994 e ROSENBERG e DEKEL, 2012). Segundo Rosenberg e Dekel (2012), o aumento da temperatura deve ser considerado para os casos em que esta elevação é suficiente para causar mudanças na resistência do material, em decorrência do processo de amolecimento térmico.

Meyers (1994), classifica os eventos dinâmicos a partir das taxas de deformação, sendo que:

1. Impactos de alta velocidade acima de 10^5 s^{-1} ;
2. Impactos de alta dinâmica entre 10^3 e 10^5 s^{-1} ;
3. Impactos de Baixa Dinâmica entre 10^1 e 10^3 s^{-1} ;
4. Quase estático entre 10^{-5} e 10^0 s^{-1} ;
5. Estático entre 10^{-9} e 10^{-5} s^{-1} .

Meyers (1994), expõe as técnicas mais usuais de ensaios conforme estas definições, ilustrado na Tabela 2.3.1, onde destaca a importância das forças de inércia em eventos de impacto. Segundo Hiermaier (2008), os carregamentos aplicados à estruturas são transmitidos ao longo dos corpos através de ondas, estas, por sua vez, se propagam na velocidade do som no meio material, considerado contínuo. Destaca-se, inclusive, que a propagação de ondas de pressão não é relevante para casos de equilíbrio estático, confirmando a análise da influência da inércia dos corpos exposta por Meyers (1994).

Tabela 2.3.1 – Classificação dos métodos de teste segundo a taxa de deformação.

Taxa de deformação [s ⁻¹]	Técnicas de Ensaios	Considerações Dinâmicas	Observações
10 ⁷ 10 ⁸ ≥10 ⁵	IMPACTOS DE ALTA VELOCIDADE -Explosivos -Impacto normal de placas -Laser pulsado - Impacto inclinado de placas - Folhas explosivas	- PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE CHOQUE - PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE CISLHAMENTO	FORÇAS DE INÉRCIA IMPORTANTES
≤10 ⁵ 10 ⁴ ≥10 ³	IMPACTOS DE ALTA DINÂMICA - Barra Hopkinson -Ensaio de Taylor -Expansão de Aneis	- PROPAGAÇÃO DE ONDAS PLÁSTICAS E ELÁSTICAS	
≤10 ³ 10 ² ≥10 ¹	IMPACTOS DE BAIXA DINÂMICA -Equipamentos hidráulicos de alta velocidade -Maquinas Pneumáticas -CAM - Plastometro	- RESSONANCIA MECÂNICA NO ESPÉCIME E NA MAQUINA SÃO IMPORTANTES	
≤10 ⁰ 10 ⁻¹ 10 ⁻² 10 ⁻³ 10 ⁻⁴ ≥10 ⁻⁵	QUASE ESTÁTICO Equipamentos de teste hidráulicos, servo-hidráulico ou por parafuso de potência.	- TESTES COM VELOCIDADE DO TRAVESSÃO CONSTANTE AO LONGO DO COMPRIMENTO DA AMOSTRA	FORÇAS DE INÉRCIA DESPREZÁVEIS
≤10 ⁻⁵ 10 ⁻⁶ 10 ⁻⁷ 10 ⁻⁸ 10 ⁻⁹	ESTÁTICO Ensaio de Fluência	- RESPOSTA VISCO-PLÁSTICA DOS METAIS	

Fonte: Adaptado de Meyers, 1994.

Na área de proteções balísticas, o estudo de alvos compostos por uma espessura intermediária, que tem a função de parar o projétil, porém sem espessura suficiente para prevenir danos na superfície traseira do alvo é amplamente empregado. Os diversos mecanismos de falha estão ilustrados na Figura 2.3.1, Rosenberg e Dekel, (2012).

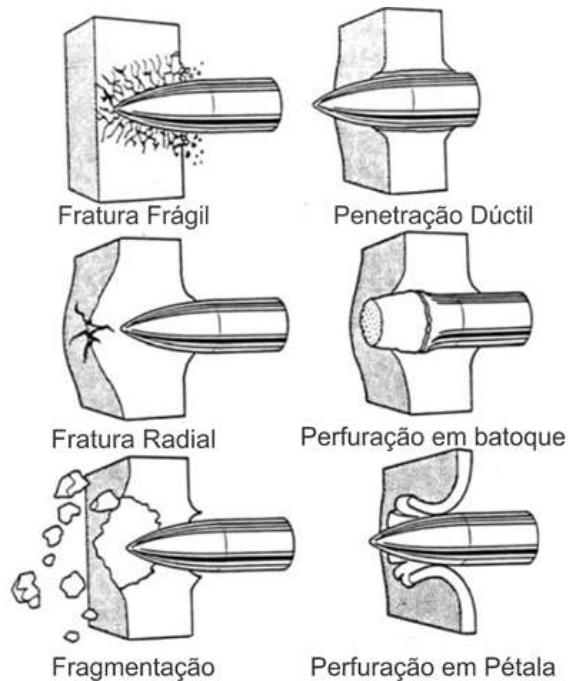


Figura 2.3.1 – Modos de falhas passíveis para materiais sobre impacto balístico.

Fonte: Adaptado de (BACKMAN, 1976 apud ROSENBERG e DEKEL, 2012).

Para o caso de processos de deformação dinâmica, torna-se relevante relações inerciais e este comportamento de onda. Conforme Hiermaier (2008), o estado final de deformação de materiais submetidos à cargas de impacto, diversas vezes dependem da velocidade de deformação, da propagação de ondas de pressão ou ondas de choque.

As ondas no meio material podem ser divididas em 3 grupos (MEYERS, 1994):

1. Ondas elásticas;
2. Ondas plásticas;
3. Ondas de choque

2.3.1 ONDAS ELÁSTICAS

Conforme Meyers (1994), os tipos de ondas elásticas se diferem pelo seu perfil de movimento de partícula e direção de propagação, mais comuns são:

1. Longitudinal (ondas de dilatação);
2. Distorcional (Cisalhante, transversal ou equivolumais);
3. Superfície (Rayleigh);
4. Interfacial (Stoneley);
5. Flexão.

Ondas longitudinais são características de movimentos para frente e para atrás ao longo da direção de propagação da onda, desta forma a velocidade de partícula (U_p) para cima estará paralela à velocidade de onda (U_s) Meyers, (1994).

Caso a direção do movimento das partículas, transportadas pela onda, seja perpendicular ao movimento da onda, então haverá uma onda Distorcional. Este tipo de interação não promove alteração da densidade do meio material e não há deformações longitudinais (ϵ_{11} , ϵ_{22} , ϵ_{33}), Meyers (1994). A Figura 2.3.2 ilustra o comportamento da interação das ondas com o meio material. Pode-se observar que a onda elástica longitudinal apresenta a maior velocidade de onda.

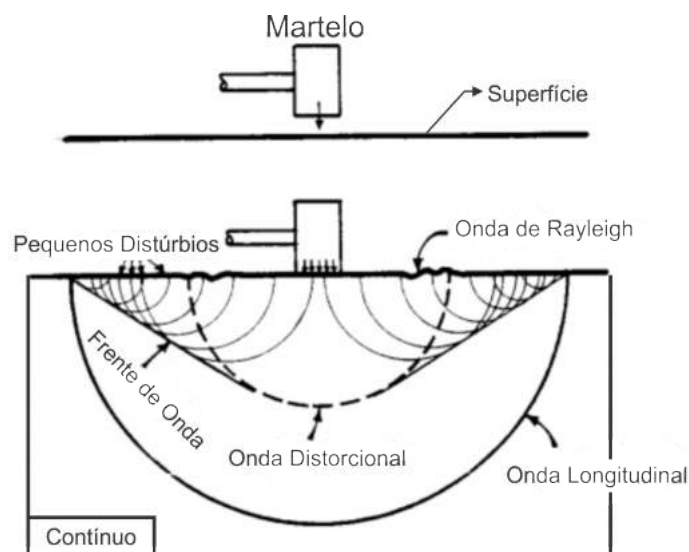


Figura 2.3.2 – Exemplificação da propagação de ondas no meio material.

Fonte: Adaptado de MEYERS, 1994.

Para a compreensão do comportamento da propagação de ondas elásticas no contínuo é necessário considerar as equações de conservação de momento para derivar a equação da onda elástica.

Como demonstrado por Meyers (1994), as equações das velocidades das ondas elásticas, cisalhantes e de Rayleigh podem ser obtidas a partir da relação geral da lei de Hooke para um

meio material isotrópico, bem como para um estado triaxial de tensões através das seguintes relações:

$$\mu = E/[2(1 + \nu)] \quad (2.1)$$

$$\lambda = (\nu E)/[(1 + \nu)(1 - 2\nu)] \quad (2.2)$$

$$V_{Long} = C_1 = [(\lambda + 2\mu)/\rho]^{1/2} \cdot 10^3 \quad (2.3)$$

$$V_{Cis} = C_s = (\mu/\rho)^{1/2} \cdot 10^3 \quad (2.4)$$

$$V_{Sup} = C_R = (0,862 + 1,14\nu)/(1 + \nu) \cdot C_s \quad (2.5)$$

2.3.2 ONDAS PLÁSTICAS

Conforme Meyers (1994), quando o campo de tensão em um material dúctil excede seu limite elástico, há formação de onda plástica. Este fenômeno ocorre em casos de carregamentos quase estáticos e dinâmicos. Característico pela formação de um pulso plástico no meio material, resultando no deslocamento da onda elástica seguida pela onda plástica.

- Em hastes, fios e barras;
- Em corpos semi-infinitos;
- Cisalhantes (ondas torcionais).

Em cada ponto, a velocidade de propagação da onda é uma função da taxa de variação da tensão em relação à deformação para o estado de deformação vigente e da massa específica do material.

$$\sigma = \sigma_0 + k\epsilon^n \epsilon^{ms} \quad (2.6)$$

Existem derivações de equações que tratam da velocidade de propagação da frente de onda plástica, porém a equação geral é:

$$C_p = [(d\sigma/d\epsilon)/\rho]^{1/2} \quad (2.7)$$

Onde a velocidade de onda plástica (C_p) somente é constante em certo valor de deformação (ϵ) (MEYERS, 1994). A partir da relação da tensão com a deformação, é possível observar que as velocidades da onda elástica serão superiores às das ondas plásticas, e que a velocidade da onda diminui com o aumento da pressão como ilustrado na Figura 2.3.3.

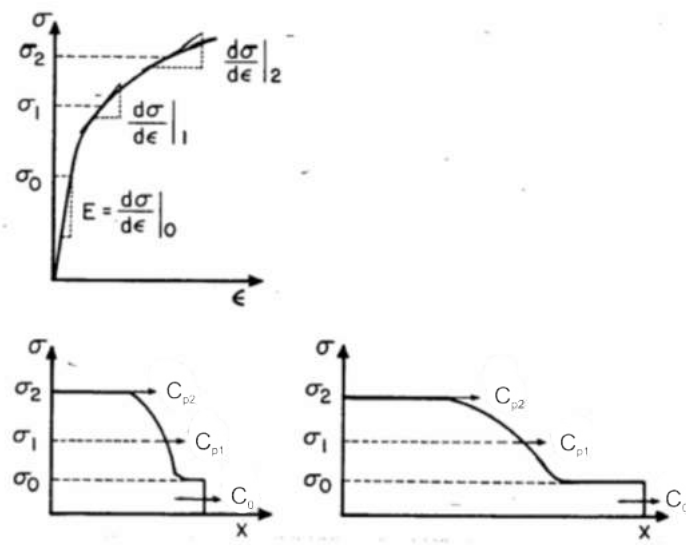


Figura 2.3.3 – Dispersão de ondas, forma da frente de onda plástica e elástica propagando no meio em função do tempo.

Fonte: Retirado de Meyers, 1994.

2.3.3 ONDAS DE CHOQUE

Ondas de choque apresentam, tipicamente, uma frente de onda íngreme. A Figura 2.3.4 ilustra a frente de onda de choque. Ocorrem quando uma onda plástica propaga em um corpo semi-infinito e o campo de tensão excede a força de fluxo dinâmico. Resultando assim, em um estado triaxial de tensões, porém uniaxial de deformação Meyers (1978). A atenuação, o alongamento observado, é resultante da propagação da frente de onda à velocidade superior que às demais regiões.

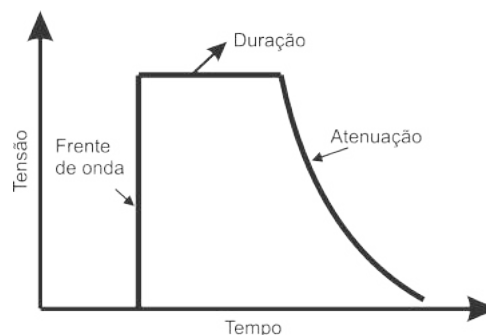


Figura 2.3.4 – Perfil idealizado da onda de choque.

Fonte: : Adaptado de MEYERS, 1994.

Ainda segundo Meyers (1994), os conceitos de propagação de onda de choque e equações de conservação de massa, momento e energia podem ser facilmente entendidas através de uma

analogia, um pistão comprimindo fluido compressível em um cilindro, Figura 2.3.5, ilustrando o comportamento da onda de choque.

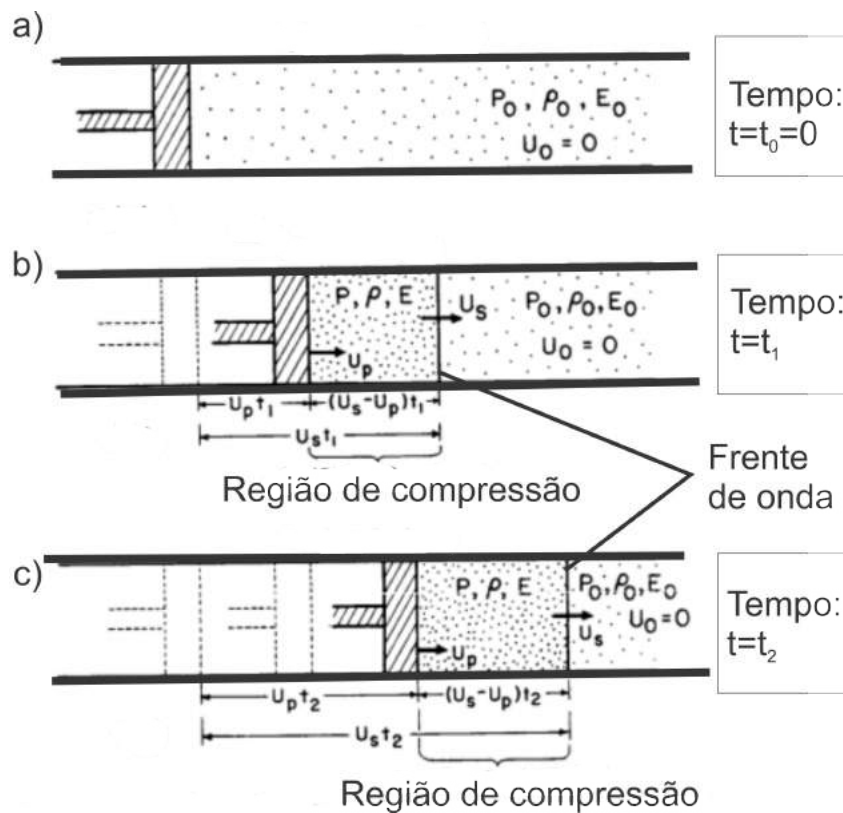


Figura 2.3.5 – Analogia da propagação de onda de choque a partir do movimento das partículas impulsionadas por um pistão em um cilindro com fluido compressível: (a) antes do choque; (b) Instante t_1 após o choque; (c) instante t_2 após t_1 .

Fonte: : Adaptado de MEYERS, 1994.

Inicialmente na Figura 2.3.5(a) o sistema está em equilíbrio apresentando sua densidade inicial (ρ_0), pressão inicial (P_0) e velocidade $U_0 = 0$. Na Figura 2.3.5(b e c) após o início do movimento, de deslocamento igual a $(U_s - U_p)t$ e, conseqüentemente, o choque. Pode-se observar duas regiões bem definidas, uma região submetida à campos compressivos e outra região estática, sem perturbação. Conforme Rosenberg e Dekel (2012), pode-se admitir que essa frente de onda não apresenta espessura relevante e que o material atrás estará comprimido para um estado de alta pressão e densidade. Este estado depende da velocidade de impacto e das propriedades dos materiais envolvidos no evento.

As partículas submetidas ao campo compressivo apresentam pressão P_1 , onde $P_1 > P_0$, resultando em uma alteração na densidade do material ($\rho_2 = \rho_1 \neq \rho_0$). Partículas neste campo de pressão apresentam velocidade de partícula $U_p \neq 0$, enquanto a frente de onda apresenta velocidade U_s , onde $U_s > U_p$.

A partir do comportamento observado na Figura 2.3.5, pode-se constatar que a equação

de conservação da massa para este sistema é independente do tempo e é descrita pela seguinte relação:

$$U_s \rho_0 = (U_s - U_p) \rho \quad (2.8)$$

A equação do momento é obtida pela relação da massa e da velocidade de partícula, para o caso de impactos, o momento é gerado pelo impulso resultante do choque e sua formulação é:

$$P - P_0 = U_p (U_s - U_p) \rho \quad (2.9)$$

Conforme Meyers (1994), a equação da conservação de energia, em sistemas simples, pode ser obtida pois trabalho das forças externas deve ser igual a mudança na energia interna mais a mudança da energia cinética do corpo. Na região de compressão, em certo tempo (t), a mudança na energia interna é descrita por:

$$e_1 [\rho (U_s - U_p) t] - e_0 [\rho_0 U_s t] = (e_1 - e_0) \rho_0 U_s t \quad (2.10)$$

A Equação 2.10 pode ser rearranjada da seguinte forma:

$$e_1 - e_0 = 0,5 (P + P_0) (1/\rho_0 - 1/\rho) \quad (2.11)$$

Aplicando a formulação da energia cinética (E_{cn}), Equação 2.12 na teoria de onda partícula resulta na Equação 2.13.

$$E_{cn} = 0,5 m v^2 \quad (2.12)$$

$$0,5 \rho (U_s - U_p) U_p^2 t = 0,5 \rho_0 U_s U_p^2 t \quad (2.13)$$

Para casos em que a onda de choque for estacionária, ou seja, quando não há forças externas atuando, a energia cinética será igual à mudança na energia interna e teremos:

$$e_1 - e_0 = 0,5 U_p^2 \quad (2.14)$$

Conforme Meyers (1994), essas equações são análogas às relações propostas por Rakine-Hugoniot para equações de conservação em ondas de choque.

As velocidades da frente de onda de choque (U_s) e da partícula (U_p) normalmente são medidas experimentalmente através de ensaios de impacto entre placas. Conforme Rosenberg e Dekel (2012), pode-se determinar a equação de estado do material através de experimentos com impactos em diferentes velocidades. É possível representar essa equação de estado graficamente através das relações entre pressão e velocidade de partícula, atrás da frente de onda, sendo esta

conhecida como “curva de Hugoniot”, ilustrada na Figura 2.3.6. Esta curva é caracterizada por considerar a variação da energia interna (temperatura).

A energia interna é a soma da energia cinética das partículas (translação, rotação e vibração) com a energia potencial destas (ligação entre átomos ou moléculas), ou seja, é diretamente relacionada a temperatura. Como descrito na Equação 2.14, para o caso de impactos, pode-se relacionar a variação da energia interna com a energia cinética da partícula.

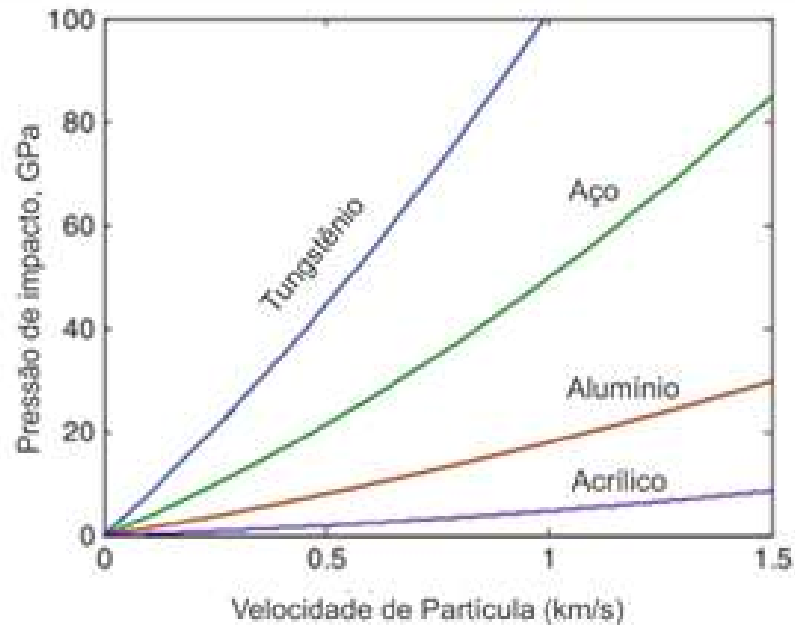


Figura 2.3.6 – Curvas de Hugoniot para alguns materiais.

Fonte: : Adaptado de Rosenberg e Dekel, 2012.

Conforme Rosenberg e Dekel (2012), a relação entre a velocidade da onda de choque e a velocidade de partícula, em muitos materiais, se demonstrou linear e é descrita pela equação de estado de choque linear (EOS):

$$U_s = C_0 + SU_p \quad (2.15)$$

Onde:

- C_0 é conhecido como velocidade do som no meio material;
- S é a inclinação da curva experimental e varia de 1,0 a 1,5.

Segundo Meyers (1994), esta relação entre U_s e U_p descreve, com veracidade, a resposta de materiais que não apresentem mudança de fases. Os valores de C_0 e S são usualmente encontrados na literatura.

Conforme Rosenberg e Dekel (2012), as equações de estado estabelecem as relações entre a densidade do material, pressão e a temperatura buscando caracterizar o estado. Uma das formulações mais usuais para o comportamento elástico dos materiais é a equação de Mie-Gruneisen. Esta equação de estado é bem ajustada para os modelos das curvas de Hugoniot e serve para determinar o comportamento de materiais que apresentem não linearidades, como no caso de materiais porosos e materiais que sofrem transformação de fase, e é dada por:

$$P = P_H(\rho) + \Gamma\rho(e - e_H) \quad (2.16)$$

Onde:

- P é a pressão exercida;
- P_H é a pressão segundo parâmetros da curva de Hugoniot, temperatura à 0 K;
- Γ é o parâmetro de Gruneisen;
- e é a energia interna do sólido;
- e_H é a energia segundo parâmetros da curva de Hugoniot.

O parâmetro de Gruneisen refere-se ao efeito que a mudança do volume da rede cristalina promove nas propriedades vibracionais da rede, conseqüentemente, descreve a relação da temperatura com a dinâmica da rede cristalina e pode ser apresentado como:

$$\Gamma = \frac{\alpha C_0^2}{C_P} \quad (2.17)$$

Onde:

- C_P é a capacidade térmica a pressão constante;
- C_0 é a velocidade do som no meio material;
- α é o coeficiente expansão térmica de volume.

Rosenberg e Dekel (2012), ressalta que $\Gamma = 2,0$ para muitos sólidos a temperatura ambiente.

O valor do parâmetro de Gruneisen para o estado de referência ($P=0$, $\varepsilon = 0$ e $T= 300$ K) pode ser obtido através das Equação 2.18.

$$\Gamma_0 = (\alpha V_0)/(C_v K_T) \quad (2.18)$$

Onde:

- C_v é o calor específico a volume constante;
- K_T é o coeficiente de compressibilidade isotérmica;
- V_0 é o volume específico a pressão 0;
- Γ_0 Parâmetro de Gruneisen no estado de referência.

Aplicando a relação da Equação 2.18 na Equação 2.19 resulta na Equação 2.20, referente ao coeficiente de Gruneisen para a temperatura instantânea.

$$\Gamma(V)/V = \Gamma_0/V_0 = \text{Constante} \quad (2.19)$$

$$\Gamma(V) = (\alpha V)/(C_v K_T) \quad (2.20)$$

Segundo Mayers (1994), pode-se aproximar $\Gamma \cong \Gamma(V)$, sendo esta relação válida para algumas centenas de gigapascals de pressão em materiais sólidos com ou não porosidade.

Torna-se interessante representar a Equação 2.16 no referencial de estado à 0 Kelvin (0K), utilizando a relação obtida na equação 2.20 pode-se escrever a Equação 2.21.

$$P - P_{0K} = \Gamma \rho (e - e_{0K}) \quad (2.21)$$

A equação 2.16 relaciona a pressão e a energia obtidas através dos equacionamentos de choque de Hugoniot, destaca-se então as seguintes formulações, Equação 2.22 e Equação 2.23 respectivamente para pressão e energia conforme Hugoniot:

$$P_H = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu (1 + (\rho/\rho_0))}{[1 - (S_1 - 1)(\rho/\rho_0)]^2} \quad (2.22)$$

$$E_H = \frac{1}{2} \frac{P_H}{\rho_0} \frac{\eta}{(1 + (\rho/\rho_0))} \quad (2.23)$$

No campo do estudo das ondas de choque, usualmente, realizam-se estudos de impactos planares, normais e paralelos. O impacto planar é um dos métodos mais usuais, implica no choque de duas superfícies planas. Impacto em superfícies paralelas se dá através do movimento simultâneo de duas placas. Enquanto impactos normais são característicos de ensaios balísticos, onde se tem um projétil viajando em certa velocidade na direção da placa alvo.

Após os impactos duas ondas de choque compressivas são formadas, uma onda se propaga no projétil e outra no alvo. Mesmo após o evento, parte do projétil ainda se desloca com a velocidade logo antes do impacto, devido à característica de onda partícula.

Na interface do impacto conforme Meyers (1994), devem existir duas premissas para estabelecer os equacionamentos. A primeira é que o material deve ser contínuo através da interface de impacto, ou seja, deve apresentar a mesma velocidade na região de compressão. Caso contrário, a energia pode ter se dissipado na forma de criação de vazios e zonas de altíssima densidade. A segunda condição, é que a pressão deve ser a mesma para ambos os materiais na interface de impacto. O evento de impacto está exemplificado na Figura 2.3.7.

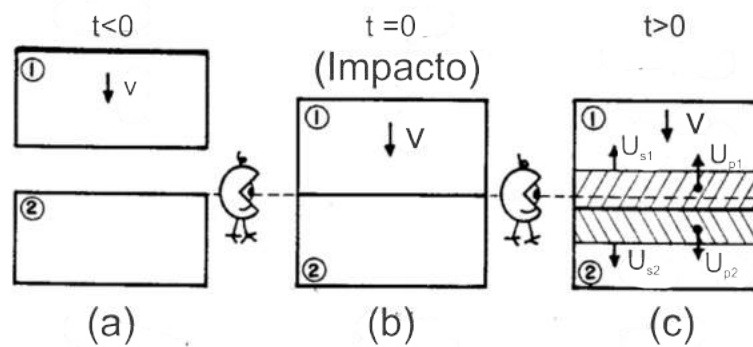


Figura 2.3.7 – Evento de impacto, (a) Projétil de material 1 viajando a velocidade (v); (b) instante do impacto, projétil material 1 no alvo material 2; (c) Instante após o impacto, propagação de ondas.

Fonte : Adaptado de Rosenberg e Dekel, 2012.

Temos que antes do impacto, todas as partículas do projétil têm a mesma velocidade (V), no instante que ocorre a interação do projétil-alvo, essa velocidade é decomposta em velocidade de partícula no alvo e no projétil e essa relação pode ser descrita pela seguinte equação:

$$U_{p1} + U_{P2} = V_{proj} \tag{2.24}$$

A partir dessa relação, considerando a equação de conservação do momento podemos deduzir que:

$$P_1 = \rho_1 U_{s1} U_{p1} \tag{2.25}$$

$$P_2 = \rho_2 U_{s2} U_{p2} \tag{2.26}$$

Aplicando a EOS para estes materiais e rearranjando estas equações, pode-se isolar a velocidade de partícula, resultando na Equação 2.27.

$$Up_2 = \frac{-(\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1 + 2\rho_1 S_1 V_{proj}) \pm \Delta^{0,5}}{2(2\rho_2 S_2 - \rho_1 S_2)} \quad (2.27)$$

Onde:

$$\Delta = (\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1 + 2\rho_0 S_1 V_{proj})^2 - 4(-\rho_1)(\rho_2 S_2 - \rho_1 S_1) \quad (2.28)$$

A multiplicação da densidade pela velocidade de onda de choque (ρUs) é conhecida como impedância sônica. O entendimento dos efeitos da impedância sônica em eventos de impacto é imprescindível para o desenvolvimento de projetos que envolvam a dinâmica do impacto.

A Figura 2.3.8, exemplifica uma típica curva de tensão versus velocidade de partícula. Nesta curva de Hugoniot invertida, o cruzamento das curvas marca o ponto da interação entre impedâncias. A impedância é o coeficiente angular dessas curvas.

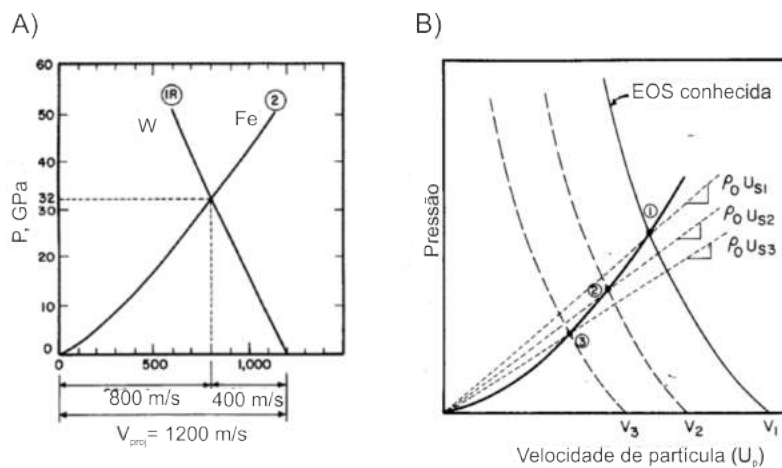


Figura 2.3.8 – (A) método de cruzamento das impedâncias; (B) Demonstração do método de ajuste segundo à impedância sônica.

Fonte: :Adaptado de Meyers, 1994.

Existem dois tipos de interação que podem resultar do cruzamento de impedâncias:

1. Impedância do projétil é maior que a impedância do alvo;
2. Impedância do alvo é maior que a impedância do projétil.

No caso (1), Figura 2.3.9, pode-se observar o comportamento da onda de choque quando um projétil de impedância menor atinge um alvo com impedância maior. A pressão P_1 em decorrência da diferença de impedância, deve ser alterada para que o equilíbrio seja alcançado, isto ocorre através do método de cruzamento das impedâncias e pode ser observado na Figura 2.3.9(a). A Figura 2.3.9(b) apresenta o efeito da interação da onda com a interface de choque.

Pode-se constatar que a pressão no material B é maior do que no material A, porém esse aumento de pressão ocorre com a redução da velocidade de partícula em B. Pode-se também destacar que a onda refletida na interface retorna pelo corpo do projétil como uma onda compressiva.

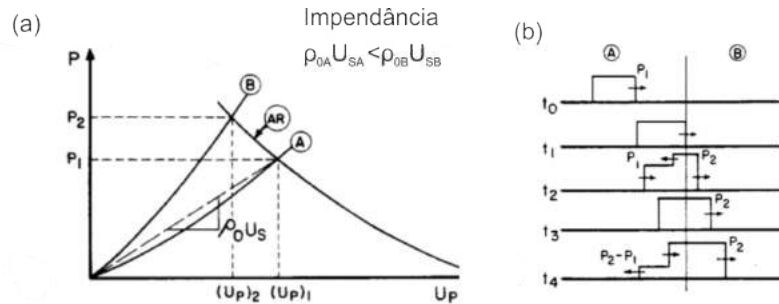


Figura 2.3.9 – Exemplificação da interação da onda de choque na interface de contato, de um projétil com impedância menor

Fonte: :Adaptado de Meyers, 1994.

A Figura 2.3.10 ilustra o caso de um impacto de um projétil de material com impedância maior do que o material do alvo. O efeito do cruzamento das impedâncias também ocorre em função de estabilizar o sistema, neste caso, a onda de pressão transmitida é menor no material B do que no material A, em contra partida a velocidade de partícula é maior no material B do que no material A. Pode-se observar que a onda refletida no projétil tem comportamento trativo.

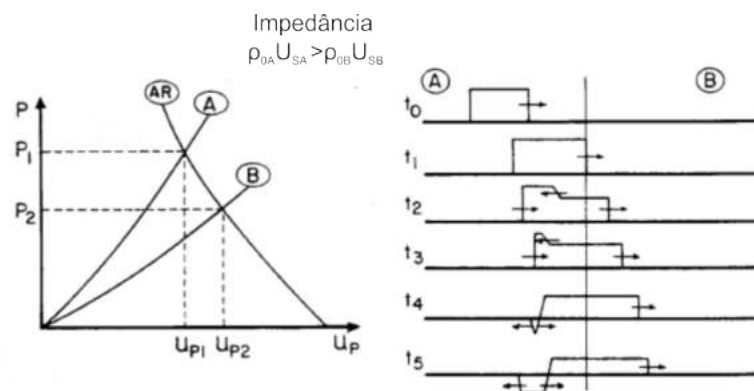


Figura 2.3.10 – Exemplificação da interação da onda de choque na interface de contato, de um projétil com impedância maior.

Fonte: :Adaptado de Meyers, 1994.

Importante ressaltar que para o caso de uma onda interagindo com uma superfície livre, como, por exemplo, o fim da placa ou do projétil, esta onda interagirá com o ar e resultará em uma onda refletida de mesma intensidade porém de carácter trativo, que induzirá uma intensidade de pressão nula viajando no espaço material a velocidade de partícula $2U_p$.

2.3.4 MODELOS CONSTITUTIVOS DE MATERIAIS EM EVENTOS DINÂMICOS

Foram propostas várias formulações matemáticas para incorporar as propriedades dos materiais em modelos constitutivos. Estes modelos buscam descrever o comportamento dos corpos quando submetidos ao campo de tensão-deformação, vários destes foram elaborados para descrever os comportamentos dinâmicos dos materiais, considerando propriedades termodinâmicas e mecânicas, como tensão, deformação, taxa de deformação, volume, pressão, temperatura, entropia, densidade, entre outras propriedades.

Neste trabalho são abordados os modelos propostos por Johnson e Cook (1983), Steinberg, Cochran e Guinan (1980).

2.3.4.1 Modelo de Johnson-Cook

Conhecido por ser um modelo constitutivo de plasticidade fenomenológico, foi modelado por Johnson-Cook (JOHNSON e COOK, 1983). Este modelo considera os efeitos decorrentes de endurecimento por encruamento, taxas de deformação (viscosidade) e amolecimento térmico, usualmente seu equacionamento é dado por:

$$\bar{\sigma} = (A + B\epsilon^{-n})(1 + C_n \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}) \left(1 - \frac{T - T_{amb}}{T_m - T_{amb}}^{m_t}\right) \quad (2.29)$$

Onde:

- $(A+B\epsilon^{-n})$ é a parcela referente ao endurecimento por encruamento
- $(1 + C_n \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0})$] é a parcela referente a influência da taxa de deformação
- $(1 - \frac{T-T_{amb}}{T_m-T_{amb}}^{m_t})$ é a parcela referente a influência da temperatura;

Temos que:

- σ , é a tensão plástica equivalente, (MPa);
- $\bar{\epsilon}$, é a deformação plástica equivalente;
- $\dot{\bar{\epsilon}}$, é a taxa de deformação plástica equivalente;
- $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ é a taxa de deformação plástica no valor de referência (s^{-1});
- T , é a temperatura instantânea, (°C);
- T_m , é a Temperatura de fusão, (°C);
- T_{amb} , é a temperatura ambiente, (°C);

- A, é a tensão de escoamento inicial, (MPa);
- B, é a constante de encruamento, (MPa);
- n, é o expoente de encruamento;
- C_n , é a constante da taxa de deformação;
- m_t , é o coeficiente de amolecimento térmico;

2.3.4.2 Modelo de Steinberg-Cochran-Guinan

Este modelo, apresentado por Steinberg, Cochran e Guinan (1980), também se enquadra na classificação de modelo fenomenológico, empírico. Segundo Steinberg, Cochran e Guinan (1980), o modelo foi desenvolvido, primeiramente, explicitamente para metais submetidos a altas taxas de deformação ($\dot{\epsilon} \geq 10^5 [s^{-1}]$), onde constatou-se que a dependência da taxa de deformação poderia ser negligenciada. Os autores destacam que a alta redução na dependência da taxa de deformação durante o aumento da tensão dinâmica pode ser explicado pelo aumento dos efeitos decorrentes da temperatura.

Steinberg, Cochran e Guinan (1980), mostraram que os efeitos das taxas de deformação apresentam maior influência na determinação do perfil de onda de choque decorrente de tensões entorno de poucos GPa. Porquanto, para valores de tensões acima de 10 GPa esses efeitos se tornam insignificantes, tornando plausível um modelo constitutivo independente da taxa de deformação. Os equacionamentos propostos são:

$$\Upsilon = \Upsilon_0 [1 + \beta(\epsilon - \epsilon_i)]^n \left[1 + \frac{\Upsilon'_p}{\Upsilon_0} \frac{P}{\eta^{1/3}} + \frac{G'_T}{G_0} (T - 300) \right] \quad (2.30)$$

$$G = G_0 \left[1 + \frac{G'_p}{G_0} \frac{P}{\eta^{1/3}} + \frac{G'_T}{G_0} (T - 300) \right] \quad (2.31)$$

Onde:

- Υ , é a tensão de escoamento;
- Υ_0 , é a tensão de escoamento de referência (P=0, $\epsilon=0$ e T=300K);
- Υ'_p , é a derivada de $d\Upsilon/dP$, a máxima tensão de escoamento;
- P, é a pressão;
- η , é a compressão, e é definida pela razão entre o volume específico inicial e o volume específico no instante;
- G'_T , é a derivada de dG/dT , sendo G o módulo de cisalhamento;

- G_0 , é o módulo de cisalhamento na condição de referência ($P=0$, $\epsilon=0$ e $T=300K$);
- G'_p , é a derivada de dG/dP ;
- T , Temperatura, ($^{\circ}K$);
- β , coeficiente de encruamento;
- ϵ , deformação plástica no instante;
- ϵ_i , deformação plástica inicial equivalente, geralmente igual a zero;
- n , expoente de encruamento.

Steinberg, Cochran e Guinan (1980), destaca a relação entre o módulo de cisalhamento com a pressão e temperatura. O aumento da pressão do sistema resulta no aumento do módulo de cisalhamento e a redução da temperatura resultará na redução do módulo. Os autores também ressaltam que nesta faixa onde a taxa de deformação pode ser negligenciada, temos que Υ/G é constante e assume-se que as mesmas dependências das temperaturas presentes para a tensão de escoamento, estão presentes no módulo de cisalhamento.

2.3.4.3 Modelo de Dano de Johnson-Cook

Conforme Hiermaier (2008), este modelo, extensivamente utilizado, propõe um valor de deformação crítica equivalente para que ocorra a fratura. Sendo este valor, uma função do campo triaxial de tensões e pode ser descrito como:

$$\bar{\epsilon}_f = [D_1 + D_2 e^{(D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}})}] [1 + D_4 \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}] [1 + D_5 \frac{T - T_{amb}}{T_M - T_{amb}}] \quad (2.32)$$

Onde:

- $[D_1 + D_2 \exp(D_3 (\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}))]$, apresenta dependência da pressão;
- $[1 + D_4 \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}]$, apresenta dependência da taxa de deformação;
- $[1 + D_5 \frac{T - T_{amb}}{T_M - T_{amb}}]$, apresenta dependência da temperatura.

Temos que:

- $\bar{\epsilon}_f$, deformação crítica equivalente para que ocorra a fratura;
- D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 , são as constantes do modelo de dano;
- $\dot{\epsilon}_0$, é a taxa de deformação plástica equivalente normalizada ($(\dot{\epsilon}_0)=1 \text{ s}^{-1}$)
- σ_m , tensão média;

- σ_{eq} , tensão equivalente de escoamento;
- $\eta_d = \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right)$, é o efeito do estado triaxial de tensões.

Segundo Murugesan e Jung (2019), o critério de dano no elemento é baseado na lei de dano acumulativo e pode ser representado por:

$$D = \sum \left(\frac{\Delta \epsilon}{\bar{\epsilon}_f} \right) \quad (2.33)$$

Onde $\Delta \epsilon$, é o incremento da deformação plástica. Os parâmetros de dano variam entre 0 e 1 e o dano acontece quando o parâmetro chega em 1.

2.3.5 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Conforme o problema deste estudo aborda tensões e deformações transientes no meio contínuo, sendo este um problema de valor de contorno no espaço (PVC) e de valor inicial no tempo (PVI), utiliza-se o método dos elementos finitos (MEF) na discretização espacial dos corpos. Através da subdivisão do corpo em elementos menores, ou seja, em uma malha de nós ligados entre si por arestas, onde cada elemento de malha representa um volume material, ilustrado na Figura 2.3.11.

Pode-se discretizar os corpos através da utilização de malha estruturada ou não estruturada e por partículas. Diversas geometrias de elementos e equações governantes podem ser aplicadas, porém, em geral, o comportamento dos elementos é bem definido. Desta forma, quanto maior o número de elementos utilizados em uma malha, menores serão estes. Quanto menor for um elemento, maior será a complexidade da malha e conseqüentemente maior será a demanda computacional.

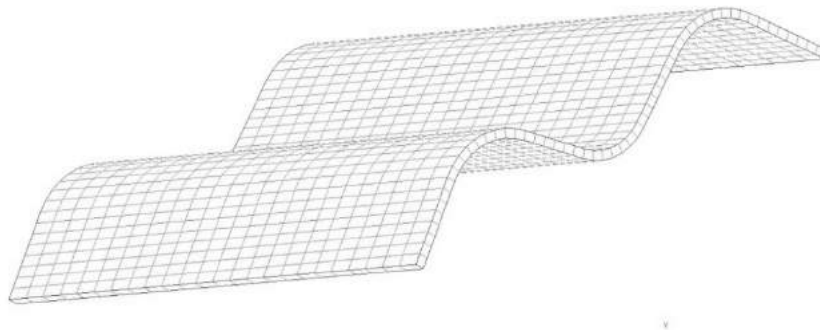


Figura 2.3.11 – Exemplo de malha ajustada a um corpo.

A integração numérica pode ocorrer de modo implícito ou explícito no tempo. Conforme Hiermaier (2008), a exatidão e estabilidade dos resultados de integrações numéricas dependem da

discretização das posições no tempo e espaço. Um modelo implícito ($t+\Delta t$) apresenta vantagens em questão da estabilidade, se comparado à métodos explícitos. Porém modelos implícitos tem a desvantagem de para qualquer valor menor de Δt , sobrestimar resultados e para casos de alta não linearidade a convergência não é garantida (ANSYS, 2020).

ANSYS (2020), expõe que no método explícito as equações são desacopladas, sendo desnecessária qualquer verificação da convergência, ou seja, a partir da garantia dos critérios de estabilidade (relação entre passo de tempo, razão entre as velocidades do som no meio e o comprimento do elemento característico.) a convergência é garantida.

Torna-se evidente a vantagem da utilização do método explícito, para o caso, foco deste estudo, onde o comportamento dinâmico do material apresenta não linearidades. Conforme Santos (2012), para o caso de impactos balísticos, o regime que governa os eventos dinâmicos pode ser modelado com equacionamentos hidrodinâmicos, ou seja, utilizando a matriz diagonalizada das tensões hidrostáticas.

As integrações numéricas através do método explícito de diferenças finitas, método da diferença central (MDC), para a solução discreta no tempo, são vantajosas. Permitem trabalhar com a matriz de rigidez efetiva (considera inércia, rigidez e amortecimento diagonal), possibilitando a solução do sistema sem métodos iterativos ou a inversão de matriz. Conforme Lapa (1987, apud SANTOS, 2012), desprezando o tensor de tensões cisalhantes ou os incorporando nos termos da matriz diagonalizada, torna-se possível a obtenção de $dt+\Delta t$ sem ter que realizar a inversão das matrizes, como ocorre no modo implícito ($t+\Delta t$). ANSYS (2020), expõe que todas as não linearidades, incluindo o contato, são embutidas no vetor de força interna.

Conforme ANSYS (2020), a modelagem explícita dinâmica é adequada para eventos que ocorram em curtos períodos, alguns milissegundos ou menos. Eventos de duração maior que 1 segundo podem ser modelados, porém demandarão maior tempo de resolução e consequentemente mais erro numérico. Os modelos de dinâmica explícita permitem a simulação da mecânica estrutural envolvendo, uma ou mais das seguintes condições:

- Impactos de baixa (1 m/s) á altas velocidades (5000 m/s);
- Propagação de onda de pressão;
- Resposta dinâmica à alta frequência;
- Condições complexas de contato;
- Comportamentos complexos dos materiais, incluindo condições de danos e falha;
- Resposta estrutural não linear, incluindo flambagem;
- Falha nas ligações, soldas e fixadores;
- Propagação de ondas de choque em meio solido e líquido;

- Corpos rígidos e flexíveis;

Análises de dinâmica explícita consideram as condições iniciais do corpo e suas condições de contorno, avaliando a conservação de massa, momento e energia em coordenadas Lagrangeanas. Conforme ANSYS (2020), as formulações de Lagrange estão disponíveis no módulo de dinâmica explícita presente em seu software. Neste modelo, a malha se move e distorce com o material, conservando sua massa e sua densidade pode ser obtida em qualquer momento através desta relação.

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V} \quad (2.34)$$

As equações diferenciais parciais que governam a conservação do momento relacionam a aceleração ao tensor de tensões (ANSYS, 2020).

$$\nabla(\sigma + b) = \rho \ddot{x} \quad (2.35)$$

Para a conservação de energia tem-se a seguinte relação.

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} \sigma \dot{\epsilon} \quad (2.36)$$

Conforme Bathe (1996), para a solução de problemas dinâmicos, utiliza-se a equação do movimento, Equação 2.37.

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = F^a \quad (2.37)$$

Onde:

- $[M]$, é a matriz massa;
- $[C]$, é a matriz amortecimento;
- $[K]$, é a matriz rigidez;
- \ddot{x} , \dot{x} , x , são respectivamente a aceleração, velocidade e deslocamento.
- F^a , força aplicada.

Utilizando os equacionamentos pelo método das diferenças centrais, conforme Bathe (1996) para um instante t_n a velocidade e aceleração podem ser descritas por:

$$\dot{x} = [1/(2\Delta t)](x_{n+1} - x_{n-1}) \quad (2.38)$$

$$\ddot{x} = [1/(\Delta t)^2](x_{n+1} - 2x_n + x_{n-1}) \quad (2.39)$$

Ao utilizarmos o MDC com as matrizes de massa e amortecimento agrupadas (diagonais), Equação 2.40, permitindo o desacoplamento das equações e sua solução explícita no tempo. A equação 2.41 descreve o algoritmo explícito simplificado, conforme pode ser constatado em ANSYS (1999), a totalidade dos equacionamentos utilizados em seus modelos numéricos são amplamente mais complexos.

$$[\bar{K}] = (1/\Delta t^2)[M]_{Diag} + (1/2\Delta t)[C]_{Diag} \quad (2.40)$$

$$[\bar{K}]x_{n+1} = \bar{F}_t \quad (2.41)$$

Onde o vetor força nodal aplicada no instante t é descrito pela Equação 2.3.5.

$$\bar{F}_t = F(t)_t - [[K(x)] - \frac{2}{\Delta t^2}[M]_{Diag}]x_t - [\frac{2}{\Delta t^2}[M]_{Diag} - \frac{1}{2\Delta t}[C]_{Diag}]x_{n-1}$$

(2.42)

Estas formulações estão apresentadas em modo simplificado e são calculadas para cada nó, em certo passo temporal (Δt). Utiliza-se pequenos passos de tempo, de forma a se garantir a estabilidade e convergência da solução. O tamanho do passo de tempo é limitado pela condição proposta por Courant, Friedrichs e Lewyt (1967), que expõem que este intervalo seja, tal qual, a onda de pressão não se propague além da menor dimensão do elemento característico da malha, este critério de estabilidade para o tempo é obtido por:

$$(\Delta t) \leq [f(\frac{h}{C})] \quad (2.43)$$

Onde:

- f , é o fator de estabilidade;
- h , é um fator devido à dimensão característica do elemento de malha;
- C , é a velocidade do som no meio material;

Conforme ANSYS (2020), o valor do fator h depende da geometria do elemento de malha selecionado e a Tabela 2.3.2, apresenta os parâmetros para os elementos mais usuais.

Tabela 2.3.2 – Dimensões de ajuste características dos elementos.

Tipo de Elemento	Fator h
Hexaédrico e Pentaédrico	O volume do elemento dividido pelo quadrado da diagonal mais longa da zona e escalado por $\sqrt{(2/3)}$.
Tetraédrico	A distância mínima de qualquer nó de elemento para sua face de elemento oposto.
Quadrilátero (casca), teoria de Kirkchhoff-love (<i>Quad. Shell</i>)	A raiz quadrada da área da casca.
Triangular (casca), (<i>Tri. Shell</i>)	A distância mínima de qualquer nó de elemento para sua borda de elemento oposto.

Fonte: Adaptado de ANSYS, 2020.

Existem outras formas de elementos de célula tridimensionais. Estes elementos são compostos por estruturas básicas de células bidimensionais, tais como elementos quadriláteros e triangulares. Neste trabalho foram utilizados os elementos:

- Tetraedro (TET4 e TET8), composto por 4 vértices e 6 arestas. No elemento TET4, há 4 nós posicionados nos vértices. No elemento TET8, há os 4 nós nos vértices e 4 nós no meio das faces;
- Pirâmide (PYR5), sendo está uma pirâmide de base quadrilateral, possui 5 vértices e 8 arestas formando 4 faces triangulares e 1 quadrilateral. No elemento PYR5, há 5 nós posicionados em seus vértices;
- Hexaedro (HEX8), composto por 8 vértices, 12 arestas formando 6 faces quadrilaterais. O elemento HEX8, apresenta 8 nós posicionados nos vértices do hexaedro;
- Prisma com base triangular (WED6), composto por 6 vértices e 9 arestas, apresentando 5 faces. Este elemento é composto por 6 nós posicionados nos vértices do prisma.

2.3.5.1 DESCRIÇÃO DO MOVIMENTO

Análises dinâmicas podem ser desenvolvidas a partir do referencial lagrangeano, eulerianos ou uma mescla destes.

Como foi avaliado, para o caso foco deste estudo é mais condizente utilizar uma análise do movimento segundo formulações de Lagrange.

2.3.5.1.1 Formulação de Lagrange

Método de referência lagrangeano é caracterizado por uma discretização do corpo através de uma malha ajustada a este. A Figura 2.15, ilustra a utilização de uma malha lagrangeana no evento de um bloco de material impactando em uma parede rígida.

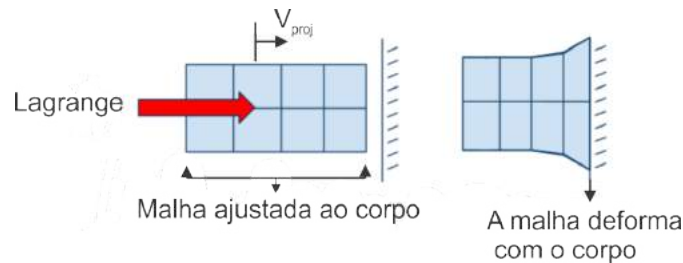


Figura 2.3.12 – Exemplificação da malha Lagrangeana.

Fonte: Adaptado de ANSYS, 2020.

Conforme ANSYS (2020), a utilização do referencial lagrangeano é o método mais eficiente e preciso para ser utilizado na maioria dos modelos estruturais. Porém, este tipo de modelagem apresenta desvantagem quando o material é submetido a extremas deformações, como ocorre em fluido ou gás escoando ao redor de um obstáculo, os elementos da malha ficarão altamente distorcidos conforme a deformação no material aumenta.

2.3.5.1.2 Formulação de Euler

O método de referência de Euler é definido por uma malha estacionária no espaço, ou seja, o material flui pela malha. A Figura 2.3.13 ilustra a malha euleriana. Neste tipo de análise a malha não sofre influência das deformações que ocorrem no corpo.

Conforme ANSYS (2020), o método euleriano apresenta um custo computacional adicional, se comparado ao método lagrangeano. Neste método é necessário transportar o material de uma célula para outra e localizar em quais células existem os materiais. Cada célula da malha pode conter um ou mais materiais, neste caso, a localização e a interface dos materiais são obtidas por aproximação.

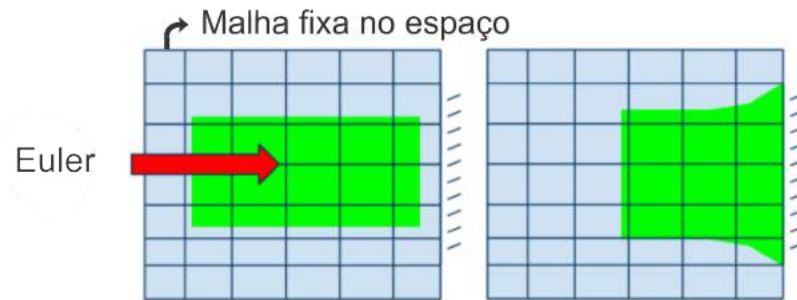


Figura 2.3.13 – Exemplificação da malha Euleriana.

Fonte: Adaptado de ANSYS, 2020.

Em sistemas de referência euleriano, o modulo do AUTODYN não consegue trabalhar com os critérios de falha do material, sendo necessário adicionar um critério geométrico (deformações) para que o material não acumule mais energia que sua tenacidade permitiria.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta dissertação apresenta como objetivo principal a análise das vantagens da geometria poliondular no emprego da liga de titânio ASTM grau 5 como proteção balística. Buscando alcançar esse objetivo, algumas etapas foram propostas.

A conformação das chapas foram realizadas no IME, utilizando matriz previamente elaborada por Cunha (2019), em parceria com a Vilares Metals. A Figura 3.0.1 ilustra o procedimento adotado para conformação das chapas.

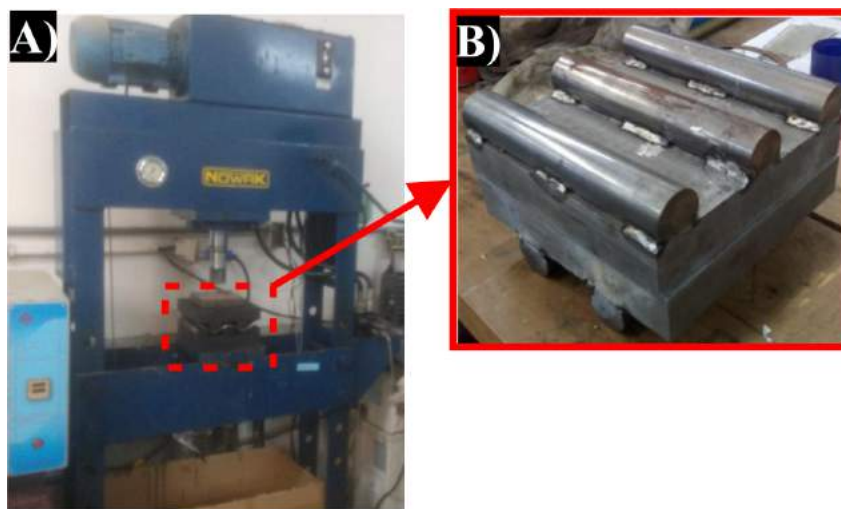


Figura 3.0.1 – Conformação das chapas. A) Prensa hidráulica Nowak, durante a conformação das chapas; B) Matriz utilizada.

Fonte: Adaptado de (CUNHA, 2019)

A primeira etapa proposta, foi a realização de uma modelagem computacional do evento de impacto do projétil de calibre 7.62x51FMJ com o material na condição como recebido, porém com geometria plana e poliondular. Esta modelagem numérica foi realizada através da ferramenta computacional de análise por elementos finitos (FEA) da empresa ANSYS, mais especificamente através do pacote AUTODYN®. Com o intuito de obter parâmetros para o planejamento do ensaio balístico, garantindo que o projétil transpassaria as placas, vale ressaltar, que neste primeiro modelo algumas simplificações foram utilizadas.

A segunda etapa proposta foi a realização dos ensaios balísticos conforme as parametrizações da modelagem preliminar. Foram obtidos dados experimentais referentes ao evento, tais como a velocidade residual do projétil e seu perfil de saída após o choque. A partir destes dados, buscaram-se ajustes ao modelo numérico final, realizando análises buscando a validação deste modelo. O ensaio balístico também permitiu observar o comportamento do material submetido à carregamento dinâmico, ou seja, foi possível observar diferentes comportamentos dinâmicos do

material dependendo da zona de impacto, podendo correlacionar este comportamento ao tipo de geometria da chapa.

A terceira etapa é constituída pela caracterização do material em condição como recebido e pela caracterização dos corpos-de-prova após o impacto, buscando investigar se houve alguma mudança de fase induzida pelo processo de conformação das chapas na geometria poliondular e devido ao ensaio balístico. A caracterização do material como recebido foi realizado através de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura, ensaio de tração, ensaio de micro dureza Vickers e por difração de raios X. Para o corpo-de-prova poliondular foi realizado ensaio de micro dureza Vickers e microscopia ótica. Para o corpo-de-prova balístico, após o ensaio, foram realizadas análises estereográficas e microscopia eletrônica de varredura.

3.1 MODELAGEM NUMÉRICA

Em termos dos parâmetros dos materiais para o regime dinâmico, foram aplicados a todos os materiais envolvidos nesta simulação, a equação governante de estado de choque proposta por Mie-Gruneisen, abordado na seção 2.3.3 e demonstrados na Tabela 3.1.1. Esta equação permite obter a pressão no meio material, a partir do ajuste dos equacionamentos de Rankine-Hugoniot, submetido a uma onda de choque.

Tabela 3.1.1 – Parâmetros para as equações de estado de choque de Mie-Gruneisen.

Constantes	Unidades	Ti-6Al-4V	Chumbo	Latão
Γ	-	1,23	2,74	2,04
C_1	m/s	5130	2006	3726
S_1	-	1,028	1,429	1,434
T_0	K	300	300	295,15
C_v	J/kgK	525	124	385

Fonte: Dados retirados de ANSYS, 2020.

Para a primeira fase de simulações, foram aplicados dois modelos de equações constitutivas dos materiais. O modelo de Johnson-Cook e Steiberg-Cochran-Guinan, abordados nas seções 2.3.4.1 e 2.3.4.2, respectivamente. Também foi implementado o modelo de falha de Johnson-Cook.

Para o Ti-6Al-4V e para o chumbo foram aplicados o modelo constitutivo de Steiberg-Cochran-Guinan. Como foi visto na seção 2.3.4.2, este modelo foi proposto para eventos de taxas de deformação superiores a $10^5 s^{-1}$, que segundo a Tabela 2.3.1, da seção 2.3, se enquadram na classificação de Meyers (1994), na faixa dos impactos de alta velocidade e de alta dinâmica.

Neste modelo constitutivo, a influência da taxa de deformação pode ser negligenciada visto que a influência da pressão e da temperatura sobrepõem os efeitos das taxas. Conforme Mohotti, Ngo e Mendis (2011), a aplicação desta equação constitutiva se justifica para o chumbo, pois este é um metal dúctil, muito macio que apresenta baixa temperatura de fusão. Como em eventos de impacto a temperatura do sistema sobe rapidamente em decorrência da interação entre os corpos, esta, por sua vez, pode facilmente superar temperatura de fusão do chumbo. No caso do Ti-6Al-4V a elevação da temperatura durante o impacto pode resultar em uma recristalização dinâmica do material, nestes casos é comum a formação de bandas de cisalhamento. Os parâmetros para análise constitutiva estão dispostos na Tabela 3.1.2.

Tabela 3.1.2 – Parâmetros para o modelo constitutivo de Steiberg-Cochran-Guinan.

Constantes	Unid.	Ti-6Al-4V	Chumbo
G	GPa	41	8,6
Y	MPa	133	8
Y ₀	MPa	212	100
β	-	12	110
n	-	0,1	0,52
dG/dp	-	0,4819	1
dG/dT	KPa/K	-2980	-9976,001
dG/dP	-	0,0153	0,0009304
Temperatura de Fusão	K	2110	760

Fonte: Dados retirados de ANSYS, 2020.

Para o Latão presente na camisa do projétil e para o alumínio presente na placa testemunha o modelo constitutivo utilizado foi o de Johnson-Cook. Os parâmetros do modelo estão dispostos na Tabela 3.1.3.

Tabela 3.1.3 – Parâmetros do modelo constitutivo de Johnson-Cook.

Constantes	Unid.	Latão	Alumínio (Testemunha)
G	Pa	37,4	25
A	MPa	112	8
B	MPa	505	90
n	-	0,42	0,35
C _g	-	0,009	0,2
m _t	-	1,68	0,7
Temperatura de Fusão	K	1189	933
$\dot{\epsilon}_0$	s ⁻¹	1	1

Fonte: Dados retirados de ANSYS, 2020.

Utilizou-se o critério de falha dinâmico de Johnson-Cook, abordado na seção 2.3.3.1, para o latão presente na camisa do projétil e para a liga de Ti-6Al-4V. Para o chumbo e para o alumínio devido a suas características, optou-se por utilizar o critério de limite de deformação plástica presente no software, no valor fixo de 1,5. Para que ocorra a erosão do material este critério considera que quando o dano alcança um valor determinado há a erosão do elemento.

Os parâmetros de falha da liga de Ti-6Al-4V e para a camisa de latão foram obtidos na literatura. Os valores dos parâmetros de Johnson-Cook utilizados estão na Tabela 3.1.4.

Tabela 3.1.4 – Constantes para o método de falha de Johnson-Cook.

Material	Constantes				
	D1	D2	D3	D4	D5
Ti-6Al-4V	-0,09	0,27	0,48	0,014	3,87
Latão	0,54	4,89	3,03	0,014	1,12

Fonte: Dados retirados de DOT/FAA (2003) e TSE, BIN, et al. (2016)

3.2 ANÁLISE NUMÉRICA COMPUTACIONAL

As análises numéricas foram realizadas através do software AUTODYN® da empresa ANSYS, o modelo numérico utiliza o método dos elementos finitos, aplicando a integração explícita e os corpos foram modelados segundo a malha lagrangeana, abordada na seção 2.4.1.1. Ressalta-se que, as premissas desta modelagem foram abordadas amplamente nas seções 2.3 e 2.4 deste trabalho.

Primeiramente o MEF foi utilizado para que seus resultados fossem analisados de forma qualitativa com o objetivo de fornecer subsídios para os comportamentos esperados pelos corpos de prova nos ensaios balísticos, melhorando o planejamento dos ensaios.

A segunda etapa consistiu na simulação do impacto balístico nas zonas de interesse (Vale, Pico, Intermediária) da proteção balística, com adição da chapa testemunha de Alumínio e inclusão do giro "twist" do projétil, conforme Cunha (2019) em decorrência do raiamento do cano, de 17522 rad/s referente a 12 pol/revolução. Após a aquisição dos dados balísticos, também foi realizado a modelagem da simulação conforme in situ no ensaio balístico, ou seja, nesta simulação o posicionamento do projétil coincide com as perfurações observadas nas chapas de Ti-6AL-4V após o ensaio balístico. A velocidade de impacto do projétil também foi ajustada conforme a velocidade obtida no ensaio.

Para a modelagem dos corpos planos, em ambas as espessuras (2 e 3 mm), foram adotadas geometrias tridimensionais reduzidas das placas, na forma uma seção circular, ilustradas na Figura 3.2.1 .

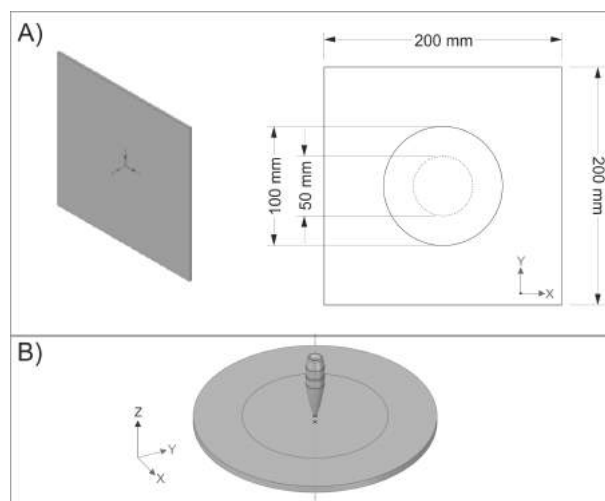


Figura 3.2.1 – Modelo geometria tridimensional reduzida adotado, A) modelo integral; B) Modelo utilizado para as simulações de placa plana.

Para a modelagem das placas poliondular foram utilizadas as geometrias tridimensionais completas, resultantes da conformação das chapas de 200x200 mm. Diferentemente da abordagem de Cunha, Gomes, et al. (2018), que propuseram a função $F(x) = 15\sin(\pi X/50)$ para modelagem dos perfis convexos, optou-se pela medição da geometria final das placas, isto pois durante a conformação destas foi constatado um retorno elástico.

Realizadas as devidas medições, as chapas foram modeladas com auxílio do software da SOLIDWORKS.

O projétil utilizado, 7.62x51FMJ, apresenta núcleo de chumbo e jaqueta de latão tendo aproximadamente 9,78 g de massa e sua velocidade na boca do cano é de aproximadamente 850 m/s. A modelagem geométrica está em conformidade com a NATO/OTAN (2020), a Figura 3.2.2 ilustra a modelagem do projétil.

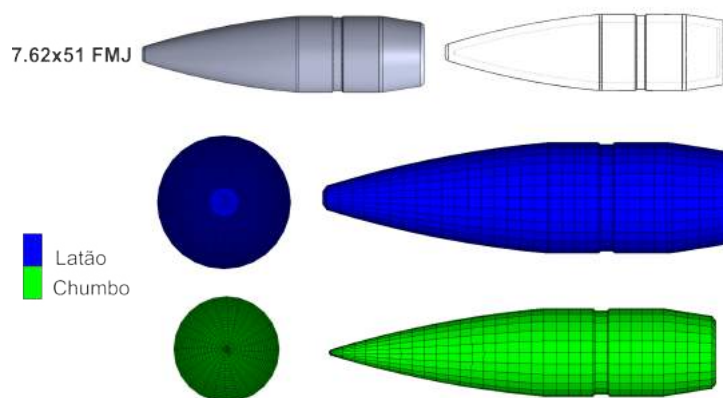


Figura 3.2.2 – Projétil 7.62x51 FMJ modelado para simulação numérica.

Para as placas planas e poliondulares de 3 mm de espessura foram avaliados impactos

entre o projétil e a chapa em velocidades de 800 m/s e 850 m/s. Para a placa poliondular de 2 mm, somente foi avaliada a velocidade de 800 m/s. A variação de velocidade foi aplicada, primeiramente, com o intuito de avaliar se o projétil obteria sucesso em transpassar a placa metálica, visando otimizar o ensaio balístico. Como a velocidade de 850 m/s na prática seria uma velocidade máxima obtida de projéteis 7.62x51FMJ, optou-se por analisar este projétil em uma velocidade inferior a máxima. Desta forma, foi possível constatar e afirmar que o projétil a 800 m/s também obteve sucesso em transpassar as placas de 3 mm de espessura, visto isto, não foi realizada a simulação da placa poliondular de 2 mm a velocidade de 850 m/s.

Nas chapas planas, simulou-se o projétil impactando no centro destas. Foi realizada a análise de variações na discretização dos corpos para a resolução do problema, sendo definidas algumas parametrizações para todas as simulações. Esses parâmetros estão dispostos na Tabela 3.2.1. As malhas resultantes estão ilustradas na Figura 3.2.3.

Tabela 3.2.1 – Parâmetros padrões para as simulações.

Modelo	Parâmetros	Definidos
Projétil	Método	MultZone
	Tipo de malha mapeada	Hexagonal
	Tipo de malha livre	Dominância hexagonal
Placas planas e poliondulares	Método	Cartesiano
	Tamanho do Elemento	2mm

Para as chapas poliondulares, na primeira etapa antes do ensaio balístico, buscou-se simular os impactos em três regiões distintas, na região de pico da onda, na região do vale da onda e na região intermediária entre pico e vale, ilustrados na Figura 3.2.4.

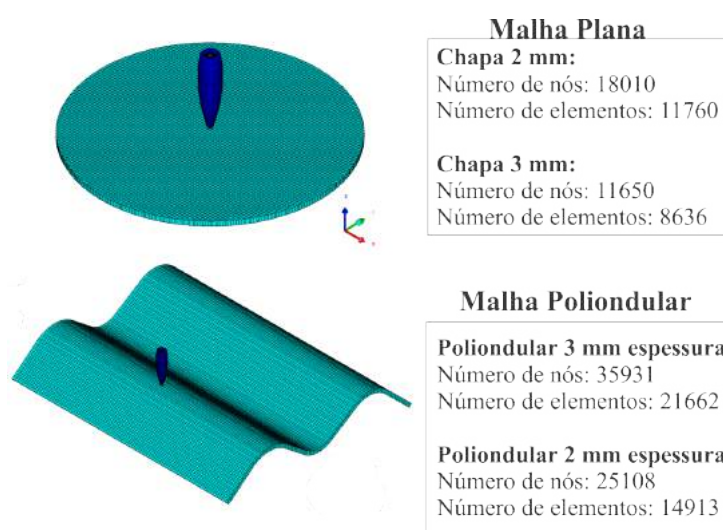


Figura 3.2.3 – Malha utilizada, análise preliminar.

Os resultados obtidos das simulações das placas planas e poliondulares foram comparados a partir das velocidades residuais e da energia absorvida no processo. Para tanto, foram desprezados os efeitos de borda, pois os eventos analisados ocorrem em intervalos de tempo tão pequenos que não há interação da onda de choque com a borda do modelo.

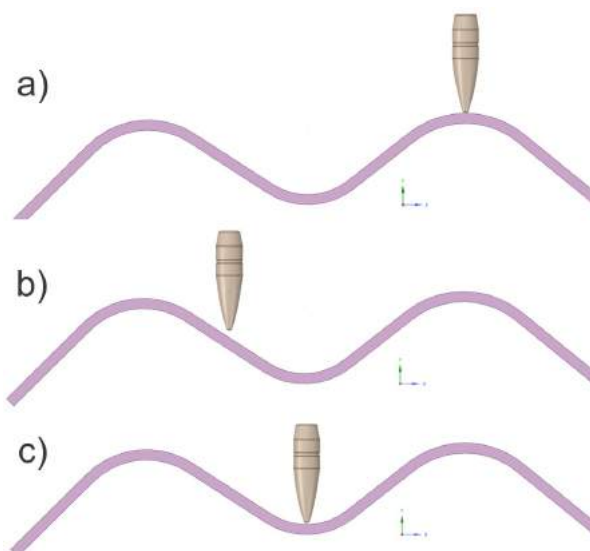


Figura 3.2.4 – Esquemática das zonas de impacto nas placas poliondulares. a) Pico; b) Intermediária; c) Vale.

Para a segunda etapa, após o ensaio balístico, foram utilizados os mesmos padrões de modelagem dos corpos e elementos, porém com redução do tamanho do elemento para 1,5 mm, resultando em melhor qualidade da malha. Simulou-se o impacto no conjunto com placa testemunha e conforme o ocorrido no ensaio balístico, variando o posicionamento de incidência do projétil, bem como a velocidade deste antes do impacto. A Figura 3.2.5 apresenta uma esquematização da malha resultante.

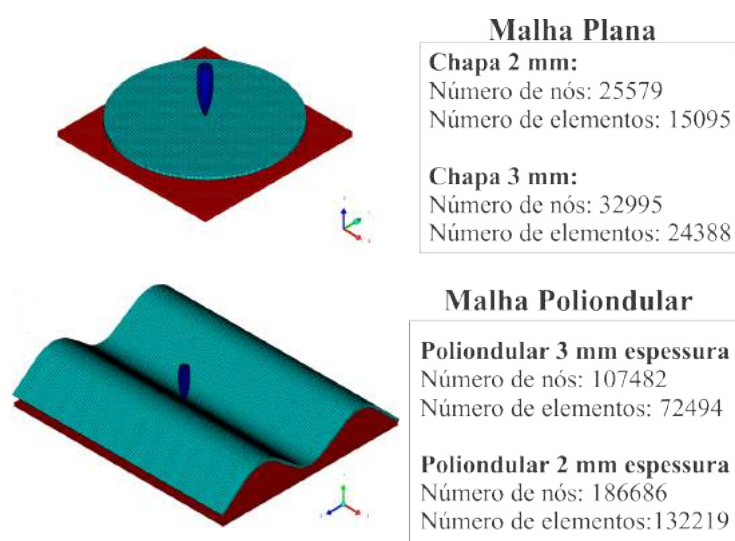


Figura 3.2.5 – Malha refinada para os modelos finais.

3.3 ENSAIOS BALÍSTICOS

Os ensaios balísticos foram realizados no Centro de Avaliações do Exército (CAEx), segundo uma adaptação da norma NBR 15000. A adaptação foi necessária, visto que as chapas apresentavam limitações geométricas para cumprir integralmente a norma.

A NBR 15000 especifica o nível de barreira balística quanto ao impacto balístico, às especificações da norma estão expostas na Tabela 3.3.1. Sendo selecionado os parâmetros para um nível de proteção III, a análise preliminar possibilitou determinar a faixa de velocidade requerida estaria de acordo com a norma. Desta forma, foram utilizadas munições comerciais da munição 7.62x51 FMJ.

Tabela 3.3.1 – Nível de proteção balística referente ao impacto balístico.

Nível	Munição	Massa do projétil (g)	V_{proj} (m/s)	Número de impactos
I	.22 LRHV Chumbo	2,6 ±0,1	320 ±10	5
	.38 Special RN Chumbo	10,2 ±0,1	254±15	5
II-A	9 FMJ	8,0 ±0,1	322±12	5
	357 Magnum JSP	10,2±0,1	381±12	5
II	9 FMJ	8,0±0,1	358±15	5
	357 Magnum JSP	10,2±0,1	425±15	5
III-A	9 FMJ	8,0±0,1	426±15	5
	.44 Magnum SWC GC	15,6±0,1	426±15	5
III	7.62x51 FMJ	9,7±0,1	838±15	5
IV	.30-06 AP	10,8±0,1	868±15	5

Fonte: Adaptado de NBR 15000 (2005).

Segundo a NBR 15000 (2005), o posicionamento dos tiros se dá em uma base quadrada de 205 mm de lado. Os disparos devem ser realizados nos vértices e no centro do corpo-de-prova, este, por sua vez deve ser composto por uma placa quadrada de 500x500 mm, ilustrado na Figura 3.3.1.

As chapas utilizadas neste estudo apresentam dimensões quadradas de 200x200 mm, visto isto, adaptou-se o ensaio para que os projéteis atingissem a placa em áreas distantes o suficiente para que não haja influência dos demais disparos. Neste contexto, reduziu-se o número de tiros por placa de cinco para três, sendo estes dispostos conforme a Figura 3.3.2.

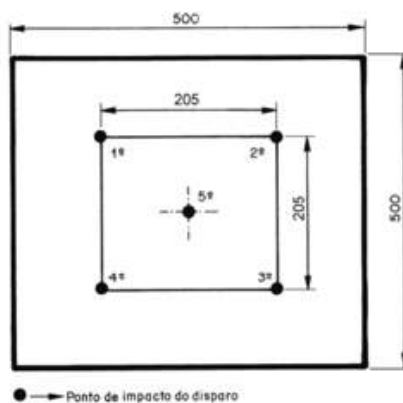


Figura 3.3.1 – Esquema de posicionamentos para o ensaio balístico, segundo norma NBR 15000 (2005).

Fonte: Retirado de NBR 15000, 2005

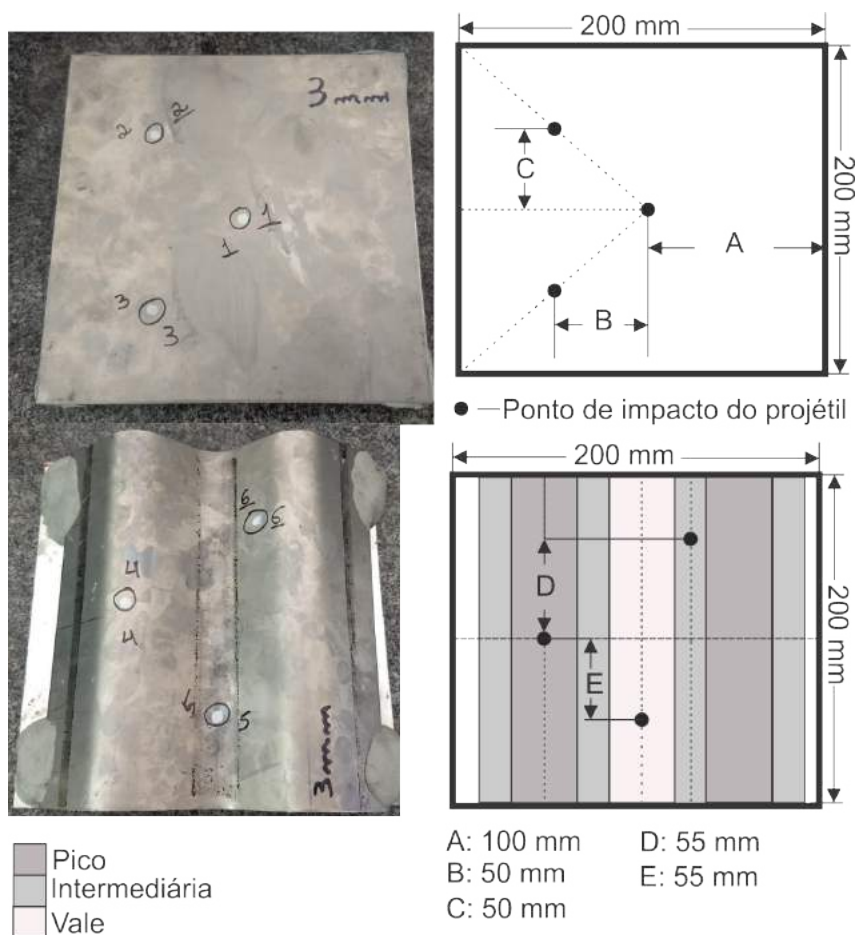


Figura 3.3.2 – Esquematização dos posicionamentos geométricos para impacto balístico nas chapas planas e poliondulares.

O esquema do túnel balístico utilizado no ensaio está apresentado na Figura 3.3.3.

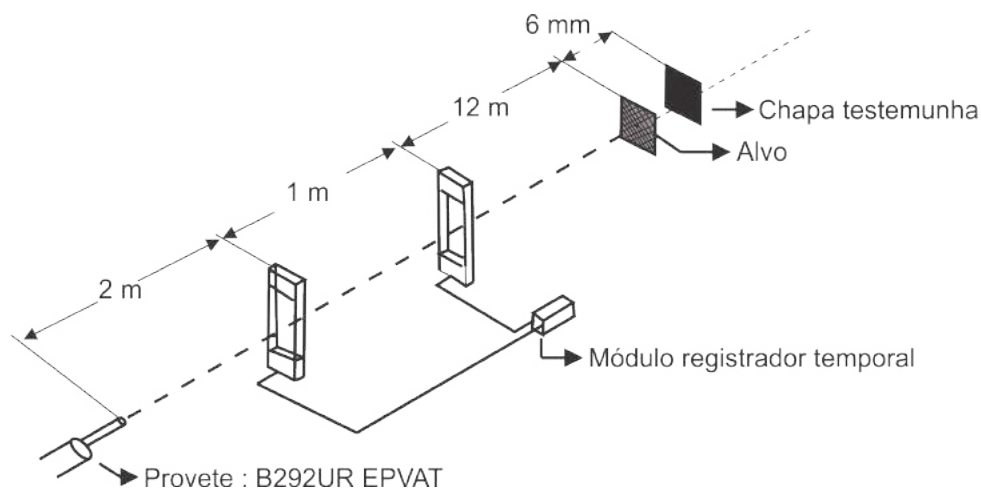


Figura 3.3.3 – Esquema do ensaio balístico.

O provete utilizado, B292UP EPVAT, está ilustrado na Figura 3.3.4. Ressalta-se que para os ensaios balísticos foram utilizadas munições comerciais de 7.62x51 FMJ, sendo as velocidades mensuradas, na boca do cano do provete, condizentes com as especificadas na norma ABNT NBR 15000/2005.

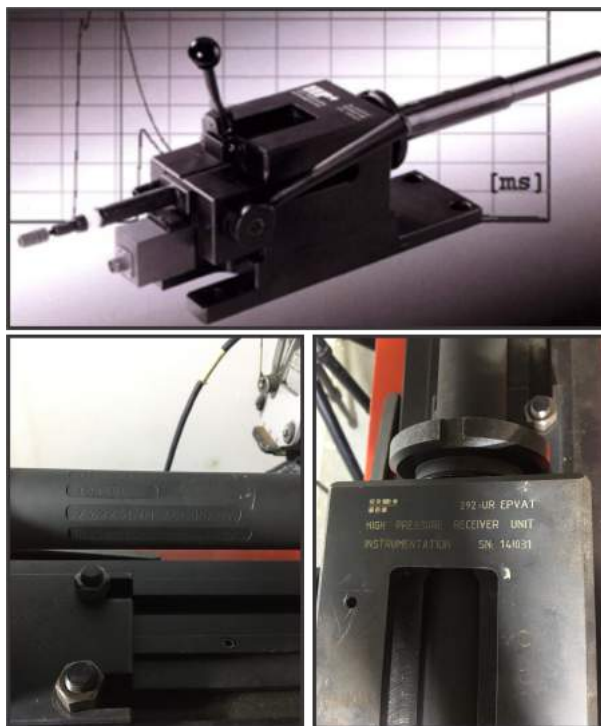


Figura 3.3.4 – Provete utilizado para o projétil 7.62x51 FMJ.

Fonte: Imagens obtidas no CAEx e LUMINYS, 2020

A Figura 3.3.5 apresenta o dispositivo de fixação das placas.



Figura 3.3.5 – Equipamento presente no CAEx, módulo registrador e fixador.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E CORPOS-DE-PROVA BALÍSTICOS

A caracterização do material como recebido permite a comparação com a caracterização dos corpos-de-prova balísticos, possibilitando a compreensão do comportamento dinâmico da liga, evidenciando os modos de fratura e mudanças na microestrutura.

As chapas de Ti-6Al-4V, utilizadas nesta pesquisa para as simulações e ensaios balísticos, são placas de 2 e 3mm de espessura. Sendo um corpo-de-prova plano e outro poliondular, para as duas espessuras. As placas em geometria poliondular foram conformadas no Instituto Militar de Engenharia (IME), a partir da matriz elaborada por Cunha, Gomes, et al. (2018).

3.4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) na cidade de São José dos Campos, através do aparato de tração MTS 810 com garras hidráulicas devidamente calibrado como pode ser observado na Figura 3.4.1.

Este ensaio foi proposto para o material como recebido e busca obter os parâmetros mecânicos do material, como forma de controle para as propriedades esperadas para a liga.



Figura 3.4.1 – Máquina de tração MTS 810, presente no IAE.

Os corpos-de-prova foram confeccionados no IAE, a partir da chapa de 4 mm de espessura, esta, por seu turno, se enquadra na norma "subsize" da ASTM E8/E8M (2015), para espécimes de geometria plana nesta faixa de espessura. A Figura 3.4.2 apresenta uma geometria proposta segundo os corpos-de-prova padrões da ASTM-E8M.

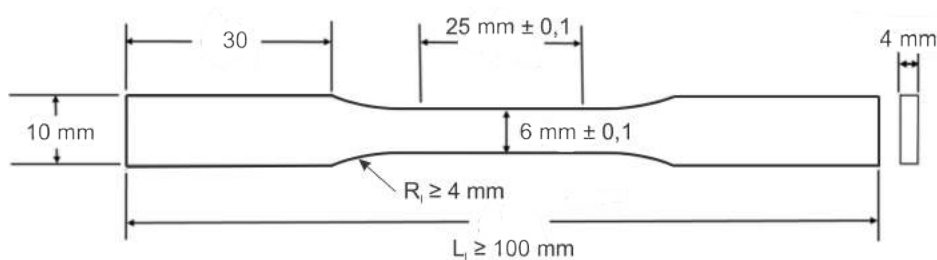


Figura 3.4.2 – Geometria dentro dos padrões ASTM-E8M.

A Figura 3.4.3 apresenta os corpos de prova como confeccionados. Sendo três no sentido de laminação da placa e quatro defasados em 90°, neste caso foi elaborado 1 corpo de prova a mais pois houve a ocorrência de entalhe acidental superficial no corpo de prova, desta forma por segurança confeccionou-se um corpo de prova a mais. Busca-se avaliar se existe algum efeito da direção de laminação nestas placas.

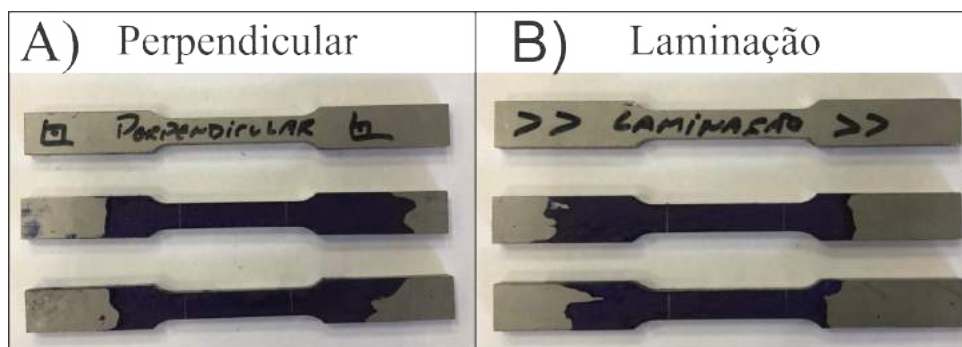


Figura 3.4.3 – Corpos de prova confeccionados;A) Perpendicular ao sentido da laminação;B) No sentido da laminação.

O ensaio mensurou a força na célula de carga resultante de uma taxa de deslocamento fixa para o eixo da máquina, taxa esta de 1mm/min. Os dados foram tratados utilizando o Software MATLAB, o módulo de elasticidade foi determinado segundo Norma ASTM E111/04, utilizando o método da tangente e da corda.

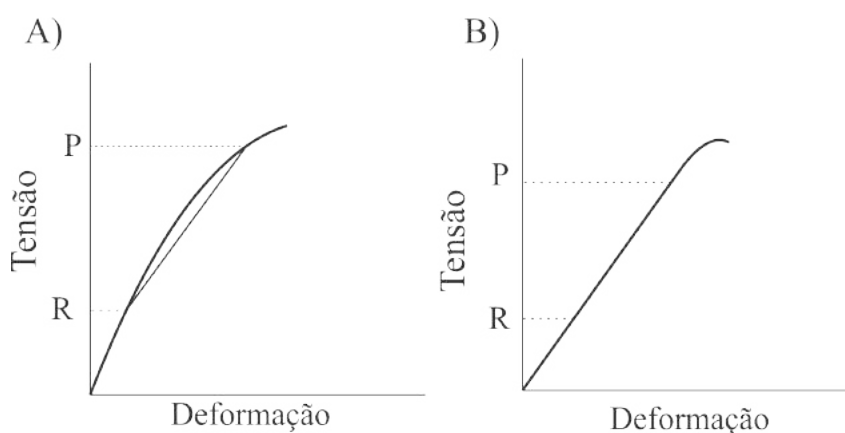


Figura 3.4.4 – Adaptado de ASTM E111/04 ;A) Módulo da corda entre dois pontos;B) Módulo de Young entre a tensão P abaixo do limite de proporcionalidade e R.

O módulo de elasticidade tangente foi determinado a partir do ajuste dos pontos pelo método dos mínimos quadrados, seguindo indicativos da norma ASTM E111. Sendo este um método que permite uma análise estatística dos dados, bem como a determinação da variabilidade.

O coeficiente de variação (C_V) foi obtido a partir da Equação 3.1

$$C_V = 100 \sqrt{\frac{\frac{1}{\bar{x}^2} - 1}{k - 2}} \quad (3.1)$$

Onde:

- C_V = Coeficiente de Variação;

- r = Coeficiente da qualidade do ajuste;
- k = número de pontos mensurados.

O Módulo de resiliência foi calculado a partir da integral da curva tensão x deformação até o ponto de escoamento (LE) para cada corpo de prova analisado. Calculou-se também o módulo de tenacidade a partir da Equação 3.2.

$$U_t = \frac{LE + LRT}{2} \epsilon_f \quad (3.2)$$

onde:

- LE: Tensão de escoamento.
- LRT: Tensão máxima de resistência a tração.
- ϵ_f : Deformação de fratura.

3.4.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A análise através da difração de raios x pode ser utilizada para avaliar a microestrutura das fases alfa e beta presentes na liga, visto que os picos correspondentes às fases constituintes aparecem distintamente no difratograma.

Para a realização deste experimento, baseia-se nos parâmetros de varredura utilizados por Sarkar, Roy e Suwas (2010), variando 2θ de 30° a 140° em modo de varredura contínua.

Esta análise foi realizada no Instituto Militar de Engenharia (IME) na SE/8 a partir do difratômetro X'Pert PRO MRD da PanAlytical. Alguns dos parâmetros de aquisição utilizados estão dispostos na Tabela 3.4.1.

Tabela 3.4.1 – Parâmetros de varredura utilizados

Parâmetros	Valores
Voltagem	40 KV
Corrente	40 mA
Tubo de Raios X	PW3376/00 Co
Sollerslit	0,04rad
Mask	15 mm
Anti-Scatterslit	2°
Divergenceslit	1°
Stepsize	$2,51^\circ$
Couting Time	97,92
Scan Range	30° a 140°

A análise qualitativa do difratograma foi realizada através do Software HighScore Plus versão 3.0e (3.0.5) 2012 da PANalytical. Esta análise ocorre através da comparação e probabilidade de compatibilidade do difratograma obtido com fichas de padrões de difração (CIF), presentes no banco de dados do Centro Internacional para dados de difração o ICDD-PDF.

O refinamento foi realizado através do método de Rietveld, a partir da seleção das fichas CIF. Sendo que este método simultaneamente refina a estrutura do cristal, a célula unitária, a análise de microestrutura, a análise quantitativa de fases.

3.4.3 MICROSCOPIA ÓTICA

A microscopia ótica consiste na refração da luz através de uma série de lentes, buscando a formação e ampliação de imagem ótica de uma amostra, permitindo examinar, em maiores detalhes, a morfologia dos grãos e as distintas fases presentes.

Através da microscopia ótica, foi analisada a morfologia das fases encontradas em corpos de prova decorrentes da geometrias plana e poliondular. Esta análise busca determinar se houve mudança de fase induzida, devido a conformação das chapas para geometria poliondular.

Para preparação das amostras buscou-se seguir as diretrizes da ASM INTERNATIONAL (1998). Os cortes da amostra foram realizados buscando evitar o aquecimento do material. Estes foram realizados através do equipamento de corte de precisão, Minitom da Struers.

Após o embutimento à frio as amostras foram lixadas com lixas d'água em granulometrias de 180, 220, 400, 600, 1200 com auxílio da politiz Arotex modelo AROPOL-2V, Figura 3.4.5, presente no laboratório de Metalografia do Instituto Militar de Engenharia (IME).



Figura 3.4.5 – Politriz AROPOL-2V.

O Polimento intermediário foi realizado, com auxílio da politriz, utilizando pano para polimento com pasta de diamante de $3\text{-}\mu\text{m}$ e $1\text{-}\mu\text{m}$. O polimento final foi realizado utilizando pano com $0,05\text{-}\mu\text{m}$ de Al_2O_3 .

A solução de ataque para revelação metalográfica utilizada foi a solução Kroll's, sendo composta por 3 ml de HF (40 % concentração), 5 ml de HNO_3 (65 % de concentração) e 100 ml de H_2O . Sendo está o reagente mais usual para análises de ligas de Ti comerciais.

As imagens óticas foram obtidas através do Microscópio óptico da Olympus, Figura 3.4.6.



Figura 3.4.6 – Microscópio óptico Olympus.

3.4.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A microscopia eletrônica de varredura consiste na formação de uma imagem eletrônica. Onde através de um feixe de elétrons que interagem com a amostra, são gerados elétrons retroespalhados, elétrons secundários, raios X, fótons, entre outros. Estas emissões são características de interações elétron-matéria e podem ser captados por sensores.

As chapas provenientes do ensaio balístico foram seccionadas formando 12 corpos de

prova, referentes as áreas de perfuração dos projeteis, para análises por microscopia eletrônica de varredura através do equipamento modelo Quanta FEG250 da FEI, presente no laboratório da SE8 (IME), ilustrado na Figura 3.4.7.



Figura 3.4.7 – Microscópio eletrônico de varredura, SE8 IME.

Foi efetuada uma sondagem dos elétrons retroespalhados buscando inclusões da camisa do projétil na amostra de titânio. Posteriormente foram analisados as imagens decorrentes dos elétrons secundários, permitindo a análise da topografia da superfície de fratura devido ao impacto com o projétil. Ademais foi feita a varredura das superfícies de fratura dos corpos de prova de tração, buscando artifícios que sirvam para correlação e comparação do material submetido ao regime de fratura quase estático com o regime dinâmico.

3.4.5 ENSAIO DE DUREZA

Foi realizado o ensaio de micro dureza Vickers (HV), conforme a norma ASTM E384 (2017), ilustrado na Figura 3.4.8. Esta metodologia é muito útil para a avaliação dos materiais, em termos de controle de qualidade e processos. O indentador é uma pirâmide de diamante de base quadrada, possuindo ângulo de 136° entre suas faces opostas.

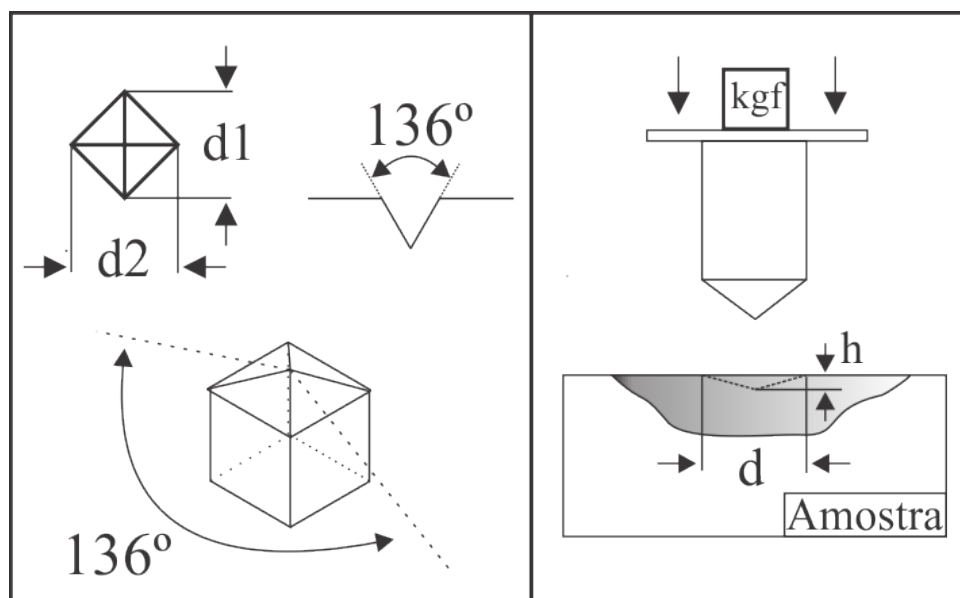


Figura 3.4.8 – Esquemática do Ensaio de Dureza Vickers.

Foram analisadas três amostras, previamente preparadas, referentes as chapas de Ti-6Al-4V. A superfície axial da chapa no sentido de laminação, a superfície da chapa e a superfícies axial da seção circular decorrente da conformação da chapa.

Realizou-se com o durômetro Shimadzu modelo HMV-G21, Figura 3.4.9, cinco indentações a partir da aplicação da carga de 0,2kgf (1,961 N) com duração de 15s em pontos distintos das amostras conforme norma supracitada.



Figura 3.4.9 – Durômetro Shimadzu HMV-G21.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização da Liga

4.1.1 Ensaio de Tração

A partir do ensaio de tração dos corpos de prova confeccionados no sentido de laminação e perpendiculares à laminação, foram plotadas as curvas de tensão-deformação para a liga foco do estudo. A Figura 4.1.1 ilustra o comportamento dos corpos de prova perpendiculares submetidos ao ensaio de tração.

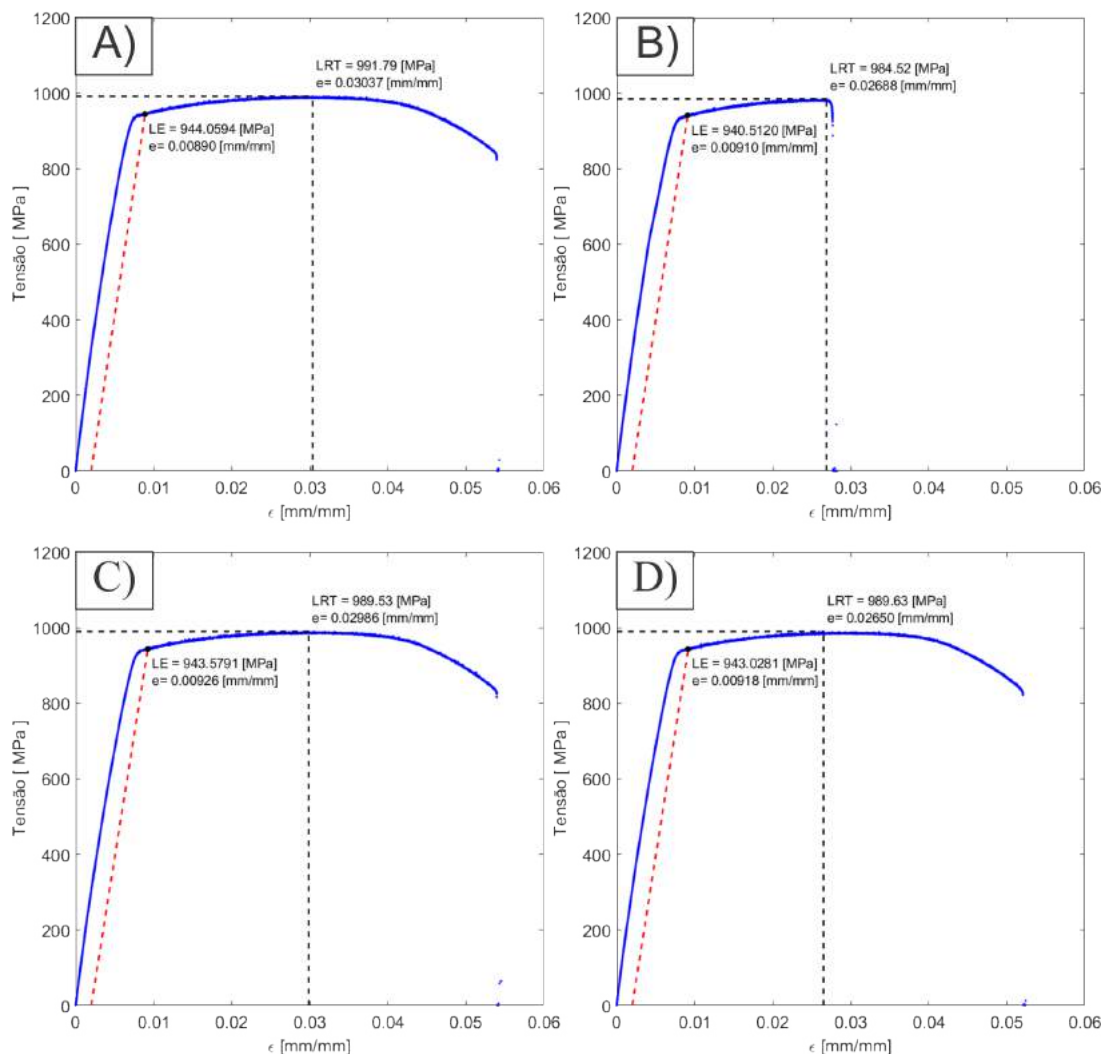


Figura 4.1.1 – Gráfico de Tensão x Deformação dos corpos de prova confeccionados no sentido perpendicular a laminação; A) Corpo de prova perpendicular 1; B) Corpo de prova perpendicular 2; C) Corpo de prova perpendicular 3; D) Corpo de prova perpendicular 4.

Se torna nítida a influência do entalhe no corpo de prova perpendicular 2, Figura 4.1.1(B),

sobre a tenacidade.

A Figura 4.1.2 apresenta os resultados para os ensaios dos corpos confeccionados no sentido de laminação das placas. A curva Tensão X Deformação do corpo de prova L_1 também apresentou comportamento similar ao corpo de prova P_2 , indicando a pré-existência de defeitos superficiais, possivelmente um entalhe decorrente da usinagem.

O defeito resultou em menor tenacidade do material, porém o Limite de resistência a tração em ambos os casos permaneceu dentro da faixa esperada. Indicando que apesar do concentrador de tensões o corpo de prova apresentava seção transversal resistente para suportar o carregamento.

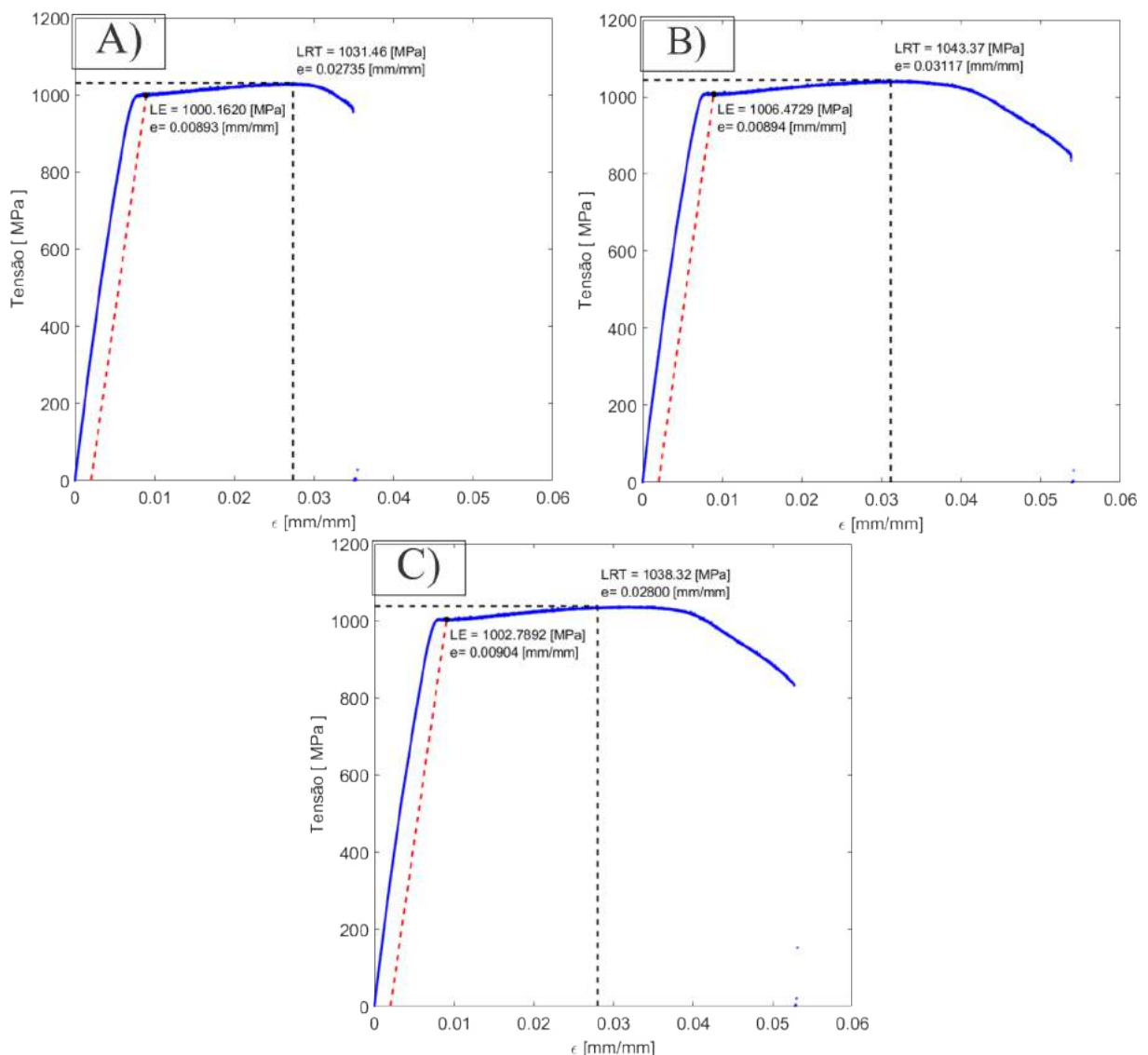


Figura 4.1.2 – Gráfico de Tensão x Deformação dos corpos de prova confeccionados no sentido da laminação; A) Corpo de prova Laminação 1; B) Corpo de prova Laminação 2; C) Corpo de prova Laminação 3.

A tabela 4.1.1 apresenta os dados obtidos a partir do ensaio de tração dos corpos de prova no sentido perpendicular ao de laminação das placas. Os dados destacados em vermelho não

foram considerados para as médias e desvios padrões obtidos, devido ao corpo de prova P2 ter sofrido um entalhe accidental.

Tabela 4.1.1 – Ensaio de tração, dados corpos de prova perpendiculares

	P1	P2	P3	P4	Média	Desvio Padrão
Tensão Ult. [MPa]	991,79	984,520	989,53	989,63	990.317	1,043
Tensão Esc. [MPa]	944,059	940,512	943,579	943,028	943,556	0,421
E_{MMQ} [MPa]	128860	124434,45	123489,87	124593,32	125344,41	2073,093
R²	0,992	0,990	0,994	0,994	-	-
C_V [%]	0,135	0,148	0,112	0,113	-	-
E_{corda} [MPa]	129110	124220	123570	124650	125387,5	-
U_t [MPa]	52,705	27,245	52,833	51,132	52,223	0,773
U_r [N.mm/mm ³]	3,447	3,547	3,598	3,563	3,539	0,065

A tabela 4.1.2 apresenta os dados dos corpos confeccionados no sentido de laminação, os modulo de tenacidade (Ut) do corpo de prova L1 foi descartado para a média, suspeita-se que havia um pequeno entalhe accidental devido ao processo de confecção.

Tabela 4.1.2 – Ensaio de tração, dados corpos de prova sentido de laminação

	L1	P2L2	L3	Média	Desvio Padrão
Tensão Ult. [MPa]	1031,46	1043,37	1038,32	1037,717	4,881
Tensão Esc. [MPa]	1000,162	1006,4729	1002,7892	1003,141	2,588
E_{MMQ} [MPa]	137541	137868,92	135570,42	137003,4467	1020,576
R²	0,9947	0,9943	0,9948	-	-
C_V [%]	0,10764835	0,1116591	0,1066226	-	-
E_{corda} [MPa]	139440	138810	133360	137203,33	-
U_t [MPa]	36,31	56,194	54,674	55,434	0,760
U_r [N.mm/mm ³]	3,633	3,6721	3,703	3,669	0,029

A partir dos dados dispostos, realizou-se a análise estatística utilizando o teste F e o teste t de Student. O teste F apresenta a razão entre as variâncias, sendo este necessário para classificação do tipo de teste t. Constatou-se que com 95% de confiança que as variâncias das tensões de escoamento e ruptura para os corpos de prova no sentido perpendicular e de laminação são iguais, ou seja, a variabilidade dos dados observados nos ensaios são iguais, desta forma classifica-se o tipo do teste t como homoscedástico.

Segundo o teste t de Student para duas amostras de variância igual, pode-se afirmar com 95% de confiança de que as médias são diferentes. Conforme a análise estatística ratifica, existe o efeito de anisotropia resultante da orientação preferencial dos grãos devido, possivelmente, ao processo de laminação.

Para análise da superfície de falha fez se uso do estereoscópio presente no IAE, permitindo uma melhor resolução da superfície de fratura, bem como, o comportamento do escoamento em cada corpo de prova. A Figura 4.1.3 apresenta a superfície de fratura do corpo de prova P1.

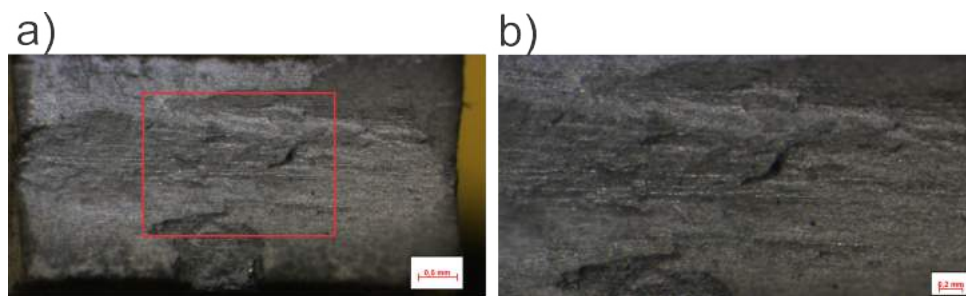


Figura 4.1.3 – Imagens com aumento ótico da superfície de fratura do corpos de prova Perpendicular, P1;a) escala em 0,5 mm; b) escala em 0,2 mm.

A Figura 4.1.4 apresenta o comportamento longitudinal final do corpo de prova P1. Ao correlacionarmos com a Figura 4.1.3 e com os dados do ensaio, torna-se evidente de que o corpo de prova apresentou comportamento tipicamente dúctil. Nas imagens pode-se observar a transição do estado plano de deformações para um estado plano de tensões, característico pela nucleação de banda de cisalhamento associada ao coalescimento de cavidades, ou seja, transição entre a tensão normal no centro do corpo de prova para tensão de cisalhamento. A medida que a deformação progride, outros mecanismos de deformação são ativados.



Figura 4.1.4 – Visão Longitudinal do corpo de prova P1.

A Figura 4.1.5 apresenta a imagem utilizada para análise factográfica do corpo de prova p1. Constata-se a presença de dimples, trincas resultantes do coalescimento de cavidades e maclas.

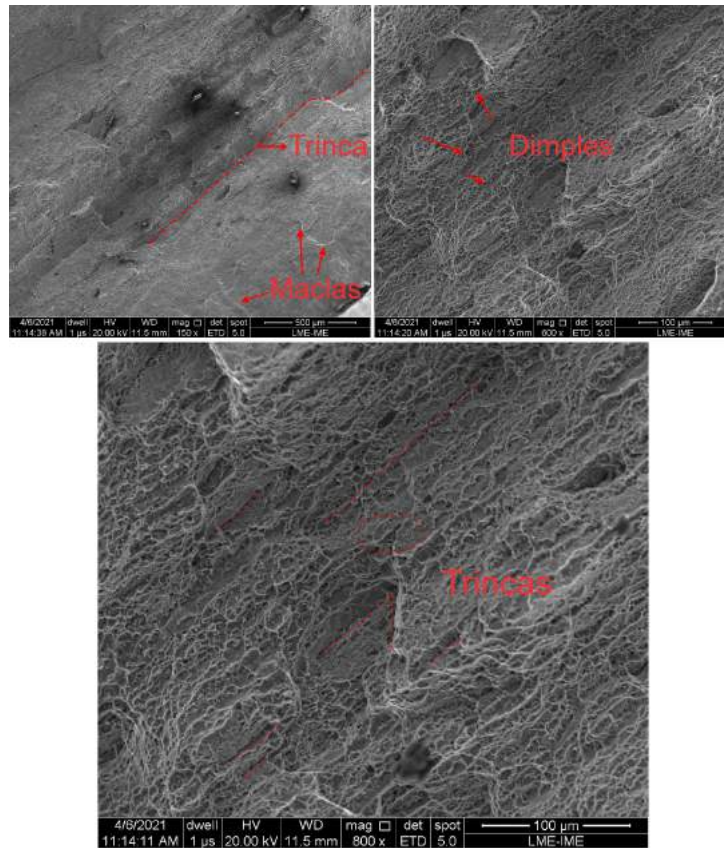


Figura 4.1.5 – Microscopia eletrônica de varredura da região central, P1.

A Figura 4.1.6 apresenta o corpo de prova *P2*, neste corpo, como pode ser observado, houve a inclusão de um entalhe accidental.

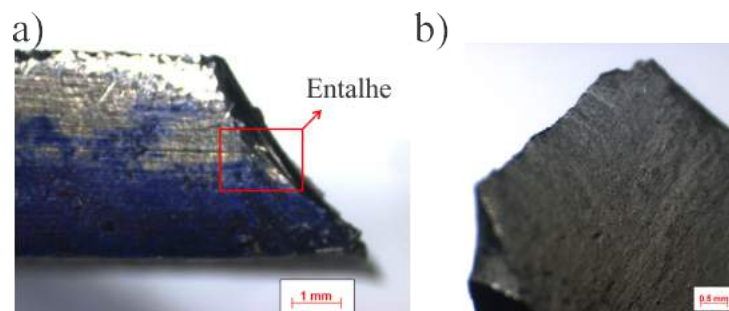


Figura 4.1.6 – Imagens com aumento ótico da superfície de fratura do corpos de prova Perpendicular, *P2*; a) escala em 1,0 mm; b) escala em 0,5 mm.

Apesar do concentrador de tensões no corpo *P2*, este também apresentou comportamento dúctil sem alterações relevantes na tensão de escoamento e de ruptura. Porém pode-se observar distintos mecanismos de fratura através da análise macroscópica dos Corpos de prova (CP). Na Figura 4.1.6(b) temos uma superfície rugosa com a ocorrência de coalescimento de cavidades, porém nos extremos é possível observar "marcas de praia" típicas de clivagem.

Como o titânio alfa apresenta estrutura Hexagonal compacta (HC) sendo esta característica por apresentar restrições nos sistemas de deslizamento, uma vez que dificulta a movimentação de discordâncias, espera-se a ocorrência de maclas. A maclação esta associada ao aumento da taxa de encruamento, escoamento serrilhado e nucleação de trincas por clivagem.

Diferentemente do que foi observado no corpo de prova P1, neste caso a nucleação da trinca principal foi a partir do entalhe na superfície, resultando no estado de tensão cisalhante, responsável pela menor tenacidade do corpo de prova, como pode ser observado na Figura 4.1.7 .

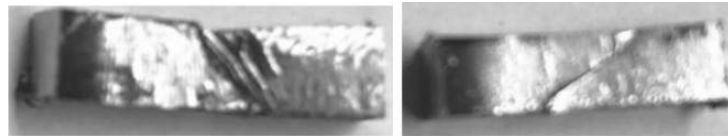


Figura 4.1.7 – Visão Longitudinal do corpo de prova P2.

Uma vez que o concentrador elevou a tensão local favorecendo outros mecanismos de deformação resultando no estado plano de tensão cisalhante, favorecendo a movimentação das discordâncias, que por sua vez, devido as restrições decorrentes do das células HC serviram como concentradores de tensões favorecendo a formação de cavidades e maclas.

A Figura 4.1.8 apresenta o corpo de prova P3, pode-se observar um comportamento similar do observado no corpo de prova P1.

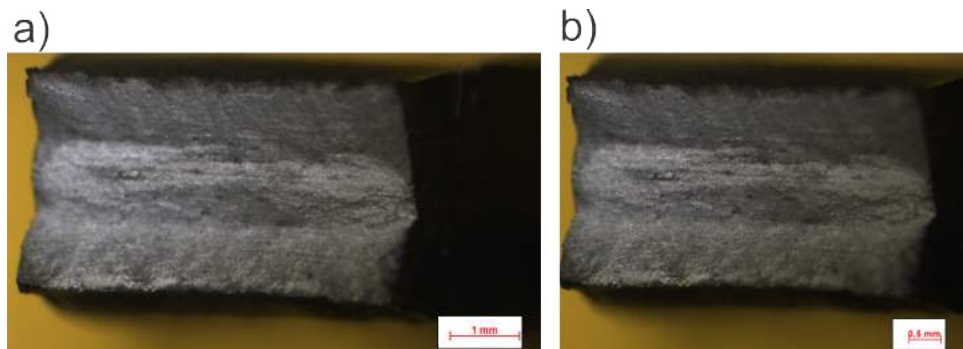


Figura 4.1.8 – Imagens com aumento ótico da superfície de fratura do corpos de prova Perpendicular, P3; a) escala em 1,0 mm; b) escala em 0,5 mm.

A Figura 4.1.9 apresenta a seção longitudinal, também similar a observada no P1. Demonstrando um padrão que pode ser associado a textura induzida no material devido ao seu processamento.



Figura 4.1.9 – Visão Longitudinal do corpo de prova P3.

A Figura 4.1.10 apresenta uma perspectiva através da técnica de microscopia eletrônica de varredura utilizando imagens de elétrons secundários. Resolvendo melhor a superfície e melhor riqueza de detalhes da topografia da fratura.

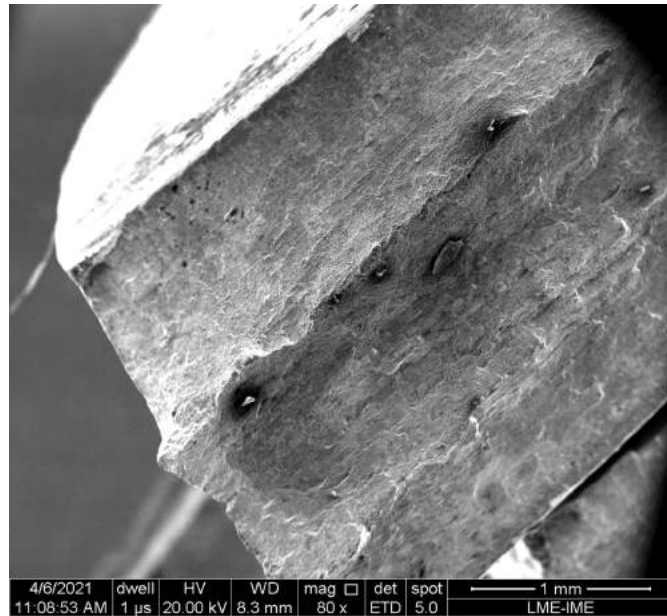


Figura 4.1.10 – Microscopia eletrônica da superfície de fratura do corpo de prova P3, magnificação de 80x.

A Figura 4.1.11 apresenta a superfície central com maior aumento. Confirma-se a presença de dimples, maclas e zonas de clivagem.

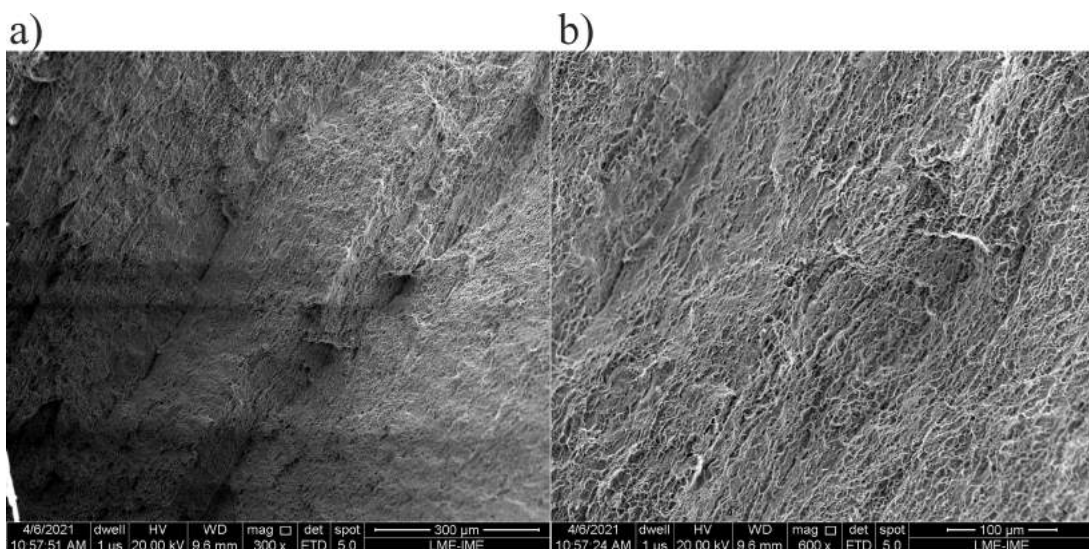


Figura 4.1.11 – Microscopia eletrônica da superfície de fratura do corpo de prova P3, zona central; a) magnificação 300x; b) magnificação de 600x.

Confirma-se a presença de dimples, maclas e micro trincas.

A Figura 4.1.12 apresenta a superfície de fratura do corpo de prova P4, correspondendo ao padrão observado em P1 e P3.

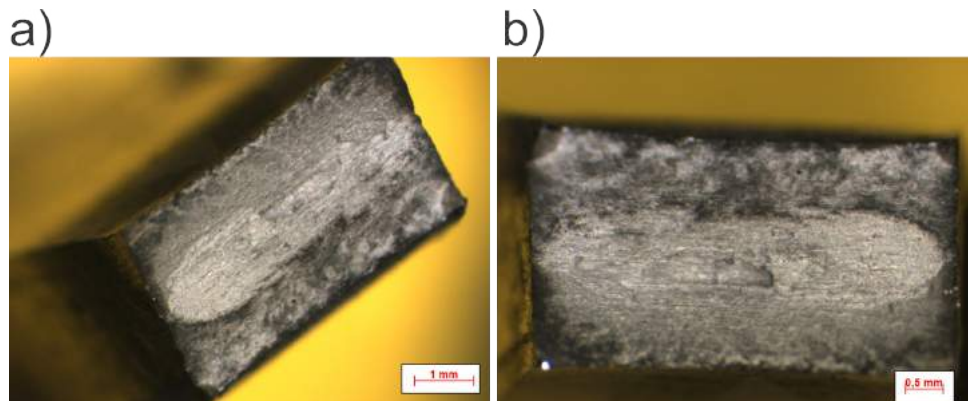


Figura 4.1.12 – Microscopia ótica de fratura do corpo de prova P4; a) escala em 1,0 mm ; b) escala em 0,5 mm.

A Figura 4.1.13 apresenta a seção longitudinal do corpo de prova P4. Contudo, apesar do comportamento de cisalhamento a 45° da direção de aplicação da força, o corpo de prova apresentou integridade relativamente similar a dos corpos de prova P1 e P3.

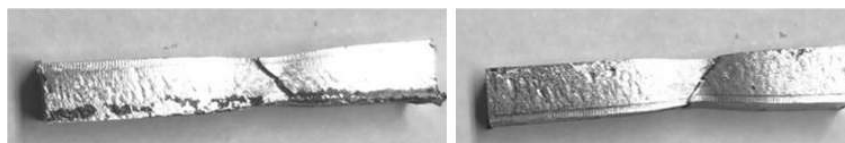


Figura 4.1.13 – Visão Longitudinal do corpo de prova P4.

Para a análise dos corpos de prova no sentido de laminação (L1, L2 e L3) foram aplicadas as mesmas metodologias, diferenciando parâmetros quando observado relevância técnica. A Figura 4.1.14 apresenta a superfície de fratura do corpo de prova L1.

Corpo de Prova L1

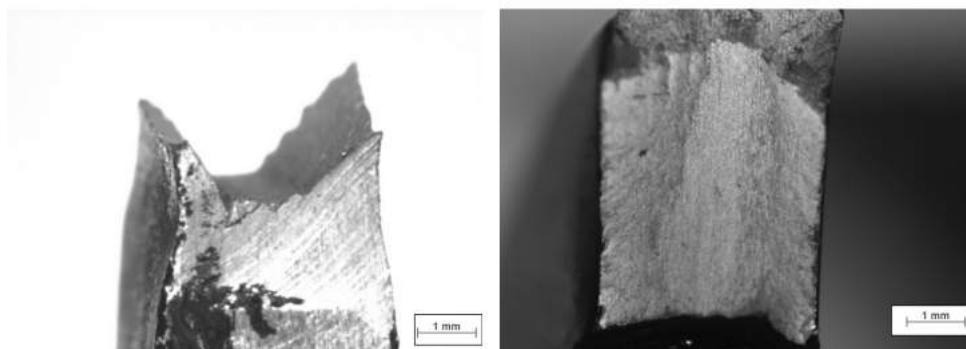


Figura 4.1.14 – Microscopia ótica de fratura do corpo de prova P4; a) Seção 1, da metade fraturada, com escala de 1,0 mm ; b) Seção 2, da metade fraturada, com escala de 1,0 mm.

A Figura 4.1.15 apresenta a superfície de fratura do corpo de prova L2.



Figura 4.1.15 – Microscopia ótica de fratura do corpo de prova P4; a) Seção 1, da metade fraturada, com escala de 1,0 mm ; b) Seção 2, da metade fraturada, com escala de 1,0 mm.

A Figura 4.1.16 apresenta a superfície de fratura do corpo de prova L3.

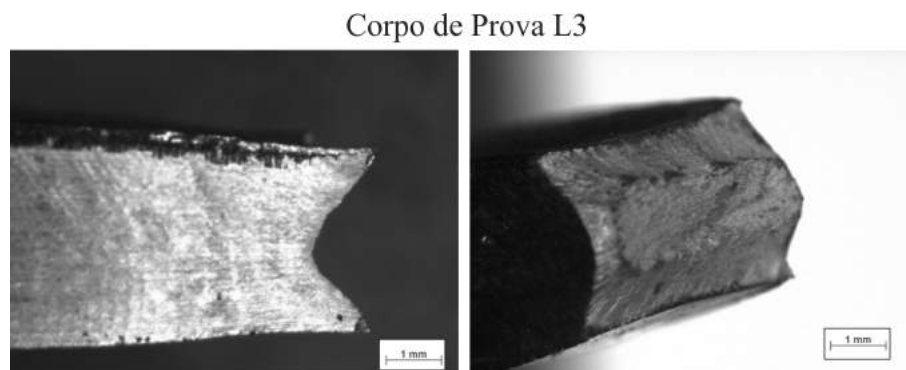


Figura 4.1.16 – Microscopia ótica de fratura do corpo de prova P4; a) Seção 1, da metade fraturada, com escala de 1,0 mm ; b) Seção 2, da metade fraturada, com escala de 1,0 mm.

Em todos os corpos de prova do sentido laminar, foram observados maior duração do estado plano de deformações. Pode-se então afirmar que a textura resultante do processamento do material, ampliou os possíveis mecanismos de deformação da liga, ampliando a tenacidade a fratura.

4.1.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A Figura 4.1.17 apresenta o difratograma resultante do ensaio. Ressalta-se que não há padrão JCPDS para este material. A literatura ainda apresenta lacunas de documentação, visto o potencial de variabilidade de microestruturas resultantes das diversas rotas de processamento da liga Ti6Al4V. Entretanto existem fichas ICSD para a liga Ti6Al4V, porém seu acesso é restrito e demanda aquisição da licença de uso.

Através da análise do difratograma foi possível realizar análise qualitativa, permitindo a indexação dos picos através das fichas JCPDS 00-044-1294 (Titânio- α) e JCPDS 01-089-4913 (Titânio- β). Para o refinamento utilizando o método de Rietveld e fez-se uso das fichas AMCSD 0011232 (Titânio- β) e AMCSD 0011195 (Titânio- α).

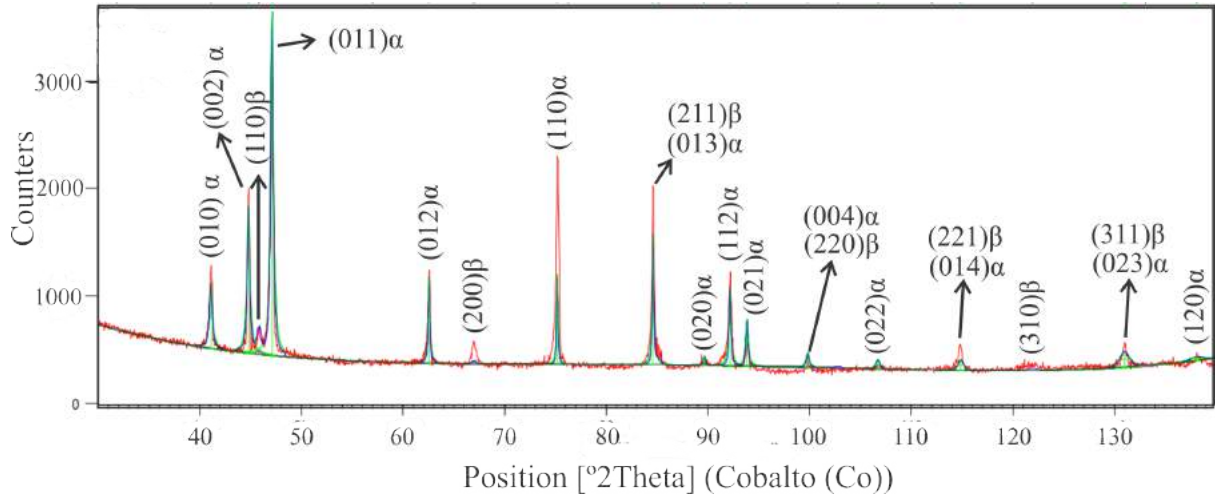


Figura 4.1.17 – Difratograma do material com indexação dos picos.

Entretanto como há sobreposição dos picos em consequência das duas fases presentes, estas resultam em um alargamento dos picos e consequentemente no aumento da dificuldade de refinamento. Sendo este um problema recorrentemente encontrado na literatura.

O refinamento, resultante, obteve um fator de qualidade (Goodness of fit, GOF) de 3,62. Sabe-se que valores entre 1,0 á 1,7 são bem aceitos e que valores acima de 1,7 acendem um alerta e indicam um questionamento sobre a adequação do modelo. Neste caso, se houvesse maior acesso a bancos de dados mais atualizados, mais fichas cristalográficas poderiam ser analisadas buscando melhor adequação.

A partir deste refinamento é possível arguir sobre a quantificação das fases, apesar do indicativo de possível adequação deficiente. O modelo resultou em 95,1% de fase α e 4,9% de fase β , sendo este um valor condizente com o encontrado na literatura para este tipo de liga α - β .

Os parâmetros de rede após o refinamento estão dispostos na Tabela 4.1.3, a razão c/a resultante foi de 1,5965 [Å].

Tabela 4.1.3 – Parâmetros de rede ajustado, método de Rietveld.

Parâmetros de rede [Å]	
Titânio-α	a=b 2,923566
	c 4,667451
Titânio-β	a=b=c 3,231125

A indexação dos planos está disposta na Tabela 4.1.4. Pode-se observar ângulos próximos devido as duas fases presentes, essa proximidade dificulta o refinamento do modelo, sendo necessário maior resolução de varredura.

Tabela 4.1.4 – Indexação dos picos e distâncias interplanares (d).

2θ	Plano	d [Å]	Fase
41,0918	010	2,5475	α
44,7895	022	2,34787	α
45,8108	110	2,29825	β
47,1114	011	2,23828	α
62,5501	012	1,72303	α
66,9534	200	1,62166	β
75,1717	110	1,46652	α
84,5935	013	1,32919	α
85,217	211	1,32269	β
89,6304	020	1,26912	α
92,1633	112	1,2418	α
93,8428	021	1,22465	α
99,8109	004	1,16931	α
102,7898	220	1,14465	β
106,714	022	1,11483	α
112,0182	221	1,07885	β
114,8616	014	1,06142	β
121,9091	310	1,02319	β
130,988	023	0,98306	α
133,0351	311	0,97528	β
138,0843	120	0,95787	α

4.1.3 Microestrutura

Foram preparadas e analisadas amostras das chapas de titânio buscando determinar a microestrutura do material como recebido e investigar possíveis mudanças decorrentes do processo de conformação aplicado.

Não foram observadas mudanças aparentes na morfologia. A Figura 4.1.18 apresenta um dos padrões de microestrutura que foi observado através da microscopia ótica. Ocorrência de grãos equiaxiais α com intragranular β e contornos $\alpha - \alpha$ não definidos. Padrão similar ao observado em ASM International (1998), para chapas de Ti-6Al-4V recristalizado a 925 °C, resfriado até 760 °C à uma taxa de 50-55 °C/h, então resfriado no ambiente.

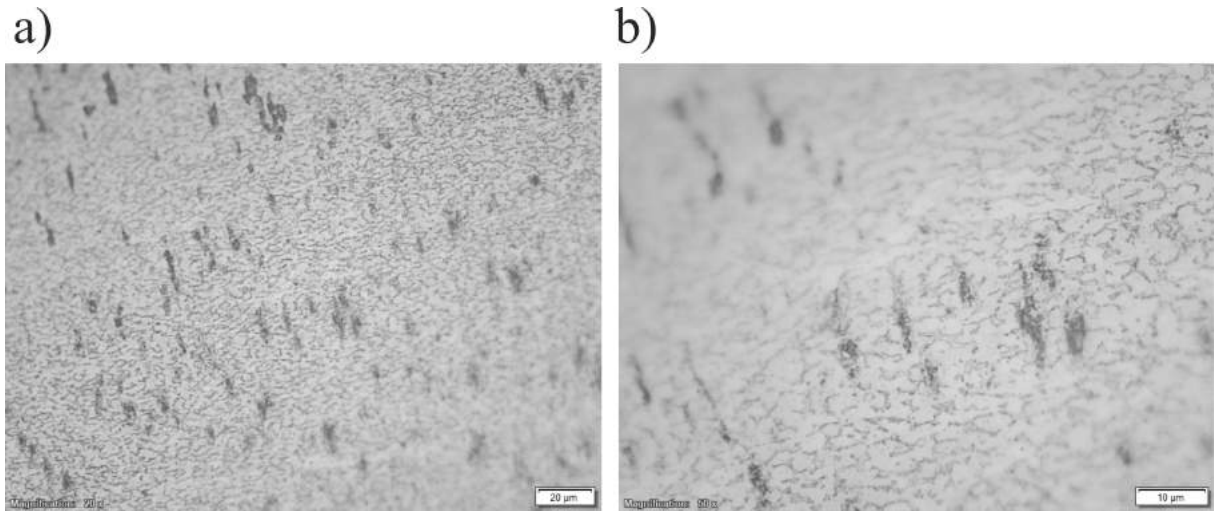


Figura 4.1.18 – Microscopia ótica, Ti-6Al-4V; a) Aumento de 200x, escala 20 μm ; b) Aumento de 500x, escala de 10 μm .

A Figura 4.1.19 apresenta transformação de fase β em lamelas de fase α e grãos equiaxiais com beta intergranular. A ocorrência de lamelas é característica de um regime de arrefecimento lento, onde o tamanho das lamelas é dependente desta taxa de resfriamento. A formação lamelar é característica da nucleação de fase α a partir da temperatura Beta Transus, a nucleação ocorre nos contornos de grão da fase beta e posteriormente crescem para o centro dos grãos de fase β .

Os grãos α equiaxiais, conforme ASM (1990), são formados durante o recozimento de ligas trabalhadas a frio, acima da temperatura de recristalização. Sendo o alongamento, destes, uma característica resultante do trabalho unidirecional resultante do processo de laminação.

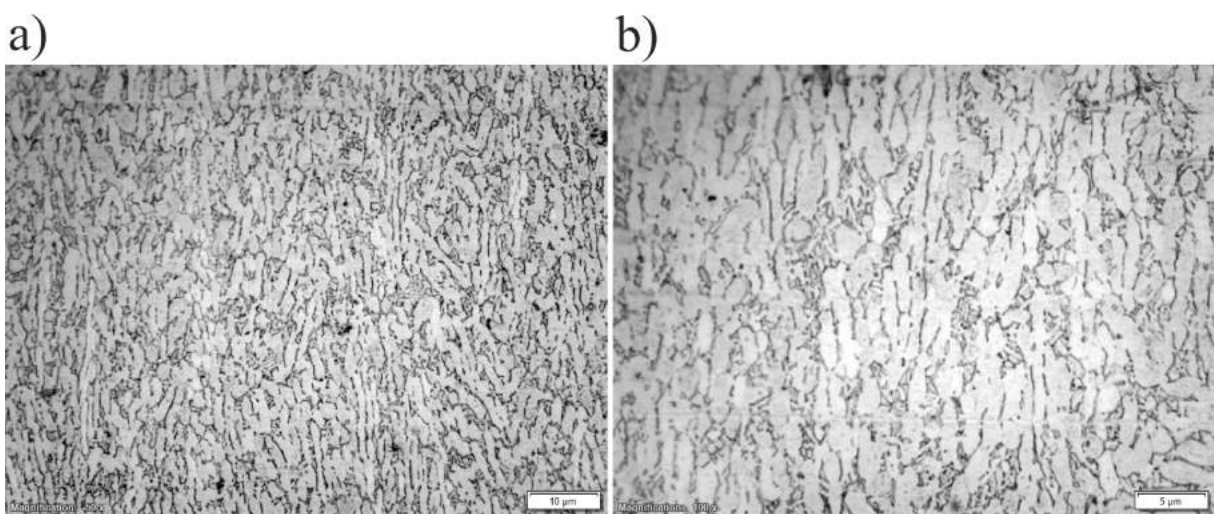


Figura 4.1.19 – Microscopia ótica, Ti-6Al-4V; a) Aumento de 500x, escala 10 μm ; b) Aumento de 1000x, escala de 5 μm .

A Figura 4.1.20 ilustram estruturas que recorrentemente aparecem nas amostras, conforme padrão observado em ASM (1998), se trata de matriz de fase beta retida e transformada em fase alfa secundária, ocorre devido a altas taxas de resfriamento do material e sua morfologia, característica, é de regiões homogêneas sem presença de lamelas. Foi constatado que está apresenta direção preferencial no sentido de laminação. Conforme ASM (1990), está associada a melhora do módulo de resiliência, mas afeta a resistência do material.

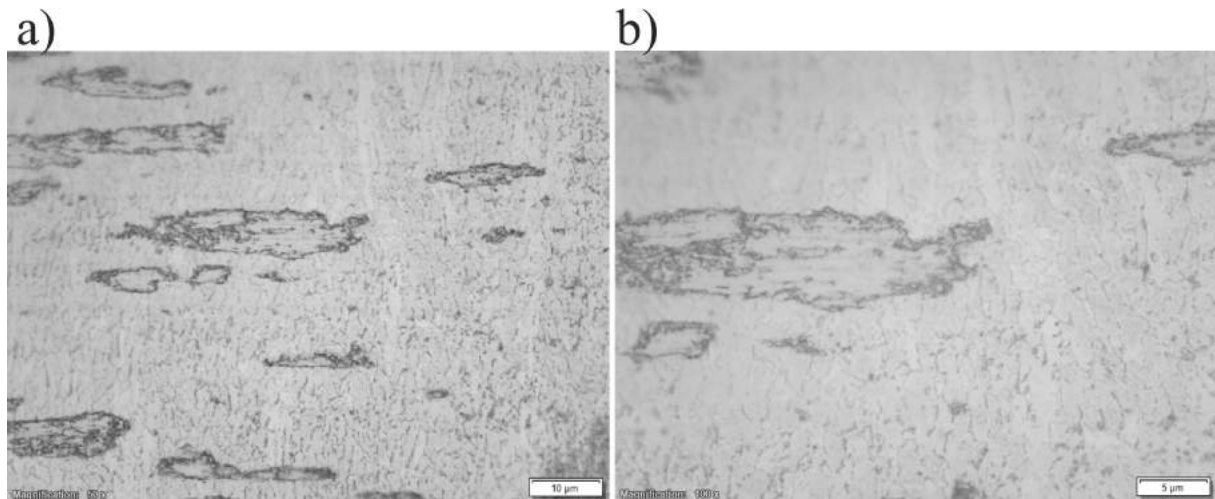


Figura 4.1.20 – Microscopia ótica, Ti-6Al-4V; a) Aumento de 500x, escala 10 µm; b) Aumento de 1000x, escala de 5 µm.

4.1.4 Ensaio de Dureza

A partir do ensaio das amostras foi constatado, conforme ilustrado na Tabela 4.1.5, a dureza Vickers (HV) destas. Sendo que do ponto de vista estatístico pode-se afirmar com 95% de confiança de que as médias são iguais. Desta forma, constata-se que não houve relevante endurecimento devido a conformação da chapa. Pode-se afirmar que os demais resultados observados no ensaio balístico não foram afetados por alterações devido ao endurecimento resultante da conformação das chapas, mas sua variabilidade é decorrente da geometria destas.

Tabela 4.1.5 – Resultado e análise do ensaio de dureza Vickers

Dureza Vickers (HV)	Carga: 0,2 kgf (1,961 N)					Tempo: 15 Segundos			
	Indentações					Média (HV)	Desvio Padrão	Distribuição bicaudal t de Student	
MATERIAL: Ti-6Al-4V	1	2	3	4	5			Inferior	Superior
Seção transversal (Sentido da laminação)	329	321	332	368	355	341	16,4	338,751	343,249
Superfície da chapa	351	344	327	351	316	337,8	13,04	335,795	339,805
Seção transversal (Perfil circular)	346	327	327	327	331	331,6	5,76	330,267	332,933

4.2 Ensaio Balístico

O ensaio balístico tem a finalidade de promover maior entendimento sobre o comportamento dos materiais quando submetidos a impactos de alta velocidade. A partir desta investigação, se pode arguir sobre os mecanismos de falha presentes nas áreas de impacto do projétil.

4.2.1 Modelagem Numérica Preliminar

A análise preliminar permitiu o refinamento da metodologia utilizada. Resultou, também, na confirmação de que o projétil operando na faixa de 800 a 850 m/s, transpassaria as proteções de Ti-6Al-4V, planas e poliondulares com espessuras de 2 e 3 mm.

Os dados referentes às simulações das placas planas estão dispostos em categoria de geometria e por velocidade de projétil. A Figura 4.2.1 apresenta a simulação da placa plana de 2mm e os danos à superfície de fratura da chapa de Ti-6Al-4V. Os padrões de superfície de fratura são similares, indicando que o material sobre regime de alta dinâmica, apesar da variação de 50 m/s se comportou da mesma forma para a mesma espessura.

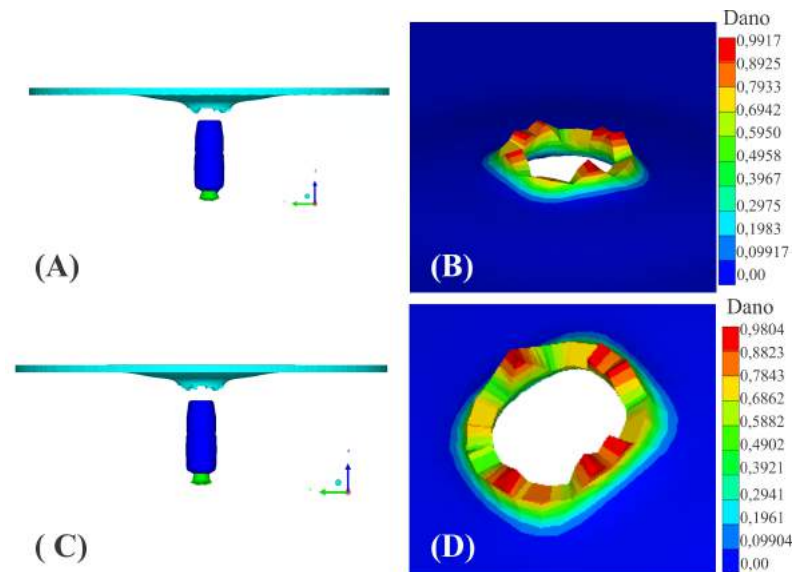


Figura 4.2.1 – Placa plana 2 mm; A) Simulação do projétil à 800 m/s; B) Superfície de fratura decorrente do projétil a 800 m/s, Dano; C) Simulação projétil à 850 m/s; D) Superfície de fratura decorrente do projétil a 850 m/s, Dano.

A Figura 4.2.2 apresenta a simulação da placa plana de 3 mm e a superfície de fratura da chapa de Ti-6Al-4V. Graficamente é possível analisar que a superfície de fratura, bem como o dano resultante, desta vez foram distintos. Indicando que o aumento da espessura da placa resultou em maior dano aos elementos ainda íntegros na placa, sem contar com os elementos que foram erodidos da placa. Sabe-se que está é uma análise preliminar baseada na topologia de fratura.

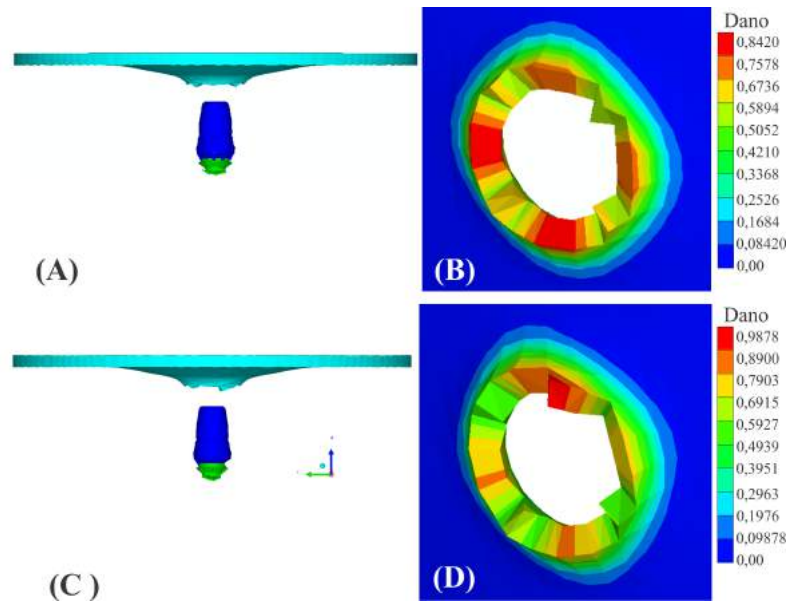


Figura 4.2.2 – Placa placa 3mm; A) Simulação da placa plana de 3 mm projetil à 800 m/s; B) Superfície de fratura decorrente do projetil a 800 m/s, Dano; C) Simulação projetil à 850 m/s; D) Superfície de fratura decorrente do projetil a 850m/s, Dano.

A tabela 4.2.1 permite um maior entendimento do fenômeno.

Tabela 4.2.1 – Modelagem numérica preliminar, placas planas.

Plana 2 mm	Energia [J]				Trabalho Plástico [J]				
	Total	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	Total	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	
800 m/s	Inicial	3095,12	1112,69	1982,43	0,00				
	Final	2973,72	1030,92	1855,39	87,41	67,34	32,78	3,37	31,19
	Variação	-121,40	-81,77	-127,04	87,41				
850 m/s	Inicial	3494,10	1256,12	2237,98	0,00				
	Final	3368,16	1165,42	2111,20	91,55	65,21	31,13	3,00	31,08
	Variação	-125,94	-90,70	-126,78	91,55				
Plana 3 mm	Energia [J]				Trabalho Plástico [J]				
	Total	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	Total	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	
800 m/s	Inicial	3095,12	1112,69	1982,43	0,00				
	Final	2791,54	883,24	1697,73	210,57	131,82	47,88	8,97	74,96
	Variação	-303,58	-229,45	-284,70	210,57				
850 m/s	Inicial	3494,10	1256,12	2237,98	0,00				
	Final	3184,27	1003,16	1956,67	224,44	130,12	43,29	8,25	78,58
	Variação	-309,83	-252,96	-281,31	224,44				

Conforme observado, para a chapa plana de 2 mm, a energia absorvida pelo liga de Titânio é relativamente próxima para os dois regimes de velocidade, podendo ser este o motivo

da similaridade topográfica da fratura devido ao projétil. Ressalta-se que a diferença de energia total resultante é decorrente da ocorrência de erosão de nós, ou seja, de estilhaços da camisa do projétil, núcleo do projétil e da chapa de Ti-6Al-4V.

A Tabela 4.2.1, também permite observar que o aumento da velocidade resultou em mais energia sendo retirada do sistema, ou seja, um indicio de que mais material foi fragilizado e fraturado durante o evento.

Ao analisarmos a densidade de trabalho plástico, em conjunto com as Figuras 4.2.1 e 4.2.2 pode-se constatar que há um ganho considerável de energia de deformação para com o aumento da espessura das chapas, permitindo que os elementos absorvessem mais energia antes de que o dano fosse capaz de fraturar o elemento.

Contudo ao observarmos a placa de 3 mm de espessura, submetida ao projétil a 800 e 850 m/s, observa-se que o trabalho plástico do projétil foi menor a 850 m/s se comparado ao trabalho plástico à 800 m/s, o que poderia ser um indicio de que o regime dinâmico, com o aumento da velocidade, promoveu a falha dos elementos com maior parcela de fragilidade do que o regime a 800 m/s. Isto implica na descaracterização do perfil perfurante do projétil, podendo ser este o motivo do aumento do trabalho plástico da chapa de Ti-6Al-4V para o evento à 850 m/s.

As Velocidades residuais preliminares estão dispostas na Tabela 4.2.2.

Tabela 4.2.2 – Velocidade residual do projétil após o impacto na chapa de Ti-6Al-4V com espessura de 2 e 3 mm.

Geometria Plana	Velocidade de impacto [m/s]	Velocidade residual [m/s]
2 mm	800,00	778,50
	850,00	829,50
3 mm	800,00	752,80
	850,00	807,40

Os dados referentes às simulações das placas poliondulares foram dispostos em função da geometria específica da placa poliondular e por velocidade de impacto do projétil.

A Figura 4.2.3 apresenta o impacto na região intermediária do perfil poliondular de 3 mm de espessura, nas velocidades de 800 e 850 m/s.

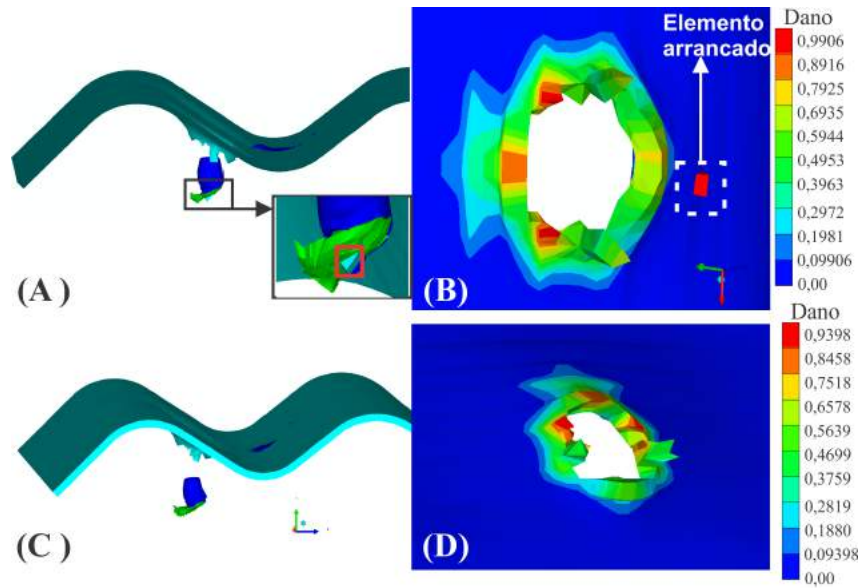


Figura 4.2.3 – Placa poliondular de 3mm de espessura; A) Impacto do projétil na região intermediária do perfil à velocidade de 800 m/s; B) Superfície de fratura decorrente do projétil a 800 m/s, Dano; C) Impacto do projétil na região intermediária do perfil à velocidade de 800 m/s; D) Superfície de fratura decorrente do projétil a 850 m/s, Dano.

O perfil de fratura apresenta um padrão similar para as duas velocidades de impacto, todavia, há mais elementos da superfície da chapa apresentando dano elevado. O resultado preliminar da região de vale da geometria, está ilustrada graficamente na Figura 4.2.4.

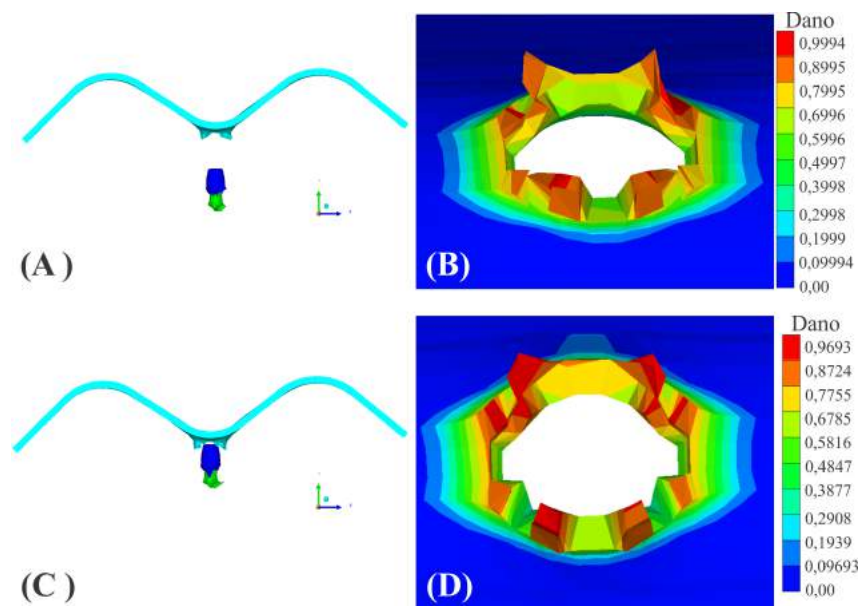


Figura 4.2.4 – Placa poliondular de 3mm de espessura; A) Impacto do projétil na região do vale do perfil à velocidade de 800 m/s; B) Superfície de fratura decorrente do projétil a 800 m/s, Dano; C) Impacto do projétil na região do vale do perfil à velocidade de 850 m/s; D) Superfície de fratura decorrente do projétil a 850 m/s, Dano.

A Figura 4.2.5 apresenta o resultado referente a região do pico do perfil poliondular.

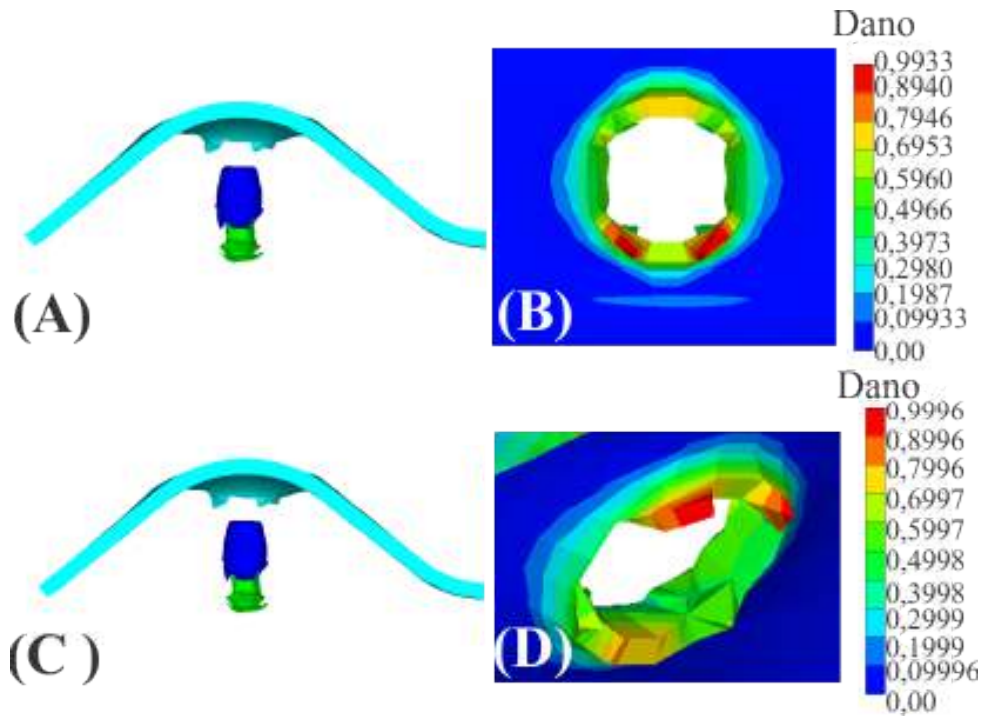


Figura 4.2.5 – Placa poliondular de 3mm de espessura; A) Impacto do projétil na região do vale do perfil à velocidade de 800 m/s; B) Superfície de fratura decorrente do projétil a 800 m/s, Dano; C) Impacto do projétil na região do vale do perfil à velocidade de 850 m/s; D) Superfície de fratura decorrente do projétil a 850 m/s, Dano.

A tabela 4.2.3 apresenta os dados referentes a energia total do sistema, para as modelagens com impactos a 800 e 850 m/s. Torna-se interessante a análise dos dois regimes de velocidade para a chapa poliondular de 3 mm. Sendo possível observar que o fator geométrico resultou em comportamentos distintos dos elementos.

Analisando diretamente a transferência de energia, temos que a chapa de Ti-6Al-4V absorveu mais energia, proveniente do impacto, na região intermediária, seguida pela região de pico e por último o vale. Da perspectiva da velocidade de impacto, temos que a região de pico absorve, levemente, mais energia do impacto a 850 m/s do que a 800 m/s, o inverso ocorre para as demais regiões.

Pode-se correlacionar o perfil geométrico do impacto com a energia retirada do sistema núcleo-camisa do projétil. Observa-se que o perfil intermediário obteve maior retirada de energia do núcleo enquanto a região de pico obteve a segunda maior retirada de energia do núcleo e a primeira maior retirada da camisa, sendo o vale as menores energias retiradas.

Tabela 4.2.3 – Modelagem preliminar, placa poliondular de 3 mm de espessura, energia total referente aos impactos a 800 e 850 m/s

Poliondular Pico	Energia [J]				
	Total	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	
800 m/s	Inicial	3095,16	1112,69	1982,47	0,00
	Final	2629,13	777,13	1604,76	247,24
	Variação	-466,04	-335,56	-377,71	247,24
850 m/s	Inicial	3494,15	1256,12	2238,03	0,00
	Final	3032,59	920,77	1860,70	251,12
	Variação	-461,56	-335,35	-377,33	251,12
Poliondular intermediaria	Energia [J]				
	Total	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	
800 m/s	Inicial	3095,15	1112,68	1982,47	0,00
	Final	2708,58	817,99	1502,22	388,37
	Variação	-386,57	-294,69	-480,25	388,37
850 m/s	Inicial	3494,03	1256,12	2237,91	0,00
	Final	3121,24	986,86	1773,29	361,09
	Variação	-372,80	-269,27	-464,62	361,09
Poliondular Vale	Energia [J]				
	Total	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	
800 m/s	Inicial	3095,39	1112,69	1982,70	0,00
	Final	2732,00	839,54	1688,85	203,62
	Variação	-363,39	-273,15	-293,85	203,62
850 m/s	Inicial	3494,40	1256,12	2238,28	0,00
	Final	3115,68	939,47	1976,61	199,60
	Variação	-378,72	-316,65	-261,67	199,60

A Tabela 4.2.4 apresenta os dados sobre o trabalho plástico, estes permitem arguir sobre o comportamento do projétil e da proteção balística. Como dito anteriormente e ratificado pelo trabalho plástico, a chapa de Ti-6Al-4V apresentou maior densidade de trabalho plástico na região intermediária. Porém a segunda maior densidade de trabalho plástico foi observada na região do vale, ou seja, o vale absorveu mais energia que o pico antes do elemento falhar, porém tanto a camisa quanto o núcleo do projétil absorveram mais energia antes da falha dos elementos no impacto na região de pico do que na de vale. Isto é um indício de que o projétil sofreu maior dano na região de pico do que na região de vale. Porém em decorrência da geometria, o vale, a chapa de Ti-6Al-4V, supera a energia absorvida em trabalho plástico.

Tabela 4.2.4 – Modelagem preliminar, placa poliondular de 3 mm de espessura, energia de trabalho plástico referente aos impactos a 800 e 850 m/s

Poliondular Pico	Trabalho Plastico [J]			
	Total	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V
800 m/s	158,55	61,60	15,57	81,38
850 m/s	150,33	59,56	14,56	76,21
Poliondular intermediaria	Trabalho Plastico [J]			
	Total	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V
800 m/s	221,79	82,96	14,24	124,59
850 m/s	197,25	73,90	15,16	108,19
Poliondular Vale	Trabalho Plastico [J]			
	Total	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V
800 m/s	155,76	50,49	12,24	93,03
850 m/s	145,10	47,98	10,37	86,75

Para a análise do perfil poliondular com 2 mm de espessura, foi avaliada a velocidade de 800 m/s, visto que este patamar é eficaz na perfuração das chapas de 3 mm. A Tabela 4.2.5 apresenta os dados de energia e trabalho plástico desta modelagem.

Realizando a análise das energias totais, pode-se afirmar que a chapa poliondular apresenta melhor desempenho se comparada a chapa plana de 2 mm de espessura, apresentando maior redução de energia do projétil. Quando avalia-se a placa plana de 3 mm constata-se que está apresenta maior redução de energia, entretanto a região intermediária do perfil da chapa de 2 mm apresenta melhores resultados em termos de trabalho plástico da camisa de latão e do núcleo de chumbo do projétil, o que nos induz a crer que o fator geométrico resultou em maior deformação do projétil, apesar da menor capacidade de deformação da proteção de Ti-6Al-4V, possivelmente devido a menor espessura.

Conforme às análises dos resultados preliminares das chapas planas e poliondulares, temos que o perfil poliondular aparece como uma alternativa simples para maior absorção de energia e aumento do dano ao projétil. Apesar da variabilidade do comportamento proteção-projétil da poliondular, tanto a região de vale, pico ou intermediária, em geral para uma mesma espessura, superam a energia (J) retirada do sistema chapa plana e a densidade de trabalho plástico

(J/kg), ou seja, o perfil poliondular apresentou maior desempenho como proteção balística.

Tabela 4.2.5 – Simulação poliondular de 2 mm, velocidade de impacto de 800 m/s, energia total e trabalho plástico dos materiais.

Poliondular 2 mm Pico	Energia [J]			Trabalho Plástico [J]
	Inicial	Final	Variação	
Latão	1117,78	1009,99	-107,786	53,004
Chumbo	1976,38	1764,71	-211,67	7,33478
Ti-6Al-4V	0	126,16	126,16	49,2579
Poliondular 2 mm Intermediária	Energia [J]			Trabalho Plástico [J]
	Inicial	Final	Variação	
Latão	1108,47	986,421	-122,049	58,816
Chumbo	1957,1	1699,66	-257,44	9,1934
Ti-6Al-4V	0	140,663	140,663	33,418
Poliondular 2 mm Vale	Energia [J]			Trabalho Plástico [J]
	Inicial	Final	Variação	
Latão	1108,47	1058,68	-49,79	43,963
Chumbo	1957,1	1800,9	-156,2	3,1514
Ti-6Al-4V	0	72,4805	72,4805	30,006

A Tabela 4.2.6 apresenta um comparativo das velocidades residuais resultantes das simulações. Conforme observado o projétil obteria sucesso em transpassar as placas planas e poliondulares, nesta faixa de velocidade, visto isto simulou-se o perfil poliondular de 2 mm, à velocidade de impacto de 800 m/s, visando comparar seu desempenho.

Tabela 4.2.6 – Simulação, comparativo entre as velocidades residuais.

	Velocidade inicial (m/s)	Velocidade residual (m/s)	Variação (m/s)	Melhor desempenho a 850 m/s	Melhor desempenho a 800 m/s
Poliondular Vale (3 mm)	800	738,19	61,81	-	3°
	850	793	57	3°	-
Poliondular Intermediária (3 mm)	800	711,85	88,15	-	1°
	850	772,27	77,73	1°	-
Poliondular Pico (3 mm)	800	713,25	86,75	-	2°
	850	779,9	70,1	2°	-
Poliondular Vale (2 mm)	800	764,35	35,65		7°
Poliondular Intermediária (2 mm)	800	746,54	53,46	-	4°
Poliondular Pico (2 mm)	800	751,06	48,94	-	5°
Plana 2 mm	800	778,5	21,5	-	8°
	850	829,5	20,5	5°	-
Plana 3 mm	800	752,8	47,2	-	6°
	850	807,4	42,6	4°	-

Conforme os resultados das velocidades residuais e demais análises, temos que a região intermediária é a de melhor eficiência, seguida respectivamente pela região de pico e vale do perfil. Observa-se que a velocidade residual do projétil referente às proteções balísticas das regiões de pico e intermediária do perfil poliondular de 2 mm de espessura é menor, apesar de similar, do que a obtida através da proteção de placa plana de 3 mm de espessura.

Do ponto de vista da proteção de Ti-6Al-4V, pode-se extrapolar e comparar os dados de velocidade residual obtidos nas modelagens numéricas sem a inclusão da chapa testemunha, com os obtidos no trabalho realizado por Cunha (2018), em aço ABNT/AISI 4340. As modelagens divergem em quatro pontos principais, neste trabalho houve maior cuidado com a discretização da malha e a inclusão de parâmetros de dano para a camisa de latão do projétil, enquanto Cunha (2018), nesta etapa da modelagem, há a inclusão da velocidade de giro decorrente do raiamento do cano. Apesar de ambas as chapas terem sido conformadas na mesma matriz, Cunha (2018), utiliza uma função para modelagem das placas, enquanto neste trabalho às mesmas foram mensuradas, buscando evitar erros devido ao retorno elástico após a conformação. Não obstante pode-se avaliar as velocidades, a Tabela 4.2.7 apresenta os resultados para os perfis poliondulares.

Tabela 4.2.7 – Comparativo entre as velocidades residuais aço ABNT 4340 e Titânio ASTM grau 5.

Velocidade de impacto: 850 m/s	Material		Variação [m/s]
	Aço ABNT 4340	Ti-6Al-4V	
Região	Velocidade residual [m/s]	Velocidade residual [m/s]	
Placa plana	758,2	807,4	49,2
Poliondular: Pico	670,55	779,5	109,35
Poliondular: Intermediária	695,98	772,27	76,29
Poliondular: Vale	742,75	793	50,25

Fonte: Dados do aço ABNT 4340 retirados de Cunha (2018).

Pode-se observar que as simulações diferem no perfil de melhor resultado, enquanto neste trabalho o perfil intermediário se demonstrou como o de melhor eficiência, no trabalho de Cunha (2018), o perfil de pico apresenta os melhores resultados. Entretanto os modelos apresentam o perfil de vale como o de menor eficiência, ratificando as análises.

4.2.2 Análise da fratura

A Figura 4.2.7 apresenta a chapa poliondular de 3 mm de espessura. Pode-se observar as marcações para a mira, restando evidente que neste corpo-de-prova houve um desvio. O desvio não invalida os resultados, uma vez que a simulação final será conforme o ensaio balístico. Ressalta-se, também, que dados sobre a geometria de pico, intermediária e vale são vitais para comparação e caracterização do perfil poliondular.

A Figura 4.2.7(a) apresenta a superfície de impacto do projétil. A Figura 4.2.7(b) apresenta a superfície de saída do projétil. As velocidades de impacto e residual estão expostas na Tabela 4.2.8.



Figura 4.2.6 – Chapa poliondular de 3 mm de espessura após o ensaio balístico;(a) face de entrada dos projéteis; (b) face de saída dos projéteis.

Os furos de penetração estão ilustrados nas Figura 4.2.7, 4.13 e 4.14 com maior riqueza de detalhes.

Tabela 4.2.8 – Resultado do ensaio balístico para placa poliondular de 3 mm de espessura.

Disparo	Região de impacto	Identificação	Velocidade de impacto (m/s)	Velocidade residual (m/s)	Velocidade residual 2 (m/s)
4	Intermediária	Ti-6Al-4V 3 mm- Poliondular; Testemunha: Al 3 mm- Plana.	833,57	713,46	626,90
5	Vale/Intermediária		834,90	726,60	592,95
6	Pico		827,50	735,88	627,84

Conforme pode ser observado na Figura 4.2.7, o impacto que deveria ter ocorrido no topo, ocorreu exatamente na transição entre o topo e a zona intermediária. O padrão de perfuração aparenta ser em pétala com a ocorrência de fragmentação. A fragmentação fica evidente ao se analisar a chapa testemunha na superfície de entrada do projétil. Na superfície de saída da chapa de Ti-6Al-4V, pode ser observada a ocorrência de uma região de delaminação na placa. A perfuração, na face de saída, também apresenta sinais de zonas de deformação dúctil e zonas de deformação frágil.

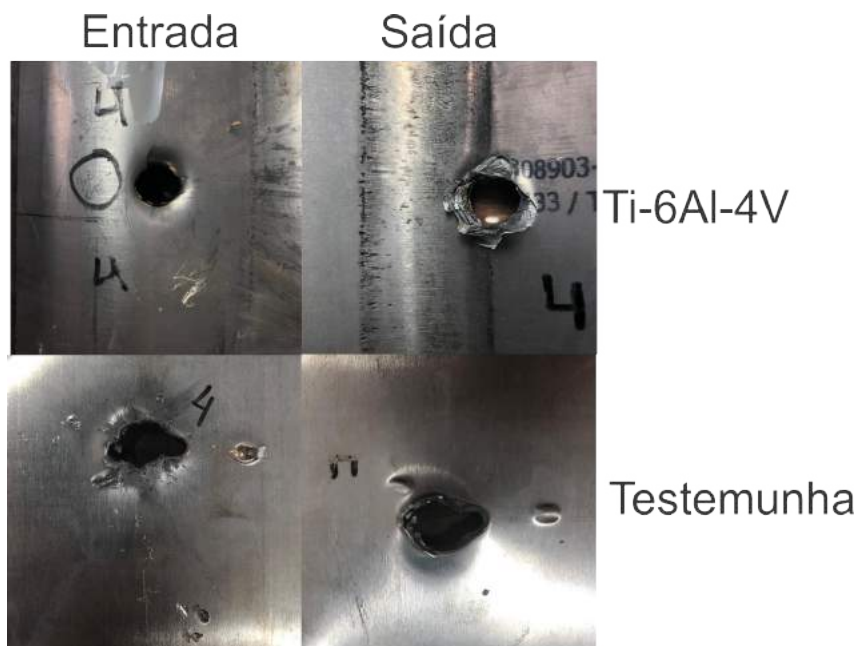


Figura 4.2.7 – Imagens da superfície de entrada e saída do projétil para a perfuração número 4. Para o impacto na zona de transição entre o topo e zona intermediária do perfil ondular da placa de 3mm de espessura e na placa testemunha.

A Figura 4.2.8 e 4.2.9 apresentam imagens através de microscopia eletrônica da região de fratura, ratificando a ocorrência de mecanismos de fratura dúctil e frágil. Contudo, é nítida a prevalência do regime frágil.

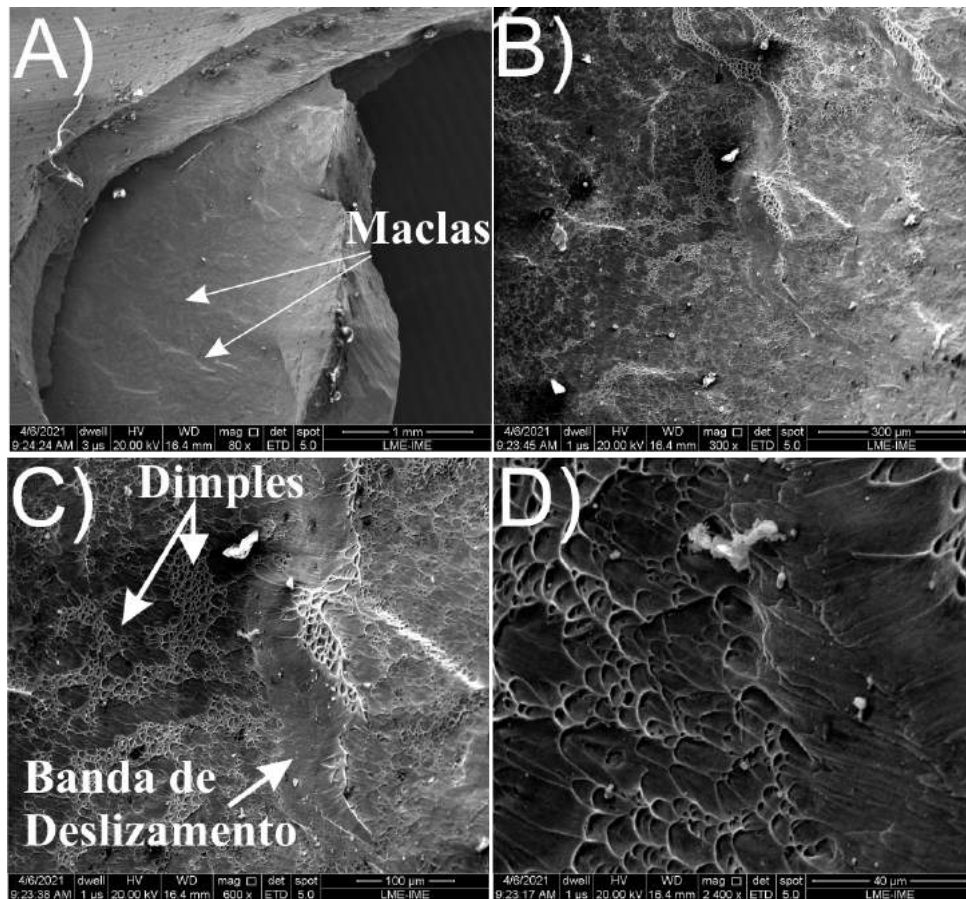


Figura 4.2.8 – Disparo 4, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 300X escala 300 μm ; C) Aumento 600X escala 100 μm ; D) Aumento 1200X escala 40 μm .

Observa-se que a delaminação ocorreu através de fratura frágil, clivagem de plano cristalográfico, aparentemente houve separação atômica de planos na direção perpendicular ao carregamento de impacto. A formação de micro cavidades são, neste caso, características da clivagem.

Na Figura 4.2.9 pode-se observar mais características de regime frágil, como a seção transversal da chapa na região da pétala relativamente lisa, característica presente em fratura frágil. Inclusive há ocorrência de trincas de carácter frágil nesta região.

Na região de delaminação retratada, também relata-se ocorrência de micro cavidades, possivelmente resultante da clivagem dos planos. possível ocorrência de maclas decorrentes do regime de plasticidade. Sabe-se que em estruturas HC há dificuldade na movimentação de discordâncias, este fato aliado a taxa de carregamento dinâmico favorecem a maclação do material.

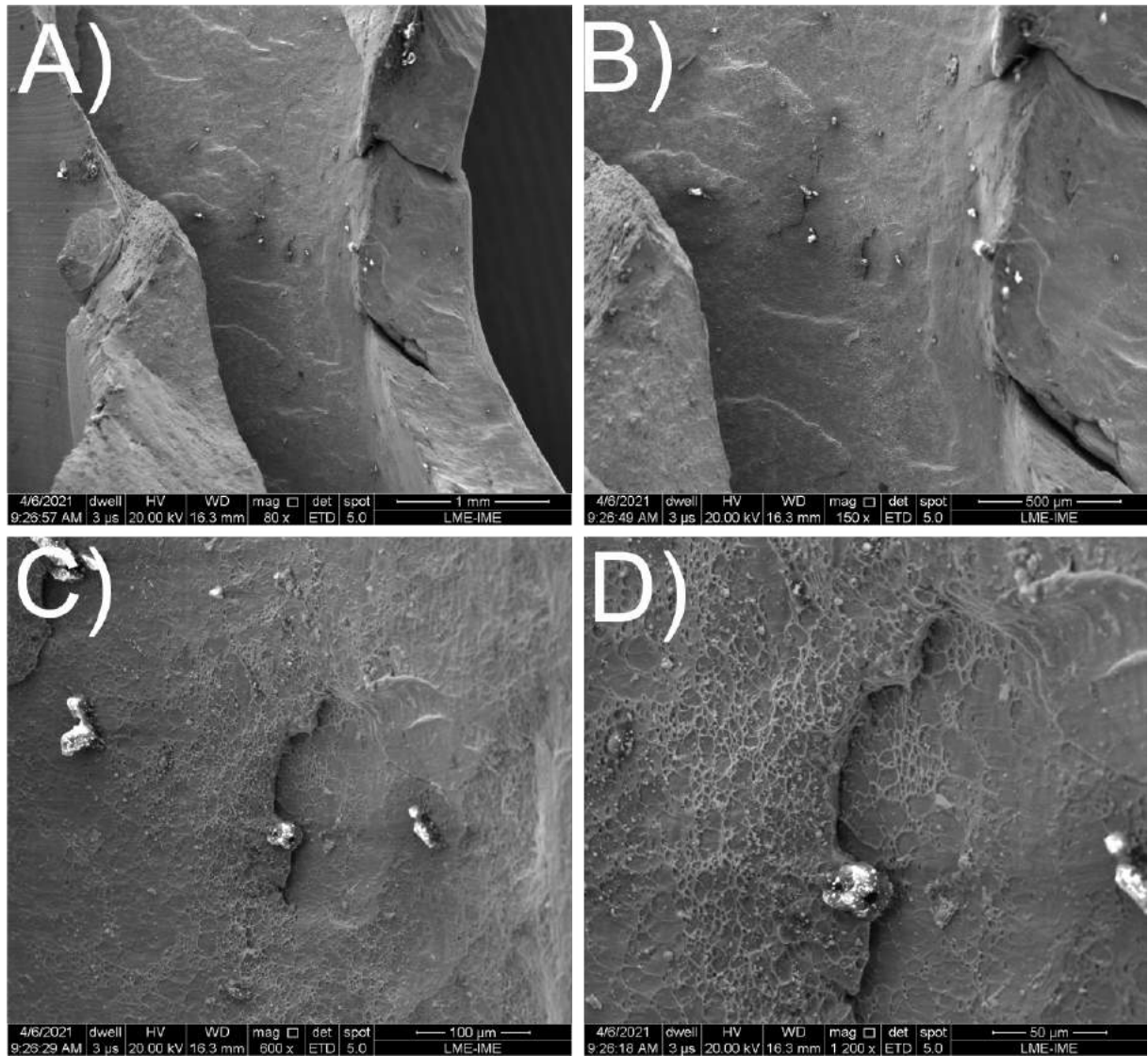


Figura 4.2.9 – Disparo 4, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 600X escala 100 μm ; D) Aumento 1200X escala 50 μm .

A Figura 4.2.10 apresenta o impacto na zona entre o vale e a zona intermediária, neste caso, não é observado delaminação da chapa. A impressão de saída na placa de Ti-6Al-4V apresenta um padrão possivelmente de fratura radial.

Há evidências, na superfície de entrada e saída, que o projétil tenha sofrido um tombamento, pois o padrão de perfuração na chapa de Ti-6Al-4V aparenta um desvio do projétil da área do vale na direção da área da seção intermediária. Outra evidência do tombamento é o padrão de entrada e saída do projétil na chapa testemunha. Pode-se, igualmente, observar a ocorrência do impacto de um fragmento de tamanho considerável na chapa testemunha.



Figura 4.2.10 – Imagens da superfície de entrada e saída do projétil para a perfuração número 5. Para o impacto na zona de transição entre o vale e a zona intermediária do perfil ondular da placa de 3mm de espessura e na placa testemunha.

Através da microscopia eletrônica de varredura, Figura 4.2.11, pode-se observar que a superfície de fratura é característica de mecanismos de fratura frágil, novamente, com ocorrência de clivagem de planos e nítida ocorrência de trinca intergranular.

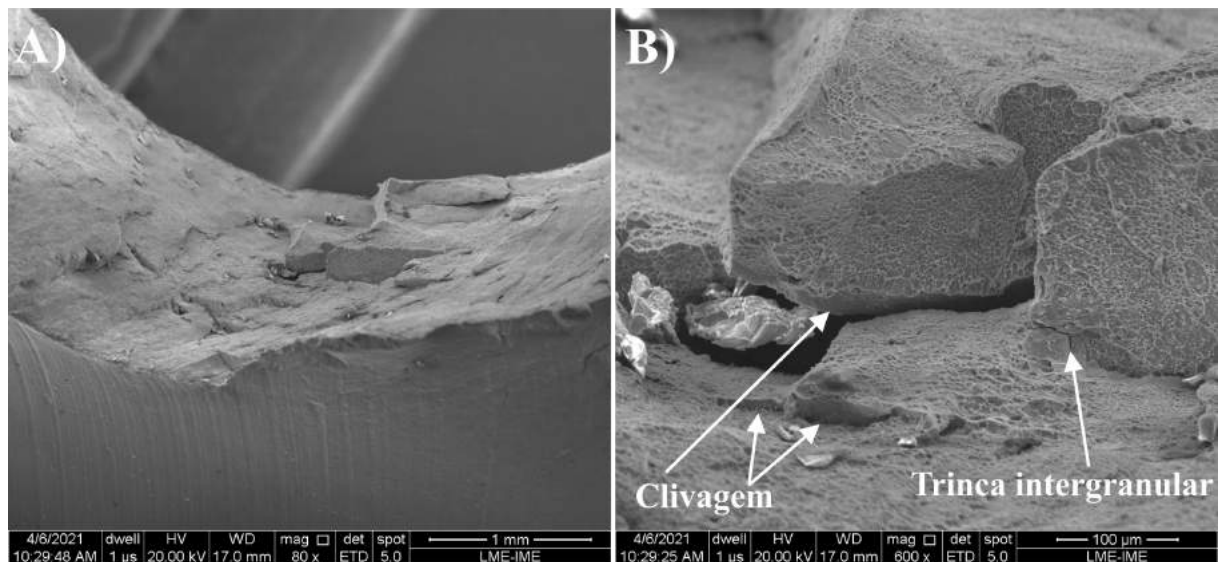


Figura 4.2.11 – Disparo 5, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 600X escala 100 μm.

Analisando outro ponto de interesse, Figura 4.2.12, constata-se a formação de platôs

característicos da separação atômica de específicos planos cristalográficos, clivagem. Há fortes indícios, apesar da observação de microcavidades, que houve predomínio de fratura intergranular. A fratura se deslocou pelos contornos de grão (Fase β) produzindo comportamento frágil em escala macroscópica, porém em escala microscópica a trinca desvia das partículas formando, localmente, aparência de microcavidades.

A fratura intergranular pode ocorrer em função do aumento de temperatura decorrente do impacto, facilitando a quebra da ligação atômica. Há outros mecanismos facilitadores para ocorrência de fratura intergranular, como: precipitação de fase frágil nos contornos, cavitação em contornos de grão entre outras. Porém como estamos analisando regime dinâmico, acredita-se não haver tempo para precipitação da fase β , por exemplo. Sendo mais provável ter ocorrido pelo aumento da temperatura local, aliado a um regime de alta intensidade de pressão.

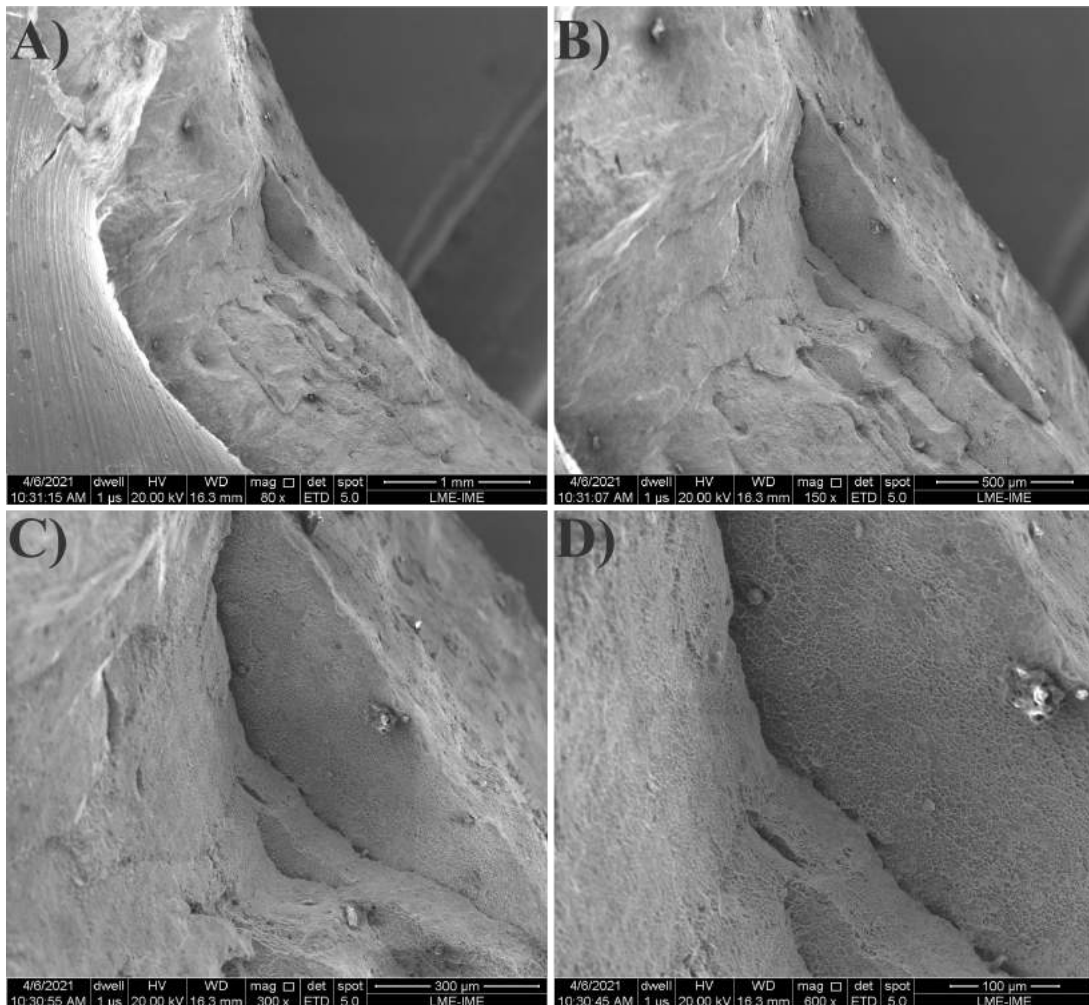


Figura 4.2.12 – Disparo 5, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm .

Na zona de pico do perfil poliondular, Figura 4.2.13, caso em que se pode afirmar que houve uma fratura totalmente frágil, devido ao perfil de perfuração existente na placa Ti-6Al-4V.

Apresentando um furo limpo sem deformações plásticas aparentes, tanto na superfície de entrada quanto na de saída do projétil. Constatou-se, da mesma forma, diversos fragmentos na superfície de entrada na chapa testemunha, indicando que o material foi ejetado a partir desta fratura frágil. Ressalta-se que o projétil não apresentou desvios relevantes em sua trajetória.

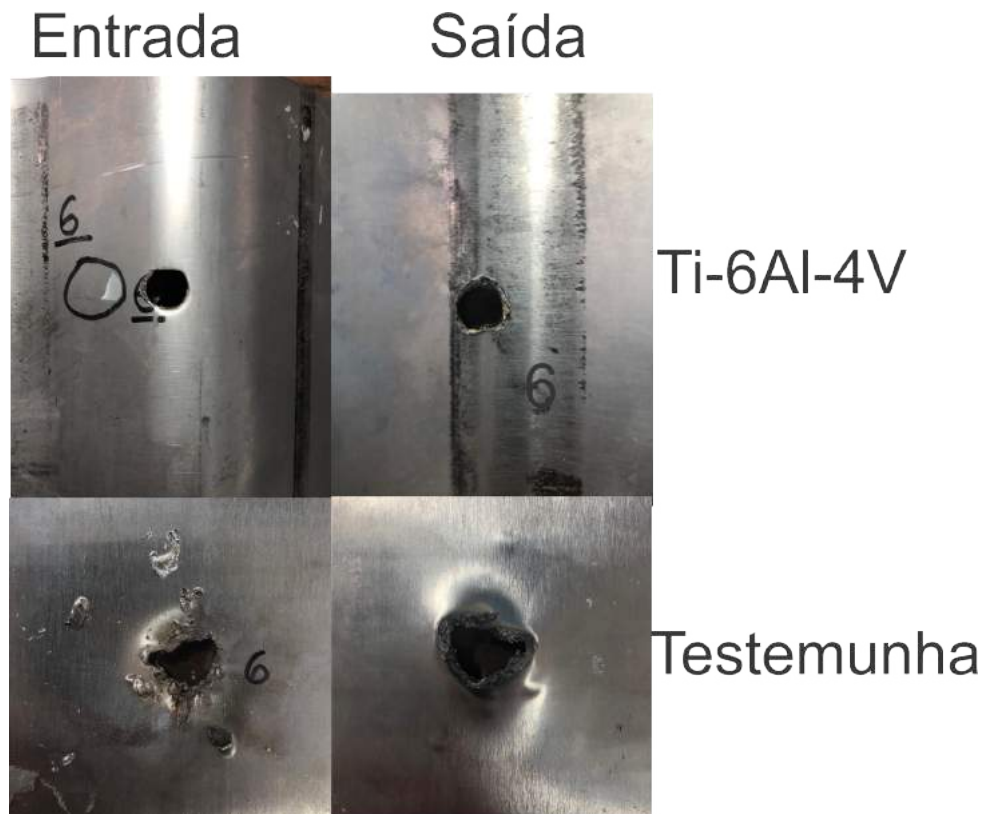


Figura 4.2.13 – Imagens da superfície de entrada e saída do projétil para a perfuração número 6. Para o impacto na zona de pico do perfil ondular da placa de 3mm de espessura e na placa testemunha.

A Figura 4.2.14 reforça a análise ótica do perfil de perfuração. Constatou-se ocorrência de fratura predominantemente frágil caracterizada por clivagem de planos cristalográficos. Ressalta-se a ocorrência desta clivagem em planos paralelos, caracterizando o que pode ser a propagação de trincas simultaneamente nestes planos, formando o aspecto de degraus.

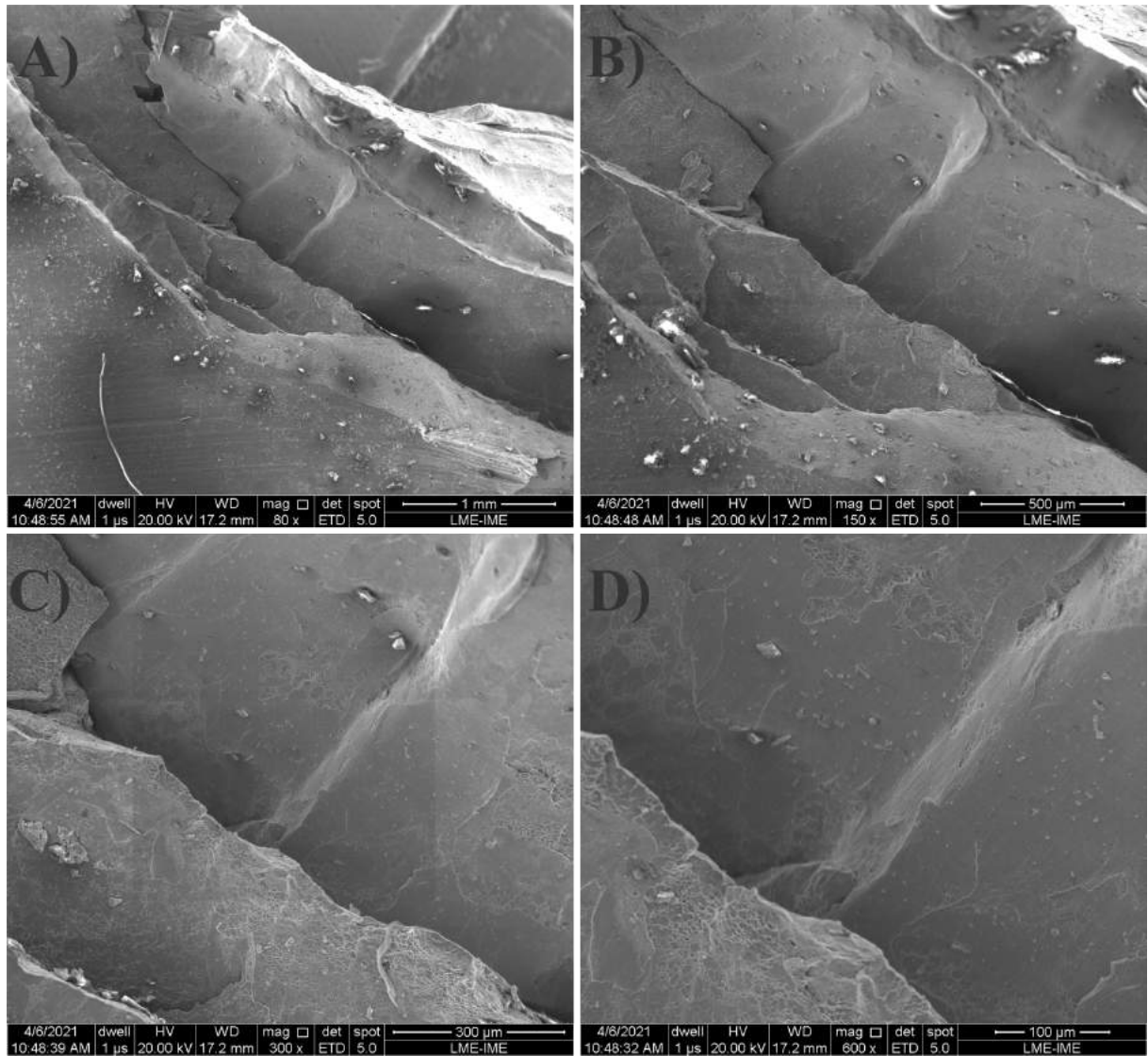


Figura 4.2.14 – Disparo 6, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm .

Ao observar área distinta da superfície de fratura na Figura 4.2.15, ratifica-se, novamente, a predominância de facetas de clivagem.

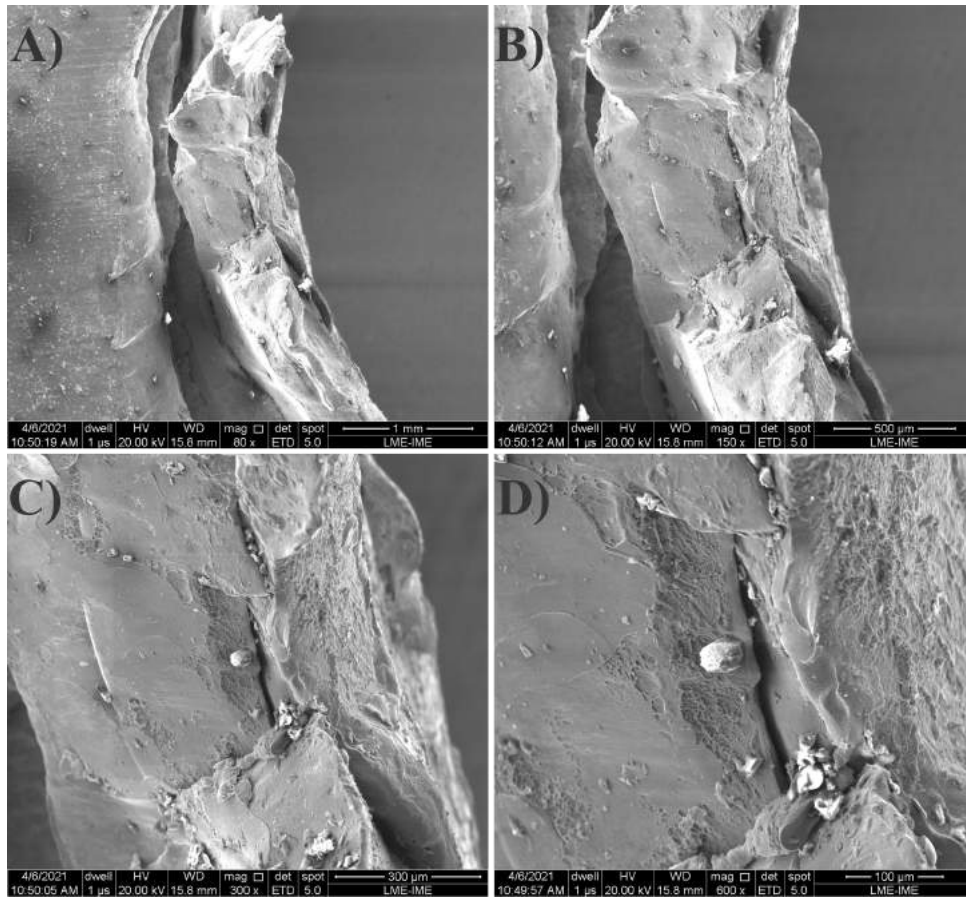


Figura 4.2.15 – Disparo 6, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm .

A Figura 4.2.16 apresenta a chapa plana de 3 mm de espessura. Pode-se observar que neste caso não houve desvios relevantes do tiro.



Figura 4.2.16 – Chapa plana de 3 mm de espessura, após o ensaio balístico;(a) face de entrada dos projéteis; (b) face de saída dos projéteis.

A Figura 4.2.17 apresenta o impacto referente a posição central da placa. Não houve desvio de trajetória do projétil. No entanto, há um aparente padrão na delaminação e na fragmentação desta perfuração. Pode-se observar, tanto na imagem de saída no Ti-6Al-4V quanto na de entrada na chapa testemunha, um padrão elíptico. Talvez decorrente da presença de textura resultante da direção de laminação da placa Ti-6Al-4V. Ademais, há uma simetria vertical nos dois maiores fragmentos presentes na superfície de entrada na chapa testemunha

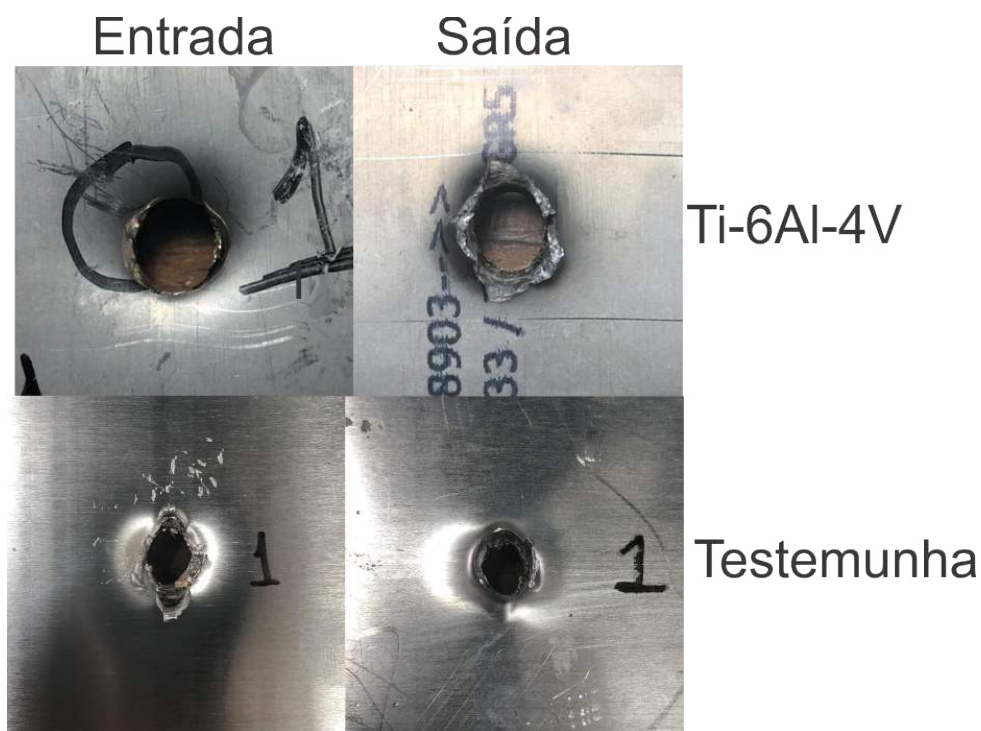


Figura 4.2.17 – Imagens da superfície de entrada e saída do projétil, para a perfuração número 1. Para o impacto na placa plana de Ti-6Al-4V de 3 mm de espessura e na placa testemunha.

A tabela 4.2.9 apresenta os dados referentes ao ensaio balístico.

Tabela 4.2.9 – Resultado do ensaio balístico para placa plana de 3 mm de espessura.

Disparo	Região de impacto	Identificação	Velocidade de impacto (m/s)	Velocidade residual (m/s)	Velocidade residual 2 (m/s)
1	Central	Ti-6Al-4V 3 mm- Plana;	827,71	717,35	683,34
2	Periférico		821,40	659,03	
3	Periférico	Testemunha: Al 3 mm- Plana.	834,95	747,71	686,15

As Figuras 4.2.18 e 4.2.19 apresentam as imagens de MEV obtidas para a chapa plana de 3mm, mais especificamente para o disparo número 1.

O padrão de fratura observado, em geral, é o mecanismo de fratura através de clivagem e ocorrência de trincas intergranulares. Na Figura 4.2.18 observa-se a deposição de partícu-

las, entretanto também é possível observar micropartículas com aspecto típico de bandas de cisalhamento adiabático.

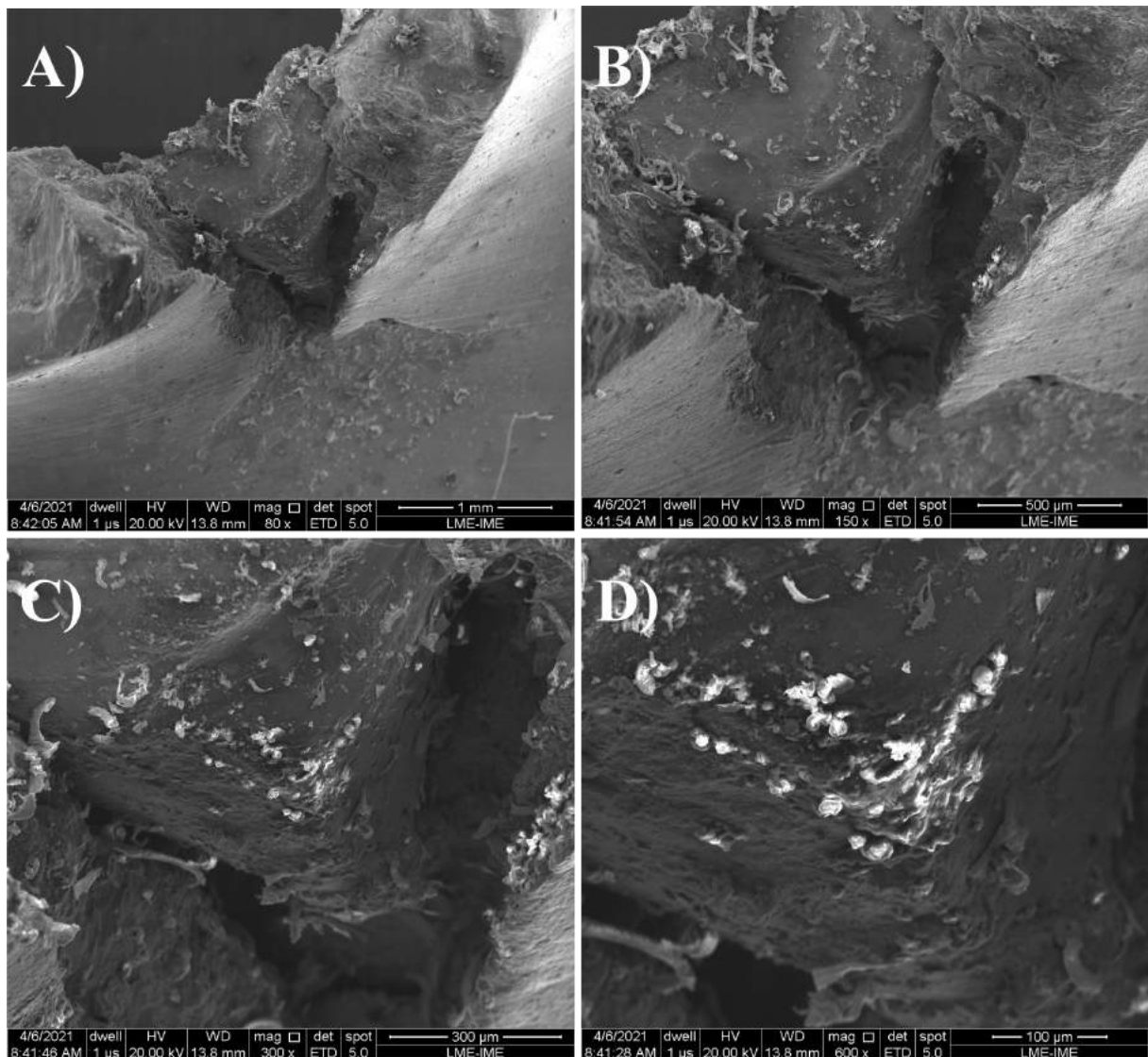


Figura 4.2.18 – Disparo 1, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm .

Observa-se na Figura 4.2.19 partículas sobre a face que anteriormente compunha a seção transversal da chapa, esta por sua vez apresenta superfície resultante da clivagem e os artefatos observados podem ser resultantes de resíduos balísticos, da camisa do projétil ou núcleo.

Pode-se observar a ocorrência de sucessivos degraus micrométricos, formando a morfologia conhecida como marcas de rios. A formação dos degraus se dá quando a trilha se propaga em planos paralelos e encontra uma discordância em hélice, alterando o plano de propagação, resultando no degrau.

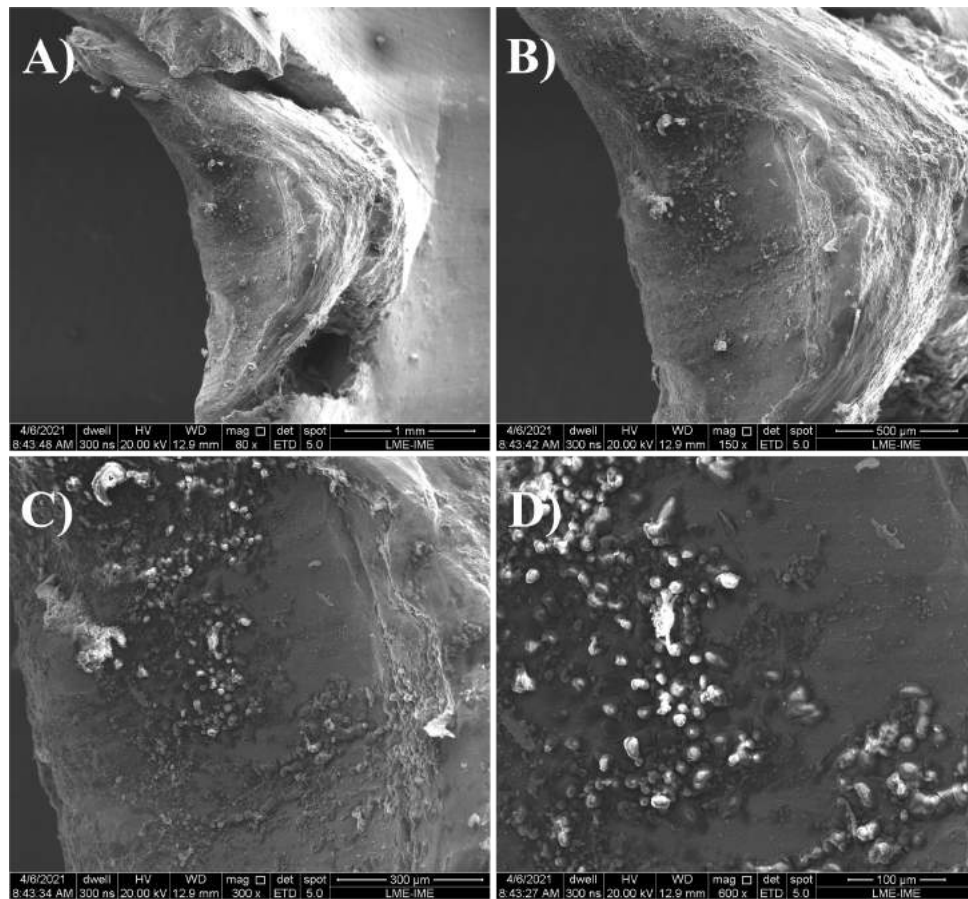


Figura 4.2.19 – Disparo 1, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm .

Entretanto ressalta-se que há comportamento dúctil na formação da pétala, apesar dos indícios que a fratura no ponto de impacto foi de predominância frágil, comportamento condizente com o regime do evento dinâmico. Temos que em um segundo momento após o impacto e consequentemente a propagação da onda de pressão, onda de choque, promovendo a propagação das trincas de mecanismos frágeis, o material foi capaz de ativar outros mecanismos de deformação plástica, permitindo a formação da pétala. O que pode ser explicado por diferentes taxas de deformação ao longo do domínio, onde a região cerca do impacto apresenta maior fragilidade e está vai diminuindo conforme se afasta.

O padrão observado na Figura 4.2.20 é similar ao observado na Figura 4.2.17. Apresentando, de mesmo modo, um padrão elíptico com dois fragmentos apresentando simetria vertical fincados na chapa testemunha. A imagem evidencia que o comportamento da chapa plana não apresenta variabilidade relevante, o que é condizente, pois não há alteração das condições de contorno do ensaio.

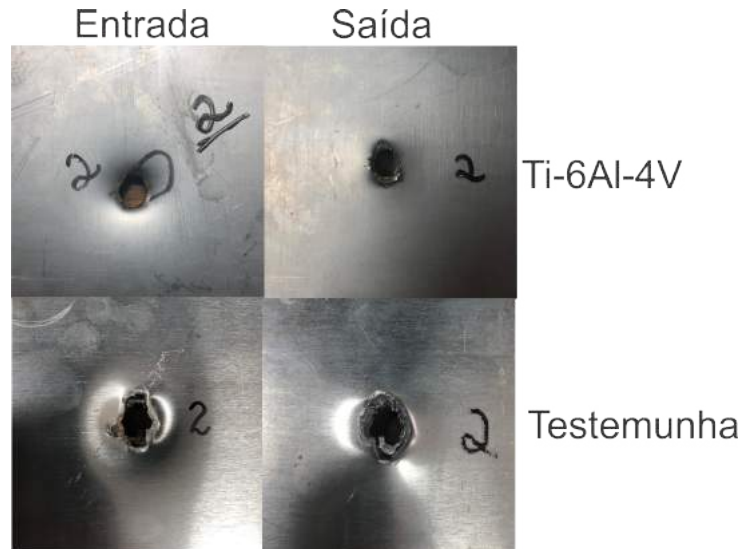


Figura 4.2.20 – Imagens da superfície de entrada e saída do projétil, para a perfuração número 2. Para o impacto na placa plana de Ti-6Al-4V de 3 mm de espessura e na placa testemunha.

Conforme pode ser observado na Figura 4.2.21 há predominância da separação atômica de planos cristalinos paralelos entre si.

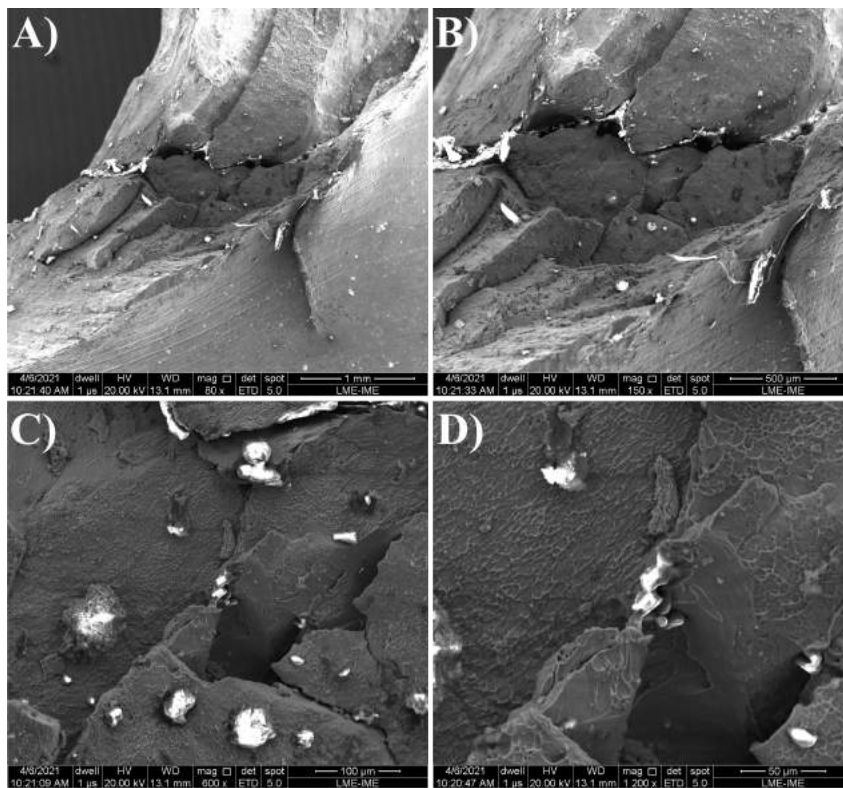


Figura 4.2.21 – Disparo 2, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm; C) Aumento 600X escala 100 μm; D) Aumento 1200X escala 50 μm.

O padrão observado na Figura 4.2.22 também é similar aos demais observados para a placa plana de 3 mm de espessura. Apresentando o recorrente padrão elíptico com dois fragmentos, com indícios de simetria vertical fincados na superfície de entrada da chapa testemunha.

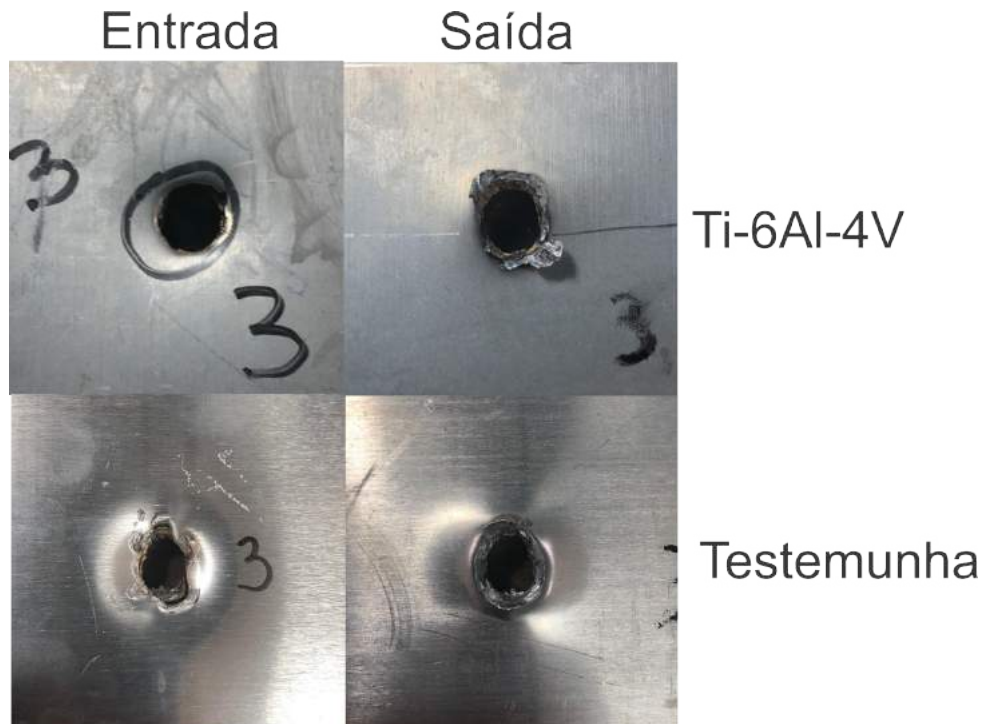


Figura 4.2.22 – Imagens da superfície de entrada e saída do projétil, para a perfuração número 3. Para o impacto na placa plana de Ti-6Al-4V de 3 mm de espessura e na placa testemunha.

As Figuras 4.2.23 4.2.24 apresentam as imagens obtidas via MEV da perfuração do disparo número 3, sendo analisada região sem a ocorrência de deformação plástica aparente e da região onde pode ser observada uma pétala, Figura 4.2.22.

Na Figura 4.2.23 observa-se predominantemente a separação atômica de planos cristalográficos paralelos, ou seja, fratura transgranular. A trinca se propagou perpendicularmente a direção da força de impacto e consequentemente paralela aos planos, às facetas de clivagem.

Nota-se que a superfície anteriormente seção transversal da chapa, Figura 4.2.23(B) apresenta marcas de rios. Indicando que a trinca se propagou em dois ou mais planos cristalográficos. Esta propagação no sentido longitudinal da seção da chapa, pode ter favorecido a deformação em forma de pétala e a posterior ejeção destas.

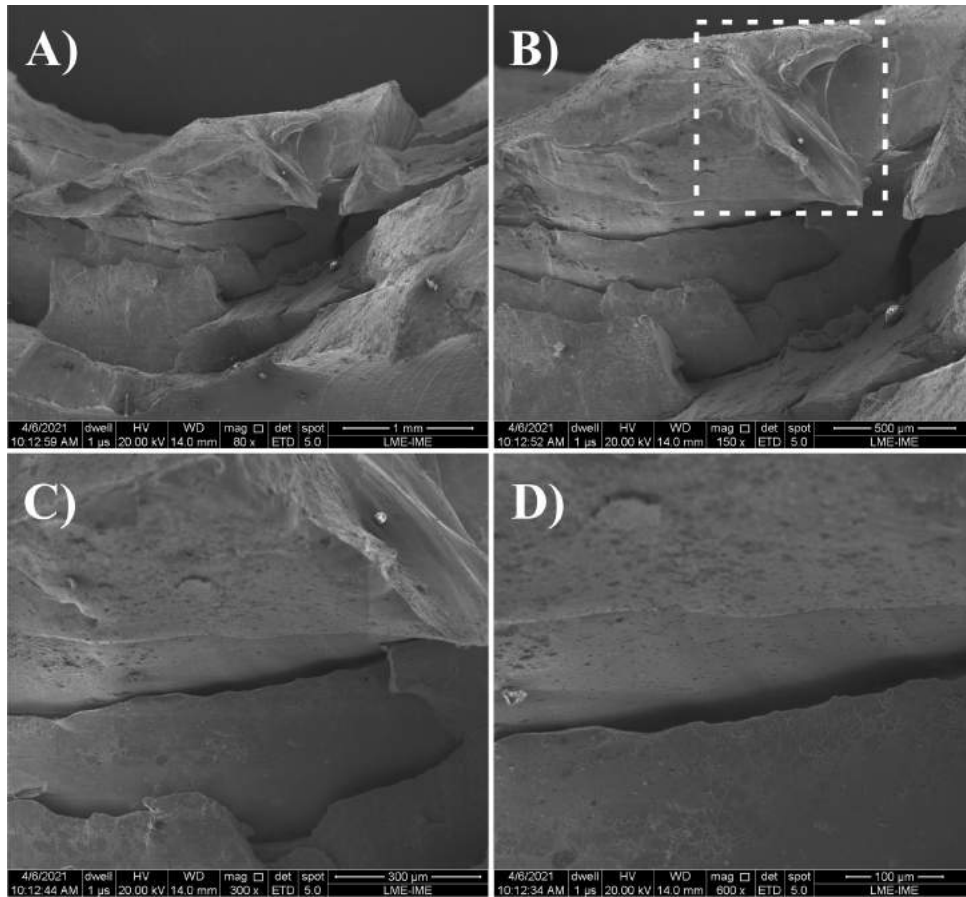


Figura 4.2.23 – Disparo 3, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm .

A Figura 4.2.24 apresenta a região com a pétala, pode-se observar fratura predominantemente transgranular, porém com indícios que a trinca teve que desviar de partículas durante sua propagação, visto que há formação de marcas similares a microcavidades. Isto pode ter dissipado parte da energia, aliado a mudança de direção das facetas de clivagem, visto que no encontro de dois degraus a fratura ocorre por deformação plástica.

Aparentemente a propagação das trincas transgranulares ocorrem predominantemente em planos paralelos no sentido longitudinal da seção da chapa, evidenciando o comportamento anteriormente reportado.

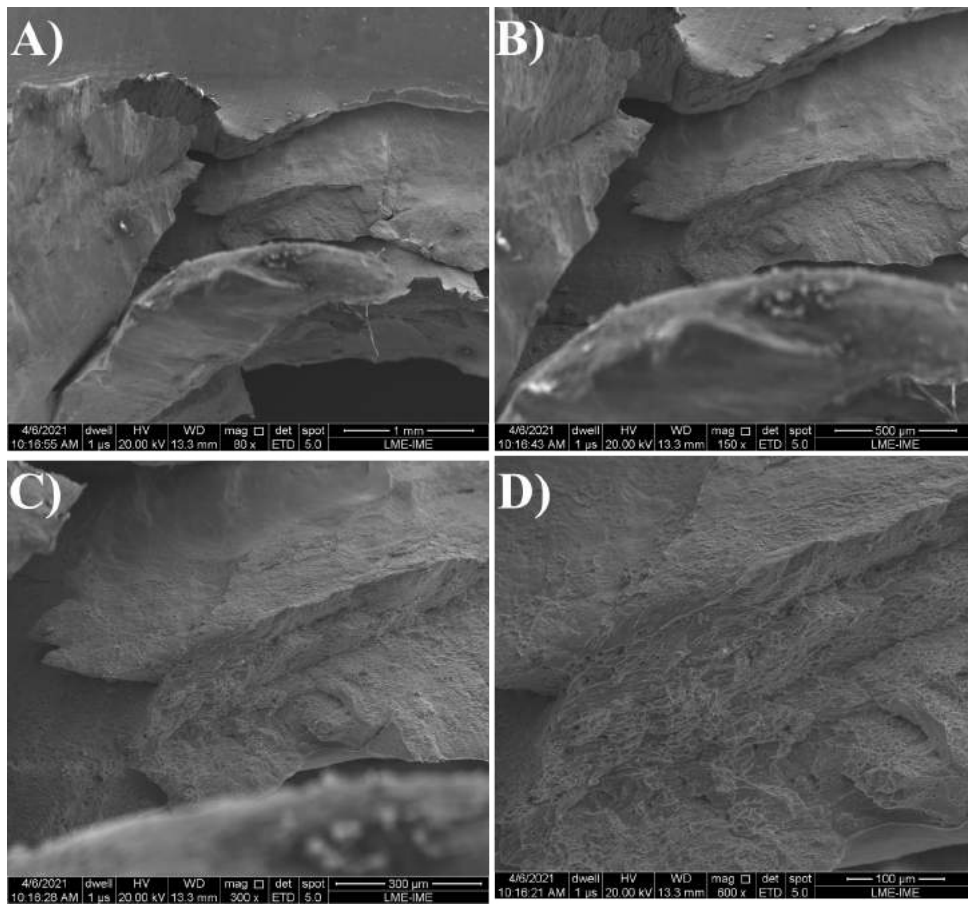


Figura 4.2.24 – Disparo 3, chapa poliondular de 3 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm .

A Figura 4.2.25 apresenta a chapa plana de 2 mm de espessura, não houve desvios na trajetória do tiro.

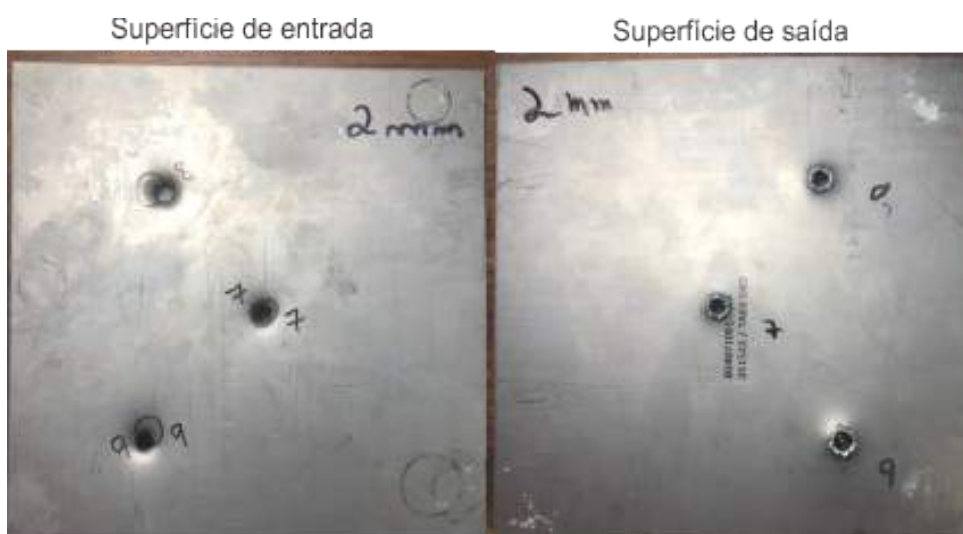


Figura 4.2.25 – Chapa plana de Ti-6Al-4V com 2 mm de espessura, após o ensaio balístico;(a) face de entrada dos projéteis;(b) face de saída dos projéteis.

A Tabela 4.2.10 apresenta as velocidades referentes ao ensaio balístico para a chapa plana de 2 mm de espessura.

Tabela 4.2.10 – Resultado do ensaio balístico para placa plana de 2 mm de espessura.

Disparo	Região de impacto	Identificação	Velocidade de impacto (m/s)	Velocidade residual (m/s)	Velocidade residual 2 (m/s)
7	Central	Ti-6Al-4V 2 mm-	823,56	770,44	-
8	Periférico	Poliondular;	821,55	765,54	-
9	Periférico	Testemunha: Al 3 mm - Plana	826,56	761,55	-

Conforme o padrão de perfuração presente na Figura 4.2.26, não houve fragmentação aparente e há indícios que houve uma zona dúctil e uma zona frágil na fratura. A fratura aparenta ser em pétalas.

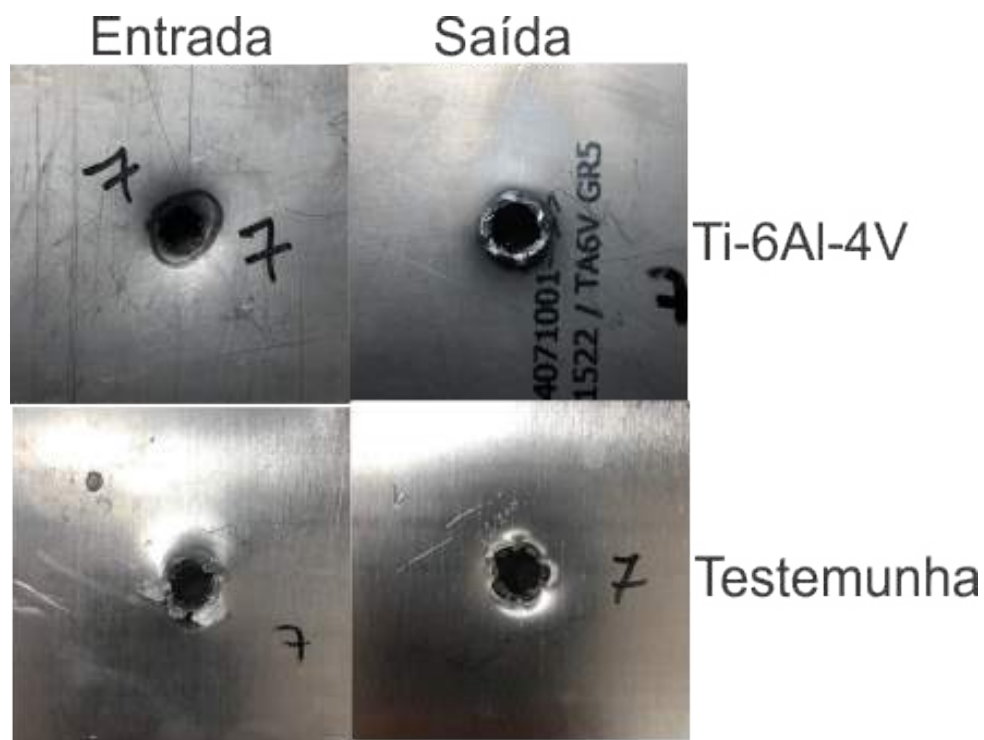


Figura 4.2.26 – Imagens da superfície de entrada e saída do projétil, para a perfuração número 7. Para o impacto na placa plana de Ti-6Al-4V de 2 mm de espessura e na placa testemunha.

A Figura 4.2.27 apresenta com detalhes a superfície de fratura. A superfície de fratura apresenta comportamento de fratura intragranular. Observa-se ampla ocorrência de micropartículas apresentando bandas de cisalhamento adiabático (ASB).

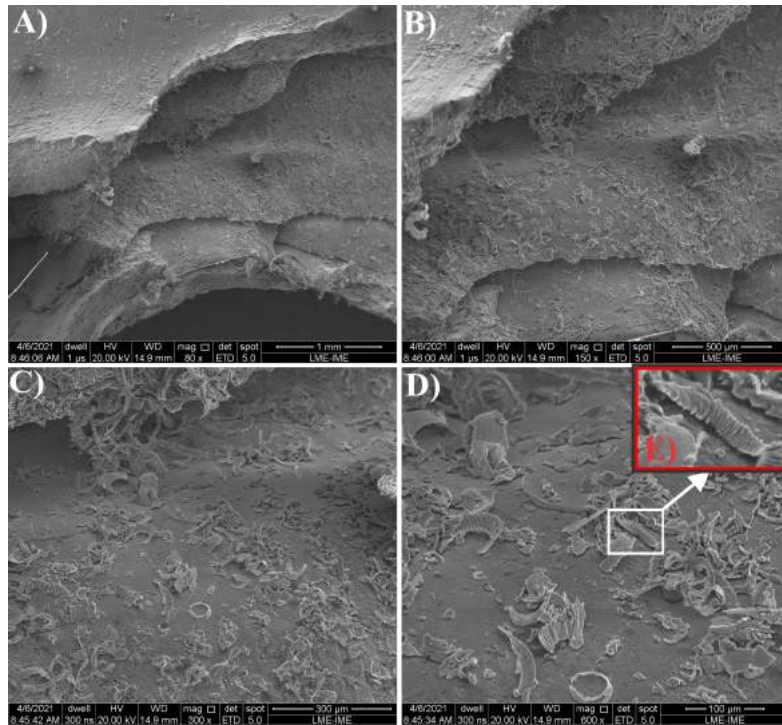


Figura 4.2.27 – Disparo 7, chapa plana de 2 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 150X escala 500 μm ; C) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm ; E) Área em maior aumento.

O padrão presente na Figura 4.2.28 aparenta ser uma fratura em pétalas. Não se observou fragmentação dispersa aparente, mas há marcas de entrada próximas ao furo de perfuração na superfície de entrada da chapa testemunha. Estes parecem ser de pedaços referentes as pontas das pétalas da chapa de Ti-6Al-4V. Além disso, há indícios de que houve uma zona dúctil e uma zona frágil na fratura.

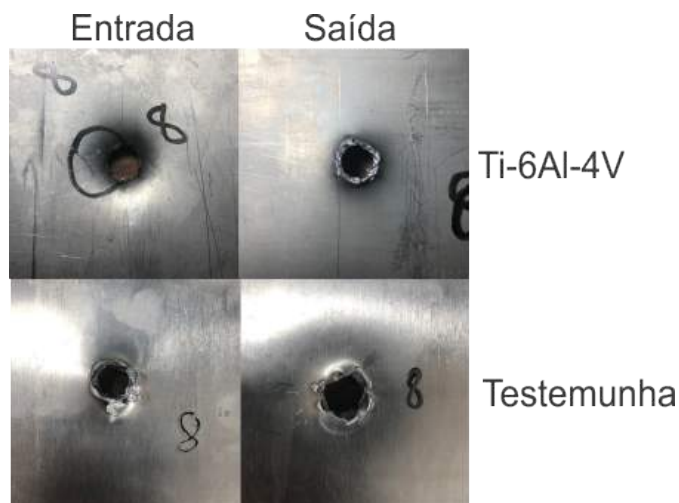


Figura 4.2.28 – Imagens da superfície de entrada e saída do projétil, para a perfuração número 8. Para o impacto na placa plana de Ti-6Al-4V de 2 mm de espessura e na placa testemunha.

Na Figura 4.2.29 foram analisadas duas regiões distintas da seção mesma seção de fratura de perfuração do projétil. Seção mais externa da seção transversal da chapa, Figuras 4.2.29(B) e 4.2.29(C), e seção mais interna, seção de entrada do projétil, Figuras 4.2.29(D) e 4.2.29(E).

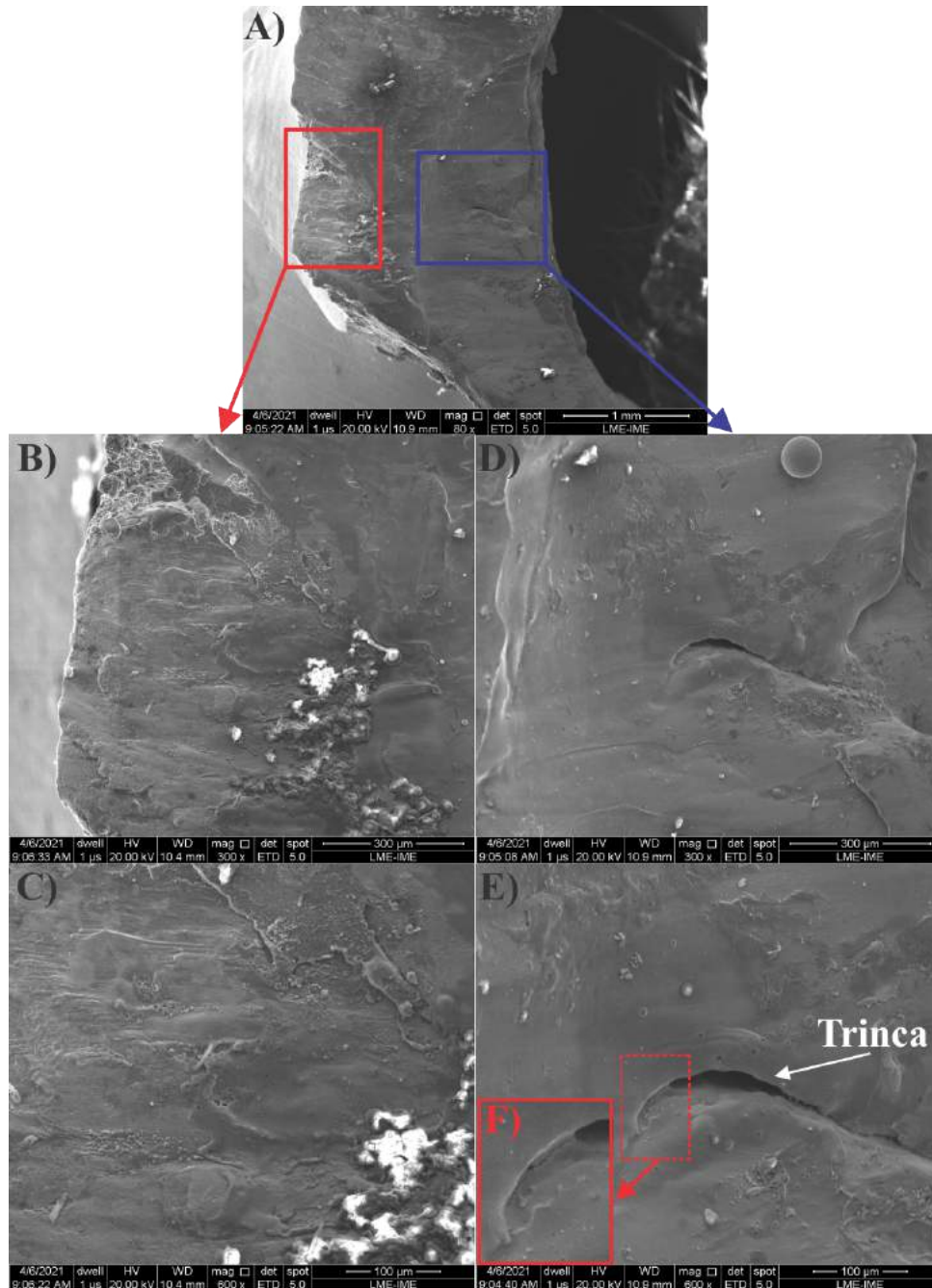


Figura 4.2.29 – Disparo 8, chapa plana de 2 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 300X escala 300 μm ; C) Aumento 600X escala 100 μm ; D) Aumento 300X escala 300 μm ; E) Aumento 600X escala 100 μm F) Área em maior aumento, da região da trinca.

O módulo de fratura observado na Figura 4.2.30 é similar aos demais observados para a placa plana de 2 mm de espessura.



Figura 4.2.30 – Imagens da superfície de entrada e saída do projétil, para a perfuração número 9. Para o impacto na placa plana de Ti-6Al-4V de 2 mm de espessura e na placa testemunha.

Particularmente, a partir da separação atômica de planos e de certa parcela de deformação plástica, observa-se a formação da pétala, neste caso na Figura 4.2.31 pode-se observar a propagação de duas trincas na superfície externa da chapa, ambas formando aproximadamente $\pm 45^\circ$ com as marcas de laminação visíveis na superfície. Aparentemente as trincas estão se propagando para um mesmo ponto em comum, o que poderia resultar na separação do elemento, caracterizando estilhaços da chapa.

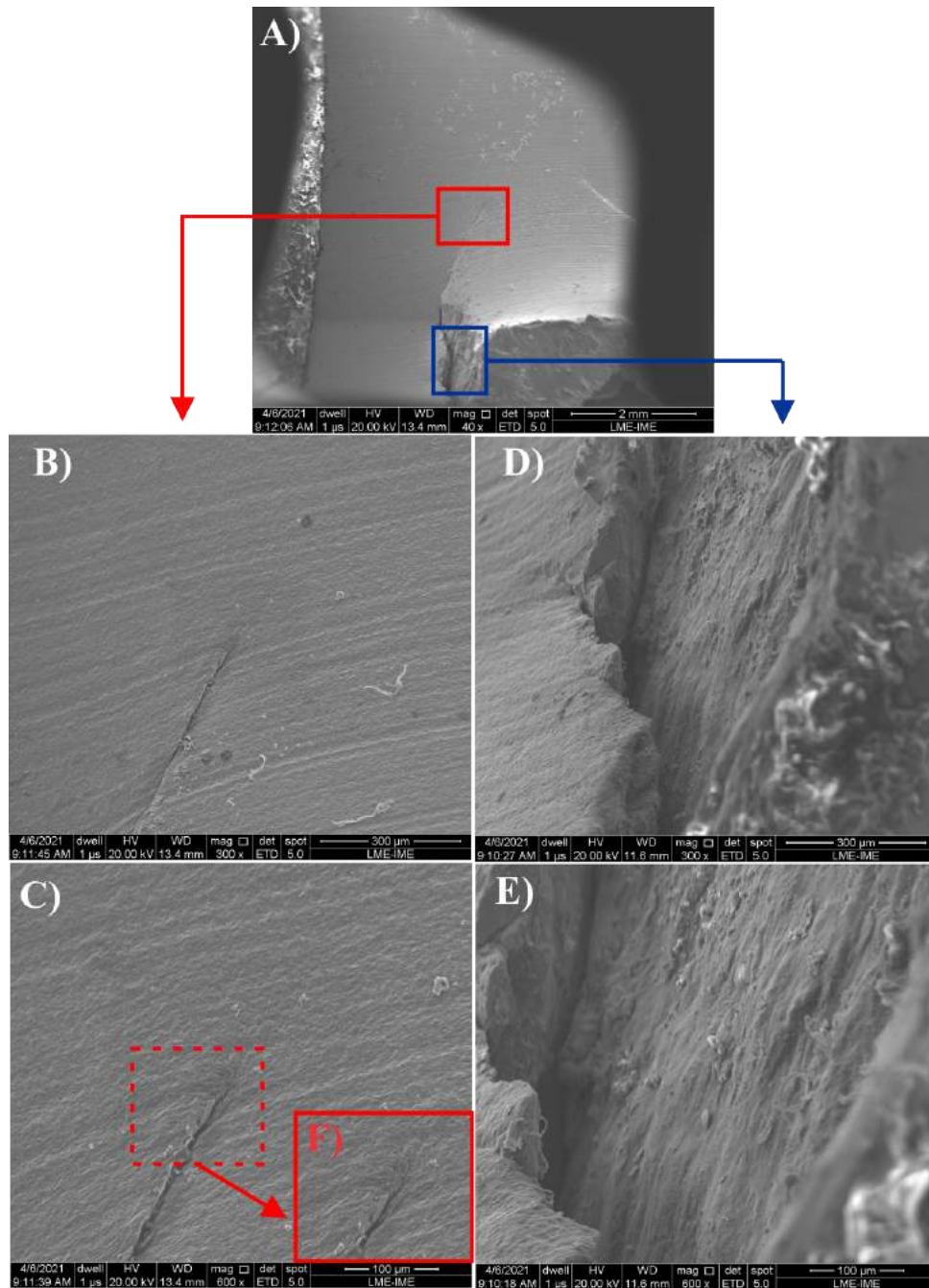


Figura 4.2.31 – Disparo 9, chapa plana de 2 mm de espessura; A) Aumento 80X escala 1 mm; B) Aumento 300X escala 300 μm ; C) Aumento 600X escala 100 μm ; D) Aumento 300X escala 300 μm ; D) Aumento 600X escala 100 μm F) Área em maior aumento, da região da trinca.

A Figura 4.2.32 apresenta a chapa poliondular de 2 mm de espessura. Pode-se observar as marcações para o alvo do tiro na superfície de entrada do projétil na chapa de Ti-6Al-4V. Evidente que houve um desvio para o disparo número 12, contudo, independente do desvio, o projétil atingiu a zona desejada.

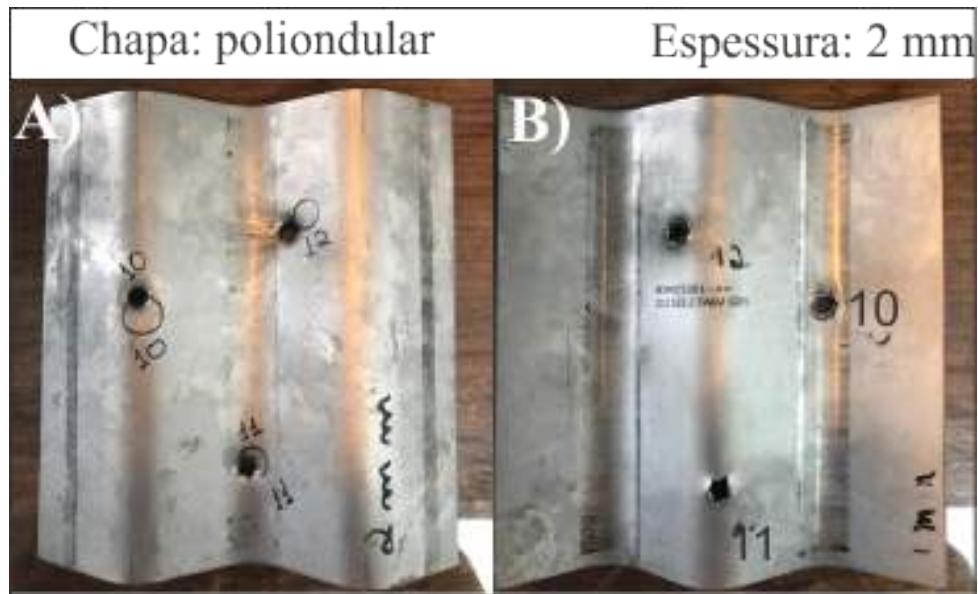


Figura 4.2.32 – Chapa poli nodular de 2 mm de espessura, após o ensaio balístico;(a) face de entrada dos projéteis; (b) face de saída dos projéteis.

Na tabela 4.2.11 temos as velocidades de impacto e residual do projétil para os disparos na chapa poliondular de 2 mm.

Tabela 4.2.11 – Chapa poli nodular de 2 mm de espessura, após o ensaio balístico;(a) face de entrada dos projéteis; (b) face de saída dos projéteis.

Disparo	Região de impacto	Identificação	Velocidade de impacto (m/s)	Velocidade residual (m/s)	Velocidade residual 2 (m/s)
10	Intermediária	Ti-6Al-4V 2 mm- Poliondular;	829,58	771,75	-
11	Vale		827,36	774,71	-
12	Pico	Testemunha: Al 3 mm - Plana	817,65	741,07	707,33

A Figura 4.2.33 apresenta o perfil de penetração decorrente do impacto no topo da geometria poliondular. Pode-se observar uma delaminação na superfície posterior de impacto, na chapa de Ti-6Al-4V. O perfil de fratura parece ser em pétala. Porém a delaminação decorrente da propagação de trinca frágil no sentido longitudinal na seção transversal da placa, parece ter fragilizado a superfície posterior. Observa-se a ocorrência de fragmentos relativamente bem dispersos na superfície de entrada da chapa testemunha.

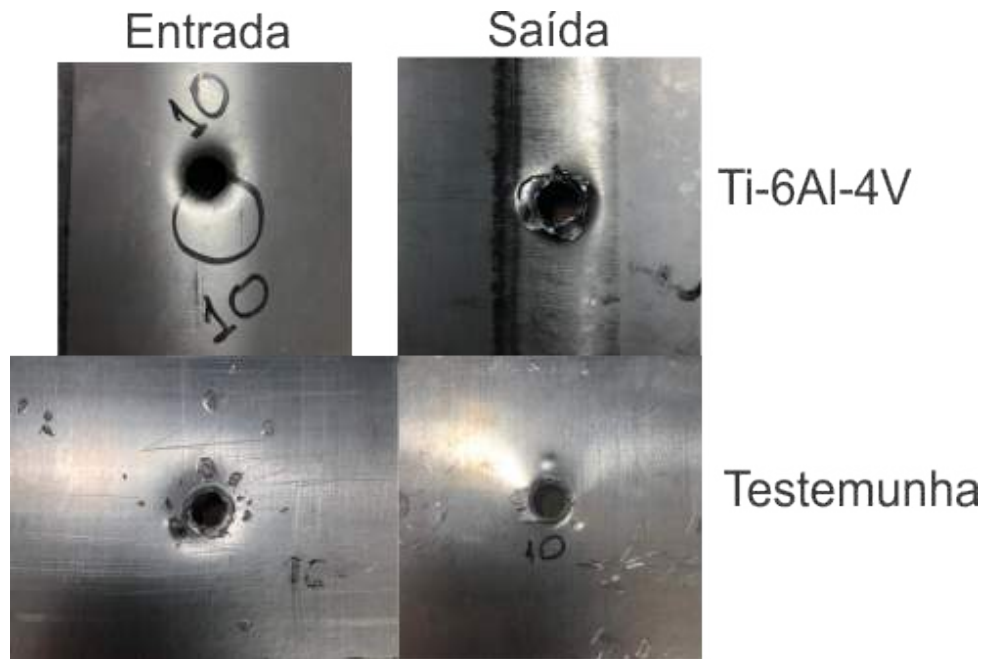


Figura 4.2.33 – Imagens da superfície de entrada e saída do projétil para a perfuração número 10. Para o impacto na zona de pico do perfil ondular da placa de 2mm de espessura e na placa testemunha.

Na Figura 4.2.34 estão apresentadas imagens de MEV de três regiões distintas da perfuração referente ao décimo disparo. Sendo possível constatar similaridade entre as regiões, sendo Figura 4.2.34(C) uma imagem nítida da propagação da trinca transgranular. Constata-se que a superfície resultante da separação é condizente com a observada nas Figuras 4.2.34(F) e (I), sendo este um indicio que as microcavidades resultantes da propagação da trinca transgranular e separação de planos atômicos é resultado, durante a clivagem, da trinca desviando de partículas do material enquanto se propaga.

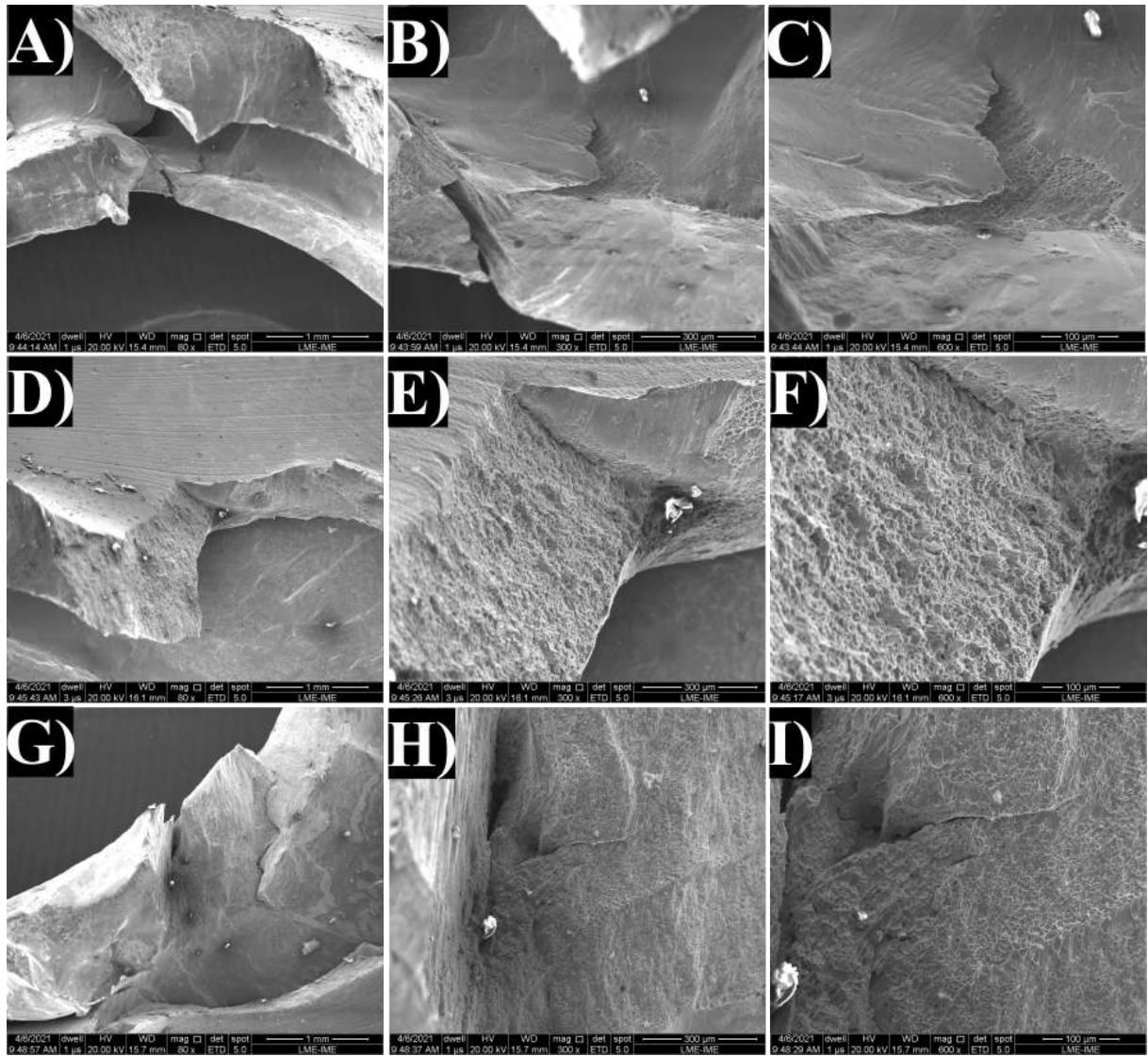


Figura 4.2.34 – Disparo 10. A) Área foco 1, 80x ; B) Área foco 1, 300x; C) Área foco 1, 600x; D)Área foco 2, 80x; E) Área foco 2, 300x; F)Área foco 2, 600x; H) Área foco 3, 80x; I) Área foco 3, 300x F) Área foco 3, 600x.

Para o impacto na região do vale do perfil ondular, Figura 4.2.35, é possível observar comportamento similar ao observado na placa plana de 2 mm de espessura. O perfil de perfuração apresenta indícios de fratura radial, sendo possível observar a propagação de duas trincas simetricamente posicionadas com o furo do projétil. Observando a superfície de entrada na chapa testemunha, nota-se que há dois fragmentos da chapa Ti-6Al-4V de tamanhos relativamente grandes fincados.

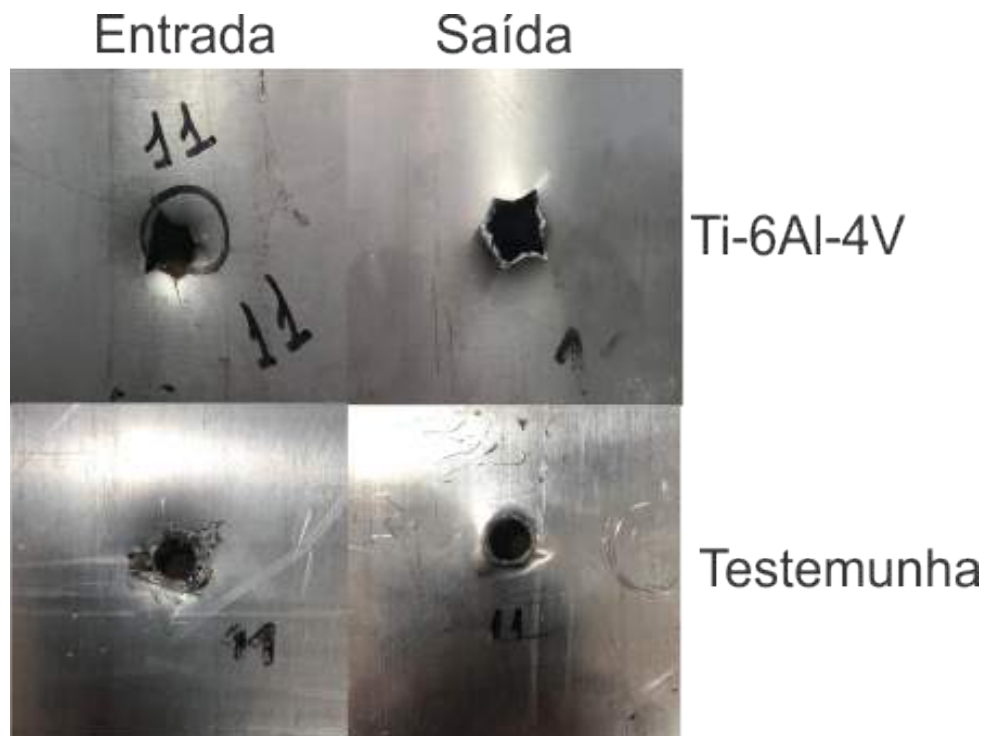


Figura 4.2.35 – Imagens da superfície de entrada e saída do projétil para a perfuração número 11. Para o impacto na zona de vale do perfil ondular da placa de 2mm de espessura e na placa testemunha.

Observando a Figura 4.2.36 pode-se relatar o comportamento da chapa de Ti-6Al-4V para o disparo número 11, incidente no vale do perfil poliondular. O comportamento da propagação da trinca é similar ao observado na chapa plana de 3 mm nas Figuras 4.2.17, 4.2.18 e evidenciado na Figura 4.2.30 da chapa plana de 2 mm. Constata-se que quando há observação de pétalas há a ocorrência de duas trincas se propagando no material, perifericamente as pétalas, de forma a se encontrarem. Na Figura 4.2.30 observou um comportamento de angulação de aproximadamente 45° com as marcas de laminação observadas na superfície. A Figura 4.2.36(A) aparentemente as duas trincas, se encontraram formando uma geometria similar a ponta de triângulo.

Essas observações sugerem que o regime de falha é realmente frágil. As pétalas são aceleradas pelo impacto do projétil, sofrendo certa deformação plástica e cisalhamento devido ao carácter perfurante do projétil. A medida que a propagação separa os planos atômicos, isto facilita o deslocamento da pétala.

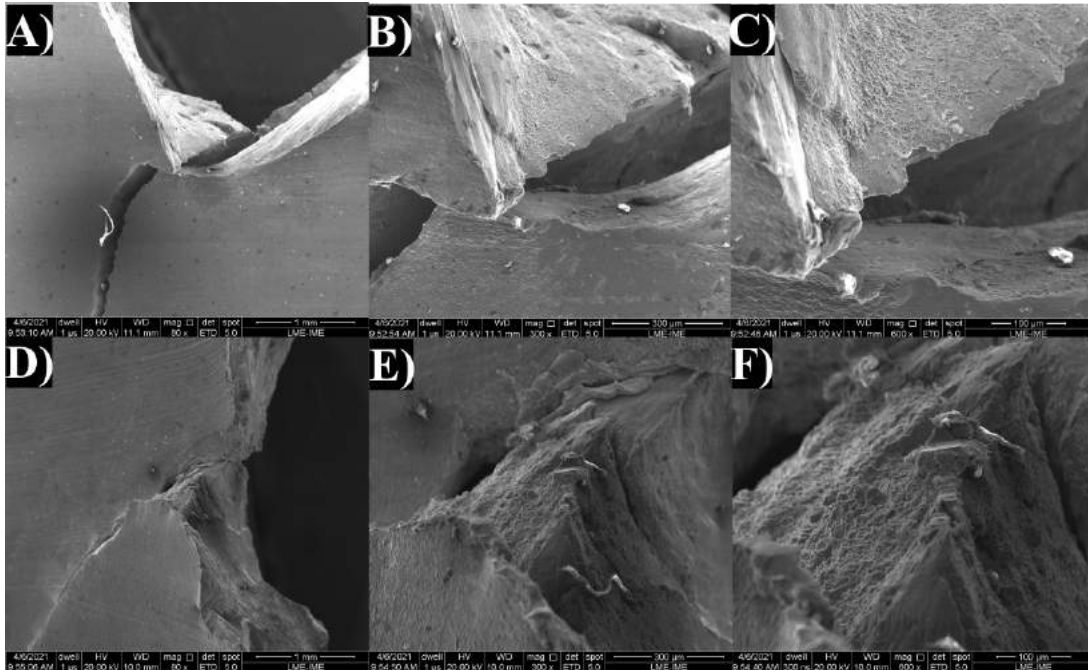


Figura 4.2.36 – Disparo 11, A) Área foco 1, 80x ; B) Área foco 1, 300x ; C) Área foco 1, 600x ; D) Área foco 2, 80x; E) Área foco 2, 300x; F) Área foco 2, 600x.

Para o impacto na região intermediária do perfil ondular ilustrado na Figura 4.2.37. Observa-se um comportamento de fratura em pétalas, entretanto, pode-se destacar que houve a ejeção de uma pétala devido à delaminação. A ejeção pode ter ocorrido em função da propagação de uma trinca frágil no sentido longitudinal da seção transversal da placa.



Figura 4.2.37 – Imagens da superfície de entrada e saída do projétil para a perfuração número 12. Para o impacto na região intermediária do perfil ondular da placa de 2mm de espessura e na placa testemunha.

O Comportamento observado na região intermediária é similar ao observado nas perfurações que ocorreram delaminação da chapa, ou seja, a trinca se propagou preferencialmente no sentido normal a seção transversal da chapa, sendo perpendicular ao sentido da pressão resultante do impacto.

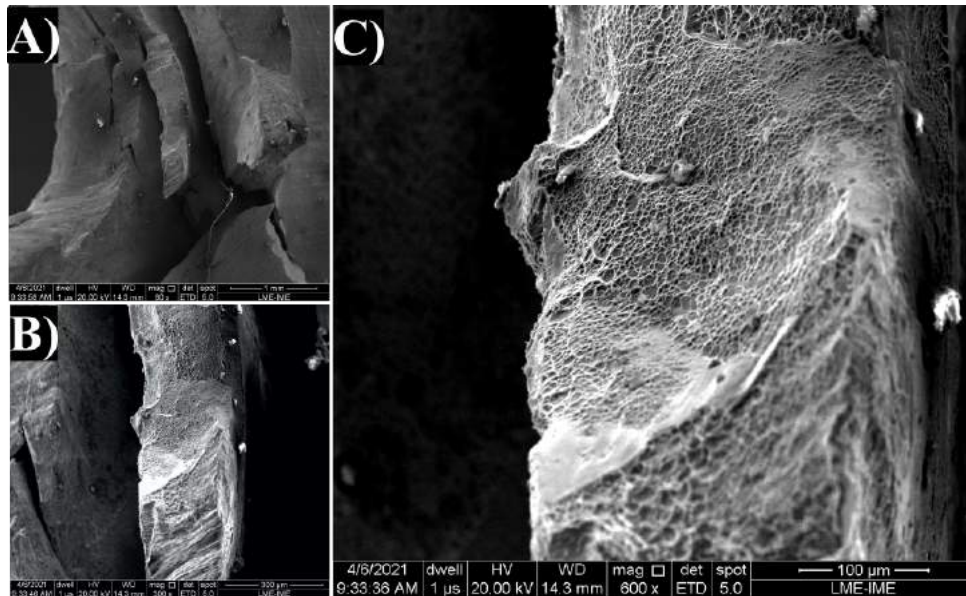


Figura 4.2.38 – Disparo 12, A) Aumento de 80x; B) Aumento de 300x ; C) Aumento de 600x.

4.3 Modelagem Numérica ajustada

Nesta modelagem, foram consideradas as velocidades angulares do projétil para todas as simulações. Buscou-se, também, simular as regiões de impacto conforme observado no ensaio balístico com a velocidade de impacto mensurada. Também foram realizadas as simulações dos impactos considerando a chapa testemunha de Alumínio para o impacto na chapa plana de 2 e 3 mm e para a chapa poliondular de 3 mm de espessura, a Figura 4.3.1 ilustra esta modelagem com a inclusão da chapa testemunha.

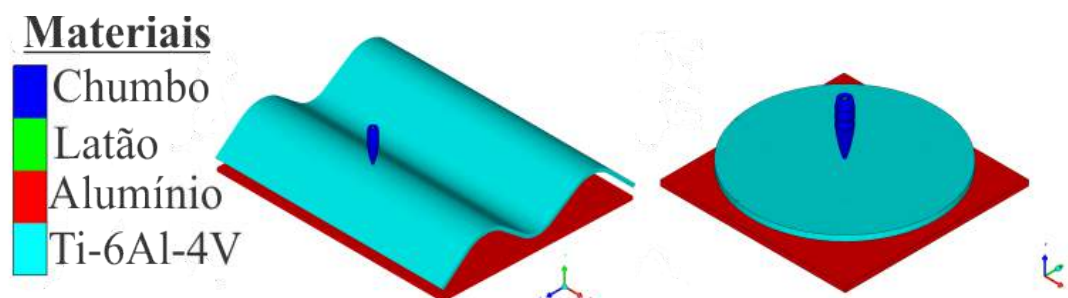


Figura 4.3.1 – Ilustração da modelagem geométrica das chapas.

As modelagens foram conforme, supracitado na metodologia. O dano ao projétil, velocidade residual e energia absorvida pelo sistema é alterado com a adição da chapa testemunha de

alumínio. As tabelas 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3 apresentam os resultados da energia total.

Tabela 4.3.1 – Comparativo entre a energia (J) do sistema projétil-proteção-testemunha, chapas planas.

Plana 2 mm com testemunha		Energia [J]			
		Total	Chumbo	Ti-6Al-4V	Alumínio
800 m/s	Inicial	1982,43	1982,43	0,00	0,00
	Final	1902,28	1630,20	73,89	198,20
	Variação	-80,15	-352,23	73,89	198,20
850 m/s	Inicial	2237,98	2237,98	0,00	0,00
	Final	2144,19	1873,50	71,66	199,03
	Variação	-93,79	-364,48	71,66	199,03
Plana 3 mm com testemunha		Energia [J]			
		Total	Chumbo	Ti-6Al-4V	Alumínio
800 m/s	Inicial	1982,43	1982,43	0,00	0,00
	Final	1852,99	1430,54	199,24	223,21
	Variação	-129,44	-551,89	199,24	223,21
850 m/s	Inicial	2237,98	2237,98	0,00	0,00
	Final	2106,31	1676,47	203,68	226,15
	Variação	-131,67	-561,51	203,68	226,15

Tabela 4.3.2 – Comparativo entre a energia (J) do sistema projétil-proteção-testemunha, chapa poliondular de 2 mm de espessura.

Poliondular 2 mm com testemunha:		Energia [J]				
		Total	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	Alumínio
Região: Pico						
800 m/s	Inicial	3065,62	1108,47	1957,15	0,00	0,00
	Final	2769,21	877,56	1581,17	97,84	212,64
	Variação	-296,41	-230,91	-375,98	97,84	212,64
Região: Intermediária						
800 m/s	Inicial	3090,51	1114,39	1976,12	0,00	0,00
	Final	2809,64	816,20	1554,43	197,62	241,39
	Variação	-280,87	-298,19	-421,69	197,62	241,39
Região: Vale						
800 m/s	Inicial	3065,64	1108,47	1957,17	0,00	0,00
	Final	2798,88	956,92	1622,26	65,34	154,36
	Variação	-266,76	-151,55	-334,91	65,34	154,36

Tabela 4.3.3 – Comparativo entre a energia (J) do sistema projétil-proteção-testemunha, placa poliondular 3 mm de espessura.

Poliondular pico com testemunha	Energia [J]				
	Total	Chumbo	Ti-6Al-4V	Alumínio	
800 m/s	Inicial	1982,47	1982,47	0,00	0,00
	Final	1774,73	1210,68	228,71	335,34
	Variação	-207,74	-771,79	228,71	335,34
850 m/s	Inicial	2238,03	2238,03	0,00	0,00
	Final	1988,91	1424,00	199,81	365,10
	Variação	-249,12	-814,03	199,81	365,10
Poliondular intermediária com testemunha	Energia [J]				
	Total	Chumbo	Ti-6Al-4V	Alumínio	
800 m/s	Inicial	1982,44	1982,44	0,00	0,00
	Final	1801,69	1097,74	362,76	341,19
	Variação	-180,75	-884,70	362,76	341,19
850 m/s	Inicial	2238,08	2238,08	0,00	0,00
	Final	2061,87	1367,16	310,53	384,19
	Variação	-176,21	-870,92	310,53	384,19
Poliondular vale com testemunha	Energia [J]				
	Total	Chumbo	Ti-6Al-4V	Alumínio	
800 m/s	Inicial	1982,70	1982,70	0,00	0,00
	Final	1852,90	1365,80	200,18	286,92
	Variação	-129,80	-616,90	200,18	286,92
850 m/s	Inicial	2238,28	2238,28	0,00	0,00
	Final	2093,49	1604,40	202,17	286,92
	Variação	-144,79	-633,88	202,17	286,92

Novamente, a região intermediária do perfil poliondular apresentou os melhores resultados. A partir da avaliação da diferença de energia absorvida pela chapa testemunha de alumínio, pode-se constatar que os melhores resultados para o perfil foram a região intermediária e de pico. Essa nítida diferença de energia, reforça a análise de que a região intermediária, além do dano e conseqüentemente da deformação plástica do projétil, defletiu a trajetória deste, resultando na descaracterização do perfil perfurante, e conseqüentemente, em maior área de impacto na chapa testemunha, sendo este com ângulo distinto do impacto na chapa de Ti-6Al-4V. Para a região de pico, reforça a análise de que ao causar maior dano ao projétil, também, promove a descaracterização do perfil perfurante. Resultando no aumento da energia absorvida pela chapa testemunha.

O vale do perfil para espessura de 2 e 3 mm, apresentou capacidade superior de retirada de energia do projétil, se comparado à chapas planas de mesma espessura. Entretanto constata-se que a redução de energia em decorrência da proteção de Ti-6Al-4V, neste caso, foi semelhante à observada nas chapas planas. Todavia como a energia absorvida na chapa testemunha é superior no impacto referente ao vale, acredita-se que seja devido à maior deformação do projétil em decorrência do maior dano. Sendo estes indícios de que a região de vale apresenta maior

desempenho do que chapas planas, de mesma espessura, na proteção balística.

Os dados apresentados na Tabela 4.3.4 permitem a análise numérica do trabalho plástico (J), sendo está uma parcela da energia total observada, que é composta pela energia cinética, energia interna e trabalho plástico. Apesar da inclusão da chapa testemunha os dados obtidos reforçam as análises anteriores.

Pode-se comparar a região intermediária da chapa poliondular de 2 mm de espessura com a plana de 3 mm, temos que a simulação da chapa poliondular apresenta maior eficiência na deformação da camisa de latão, da testemunha de Alumínio e da proteção de Ti-6Al-4V, somente o núcleo de chumbo apresentou resultado inferior ao da chapa plana. Desta forma, o emprego de blindagem multicamada poliondular, defasada 1/4 de período de onda, poderia suprimir a queda de eficiência dos demais perfis. Ao defasar 1/4 de período obteríamos a combinação das regiões de Pico e intermediária e de Vale com a intermediária.

Tabela 4.3.4 – Simulação, energia de trabalho plástico, modelagem com testemunha.

Poliondular 2 mm		Trabalho plástico [J]			
Região:	Velocidade de Impacto [m/s]	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	Alumínio
Vale	800 m/s	56,61	12,24	31,14	100,54
Pico		54,83	12,28	50,23	134,19
Intermediária		75,73	16,51	90,19	152,13
Poliondular 3 mm		Trabalho plástico [J]			
Região:	Velocidade de Impacto [m/s]	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	Alumínio
Vale	800	67,432	18,153	92,622	150,82
Pico		89,549	19,36	124,1	192,8
Intermediária		89,308	19,961	128,2	205,16
Vale	850	64,58	17,039	91,236	161,79
Pico		53,51	21,46	72,16	231,31
Intermediária		82,624	20,89	110,46	220,36
Placa Plana 3 mm		Trabalho plástico [J]			
Região:	Velocidade de Impacto [m/s]	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	Alumínio
Central	800	60,883	15,253	79,842	140,93
	850	50,221	20,05	83,107	134,48
Placa plana 2 mm		Trabalho plástico [J]			
Região:	Velocidade de Impacto [m/s]	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	Alumínio
Central	800	53,64	12,02	30,533	113,09
	850	52,844	11,09	28,323	111,23

A Tabela 4.3.5 apresenta os dados referentes as velocidades de impacto e residuais. Apesar do perfil intermediário apresentar os melhores resultados, com a inclusão da testemunha, torna-se nítido que a redução de velocidade do projétil foi similar com a observada no impacto

na região de pico. Reforçando que cada região do perfil interage de forma distinta, seja na deformação da proteção balística, deformação do projétil ou deflexão do movimento. Ressalta-se que a região de vale, apresenta redução de velocidade residual superior à observada na chapa plana para espessuras de 3 mm, entretanto para espessuras de 2 mm observa-se valor inferior para a região de vale.

Tabela 4.3.5 – Comparativo entre as velocidades residuais do projétil, inclusão da chapa testemunha.

Região	Velocidade inicial [m/s]	Velocidade Residual [m/s]	Variação [m/s]	Redução [%]
Poliondular (3 mm)	800	686,12	113,88	14,24
Vale	850	742,98	107,02	12,59
Poliondular (3 mm)	800	648,89	151,11	18,89
Intermediaria	850	705,52	144,48	17,00
Poliondular (3 mm)	800	649,74	150,26	18,78
Pico	850	706,57	143,43	16,87
Poliondular (2 mm)	800	731,42	68,58	8,57
Vale	800	704,72	95,28	11,91
Poliondular (2 mm)	800	714,14	85,86	10,73
Intermediaria	800	728,91	71,09	8,89
Poliondular (2 mm)	800	779,92	70,08	8,24
Pico	800	698,23	101,77	12,72
Plana 2 mm	800	756,22	93,78	11,03
Plana 3 mm	850			

4.3.1 Simulação conforme Ensaio Balístico

O foco da modelagem conforme in situ, foi a avaliação da superfície poliondular, visto que desvios da mira não apresentam relevância para com simulações de chapas planas. A Tabela 4.3.7 apresenta os resultados referentes a simulação das chapas poliondulares. Pode-se observar que o que o perfil intermediário apresenta melhores resultados próximo ao perfil de pico, apresentando maior redução da velocidade final do projétil.

Tabela 4.3.6 – Simulação conforme ensaio balístico, Velocidades residuais.

Disparo	Poliondular	Região de impacto	Velocidade de impacto (m/s)	Velocidade Residual (m/s)	Redução de velocidade
4	3 mm	Intermediária - Pico	833,57	697,06	16,38%
5		Intermediária - Vale	834,9	722,63	13,45%
6		Pico - Intermediária	827,5	642,25	22,39%
10	2 mm	Pico	829,58	744,52	10,25%
11		Vale	827,36	760,64	8,06%
12		Intermediária-Vale	817,65	723,47	11,52%

A Tabela 4.3.7 apresenta o comparativo do resultado mensurado a partir do ensaio balístico e da simulação in situ. Conforme pode ser observado, em alguns casos há duas velocidades residuais, isto ocorre pois o sensor de velocidade captou dois perfis de velocidade, ou seja, dois corpos viajando nestas velocidades. Pode ser proveniente de estilhaços do projétil, chapa testemunha ou da separação da camisa de Latão do núcleo de chumbo do projétil.

Tabela 4.3.7 – Velocidades residuais.

Disparo	Região de impacto	Identificação	Velocidade de impacto [m/s]	Velocidade residual [m/s]		
				1	2	Simulação
1	Central	Ti-6Al-4V Plana 3 mm	827,71	717,35	683,34	
2	Periférico		821,40	659,03	-	-
3	Periférico		834,95	747,71	686,15	
4	Intermediária	Ti-6Al-4V Poliondular 3 mm	833,57	713,46	626,90	697,06
5	Vale/Intermediária		834,90	726,60	592,95	722,63
6	Pico		827,50	735,88	627,84	642,25
7	Central	Ti-6Al-4V Plana 2 mm	823,56	770,44		
8	Periférico		821,55	765,54		
9	Periférico		826,56	761,55	-	
10	Intermediária	Ti-6Al-4V Poliondular 2 mm	829,58	771,75		744,52
11	Vale		827,36	774,71		760,64
12	Pico		817,65	741,07	707,33	723,47

Conforme a Tabela 4.3.7, as velocidades residuais simuladas encontram-se cerca dos resultados mensurados no ensaio balístico. Entretanto deve-se ressaltar que existem erros intrínsecos presentes em modelagens numéricas, além dos erros decorrentes do ensaio empírico, visto que os resultados da simulação são aproximações baseadas em modelos matemáticos. Desta forma considera-se o resultado da modelagem satisfatório, sendo este condizente os resultados do ensaio balístico.

Apesar da variação da velocidade de impacto, pode-se sem detrimento relevante, compará-las a partir de porcentagem de velocidade reduzida como demonstrado na Tabela 4.3.8, visto que o valor da modelagem encontra-se dentro da faixa de velocidades mensuradas no ensaio e que o comportamento observado das proteções foram similares em ambas as metodologias. Não

obstante da necessidade de um maior número de amostras para complementação da discussão sobre padrões de comportamento.

Tabela 4.3.8 – Comparativo, Velocidades residuais.

Disparo	Região de impacto	Identificação	Velocidade de impacto [m/s]	Redução da velocidade [%]		
				Residual 1 [%]	Residual 2 [%]	Residual da simulação [%]
1	Central	Ti-6Al-4V	827,71	13,33	17,44	
2	Periférico	Plana 3 mm	821,40	19,77	-	-
3	Periférico	Plana 3 mm	834,95	10,45	17,82	
4	Intermediária	Ti-6Al-4V	833,57	14,41	24,79	16,38
5	Vale/Intermediária	Poliondular 3 mm	834,90	12,97	28,98	13,45
6	Pico	Poliondular 3 mm	827,50	11,07	24,13	22,39
7	Central	Ti-6Al-4V	823,56	6,45		
8	Periférico	Plana 2 mm	821,55	6,82		-
9	Periférico	Plana 2 mm	826,56	7,87	-	
10	Intermediária	Ti-6Al-4V	829,58	6,97		10,25
11	Vale	Poliondular 2 mm	827,36	6,36		8,06
12	Pico	Poliondular 2 mm	817,65	9,37	13,49	11,52

A figura 4.3.2 apresenta os disparos na placa poliondular de 3 mm de espessura. Graficamente pode-se constatar similaridades com o ocorrido no ensaio balístico. Entretanto como o comportamento do próprio ensaio balístico foi diversificado pelo fator geométrico, tem-se casos que divergem, como o disparo 6 que não apresentou fratura em pétala no ensaio.

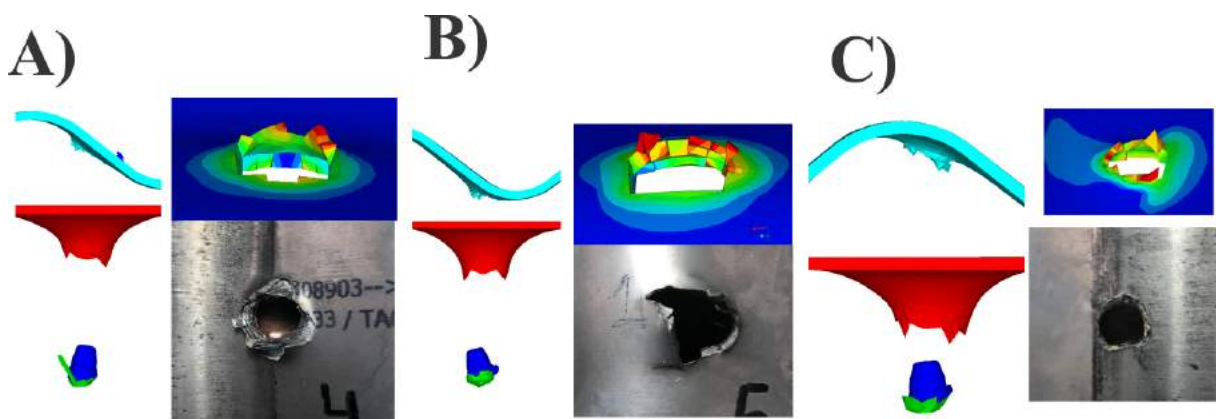


Figura 4.3.2 – A) Disparo 4; B) Disparo 5 ; C) Disparo 6.

Os dados referentes a energia total do evento estão dispostos na Tabela 4.3.9.

Tabela 4.3.9 – Simulação conforme ensaio balístico da energia total, chapas poliiondulares.

Disparo 4 - Energia Total (J)					
	Total	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	Alumínio
Inicial	3327,52	1203,01	2124,51	0,00	0,00
Final	2682,09	789,55	1415,20	156,87	320,48
Variação	-645,43	-413,46	-709,31	156,87	320,48
Disparo 5 - Energia Total (J)					
	Total	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	Alumínio
Inicial	3369,10	1216,90	2152,20	0,00	0,00
Final	2751,05	828,58	1507,39	157,10	257,98
Variação	-618,05	-388,32	-644,81	157,10	257,98
Disparo 6 - Energia Total (J)					
	Total	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	Alumínio
Inicial	3230,42	1177,12	2053,30	0,00	0,00
Final	2437,00	647,57	1146,20	270,21	373,02
Variação	-793,42	-529,55	-907,10	270,21	373,02
Disparo 10 - Energia Total (J)					
	Total	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	Alumínio
Inicial	3295,70	1191,50	2104,20	0,00	0,00
Final	2948,46	955,36	1681,40	100,17	211,53
Variação	-347,24	-236,14	-422,80	100,17	211,53
Disparo 11 - Energia Total (J)					
	Total	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	Alumínio
Inicial	3278,28	1185,22	2093,06	0,00	0,00
Final	3003,87	1021,79	1763,09	64,40	154,59
Variação	-274,41	-163,43	-329,97	64,40	154,59
Disparo 12- Energia Total (J)					
	Total	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	Alumínio
Inicial	3201,84	1157,69	2044,15	0,00	0,00
Final	2823,66	922,64	1578,39	97,21	225,42
Variação	-378,18	-235,05	-465,76	97,21	225,42

Constata-se, a partir da simulação, que o disparo 6 apresentou maior redução de energia do sistema. Está também apresentou os maiores valores de energia absorvida para placa de

Ti-6Al-4V e para a testemunha de alumínio.

Correlacionando a Tabela 4.3.9 com a 4.3.7, para a chapa poliondular de 3 mm, observa-se que se houvesse um maior número de amostras para os perfis, seria possível afirmar com maiores propriedades sobre a similaridade em decorrência da porcentagem de velocidade do projétil. Devido a mensuração de dois perfis de velocidade após o impacto, torna-se difícil avaliar o comportamento.

As hipóteses seriam adotar a velocidade residual 1, a velocidade residual 2 ou uma média destas. Para os três casos, temos que as regiões dos disparos 4 e 5 apresentaram maior eficiência se comparadas a região 6. Entretanto como os disparos 4 e 5 compreendem parcela da região intermediária, devido a desvios de mira, este resultado está de acordo com as demais simulações, evidenciando o perfil de melhor desempenho.

A figura 4.3.3 apresenta os disparos na placa poliondular de 2 mm de espessura. Observa-se similaridade gráfica. A modelagem a partir das equações de estado, modelo constitutivo e modelo de falha adotados, foi capaz de promover a fratura em pétala e a fragmentação destas pétalas durante a simulação. Observa-se na 4.3.3.(B) quinas resultantes da fratura das pétalas, sendo está similar ao ensaio balístico. Em contra partida, à princípio, o modelo não foi capaz de representar a delaminação das chapas, porém constata dano a essas regiões.

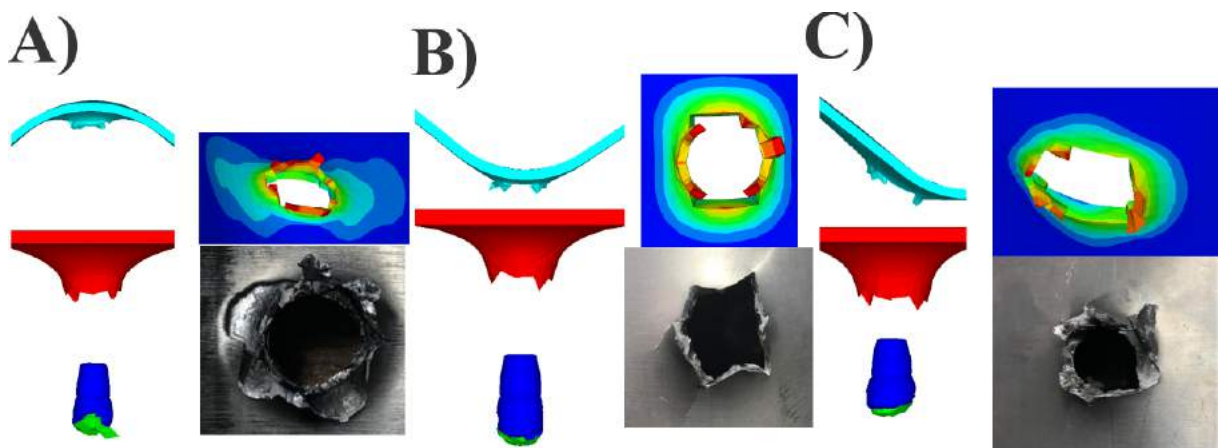


Figura 4.3.3 – A) Disparo 10; B) Disparo 11 ; C) Disparo 12.

A Figura 4.3.4 apresenta o tamanho final do projétil para os disparos simulados. O comportamento é conforme dados tabelados e discutidos neste trabalho. Pode-se correlacionar o tamanho final com a região de impacto e com os dados tabelados da energia de trabalho plástico, Tabela 4.3.10.

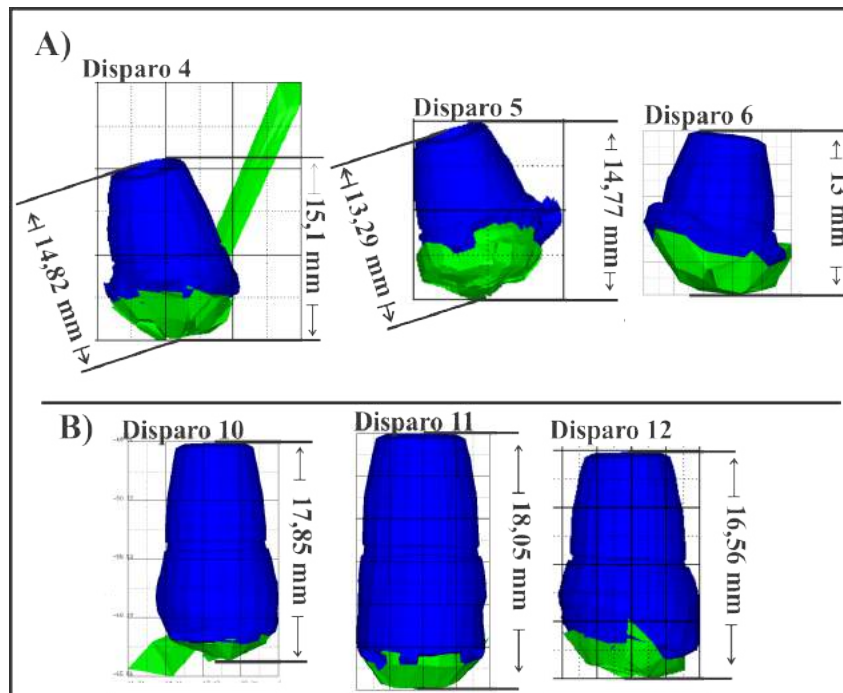


Figura 4.3.4 – Ilustração do projétil após o evento de impacto. A) Placa poliondular de 3 mm de espessura; B) Placa poliondular de 2 mm de espessura.

Analisando a Figura 4.3.4.(A) temos que o projétil apresentou maior redução de tamanho para o impacto 6, este ocorreu em região, predominantemente, de pico descendendo para o intermediário. Além disso, apura-se graficamente o tombamento do projétil nos disparos 4 e 5, que foram predominantemente impactos no perfil intermediário. Para a Figura 4.3.4.(B) não foi constatado deflexão da trajetória, relevante, após o impacto. Evidenciando que a deflexão do projétil, além da dependência do perfil poliondular, é dependente da espessura da chapa.

Tabela 4.3.10 – Simulação conforme ensaio balístico da energia de trabalho plástico, chapas poliondulares.

Energia de trabalho plástico (J)				
Disparo	Latão	Chumbo	Ti-6Al-4V	Alumínio
4	74,16	24,17	43,70	217,41
5	64,60	22,08	66,93	160,36
6	73,03	25,15	127,36	242,63
10	52,37	13,03	49,90	126,88
11	51,79	11,20	30,68	101,57
12	70,81	16,76	34,94	141,00

5 CONCLUSÃO

A caracterização do material permitiu obter parâmetros referentes a liga foco deste estudo, sendo possível arguir sobre a rota de processamento deste. A partir da difração de Raios X foram indexados os picos para o Titânio α e Titânio β e obtidos parâmetros de rede aproximados, constatando que o material de fato tratava-se da liga de Titânio α - β . O ensaio de tração, em conjunto com a microscopia ótica, reforçam a possível faixa de temperatura de recristalização.

O ensaio balístico evidenciou a variabilidade e dependência do fator geométrico no comportamento dinâmico do material. Este fator foi correlacionado com a melhoria do desempenho resultante do emprego da geometria poliondular na proteção. Através das análises de MEV, observou-se características distintas de fratura indicando variação dos mecanismos ativados. Destacando predominância do regime frágil, não obstante da ocorrência de pétalas no perfil de fratura.

A simulação dos perfis poliondulares e planos, reforçaram a análise do ensaio balístico, ressaltando a maior atenuação da velocidade residual para com o perfil poliondular. Constatou-se regiões de melhor desempenho do perfil poliondular, sendo genericamente a região intermediária à de melhor resultado. Contudo observa-se um ganho de eficiência nesta região intermediária ascendendo para o perfil de pico, resultado que se repetiu no ensaio balístico.

Relevante destacar que a partir da simulação, foram obtidos dados sobre dano, energia total e energia de trabalho plástico. Desta forma foi possível destacar, numericamente, diferenças de comportamento do sistema projétil-proteção em decorrência da variação da geometria. A análise sem a chapa testemunha, permitiu observar que a região de pico e intermediária apresentaram os melhores resultados de deformação e dano ao projétil. Enquanto o perfil de vale, apesar de seu menor desempenho, apresentou maior capacidade de absorção de energia através da deformação plástica, se comparada, à observada no perfil de pico. A análise com chapa testemunha permitiu aproximar a simulação com o ensaio balístico realizado, além de permitir avaliar o dano ao projétil ao correlacioná-lo a energia de deformação plástica das chapas testemunhas.

A comparação dos dados gerados neste trabalho com os obtidos por Cunha (2018), indicam que a liga de Titânio ASTM grau 5 apresenta menor eficiência do que o aço ABNT/AISI 4340, conforme os parâmetros utilizados nas simulações. Porém há diversas possibilidades de morfologias de grãos decorrentes de tratamentos térmicos e mecânicos, devido ao comportamento alotrópico desta liga de titânio, sendo assim, não se descarta um estudo da eficiência do Ti-6Al-4V para diferentes rotas de tratamento. Ressalta-se que a densidade da liga ABNT/AISI 4340 é entorno de 7,85 g/cm³, visto isto, o emprego de liga de titânio poderia ser justificado pois está apresenta entorno de 4,4 g/cm³, podendo gerar uma redução de peso de aproximadamente 44 %.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Torna-se evidente o poder da modelagem numérica neste tipo de análise, contudo seria interessante uma caracterização dinâmica do material da liga utilizada. A obtenção e implementação dos parâmetros dos modelos constitutivos e de falha resultariam em maior efetividade do modelo matemático, além da contribuição científica da obtenção destes parâmetros.

Análise de blindagem multi camada poliondular de 2 e 3 mm de espessura, com as placas defasadas 1/4 do período do perfil poliondular, resultando em proteções Pico-intermediária e vale-intermediária. Desta forma a deficiência observada no perfil côncavo poderia ser sanada.

Devido ao carácter alotrópico do Ti-6Al-4V torna-se interessante avaliar diferentes rotas de processamento, buscando a morfologia de melhor resultado como proteção balística.

Na perspectiva da modelagem, caso haja material disponível, seria relevante calibrar o modelo matemático a partir de problemas inversos.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. *Sumário Mineral*. Brasília, 2017. ISSN 0101 2053.
- ANSYS. *ANSYS Theory Reference*. Canonsburg, 1999.
- ANSYS. *EXPLICIT DYNAMICS THEORY GUIDE*. [S.l.], 2020.
- ANSYS. *MATERIALS PROPERTIES*. [S.l.], 2020.
- ASM. *ASM HandBook Vol. 2*. 10. ed. [S.l.]: ASM, 1990. ISBN 0-87170-378-5.
- ASM. *ASM HandBook vol. 9*. 9. ed. [S.l.]: ASM, 1998.
- ASM. *Titanium Physical Metallurgy Processing and Applications*. Ohio: [s.n.], 2015.
- ASTM. *Standard Specification for Unalloyed Titanium, for Surgical Implant Applications*. [S.l.], 2017.
- ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus: Blindagens para impactos balísticos - classificação e critérios de avaliação*. [S.l.], 2010.
- ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Methods for Tension Testing Of Metallic Materials*. [S.l.], 2015.
- BATHE, K. J. *Finite Elements Procedure*. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- BOARDMAN, J.; GRIFFIN, J.; OSWYN, M. *The Oxford illustrated History of Greece and the Hellenistic World*. Oxônia: Oxford University Press, 2001.
- BRIDIER, F.; VILLECHAISE, P.; MENDEZ, J. Analysis of the different slip systems activated by tension in a $\alpha - \beta$ titanium alloy in relation with local crystallographic orientation: doi: 10.1016/j.actamat.2004.09.040. *ACTA Materialia*, v. 53, p. 555–567, 2004.
- COURANT, R.; FRIEDRICHS, K.; LEWYT, H. On the partial difference equations of bmathematical physics. In: *IBM Journal of Research and Development*. [S.l.: s.n.], 1967.
- CUNHA, D. F.; GOMES, A. V.; BASSI, A. A.; BRANDÃO, L. P. M. Estudo do comportamento dinâmico de blindagem poli ondular em proteção balística. In: *ABM WEEK*. São Paulo: [s.n.], 2018.
- CUNHA, D. F. da. *COMPORTAMENTO DINÂMICO DE PLACAS METÁLICAS POLIIONDULARES E SUA APLICAÇÃO EM BLINDAGENS BALÍSTICAS*. Mestrado Ciência dos Materiais — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<http://aquarius.ime.eb.br/~debiasi/dissertacao%20Daniel.pdf>>.
- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). *Failure Modeling Titanium 6Al-4V and Aluminum 2024-T3 With the Johnson-Cook Material Model*: U.s. departament of transportation. Springfield, 2003.

GOMES, A. V. *Comportamento Balístico de Alumina com Adição de Nióbia e Variação da Geometria do Alvo*. Mestrado em Ciência dos Materiais — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2004.

GONÇALVES, D. P. *Análise e investigação de Impactos em Blindagem Mista Cerâmica/Metal*. Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2000.

HIEMAIER, S. J. *Structures Under Crash and Impact - Continuum Mechanics, Discretization and Experimental Characterization*. New York: Springer, 2008.

INSTITUTO DE SEGURANÇA PÚBLICA. *Segurança Pública em Números*. Rio de Janeiro, 2020.

JOHNSON, G. R.; COOK, W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In: *Proceedings of the 7th International Symposium On Ballistics*. [S.l.: s.n.], 1983.

LOPES Éder S. N. *Correlação entre transformações de fase e comportamento mecânico de ligas Ti-Nb-Sn e sua aplicação na concepção de implantes ortopédicos com propriedades otimizadas*. Mestrado Engenharia Mecânica — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

LUMINY. *Ballistic Measurements LTD. Ballistic Measurements*. 2020. 15 nov. de 2020. Disponível em: <<http://www.ballisticmeasurements.com/epvat-receiver-unit.php>>.

MEYERS, M. A. A mechanism for dislocation generation in shock-wave deformations. In: *METALLURGICA*. Rapid: [s.n.], 1978. p. 21–26.

MEYERS, M. A. *Dynamic Behavior Of Materials*. San Diego: John Wiley & Sons, 1994.

MOHOTTI, D.; NGO, T.; MENDIS, P. Numerical simulation of impact and penetration of ogival shaped projectiles through steel plate. In: *International Conference on 'Structural Engineering Construction and Management*. [S.l.: s.n.], 2011.

MURUGESAN, M.; JUNG, D. W. Johnson cook material and failure model parameters estimation of aisi-1045 medium carbon steel for metal forming applications. In: *MDPI - Journal Materials*. [S.l.: s.n.], 2019.

NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION. *NATO STANDARD AOP-2310*: Technical performance specification providing for the interchangeability of 7.62 mm x 51 ammunition and links. [S.l.], 2020. Nato Standardization Office (NSO).

ROSENBERG, Z.; DEKEL, E. *Terminal Ballistics*. New York: Springer, 2012.

SANTOS, J. L. D. *Simulação de Ensaio Balístico DOP*. Mestrado em Ciência dos Materiais — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

SARKAR, A.; ROY, S.; SUWAS, S. X-ray diffraction line profile analysis of deformation microstructure in boron modified ti-6al-4v alloy. *Materials Characterization*, 2010.

SERRA, A.; BACON, D. J.; POND, R. C. Twins as barriers to basal slip in hexagonal-closed-packed metals. *Metall. Mater. Trans*, v. 33, p. 809–812, 2002.

TORRES, M. F. C. *Simulação do Desempenho Balístico de Blindagem Mista Cerâmica/Compósito*. Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.

TSE, K. M.; BIN, T. L.; YANG, B.; TAN, V. B. C.; LEE, H. Effect of helmet liner systems and impact directions on severity of head injuries sustained in ballistic impacts: a finite element (fe) study. In: *Medical & Biological Engineering & Computing*. [S.l.: s.n.], 2016.