

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

JHEISON LOPES DOS SANTOS

SIMULAÇÃO DE ENSAIO BALÍSTICO DOP

Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Ciência dos Materiais.

Orientadores:

Ten Cel Eduardo de **Sousa Lima** – D.C.

Maj André Luís de V. **Cardoso** – D.C.

Rio de Janeiro

2012

C2012

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 autor e dos orientadores.

620.187 Santos, Jheison Lopes dos Santos
S237s Simulação de Ensaio Balístico DOP / Jheison Lopes dos Santos – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2012.

105 p.: il.

Dissertação: (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia
– Rio de Janeiro, 2012

1. Engenharia de Ciência dos Materiais. 2. DOP 3. Liga de Alumínio. 4. Simulação I. Lima, Eduardo de Sousa. II. Cardoso, André Luís de Vasconcelos. III. Título. IV. Instituto Militar de Engenharia.

CDD 620.187

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

JHEISON LOPES DOS SANTOS

SIMULAÇÃO DE ENSAIO BALÍSTICO DOP

Dissertação de Mestrado 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 Ciências em Ciência dos Materiais.

Orientadores: TC Eduardo de Sousa Lima – D.C.

Maj André Luís de Vasconcelos Cardoso – D.C.

Aprovada em 18 de dezembro pela seguinte Banca Examinadora:

Ten Cel Eduardo de Sousa Lima – D.C., do IME – Presidente

Maj André Luís de Vasconcelos Cardoso – D.C., do CTEEx

Prof. Luis Henrique Leme Louro – Ph.D., do IME

Ten Cel Paulo Roberto Rocha Aguiar – D.C., do CTEEx

Rio de Janeiro

2012

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me dado força, paciência e perseverança para que este sonho se realizasse.

Minha família, minha base, pelo suporte, ânimo e apoio a mim cedidos. Sempre acreditando em mim. Obrigado por tudo! Amo vocês!

Aos meus amigos mais antigos, em especial Lyon, Renato, Rodrigo, Hebert, Patrícia, Cássio, Cláudio, Tia Rose, Diogo.

Aos eternos ruralinos Bruno, Thiago, Jeffinho, Juliana, Raphael, Karen, Anelise, Daniele, Rosilane, Livia, Karine, Carolina e Juninho. Nunca esquecerei nossa união e carinho!

Aos amigos mais recentes, em especial Carolina, Wellington, Vinícius, Cris, Wallace, Bruno Tavares, Nanny, Lu, Mariana, Juan e Elias, por também terem sido alvos dos meus desabafos quanto à dissertação.

Aos amigos de IME Suzana, Aquino, Bruno Jaccoud, Roosevelt, Verônica, Fábio, Bruna, por todas as conversas motivadoras. Foram fundamentais para mim!

Aos meus alunos/amigos do Pré-Vestibular Comunitário São José e do Preparatório Garra, pelo apoio que sempre me deram!

Aos meus professores orientadores Eduardo de Sousa Lima e André Luís de Vasconcelos Cardoso, pelas correções, sugestões e pelo conhecimento passado.

Aos demais professores do curso de Ciência de Materiais do IME, pelos conhecimentos e ensinamentos passados.

Aos funcionários do IME, mais precisamente ao Major Evandro, Anderson, Joel, Leonardo e Carlos Roberto, por todo o auxílio.

Aos demais integrantes do GEB (Grupo de Estudos Balísticos), Tenente Coronel Aguiar e, principalmente, ao Major Guimarães, pelo incansável empenho e determinação na resolução dos problemas surgidos ao longo do trabalho.

Ao Luiz Lima, da ESSS (Engineering Simulation and Scientific Software), por toda a paciência, presteza e empenho no suporte a esta dissertação.

Aos alunos de graduação de Tema Dirigido, Ana Cecília, Isabelle Queiroz e Douglas Paula, e a aluna de PIBITI (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação) Cláudia Schwerz pelas colaborações com suas respectivas pesquisas.

Ao CAEx (Centro de Avaliações do Exército, em especial ao Major Malizia, por toda a boa vontade e disponibilidade na realização dos ensaios balísticos.

Ao AGR (Arsenal de Guerra do Rio de Janeiro), principalmente ao Capitão Quintino, Capitão Vander, aos Tenentes André e Plácido, aos 3^{os} Sargentos Braga e Assis, pelo suporte nos cortes dos tarugos.

Ao CBPF (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas), em especial ao Rodrigo, pelos cortes e usinagens nas peças de alumínio.

À CAPES (Coordenação de Apoio à Pessoal de Ensino Superior), pelo suporte financeiro deste projeto.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES | 9 |
| LISTA DE TABELAS..... | 13 |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS | 14 |
| LISTA DE SIGLAS..... | 17 |
| | |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 20 |
| | |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 22 |
| 2.1 A liga 6351 T6..... | 22 |
| 2.2 Modelagem do comportamento dinâmico | 24 |
| 2.2.1 Equações de conservação e de estado | 25 |
| 2.2.2 Método de elementos finitos | 29 |
| 2.2.3 Métodos de discretização | 31 |
| 2.2.3.1 Método de Lagrange | 31 |
| 2.2.3.2 Método de Euler..... | 31 |
| 2.2.3.3 ALE (Arbitrary Lagrange Euler)..... | 33 |
| 2.2.3.4 Meshfree Lagrangian Method – SPH (Smooth Particles Hydrodynamics) ... | 33 |
| 2.2.4 Método das diferenças finitas | 34 |
| 2.3 Utilização de <i>softwares</i> de simulação | 34 |
| 2.4 Ensaio DOP | 36 |
| 2.5 Barra Hopkinson | 36 |
| | |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 39 |
| 3.1 Aspectos gerais | 39 |
| 3.2 Material utilizado | 39 |
| 3.3 Preparação dos tarugos..... | 40 |
| 3.4 Ensaio DOP | 41 |
| 3.4.1 Testes balísticos nos alvos com 100 mm de altura..... | 41 |
| 3.4.2 Teste balístico nos alvos com 50 mm de altura | 45 |
| 3.5 Ensaio na Barra Hopkinson | 46 |
| 3.6 Verificação da profundidade de penetração..... | 47 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.7 | Caracterização estrutural | 48 |
| 3.8 | AUTODYN | 50 |
| 3.9 | Modelagem do ensaio balístico..... | 51 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 55 |
| 4.1 | Aspectos gerais | 55 |
| 4.2 | Velocidades de impacto obtidas pelo ensaio DOP | 56 |
| 4.3 | Medida da profundidade de penetração | 56 |
| 4.4 | Resultados do ensaio em barra hopkinson..... | 61 |
| 4.5 | Análise estrutural | 62 |
| 4.6 | Análise da penetração no alvo..... | 70 |
| 4.7 | Análise das simulações preliminares | 72 |
| 4.7.1 | Etapa 1..... | 72 |
| 4.7.2 | Etapa 2..... | 74 |
| 4.7.3 | Etapa 3..... | 74 |
| 4.8 | Simulações avançadas | 76 |
| 5. | CONCLUSÕES..... | 83 |
| 6. | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 85 |
| 7. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 86 |
| 8. | APÊNDICES | 91 |
| 8.1 | APÊNDICE 1: GRÁFICOS DA ENERGIA CINÉTICA | 92 |
| 8.2 | APÊNDICE 2: GRÁFICOS DA ENERGIA TOTAL | 94 |
| 8.3 | APÊNDICE 3: GRÁFICOS DA ENERGIA | 96 |
| 9. | Anexos..... | 98 |
| 9.1 | ANEXO 1: PROPRIEDADES DE ENTRADA DO ALVO (AA 6351 T6)..... | 99 |
| 9.2 | ANEXO 2: PROPRIEDADES DE ENTRADA DO NÚCLEO PERFURANTE (SAE/AISI 4340). | 101 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 9.3 | ANEXO 3: PROPRIEDADES DE ENTRADA DA BASE DE CHUMBO (LEAD)..... | 103 |
| 9.4 | ANEXO 4: PROPRIEDADES DE ENTRADA DA JAQUETA DO PROJÉTIL (CART BRASS). | 104 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | |
|-----------|--|----|
| FIG. 2.1 | Diagrama de Fases pseudo-binário da ligas Alumínio-Magnésio-Silício (SOARES, 2009). | 23 |
| FIG. 2.2 | Diagrama de Fases das ligas Alumínio-Magnésio-Silício (BUENO, 2010). | 23 |
| FIG. 2.3 | Esquemática da propagação de região chocada devido a um pistão se movendo em um cilindro e interagindo com fluido compressível, em um momento (a) antes do choque, (b) após um instante t_1 e (c) após um instante $t_2 > t_1$ (adaptado de MEYERS, 1994). | 25 |
| FIG. 2.4 | Hugoniot de Choque para o alvo de liga de alumínio 6061 T6 e a ponta de latão do projétil. | 29 |
| FIG. 2.5 | Elementos finitos, faces e nós (ANSYS AUTODYN USER'S MANUAL, 2010). | 30 |
| FIG. 2.6 | Malha pelo método de Lagrange (a) não deformada e (b) deformada (SANTOS, 2009)..... | 31 |
| FIG. 2.7 | Malha pelo método de Euler (a) material não deformado e (b) deformado (SANTOS, 2009)..... | 32 |
| FIG. 2.8 | Simulação do Ensaio de Taylor com malha pelo método ALE. (a) Impacto de uma barra de metal em uma parede, com a solução de impacto (b) pelo método de Lagrange e (c) pelo método ALE (SANTOS, 2009). | 33 |
| FIG. 2.9 | Malha pelo método SPH (a) não deformada e (b) deformada (SANTOS, 2009). | 34 |
| FIG. 2.10 | Esquema experimental da Barra Hopkinson (SKAF, 2012)..... | 38 |
| FIG. 3.1 | Esquema do projétil Pf (adaptado de AMORIM JÚNIOR, 2007)..... | 40 |
| FIG. 3.2 | (a) Adição de pólvora nos cartuchos; (b) Polvorímetro (Hornady); (c) Balança semi-analítica BK600 (GEHAKA); (d) Prensa de carregamento Lock-N-Load® Classic™ (Hornady)..... | 43 |
| FIG. 3.3 | Esquema do Ensaio DOP (adaptado de NBR 15000, 2005). | 43 |
| FIG. 3.4 | Dispositivo de disparo B290 Ammunition Test Gun (HPI – High Pressure Instrumentation)..... | 44 |

| | | |
|-----------|--|----|
| FIG. 3.5 | Barreira óptica B471 Precision Light Screen (HPI – High Pressure Instrumentation) com o registrador de tempo, a pequena caixa localizada na parte inferior da barreira. | 44 |
| FIG. 3.6 | Fixação dos tarugos. | 45 |
| FIG. 3.7 | Barra Hopkinson utilizada, localizada no CTEEx (SKAF, 2012)..... | 46 |
| FIG. 3.8 | Corpos de prova utilizados na Barra Hopkinson..... | 47 |
| FIG. 3.9 | Máquina de serra de fita horizontal semiautomática Starret St – 4002 utilizada no AGR para realização dos cortes. | 48 |
| FIG. 3.10 | Formação semelhante à pétala na face impactada do alvo..... | 49 |
| FIG. 3.11 | Trajetória do projétil no interior do alvo..... | 50 |
| FIG. 4.1 | Gráfico da velocidade X profundidade de penetração a partir da base do projétil. | 57 |
| FIG. 4.2 | Visualização da ponta perfurante de aço após os cortes. | 58 |
| FIG. 4.3 | Gráfico da velocidade X profundidade de penetração nos alvos de 100 mm..... | 59 |
| FIG. 4.4 | Gráfico da velocidade X profundidade de penetração nos alvos de 50 mm. | 60 |
| FIG. 4.5 | Gráfico comparativo do desempenho balístico dos alvos de diferentes espessuras. | 61 |
| FIG. 4.6 | Formação semelhante à pétala na face impactada | 62 |
| FIG. 4.7 | Imagem obtida por meio de um estereoscópio da amostra seccionada do Alvo 1: (a) Região 1; (b) Região 2; (c) Região 3; (d) Região 4; (e) Região 5; e (f) Região 6. Aumento de 1,6x. | 63 |
| FIG. 4.8 | MEV da Região 1, onde apresentou intensa deformação plástica. Aumento de 1300x..... | 63 |
| FIG. 4.9 | (a) Região 4: presença de ranhuras. Aumento de 75x. (b) Aumento de 2000x da região central, detalhando algumas ranhuras. (c) Região 3: presença de ranhuras semelhantes às da região 4. Aumento de 75x. (d) Aumento de 2000x da região central, apresentando a aparência de líquido resfriado e a presença de trincas..... | 64 |
| FIG. 4.10 | Aumento de 5000x da região central da FIG. 4.9(d), onde pode-se perceber a existência de uma trinca. | 65 |

| | | |
|-----------|---|----|
| FIG. 4.11 | Imagem MEV da Região 5. Presença de ranhuras causadas pelo atrito do projétil com a superfície do metal e possivelmente de bandas de cisalhamento. Aumento de 75x..... | 66 |
| FIG. 4.12 | Visualização por meio de um estereoscópio da amostra seccionada do Alvo 2. (a) Região 1; (b) Região 2; (c) Região 3; (d) Região 4. Aumento de 1,6x..... | 66 |
| FIG. 4.13 | Região 1 da amostra 2: (a) Aumento de 75x; (b) Região destacada com aumento de 1000x. | 67 |
| FIG. 4.14 | Imagem obtida por meio de um estereoscópio da amostra seccionada do Alvo 4: (a) Região 1; (b) Região 2; (c) Região 3; e (d) Região 4. Aumento de 1,6x..... | 68 |
| FIG. 4.15 | (a) Região 1, com aumento de 75x. É possível perceber uma fissura, indicada pelas setas. (b) Aumento da região central de 2000x, detalhando uma parte da fissura. É possível perceber grande oxidação na peça. | 68 |
| FIG. 4.16 | Região 3. (a) Uma trinca é apontada pelas setas. Aumento de 75x. (b) Aumento de 2000x em uma das trincas, onde fica visível a bifurcação característica das fraturas dinâmicas. | 69 |
| FIG. 4.17 | (a) Aumento de 75x da Região 4. (b) Aumento de 2000x em uma das ranhuras..... | 69 |
| FIG. 4.18 | Regimes de Penetração do projétil no alvo de alumínio..... | 70 |
| FIG. 4.19 | Jaqueta do projétil após penetração no alvo. | 71 |
| FIG. 4.20 | Trajectoria do projétil no alvo..... | 72 |
| FIG. 4.21 | (a) O projétil modelado e (b) Estágio inicial da simulação. | 73 |
| FIG. 4.22 | Momento em que a simulação é interrompida pelo erro quanto à incerteza da energia no alvo com poucos elementos em (a) um alto ciclo e (b) baixo ciclo | 73 |
| FIG. 4.23 | Momentos da simulação com alvo composto por 255.000 de elementos na etapa 2; (a) estágio inicial e (b) estágio final..... | 74 |
| FIG. 4.24 | Penetração máxima com velocidade inicial de 791,10 m/s..... | 75 |
| FIG. 4.25 | Penetração máxima com velocidade inicial de 887,55 m/s..... | 75 |
| FIG. 4.26 | Modelagem mais refinada do alvo e do projétil..... | 77 |
| FIG. 4.27 | Penetração máxima no teste da nova modelagem. | 78 |
| FIG. 4.28 | Inclinação na trajetória do projétil indicada pela simulação. | 79 |

| | | |
|-----------|--|----|
| FIG. 4.29 | Comparação entre a trajetória da penetração (a) no ensaio real e (b) na simulação..... | 80 |
| FIG. 4.30 | Projétil penetrando com velocidade constante dentro do alvo..... | 81 |
| FIG. 4.31 | Gráfico comparativo entre as profundidades de penetração obtidas pelo ensaio real e pela simulação. | 82 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|---|----|
| TAB. 2.1 | Propriedades das ligas de Alumínio 6351 T6, 6061 T6, 6063 T6 e 6070 T6 | 24 |
| TAB. 3.1 | Nível de proteção do sistema de blindagem quanto ao impacto balístico (ABNT NBR 15000, 2005) | 41 |
| TAB. 3.2 | Nível de proteção alternativa de sistema de blindagem quanto ao impacto balístico (ABNT NBR 15000, 2005) | 42 |
| TAB. 4.1 | Dosagens de pólvora e suas respectivas velocidades no ensaio com tarugos de 100 mm. | 56 |
| TAB. 4.2 | Dosagens de pólvora e suas respectivas velocidades no ensaio com tarugos de 50 mm. | 56 |
| TAB. 4.3 | Penetração a partir da base do projétil. | 57 |
| TAB. 4.4 | Penetração nos tarugos de 100 mm de espessura obtida pelo ensaio DOP. | 59 |
| TAB. 4.5 | Penetração nos tarugos de 50 mm de espessura obtida pelo ensaio DOP. | 60 |
| TAB. 4.6 | Penetração nos tarugos de 100 mm de espessura obtida pela simulação. | 80 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

T6 – Tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial

SÍMBOLOS

| | | |
|--|---|---|
| m/s | – | metros por segundo |
| m | – | metro |
| mm | – | milímetro |
| ms | – | milissegundo |
| °C | – | graus Celsius |
| K | – | graus Kelvin |
| ρ_0 | – | massa específica inicial |
| ρ | – | massa específica final |
| U_s | – | velocidade da onda de choque |
| U_p | – | velocidade da partícula |
| P | – | pressão final |
| P_0 | – | pressão inicial |
| E | – | energia final |
| E_0 | – | energia inicial |
| V | – | volume final |
| V_0 | – | volume inicial |
| C_0 | – | velocidade do som no material à pressão 0 |
| S | – | parâmetro empírico do material |
| P_{0K} | – | pressão à 0 K |
| E_{0K} | – | energia à 0 K |
| γ | – | coeficiente de Grüneisen |
| $\left(\frac{D}{Dt}\right)_L$ | – | contribuição do método de Lagrange |
| $\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)_E$ | – | contribuição do método de Euler |
| \vec{V} | – | vetor velocidade |

| | | |
|--|---|---|
| \emptyset | – | grandeza em análise |
| V | – | Volts |
| σ | – | tensão hidrostática; e |
| τ | – | tensão cisalhante |
| A | – | tensão de escoamento |
| B | – | constante de encruamento |
| ϵ_p | – | deformação plástica equivalente |
| n | – | expoente de encruamento |
| C | – | constante da taxa de deformação |
| $\dot{\epsilon}_p^*, \dot{\epsilon}^*$ | – | taxa de deformação plástica adimensional $\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ para $\dot{\epsilon}_0 = 1,0 \text{ s}^{-1}$ |
| T_H, T^* | – | temperatura homóloga |
| m | – | expoente de amolecimento térmico |
| Y | – | tensão de escoamento |
| Y_0 | – | tensão de escoamento inicial |
| Y'_P | – | derivada $\frac{dY}{dP}$ |
| P | – | pressão |
| η | – | compressão (razão entre volume específico inicial e o volume específico) |
| G'_T | – | derivada $\frac{dG}{dT}$, sendo G o módulo de cisalhamento |
| G_0 | – | módulo de cisalhamento inicial |
| T | – | temperatura, em graus Kelvin |
| T_{room} | – | temperatura do ambiente do ensaio |
| T_{melt} | – | temperatura de fusão |
| B | – | coeficiente de endurecimento |
| ϵ | – | deformação plástica |
| n | – | expoente de endurecimento |
| ϵ^f | – | deformação de falha |
| D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 | – | constantes de dano do material |
| σ^* | – | razão entre a pressão P e a tensão de escoamento σ_Y |
| $E_{proj\acute{e}til}$ | – | energia do projétil |
| m_{Al} | – | massa fundida da liga |

| | | |
|------------|---|---|
| c_{Al} | – | calor específico da liga |
| ΔT | – | variação de temperatura |
| L_f^{Al} | – | calor latente de fusão da liga |
| d | – | diâmetro do projétil |
| p | – | comprimento da perfuração no tarugo |
| α | – | coeficiente de expansão térmica |
| c_V | – | calor específico à volume constante |
| K | – | compressibilidade isotérmica |
| ν | – | frequência vibracional da rede cristalina |
| dt | – | passo de integração (“timestep”) |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|---------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| NBR | Norma Brasileira |
| MIL-STD | “Military Standard” |
| IME | Instituto Militar de Engenharia |
| DOP | “Depth of Penetration” (Profundidade de Penetração) |
| CFC | Estrutura cristalina cúbica de face centrada |
| ASM | “American Society for Materials” |
| PIBITI | Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação |
| AA | “Aluminum Association”/“Aluminum Alloy” |
| AP | “Armor Piercing” |
| Pf | Perfurante |
| GEB | Grupo de Estudos Balísticos |
| CAEx | Centro de Avaliações do Exército |
| CBPF | Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas |
| MEV | Microscópio Eletrônico de Varredura |
| AGR | Arsenal de Guerra do Rio de Janeiro |
| SAE | “Society of Automotive Engineers” |
| AIISI | “American Institute of Steel Industries” |
| EOS | “Equation Of State” |
| CBC | Companhia Brasileira de Cartuchos |

RESUMO

Esta dissertação teve o propósito de simular o impacto do projétil 7,62 mm Pf em um alvo da liga de alumínio 6351 T6 com 100 mm e 50 mm de espessura, mediante o emprego do *software* AUTODYN[®], um código computacional de elementos finitos com integração explícita da empresa ANSYS. Seus resultados foram comparados com o ensaio real DOP (“Depth of Penetration” – Profundidade de Penetração) de acordo com as normas ABNT NBR 15000 – Blindagens para impactos balísticos – Classificação e critérios de avaliação e MIL-STD-376 – *Ballistic Performance Ranking of Ceramic Armor Plates Against High Density Penetrators* adaptadas. Os resultados das simulações e dos ensaios reais foram compatíveis. As velocidades de impacto variaram de 791,10 m/s a 887,55 m/s, resultando em penetrações reais entre 27,85 mm e 49,50 mm, e em penetrações simuladas computacionalmente entre 37,70 mm e 46,65 mm.

Foi estudada, ainda, a trajetória do projétil no interior do alvo, uma vez que desvios consideráveis da mesma foram observados e devidamente explicados.

Além disso, a macro e microestrutura dos alvos na região da trajetória do projétil foram analisadas. Foram verificados modos distintos de fratura, entre eles trincas bifurcadas e, possivelmente, já que intensas oxidações de algumas amostras prejudicaram a análise, bandas de cisalhamento. Percebeu-se, inclusive, que a energia envolvida no processo foi suficiente para fundir parte da liga de alumínio.

ABSTRACT

This dissertation had the purpose of simulating the impact of the 7.62 mm AP projectile on a target of aluminum alloy 6351 T6 with 100 mm and 50 mm thickness, by using the software AUTODYN[®], a finite element code with explicit integration of ANSYS Company. The simulation results were compared with those of the real test DOP (Depth of Penetration) according to ABNT NBR 15000 – Shields for ballistic impacts – Classification and evaluation criteria, and MIL-STD-376 – Ballistic Performance Ranking of Ceramic Plates Armor Against High Density Penetrators adapted. The obtained results of the simulations and real tests were compatible. The impact velocities varied 791.10 m/s from 887.55 m/s. It results in a penetration between 27.85 mm and 49.50 mm, while the computationally simulated penetrations were between 37.70 mm and 46.65 mm.

The projectile trajectory in the target was also studied, since considerable deviations inner were observed and properly explained.

Furthermore, the macro and microstructure of the targets in the region of the trajectory of the projectile were analyzed. It was verified distinct modes of fracture, including bifurcated cracks and, possibly, shear bands although the intense observed oxidation made it difficult to analyze the samples. It was also noticed, also, that the amount of energy involved in the process was enough to partially melt the aluminum alloy.

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, o mundo presenciou uma grande ascensão tecnológica, acompanhada da busca pelos melhores resultados mediante baixo custo e menor tempo de pesquisa. Assim, a utilização de *softwares* de simulação tem aumentado, pois antecipam alguns resultados importantes antes mesmo de um dado material ser fabricado, como no caso de simulações de impactos balísticos para avaliação de blindagens.

A simulação do comportamento mecânico de materiais metálicos no programa ANSYS é uma atividade corriqueira. Apesar disso, a atividade de simulação de testes balísticos ainda é incipiente no país e, em particular, no Instituto Militar de Engenharia (IME). Nela há uma otimização de custo de avaliação e tempo, já que seria possível uma pré-avaliação dos materiais e dos sistemas de proteção.

O material alvo de estudo nesta dissertação é a liga de alumínio 6351 T6, utilizada estruturalmente, principalmente em carrocerias de ônibus e de furgões, equipamentos rodoviários e veículos em geral, construção civil, fachadas e embarcações, dentre outras aplicações (DELBONI, 2007). Contudo, não se encontram na literatura dados sobre simulação ou ensaios balísticos para essa liga, nem a submissão da mesma a impactos de média e alta taxas de carregamento. Tais fatores, aliados à incipiência de simulação de ensaios balísticos apontada anteriormente, motivaram a realização deste estudo, o que ressalta o ineditismo do mesmo.

O objetivo principal deste estudo é a simulação do ensaio balístico DOP, o que leva a objetivos intermediários, tais como a realização do ensaio em Barra Hopkinson da liga em questão, a análise da trajetória de penetração do projétil no alvo, bem como a caracterização estrutural dos alvos balísticos.

Essa liga será usada como material de apoio para placas cerâmicas empregadas como elemento de blindagem balística em trabalhos posteriores do Grupo de Estudos Balísticos (GEB), parceria entre o Instituto Militar de Engenharia, o Centro Tecnológico do Exército (CTEx) e a *Engineering Simulation and Scientific Software* (ESSS).

O uso de códigos computacionais voltados para a simulação na etapa pré-testes e testes possui aspectos favoráveis, além de ser algo inovador para o Instituto.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a liga de alumínio estudada, a modelagem do comportamento dinâmico, a utilização de *softwares* de simulação, e os ensaios DOP e em Barra Hopkinson.

No capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados, dentre eles a descrição do material utilizado, dos testes balísticos e do ensaio em Barra Hopkinson, além da metodologia adotada para verificação da profundidade de penetração, análise estrutural e o programa utilizado, bem como a modelagem desenvolvida.

Os resultados e discussões da medida da profundidade de penetração, das análises estruturais, da penetração no alvo e das simulações realizadas são apresentados no capítulo 4.

O capítulo 5 traz as conclusões obtidas com o estudo realizado nesta dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A LIGA 6351 T6

Os materiais metálicos possuem um amplo uso em aplicações estruturais por serem bastante resistentes e deformáveis. Atualmente, dois metais têm se destacado em relação à sua utilização: em primeiro lugar vem o aço, e em segundo lugar, o alumínio (SCHAEFFER, 2006).

O alumínio, material metálico de estrutura cristalina CFC, com densidade relativamente baixa, mantém sua ductilidade até mesmo em temperaturas criogênicas. Suas propriedades fazem com que ele e suas ligas sejam a escolha mais econômica e atraente para uma ampla variedade de usos (ASM HANDBOOK, 1992, BUZINELLI, 2008).

A utilização do alumínio tem aumentado, bem como o uso de ligas com outros metais de baixa densidade, como o magnésio (COUTO, 2008). Quando ligado ao magnésio e ao silício, formando ligas da série 6XXX, o alumínio, em equilíbrio na temperatura ambiente, forma duas fases, sendo uma delas uma solução sólida de alumínio α e outra um composto intermetálico Mg_2Si (COUTO, 2008). Como parte da nomenclatura da liga, indicando o tratamento realizado, existe uma letra atribuída a este e, dependendo do tratamento utilizado, um número.

No caso da liga utilizada neste trabalho, 6351 indica que se trata de uma liga composta de alumínio, silício, magnésio, ferro e cobre, enquanto T6 significa que o material sofreu solubilização e endurecimento por envelhecimento (ASM HANDBOOK, 1992) As FIG. 2.1 e 2.2 ilustram, respectivamente, o diagrama de fases pseudo-binário e ternário da liga Al-Mg-Si.

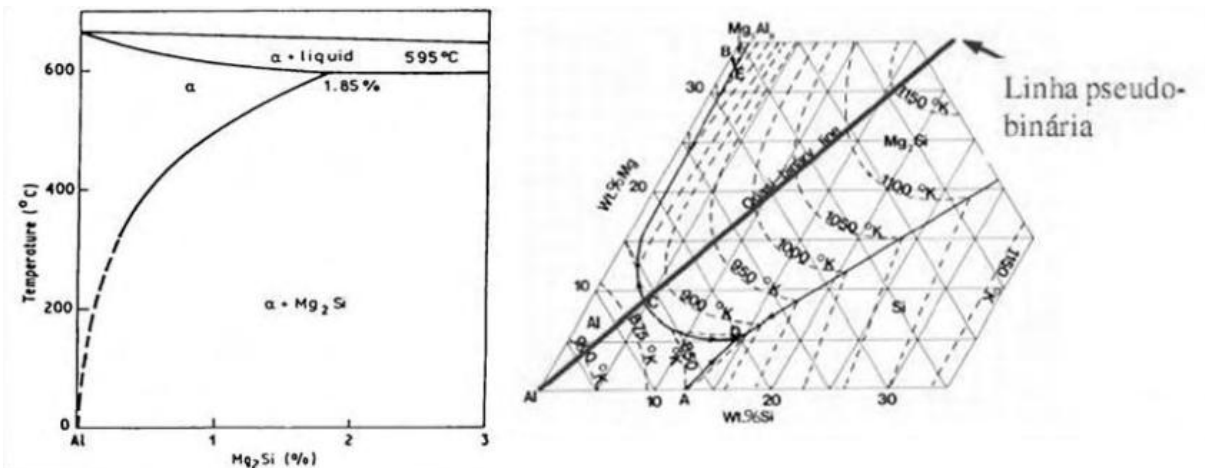


FIG. 2.1 Diagrama de Fases pseudo-binário da ligas Alumínio-Magnésio-Silício (SOARES, 2009).

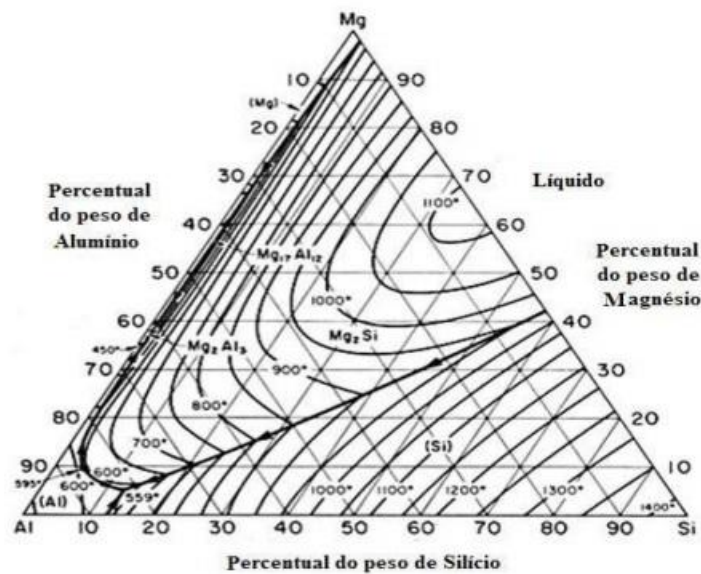


FIG. 2.2 Diagrama de Fases das ligas Alumínio-Magnésio-Silício (BUENO, 2010).

Ligas com propriedades semelhantes, como a 6061 e 7018, são utilizadas em ensaios balísticos (GOMES, 2004). A literatura se torna escassa no que se refere à análise desta liga quando sujeita a impactos de médias e altas taxas de carregamento (BUZINELLI, 2008). Para analisar seu comportamento quando submetido a impactos de média e alta taxa de carregamento, pode-se realizar o teste DOP, bem como o ensaio na Barra Hopkinson. A TAB. 2.1 apresenta algumas das propriedades dessa liga em comparação com três ligas pertencentes à mesma série: 6061 T6, 6063 T6 e 6070 T6.

TAB. 2.1 Propriedades das ligas de Alumínio 6351 T6, 6061 T6, 6063 T6 e 6070 T6

| Propriedade | 6351 T6 | 6061 T6 | 6063 T6 | 6070 T6 |
|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------|
| Densidade | 2,71 g/cm ³ | 2,70 g/cm ³ | 2,70 g/cm ³ | 2,71 |
| Dureza Brinnell | 95 HB | 95 HB | 73 HB | 120 HB |
| Resistência à tração | 310 MPa | 310 MPa | 241 MPa | 379 MPa |
| Resistência ao Escoamento | 285 MPa | 276 MPa | 214 MPa | 352 MPa |
| Módulo de Elasticidade | 68,9 GPa | 68,9 GPa | 68,3 GPa | 68,9 GPa |
| Coefficiente de Poisson | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 |
| Módulo de Cisalhamento | 26,0 GPa | 26,0 GPa | 25,8 GPa | 26,0 GPa |
| Condutividade térmica (RT) | 176 (W/m.K) | 167 (W/m.K) | 193 (W/m.K) | 172 (W/m.K) |
| Solidus | 554 °C | 582 °C | 615 °C | 566 °C |
| Liquidus | 649 °C | 651,7 °C | 655 °C | 649 °C |

Fonte: (ASM METALS HANDBOOK, 1992, <http://www.matweb.com>)

2.2 MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DINÂMICO

O impacto de um projétil em um alvo pode gerar ondas de choque que são caracterizadas por apresentarem uma frente de onda íngreme. Nesse caso, não se considera o fluxo de matéria do alvo para a lateral, o que resulta em componentes hidrostáticas das tensões com valores muito maiores que a tensão de escoamento dinâmico do material (GOLDSMITH, 2001, CARDOSO, 2005). Assim, a componente cisalhante (chamada de desviadora) pode ser desprezada em relação à componente hidrostática (parte compressiva) do tensor das tensões, que vem a ser uma função da posição no corpo onde está sendo analisado. A relação entre as matrizes das tensões é dada pela EQ. 2.1.

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & 0 & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Onde: σ é a tensão hidrostática; e

τ , a tensão cisalhante;

2.2.1 EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO E DE ESTADO

O fenômeno de deformação dinâmica a taxas elevadas é governado pelas relações de conservação de Rankine-Hugoniot. As EQ. 2.2, 2.3 e 2.4 (RANKINE, 1870, HUGONIOT, 1889) representam as conservações de massa, momento e energia. A FIG. 2.3 ilustra uma frente de onda avançando em um corpo e separando duas regiões: uma região que já sentiu a passagem da frente, e outra região que ainda não experimentou a perturbação causada pela frente da onda de choque.

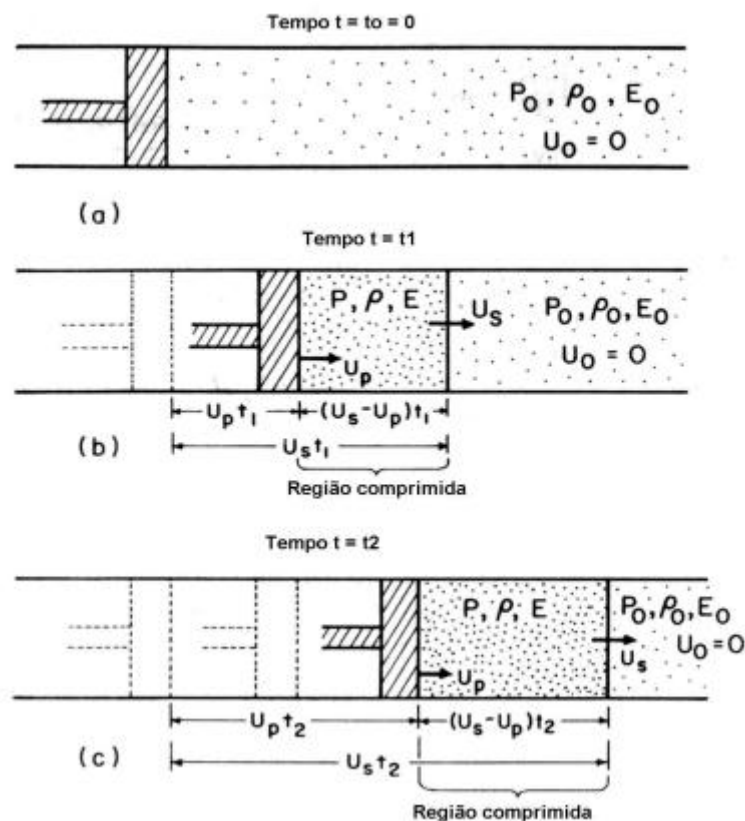


FIG. 2.3 Esquemática da propagação de região chocada devido a um pistão se movendo em um cilindro e interagindo com fluido compressível, em um momento (a) antes do choque, (b) após um instante t_1 e (c) após um instante $t_2 > t_1$ (adaptado de MEYERS, 1994).

$$\rho_0 U_s = \rho(U_s - U_p) \quad (2.2)$$

$$(P - P_0) = \rho_0 U_s U_p \quad (2.3)$$

$$E - E_0 = \frac{(P+P_0)(V_0-V)}{2} \quad (2.4)$$

Onde: ρ_0 é a massa específica inicial;

ρ , a massa específica final;

U_s , a velocidade da onda de choque;

U_p , a velocidade da partícula;

P , a pressão final;

P_0 , a pressão inicial;

E , a energia final;

E_0 , a energia inicial;

V , o volume final; e

V_0 , o volume inicial.

As equações de conservação envolvem cinco variáveis (pressão P , velocidade de partícula U_p , velocidade da onda de choque U_s , volume específico V ou densidade ρ , e Energia E). Portanto, é necessária uma equação adicional que relacione delas. Ela é obtida experimentalmente pelo ajuste do polinômio apresentado na EQ. 2.5.

$$U_s = C_0 + S_1 U_p + S_2 U_p^2 + S_3 U_p^3 + \dots \quad (2.5)$$

Para a maioria dos materiais usa-se uma aproximação definida pela EQ. 2.6.

$$U_s = C_0 + S U_p \quad (2.6)$$

Porém, se o material for poroso ou sofrer transformações de fase, faz-se necessário a consideração dos termos de ordem superior, ou correções no cálculo das relações de Hugoniot, com base na equação de Mie-Grüneisen (RICE, 1958, JOHNSON, 1999), apresentada na EQ. 2.7.

$$P - P_{0K} = \frac{\gamma}{V} (E - E_{0K}) \quad (2.7)$$

Onde: P_{0K} é a pressão à 0 K;

E_{0K} , a energia à 0 K; e

γ , o coeficiente de Grüneisen, onde $\gamma = \frac{\gamma_0 V}{V_0}$.

E ainda,

$$\frac{\gamma}{V} = \frac{3\alpha}{C_V K} \quad (2.8)$$

Onde: α , é o coeficiente de expansão térmica;

c_V , calor específico à volume constante; e

K , compressibilidade isotérmica.

O coeficiente de Grüneisen é um parâmetro dependente da frequência vibracional da rede cristalina do alvo e do volume, de acordo com a EQ. 2.9.

$$\gamma = - \left(\frac{\partial \ln \nu}{\partial \ln V} \right) \quad (2.9)$$

Onde: ν , é a frequência vibracional da rede cristalina do alvo.

Tais equações são válidas somente quando adotadas as seguintes premissas (MEYERS, 1994):

- a) A onda de choque é uma superfície descontínua e não possui espessura aparente;
- b) O módulo de cisalhamento (G) é desprezado no sólido submetido a pressões muito elevadas;
- c) Forças volumétricas (como a gravitacional) são desprezíveis, em comparação com o carregamento quasi-estático, bem como a condução de calor na frente de choque (processo adiabático);
- d) Não há comportamento elastoplástico;

e) Não há transformação de fase; e

f) A velocidade do pulso obrigatoriamente cresce com o aumento da pressão, segundo a EQ. 2.10.

$$\left(\frac{\partial^2 P}{\partial U^2}\right) > 0, P \uparrow U \uparrow \quad (2.10)$$

O cálculo da pressão gerada no momento do impacto, pela onda de choque, foi estimada a partir do Método de Casamento de Impedância de Choque (MEYERS, 1994, p. 195) envolvendo o alvo (liga de alumínio) e a ponta do projétil (latão). Este método permite obter a pressão e a velocidade de partícula U_p , no instante do choque na interface entre o alvo e o projétil, dadas pela interseção da Hugoniot direta, do material do alvo, e a Hugoniot invertida, do material do projétil.

Pode-se calcular a Hugoniot direta $P \times U_p$ do alvo (liga de alumínio), através da EQ. 2.11.

$$P_{Al} = \rho_0^{Al} (C_{Al} + S_{Al} U_p) U_p \quad (2.11)$$

A Hugoniot inversa $P \times U_p$ do projétil (latão) pode ser obtida através da EQ. 2.12, considerando a velocidade do projétil imediatamente antes do impacto de 0,8 km/s aferido com a ajuda da barreira óptica.

$$P_{Latão} = \rho_0^{Latão} [C_{Latão} + S_{Latão} (0,8 - U_p)] (0,8 - U_p) \quad (2.12)$$

Considerando o alvo como a liga de alumínio 6061 T6 e a ponta do projétil como latão, e utilizando dados dispostos por Meyers (1994, p. 133), tem-se que $\rho_0^{Al} = 2,70 \text{ g/cm}^3$, $C_{Al} = 5,35 \text{ km/s}$, $S_{Al} = 1,34$, $\rho_0^{Latão} = 8,45 \text{ g/cm}^3$, $C_{Latão} = 3,73 \text{ km/s}$, e $S_{latão} = 1,43$.

Como a pressão gerada pela onda de choque no momento do impacto é a mesma para o alvo e para o projétil, ao igualar as EQ. 2.11 e 2.12, inserindo os devidos valores, obteve-se a velocidade de partícula comum a ambos, $U_p = 0,543 \text{ km/s}$. Assim, ao substituir na EQ. 2.11 este valor de U_p , obtém-se uma

pressão no alvo de 8,91 GPa. A FIG. 2.4 apresenta as curvas Hugoniot de choque para o alvo e para o projétil.

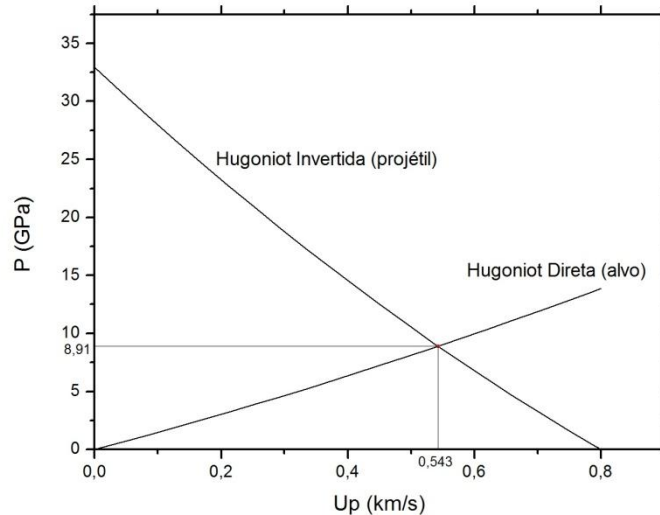


FIG. 2.4 Hugoniot de Choque para o alvo de liga de alumínio 6061 T6 e a ponta de latão do projétil.

Como a literatura indica que a pressão hidrostática da liga AA 6061 T6 é de 2 GPa (GILAT, 1985), e o limite elástico de Hugoniot (HEL), que corresponde à máxima tensão suportada por um sólido comprimido por choque unidimensional sem que ocorra deformação irreversível na frente de choque, é de 0,45 GPa (SKRIPNYAK, 1995). Considerando que os parâmetros acima sejam compatíveis com os da liga AA 6351 T6, conclui-se que o alvo foi submetido a uma pressão vinte vezes maior ao HEL da liga de alumínio, o que configura claramente o estado de choque.

2.2.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Trata-se de um método de análise de modelos matemáticos, sendo mais comumente implementado através de equações diferenciais ou por integrais, com suas respectivas condições de contorno. Logo, tal método baseia-se na discretização de uma estrutura em várias subestruturas, sendo essas denominadas

de elementos finitos. Essa divisão de uma estrutura maior é o que se chama de malha e contém elementos compostos de arestas, que são chamadas de faces, como mostrado na FIG. 2.5. Os pontos de interseção das arestas são chamados de nós e conectam os elementos em pontos comuns (AZEVEDO, 2003).

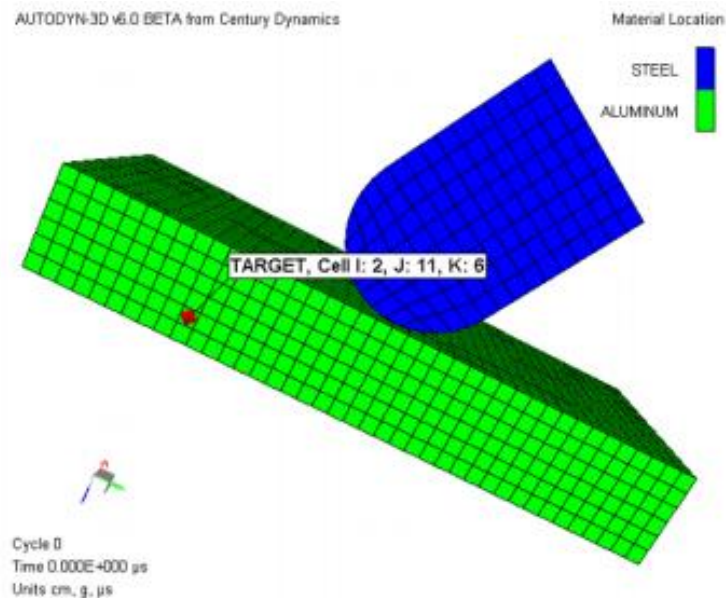


FIG. 2.5 Elementos finitos, faces e nós (ANSYS AUTODYN USER'S MANUAL, 2010).

A integração pode ser de modo implícito ou explícito. Ao se determinar os deslocamentos no instante $t + \Delta t$, expressando as condições de equilíbrio para tal instante, torna-se necessário o uso de métodos de integração implícita. Com isso, gera a necessidade de inversão da matriz a ser analisada (LAPA, 1987).

O método da integração explícita é usado em casos onde for possível aplicar uma matriz diagonalizada, com a matriz de tensões cisalhantes podendo ser desprezada ou expressa em termos da matriz diagonalizada. Assim, permite-se a determinação de $d_{t+\Delta t}$, sem a realização da inversão de matrizes (LAPA, 1987). Como na situação analisada neste trabalho apenas a matriz diagonalizada de tensões hidrostáticas é considerada, conclui-se que esse é o método mais indicado para eventos dinâmicos.

Em modelagem, existem diferentes formas de se observar um fenômeno, cada qual com sua singularidade, que interfere na discretização do modelo, sendo quatro os modelos mais utilizados (QUAN, 2003).

2.2.3 MÉTODOS DE DISCRETIZAÇÃO

2.2.3.1 MÉTODO DE LAGRANGE

Nesse método, a malha acompanha o movimento e a deformação do material em regiões de distorção relativamente baixas. É mais indicado para representar sólidos, como estruturas e projéteis. Tem como vantagem a sua eficiência computacional e fácil incorporação de modelos complexos, mas a malha pode ficar muito distorcida em regiões extremamente deformadas (SANTOS, 2009). Esse foi o método usado neste trabalho. As FIG. 2.6(a) e (b) apresentam uma malha pelo método de Lagrange não deformada e deformada, respectivamente.

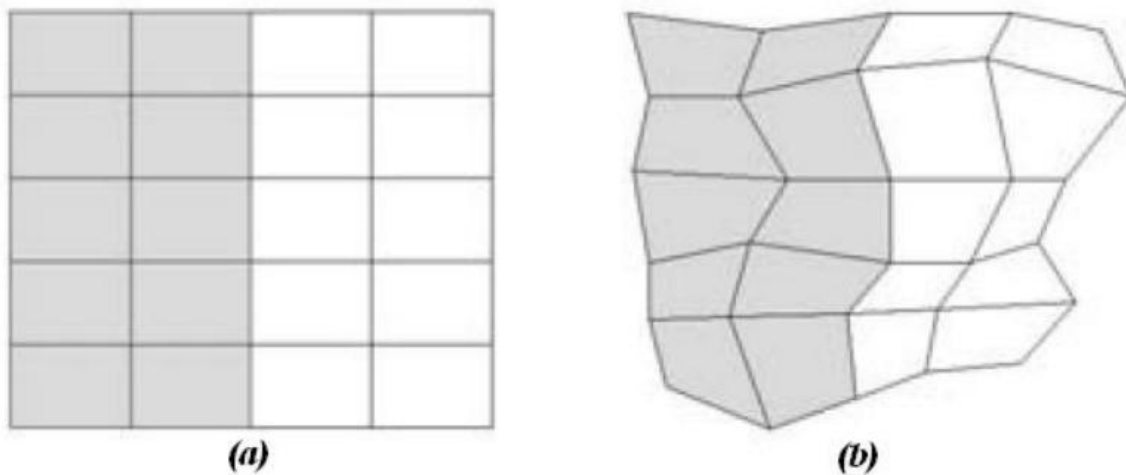


FIG. 2.6 Malha pelo método de Lagrange (a) não deformada e (b) deformada (SANTOS, 2009).

2.2.3.2 MÉTODO DE EULER

De acordo com esse método, a grade numérica é fixa no espaço enquanto o material se move em relação a ela. Adequado para a descrição do comportamento do material sob deformações severas, esse método é geralmente usado para representar fluidos ou gases. Sua vantagem é que grandes deformações ou situações de escoamento não resultam em distorções na malha que permanece fixa.

Em contrapartida, é necessário trabalho computacional extra para manter as interfaces do material e reduzir a difusão numérica (QUAN, 2003). A FIG. 2.7(a) ilustra uma malha desse método com o material não deformado, enquanto na FIG. 2.7(b), o material já foi deformado.

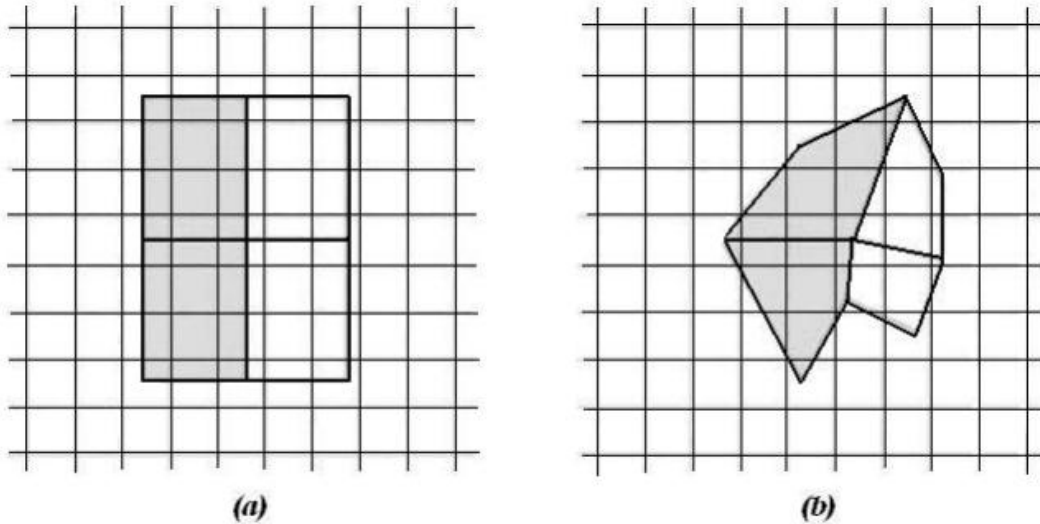


FIG. 2.7 Malha pelo método de Euler (a) material não deformado e (b) deformado (SANTOS, 2009).

Pode-se ter uma relação entre os métodos Lagrangeano e Euleriano através da equação diferencial apresentada na EQ. 2.13

$$\left(\frac{D\phi}{Dt}\right)_L = \left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)_E + \bar{V} \cdot \nabla\phi \quad (2.13)$$

Onde: $\left(\frac{D}{Dt}\right)_L$ é a contribuição do método de Lagrange;

$\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)_E$, a contribuição do método de Euler;

\bar{V} , o vetor velocidade; e

ϕ , a grandeza em análise.

2.2.3.3 ALE (ARBITRARY LAGRANGE EULER)

Esse é um método híbrido dos métodos anteriores, que fornece uma facilidade de rezoneamento (isto é, uma atualização da malha) contínua e tem como vantagem a capacidade de reduzir dificuldades causadas por severas deformações da malha, encontradas pelo método de Lagrange. Porém, é empregado um passo computacional adicional de rezoneamento (QUAN, 2003). Um exemplo de emprego desse método se dá pela FIG. 2.8(a), (b) e (c)

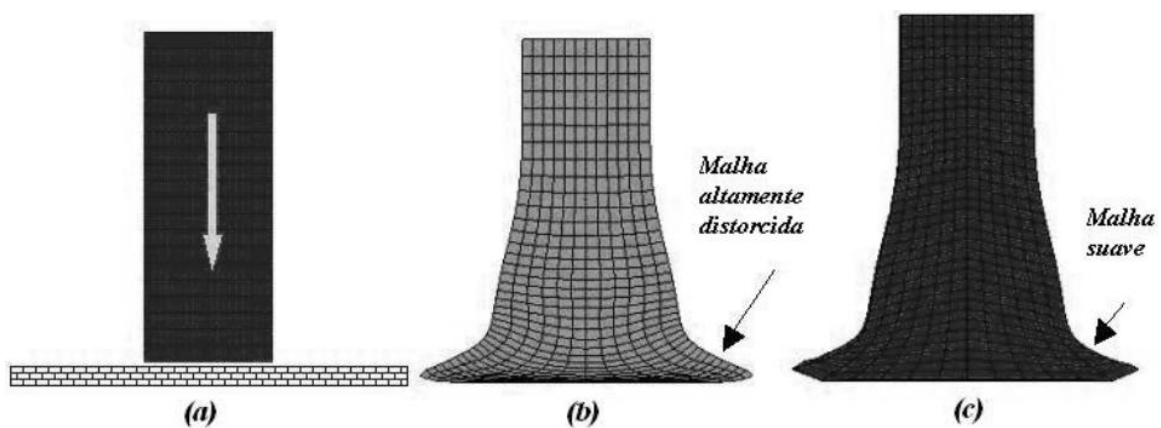


FIG. 2.8 Simulação do Ensaio de Taylor com malha pelo método ALE. (a) Impacto de uma barra de metal em uma parede, com a solução de impacto (b) pelo método de Lagrange e (c) pelo método ALE (SANTOS, 2009).

2.2.3.4 MESHFREE LAGRANGIAN METHOD – SPH (SMOOTH PARTICLES HYDRODYNAMICS)

De acordo com essa metodologia, as partículas, além de pontos de interação de massa, também são pontos de interpolação. Assim, são usados para calcular o valor de variáveis físicas, uma vez que não apresenta malha e cálculo de interações entre as partículas. É muito útil para simular o comportamento de materiais sob deformações e distorções severas, como em impactos a hipervelocidades. Como desvantagem, requer uma espécie de partícula para localizar outras até então vizinhas, para realizar a interpolação. Tal fato torna o tempo computacional por ciclo

mais elevado do que no caso Lagrangeano (LIBERSKY, 1993). A FIG. 2.9 traz a visualização de tal método.

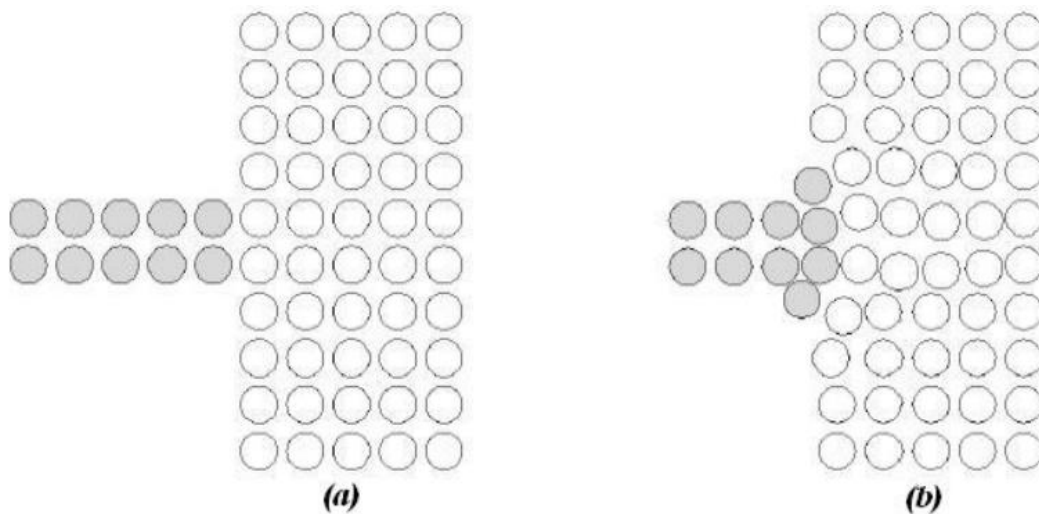


FIG. 2.9 Malha pelo método SPH (a) não deformada e (b) deformada (SANTOS, 2009).

2.2.4 MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

Utilizado para adequar as equações de conservação na forma diferencial para o uso em computador, é um método que se baseia na aproximação das derivadas que aparecem no problema original, por meio de quocientes de diferenças, usando séries de Taylor (ARAÚJO, 2010).

2.3 UTILIZAÇÃO DE SOFTWARES DE SIMULAÇÃO

O AUTODYN[®] é um dos *softwares* que têm sido bastante utilizados, uma vez que a sua confiabilidade tem sido comprovada pelos resultados da literatura (PARTOM, 2001, GOMES, 2004, JUSTO, 2005, THAM, 2005).

Em 2001, Partom (2001) estudou experimentalmente o efeito de alvo alumina/alumínio contra projéteis Pf por DOP e computacionalmente a falha cerâmica pelo AUTODYN[®]. Ele verificou que, ainda tendo a mesma densidade de

área, o desempenho balístico do sistema de um único elemento com 9,2 mm de espessura de alumina e 6,6 mm de alumínio, é superior ao do sistema espaçado com 4,6 mm de espessura de alumina e 3,1 mm de alumínio, distanciados por 82 mm.

Em 2004, no IME, Gomes (2004) realizou simulação de ensaios balísticos em alvos cerâmicos com alteração em sua geometria, bem como na dosagem de nióbia. Por ser a disponível no momento, foi utilizada uma versão limitada do programa AUTODYN[®], permitindo apenas um pequeno intervalo de tempo (até o ciclo 100, representando os primeiros 4 μ s), conseqüentemente uma pequena penetração. Foi verificado que a variação convexa na geometria da superfície do alvo é favorável ao desempenho balístico da cerâmica.

No ano de 2005, Justo (2005), em seu estudo o comportamento ao impacto de alta velocidade em materiais compósitos, utilizou o *software* AUTODYN[®] para simular os impactos a altas velocidades, onde foi salientada uma excelente concordância com os resultados experimentais do tipo e forma de dano, bem como os valores de V_{50} e velocidade residual.

Ainda neste ano, esse mesmo *software* foi utilizado por Tham (2005) na simulação da penetração e perfuração em concreto reforçado, onde concluiu que, para regimes de altas velocidades, o modelo constitutivo com resistência ao escoamento dependente da pressão possui uma forte correlação com as velocidades residuais experimentais. Além disso, os contornos de dano nas superfícies de impacto e de saída obtidos na simulação foram consistentes com os danos pós-testes.

Como um exemplo mais recente de utilização e confiabilidade de *softwares* que utilizam elementos finitos, Gama publicou, em 2011, um artigo sobre a modelagem de impacto em alvos realizada por elementos finitos, evolução do dano e a penetração de compósitos (GAMA, 2011).

Outros *softwares* de análise e simulação numérica estão sendo utilizados. Em 2009 foi feito um estudo do estilhaçamento e DOP de materiais metálicos pelo programa Abaqus[™], da Simulia, por Lopes (2009) onde, entre outras conclusões, observou que energia cinética convertida em trabalho plástico depende da forma com que o alvo irá ceder por cada forma da ponta do projétil, assim como foi observado um aumento do limite balístico com o aumento da espessura.

Ramsaroop (2010) utilizou o MATLAB[®], da MathWorks, no estudo de compósitos laminados, onde foi elaborado um programa que utiliza como dados de entrada as condições de carregamentos aplicados, e propriedades e limites do material. Neste estudo, tal programa otimamente projetou o composto laminado para as dadas condições de carregamento, ajudando na redução de custos de material.

2.4 ENSAIO DOP

Muito comum para se medir a eficiência de uma blindagem, o ensaio de profundidade de penetração residual DOP (MIL-STD-376, 1993), consiste na fixação da blindagem em um material de apoio dúctil. Em seguida, o alvo é atingido por um projétil e a profundidade de penetração é medida e comparada com aquela sem a blindagem (ROSENBERG, 1988, HAZELL, 2010). Sendo assim, há duas situações a se analisar: o impacto do projétil no material de apoio e o impacto do projétil na blindagem fixada no material de apoio. Neste trabalho, apenas a primeira situação foi analisada, sendo uma liga de alumínio usada como o material de apoio.

2.5 BARRA HOPKINSON

O ensaio em Barra Hopkinson é um ensaio realizado em taxas intermediárias e altas de deformação ($10^2 - 10^4 \text{ s}^{-1}$), cujo funcionamento consiste no impacto de uma barra curta, chamada de impactador, em uma barra de um maior comprimento, denominada barra incidente. Após a barra incidente ser atingida, uma onda de tensão passa pela mesma, e alcança a amostra, que está posicionada entre a barra incidente e uma barra de mesmo comprimento, denominada transmissora. Sendo assim, parte da onda é refletida e parte é transmitida ao corpo de prova.

Devido à amplitude da onda, uma deformação plástica é imposta ao material, uma vez que a tensão de escoamento é menor que a tensão do pulso gerado pelo impactador. Os pulsos incidente, refletido e transmitido são registrados por meio de

um osciloscópio e de um par de extensômetros (*strain gages*) fixos na barra incidente e na transmissora.

Por meio destes registros, são determinadas as deformações, as taxas de deformação e as tensões impostas ao corpo de prova (CARDOSO, 2005), através das EQ. 2.14, 2.15 e 2.16, respectivamente.

$$\varepsilon(t) = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \varepsilon_R dt \quad (2.14)$$

Onde: $\varepsilon(t)$ é a deformação;

C_0 , a velocidade do som no material;

L , a distância entre as barras incidente e transmissora; e

ε_R , a amplitude do pulso refletido.

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R \quad (2.15)$$

Onde: $\varepsilon(t)$ é a deformação;

$$\sigma(t) = E_0 \frac{A_0}{A} \varepsilon_T(t) \quad (2.16)$$

Onde: $\sigma(t)$ é a tensão;

E_0 , o módulo de elasticidade das barras;

A_0 , área de seção transversal da barra incidente;

A , área de seção transversal da amostra; e

ε_T , a amplitude do pulso transmitido.

A FIG. 2.10 mostra uma esquematização da Barra Hopkinson.

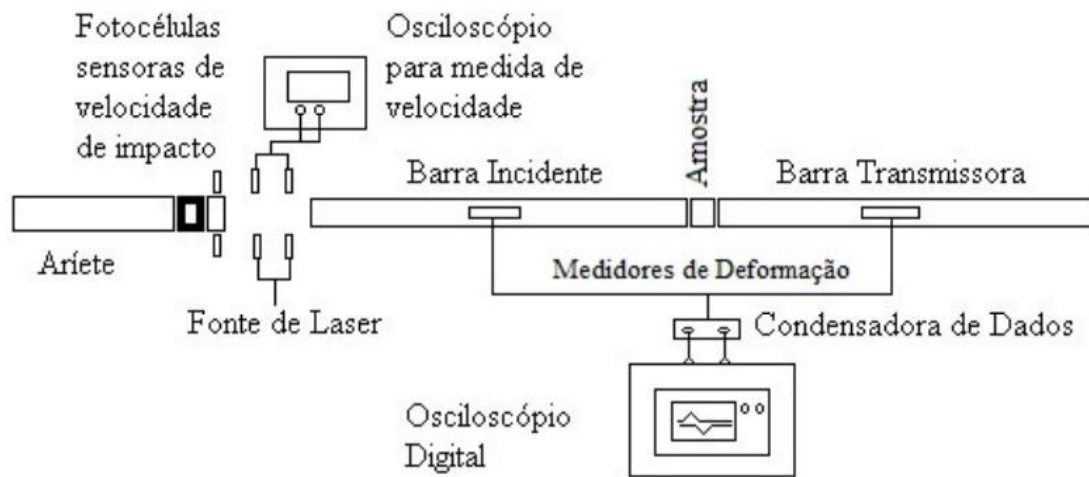


FIG. 2.10 Esquema experimental da Barra Hopkinson (SKAF, 2012).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ASPECTOS GERAIS

Este trabalho consistiu na realização do ensaio DOP, a partir de projéteis 7,62 mm Pf em alvos confeccionados com a liga de alumínio 6351 T6. Em seguida, o ensaio foi modelado por meio de simulações realizadas com o *software* AUTODYN®.

A liga utilizada foi adquirida em forma de tarugos com 177,8 mm de diâmetro¹ por 100 mm de espessura. Após os primeiros ensaios reais, foi verificado que, pela pequena penetração, os tarugos poderiam ser cortados em duas partes de 50 mm de espessura cada. Destes, os que obtiveram menor penetração, ainda tiveram sua outra metade reutilizada para novos disparos. Também foram adquiridos tarugos com 19,05 mm de diâmetro² por 100 mm para serem usinados até o tamanho adequado para a utilização na Barra Hopkinson, de 12 mm de diâmetro por 5 mm de espessura, para levantamento de propriedades dinâmicas.

Os valores de penetração foram medidos tanto se mantendo os alvos intactos, com paquímetro e com ultrassom, quanto pela realização de cortes nos tarugos.

A estrutura dos alvos foi visualizada por estereoscopia e por microscopia eletrônica de varredura.

3.2 MATERIAL UTILIZADO

Conforme indicado pela literatura (ASM METALS HANDBOOK, 1992), a liga aqui utilizada é composta por 0,70-1,30% de Si, 0,50% de Fe, 0,10% de Cu, 0,40-0,80% de Mn e 0,40-0,80% de Mg, bem como foi submetida ao tratamento térmico T6 pelo fabricante. Tal tratamento consiste na solubilização em torno de 505 °C, com tempo

¹ As empresas fornecem o diâmetro em polegadas. Assim, 177,8 mm equivale a 7".

² 19,05 mm equivale a ¾".

de patamar de 15 minutos, seguido de resfriamento em água e reaquecimento a 170 °C por 6 horas, quando é resfriado no ar (SCHAEFFER, 2006).

O projétil utilizado foi o 7,62 mm Pf, que possui uma jaqueta, composta por uma liga Tombac 70/30, por uma base de chumbo e por um núcleo perforante de aço AISI/SAE 4340 no interior da jaqueta. A FIG. 3.1 mostra o esquema do projétil.

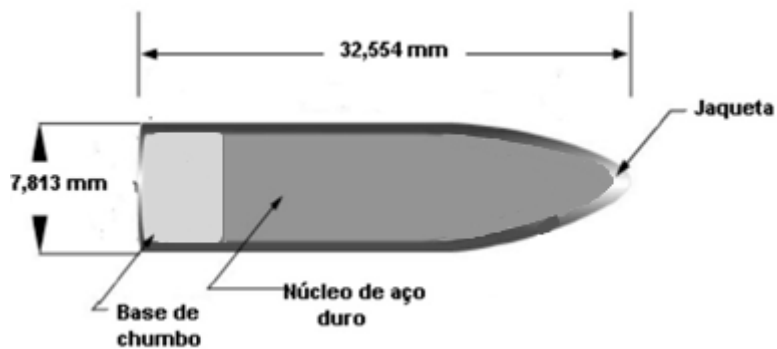


FIG. 3.1 Esquema do projétil Pf (adaptado de AMORIM JÚNIOR, 2007)

3.3 PREPARAÇÃO DOS TARUGOS

Para o ensaio, foram adquiridos tarugos dessa liga com 177,8 mm de diâmetro por 200 mm de espessura. As peças foram seccionadas em outras, com 100 mm e 50 mm de espessura. Este procedimento foi iniciado no IME. Porém, a serra mecânica de arco S900, da Franho, utilizada, não possibilitou a realização total dos cortes. Dessa forma, para que os tarugos ficassem com 50 mm de espessura, o processo foi concluído no CBPF. Assim, com os alvos em duas espessuras distintas, os ensaios balísticos foram realizados.

3.4 ENSAIO DOP

3.4.1 TESTES BALÍSTICOS NOS ALVOS COM 100 MM DE ALTURA

Testes balísticos foram realizados no Centro de Avaliações do Exército (CAEx), de acordo com a norma NBR 15000 (Blindagens para impactos balísticos – Classificação e critérios de avaliação) (ABNT NBR 15000, 2005), capazes de proteger vários níveis de ameaça conforme indicados nas TAB. 3.1 e 3.2.

TAB. 3.1 Nível de proteção do sistema de blindagem quanto ao impacto balístico (ABNT NBR 15000, 2005)

| Nível | Munição | Massa do projétil (g) | V ₀ (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 | 332 ± 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 | 7.62 x 51FMJ (.308 – Winchester) | 9,7 ± 0,1 | 838 ± 15 | 5 |
| IV | .30 – 06 AP | 10,8 ± 0,1 | 868 ± 15 | 1 |

Legenda:

LRHV – *Long Rifle High Velocity*

RN – *Round Nose*

FMJ – *Full Metal Jacketed*

JSP – *Joint Soft Point*

SW GC – *Semi WadCutter Gas Check*

AP – *Armor Piercing*

TAB. 3.2 Nível de proteção alternativa de sistema de blindagem quanto ao impacto balístico (ABNT NBR 15000, 2005)

| Proteção alternativa (PA) | Munição | Massa do projétil (g) | V ₀ (m/s) | Número de impactos |
|---------------------------|---|-----------------------|----------------------|--------------------|
| PA-1 | Cal 12/70 | 28,4 ± 0,05 | 450 ± 10 | 5 |
| PA-2 | 5,56 x 45 Ball - SS92 / M 193 | 3,5 ± 0,1 | 990 ± 12 | 5 |
| PA-3 | 7,62 x 39 Ball – SS92 / M 43 | 7,9 ± 0,1 | 716 ± 15 | 5 |
| PA-4 | 5,56 x 45 NATO Ball – SS109 / M855 (NP) ^{*)} | 4,0 ± 0,1 | 915 ± 15 | 5 |
| PA-5 | 7,62 x 39 Ball PS – M 1943 (NP) ^{*)} | 7,9 ± 0,1 | 720 ± 15 | 5 |
| PA-6 | 7,62 x 51 AP | 9,8 ± 0,1 | 840 ± 15 | 2 ^{**)} |

Legenda:

^{*)} NP– Núcleo com aço perfurante.

^{**)} A uma distância de 300 mm.

A munição 7,62 x 51 Pf utilizada neste trabalho não está prevista em nenhum nível de proteção blindada. Contudo, ela pode ser comparada ao nível IV de segurança desde que a sua energia cinética do projétil possua nível de energia equivalente ao nível de proteção.

Um primeiro disparo com munição comercial foi realizado, a fim de aquecer o sistema e colimar o laser na direção desejada. O aquecimento do sistema é importante, pois a temperatura influencia diretamente a velocidade do projétil. A seguir, foram realizados mais 12 disparos. Nestes, cada cartucho recebeu uma massa de pólvora que aumentava gradativamente. A velocidade variou com a alteração na quantidade de pólvora, juntamente com fatores como iniciação da espoleta, condicionamento da pólvora e temperatura de disparo. Primeiramente, o projétil é sacado do cartucho. Em seguida, a pólvora é adicionada, conforme ilustram as FIG. 3.2(a) e FIG. 3.2(b), sendo posteriormente medida com a balança semianalítica BK600, da Gehaka, mostrada na FIG. 3.2(c). Então, a pólvora é inserida no estojo e finalmente o projétil é reintroduzido no estojo, através da prensa de carregamento Lock-N-Load[®] Classic[™], da Hornady, apresentada na FIG. 3.2(d). A pólvora utilizada foi do tipo CBC N°102, da Companhia Brasileira de Cartuchos – SP.

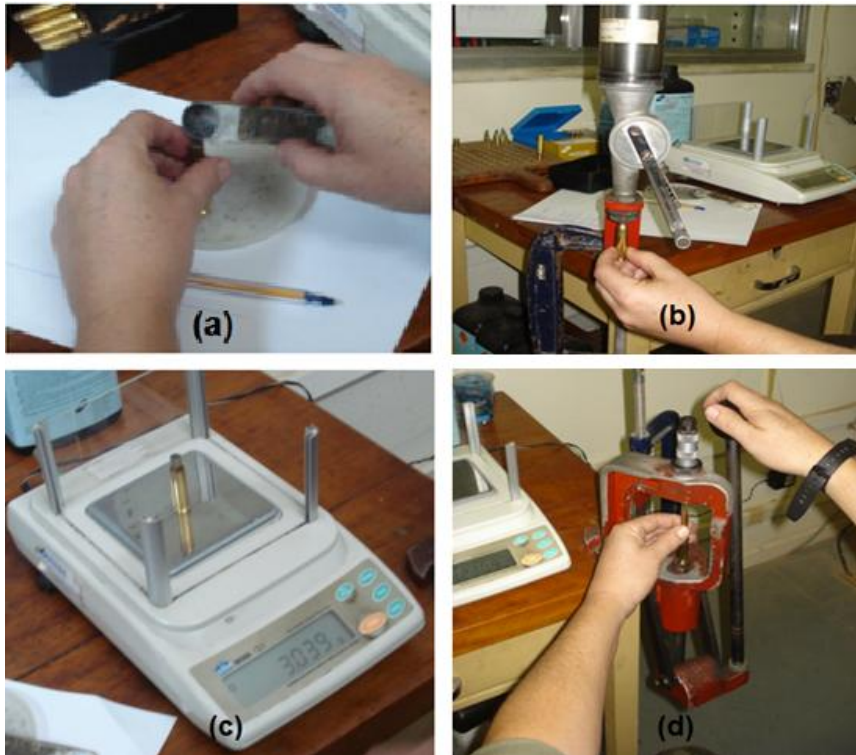


FIG. 3.2 (a) Adição de pólvora nos cartuchos; (b) Polvorímetro (Hornady); (c) Balança semi-analítica BK600 (GEHAKA); (d) Prensa de carregamento Lock-N-Load® Classic™ (Hornady)

Os alvos foram fixados a 15 m de distância do provete instalado no dispositivo de disparo com mira laser B290 *Ammunition Test Gun*, da HPI (*High Pressure Instrumentation*), de acordo com o esquema representado na FIG. 3.3. A FIG. 3.4 apresenta o dispositivo de disparo utilizado.

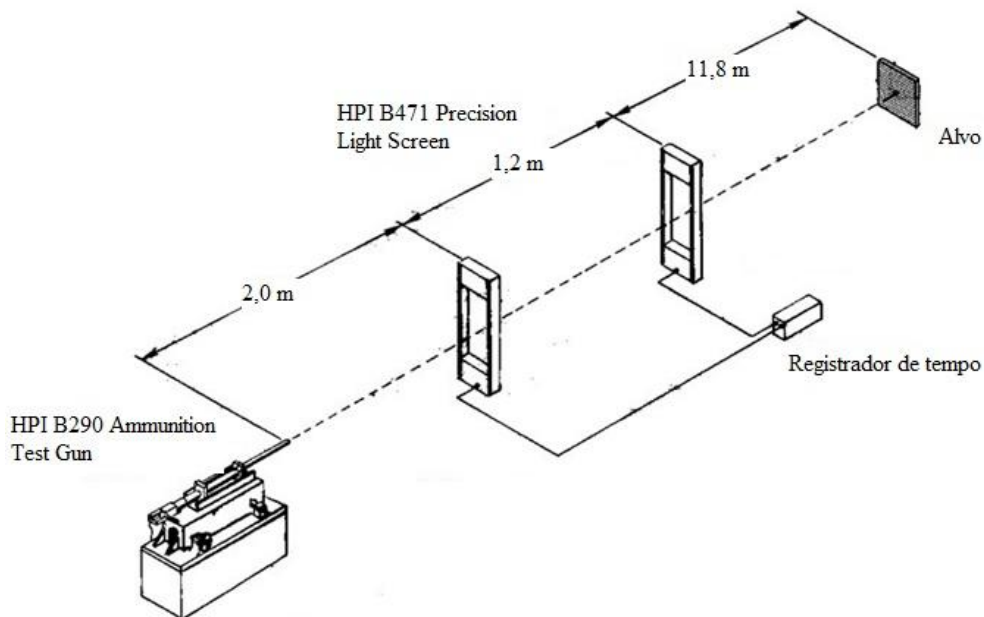


FIG. 3.3 Esquema do Ensaio DOP (adaptado de NBR 15000, 2005).



FIG. 3.4 Dispositivo de disparo B290 Ammunition Test Gun (HPI – High Pressure Instrumentation).

O sistema de medição de velocidade, mostrado na FIG 3.5, constitui-se de uma barreira óptica B471 *Precision Light Screen*, também da HPI, posicionada a 2 m de distância do provete. Dois sensores localizados no início e no fim da barreira captam um feixe de 1,5 V. Conforme o projétil passa, ocorre uma variação na voltagem. O sinal é transmitido para um registrador de tempo, uma pequena caixa que faz parte do equipamento. O tempo que o projétil levou para passar pela barreira (1,2 m de comprimento) é obtido e, com isso, a sua velocidade é determinada.



FIG. 3.5 Barreira óptica B471 *Precision Light Screen* (HPI – High Pressure Instrumentation) com o registrador de tempo, a pequena caixa localizada na parte inferior da barreira.

Os tarugos foram fixados por quatro parafusos, perpendiculares entre si, em um suporte de diâmetro pré-definido, fixo em uma placa lisa, como ilustrado na FIG 3.6.



FIG. 3.6 Fixação dos tarugos.

3.4.2 TESTE BALÍSTICO NOS ALVOS COM 50 MM DE ALTURA

Testes balísticos foram realizados nos alvos com 50 mm de altura no CAEx, de forma semelhante aos realizados nos alvos com 100 mm de altura, de acordo com a norma NBR 15000. Utilizaram-se os mesmos equipamentos de disparo, medição de velocidade e sustentação dos tarugos, assim como foram realizados os mesmos procedimentos. Contudo, neste teste foram realizados apenas 5 disparos, com a pólvora adicionada após o projétil ter sido sacado do cartucho, medida, e inserida no estojo. Em seguida, o projétil foi reintroduzido no estojo, através da prensa de carregamento. Assim, foram obtidas 5 diferentes velocidades de impacto.

3.5 ENSAIO NA BARRA HOPKINSON

Para realização deste ensaio, foi utilizada a Barra Hopkinson existente no CTE_x, apresentada na FIG. 3.7. Inicialmente, foi necessário recolocá-la em operação, já que os extensômetros estavam exauridos após os últimos trabalhos. Nesse ensejo, fez-se o reconhecimento do sistema de propulsão da barra, por gás comprimido, e verificou-se que necessitava reparos, pois não se encontrava devidamente isolado. O sistema é alimentado por um compressor da marca Schulz e uma linha de ar comprimido. A velocidade de impacto é medida por dois fotodiodos, cujos sinais são levados a uma condensadora de sinais, alimentada com uma tensão contínua. Cada diodo é associado a um canal independente de um osciloscópio, sendo a velocidade de impacto calculada, então, dividindo-se a distância entre os feixes (28 mm) pelo tempo da amostragem de dois picos.

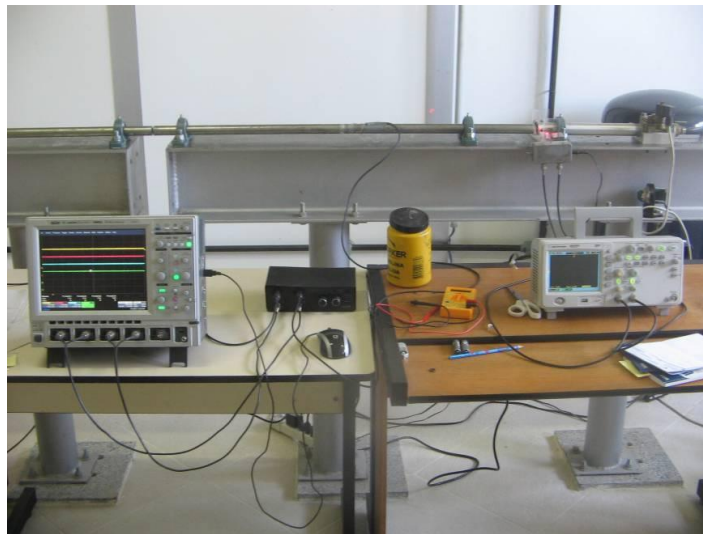


FIG. 3.7 Barra Hopkinson utilizada, localizada no CTE_x (SKAF, 2012).

Corpos de prova de 12 mm de diâmetro por 5 mm de espessura foram usinados a partir de um tarugo de $\frac{3}{4}$ " (19,05 mm) de diâmetro por 100 mm de comprimento. Dispostos entre a barra incidente e a transmissora, 10 amostras (FIG. 3.8) foram separadas para serem ensaiadas, a fim de calibrar o equipamento e levantar resultados.



FIG. 3.8 Corpos de prova utilizados na Barra Hopkinson.

3.6 VERIFICAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO

A fim de se obter um resultado preliminar da profundidade de penetração obtido no ensaio balístico, utilizou-se um paquímetro 530-104B-10, da Mitutoyo e, a partir da base do projétil, aferiu-se o quanto o mesmo penetrou no alvo.

Como outra forma de se verificar a profundidade de penetração nos tarugos, foi utilizando o ultrassom. Foi empregado o equipamento de ultrassom Krautkramer USN 50R.

Uma terceira forma de se verificar a profundidade de penetração deu-se mediante a realização de cortes na peça, de forma a seguir a trajetória do projétil. Os cortes inicialmente se deram no IME, com uma serra mecânica de arco S900, da Franho. Contudo, devido a desajustes dessa ferramenta, os tarugos não ficavam perfeitamente estabilizados, culminando, entre outras consequências, em cortes fora da trajetória inicial. Com isso, as secções foram posteriormente realizadas no AGR, utilizando como equipamento uma máquina de serra de fita horizontal semiautomática Starret St – 4002, que pode ser observada na FIG. 3.9.

Primeiramente foram feitos cortes no plano de incidência do projétil, a fim de facilitar a visualização do núcleo perforante. Então, à medida que foram necessários, outros cortes foram realizados até que a ponta de aço pudesse ser vista.



FIG. 3.9 Máquina de serra de fita horizontal semiautomática Starret St – 4002 utilizada no AGR para realização dos cortes.

Com a ponta perforante sendo visível, a profundidade de penetração pôde ser aferida mediante a utilização de um paquímetro, de acordo com a norma MIL-STD-376.

3.7 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL

Os alvos impactados balisticamente tiveram sua microestrutura analisada por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) e por estereoscopia.

A microscopia eletrônica de varredura consiste na emissão de um feixe de elétrons sobre a superfície da amostra. Seu feixe é guiado por bobinas, de modo a realizar uma varredura de forma regular. Ao incidir na amostra, o feixe produz elétrons e fótons, podendo ser usados para permitir a observação. Assim, é possível obter informações sobre a morfologia e elementos químicos, além de fornecer a

aparência tridimensional da imagem das amostras (DEDAVID, 2007). Foi utilizado um MEV JSM-5800LV, da Jeol.

A estereoscopia consiste na criação de percepção de profundidade mediante a observação de um par de imagens planas. Ela depende, basicamente, da paralaxe estereoscópica (aparente mudança de posição dos objetos quando observados de lugares distintos) e o ângulo de interseção estereoscópica (SANTOS, 1999). Para tal, foi empregado um estereoscópio Stemi SV11, da ZEISS.

Para serem visualizados no microscópio, foram selecionadas algumas partes do alvo, como a deformação semelhante à pétala na superfície impactada FIG. 3.10.



FIG. 3.10 Formação semelhante à pétala na face impactada do alvo.

A trajetória do projétil no interior do alvo, visualizada na FIG. 3.11, também foi observada no microscópio, a fim de obter informações sobre como a passagem do projétil influenciou a microestrutura dos tarugos.



FIG. 3.11 Trajetória do projétil no interior do alvo.

3.8 AUTODYN

O AUTODYN[®] constitui-se de um código computacional baseado em elementos finitos, com integração explícita, que é utilizado na modelagem da dinâmica não linear de sólidos e fluidos. As propriedades de entrada dependem da equação de choque, dos modelos constitutivos de resistência e de falha, e da erosão. Dessa forma, podem ser citados parâmetros como densidade, módulo de cisalhamento, coeficiente de Grüneisen, tensão de escoamento, condutividade térmica, calor específico, temperatura de fusão, constante e expoente de encruamento, entre outros.

Como resultados de saída, o AUTODYN[®] disponibiliza uma elevada gama de opções, dentre as quais se destacam a análise de tensões e pressões, descolamentos, deformação e taxa de deformação, temperaturas, variação de energia, velocidade e momento, velocidade do som, etc.

3.9 MODELAGEM DO ENSAIO BALÍSTICO

Devido ao fato desta liga estar sendo mais estudada há poucos anos e à carência literária sobre ligas de alumínio, as propriedades da liga 6351 T6 não constam no banco de dados do AUTODYN®. Para a aquisição de tais propriedades, seria necessária a realização de ensaios em Barra Hopkinson, a fim de levantá-las e acrescentá-las ao *software*. Contudo, tais dados ainda estavam em levantamento. Assim, por pertencer à mesma série 6XXX, possuir propriedades semelhantes (ASM METALS HANDBOOK, 1992), ser bem mais pesquisada (PARTOM, 2001, GOMES, 2004, TAKAFFOLI, 2012, RAMADHAN, 2013) e já constar no banco de dados do programa, as simulações inicialmente foram feitas com os dados da liga 6061 T6.

Ao se realizar uma modelagem, o número de elementos finitos é um fator que pode interferir diretamente nos resultados da simulação. Com uma elevada quantidade de elementos finitos em uma modelagem, são esperados resultados mais precisos. Além do esperado aumento de precisão numérica, a malha mais refinada permite um processo de erosão do alvo e do projétil mais adequado e representativo da realidade.

Porém, o aumento do número de elementos interfere no tamanho dos mesmos, e os programas explícitos calculam o tamanho dos passos de integração (dt) de acordo com o menor tamanho de aresta dentre todos os elementos finitos, de acordo com o critério de Courant-Friedrichs-Levy (ANSYS AUTODYN USER'S MANUAL, 2010).

Uma das principais considerações da abordagem Lagrangeana é a necessidade de malhas muito refinadas, com finalidade de refino da resposta dos processos de erosão balística, a qual resulta em altas demandas computacionais.

Este cálculo é, ainda, refeito a cada passo e, com níveis de deformação elevados, antes da erosão de um determinado elemento, o passo de integração pode se tornar ainda menor do que os patamares do início da simulação.

Diante disso, para simplificar o modelo inicial, o projétil foi modelado apenas com a base de chumbo e a jaqueta, com 14.832 elementos e 28,6 mm de comprimento. As simulações preliminares foram realizadas em 3 etapas progressivas, variando a

quantidade de elementos que compõem o alvo, visando o aprimoramento dos resultados.

Nas simulações avançadas, há uma modelagem mais refinada, já com o núcleo perforante de aço, constituída por 15.073 elementos, bem como as propriedades (excetuando-se as dinâmicas) da própria liga 6351 T6. Assim, todo o projétil agora possui 46.580 elementos e 32 mm de comprimento, enquanto o alvo possui 70.256 elementos e 100 mm de espessura. Foram adotados elementos hexaédricos, em sua grande maioria (aproximadamente 95% dos elementos).

Contudo, para o tipo de elemento utilizado, as expressões de taxas de deformação e forças envolvem diretamente diferenças entre velocidades e/ou coordenadas dos vértices diagonalmente opostos de cada elemento. Caso não haja tais diferenças mesmo com o elemento distorcido, não há aumento na deformação e, conseqüentemente, não há resistência a esta distorção. Se tal deformação ocorrer em uma região com muitos elementos, é observada a forma de uma ampulheta, e parte da energia envolvida no processo é perdida. Então, tal energia, chamada de energia de *hourglass*, teve seu controle feito pelo próprio *software*, utilizando 1 ponto de integração.

Foi utilizada uma equação constitutiva modelada por Johnson-Cook (JOHNSON, 1983), descrita na EQ. 3.1, para a análise de resistência de todos os materiais, exceto para o chumbo. Tal modelo foi adotado por levar em consideração os efeitos térmicos.

$$\sigma = [A + B\varepsilon_p^n][1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*][1 - T_H^m] \quad (3.1)$$

Onde: A é a tensão de escoamento;

B, a constante de encruamento;

ε_p , a deformação plástica equivalente;

n, o expoente de encruamento;

C, a constante da taxa de deformação;

$\dot{\varepsilon}_p^*$, a taxa de deformação plástica adimensional $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ para $\dot{\varepsilon}_0 = 1,0 \text{ s}^{-1}$;

T_H , a temperatura homóloga; e

m, o expoente de amolecimento térmico.

Sendo a temperatura homóloga dada pela EQ. 3.2.

$$T_H = \frac{(T - T_{room})}{(T_{melt} - T_{room})} \quad (3.2)$$

Onde: T é temperatura instantânea;

T_{room} , a temperatura do ambiente do ensaio; e

T_{melt} , a temperatura de fusão.

Para o chumbo foi adotada a equação constitutiva modelada por Steinberg-Guinan (STEINBERG, 1978), descrita pela EQ. 3.3. Esse modelo foi utilizado porque apresenta a contribuição dos efeitos térmicos e por ser o modelo apresentado para o chumbo na biblioteca do *software*.

$$Y = Y_0 \left\{ 1 + \left(\frac{Y_P}{Y_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{G'_T}{G_0} \right) (T - 300) \right\} (1 + \beta \varepsilon)^n \quad (3.3)$$

Onde: Y é a tensão de escoamento;

Y_0 , a tensão de escoamento inicial;

Y'_P , a derivada $\frac{dY}{dP}$;

P , a pressão;

η , a compressão, definida pela razão entre o volume específico inicial V_0 e o volume específico V ;

G'_T , a derivada $\frac{dG}{dT}$, sendo G o módulo de cisalhamento;

G_0 , o módulo de cisalhamento inicial;

T , a temperatura, em graus Kelvin;

β , o coeficiente de encruamento;

ε , a deformação plástica; e

n , o expoente de encruamento.

Para o modelamento dos critérios de falha, foi adotado o modelo de Johnson-Cook, o qual leva em consideração o aquecimento do material, para o núcleo

perfurante de aço e também para o alvo. A EQ. 3.4 apresenta a equação, identificando quais as contribuições de cada um de seus termos. Para os demais materiais, foi adotado o critério de erosão, apresentado nos apêndices.

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}] [1 + D_4 \ln |\dot{\varepsilon}^*|] [1 + D_5 T^*] \quad (3.4)$$

Onde: ε^f é a deformação de falha;

D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 , constantes de dano do material;

σ^* , a razão entre a pressão P e a tensão de escoamento σ_Y ;

$\dot{\varepsilon}^*$, a taxa de deformação plástica adimensional $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ para $\dot{\varepsilon}_0 = 1,0 \text{ s}^{-1}$; e

T^* , a temperatura homóloga.

$[D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}]$, a dependência da pressão;

$[1 + D_4 \ln |\dot{\varepsilon}^*|]$, a dependência da taxa de deformação; e

$[1 + D_5 T^*]$, a dependência da temperatura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ASPECTOS GERAIS

Os valores medidos de penetração do ensaio DOP foram comparados com aqueles obtidos por meio das simulações realizadas com o *software* AUTODYN®.

A fim de se obter resultados preliminares, foram realizadas análises simplificadas. Para tal, inicialmente foram levantadas as profundidades de penetração a partir da base do projétil e, para que a análise comparativa pudesse ser realizada, o ensaio foi modelado sem o núcleo perfurante de aço.

Posteriormente, buscou-se uma maior proximidade com o ensaio balístico realizado. Com isso, um trabalho bem mais minucioso em relação à modelagem do ensaio foi feita. Assim, as malhas ficaram mais refinadas, de modo a otimizar a relação entre os resultados e a demanda computacional, além de simular o ensaio de forma mais fidedigna.

As TAB. 4.1 e 4.2 apresentam as velocidades obtidas, respectivamente, no impacto nos alvos com 100 mm e 50 mm de altura. Ao se comparar os resultados da profundidade de penetração obtidos pelas simulações preliminares com a menor e maior velocidade de impacto, com os apresentados na TAB. 4.3, observa-se uma coerência. Isso se dá pelo fato da simulação não conter o núcleo perfurante, e a medida da profundidade de penetração não levarem em conta a ponta do núcleo perfurante.

Nas simulações avançadas, com um melhor refinamento da malha, a modelagem completa do projétil e a aferição da profundidade de penetração a partir da ponta do núcleo perfurante, houve consistência entre os resultados obtidos das mesmas com os resultados dispostos na TAB. 4.4.

4.2 VELOCIDADES DE IMPACTO OBTIDAS PELO ENSAIO DOP

A TAB. 4.1 mostra a massa de pólvora e sua respectiva velocidade de impacto nos alvos com 100 mm de espessura. A nomenclatura de massa “comercial” indica que a quantidade original de pólvora não foi alterada.

TAB. 4.1 Dosagens de pólvora e suas respectivas velocidades no ensaio com tarugos de 100 mm.

| Ensaio | Massa (g) | Velocidade (m/s) |
|--------|-------------|------------------|
| 1 | 3,109 | 887,55 |
| 2 | 3,080 | 872,27 |
| 3 | 3,145 | 886,26 |
| 4 | 2,905 | 826,04 |
| 5 | 2,900 | 827,02 |
| 6 | 2,901 | 825,33 |
| 7 | 2,771 | 794,22 |
| 8 | 2,768 | 791,18 |
| 9 | 2,770 | 791,10 |
| 10 | “comercial” | 799,72 |
| 11 | “comercial” | 800,06 |
| 12 | “comercial” | 806,28 |

Na TAB. 4.2 estão disponíveis os valores das dosagens de pólvora utilizadas para os novos disparos e as velocidades de impacto obtidas nos alvos de 50 mm.

TAB. 4.2 Dosagens de pólvora e suas respectivas velocidades no ensaio com tarugos de 50 mm.

| Ensaio | Massa (g) | Velocidade (m/s) |
|--------|-------------|------------------|
| 1 | “comercial” | 800,04 |
| 2 | 3,121 | 865,15 |
| 3 | 3,113 | 866,88 |
| 4 | 3,153 | 874,61 |
| 5 | 3,135 | 867,23 |

4.3 MEDIDA DA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO

A TAB. 4.3 apresenta os valores preliminares da profundidade de penetração obtidos a partir da base do projétil, aferidos pelo ensaio balístico DOP real, medidos

dos alvos de 100 mm de espessura. A velocidade de impacto variou entre 791,10 m/s e 877,55 m/s, assim como a penetração, de 13 mm a 17 mm.

TAB. 4.3 Penetração a partir da base do projétil.

| Ensaio | Velocidade (m/s) | Penetração (mm) |
|--------|------------------|-----------------|
| 1 | 887,55 | 14,00 |
| 2 | 872,27 | 15,00 |
| 3 | 886,26 | 16,00 |
| 4 | 826,04 | 14,00 |
| 5 | 827,02 | 17,00 |
| 6 | 825,33 | 13,00 |
| 7 | 794,22 | 14,00 |
| 8 | 791,18 | 13,00 |
| 9 | 791,10 | 15,00 |
| 10 | 799,72 | 13,00 |
| 11 | 800,06 | 15,00 |
| 12 | 806,28 | 14,00 |

A FIG. 4.1 ilustra o gráfico da velocidade X profundidade de penetração dos valores da TAB. 4.3. Apesar da grande dispersão dos resultados, pode ser observada uma pequena correlação entre o aumento da velocidade de impacto com o aumento da profundidade de penetração.

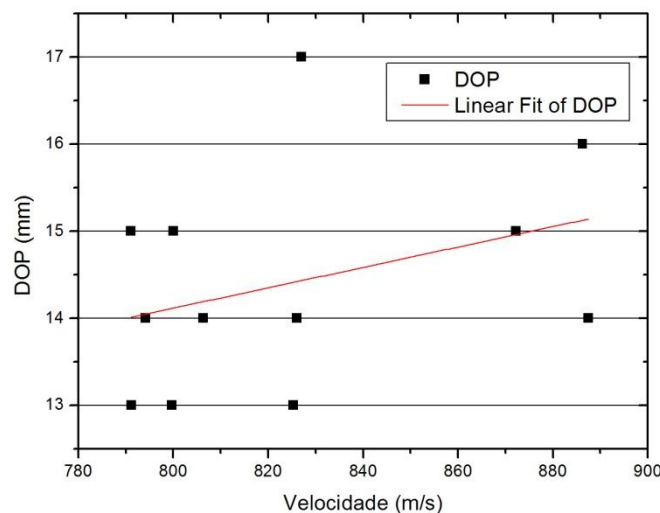


FIG. 4.1 Gráfico da velocidade X profundidade de penetração a partir da base do projétil.

A grande dispersão indica que o intervalo de velocidade não está adequado, além de o método de medição utilizado não ser adequado, uma vez que a

deformação na superfície, semelhante à pétala (FIG. 4.6(c)), não permitiu que o paquímetro ficasse bem posicionado, dificultando a medição. A possível percepção do aumento da profundidade com o aumento da velocidade se deve ao consequente aumento da energia de impacto. Tais fatores explicam o baixo valor do parâmetro de ajuste linear R^2 (0,03169) obtido no gráfico contido na FIG. 4.1.

A verificação da profundidade de penetração por ultrassom, no entanto, não se mostrou um método proveitoso, uma vez que o sinal se dispersava por um desvio sofrido pela ponta de aço do projétil. Assim, por não obter o retorno, o sinal não era mostrado no equipamento, fornecendo então apenas uma noção da região em que o projétil poderia estar.

O método que se mostrou mais eficaz foi o de realização de cortes no plano de incidência do projétil, uma vez que a profundidade de penetração pôde ser aferida de acordo com a norma (MIL-STD-376, 1993). A FIG. 4.2 traz a visualização final obtida pelos cortes.

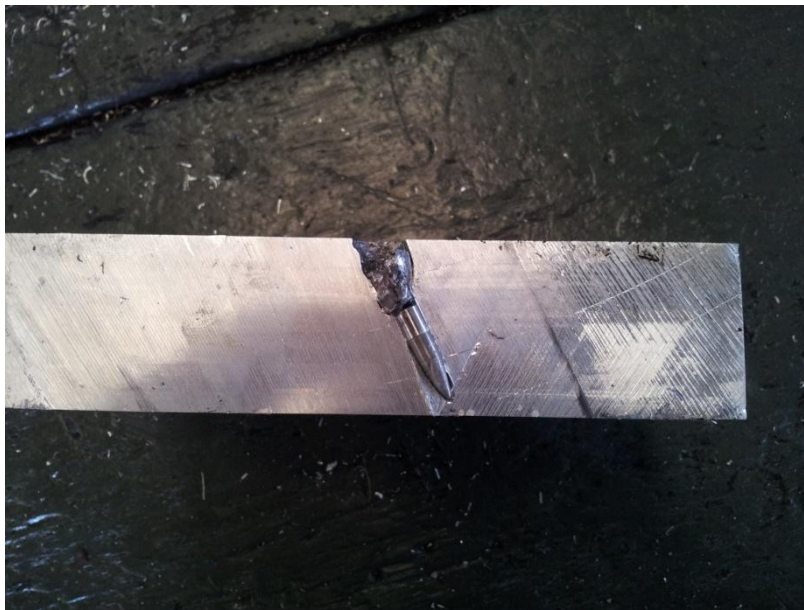


FIG. 4.2 Visualização da ponta perfurante de aço após os cortes.

A TAB. 4.4 mostra os valores da profundidade de penetração nos tarugos com 100 mm de altura, aferidos de forma convencional, ou seja, de forma perpendicular com um paquímetro (MIL-STD-376, 1993).

TAB. 4.4 Penetração nos tarugos de 100 mm de espessura obtida pelo ensaio DOP.

| Ensaio | Velocidade (m/s) | Penetração (mm) |
|--------|------------------|-----------------|
| 1 | 887,55 | 38,15 |
| 2 | 872,27 | 37,70 |
| 3 | 886,26 | 38,85 |
| 4 | 826,04 | 38,20 |
| 5 | 827,02 | 38,30 |
| 6 | 825,33 | 36,30 |
| 7 | 794,22 | 34,40 |
| 8 | 791,18 | 27,85 |
| 9 | 791,10 | 49,50 |
| 10 | 799,72 | 30,10 |
| 11 | 800,06 | 35,60 |
| 12 | 806,28 | 41,00 |

A FIG. 4.3 apresenta o gráfico da velocidade X profundidade de penetração dos valores da TAB. 4.4.

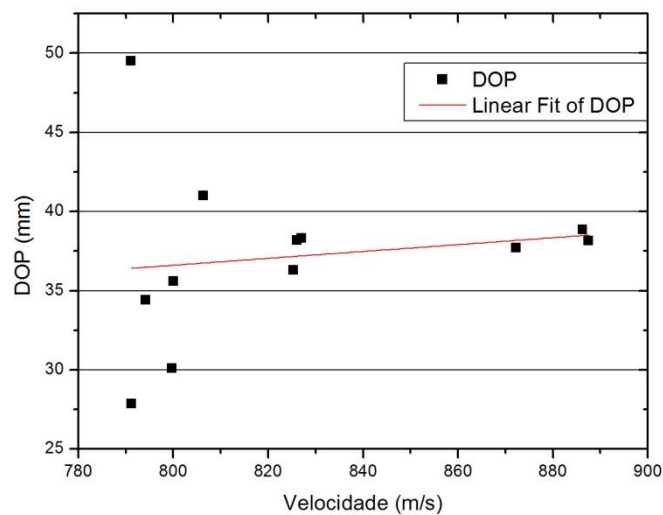


FIG. 4.3 Gráfico da velocidade X profundidade de penetração nos alvos de 100 mm.

Na TAB. 4.5 constam os valores da profundidade de penetração nos tarugos com 50 mm de altura, também aferidos de forma perpendicular com um paquímetro (MIL-STD-376, 1993)

TAB. 4.5 Penetração nos tarugos de 50 mm de espessura obtida pelo ensaio DOP.

| # | Velocidade (m/s) | Penetração (mm) |
|---|------------------|-----------------|
| 1 | 800,04 | 37,70 |
| 2 | 865,15 | 37,00 |
| 3 | 866,88 | 37,10 |
| 4 | 874,61 | 41,00 |
| 5 | 867,23 | 38,00 |

A FIG. 4.4 ilustra o gráfico da velocidade X profundidade de penetração dos valores da TAB. 4.5. Apenas o primeiro disparo apresentou uma disparidade nos resultados da relação entre a penetração máxima com a velocidade, fazendo o valor do parâmetro R^2 cair de aproximadamente 0,95 para -0,23601.

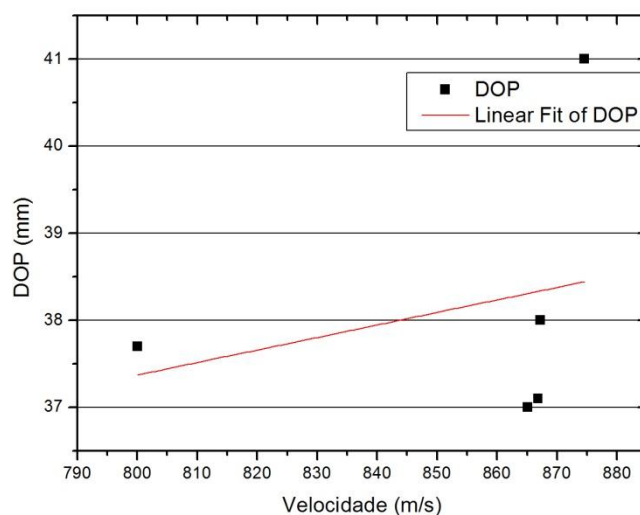


FIG. 4.4 Gráfico da velocidade X profundidade de penetração nos alvos de 50 mm.

Através da FIG. 4.5, pode-se ter uma análise comparativa entre o desempenho balístico dos alvos com diferentes alturas. O aumento da penetração com a velocidade se mostrou bastante parecida para ambas as alturas, resultando em desempenhos balísticos semelhantes.

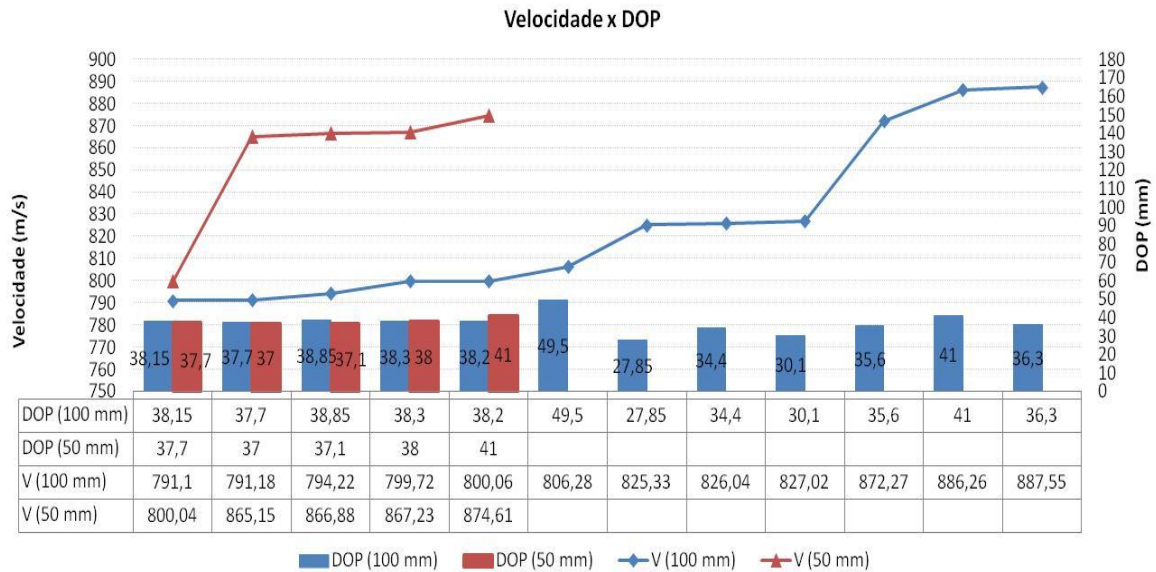


FIG. 4.5 Gráfico comparativo do desempenho balístico dos alvos de diferentes espessuras.

4.4 RESULTADOS DO ENSAIO EM BARRA HOPKINSON

Verificou-se que os osciloscópios utilizados em testes anteriores (CARDOSO, 2005, SKAF 2012) não mais se encontravam operantes e, por esse motivo, foram utilizados osciloscópios mais modernos, como o DSO1002A, da *Agilent Technologies*, sobre os quais ainda não se tinha o conhecimento de como operar e ler os resultados. Assim, pela leitura de seus manuais e também empiricamente, obteve-se sucesso em fazê-los operar satisfatoriamente.

Nos testes de impacto sem qualquer corpo de prova, foram encontrados problemas que impediram a leitura de qualquer resultado nos osciloscópios. Muitas vezes isso foi devido ao desconhecimento de sua operação, ou pelo desalinhamento das barras e descolamento dos extensômetros (*strain gages*), casos em que os osciloscópios não apresentavam leitura alguma.

Porém, durante os ensaios, devido à potência do impacto do equipamento, parte do extensômetro (*strain gage*) da barra transmissora foi danificada. Além disso, as condições do sistema de aquisição de sinais, que inclui um aparato de eletrônica pouco robusta, não permitiram que resistisse às vibrações do equipamento e que cumprisse suas funções satisfatoriamente. Assim, essa etapa da pesquisa foi

postergada, prejudicando a análise dinâmica da liga em questão pela barra, não sendo possível realizar o levantamento de propriedades dinâmicas do material em análise.

4.5 ANÁLISE ESTRUTURAL

Para que a amostra pudesse ser observada no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), foi necessário que este corte fosse feito em peças pequenas, contendo somente a região a ser estudada, e de espessura reduzida. A fim de minimizar a quantidade de cortes e otimizar o tempo de preparação das amostras, foram selecionados os tarugos de 50 mm.

Foi, realizada, também uma limpeza das peças cortadas, feita com acetona. Simplesmente derramou-se um pouco de acetona sobre as peças, a fim de tirar o excesso de graxa ou óleo resultante do corte.

A observação dos alvos foi realizada em duas etapas: uma avaliação macroscópica e outra microscópica.

Na primeira etapa, as regiões impactadas foram observadas por meio de um estereoscópio. Em seguida foram feitas análises no MEV, em regiões específicas.

A observação visual, mediante a FIG. 4.6, do modo de falha da face frontal das amostras analisadas até o presente (tarugos 1, 2 e 4), permitiu verificar formação semelhante à pétala, evidenciando a ductilidade característica dos tarugos de alumínio.

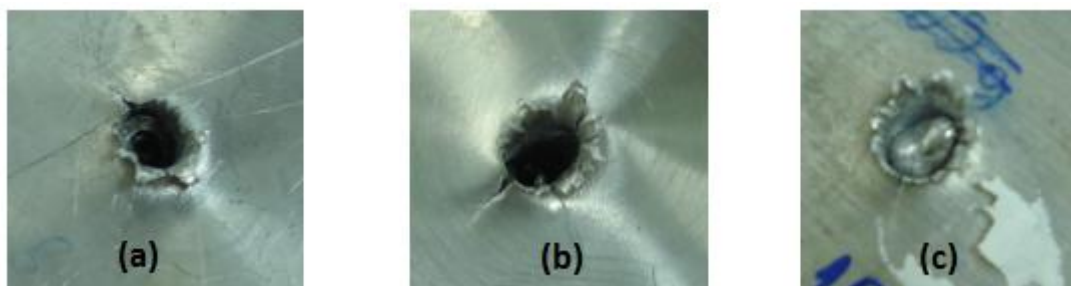


FIG. 4.6 Formação semelhante à pétala na face impactada

A FIG. 4.7 apresenta uma montagem das imagens de estereoscópio obtidas do alvo 1.

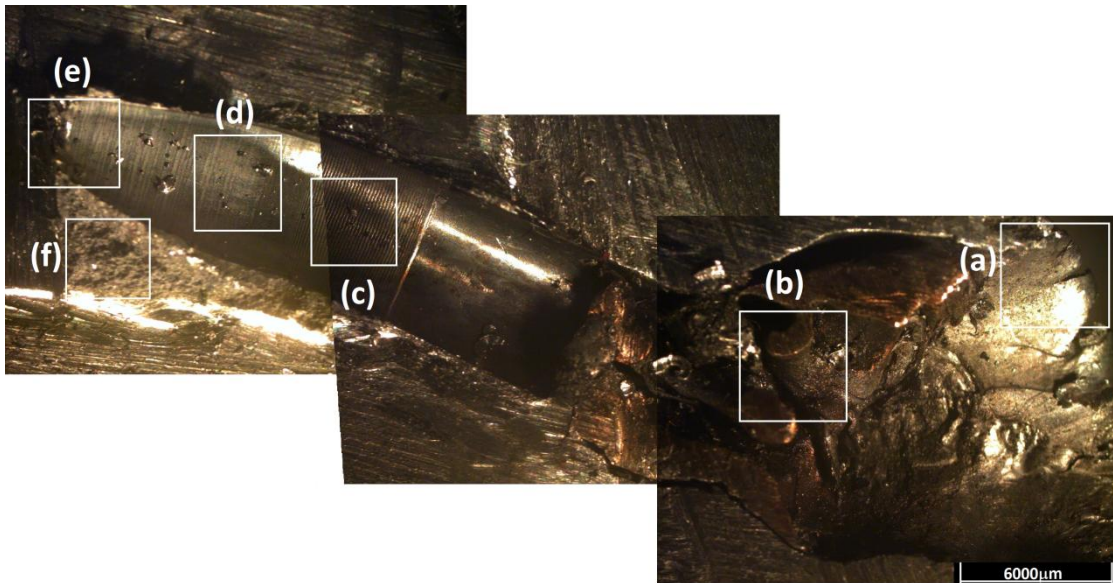


FIG. 4.7 Imagem obtida por meio de um estereoscópio da amostra seccionada do Alvo 1: (a) Região 1; (b) Região 2; (c) Região 3; (d) Região 4; (e) Região 5; e (f) Região 6. Aumento de 1,6x.

Como ilustrado na FIG. 4.8, a Região 1 apresentou intensa deformação plástica. Percebe-se a presença de ranhuras aproximadamente paralelas e não uniformemente espaçadas.

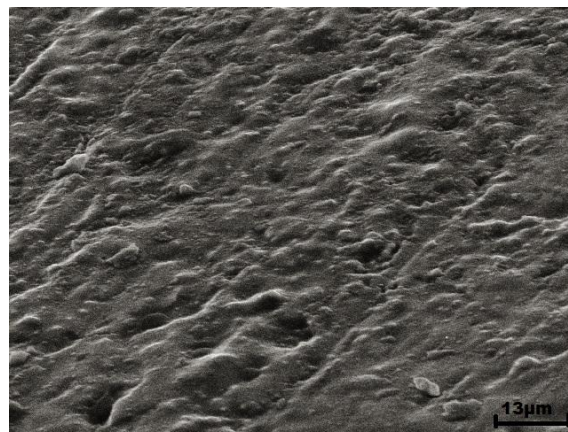


FIG. 4.8 MEV da Região 1, onde apresentou intensa deformação plástica. Aumento de 1300x.

Levantou-se a hipótese de que esta região sofreu espalhamento de material após a passagem do projétil. Portanto, o relevo observado não descreve exatamente a deformação causada pelo impacto, mas sim pelas ondas de choque, que transmitiram energia e causaram esse espalhamento, uma vez que o fenômeno de

penetração é de natureza vibratória. Assim, é possível que estejam sendo observadas marcas de vibração decorrentes do processo de penetração.

A observação macroscópica da Região 2 revela que a jaqueta foi deformada e retirada do núcleo de aço do projétil, que prosseguiu perfurando o alvo de alumínio. Porém, não foi possível observar mais detalhes da região no MEV devido à intensa oxidação.

Foi feita uma comparação entre as Regiões 3 (FIG. 4.9(c)) e 4 (FIG. 4.9(a)). Ambas as regiões apresentam ranhuras perpendiculares ao trajeto do projétil. Ao se ampliar a região central (FIG. 4.9(b) e (d)), percebeu-se que a Região 3 apresentou um aspecto distinto do da Região 4, semelhante a de um líquido resfriado.

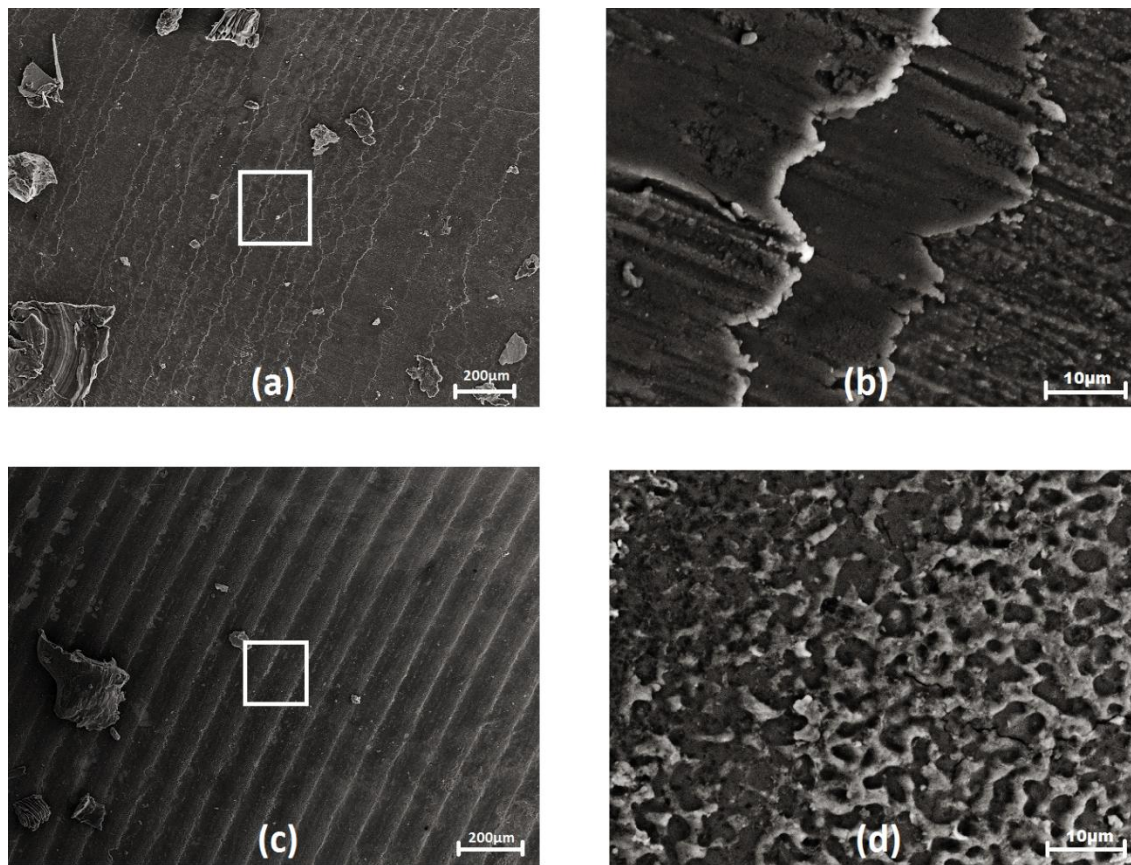


FIG. 4.9 (a) Região 4: presença de ranhuras. Aumento de 75x. (b) Aumento de 2000x da região central, detalhando algumas ranhuras. (c) Região 3: presença de ranhuras semelhantes às da região 4. Aumento de 75x. (d) Aumento de 2000x da região central, apresentando a aparência de líquido resfriado e a presença de trincas.

Acréscimo de temperatura é esperado em decorrência do choque, conforme documentado por Meyers (1994, p. 149). Portanto, o alumínio foi aquecido adiabaticamente por choque do projétil a uma pressão calculada da ordem de 9

GPa. Isto ocasionou um processo muito rápido de fusão e provável vaporização, e subsequente solidificação, evidenciadas através das análises metalográficas pós-choque, conforme mostradas na FIG. 4.9.

Pode-se notar ainda a existência de uma trinca nessa região, como ilustrado na FIG. 4.10.

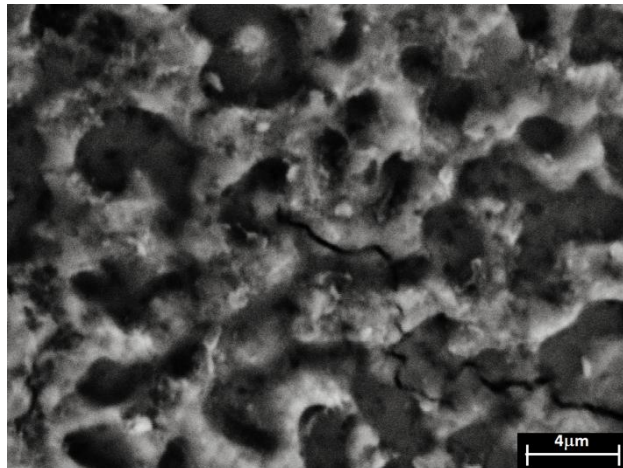


FIG. 4.10 Aumento de 5000x da região central da FIG. 4.9(d), onde pode-se perceber a existência de uma trinca.

A visualização da Região 5 permitiu supor que o projétil perfura o alvo, carregando consigo parte do mesmo, ao longo do seu trajeto, até parar. A observação com MEV das Regiões 4 (FIG. 4.9 (a) e (c)) e 5 (FIG. 4.11), acusou a presença de ranhuras perpendiculares ao sentido de entrada do projétil, provavelmente oriundas do atrito decorrente do movimento de rotação, na trajetória de entrada do projétil.

Na lateral esquerda superior da FIG. 4.11, observam-se também linhas discretas no sentido do movimento. Estas aparentam ser linhas de cisalhamento (MEYERS 1994), embora a microscopia eletrônica não seja a mais indicada para observá-las.

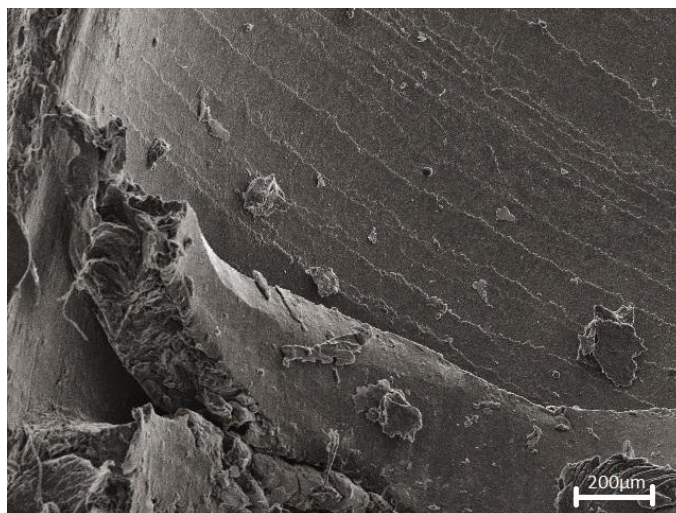


FIG. 4.11 Imagem MEV da Região 5. Presença de ranhuras causadas pelo atrito do projétil com a superfície do metal e possivelmente de bandas de cisalhamento. Aumento de 75x.

A inspeção visual tornou perceptível que a Região 6 tem um aspecto diferente da região que a contorna. Portanto, foi então feita a observação em MEV, a fim de descobrir se esta região apresentava alguma deformação decorrente do impacto. Concluiu-se que a região apresenta esta aparência durante o corte da amostra. O operador provavelmente rasgou esta região para separar a amostra do alvo 1.

A FIG. 4.12 apresenta uma montagem das imagens de estereoscópio obtidas do alvo 2.

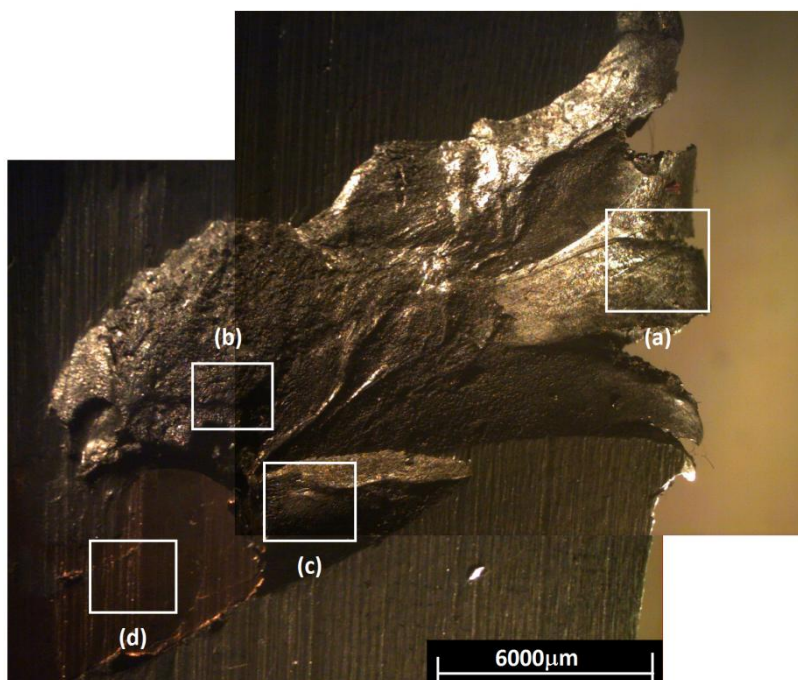


FIG. 4.12 Visualização por meio de um estereoscópio da amostra seccionada do Alvo 2. (a) Região 1; (b) Região 2; (c) Região 3; (d) Região 4. Aumento de 1,6x.

A Região 1 apresenta vários modos de fratura, como é possível perceber pela FIG. 4.13. Na região superior esquerda da FIG. 4.13(a), vê-se um grande corte e o relevo mais ao interior, correspondente ao de uma fratura dúctil. O restante da imagem, apresenta uma aparência semelhante à Região 1 da amostra 1. Nota-se também algumas marcas na peça, semelhantes a arranhões. Foi feita a observação com um aumento maior, na região destacada (FIG. 4.13(b)). As marcas sugerem que a região sofreu arraste de material por estilhaços. Estes podem ter sido causados durante a penetração do projétil ou durante o corte da peça.

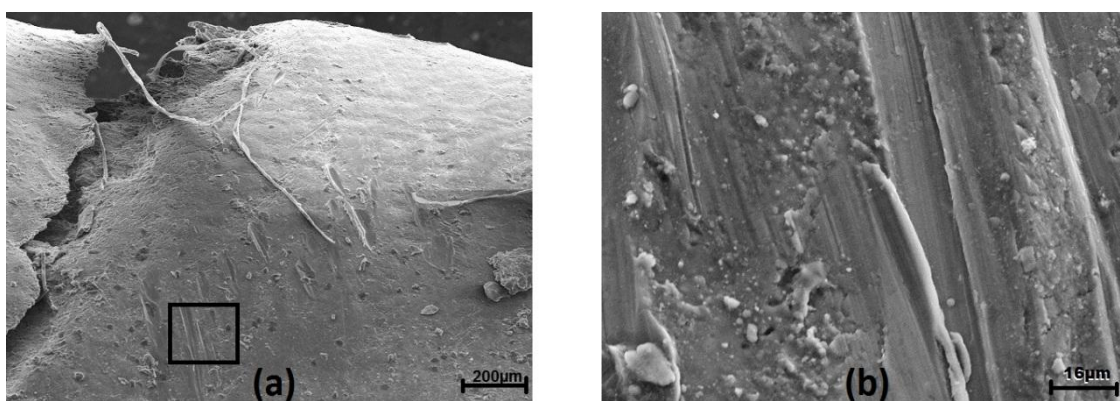


FIG. 4.13 Região 1 da amostra 2: (a) Aumento de 75x; (b) Região destacada com aumento de 1000x.

A primeira visualização em MEV da Região 2, não deixou clara qual o modo de fratura predominante. Contudo, foi possível perceber uma grande oxidação na região.

A Região 3 da amostra 2, apresentou semelhança com a Região 6 da amostra 1. Também foi observada uma intensa oxidação. Verificou-se mais detalhadamente a região central, onde foi realizada uma análise por EDS. Constatou-se a presença de vários óxidos: Al_2O_3 , SiO_2 , PbO , CuO .

A visualização da Região 4, corresponde a uma parte da jaqueta do projétil que ficou para trás, foi semelhante ao que foi descrito na Região 2 da amostra 1. Ao se observar a região em MEV, foi constatada que algumas ranhuras presentes correspondem a marcas da serragem da peça, sendo, portanto irrelevante no estudo realizado.

A FIG. 4.14 apresenta uma montagem das imagens obtidas em estereoscópio da amostra 4.

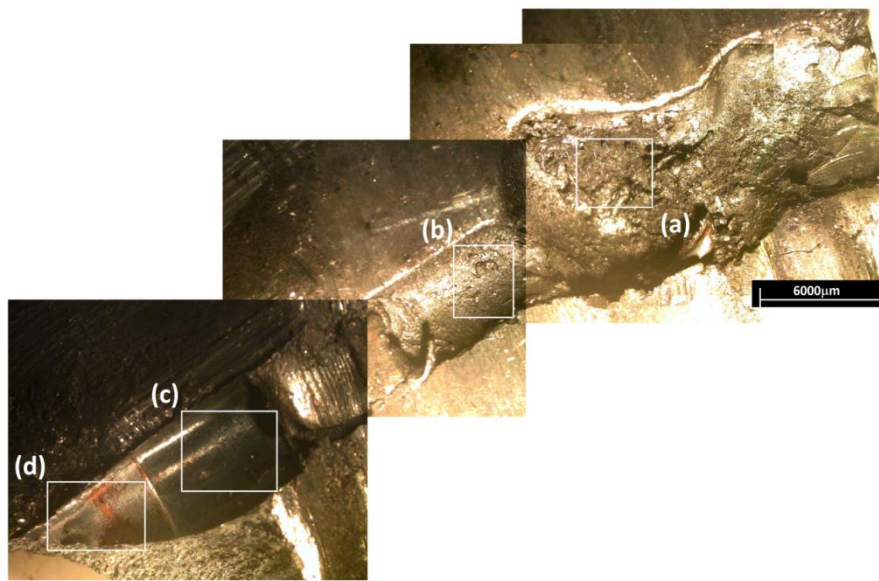


FIG. 4.14 Imagem obtida por meio de um estereoscópio da amostra seccionada do Alvo 4: (a) Região 1; (b) Região 2; (c) Região 3; e (d) Região 4. Aumento de 1,6x.

Tanto a Região 1 quanto a Região 2, apresentam bastante deformação plástica e oxidação.

Ao ser observada a Região 1, foi possível perceber a existência de uma fissura, como pode ser observado na FIG. 4.15.

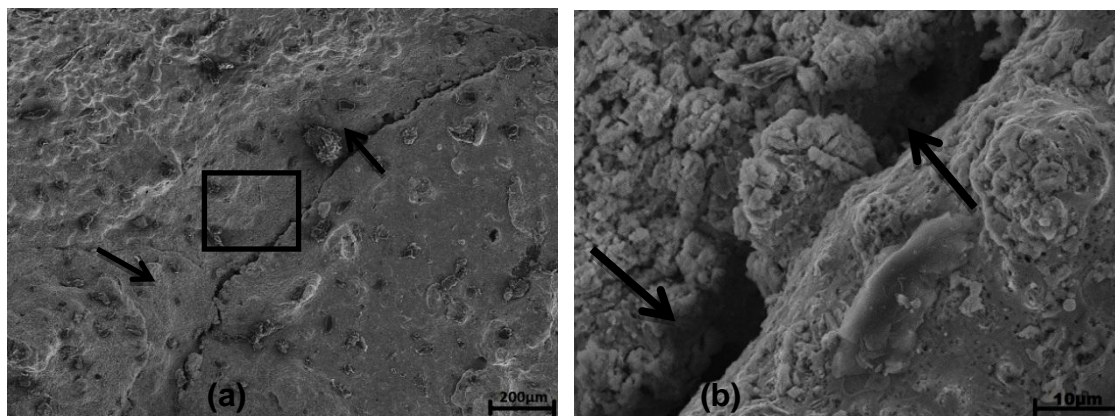


FIG. 4.15 (a) Região 1, com aumento de 75x. É possível perceber uma fissura, indicada pelas setas. (b) Aumento da região central de 2000x, detalhando uma parte da fissura. É possível perceber grande oxidação na peça.

A Região 2 não permitiu observação de nenhuma informação relevante, uma vez que se encontrava bastante oxidada.

A visualização da Região 3 da amostra 4, disposta na FIG. 4.16, apresentou uma aparência semelhante às regiões centrais da amostra 1, com ranhuras perpendiculares ao sentido de entrada do projétil, causadas pelo atrito deste com a superfície do alumínio.

Nessa região, é possível ver muitas trincas, bem discretas, na FIG. 4.16(a). Ao observar-se com um maior aumento (FIG. 4.16(b)), é possível ver que as trincas sofrem bifurcações, característica das fraturas dinâmicas (CARDOSO, 2005). Este resultado é coerente com o ensaio, pois esta amostra foi impactada com uma elevada velocidade e, conseqüentemente, maior energia, conforme já foi apresentado na TAB. 4.5. Quanto maior a energia cinética com que o alvo é impactado, maior sua taxa de deformação (YI, 2001).

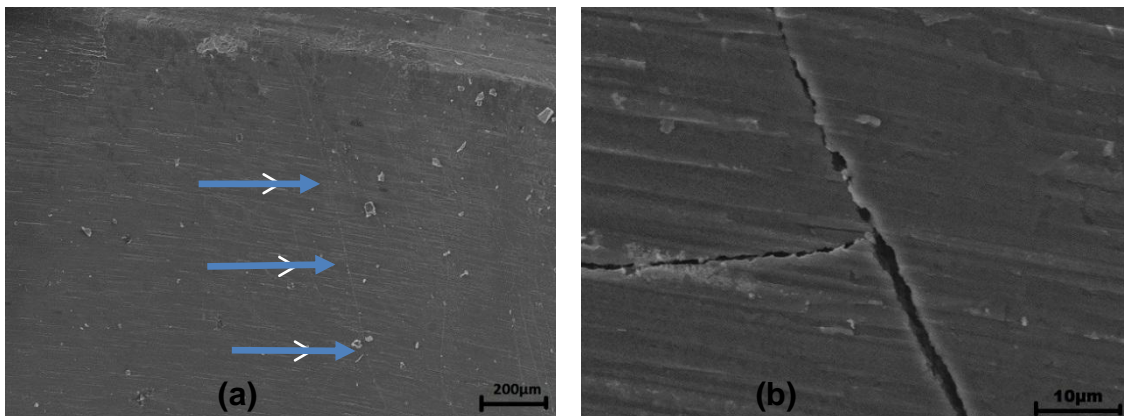


FIG. 4.16 Região 3. (a) Uma trinca é apontada pelas setas. | Aumento de 75x. (b) Aumento de 2000x em uma das trincas, onde fica visível a bifurcação característica das fraturas dinâmicas.

A Região 4 apresentou as mesmas ranhuras perpendiculares ao trajeto do projétil, além de intensa oxidação, como pode ser visto na FIG. 4.17.

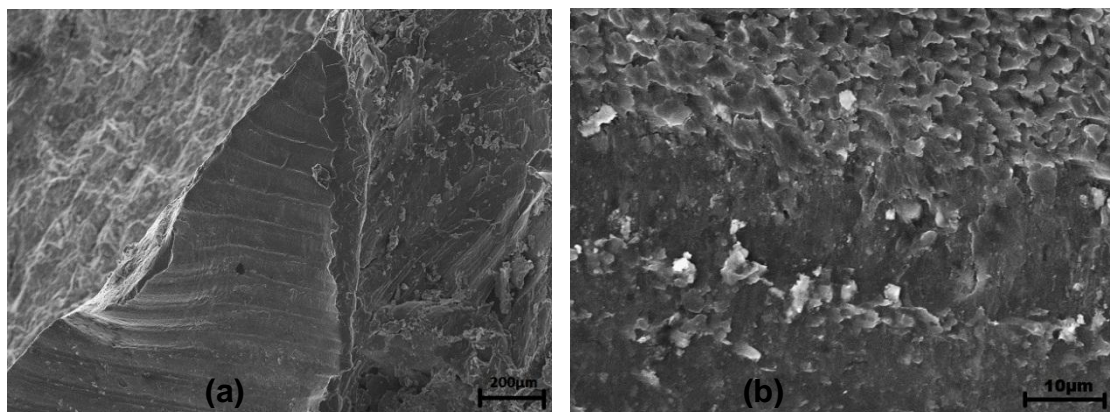


FIG. 4.17 (a) Aumento de 75x da Região 4. (b) Aumento de 2000x em uma das ranhuras.

4.6 ANÁLISE DA PENETRAÇÃO NO ALVO

Visualizando-se a trajetória do projétil no alvo (FIG. 4.18), é possível observar a existência de dois regimes de penetração distintos.

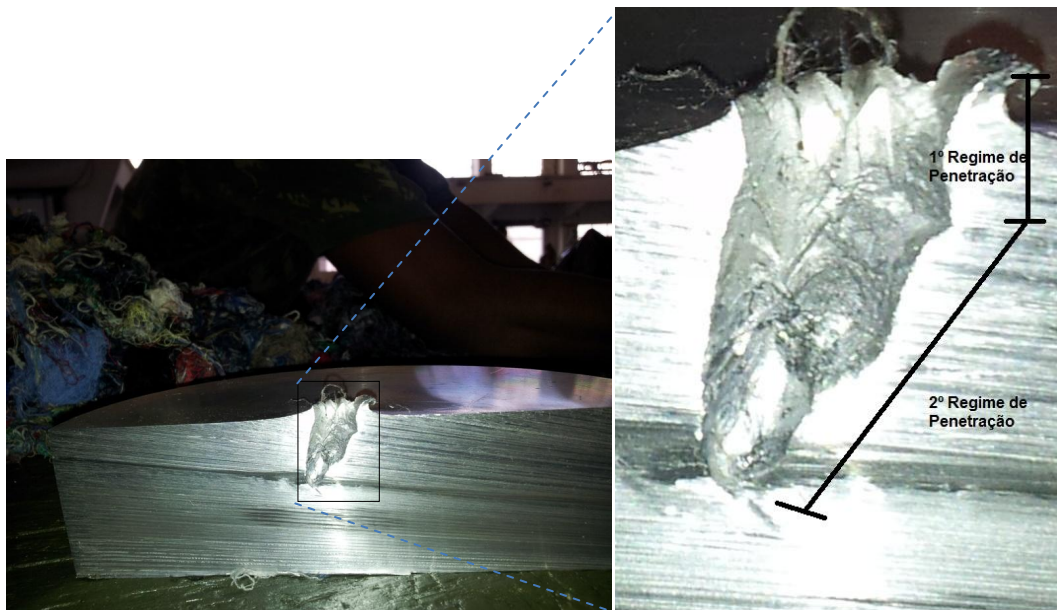


FIG. 4.18 Regimes de Penetração do projétil no alvo de alumínio.

O primeiro regime está sob influência do ângulo de Yaw, que vem a ser o ângulo entre o eixo longitudinal e a linha de trajetória do voo, e do ângulo de incidência, ou seja, o ângulo entre a linha normal da superfície e a linha de incidência do projétil, ocorrendo por processo adiabático, já que não há tempo para haver transmissão de calor.

Nota-se uma pequena inclinação (inferior a 10°) em relação à normal da superfície. O fenômeno de deformação pode ser explicado pela mecânica vibratória, dadas as marcas de ondas na superfície, observados na FIG. 4.18. Há disparos em que as assimetrias do orifício de entrada foram exageradas, o que sugere falta de controle de ângulo de Yaw e do ângulo de incidência. Sendo confirmada, portanto, a necessidade do monitoramento dos ensaios por câmera de altas velocidades. O material da jaqueta do projétil se funde e se deforma com o calor do impacto, conforme a FIG. 4.19. Contudo, a sua simulação é de muita relevância para a compreensão na mudança do regime de penetração.



FIG. 4.19 Jaqueta do projétil após penetração no alvo.

No segundo regime de penetração, há interação, por atrito, do núcleo perforante do projétil de aço com a parede do tarugo de alumínio, provocando aquecimento e fusão deste, além de uma mínima erosão da ponta do projétil, também observada na FIG. 4.19. Observou-se também a mudança do ângulo da trajetória de penetração de um valor de 10° para valores maiores de 30° . Houve redução do diâmetro do orifício de penetração pela perda da jaqueta. Contudo, não foi observada alteração relevante no bloco de chumbo do culote do projétil, como pode ser visto na FIG. 4.20.

Há indícios de que a mudança nas características do contato entre o núcleo de aço e o alvo seja responsável pela alteração da trajetória, aliado ao efeito de amolecimento do alumínio, por dissipação de energia cinética do projétil em forma de calor, influenciando o contato por diminuir a resistência do alvo, facilitando a penetração. Além disso, deve-se observar que o projétil possui rotação, isto é, possui velocidade angular, e que a alteração das condições de atrito pode haver induzido um momento angular, que altera a trajetória e a retirada do alumínio do alvo.



FIG. 4.20 Trajetória do projétil no alvo.

4.7 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES PRELIMINARES

4.7.1 ETAPA 1

As primeiras simulações apenas consideraram os tarugos de 100 mm de espessura, feitas com uma quantidade pequena de elementos (aproximadamente 11.400). Assim, os elementos possuem um tamanho relativamente grande. Ao sofrerem o impacto, eram apagados pelo *software* quando tiveram sua contribuição com os resultados prejudicada. O AUTODYN® realiza tal ação para aumentar a confiabilidade do resultado. A FIG. 4.21(a) apresenta o projétil modelado e a FIG. 4.21(b) ilustra um momento inicial da simulação com poucos elementos, contendo uma malha mais trabalhada na proximidade do contato do projétil com o alvo.

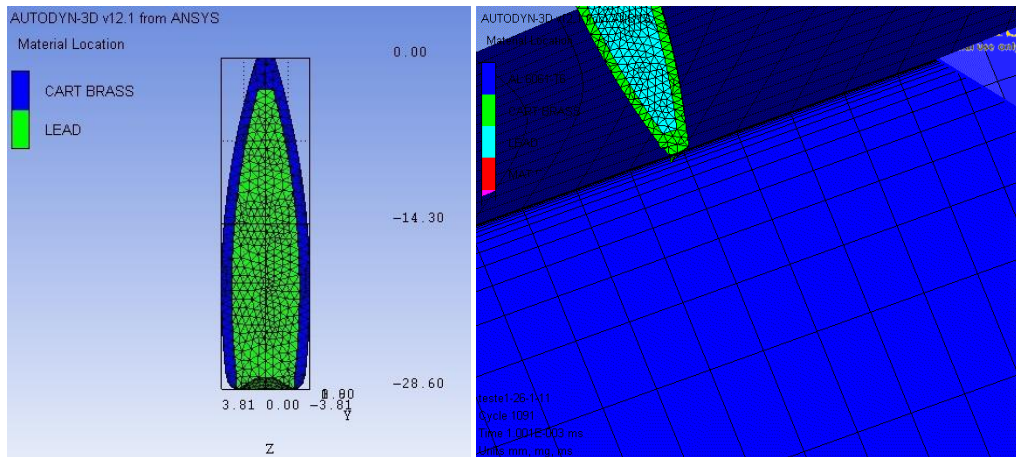


FIG. 4.21 (a) O projétil modelado e (b) Estágio inicial da simulação.

Após aproximadamente 30 horas rodando, as simulações paravam por volta do ciclo 25.300 devido a um erro quanto à incerteza da energia, acusado pela mensagem “energy error too large” mostrada pelo programa. Foram realizadas 10 simulações similares, porém todas apresentaram o mesmo erro. A FIG. 4.22(a) e (b) apresentam o momento em que a simulação parou devido a este erro no alvo com poucos elementos, mas em ciclos superiores e inferiores, respectivamente. Toda esta primeira etapa levou aproximadamente 380 horas.

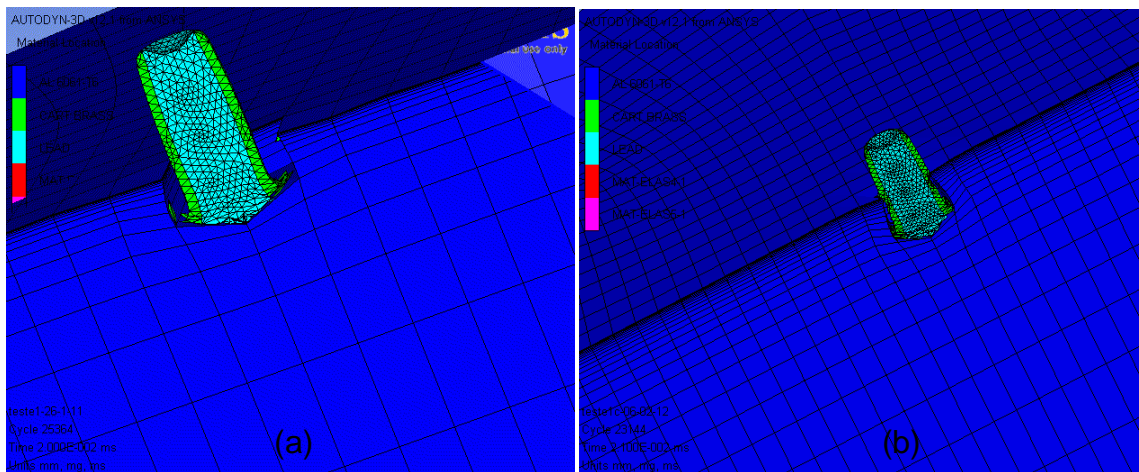


FIG. 4.22 Momento em que a simulação é interrompida pelo erro quanto à incerteza da energia no alvo com poucos elementos em (a) um alto ciclo e (b) baixo ciclo

4.7.2 ETAPA 2

A princípio, foi imaginado que as simulações paravam pelo fato da malha estar mal refinada. Mediante isso, foram simulados impactos no alvo agora composto por 255.000 elementos. A melhora do aspecto da penetração é perfeitamente notável, já que o espaço entre o projétil e o alvo, durante a penetração, se tornou menor, sendo mais similar à situação real. Porém, ocorreu a mesma mensagem de erro. Na FIG. 4.23(a), é observado o estágio inicial da simulação com essa nova quantidade de elementos, enquanto a FIG. 4.23(b) traz o instante em que a simulação para por conta do tal erro, na nova modelagem. Assim como a anterior, a etapa 2 levou um total aproximado de 380 horas e parava por volta do ciclo 27.000.

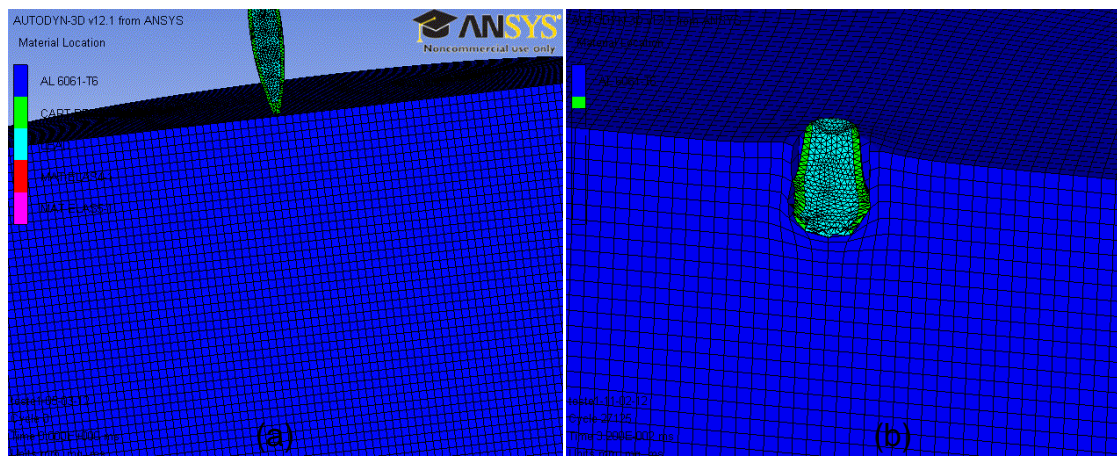


FIG. 4.23 Momentos da simulação com alvo composto por 255.000 de elementos na etapa 2; (a) estágio inicial e (b) estágio final.

4.7.3 ETAPA 3

Depois de 10 outras simulações e uma busca nas ferramentas do *software*, foi descoberto onde a incerteza podia ser alterada. Como padrão, o programa utiliza 5% de margem de segurança. Após aumentar esse parâmetro, a mensagem de erro não apareceu mais, permitindo que o ensaio fosse simulado no alvo contendo 255.000 elementos, estabelecido anteriormente.

Então, foram feitas algumas simulações, utilizando a velocidade máxima e a mínima, obtidas no ensaio DOP real: 887,55 m/s e 791,10 m/s. No entanto, todas tiveram um mesmo ponto inicial. Com essa quantidade de elementos, o tempo de cada simulação ininterrupta é de 35 horas, chegando até 38 horas. As FIG. 4.24 e 4.25 ilustram, respectivamente, o resultado final da penetração com a mais baixa e mais alta velocidade inicial. Como a espessura do tarugo modelado é de 100 mm, e possui 50 células ao longo de tal medida, conclui-se que cada célula equivale a 2 mm.

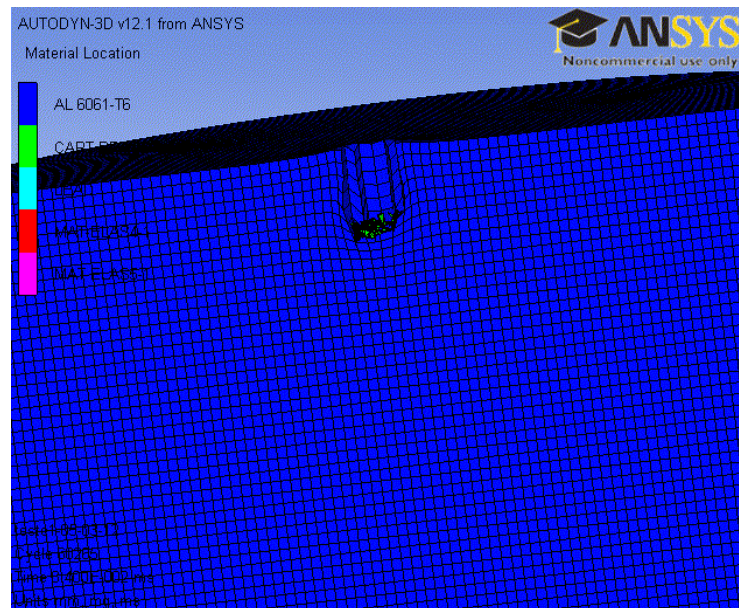


FIG. 4.24 Penetração máxima com velocidade inicial de 791,10 m/s.

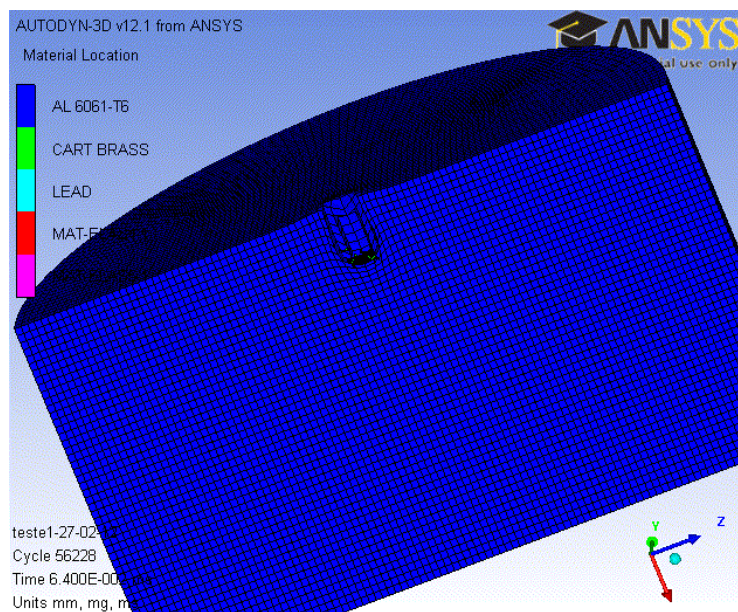


FIG. 4.25 Penetração máxima com velocidade inicial de 887,55 m/s.

Nota-se, pela FIG. 4.24, que o projétil obteve uma penetração máxima de aproximadamente 14 mm, uma vez que prosseguiu pela extensão de 7 elementos. Na FIG. 4.25, o projétil com a maior velocidade obtida consegue penetrar entre 15 e 16 mm no alvo.

Vale ressaltar que, nessas simulações já contendo um número maior de elementos, o advento de um pequeno retorno do projétil após obter a penetração máxima foi observado, ou seja, uma alteração no sentido do vetor velocidade, que depois tendeu a zero e se estabilizou. Este momento também ocorreu e foi registrado em outras pesquisas (WIŚNIEWSKI, 2009, FELI, 2011).

Wiśniewski e Tomaszewski, (WIŚNIEWSKI, 2009) registraram esse acontecimento durante a análise de um impacto de um projétil 12,7 mm Pf em um alvo de aço RHA. Em seu trabalho, Feli e Asgari (FELI, 2011) mencionam o ocorrido com a simulação de blindagens cerâmicas/compósitos sendo impactados por projétil de tungstênio. Mesmo os autores não mencionando a razão do retorno, tal acontecimento pode estar relacionado com o fato das simulações até então feitas não contarem com o atrito, apenas com a interação com a aceleração da gravidade.

Com o incidente com a Barra Hopkinson, o levantamento das propriedades dinâmicas da liga utilizada neste trabalho não pode ser realizado. Portanto, se fez necessária uma pesquisa sobre as propriedades da liga 6351 T6 necessárias para a utilização no programa. Elas tiveram seus valores anotados e inseridos no mesmo como um novo material. Assim, se tornou possível iniciar as simulações com a liga propriamente dita e a utilização do modelo de um projétil com ponta perfurante.

4.8 SIMULAÇÕES AVANÇADAS

Após a realização das simulações preliminares, tanto o alvo quanto o projétil foram remodelados. Conforme apresentado na FIG. 4.26, o alvo, por sua vez, foi modelado em duas partes, apenas com a finalidade de facilitar a criação da malha. Assim, uma das partes é a região de penetração principal do projétil (composta por 14.400 elementos), e a outra, o restante do alvo (composta de 55.856 elementos).

A região interna do alvo, além de ter a maior discretização, é aquela na qual se prevê que ocorra o fenômeno de penetração do projétil. Desta forma, os contatos foram definidos entre o projétil e esta região, apenas, evitando-se demandas computacionais ainda mais elevadas.

O projétil foi reformulado, sendo composto pela jaqueta (23.971 elementos), a base de chumbo (7.536 elementos) e o núcleo perfurante de aço (15.073 elementos).

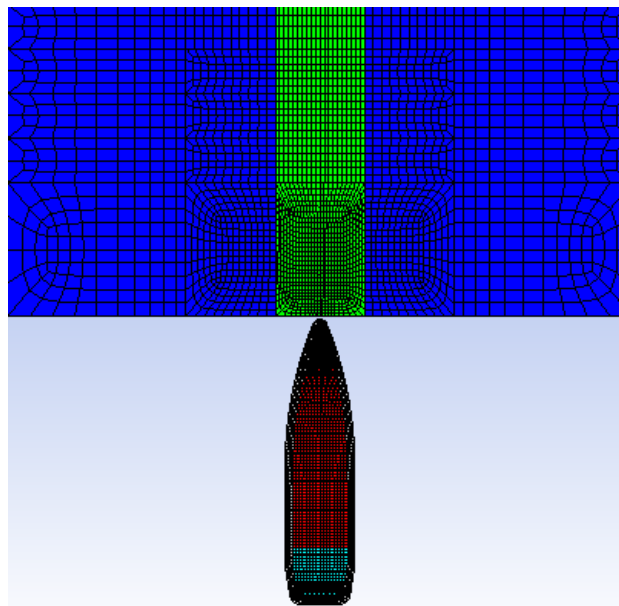


FIG. 4.26 Modelagem mais refinada do alvo e do projétil.

Mediante o fato de não se ter conhecimento sobre as propriedades dinâmicas do Tomback 70/30 necessárias para a simulação, foi adotado como material da jaqueta o latão (*Cart Brass*), já contido na biblioteca do *software*. Para a base de chumbo e o núcleo perfurante, foram utilizados, respectivamente, o chumbo (*Lead*) e aço 4340 (*Steel 4340*), também já presentes no programa.

Para a modelagem do alvo, foram inseridas propriedades, excetuando-se as dinâmicas, da própria liga 6351 T6, adicionando-a como um novo material. No entanto, como as propriedades dinâmicas da mesma tiveram seu levantamento prejudicado com o incidente ocorrido com a Barra Hopkinson, foram incorporadas as propriedades dinâmicas da liga 6061 T6, apresentadas por Takaffoli (2012).

Como uma primeira verificação do desempenho da nova modelagem, foi realizada uma simulação teste. Nesta, foi utilizada a velocidade máxima obtida. A

primeira mudança considerável foi quanto ao processamento. Toda a simulação teste durou entre 7 e 8 horas, ou seja, entre um terço e um quarto parte da duração das simulações preliminares. Tal resultado já revela a alta relevância da modelagem, pois nas simulações avançadas, há um total de 116.836 elementos, já nas preliminares, 259.832 elementos.

Nas simulações avançadas, foram adotadas técnicas de mapeamento para a obtenção de malhas de elementos hexaédricos, mais adequados à simulação explícita. Apenas pequenas regiões próximas à ponta do núcleo perforante não apresentaram condições geométricas adequadas ao mapeamento, resultando-se em formas degeneradas tetraédricas ou piramidais.

O tempo de penetração até que o projétil parasse por completo foi de aproximadamente 0,09 ms. Para atingir tal instante, a simulação findou no ciclo 80.000. A FIG. 4.27 mostra o momento supracitado.

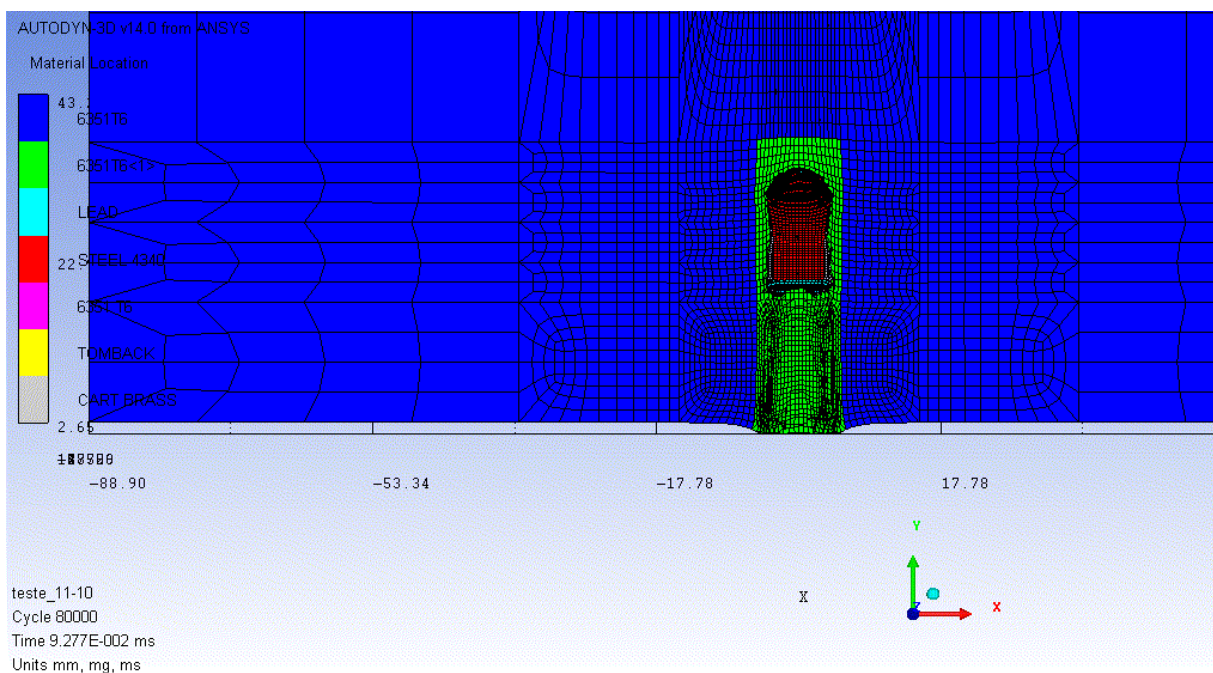


FIG. 4.27 Penetração máxima no teste da nova modelagem.

Foi observado que o elemento do núcleo perforante que mais penetrou no alvo, atingiu uma profundidade de 38,25 mm. Ao se comparar com a profundidade de penetração obtida no ensaio real com uma velocidade de impacto de 887,55 m/s, que foi de 38,15 mm, verifica-se uma diferença de apenas 0,24% a mais na simulação.

Contudo, a modelagem não continha os modelos de resistência e de falha completos. Para o alvo, foi adotado o modelo de resistência de Johnson-Cook (EQ. 3.1), no entanto, sem inserir os valores da constante de encruamento, do expoente de encruamento, do expoente de amolecimento térmico e da constante da taxa de deformação. Assim como a base de chumbo, não foi adotado nenhum modelo de falha. Porém, foi adotado como critério de erosão o *Geometric Strain* e EOS de choque. Todavia, para a base de chumbo, foi adotado o modelo de resistência de Steinberg-Guinan.

Para o núcleo de aço, importado da biblioteca do AUTODYN®, foram utilizados a EOS Linear, modelo de resistência e falha de Johnson-Cook, e a erosão, falha. Já para a jaqueta, também importada da biblioteca como *Cart Brass*, foi utilizado a EOS Linear, modelo de resistência de Johnson-Cook, nenhum modelo de falha, e erosão por *Geometric Strain*. A partir desse teste, foi dado início às simulações com a nova modelagem.

Foi possível observar que, em algumas simulações, o núcleo perforante também obteve uma mudança em sua trajetória, assim como no ensaio real. A FIG. 4.28 traz a visualização desta ocorrência. Além disso, revela também uma dada erosão da ponta de aço, conforme apontado no item 4.5.

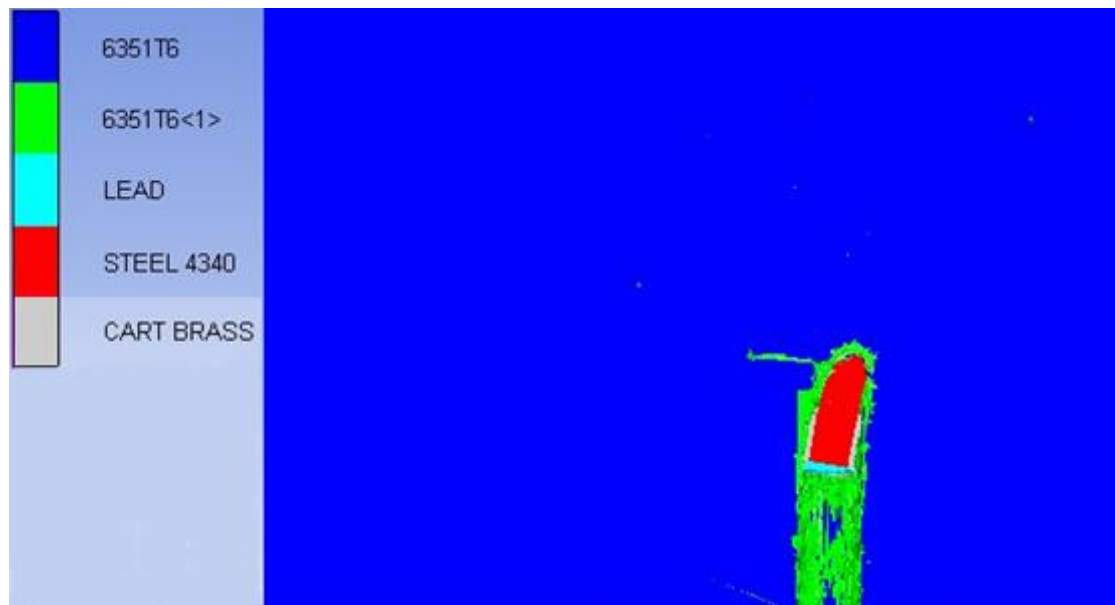


FIG. 4.28 Inclinação na trajetória do projétil indicada pela simulação.

Por meio da FIG. 4.29, pode-se observar uma semelhança entre o ensaio real e a simulação.

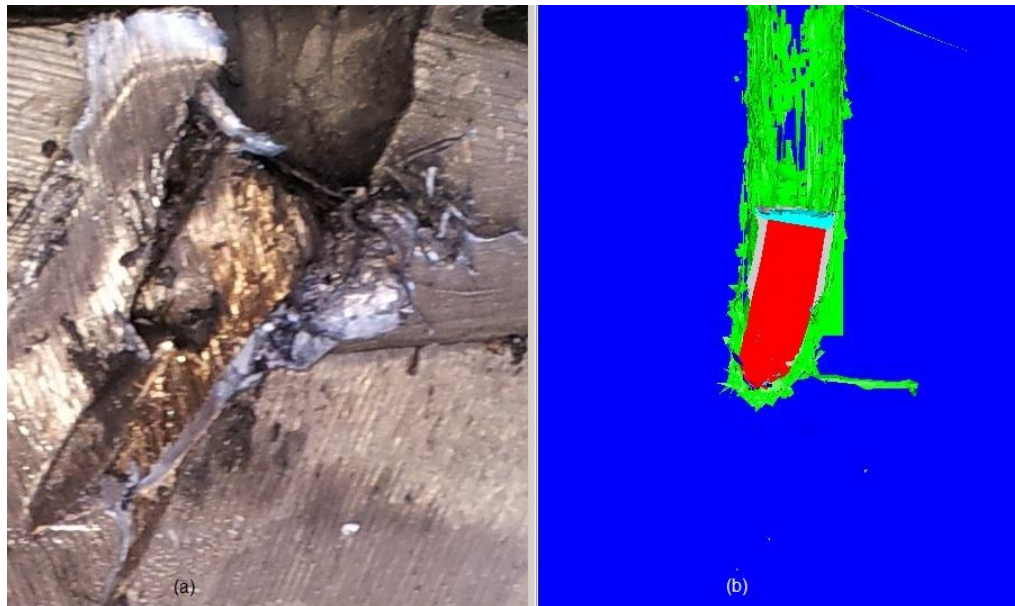


FIG. 4.29 Comparação entre a trajetória da penetração (a) no ensaio real e (b) na simulação.

Com a inserção do modelo de falha de Johnson-Cook para o alvo, e a sua erosão baseada no modelo de falha, o tempo da simulação se elevou consideravelmente, obtendo-se uma média de 28 horas. No entanto, a verossimilhança é bem mais elevada, culminando em resultados mais fidedignos. Portanto, devido ao tempo que cada simulação demandava e à disponibilidade da licença, foram simulados os impactos em três faixas de velocidade: a mínima, de 791,10 m/s, uma intermediária, de 826,04 m/s, e a máxima, de 887,55 m/s.

A TAB. 4.6 apresenta os resultados obtidos na simulação do impacto em alvos de 100 mm de espessura.

TAB. 4.6 Penetração nos tarugos de 100 mm de espessura obtida pela simulação.

| # | Velocidade (m/s) | Penetração (mm) |
|---|------------------|-----------------|
| 1 | 887,55 | 37,70 |
| 2 | 826,04 | 45,23 |
| 3 | 791,10 | 46,65 |

Contudo, ao decorrer de algumas outras simulações, foi observado que o projétil tinha sua velocidade reduzida e permanecia constante (entre 380 e 580 m/s).

Tal fato não poderia ocorrer, uma vez que o alvo realizaria trabalho devido à força de atrito. Sendo assim, o projétil deveria ter sua energia cinética reduzida por toda extensão de penetração no alvo.

Então, foi verificado que a parte do contato na região azul do alvo, como ilustrado na FIG. 4.30, não havia sido trabalhada. Isto significa que, para o projétil, era como se não houvesse material nessa parte do tarugo.

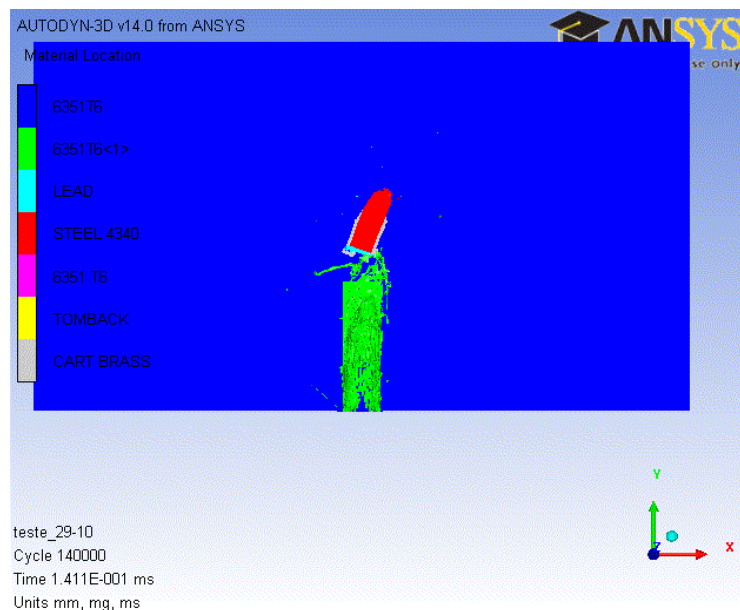


FIG. 4.30 Projétil penetrando com velocidade constante dentro do alvo.

Sanado tal problema, as simulações deram prosseguimento. Com a inserção do comando de contato para tal região também, a demanda computacional se elevou, com o tempo da simulação, agora, chegando à casa das 36 horas.

Nos anexos e apêndices estão contidos os dados referentes a algumas simulações que serviram como base tanto para as análises preliminares, quanto para as avançadas, haja vista que a variação mor entre elas foi a velocidade de impacto. Entretanto, outros erros surgiram durante as simulações. Estes estavam ligados ao *timestep* (passo de tempo de integração) e à incerteza da energia.

Como uma última forma de se evitar tais erros e obter mais uma simulação confiável e funcional, foi reutilizada a última simulação que obteve êxito, inserindo os parâmetros até então ausentes na mesma, como as propriedades do material

necessárias para o modelo de resistência de Johnson-Cook para o alvo (TAKAFFOLI, 2012), e a alteração da equação de estado do núcleo perfurante para choque, cujos dados foram levantados por Steinberg (1978).

Traçando-se um gráfico entre os valores da profundidade de penetração obtidos no ensaio real e os obtidos, pela simulação, observa-se uma considerável coerência entre os mesmos, como pode ser observado na FIG. 4.31. Os valores possuem um desvio padrão de 2,02 mm, para a velocidade de 791,10 m/s, 4,97 mm para a velocidade de 826,04 m/s, e de 0,32 mm, para a velocidade de 887,55 m/s.

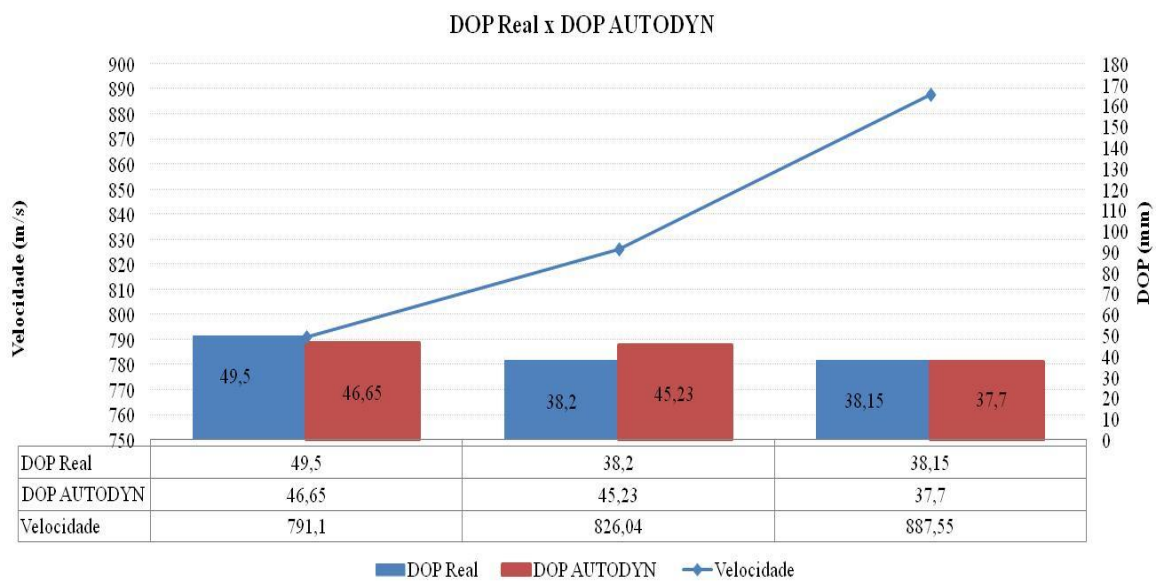


FIG. 4.31 Gráfico comparativo entre as profundidades de penetração obtidas pelo ensaio real e pela simulação.

5. CONCLUSÕES

Um ensaio DOP foi realizado em uma liga de alumínio 6351 T6 com projétil 7,62 mm Pf.

Os resultados obtidos nesta pesquisa, com o ensaio balístico na liga de alumínio 6351 T6 e sua simulação, são inéditos.

Pode ser notado um pequeno aumento da profundidade de penetração devido ao aumento da velocidade de impacto. O método de aferição a partir da base do projétil deve ser revisado, uma vez que a deformação plástica existente na superfície não permitia um bom posicionamento do paquímetro, dificultando a medição. A análise por ultrassom não foi eficaz, já que o contato com a ponta do núcleo perforante dispersava o sinal emitido.

Neste ensejo, foram realizados cortes nas peças, a fim de visualizar a ponta do núcleo perforante e, assim, realizar a medida da profundidade de penetração de forma mais precisa. Os resultados tiveram uma variação considerável em relação aos preliminares, uma vez que houve uma mudança na trajetória do projétil dentro do alvo. A mudança nas características do contato entre o núcleo de aço e o alvo pode ter sido responsável por tal alteração, aliado ao efeito de amolecimento do alumínio, além do fato do projétil possuir rotação e a possibilidade de haver um momento angular induzido, alterando a trajetória e a retirada do alumínio do alvo.

O desempenho balístico tanto dos alvos com 100 mm de espessura, quanto os de 50 mm, foram compatíveis. Como apenas um disparo indicou provável perfuração no alvo de 50 mm, tal resultado sugere que essa é a espessura mínima segura para utilização de tarugos dessa liga em casos balísticos.

Os resultados adquiridos a partir do ensaio real e das simulações preliminares obtiveram resultados consistentes. Isto pode ser justificado pelo fato da liga de alumínio 6061 T6 simulada e a 6351 T6 possuírem propriedades similares. Além disso, embora as medições tenham sido efetuadas a partir da base do projétil, o núcleo perforante não foi modelado, o que, em parte, equilibrou os resultados.

Como era plausível de se esperar, a modelagem mais completa, contendo o núcleo perforante e a liga 6351 T6 como alvo, também implicou em resultados

consistentes. Estes resultados confirmam a boa capacidade do AUTODYN® em simulação de impactos balísticos.

Como não houve um tempo hábil para um estudo paralelo sobre a balística de voo e terminal da munição da CBC utilizada no presente trabalho, é possível afirmar que eventuais discrepâncias na alteração da trajetória do projétil no interior do alvo possam estar relacionadas à parâmetros balísticos da munição não considerados no desenvolvimento da simulação. Assim, o não acompanhamento dos disparos por câmera de alta resolução prejudicou a simulação.

As análises por microscopia eletrônica de varredura e estereoscopia dos alvos balísticos, apresentaram resultados interessantes. Onde a oxidação não estava tão presente, foi possível a observação de distintos modos de fratura, correspondendo às suas respectivas causas. Estiveram presentes, principalmente, trincas.

É importante ressaltar que a simulação não substitui completamente os estudos experimentais. Um deve complementar o outro para que se obtenham resultados positivos de modo mais rápido, seguro e menos dispendioso possível.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Seria desejável e de extrema importância a utilização, em ensaios balísticos futuros, da devida instrumentação para análise da balística de voo e terminal, através de câmeras de altas velocidades, a fim de monitorar os ângulos de Yaw e de incidência.

Ainda neste ensejo de relevância, se encaixa a realização de ensaios na Barra Hopkinson para levantamento de propriedades dinâmicas da própria liga de alumínio 6351 T6, objetivando inserir tais resultados em próximas simulações. A simulação dos impactos balísticos nos alvos com 50 mm e sua comparação com o ensaio real também poderia ser realizada.

A verificação da profundidade de penetração por raios-X pode ser uma grande aliada, uma vez que cortes nas peças, além de danificar serras da máquina de corte, pode atrapalhar a análise microscópica da trajetória do projétil no alvo.

Faz-se necessária também a aquisição de computadores com maior capacidade de processamento, buscando que o tempo computacional diminua consideravelmente. Tratando-se ainda de aquisição, uma maior disponibilidade de licenças para os usuários do *software* permitiria que as análises computacionais pudessem ser realizadas com maiores frequências.

A inserção de um ângulo de incidência diferente de 0° na simulação para verificar os efeitos de tal inclinação na trajetória do projétil dentro do alvo, bem como na profundidade de penetração obtida.

Uma modelagem com um quarto de alvo e projétil pode ajudar na demanda computacional, reduzindo o tempo de processamento. No entanto, pode entrar em choque com a possível mudança de trajetória do projétil dentro do alvo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 15000, **Blindagens para impactos balísticos – Classificação e critérios de avaliação**, 2005.

AMORIM JÚNIOR, W. F. **Processamento de placa espessa de compósito através de Moldagem por Transferência de Resina**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

ARAÚJO, E. S, PESTANA, R, C. **Análise dos Métodos de Diferenças Finitas e Expansão Rápida na migração reversa no tempo**. Revista Brasileira de Geofísica, São Paulo, v. 28, n. 4, pp 723-739, 2010.

ANSYS AUTODYN User's Manual. Theory Manual, Release 13.0, 2010.

ASM METALS HANDBOOK, Vol 2, **Properties and selection: Nonferrous Alloys and Specials-Purpose Materials**, 1992.

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1ª Edição, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2003.

BUENO, A. F. **Determinação do Coeficiente de Atrito para as Lidas de Alumínio AA6351 e de Titânio Ti6Al4V pelos Métodos do Anel e Tubo Cônico**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

BUZINELLI, D. V., MALITE, M. **Dimensionamento de Elementos Estruturais em Alumínio**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 10, n. 46, p. 1-31, 2008.

CARDOSO, A. L. V. **Caracterização dinâmica por impacto de cerâmicos à base de alumina**. Tese de Doutorado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.

COUTO, A. A.; MELO, N. M. P.; CABRAL NETO, A.; RAIA, F.; MACHADO, K. B. S. C., **Estudo do Comportamento em Fadiga de ligas de Alumínio endurecidas por precipitação**. 18º CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto de Galinhas, PE, Brasil, p. 8973-8984, 2008.

DEDAVID, B. A., GOMES, C. I., MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura – Aplicações e preparação de amostras.** EDIPUCRS, PUCRS, Porto Alegre, 2007.

DELBONI, C. P. **Análise Experimental da Degradação Térmica da Liga de Alumínio 6351 T6 para uso estrutural.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2007.

FELI, S., ASGARI, M. R. **Finite element simulation of ceramic/composite armor under ballistic.** Composites: Part B, 42, pp. 771-780, 2011.

GAMA, B. A., GILLESPIE, J. W. **Finite element modeling of impact, damage evolution and penetration of thick-section composites.** International Journal of Impact Engineering 38, pp 181-197, 2011.

GILAT, A., CLIFTON, R. J. **Pressure-shear Waves in 6060-T6 Aluminum and Alpha-Titanium.** Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 33, n 3, pp 263-284, 1985.

GOLDSMITH, W. **Impact – The Theory and Physical Behavior of Colliding Solids,** Dover, NY, pp 82-91, 2001.

GOMES, A.V., **Comportamento Balístico de Alumina com Adição de Nióbia e Variação da Geometria do Alvo.** Tese de Doutorado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2004.

HAZELL, P. J. **Measuring the strength of brittle materials by Depth Of Penetration testing.** Institute of Materials, Minerals and Mining, 08, v. 109, pp 1217–1225, 2010.

HOME PAGE:

(<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ca1cf891973c4745b41677780dad6240>). (capturado em 20/03/2012)

HOME PAGE: (<http://www.abal.org.br/aluminio/vantagens.asp>) (capturado em 01/08/12)

- HUGONNIOT, P. H. **Mémoire sur la propagation du mouvement dans les corps et plus spécialement dans les gaz parfaits.** 2e Partie, J. Ecole Polytech, Paris, 58,pp 1-125, 1889.
- JOHNSON, G.R., COOK, W.H. **A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperature.** 7th International Symposium on Ballistics, the Hague, Netherlands, 1983.
- JOHNSON, J. N., CHÉRET, R. **Shock waves in solids: an evolutionary perspective.** Shock Waves, v. 9, Number 3, pp 193-200, 1999.
- JUSTO, J. M. C. F., **Estudo do Comportamento ao Impacto de Alta Velocidade de Estruturas em Materiais Compósitos.** Tese de Doutoramento, FEUP, Portugal, 2005.
- LAPA, J. A. M. **Análise dinâmica linear e não-linear de estruturas.** Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Portugal, 1987.
- LIBERSKY, L. D., PETSCHKE, A. G., CARNEY, T. C., HIPPI, J. R., ALLAHDADI, F. A. **High strain Lagrangian hydrodynamics; A three-dimensional SPH code for dynamic material response.** Journal of Computational Physics, v.109, p.67-75, 1993.
- LOPES, C. R., **Spalling e DOP em alvos metálicos – Estudos analíticos e numéricos.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Portugal, 2009.
- MEYERS, M.A. **Dynamic behavior of materials.** John Wiley & Sons, 1994.
- MIL-STD-376 **Ballistic Performance Ranking of Ceramic Armor Plates against High Density Penetrators,** Department of Defense, United States of America, 1993.
- PARTOM, Y., YAZIV, D. et al. **Penetration of AP projectiles into spaced ceramic targets.** 19th International Symposium on Ballistics, 3, pp. 1175-1181, 2001.
- QUAN, X., et al. **Numerical Simulation of Structural Deformation under Shock and Impact Loads using a Coupled Multi-Solver Approach.** 5th Asia-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures. November 12-14, Hunan, China, 2003.

- RAMADHAN, A. A., ABU TALIB, A. R., MOHD RAFIE, A. S., ZAHARI, R. **High velocity impact response of Kevlar-29/epoxy and 6061-T6 aluminum laminated.** *Materials and Design*, 43, pp. 307-321, 2013.
- RAMSAROOP, A.; KANNY, K. **Using MATLAB to Design and Analyse Composite Laminates.** *Scientific Research Publishing, Engineering*, 2, 904-916, 2010.
- RANKINE, W. J. M. **On the thermodynamic theory of waves of finite longitudinal disturbance.** *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 160, pp 277-286, 1870.
- RICE M. H., MCQUEEN, R.G., WALSH, J. M. **Compression of Solids by Strong Waves.** in *Solid State Physics*, F. Seitz, D. Turnbull (Eds.), v. 6, Academic Press, New York, pp 1-63, 1958.
- ROSENBERG, Z., YESHURUN Y., BLESS, S. J., OKAJIMA, K. **A new definition of ballistic efficiency of brittle materials based on the use of thick backing plates,** in *Impact loading and dynamic behavior of materials based on the use of thick backing materials*, (ed. CHIEM, C. Y. et al.), DGM Informationsgesellschaft mbH, Oberursel, pp. 491-498, 1988.
- SANTOS, V. C. **Uma Proposta de Metodologia para Otimização em Confiabilidade de Blindagem Aeronáutica a partir de Simulações Computacionais.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, 2009.
- SANTOS, A. R., PARADELLA, W. R., VENEZIANI, P., MORAIS, M. C. **A Estereoscopia com imagens Radarsat-1: Uma Avaliação Geológica na província mineral de Carajás.** *Revista Brasileira de Geociências*, 29, pp. 627-632, 1999.
- SCHAEFFER, L., DE LIMA, D. R. S., YURGEL C. C. **Estudo da Microestrutura e da Dureza da liga de Alumínio AA6351 após o forjamento e tratamento térmico.** 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, 2006.
- SEVERO, M. A.; RODRIGUES, L.; CALDEIRA, P.; TRAVASSOS, J. **Simulação de Impacto Balístico.** Livro de Resumos das 3^{as} Jornadas Politécnicas de Engenharia, Coimbra, Portugal, 2003.

- SKAF, T. B. **Sinterização e comportamento dinâmico do aluminato de magnésio aditivado com LiF e CaO.** Tese de Doutorado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.
- SKRIPNYAK, V. A., POTEKAEV, A. I. **Shear Strength of Metals Behind Shock Fronts.** Russian Physics Journal, 38, N° 10, pp. 1057-1060, 1995.
- SOARES, M. R. N. **Efeitos dos ciclos de envelhecimento no comportamento de ligas de alumínio.** Tese de Doutorado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2009.
- STEINBERG, D. J., GUINAN, M. W. **A High-Strain-Rate Constitutive Model for Metals,** UCRL-80465, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 1978.
- TAKAFFOLI, M., PAPINI, M. **Numerical simulation of solid particle impacts on Al6061-T6 part I: Three-dimensional representation of angular particles.** Wear, 292-293, pp. 100-110, 2012.
- THAM, C. Y. **Reinforced concrete perforation and penetration simulation using AUTODYN-3D.** Finite Elements in Analysis and Design, 41, pp. 1401–1410, 2005.
- WIŚNIEWSKI, A., TOMASZEWSKI, L. **Analysis of Penetration Depth with the use of AUTODYN 5 Program.** Problemy Techniki Uzbrojenia, Z. 110, No. 5, pp 47-56, 2009.
- YI, F., ZHU, Z., FANGQIUO, Z., SHISHENG, H., YI, P. **Strain rate effects on the compressive property and the energy-absorbing capacity of aluminum alloys.** Materials Characterization, 47, pp. 417–422, 2001.

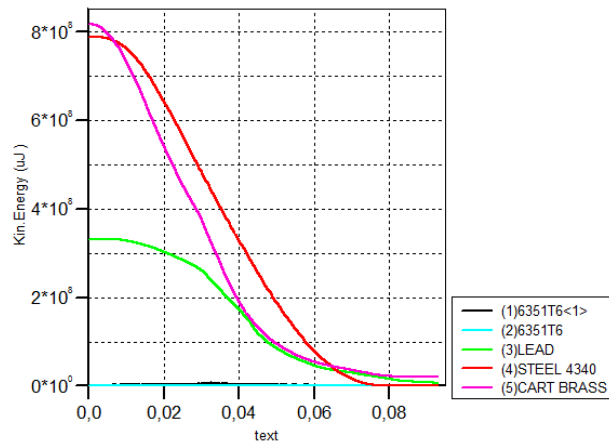
8. APÊNDICES

8.1 APÊNDICE 1: GRÁFICOS DA ENERGIA CINÉTICA

a) Velocidade de 887,55 m/s

AUTODYN-3D v14.0 from ANSYS

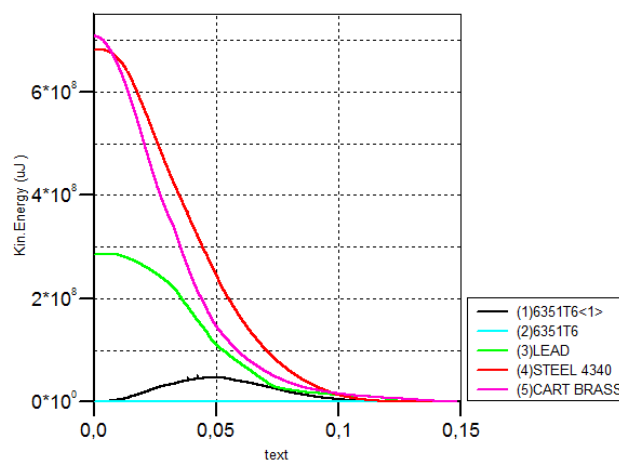
Material Summary (Ident 0 - teste_11-10)



b) Velocidade de 826,04 m/s

AUTODYN-3D v14.0 from ANSYS

Material Summary (Ident 0 - teste_15-11_v826,04)



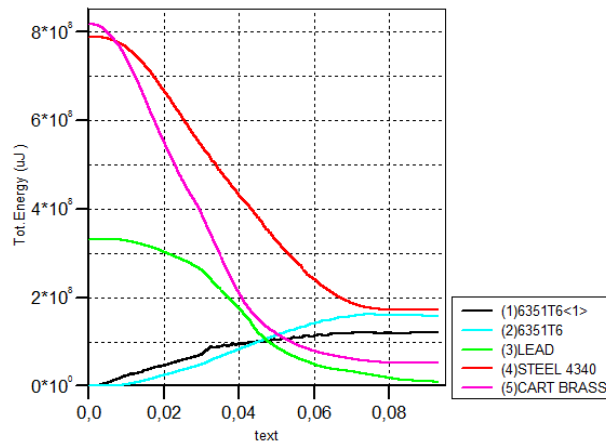
- c) Velocidade de 791,10 m/s: Houve um erro no programa que fez com que todo o histórico (History) dessa simulação se perdesse.

8.2 APÊNDICE 2: GRÁFICOS DA ENERGIA TOTAL

a) Velocidade de 887,55 m/s

AUTODYN-3D v14.0 from ANSYS

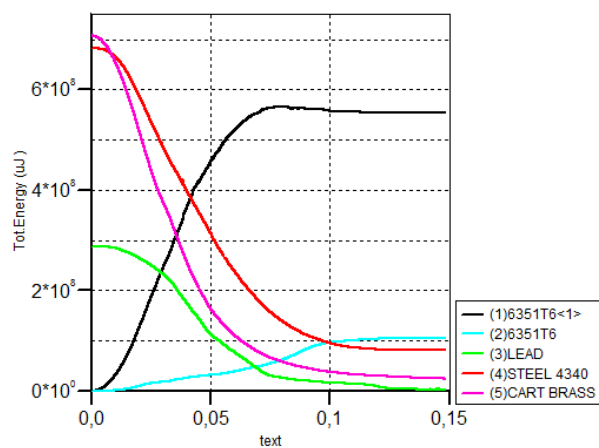
Material Summary (Ident 0 - teste_11-10)



b) Velocidade de 826,04 m/s

AUTODYN-3D v14.0 from ANSYS

Material Summary (Ident 0 - teste_15-11_v826,04)



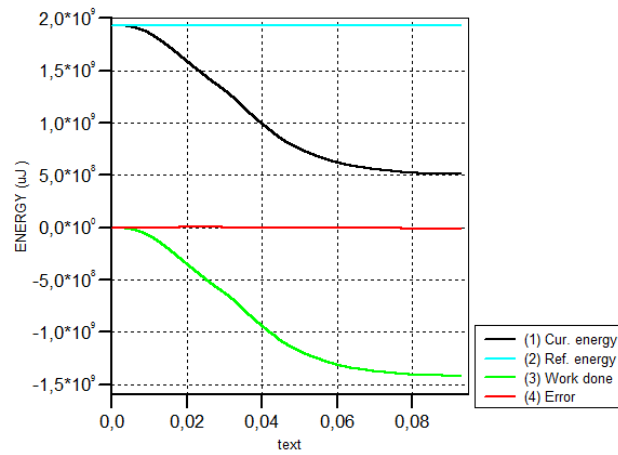
- c) Velocidade de 791,10 m/s: Houve um erro no programa que fez com que todo o histórico (History) dessa simulação se perdesse.

8.3 APÊNDICE 3: GRÁFICOS DA ENERGIA

a) Velocidade de 887,55 m/s

AUTODYN-3D v14.0 from ANSYS

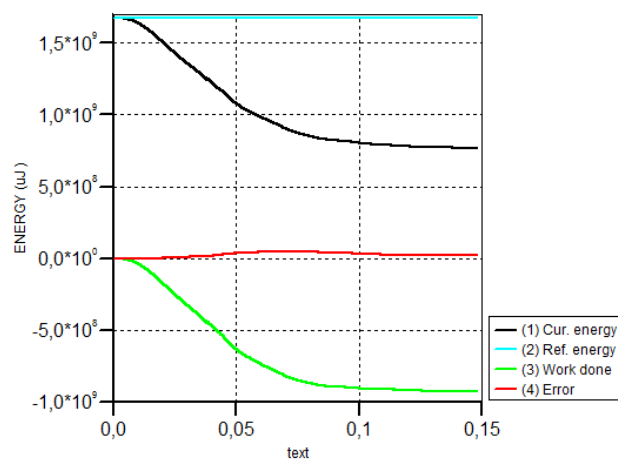
Energy Summary (Ident 0 - teste_11-10)



b) Velocidade de 826,04 m/s

AUTODYN-3D v14.0 from ANSYS

Energy Summary (Ident 0 - teste_15-11_v826,04)



- c) Velocidade de 791,10 m/s: Houve um erro no programa que fez com que todo o histórico (History) dessa simulação se perdesse.

9. ANEXOS

9.1 ANEXO 1: PROPRIEDADES DE ENTRADA DO ALVO (AA 6351 T6).

a) EOS: Shock

| Parâmetros | Valores |
|-------------------------------|-----------|
| Coefficiente de Gruneisen | 2,0 |
| Parâmetro C1 (m/s) | 5,328e+03 |
| Parâmetro S1 | 1,338 |
| Temperatura de referência (K) | 293,0 |
| Calor Específico (J/kgK) | 885 |
| Condutividade Térmica (J/mKs) | 176,0 |

b) Resistência: Johnson-Cook

| Parâmetros | Valores |
|---------------------------------------|----------|
| Módulo de Cisalhamento (kPa) | 2,6e+07 |
| Tensão de Escoamento (kPa) | 2,83e+05 |
| Constante de Endurecimento (kPa) | 85,0e+03 |
| Expoente de Endurecimento | 0,012 |
| Constante da Taxa de Deformação | 0,002 |
| Expoente de Amolecimento Térmico | 1 |
| Temperatura de Fusão (K) | 922,0 |
| Taxa de Deformação de Referência (/s) | 1,0 |
| Correção da Taxa de Deformação | 1º Ordem |

c) Falha: Johnson-Cook

| Parâmetros | Valores |
|---------------------------------------|---------|
| Constante de Dano D_1 | -0,77 |
| Constante de Dano D_2 | 1,45 |
| Constante de Dano D_3 | 0,47 |
| Constante de Dano D_4 | 0,00 |
| Constante de Dano D_5 | 1,60 |
| Temperatura de Fusão (K) | 922,0 |
| Taxa de Deformação de Referência (/s) | 1,0 |

d) Erosão: Falha

9.2 ANEXO 2: PROPRIEDADES DE ENTRADA DO NÚCLEO PERFURANTE (SAE/AISI 4340).

a) EOS: Linear

| Parâmetros | Valores |
|-------------------------------|----------|
| Bulk Modulus | 1,59e+08 |
| Temperatura de referência (K) | 300,0 |
| Calor Específico (J/kgK) | 477,0 |
| Condutividade Térmica (J/mKs) | 0,0 |

b) Resistência: Johnson-Cook

| Parâmetros | Valores |
|---------------------------------------|----------|
| Módulo de Cisalhamento (kPa) | 7,7e+07 |
| Tensão de Escoamento (kPa) | 7,92e+05 |
| Constante de Endurecimento (kPa) | 5,10e+05 |
| Expoente de Endurecimento | 0,26 |
| Constante da Taxa de Deformação | 0,014 |
| Expoente de Amolecimento Térmico | 1,03 |
| Temperatura de Fusão (K) | 1.793,0 |
| Taxa de Deformação de Referência (/s) | 1,0 |
| Correção da Taxa de Deformação | 1º Ordem |

c) Falha: Johnson-Cook

| Parâmetros | Valores |
|---------------------------------------|---------|
| Constante de Dano D_1 | 0,05 |
| Constante de Dano D_2 | 3,44 |
| Constante de Dano D_3 | -2,12 |
| Constante de Dano D_4 | 0,002 |
| Constante de Dano D_5 | 0,61 |
| Temperatura de Fusão (K) | 1.793,0 |
| Taxa de Deformação de Referência (/s) | 1,0 |

d) Erosão: Falha

9.3 ANEXO 3: PROPRIEDADES DE ENTRADA DA BASE DE CHUMBO (LEAD).

a) EOS: Shock

| Parâmetros | Valores |
|-------------------------------|-----------|
| Coeficiente de Gruneisen | 2,74 |
| Parâmetro C1 (m/s) | 2,006e+03 |
| Parâmetro S1 | 1,429 |
| Temperatura de referência (K) | 300,0 |
| Calor Específico (J/kgK) | 124 |

b) Resistência: Steinberg-Guinan

| Parâmetros | Valores |
|-----------------------------------|------------|
| Módulo de Cisalhamento (kPa) | 8,6e+06 |
| Tensão de Escoamento (kPa) | 8,0e+03 |
| Tensão de Escoamento Máxima (kPa) | 1,0e+05 |
| Constante de Endurecimento | 110,0 |
| Expoente de Endurecimento | 0,52 |
| Derivada $\frac{dG}{dP}$ | 1,00 |
| Derivada $\frac{dG}{dT}$ | -9,976e+03 |
| Derivada $\frac{dY}{dP}$ | 9,304e-04 |

c) Falha: nenhum

d) Erosão: Deformação Geométrica

| Parâmetros | Valores |
|------------------------------|-------------|
| Deformação de Erosão | 0,8 |
| Tipo de Deformação de Erosão | Instantânea |

9.4 ANEXO 4: PROPRIEDADES DE ENTRADA DA JAQUETA DO PROJÉTIL (CART BRASS).

a) EOS: Shock

| Parâmetros | Valores |
|-------------------------------|-----------|
| Coefficiente de Gruneisen | 2,04 |
| Parâmetro C1 (m/s) | 3,726e+03 |
| Parâmetro S1 | 1,434 |
| Temperatura de referência (K) | 300,0 |
| Calor Específico (J/kgK) | 385 |

b) Resistência: Johnson-Cook

| Parâmetros | Valores |
|---------------------------------------|----------|
| Módulo de Cisalhamento (kPa) | 3,74+07 |
| Tensão de Escoamento (kPa) | 1,12e+05 |
| Constante de Endurecimento (kPa) | 5,05e+05 |
| Expoente de Endurecimento | 0,42 |
| Constante da Taxa de Deformação | 0,009 |
| Expoente de Amolecimento Térmico | 1,68 |
| Temperatura de Fusão (K) | 1.189,0 |
| Taxa de Deformação de Referência (/s) | 1,0 |
| Correção da Taxa de Deformação | 1º Ordem |

c) Falha: Nenhum

d) Erosão: Deformação Geométrica

| Parâmetros | Valores |
|------------------------------|-------------|
| Deformação de Erosão | 0,8 |
| Tipo de Deformação de Erosão | Instantânea |