

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

ALLAN ANDERSON GONÇALVES FERREIRA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO CANHÃO-
PROJÉTIL DE CARRO DE COMBATE DURANTE O TIRO**

Rio de Janeiro

2017

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

ALLAN ANDERSON GONÇALVES FERREIRA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO CANHÃO-
PROJÉTIL DE CARRO DE COMBATE DURANTE O TIRO**

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

Orientador: Jorge Audrin Morgado de Gois - Cel.

Co-orientador: Aldélio Bueno Caldeira - Maj.

Rio de Janeiro

2017

c2017

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

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

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

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

623.51 Ferreira, Allan Anderson Gonçalves

F383a Análise do comportamento dinâmico do canhão-projétil de carro de combate durante o tiro / Allan Anderson Gonçalves Ferreira; orientado por Jorge Audrin Morgado de Góis; Aldélio Bueno Caldeira – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2017.

96p.: il.

Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2017.

1. Curso de Engenharia Mecânica – teses e dissertações. 2. Balística. 3. Elementos finitos. I. Góis, Jorge Audrin Morgado de. II. Caldeira, Aldélio Bueno. III. Título. IV. Instituto Militar de Engenharia.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

ALLAN ANDERSON GONÇALVES FERREIRA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO CANHÃO-
PROJÉTIL DE CARRO DE COMBATE DURANTE O TIRO**

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

Orientador: Prof. Jorge Audrin Morgado de Gois- Dr. Ing.

Co-orientador: Prof. Aldélio Bueno Caldeira – D.C

Aprovada em 27 de abril de 2017 pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Jorge Audrin Morgado de Góis – Dr. Ing do IME

Prof. Aldélio Bueno Caldeira – D.C. do IME.

Prof. André Louzada Moreira – D.C. da Escola Naval.

Prof. Achille Arantes Bassi D.C. do IME.

Rio de Janeiro

2017

3

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todos os desafios e conquistas realizadas até aqui. Aos meus pais, Paulo e Dulce, por todo apoio e compreensão. A minha esposa Daiane pelo carinho e suporte dado em todo momento. Aos meus irmãos, Paulo, André e Adriana pelo incentivo e amizade, especialmente a Adriana que sempre me apoiou em todos os momentos.

Aos professores do departamento de Engenharia Mecânica e Materiais, em especial aos professores Jorge Audrin Morgado de Gois e Aldélio Bueno Caldeira, pela ajuda e orientação deste trabalho. Aos professores Marcelo Leão e André Rezende, pelo apoio e conhecimento compartilhado. Ao professor Achiles Arantes pelo suporte acadêmico e contribuição na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	7
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE SÍMBOLOS.....	11
LISTA DE SIGLAS	13
1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Motivação	17
1.2 Objetivo	18
1.3 Revisão bibliográfica	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1 Balística interna	23
2.2 Sistema mecânico de lançamento do projétil	24
2.3 Tubo da arma	25
2.4 Munição apfsds	25
2.5 Batimento	26
3. MODELO FÍSICO.....	28
4. MODELO MATEMÁTICO.....	33
5. SOLUÇÃO NUMÉRICA.....	40
5.1. Análise estática	45
5.2. Integração no tempo.....	46
5.3. Estabilidade da solução.....	49
5.4. Escolha do material	50

5.5.	Escolha do elemento e estudo da malha.....	50
5.6.	Tipos de contatos.....	52
6.	RESULTADOS DO ESTUDO DO BATIMENTO.....	55
7.	CONCLUSÃO.....	89
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
9.	ANEXO.....	94
9.1	Licença Is-dyna.....	95

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG 2.1	Variáveis da Balística Exterior (Adaptado de U.S. ARMY 1968 e CARLUCCI; JACOBSON, 2008, p.186).	24
FIG 2.2	Principais componentes da arma (Adaptado de FARRAR; LEEMING, 1983).	24
FIG 2.3	Munição de Calibre 120 mm M829A2 APFSDS (Adaptado de UNITED STATES ARMY, 2000).	26
FIG 2.4	Movimento do projétil e seu eixo de coordenadas. (baseado em NEWILL et al.,2001).	27
FIG 3.1	Curva de Pressão em função do tempo utilizada na culatra do projétil (Adaptado de LEITE, 2015).	28
FIG 3.2	Geometria da arma em milímetros, dimensões adaptada de (HASENBEIN,1993)	29
FIG 3.3	Geometria do Projétil. (LEITE, 2015).	30
FIG 4.1	Modelo da arma para condições de contorno.	34
FIG 4.2	Modelo da cinta de forçamento para condições de contorno.	35
FIG 4.3	Modelo de contato para arma e cinta de turgência.	36
FIG 4.4	Modelo de contato para cinta de turgência e a arma.	37
FIG 4.5	Modelo para equacionamento do Projétil.	38
FIG 5.1	Análise de convergência da malha.	51
FIG 5.2	Ilustração do contato quando uma superfície penetra em outra e gera uma força de repulsão (Adaptado de KIM, 2015).	53
FIG 6.1	Deslocamento do CM do projétil na direção Y para caso 1A.	56
FIG 6.2	Deslocamento do CM do projétil na direção Z para caso 1A.	56
FIG 6.3	Rotação do projétil na direção Y para caso 1A.	57
FIG 6.4	Rotação do projétil na direção Z para caso 1A.	57
FIG 6.5	Deslocamento do projétil na direção Y para caso 2A.	58
FIG 6.6	Deslocamento do projétil na direção Z para caso 2A.	59
FIG 6.7	Rotação do projétil na direção Y para caso 2A.	59
FIG 6.8	Rotação do projétil na direção Z para caso 2A.	60
FIG 6.9	Deslocamento do projétil na direção Y para caso 3A.	61
FIG 6.10	Deslocamento do projétil na direção Z para caso 3A.	61

FIG 6.11	Rotação do projétil em relação ao eixo Z para caso 3A.	62
FIG 6.12	Rotação do projétil em relação ao eixo Y para caso 3A.	62
FIG 6.13	Deslocamento do CM do projétil na direção Y para caso 4A.....	63
FIG 6.14	Deslocamento do CM do projétil na direção Z para caso 4A.....	64
FIG 6.15	Rotação do projétil em relação ao eixo Z para caso 4A.	64
FIG 6.16	Rotação do projétil em relação ao eixo Y para caso 4A.	65
FIG 6.17	Deslocamento do CM do projétil na direção Y para caso 5A.....	65
FIG 6.18	Deslocamento do CM do projétil na direção Z para caso 5A.....	66
FIG 6.19	Rotação do projétil na direção Z para caso 5A.....	66
FIG 6.20	Rotação do projétil na direção Y para caso 5A.....	67
FIG 6.21	Deslocamento do CM do projétil na direção Y para caso 1B.....	68
FIG 6.22	Deslocamento da boca do tubo na direção Y para caso 1B, desconsiderando o deslocamento do projétil devido a inclinação do tubo.	68
FIG 6.23	Deslocamento do CM do projétil na direção Z para o caso 1B.....	69
FIG 6.24	Rotação do projétil na direção Z para caso 1B.....	69
FIG 6.25	Rotação do projétil na direção Y para caso 1B.....	70
FIG 6.26	Posição dos pontos A, B, C e D na boca do tubo.....	70
FIG 6.27	Deslocamento da boca do tubo na direção Y para caso 1B.....	71
FIG 6.28	Deslocamento da boca do tubo na direção Z para caso 1B.	71
FIG 6.29	Tensões de Von-Mises ao longo do tubo para caso 1B onde A é mais próximo do tubo.	72
FIG 6.30	Deslocamento do C.M do projétil na direção Y caso 2B.....	73
FIG 6.31	Deslocamento do C.M do projétil na direção Y ao desconsiderar a deformação do tubo caso 2B.....	73
FIG 6.32	Deslocamento do C.M do projétil na direção Z caso 2B.....	74
FIG 6.33	Rotação do projétil na direção Z para caso 2B.....	74
FIG 6.34	Rotação do projétil na direção Y para caso 2B.....	75
FIG 6.35	Deslocamento da boca do tubo na direção Y para caso 2B.....	75
FIG 6.36	Deslocamento da boca do tubo na direção Z para caso 2B.	76
FIG 6.37	Tensão de Von-Mises ao longo do tubo sendo A mais próximo do engaste e J próximo da boca do tubo caso 2B.....	76
FIG 6.38	Deslocamento do projétil na direção Y caso 3B.	77

FIG 6.39	Deslocamento do projétil na direção Y desconsiderando o deslocamento devido a deformação do tubo caso 3 B.	78
FIG 6.40	Deslocamento do projétil na direção Z caso 3B.	78
FIG 6.41	Rotação do projétil na direção Y caso 3B.	79
FIG 6.42	Rotação do projétil na direção Z caso 3B.	79
FIG 6.43	Deslocamento da boca do tubo na direção Y caso 3B.	80
FIG 6.44	Deslocamento da boca do tubo na direção Z caso 3 B.	80
FIG 6.45	Deslocamento do projétil na direção Y caso 4B.	81
FIG 6.46	Deslocamento do projétil na direção Y desconsiderando o deslocamento devido a deformação do tubo caso 4 B.	81
FIG 6.47	Deslocamento do projétil na direção Z caso 4B.	82
FIG 6.48	Rotação do projétil na direção Z caso 4B.	82
FIG 6.49	Rotação do projétil na direção Y caso 4B.	83
FIG 6.50	Deslocamento da boca do tubo na direção Y caso 4B.	83
FIG 6.51	Deslocamento da boca do tubo na direção Z caso 4B.	84
FIG 6.52	Tensão de Von-Mises ao longo do tubo sendo A mais próximo do engaste e J próximo da boca do tubo caso 2B.	84
FIG 6.53	Comparação do deslocamento do projétil na direção Y caso 5B. ...	85
FIG 6.54	Comparação do deslocamento do projétil na direção Z caso 5B.	85
FIG 6.55	Comparação da rotação do projétil na direção Z caso 5B.	86
FIG 6.56	Comparação da rotação do projétil na direção Y caso 5B.	86
FIG 6.57	Deslocamento da boca do tubo na direção Y para caso 5B.	87
FIG 6.58	Deslocamento da boca do tubo na direção Z para caso 5B.	87

LISTA DE TABELAS

TAB 3.1	Parâmetros utilizados no modelo do tubo.	30
TAB 3.2	Parâmetros utilizados no modelo do projétil.	31
TAB 6.1	Estudo de casos e condições iniciais.	55
TAB 6.2	Estudo de casos e resultados encontrados pelo modelo.	88

LISTA DE SÍMBOLOS

- f_i^B - vetor de forças de corpo
 f_V - vetor de forças de volume
 f_S - vetor de forças de superfície
 F_i - vetor de forças concentradas
 g_n - função de folga normal
 L - comprimento do tubo.
 L_e - comprimento característico do elemento.
 N_l - função de forma em função da variável ξ .
 NG - quantidade de pontos de Gauss.
 p_S - pressão na base do projétil.
 p_B - pressão na culatra.
 p_{muz} - pressão na boca do tubo.
 $p_{m\acute{a}x}$ - pressão máxima.
 u - deslocamento em qualquer localização do elemento.
 u_l - deslocamento do nó l de um elemento.
 x_p - posição de onde a pressão é máxima no tubo.
 ξ_i - valor do ponto de integração na direção i .
 η_j - valor do ponto de integração na direção j .
 ζ_k - valor do ponto de integração na direção k .
 ω_i - peso na direção i .
 ω_j - peso na direção j .
 ω_k - peso na direção k .
 $\delta d_s, \delta d_i$ - vetores de deslocamentos virtuais.
 $\delta \varepsilon$ - vetor de deformações virtuais
 σ - tensor de tensões
 φ - função para obter a região de .busca de contato
 ε - matriz de deformações
 λ, μ - constantes de Lamé
 ${}_{Bn}M_{Ai}$ - momentos provocados pelas forças externas e de reação.
 ${}_{Bn}I_A$ - tensor de inércia do corpo, calculado em relação ao ponto A do projétil no sistema móvel B_n .

$\frac{d}{dt}({}_{Bn}\omega)$ - derivada do vetor velocidade angular absoluta do projétil no sistema móvel B_n .

${}_{Bn}\Omega$ - vetor aceleração angular absoluta do projétil na base B_n .

${}_{Bn}\rho_A^*$ - vetor posição do ponto A do projétil até o centro de massa do corpo.

${}_{Bn}a_A$ - aceleração linear absoluta do ponto A do projétil na base móvel B_n .

LISTA DE SIGLAS

APFSDS - Armour Piercing Fin-Stabilised Discarding Sabot (Perfuradora de Blindagens, Estabilizada por Aletas e de Cinta Descartável)

ARL - Army Research Laboratory

IME - Instituto Militar de Engenharia

FEA - Finite Element Analysis

PRODAS - Programa Comercial *Projectile Rocket Ordnance Design and Analysis*, da Arrow Tech Software Products

RESUMO

A interação tubo-projétil durante a balística interna de uma munição APFSDS em um canhão 105 mm com alma lisa é analisada, empregando um modelo em elementos finitos implementado no software LS-DYNA. O projétil é modelado como rígido com cinta de forçamento flexível. Simulações considerando o tubo do armamento rígido e flexível foram realizadas. Projéteis com desbalanceamento de massa e condição inicial inclinada em relação ao eixo do tubo também foram estudados.

Uma análise estática foi realizada para obter a deformação do tubo devido à gravidade e em seguida a análise dinâmica da interação tubo-projétil foi executada. Os resultados mostram que o desbalanceamento de massa do projétil e as deformações no tubo modificam a dinâmica do projétil durante a balística interna, influenciando o fenômeno de batimento e alterando as condições do projétil na boca da arma. Portanto, a interação tubo-projétil influencia a acurácia e a precisão do tiro.

ABSTRACT

The barrel-projectile interaction during internal ballistics of an APFSDS ammunition in a 105 mm smoothbore cannon is analyzed by using a finite element model implemented in the LS-DYNA software. The projectile is rigid with flexible obturator. Simulations considering the rigid and flexible tube were performed. Mass unbalanced projectiles and inclined initial condition with respect to the axis of the barrel were studied.

A static analysis was executed to obtain the deformation of the tube due to gravity and then the dynamic analysis of the barrel-projectile interaction was performed. The results show that the projectile mass unbalance and the barrel deformations modify the dynamics of the projectile during the interior ballistics, influencing the balloting phenomenon and changing the projectile conditions at the muzzle of the gun. Therefore, the barrel-projectile interaction influences the accuracy and the precision of the shot.

1. INTRODUÇÃO

Modernos carros de combate têm utilizado longos canhões com o intuito de transferir maior energia cinética ao projétil, a fim de atingir um maior alcance e aumentar a energia liberada durante o impacto. Porém é importante observar que o uso destes grandes tubos resulta no aumento da resposta dinâmica transversal do tubo durante o disparo.

A precisão é algo que deve ser controlado com maior cuidado devido à flexibilidade do tubo durante o disparo, pois pequenas deflexões e rotações na boca do tubo podem gerar imprecisão em tiros de longa distância (SNECK, H. J., 2002).

Pelas equações de LeDuc é possível verificar que: com o aumento do comprimento do tubo, a velocidade do projétil ao sair do tubo sofrerá um aumento. Isto se deve a expansão dos gases no interior do tubo empurrando o projétil para fora e ao percorrer esta trajetória dentro do tubo o projétil ganha velocidade até sair pela boca, porém existe um limite, pois aumentar o tubo significa colocar mais peso sobre o mesmo (United States Army, 1968).

Segundo SNECK (2002), movimentos na boca do tubo, induzidos pelo lançamento do projétil são inevitáveis e difíceis de controlar devido a escala de tempo de disparo ser da ordem de milissegundos.

Devido às tolerâncias de fabricação, a falta de concentricidade, o engrazamento da cinta de forçamento, desvio do centro de massa do projétil em relação ao centro do tubo, inclinação do projétil, a deformação do tubo devido à gravidade, o projétil é submetido ao movimento angular de *yawing*, deslocamento angular transversal, e *pitching* deslocamento angular vertical. Estes são movimentos importantes no estudo do batimento, o qual consiste em choques sucessivos entre o projétil e o tubo durante o disparo.

Ao considerar estas variáveis, entende-se que é necessário obter o comportamento do projétil ao percorrer o tubo durante o disparo levando em consideração os esforços e deslocamento sofridos pelo tubo para que o alvo seja atingido com boa precisão. Para isto, deve ser levado em conta o deslocamento devido ao peso próprio do tubo, o desbalancemaneto do centro

de massa do projétil e o efeito de batimento produzido pelo movimento do projétil.

1.1 MOTIVAÇÃO

Durante as décadas passadas, foi reconhecido que a interação do tubo da arma com o projétil, ao percorrer a trajetória dentro do tubo, tem um papel importante na determinação da precisão ao atingir o alvo (SNECK, H. J. 2002; K. A. ANSARI, J.W. BAUGH, JR., 1988).

Estudos com modelagem numérica através do Método de Elementos Finitos foram realizados por companhias americanas e centros de pesquisas com o intuito de estudar a balística interna, sendo o principal U.S. Research Laboratory. Eles obtiveram bons resultados capazes de modelar a ignição, espalhamento de chama e combustão de diversos tipos de propelentes (Ray S. E. *et al.*, 2005).

Também foram realizados vários estudos para analisar o movimento do projétil dentro do tubo durante o disparo, utilizando códigos computacionais capazes de modelar o projétil como corpo rígido ou flexível, sendo o objeto de estudo o projétil, e o tubo na maioria das vezes é considerado rígido. Ao considerar no modelo o tubo como rígido, não se leva em conta informações importantes, como o deslocamento produzido no tubo que pode inferir alguma mudança na trajetória do projétil e isto pode gerar imprecisão ao atingir o alvo.

Estudos de dinâmica de multicorpos aplicada ao lançamento de projéteis têm sido realizados pelo IME. O mais recente é o trabalho desenvolvido por LEITE (2015), dissertação de mestrado, onde foram modelados a munição APFSDS e o tubo como corpos rígidos, sendo o tubo utilizado apenas como uma restrição ao movimento do projétil, não interagindo com o mesmo nem absorvendo parte da energia durante o contato.

Em problemas onde há contato ou impacto, parte da energia é transferida de um corpo para o outro. Neste estudo, a energia adquirida pelo projétil é transformada em energia cinética e parte desta energia pode ser transformada em energia interna, deformação.

Ao modelar o tubo como corpo rígido, no trabalho desenvolvido por LEITE (2015), não foi possível levar em consideração a curvatura do tubo devido ao

peso próprio e também não foram consideradas as imperfeições de fabricação do tubo, com isso, o efeito de batimento foi modelado impondo uma inclinação máxima inicial entre linha de centro da munição e a linha de centro do tubo, sendo limitada pela folga entre a cinta de Turgência da munição e o tubo.

Também foi modelado por ele o desbalanceamento de massa impondo um desvio do centro de massa do projétil na posição vertical de 0,25 mm acima da sua linha de centro.

O tubo foi modelado de duas formas, são elas: a primeira, engastado em uma extremidade e livre na outra; e a segunda, fixo em um berço dotado de um sistema de recuperação e livre na outra extremidade.

Com isso, propõe-se modelar o tubo como corpo flexível e o projétil como corpo rígido durante o disparo, analisando assim a influência desta interação na trajetória do projétil ao percorrer o tubo.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como principal objetivo estudar o comportamento dinâmico da interação tubo-projétil durante o lançamento do projétil, utilizando como referência o carro de combate SK-105 CFN da Marinha do Brasil, que foi utilizado no trabalho do LEITE (2015).

É verificado o comportamento do tubo quando a munição é submetida ao carregamento de pressão na sua base e quando ocorre o fenômeno de *balloting*, batimento. Para isto, é levado em conta o peso próprio do tubo, a deformação elástica do tubo, o desvio do centro de massa do projétil em relação a sua linha de centro e a inclinação do projétil na vertical, conhecido como ângulo de pitch.

Estuda-se a influência do desbalanceamento de massa do projétil, analisando as tensões e deslocamentos sofridos pela boca do tubo e pelo projétil.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

HASENBEIN *et al* (1993) estudaram o efeito da onda de pressão dinâmica sobre a resistência do tubo, verificando se ela é capaz de causar deformação

plástica na direção radial do tubo. Eles fizeram simulações utilizando as geometrias das armas comerciais, M256 de 120mm e a M68E1 de 105mm, e dois modelos experimentais com dimensões similares a dos modelos comerciais citados acima, porém próximo a boca do tubo suas espessuras são menores.

Eles utilizaram o método de elementos finitos e verificaram que não ocorre deformação permanente para os modelos comerciais, porém as falhas encontradas nos modelos experimentais podem ser explicadas pela deformação plástica, encontrada na simulação próxima a boca do tubo. Eles concluíram que somente a análise dinâmica é capaz de verificar se há deformação plástica devido a onda de pressão.

Segundo eles, há tração da seção interna do tubo na região onde ocorre pressurização devido à expansão dos gases e contração na região próxima a cinta de turgência, onde não há pressão dos gases. Isto se deve a flexão localizada da parede do tubo. Ele aponta que este efeito de compressão e tração devido a onda de pressão pode ser uma das causas de fratura por fadiga após um certo número de disparos.

Segundo ECHES (2009) entre 1988 e 2005 a companhia *Next Munitions* conduziu estudos para simular a dinâmica de armas através de análise computacional via elementos finitos. Ele informa que este tipo de trabalho foi iniciado por Rabern (1988) quem primeiro calculou as iterações entre o projétil e o tubo da arma, e foi aprimorado por Wilkerson e Hopkins (1994) que introduziram o modelo de arma por completo.

RABERN (1988) apresenta uma metodologia para analisar o comportamento do projétil *sabot/rod** quando é submetido a carregamentos laterais e axiais. Foram utilizados três tipos de munição *sabot/rod* comparando seus comportamentos entre si. Ele também comparou os resultados obtidos por um modelo experimental com o seu modelo numérico.

Este modelo experimental foi realizado em escala real para duas munições com o tubo de lançamento de 120 mm que foi levemente fletido e o projétil foi forçado a ter deslocamento lateral produzindo significantes esforços laterais. O

* *sabot/rod* – termo em inglês, pode ser traduzido para o português por *sapata/haste*.

deslocamento lateral do *sabot/rod* dentro do tubo foi medido utilizando uma máquina de raio-X e obteve resultados com acurácia de 0,007pol (0,01778mm).

Foram utilizados três tipos de tubos de lançamento de projétil no modelo computacional, um tubo perfeitamente reto, um tubo com precisão próxima do real e um tubo levemente fletido.

Segundo RABERN (1988), bons resultados entre análise experimental e modelos numéricos utilizando elementos finitos foram encontrados obtendo valores de tensão, deformação e deslocamento no tempo e foram avaliados para três projéteis e três tubos de lançamentos diferentes, avaliando todas as combinações possíveis de tubo e projétil, totalizando nove tipos de configurações por modelagem numérica e seis casos experimentais.

Segundo WILKERSON E HOPKINS (1999) uma série de experimentos de lançamentos de projéteis foram realizados utilizando o carro de combate M1A1 com arma modelo M256, onde foram coletadas informações do movimento do tubo e dos mecanismos da culatra para uma configuração padrão chamada de desbalanceada e um sistema modificado em que a massa foi adicionada a culatra para que a linha do centro de gravidade dela fosse coincidente com a linha do centro do tubo.

Isso trouxe uma mudança no comportamento do tubo da arma de forma significativa comparando as duas configurações, tanto na forma quanto na magnitude do deslocamento do tubo. Ele utilizou um modelo em elementos finitos, com o auxílio do software DYNA 3D para simular o comportamento dinâmico do sistema inteiro que inclui a culatra, o tubo da arma, munhão ou mecanismo de elevação, o mecanismo de recuo e o projétil.

SOENCKSEN *et al.* (2001) em seu trabalho apresenta experimentos realizados para o laboratório do exército americano, ARL, para validar um código computacional de simulação dinâmica projétil-tubo.

Ele utilizou projétil de treinamento, M831A1 de calibre 120 mm, em seu experimento e examinou os efeitos de erosão e da excentricidade no tubo durante o disparo sobre o movimento transversal do projétil, yawing, ao percorrer do tubo. Depois relacionou o primeiro máximo yaw obtido após o projétil sair do tubo com o obtido na boca do tubo.

SOENCKSEN *et al.*(2001) enfatiza a dificuldade de se comparar a análise experimental, de um fenômeno estocástico, com o modelo numérico. Ele

ressalta que este fenômeno é não linear e estocástico por natureza e as condições iniciais não são precisamente conhecidas a cada tiro. Por isso foi utilizado um envelope de desempenho que é comparado com o experimento.

Ele concluiu que uma erosão no tubo da arma pode elevar de 1,7 graus para aproximadamente 9 graus o movimento de yaw da munição durante o voo e que em muitos casos, o modelo computacional feito por ele representou bem os dados do modelo experimental, quando ocorrem pequenas variações para o primeiro máximo yaw não ultrapassando 1,7 graus. Isto é, apenas para pequenas variações da boca do tubo é possível prever o primeiro máximo yaw.

Segundo ele a excentricidade também pode ser um fator para explicar ocasionais anomalias observadas em treinamento ao realizar o disparo de um projétil.

A acurácia de carros de combate modernos com longos tubos, relativamente finos como cilindros ocos, é determinada pela flexibilidade deles especialmente sobre carregamento dinâmico. Pequenas deflexões e rotações na boca do tubo podem ter uma influência significativa na acurácia do tiro a longas distâncias. Movimentos da boca do tubo induzidos pelo lançamento do projétil são inevitáveis e difíceis de controlar devido à escala de tempo de disparo ser da ordem de milissegundos (SNECK, 2002).

SNECK (2002) também informa que além da dinâmica do lançamento do projétil, outra fonte que pode gerar movimento da boca do tubo é o movimento induzido pelo solo. Este movimento é transmitido através do munhão e atuadores, podendo ser de grande amplitude e ter frequências próximas à frequência natural do tubo.

Se o projétil for submetido a excessivos carregamentos transversais durante este trajeto, distúrbios podem ser induzidos que levam a movimentos de yawing e pitching, e possíveis excitações de frequências naturais que levam a flexão do tubo. Por isso, o comportamento do tubo deve ser conhecido para que estes efeitos possam ser minimizados (SNECK, 2002).

LEITE (2015) realizou um estudo do comportamento dinâmico de carros de combate com torre estabilizada ao disparar projéteis do tipo APFSDS, onde foi investigado o comportamento do batimento balístico na trajetória do projétil no interior do tubo, considerando o tubo do canhão e o projétil como corpos rígidos. Foi levado em conta o raiamento do tubo, que dá origem a rotação da

munição, o mecanismo de elevação e o sistema hidráulico responsável em prover a elevação do tubo.

LEITE (2015) obteve resultados para o modelo computacional com diferentes dados de entrada, variando a inclinação da munição na direção vertical para simular o batimento; também modificou o centro de massa do projétil e verificou sua influência no desvio da trajetória do projétil dentro do tubo da arma.

LEITE (2015) concluiu que a ocorrência do desvio da trajetória se deve em função do movimento da própria arma, forças aerodinâmicas e o movimento de batimento. O salto (ângulo medido entre a tangente da trajetória do projétil e linha de centro do tubo quando o projétil esta na boca do tubo) pode ser da ordem de milímetros ou pode ser valores maiores, normalmente, quando o armamento é utilizado para curto alcance.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 BALÍSTICA INTERNA

Segundo CARLUCCI *et al.* (2008) o estudo da balística pode ser classificado em três principais áreas: Balística Interior, Balística Exterior e Balística Terminal. Em alguns casos uma quarta categoria é nomeada de Balística Intermediária.

A balística interior lida com a interação da arma, projétil e da carga propelente antes do projétil sair pela boca do tubo. Isto inclui o processo de ignição do propelente, a queima do propelente na câmara, pressurização da câmara, engrazamento da banda de rotação e obturação da câmara, dinâmica da munição no interior do tubo e a dinâmica do tubo durante o ciclo de disparo.

A balística intermediária lida com o movimento inicial do projétil quando ele está saindo da boca do tubo. Isto geralmente inclui inicial movimento da boca do tubo, o ângulo de salto, o efeito dos gases e da chama imediatamente após a saída da munição do tubo e o descarte do *sabot*.

A balística exterior se inicia após a saída da munição da boca do tubo até o impacto com o alvo. Ela estuda o comportamento do projétil no momento em que sai da boca do tubo até o instante anterior ao impacto. Tem como objetivo obter informações, tais como, a trajetória prevista para o projétil, sua dinâmica e estabilidade e tempo de voo.

A trajetória pode ser definida como a curva no espaço traçada pelo centro de gravidade do projétil durante o voo em direção ao alvo. A origem da trajetória está no momento em que o projétil sai da boca do tubo. A tangente da trajetória na sua origem é a linha de projeção, o ângulo que a linha de tiro faz com a horizontal é a elevação e o ângulo de salto, conforme apresentado na FIG. 2.1 (U.S. ARMY, 1986).

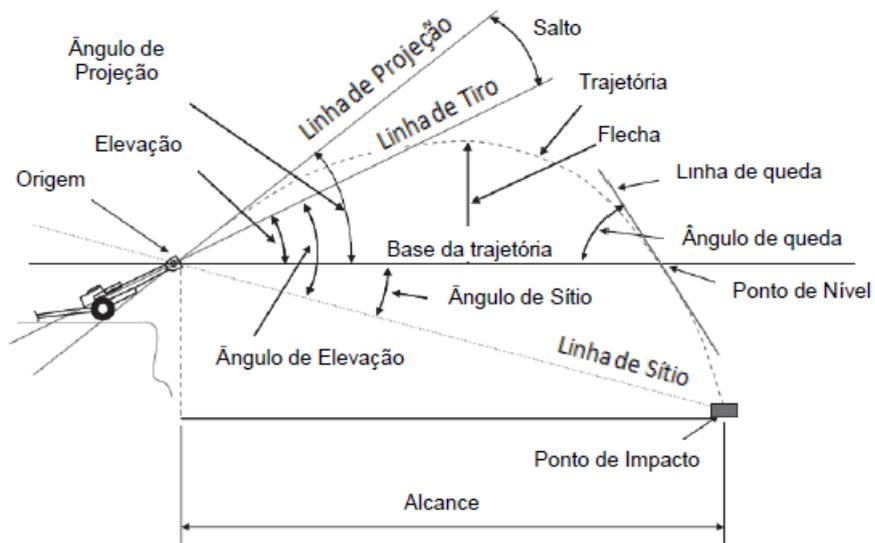


FIG 2.1 Variáveis da Balística Exterior (Adaptado de U.S. ARMY 1968 e CARLUCCI; JACOBSON, 2008, p.186).

2.2 SISTEMA MECÂNICO DE LANÇAMENTO DO PROJÉTIL

Uma arma pode ser vista como um dispositivo mecânico onde calor, liberado por uma queima de um propelente é convertido em energia cinética para o projétil, e sua função é impulsionar o projétil para atingir um alvo específico. Balística interna é o estudo científico dos processos que ocorrem dentro da arma no momento que a queima no projétil é iniciada até a eminência do projétil sair da boca do tubo (FARRAR; LEEMING, 1968).

A arma é composta de culatra, câmara, tubo e boca, conforme é apresentado na FIG 2.2.

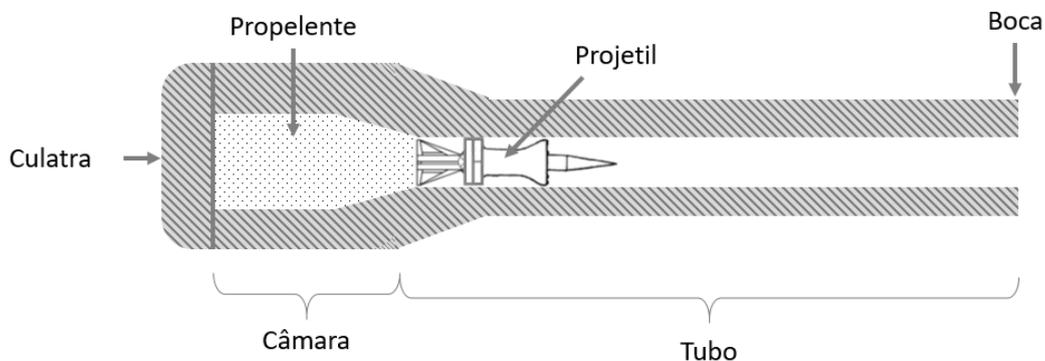


FIG 2.2 Principais componentes da arma (Adaptado de FARRAR; LEEMING, 1983).

A culatra é por onde o projétil e o propelente entram na câmara. O tubo é onde o projétil ganha velocidade até sair pela boca do tubo. O diâmetro interno do tubo da arma é chamado de calibre.

2.3 TUBO DA ARMA

O tubo é o componente primário de uma arma. Basicamente ele é um vaso de pressão tubular próximo da culatra e da abertura. A missão do tubo é lançar o projétil em direção ao alvo com uma determinada velocidade.

O tubo determina a trajetória inicial do projétil, durante o disparo, ele retém o gás propelente em todas as direções exceto a da trajetória do projétil. Em armas sem recuo parte da energia liberada pelo gás é direcionada para trás para neutralizar o recuo (ANSARI *et al.*, 1988).

O tubo de uma arma pode ser dividido em quatro regiões: a parte frontal ou furo onde o projétil percorre sua trajetória durante o disparo; a parte traseira ou câmara, que abriga o projétil e o propelente antes do disparo; abertura traseira ou culatra, onde é carregada a munição, e a abertura frontal boca, de onde o projétil sai (ANSARI *et al.*, 1988).

2.4 MUNIÇÃO APFSDS

AFSPDS (Armour Piercing Fin-Stabilised Discarding Sabot) é um tipo de munição que possui como todas as outras, um propelente e o projétil a ser lançado. É uma munição subcalibre que durante a balística externa descarta o sabot, que possui o calibre do tubo, permanecendo em direção ao alvo o projétil subcalibre que é projetado para perfurar blindagens. Esta munição também é chamada de munição flecha, devido o projétil subcalibre ser estabilizado por empenas, como uma flecha. Na FIG 2.3 pode-se ver este projétil sendo apresentado.

O *sabot*, cinta descartável, é uma armadura com banda de direção, então quando o projétil é usado a banda de direção é permitida girar livremente em

volta da armadura para evitar a rotação do projétil se ele for lançado por um tubo raiado (FARRAR; LEEMING, 1983).

O propelente é queimado e a pressão resultante desta queima impulsiona o projétil que percorrerá o tubo da arma, sendo limitado pelo mesmo. O sabot é a armadura e o penetrador é a parte que irá atingir o alvo.

Os materiais mais utilizados no APFSDS são: aço para o estojo e sua base; compósito para o sabot; urânio empobrecido para o penetrador; a aleta de alumínio.

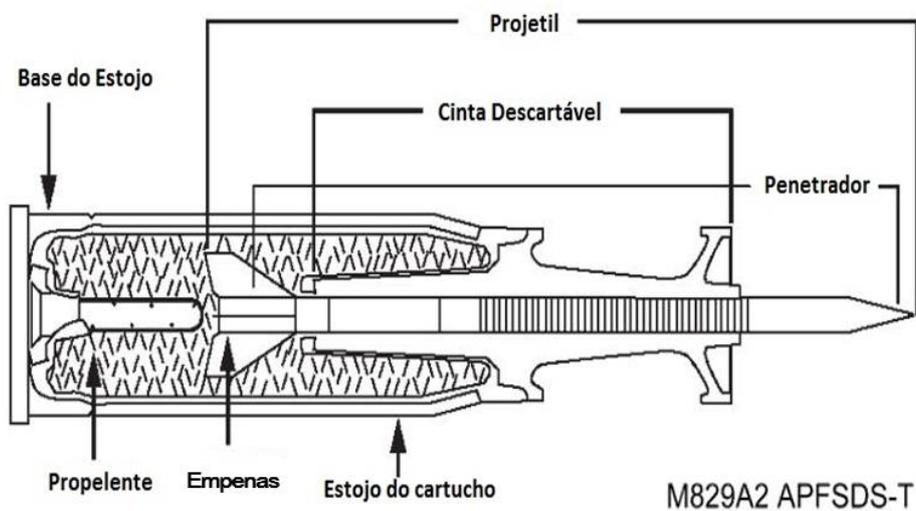


FIG 2.3 Munição de Calibre 120 mm M829A2 APFSDS (Adaptado de UNITED STATES ARMY, 2000).

2.5 BATIMENTO

O movimento de *yawing* e o de *pitching* de um projétil dentro do tubo de uma arma é uma consideração importante na balística interna e é conhecida como batimento (ANSARI *et al.*, 1988).

Na FIG 2.4 são apresentados os movimentos do projétil que são objetos de estudo deste trabalho, a saber, o deslocamento e as velocidades vertical (direção *y*) e lateral (direção *z*), o ângulo em relação ao eixo vertical, também conhecido como arfagem (*pitch*) e em relação ao eixo lateral, conhecido como guinada (*yaw*).

Estes movimentos são significativos devido às pequenas tolerâncias de fabricação, falta de concentricidade do tubo, engrazamento da cinta de forçamento, deformação do tubo, obturação dos gases propelentes e da camisa do obturador.

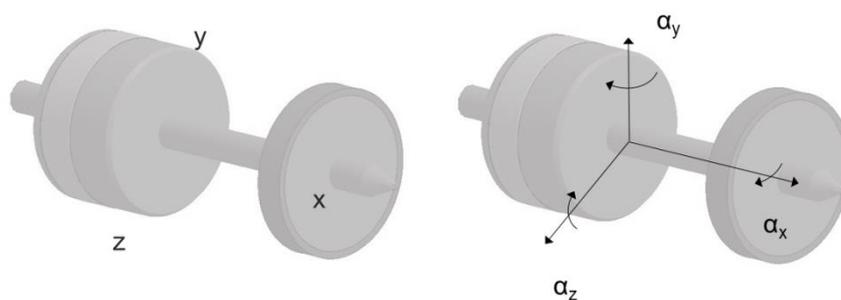


FIG 2.4 Movimento do projétil e seu eixo de coordenadas. (baseado em NEWILL et al.,2001).

3. MODELO FÍSICO

Durante a balística interna o projétil é impelido pela ação dos gases que exercem uma pressão a sua retaguarda. Desta forma, no presente trabalho a pressão na base do projétil, obtida a partir de uma simulação no software PRODAS, é uma função prescrita do tempo. A curva de pressão é a mesma utilizada no trabalho (LEITE, 2015) conforme é apresentada na FIG. 3.1. O modelo é submetido apenas ao carregamento de pressão na base do projétil e a trajetória deste dentro do tubo é obtida através do deslocamento do projétil nas direções x, y e z, bem como de sua orientação angular.

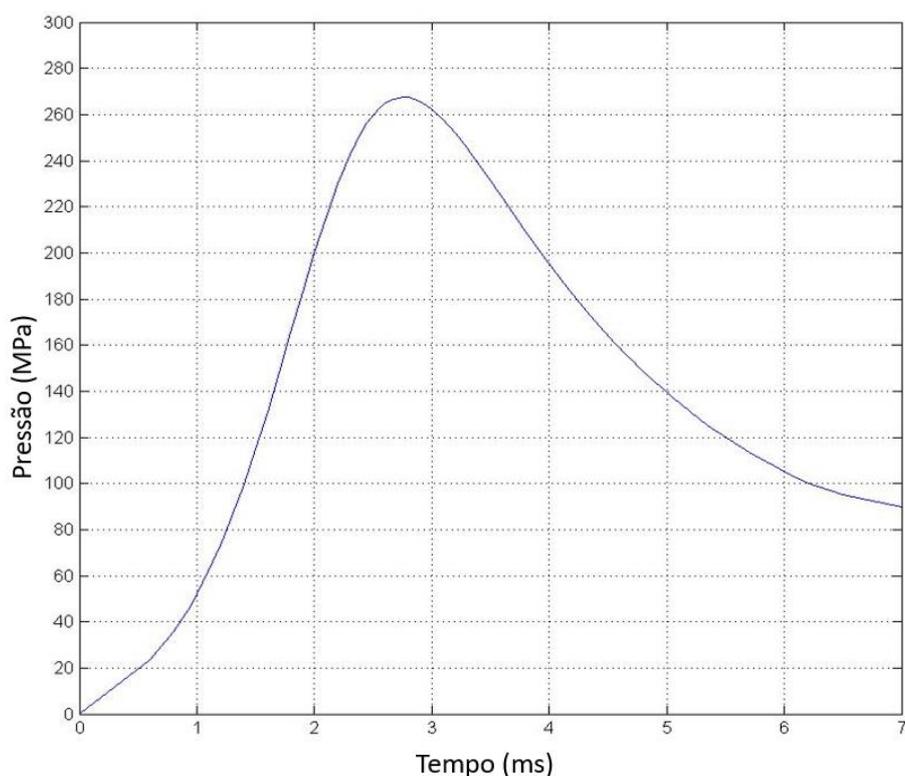


FIG 3.1 Curva de Pressão em função do tempo utilizada na culatra do projétil (Adaptado de LEITE, 2015).

A gravidade, que é considerada um carregamento devido às forças de corpo, é considerada no projétil em todos os casos desta dissertação. Quando o material do tubo é considerado rígido, a gravidade não será considerada no tubo, apenas no projétil.

Quando à deflexão devido ao peso próprio do tubo for considerada, a gravidade será mantida no tubo após ter sido submetido à deformação devido a este carregamento inicial.

A simulação da dinâmica de um projétil APFSDS durante a balística interna em um canhão é realizada empregando um modelo 3-D.

O modelo geométrico da arma foi obtido do artigo (HASENBEIN *et al.*, 1993), onde foi utilizada uma arma de calibre 105 mm e adotado folga de 0.25 mm (LEITE, 2015). O diâmetro interno do tubo foi considerado 105.5 mm e as demais dimensões podem ser vistas na FIG 3.2. Neste trabalho o tubo é considerado liso, sem raiamento e perfeitamente reto, desconsiderando as tolerâncias de fabricação.

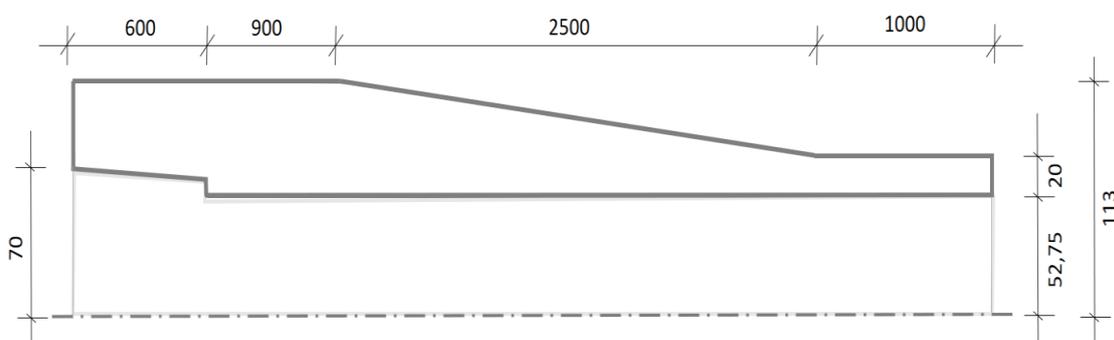


FIG 3.2 Geometria da arma em milímetros, dimensões adaptada de (HASENBEIN,1993)

É analisada uma configuração de tubo, sendo este engastado em uma extremidade e livre na outra, não sendo levado em conta o recuo da arma. São consideradas pequenas deformações e pequenos deslocamentos para o tubo e a cinta de forçamento. A solução do modelo do comportamento do tubo fornece as deformações do tubo ao longo do tempo.

A geometria utilizada para o modelo do projétil é apresentada na Fig. 3.3, sendo o raio do projétil 52.5 mm, utilizado no modelo da cinta de turgência e para cinta forçamento, o mesmo raio interno do tubo, sem folga entre esta cinta e o tubo. O projétil é considerado rígido com seis graus de liberdade. Devido à folga entre a cinta de turgência e o tubo, o projétil é livre para transladar e rotacionar, no plano perpendicular ao eixo longitudinal do tubo.

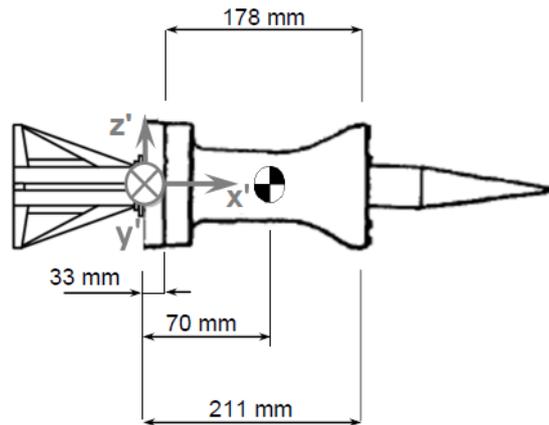


FIG 3.3 Geometria do Projétil. (LEITE, 2015).

Os valores apresentados nas TAB 3.1 e 3.2 são utilizados nos modelos computacionais para todas as análises realizadas neste trabalho. A tensão de escoamento do material depende da taxa de deformação, que para este caso é da ordem de 10^4 a 10^6 s^{-1} .

TAB 3.1 Parâmetros utilizados no modelo do tubo.

Parâmetros do tubo		
Grandeza	Símbolo	Valor
Massa do tubo	M_t	500 kg
Módulo de elasticidade (RABERN, 1988)	E	200 GPa
Massa específica (RABERN, 1988)	ρ	7 g/cm^3
Poison (RABERN, 1988)	ν	0.3
Tensão de Escoamento (HASENBEIN, 1993)	σ_y	1117MPa
Momento de Inércia do tubo na direção x (fonte: LEITE, 2002)	J_{xt}	150 kgm^2
Momento de Inércia do tubo na direção y (fonte: LEITE, 2002)	J_{yt}	715 kgm^2
Momento de Inércia do tubo na direção z (fonte: LEITE, 2002)	J_{zt}	715 kgm^2

(adaptado de LEITE, 2015).

TAB 3.2 Parâmetros utilizados no modelo do projétil.

Parâmetros da Munição APFSDS 105 mm M735		
Grandeza	Símbolo	Valor
Diâmetro da munição (LEITE, 2015)	d_m	105 mm
Folga entre o tubo e a munição (fonte: MING-NA <i>et al.</i> , 2007 p.8)	gap	0.25×10^{-3} m
Massa da munição (fonte: PRODAS 2000)	M_m	5.67204 kg
Módulo de elasticidade do projétil (RABERN, 1988)	E	200 GPa
Massa específica (RABERN, 1988)	ρ	7 g/cm ³
Poison (RABERN, 1988)	ν	0.3
Módulo de Elasticidade da Cinta de Forçamento (LANGLET, 2015)	E_{CF}	110 GPa
Massa específica da Cinta de Forçamento (LANGLET, 2015)	ρ_{CF}	3.5 g/cm ³
Coeficiente de Atrito entre a cinta de forçamento e o tubo (LANGLET, 2015)	μ	0.13
Momento de Inércia da Munição na direção x (fonte: PRODAS 2000)	J_{xm}	0.0030909 kgm ²
Momento de Inércia da Munição na direção y (fonte: PRODAS 2000)	J_{ym}	0.0482886 kgm ²
Momento de Inércia da Munição na direção z (fonte: PRODAS 2000)	J_{zm}	0.0482886 kgm ²

A solução do modelo de dinâmica do projétil fornece os ângulos de arfagem, deriva (ou guinada) e rolagem, bem como a posição espacial do projétil, enquanto a solução do modelo do comportamento do tubo fornece as deformações do tubo ao longo do tempo, permitindo observar os modos de vibração do tubo.

Os contatos entre o projétil e a arma são definidos com uma formulação do tipo penalidade e a tolerância de penetração é considerada pequena, de 0.01 mm. É utilizado um coeficiente de atrito dinâmico de 0.13, entre a cinta de obturação e o tubo (Langlet *et al.* 2015).

Para estudo do batimento, são analisadas as influências da deformação do tubo ao interagir com o projétil durante o seu lançamento, a deformação do tubo devido ao peso próprio antes do projétil ser lançado, da inclinação do projétil e do desbalanceamento de massa do projétil.

4. MODELO MATEMÁTICO

Nesta seção será apresentada a formulação matemática para os corpos flexíveis, arma e cinta de forçamento, e para os corpos rígidos, projétil e cinta de turgência, com suas respectivas condições de contorno. Também é apresentado o modelo de contato entre a arma e a cinta de forçamento e entre a arma e a cinta de turgência.

As EQ 4.1 a 4.3 apresentam o modelo matemático para arma e cinta de forçamento, onde as equações diferenciais parciais que expressam a conservação de momento linear relacionam a aceleração com o tensor de tensões σ_{ij} , conforme apresentada na EQ 4.1.

Três equações de movimento.

$$\rho \ddot{u}_i = f_i^B + \sigma_{ji,j} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (4.1)$$

Seis equações que relacionam a deformação e deslocamento.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{j,i} + u_{i,j}), \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (4.2)$$

Seis equações constitutivas, que relacionam a tensão com a deformação, através das propriedades do material.

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (4.3)$$

A EQ. 4.4 demonstra como as constantes de Lamè se relacionam com o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson.

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.4)$$

Onde \ddot{u} é $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ e $(\cdot)_{,j} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\cdot)$

f_i^B é o vetor de forças de corpo

σ é o tensor de tensões

u_i é o vetor deslocamento.

ε é a matriz de deformações

λ, μ são as constantes de Lamé

Sendo $\delta_{ij} = 0$ quando $i \neq j$, e $\delta_{ij} = 1$ quando $i = j$

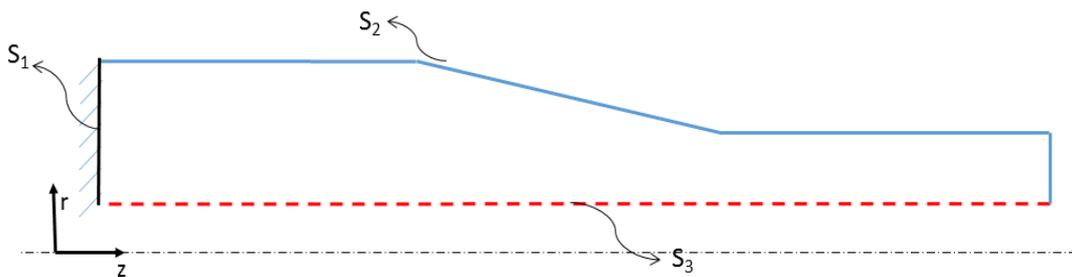


FIG 4.1 Modelo da arma para condições de contorno.

As condições de contorno para arma são:

$$u_i(\underline{x}) = 0, \quad \underline{x} \in S_1; \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (4.5)$$

$$\sigma_{ji}n_j = f_i^S = 0, \quad \underline{x} \in (S_2 \cup S_3)^*; \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (4.6)$$

* A condição de contorno da superfície S_3 apresentada na EQ. 4.6 só será utilizada para toda a superfície S_3 quando não ocorre o contato entre a cinta de turgência e a arma, o mesmo se aplica a cinta de forçamento e a arma. Quando houver contato nesta região estas condições de contorno não serão aplicadas e serão aplicados os esforços devido ao contato.

As EQ. 4.1 a 4.4 também são válidas para a cinta de forçamento, onde a superfície da FIG. 4.2 utilizam as seguintes condições de contorno (EQ. 4.7 e 4.8):

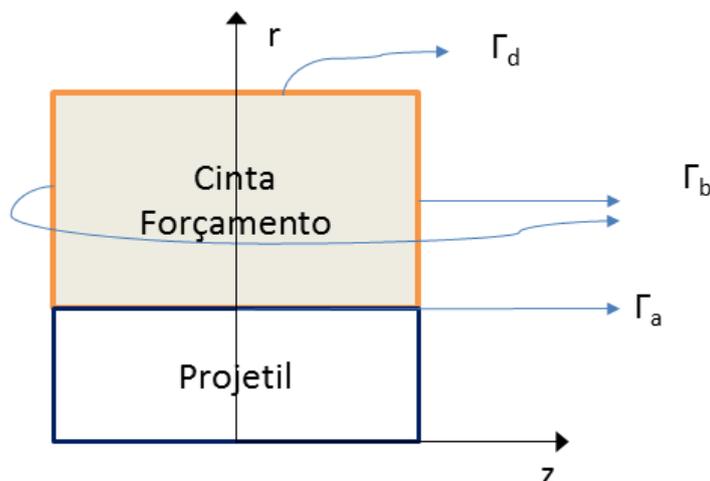


FIG 4.2 Modelo da cinta de forçamento para condições de contorno.

$$\sigma_{ji}n_j = f_i^S = 0, \quad \underline{x} \in \Gamma_b \text{ e } \underline{x} \in \Gamma_d^* ; \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (4.7)$$

$$u_{CF}(\underline{x}) - u_p(\underline{x}) = 0, \quad \underline{x} \in \Gamma_a; \quad (4.8)$$

* Para a superfície Γ_d , esta equação só é válida quando não houver contato.

$u_{CF}(\underline{x})$ é o vetor deslocamento da cinta de forçamento na posição \underline{x} ,
 $u_p(\underline{x})$ é o vetor deslocamento do projétil na posição \underline{x} .

Os contatos podem ser considerados como normal ou tangencial. O contato normal é utilizado quando pode haver interação entre os corpos sendo controlada a penetração entre eles e o tangencial é quando ocorre atrito entre duas superfícies.

Para formulação do contato normal é necessário encontrar os pontos de menor distância entre as superfícies que podem entrar em contato, neste caso, entre a arma e a cinta de turgência. Para encontrar o ponto x_c localizado na superfície da cinta de turgência tal que ele seja a menor distância do ponto x , localizado na superfície da arma encontrada entre estas duas superfícies ele deve satisfazer a equação.

$$\varphi(\xi_c) = (x - x_c(\xi_c))^T e_t(\xi_c) = 0, \quad (4.9)$$

Onde e_t é o vetor tangente a superfície da arma, conforme apresentado nas FIG 4.3.

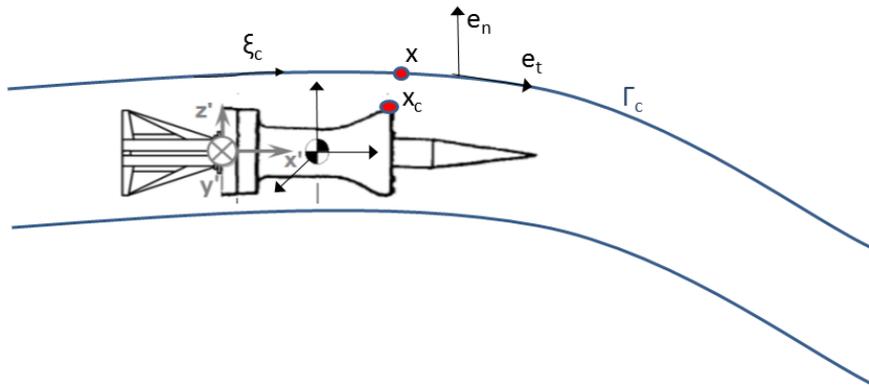


FIG 4.3 Modelo de contato para arma e cinta de turgência.

A condição de contato ou restrição deve satisfazer as seguintes condições:

a) Condição de impenetrabilidade, EQ.4.10.

$$u^T e_n + g_n \geq 0 \quad (4.10)$$

Sendo

$$g_n = (x - x_c(\xi_c))^T e_n(\xi_c) \geq 0, \quad \underline{x} \in \Gamma_c \quad (4.11)$$

φ é a função de busca de contato

g_n é a função de folga normal

x é o vetor posição de um ponto na superfície da arma.

x_c é o vetor posição de um ponto na superfície da cinta de turgência.

e_n é o vetor unitário normal a superfície da arma.

e_t é o vetor unitário tangente a superfície da arma.

u é o vetor deslocamento.

b) A tensão devido à força de contato deve ser positiva, sendo assim

$$\sigma_n \geq 0, \quad \underline{x} \in \Gamma_c \quad (4.12)$$

c) condição de consistência

$$\sigma_n(u^T e_n + g_n) \geq 0 \quad (4.13)$$

Esta condição indica que quando os pontos x e x_c estão em contato, isto é, a diferença entre eles é zero, temos $\sigma_n \neq 0$, e quando eles estão afastados, não há contato, então $\sigma_n = 0$.

A mesma formulação, apresentada nas EQ 4.9 até 4.13, é utilizada para obter a região de contato utilizando o ponto x na cinta de turgência e o ponto x_c na arma, sendo os eixos normal e_n e tangencial e_t à superfície da cinta de turgência conforme FIG.4.4.

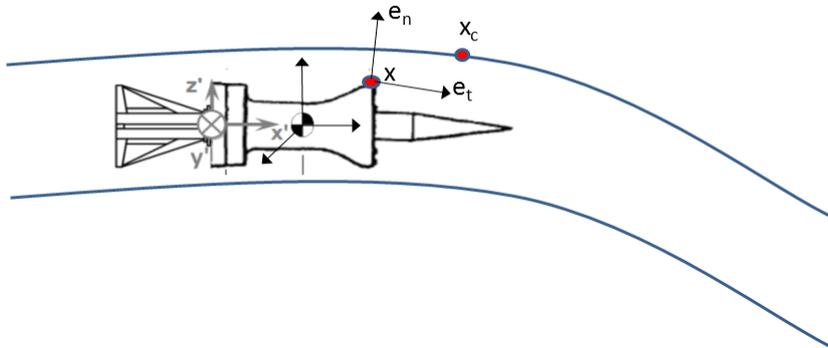


FIG 4.4 Modelo de contato para cinta de turgência e a arma.

Para o contato entre a arma e a cinta de forçamento também são utilizadas as EQ 4.9 à 4.13, utilizando a arma como a superfície cuja direção normal ao ponto x é e_n , depois utilizando a superfície da cinta de forçamento como a superfície cuja normal é utilizada para medir a menor distância entre as superfícies de contato.

Para o contato tangencial são consideradas as EQ.4.14 a 4.16:

Condição de não escorregamento.

$$f_t - \mu f_n < 0, u_{rel} = 0 \quad (4.14)$$

Condição de escorregamento

$$f_t - \mu f_n = 0, u_{rel} > 0 \quad (4.15)$$

Condição de consistência

$$u_{rel}(f_t - \mu f_n) = 0 \quad (4.16)$$

Onde

f_n é o vetor de força de contato normal

f_t é o vetor de força tangencial.

u_{rel} é o deslocamento relativo entre as duas superfícies na direção tangencial.

A formulação para obter o comportamento do projétil e a cinta de turgência, que são considerados rígidos é apresentada nas EQ 4.19 à 4.23 e FIG. 4.5.

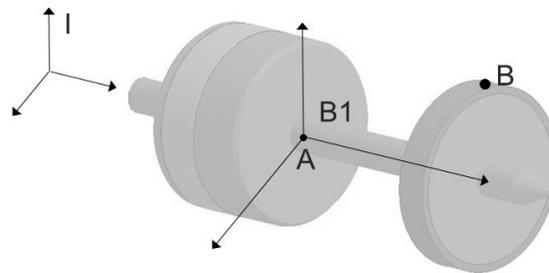


FIG 4.5 Modelo para equacionamento do Projétil.

Pela equação da quantidade de movimento linear, temos:

$$\sum_{j=1}^3 {}_I F_j = \frac{d}{dt} (m_I a^*) \quad (4.17)$$

F_j é o vetor de forças nas direções $j=1,2,3$,

m_I é a matriz de massa,

${}_I a^*$ é a aceleração do centro de massa do projétil no sistema inercial.

Sendo I o sistema de referência inercial e B1 o sistema de referencial móvel, fixo no ponto A, centro de massa do projétil. O ponto B é um ponto qualquer localizado no projétil ou na cinta de turgência.

$$\sum_{j=1}^3 {}_I F_j = m_I (a_A + {}_I \dot{\omega} \times {}_I r_{AB} + {}_I \omega \times ({}_I \omega \times {}_I r_{AB}) + 2 {}_I \omega \times {}_I v_{rel} + {}_I a_{rel}) \quad (4.18)$$

${}_I \omega$ é a velocidade angular do projétil no sistema inercial,

r_{AB} é a distância entre os pontos A e B medida no sistema inercial,

${}_I v_{rel}$ é a velocidade relativa entre os pontos A e B no sistema inercial,

${}_I a_{rel}$ é a aceleração relativa entre A e B no sistema inercial,

Como o corpo é rígido e não há variação da distância entre os pontos A e B, os dois últimos termos da equação são nulos.

$$\sum_{j=1}^3 {}_I F_j = m_I (a_A + {}_I \dot{\omega} \times {}_I r_{AB} + {}_I \omega \times ({}_I \omega \times {}_I r_{AB})) \quad (4.19)$$

$$\sum_{j=1}^3 {}_I F_j = F_P + F_B + F_{reação} + F_{cont} \quad (4.20)$$

F_P vetor de força devido a pressão,

F_B vetor de força devido a gravidade,

$F_{reação}$ vetor de força de reação entre o projétil e a cinta de forçamento,

F_{cont} vetor de força de contato entre o tubo e a cinta de turgência.

Através da variação da quantidade de movimento angular temos:

$$\sum_{j=1}^3 {}_{B_n} M_{Ai} = {}_{B_n} I_A \frac{d}{dt} ({}_{B_n} \omega) + {}_{B_n} \Omega \times ({}_{B_n} I_A \times {}_{B_n} \omega) + m_{B_n} \rho_A^* \times {}_{B_n} a_A \quad (4.21)$$

${}_{B_n} M_{Ai}$ momentos provocados pelas forças externas e de reação,

${}_{B_n} I_A$ é o tensor de inércia do corpo, calculado em relação ao ponto A no sistema móvel B_n ,

$\frac{d}{dt} ({}_{B_n} \omega)$ é a derivada do vetor velocidade angular absoluta do corpo no sistema móvel B_n ,

${}_{B_n} \Omega$ é o vetor aceleração angular absoluta na base B_n ,

m é a massa total do corpo,

${}_{B_n}\rho_A^*$ é o vetor posição do ponto A até o centro de massa do corpo,

${}_{B_n}a_A$ é a aceleração linear absoluta do ponto A na base móvel B_n .

5. SOLUÇÃO NUMÉRICA

O método de elementos finitos, MEF, é um método numérico já consolidado e utilizado para resolver problemas de valor de contorno expressos em equações diferenciais parciais, por esta razão será abordado de forma sucinta sua formulação.

O LS-DYNA utiliza princípio dos trabalhos virtuais para obter a formulação fraca por esta razão, vamos aplicar o princípio dos trabalhos virtuais na equação de equilíbrio estático EQ 5.1 e utilizando o teorema do divergente, obtemos a EQ. 5.2 (BATHE, 1996).

$$f_i^B + \sigma_{ij,j} = 0 \quad (5.1)$$

$$\int_V \delta \varepsilon_{ij}^T \sigma_{ij} dV = \int_V \delta d^T f_i^B dV + \int_S \delta d^T f_i^S dS \quad (5.2)$$

f_i^B forças de volume na direção i ,

f_i^S forças de superfície na direção i ,

$\delta d_s, \delta d_i$ são os vetores de deslocamentos virtuais,

$\delta \varepsilon$ é o vetor de deformações virtuais.

A EQ 5.2 também pode ser obtida através da EQ. 5.3 igualando o trabalho interno w_{int} , com o trabalho externo, w_{ext} e podemos considerar o termo correspondente a cargas concentradas.

$$w_{int} = w_{ext} \quad (5.3)$$

$$w_{\text{int}} = \int_V \delta \varepsilon^T \sigma dV \quad (5.4)$$

$$w_{\text{ext}} = \int_V \delta d^T f_V dV + \int_S \delta d^T f_S dS + \sum \delta d_I^T F_I \quad (5.5)$$

Chega-se a equação de equilíbrio estático aplicada a todos os elementos do meio contínuo.

$$\int_V \delta \varepsilon^T \sigma dV = \int_V \delta d^T f_V dV + \int_S \delta d^T f_S dS + \sum \delta d_I^T F_I \quad (5.6)$$

f_V forças de volume na direção i ,

f_S forças de superfície na direção i ,

$\delta d_S, \delta d_i$ são os vetores de deslocamentos virtuais,

$\delta \varepsilon$ é o vetor de deformações virtuais,

F_I forças concentradas.

Aplicando o princípio de D’Alambert pode-se generalizar a EQ. 5.2 para a análise dinâmica, considerando os efeitos de inércia como forças de volume adicionais.

$$f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (5.7)$$

Sendo ρ a massa específica e \ddot{u} a aceleração.

Pode-se obter a equação de equilíbrio dinâmico.

$$\int_V \delta \varepsilon^T \sigma dV = \int_V \delta d^T f_V dV + \int_S \delta d^T f_S dS - \int_V \delta d^T \rho \ddot{u}_i dV + \sum \delta d_I^T F_I \quad (5.8)$$

Este método consiste em dividir o domínio dentro de um grupo de simples subdomínios conhecidos como elementos. Os elementos são conectados com os elementos adjacentes pelos nós compartilhados por eles. Então dentro de

cada elemento a solução é aproximada na forma de polinômios, conforme é apresentado na EQ 5.9.

$$u(x, y, z) = \sum_{I=1}^n h_I(x, y, z) U_I \quad (5.9)$$

Tal que:

u é o deslocamento em qualquer ponto do elemento,

U é o vetor de três componentes de deslocamentos nodais, U_i, V_i, W_i , de nós da malha de elementos,

h_I é a função de interpolação de deslocamento do nó I ,

n é o número de nós do elemento.

A função de interpolação para um elemento tridimensional é apresentada na EQ. 5.10.

$$h_I(x, y, z) = l_I(\xi) \cdot l_I(\eta) \cdot l_I(\zeta) \quad (5.10)$$

$$l_I(r) = \frac{(r - r_0)(r - r_1) \dots (r - r_{j-1})(r - r_{j+1}) \dots (r - r_n)}{(r_j - r_0)(r_j - r_1) \dots (r_j - r_{j-1})(r_j - r_{j+1}) \dots (r_j - r_n)} \quad (5.11)$$

$l_I^P(r)$ é o polinômio de Lagrange da variável r utilizado para obter a função de interpolação do nó I de um elemento,

ξ, η, ζ são as coordenadas naturais do sistema parametrizado.

A matriz H do elemento pode ser obtida através da EQ 5.12.

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 & h_2 & 0 & 0 & \dots & h_n & 0 & 0 \\ 0 & h_1 & 0 & 0 & h_2 & 0 & \dots & 0 & h_n & 0 \\ 0 & 0 & h_1 & 0 & 0 & h_2 & \dots & 0 & 0 & h_n \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

A relação de deformação e deslocamento é obtida através da EQ 5.13 que relaciona o deslocamento nodal com a deformação do elemento através da matriz B .

$$\varepsilon(x, y, z) = \sum_{I=1}^n B_I(x, y, z) U_I \quad (5.13)$$

Onde B é a matriz de deslocamento deformação, cujas linhas são obtidas pela derivada da matriz H através de uma combinação apropriada. A formulação geral da matriz B para um elemento tridimensional é apresentada na EQ. 5.14.

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 & h_2 & 0 & 0 & \dots & h_n & 0 & 0 \\ 0 & h_1 & 0 & 0 & h_2 & 0 & \dots & 0 & h_n & 0 \\ 0 & 0 & h_1 & 0 & 0 & h_2 & \dots & 0 & 0 & h_n \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

As tensões são relacionadas com as deformações através da EQ.5.15.

$$\sigma = C\varepsilon + \sigma^{I(m)} \quad (5.15)$$

σ é o tensor de tensões do elemento.

C é a matriz de elasticidade.

$\sigma^{I(m)}$ é a tensão inicial no elemento m.

Considerando que a Eq. 5.8 é válida dentro de cada elemento, pode-se obter a equação para todos os elementos através do somatório das equações de equilíbrio para cada elemento conforme apresentado na EQ 5.18. Considerando que os deslocamentos e deformações virtuais assumem as mesmas aproximações que as EQ. 5.9 e 5.13, temos:

$$\delta d = \sum_{I=1}^n h_I(x, y, z) \delta U_I \quad (5.16)$$

$$\delta \varepsilon(x, y, z) = \sum_{I=1}^n B_I(x, y, z) \delta U_I \quad (5.17)$$

Substituindo as EQ 5.9, 5.13, 5.16 e 5.17 na EQ. 5.8 temos:

$$\begin{aligned} \delta U^T \left[\sum \int_V B^T C B dV \right] U &= \delta U^T \left(\sum \int_V H^T f_V dV + \sum \int_S H^T f_S dS \right) + \\ &+ \delta U^T \left(\int_V H^T \rho H \ddot{U}_i dV - \sum \int_V B^T \sigma^I dV + \sum \delta d_i^T F_i \right) \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned} \delta U^T \left[\sum \int_V H^T \rho H dV \right] \ddot{U}_i + \delta U^T \left[\sum \int_V B^T C B dV \right] U &= \delta U^T \left[\sum \int_V \delta H^T f_V dV \right] + \\ \delta U^T \left[\sum \int_S H^T f_S dS + \sum \int_V B^T \sigma^I dV + \sum \delta d_i^T F_i \right] \end{aligned} \quad (5.19)$$

Podemos simplificar a EQ.5.19 e obtem-se da seguinte forma a EQ. 5.20.

$$M \ddot{U} + K U = R \quad (5.20)$$

$$R = R_B + R_S + R_I + R_C \quad (5.21)$$

Sabendo que

$$\begin{aligned} M &= \sum \int_V H^T \rho H dV \\ K &= \sum \int_V B^T C B dV \\ R_B &= \sum \int_V H^T f_V dV \\ R_S &= \sum \int_S H^T f_S dS \end{aligned} \quad (5.22)$$

$$R_I = \sum \int_V B^T \sigma^I dV$$

$$R_C = \sum \delta d_i^T F_i$$

M é a matriz de massa do sistema global

K é a matriz de rigidez do sistema global

R_B é o vetor de força de corpo do sistema global

R_S é o vetor de força de superfície do sistema global

R_I é o vetor de força correspondente as tensões iniciais

R_C a força nodal concentrada.

As integrais obtidas nas equações acima são resolvidas através de um método de integração numérica, e neste trabalho é utilizado o método de quadratura de Gauss para um sistema parametrizado transformando estas integrais em um somatório, através de pesos e pontos de integração. A aproximação da integral no caso tridimensional já parametrizada é apresentada na EQ 5.23.

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta = \sum_{i=1}^{NG} \sum_{j=1}^{NG} \sum_{k=1}^{NG} \omega_i \omega_j \omega_k f(\xi_i, \eta_j, \zeta_k) \quad (5.23)$$

Tal que:

ξ_i, η_j e ζ_k , são os valores dos pontos de integração nas direções i, j e k.

ω_i, ω_j e ω_k são os pesos nas direções i, j e k.

NG é a quantidade de pontos de Gauss para cada direção.

5.1. ANÁLISE ESTÁTICA

A análise estática é para calcular o efeito das condições de carregamentos constantes na estrutura, onde a dependência com o tempo pode ser desprezada. Os efeitos de inércia e de amortecimento são ignorados, tais como aqueles causados por carregamentos transientes. A análise estática pode, entretanto, incluir carregamentos estáticos estáveis como gravidade. Neste

trabalho esta análise é utilizada para obter a deformação do tubo antes do disparo, conforme apresentado nas EQ.5.2 utilizando as EQ. 5.9 e 5.13 obtemos 5.24. Onde R e K são dados pelas EQ. 5.21 e 5.22.

$$KU = R \tag{5.24}$$

5.2. INTEGRAÇÃO NO TEMPO

Os métodos diretos consistem em integrar no tempo equações do tipo EQ 5.16, utilizando um procedimento do tipo passo a passo. Segundo (BATHE, 1996) pode-se basear em duas idéias:

a) A solução é do tipo discreto, isto é, resolve-se o sistema de equações em apenas um número inteiro de intervalos de tempo, $t + \Delta t$, $t + 2\Delta t$, e assim por diante. Desta forma os efeitos de inércia podem ser considerados apenas nestes pontos do intervalo de integração. Sendo assim, os processos de resolução de sistema de equações empregados na análise estática podem ser utilizados a cada intervalo de tempo.

b) Assume-se uma variação contínua dos deslocamentos, velocidades e acelerações em cada intervalo de integração. Sendo esta definição a que determina a precisão, a estabilidade e o custo do processo de solução.

Os métodos diretos podem ser obtidos de forma implícita ou explícita no tempo, onde os algoritmos implícitos utilizam as condições de equilíbrio no tempo $t + \Delta t$ e nos algoritmos explícitos o equilíbrio acontece no tempo t .

As vantagens de utilizar o método implícito é que eles são incondicionalmente estáveis. A estabilidade do algoritmo implica na solução convergir para algum resultado, com isto ela não irá crescer indefinidamente. (BATHE, 1996).

A desvantagem dos algoritmos implícitos é que eles exigem a montagem da matriz de rigidez global do sistema demandando nova fatoração sempre que a mesma for atualizada, caso o sistema linear esteja sendo resolvido pelo método direto, A solução de sistema lineares por método iterativo pode ser computacionalmente interessante. Resolver este sistema linear pode ser muito custoso computacionalmente dependendo da largura de banda da matriz de

rigidez global, que depende do número de graus de liberdade e de uma numeração apropriada da malha de elementos.

No caso dos algoritmos explícitos sua principal vantagem é que eles são mais adequados para problemas que ocorrem com intervalo de tempo muito pequeno. No caso em que o amortecimento pode ser desprezado, é possível utilizar uma matriz de massa discreta para que o sistema possa ser desacoplado e as equações podem ser resolvidas separadamente sem a necessidade de montar a matriz de rigidez.

Porém é importante ressaltar que eles não são estáveis e precisam atender uma condição de estabilidade que depende do período de maior vibração do sistema, sendo esta a principal desvantagem dos métodos explícitos.

Neste trabalho é utilizado o método explícito da diferença centrada devido a grande quantidade de graus de liberdade, pela elevada velocidade do projétil e o fenômeno de batimento ter de uma frequência elevada.

Para que o problema possa ser resolvido de forma desacoplada, ele deve satisfazer as seguintes condições:

- a) A matriz de amortecimento do sistema deve ser negligenciada.
- b) A matriz de massa deve ser diagonal.

Como neste trabalho o problema foi considerado sem amortecimento, então basta ser empregado um método para diagonalização da matriz conforme formulação a seguir:

São obtidos os coeficientes da matriz de massa consistente do elemento.

$$M_{ii} = \sum \int_V H_i^T \rho H_i dV \quad (5.25)$$

Depois calculado a massa do elemento M_e

$$M_e = \sum \int_V \rho dV \quad (5.26)$$

Com isso são obtidos os valores de m_{ii} que são os coeficientes da diagonal principal da matriz de massa diagonalizada.

$$m_{ii} = M_e \frac{M_{ii}}{\sum_i M_{ii}} \quad (5.27)$$

O método de diferenças centradas é apresentado na EQ 5.24, sendo o erro de aproximação da ordem de Δt^2 (BATHE, 1996).

$$\ddot{U}^t = \frac{U^{t-\Delta t} - 2U^t + U^{t+\Delta t}}{\Delta t^2} \quad (5.28)$$

$$\dot{U}^t = \frac{U^{t+\Delta t} - U^{t-\Delta t}}{2\Delta t} \quad (5.29)$$

Considerando a EQ. 5.16 no tempo t tem-se:

$$M\ddot{U}^t + KU^t = R^t \quad (5.30)$$

Substituindo EQ. 5.24 em 5.26

$$\frac{M}{\Delta t^2} U^{t+\Delta t} = R^t + \left[2\frac{M}{\Delta t^2} - K \right] U^t - \frac{M}{\Delta t^2} U^{t-\Delta t} \quad (5.31)$$

Para determinação de $U^{t+\Delta t}$ é necessário ter os valores de U^t e $U^{t-\Delta t}$. Para $t=0$ o valor de U^0 e \dot{U}^0 são conhecidos e \ddot{U}^0 pode ser calculado pela EQ 5.20.

Para calcular $U^{-\Delta t}$ deve-se utilizar a EQ. 5.32.

$$U^{-\Delta t} = U^0 - \Delta t \dot{U}^0 + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{U}^0 \quad (5.32)$$

Com os deslocamentos calculados, podem-se obter as acelerações e velocidades através da EQ. 5.28 e 5.29.

5.3. ESTABILIDADE DA SOLUÇÃO

Para garantir estabilidade e precisão da solução, o tamanho do passo de tempo utilizado na integração explícita no tempo é limitado pela condição de Courant-Friedrichs-Levy. (LS-DYNA, 2014).

A condição implica que o passo de tempo é limitado tal que um distúrbio, por exemplo, onda de pressão, não pode viajar mais que a menor dimensão característica do elemento na malha, em um simples passo de tempo.

Então o critério de passo de tempo para que a solução seja estável é apresentado na EQ 5.29.

$$\Delta t \leq f \left[\frac{L_e}{c} \right]_{\min} \quad (5.33)$$

Onde Δt é o incremento de tempo, f é o fator de estabilidade do passo de tempo, L_e é a dimensão característica de um elemento e c é a velocidade do som local no material em um elemento.

$$L_e = \frac{v_e}{A_{e_{\max}}} \quad (5.34)$$

Tal que, v_e é o volume do elemento e $A_{e_{\max}}$ é a área do maior lado do elemento.

Quando o elemento utilizado é um elemento sólido temos o valor de c , velocidade do som adiabática, de acordo com a formulação EQ 5.31.

$$c = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)\rho}} \quad (5.35)$$

Tal que, E é o módulo de Young, ν é a razão de Poisson e ρ a massa específica.

Deve-se ressaltar que o passo de tempo utilizado para integração explícita no tempo geralmente será muito menor que aquele utilizado para integração

implícita. Sabendo que, na formulação explícita não há necessidade de convergência para solução, portanto, é menos um critério a ser verificado.

O mínimo valor de L_e/c entre todos os elementos obtidos em um modelo é o que será utilizado para cálculo do passo de tempo. Isto implica que o número de passos de tempo requerido para resolver a simulação é obtido pelo menor elemento no modelo.

5.4. ESCOLHA DO MATERIAL

Ao utilizar o material rígido para o projétil ou para o tubo são desconsideradas as deformações dos elementos da sua malha, isto é, não há deslocamento relativo entre os nós dos elementos. Todos os graus de liberdade dos nós no corpo são acoplados com o centro de massa do corpo. Conseqüentemente, eles têm somente seis graus de liberdade desconsiderando o número de nós que o definem. As propriedades, tais como, massa, e a inércia do projétil são definidas no centro de massa do corpo.

O elemento que recebe o material rígido não é utilizado para o cálculo do passo de tempo, porém para o cálculo da rigidez do contato, ele será utilizado caso haja contato.

O Material flexível é utilizado para o tubo e para a cinta de forçamento, neste caso os graus de liberdade dependerão do elemento escolhido obtendo a quantidade total através dos nós da malha.

5.5. ESCOLHA DO ELEMENTO E ESTUDO DA MALHA

No caso em que o tubo é considerado rígido tanto o tubo quanto o projétil terão o mesmo tipo de elemento com interpolação linear e um ponto de integração, pois não haverá deformação em ambos os corpos.

Neste trabalho todos os elementos são sólidos, hexaédricos ou tetraédricos. Para os corpos rígidos, tubo e cinta de turgência, considerou-se elemento sólido tipo 1, hexaédrico linear com um ponto de integração. Para o

projétil é considerado o elemento tipo 13, tetraédrico, também linear devido ao carregamento de pressão.

Para os corpos considerados flexíveis é utilizado o elemento sólido tipo 3 que tem polinômio interpolador quadrático cada nó com graus de liberdade de translação e rotação e integração completa para que o cálculo das integrais possam ser aproximados com melhor precisão.

O refinamento da malha se deve ao pequeno deslocamento do projétil nas direções lateral e vertical devido à folga entre o tubo e o projétil. Para obter o tamanho do elemento, foi considerado o passo de tempo utilizado no cálculo de cada iteração, foi também considerada uma malha que não seja incompatível a geometria dos corpos e que seja possível detectar a penetração que deve ser muito pequena comparada à folga.

No caso mais simples, onde a deformação pode ser desprezada, utiliza-se o elemento menos custoso computacionalmente, com interpolação linear.

Optou-se por utilizar funções de interpolação quadrática, para obter um modelo com menos elementos para os corpos flexíveis, tubo e cinta de forçamento.

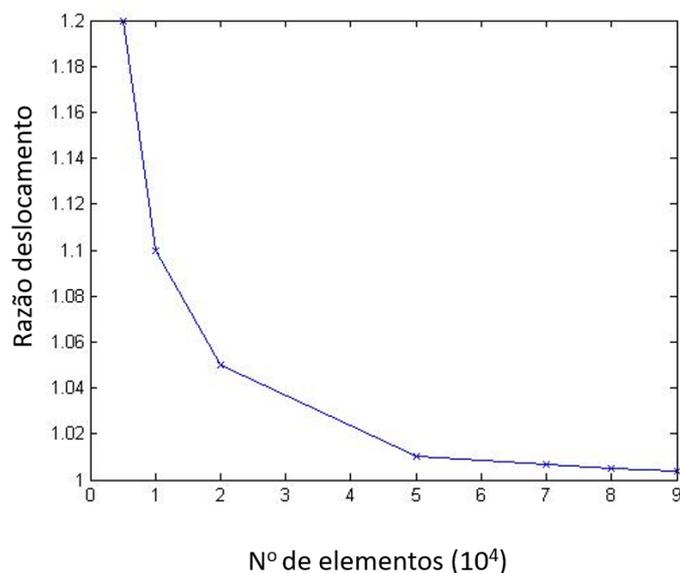


FIG 5.1 Análise de convergência da malha.

A convergência da malha de elementos finitos é apresentada na FIG. 5.1, isto é feito para que o modelo possa ser capaz de simular o comportamento dinâmico da estrutura sem que haja perda de tempo computacional.

5.6. TIPOS DE CONTATOS

Os contatos são utilizados para controlar a penetração entre os corpos pertencentes ao sistema a ser estudado, a fim de que essa penetração seja aceitável comparada com outras dimensões do modelo. Os contatos também são utilizados para montagem de componentes ao restringir os graus de liberdade entre eles.

Os contatos podem ser na direção normal e/ou tangencial. O contato normal é utilizado para avaliar quando ocorre penetração entre dois corpos e o tangencial é quando ocorre atrito entre os corpos. Será levado em conta o atrito dinâmico entre os corpos, pois não é objeto de estudo deste trabalho obter o comportamento e esforços no início do disparo. Por esta razão, não é considerado o atrito estático neste modelo de contato para este trabalho.

Existem muitos algoritmos de contatos e iremos abordar apenas os que são objetos de pesquisa para este trabalho, que posteriormente serão utilizados para obtenção do modelo numérico computacional.

Primeiramente é necessário definir alguns conceitos ao tratar de contato entre corpos. O conceito de escravo e mestre é utilizado para definir quem terá seus nós ou segmentos verificados no critério estabelecido para constatar se houve penetração ou não entre os corpos, onde partes do modelo devem ser descritas como escravo e partes como mestre dependendo do tipo de algoritmo de contato a ser utilizado.

O método de penalidade é o algoritmo de contato mais utilizado e consiste na verificação da penetração do nó escravo através de uma superfície considerada mestre. Se o nó escravo não penetrar, nada é feito. Se o nó penetrar uma força de interface é aplicada entre o nó escravo e o seu ponto de contato. A magnitude desta força é proporcional à profundidade de penetração e a rigidez do contato, sendo o mesmo princípio de uma mola sobre pressão.

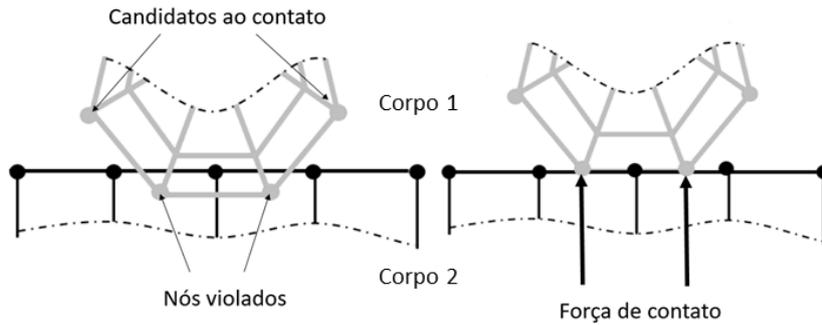


FIG 5.2 Ilustração do contato quando uma superfície penetra em outra e gera uma força de repulsão (Adaptado de KIM, 2015).

Neste trabalho, o elemento utilizado é o elemento sólido. A sua formulação de contato utilizada pelo LS-DYNA pode ser vista na EQ 5.36 e 5.37. Onde são calculados os esforços que os nós sofrem, caso haja contato, pois neste caso d é diferente de zero. Estes esforços são aplicados na EQ 5.17 como carga concentrada, seguindo a formulação de contato apresentada na seção 4, para localizar a região de contato através de um método iterativo utilizando as EQ. 4.11 à 4.18.

$$F = k \cdot d \tag{5.36}$$

$$k = slsfac \cdot sf \cdot K \cdot \frac{A^2}{V} \tag{5.37}$$

Tal que,

- k é a rigidez do contato,
- d é a penetração do nó da malha do corpo 1 na malha do corpo 2,
- $slsfac$ é o fator de escala global,
- sf é o fator de escala local,
- K é o modulo volumétrico ou *bulk modulus*,
- A é o segmento de área do elemento,
- V é o volume do elemento.

A rigidez do contato é obtida para cada segmento tanto para o segmento escravo quanto para o mestre e é utilizado o menor valor entre eles. Se estes

valores forem muito diferentes, da ordem de 100 vezes, pode ser utilizado outra formulação para cálculo da rigidez, como é apresentada na EQ 5.38.

$$k \leq \frac{1}{2} \cdot \text{sofscl} \cdot \frac{m^*}{\Delta t^2} \quad (5.38)$$

Tal que,

sofscl é o fator de escala local.

m^* é uma função das massas do nós escravos e dos nós do mestres.

Δt é o passo de tempo atual.

6. RESULTADOS DO ESTUDO DO BATIMENTO

É analisada a influência do desvio da trajetória do projétil utilizando um modelo cujo material do tubo é rígido e com outro modelo, considerando o tubo flexível.

As condições iniciais e o material são apresentados na TAB. 6.1. Onde a letra A considera o tubo com material rígido e a letra B o tubo com material flexível. Para cada número de 1 a 5 são consideradas diferentes condições de contorno com inclinações verticais do projétil de -0,06, 0 e +0,06, e desvio de centro de massa de -0,26 mm, zero e +0,26 mm.

TAB 6.1 Estudo de casos e condições iniciais.

CASOS		1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5 ^a	5B
Material do tubo		rígido	flexível	rígido	flexível	rígido	flexível	rígido	flexível	Rígido	flexível
CONDIÇÕES INICIAIS	Ângulo de pitch inicial (graus)	0	0	0	0	-0,06	-0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
	Desvio de CM vertical (mm)	0	0	-0,26	-0,26	-0,26	-0,26	0	0	-0,26	-0,26

Caso 1A

Na FIG. 6.1 é possível verificar que o centro de massa do projétil se desloca na direção y negativa, até a cinta de turgência entrar em contato com a parte interior do tubo, sendo assim, através da força de contato o tubo irá impulsionar o projétil para cima.

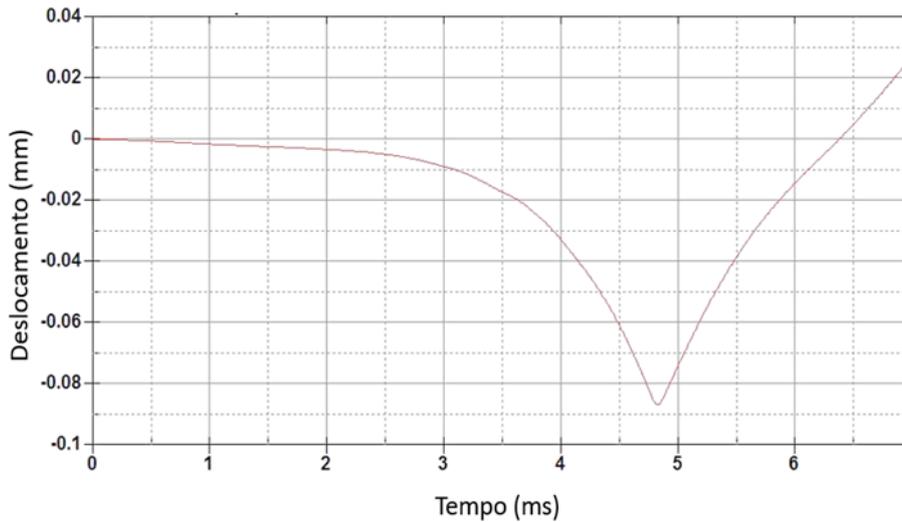


FIG 6.1 Deslocamento do CM do projétil na direção Y para caso 1A.

Na FIG. 6.2, observa-se um deslocamento do centro de massa do projétil na direção z, isto ocorre porque a aceleração gravitacional é pequena em relação a aceleração transmitida ao projétil, que é devido à pressão dos gases liberados após a explosão. Outra influência do deslocamento em z, é que o modelo contempla uma deformação na cinta de forçamento que transmite um deslocamento ao projétil a medida que entra em contato com o tubo. Conforme esta interage com o tubo ela sofre pequenas deformações nas direções y e z que podem afetar a posição do centro de massa.

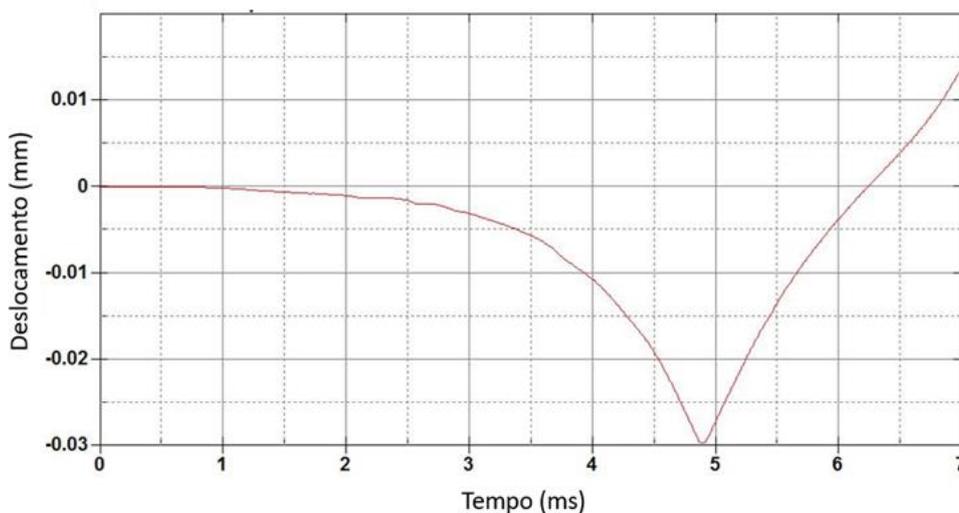


FIG 6.2 Deslocamento do CM do projétil na direção Z para caso 1A.

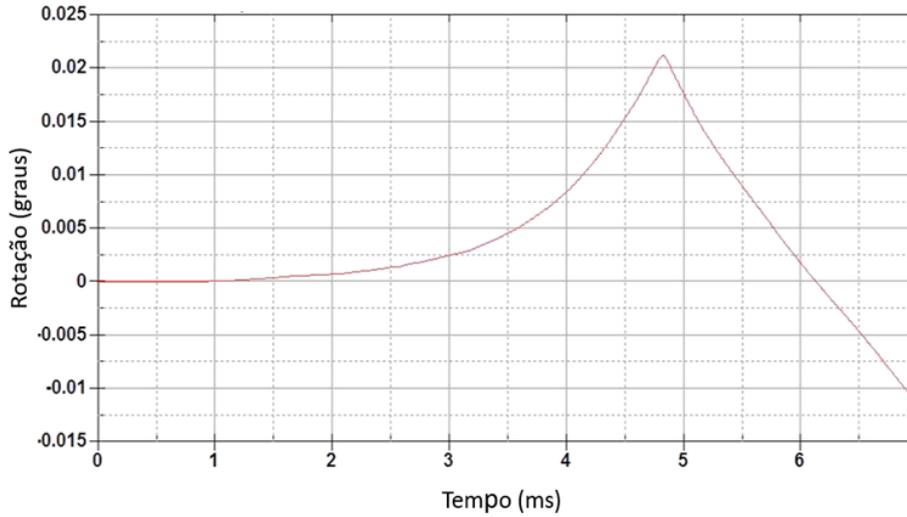


FIG 6.3 Rotação do projétil na direção Y para caso 1A.

A FIG. 6.3 mostra que o projétil sofre rotação em relação ao eixo y e depois muda sua direção após colidir com o tubo, o mesmo ocorre na FIG. 6.4 para direção z. Através destes gráficos pode ser visto que o projétil colidiu com o tubo apenas uma vez, no instante 4,8 ms. Como o projétil sai da boca do tubo no instante 6,5 ms, então ele rotaciona, no eixo z e y, até sair com ângulo de pitch de aproximadamente $-0,005^{\circ}$ e ângulo de yaw de $+0,009^{\circ}$. Estes ângulos são amplificados quando o projétil sai do tubo.

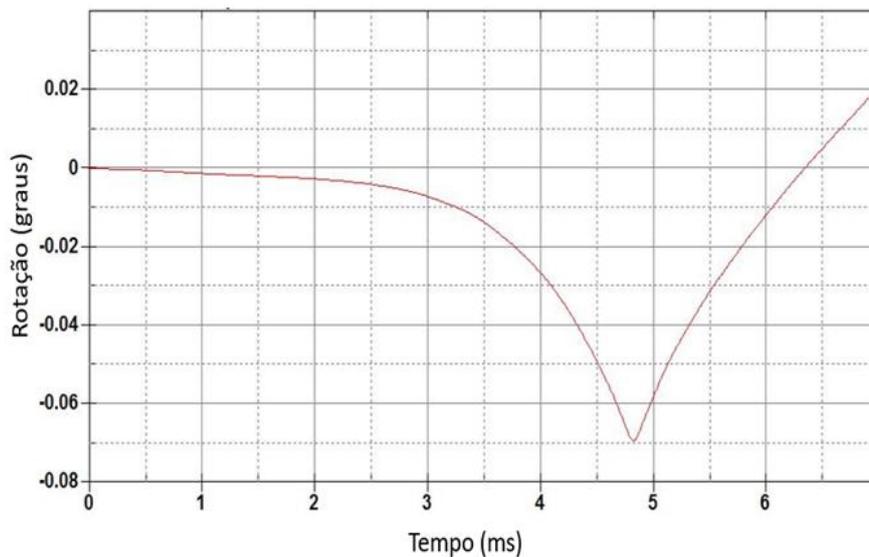


FIG 6.4 Rotação do projétil na direção Z para caso 1A.

Caso 2A

Neste caso é possível verificar que ao deslocar o centro de massa do projétil, ele entrou em contato mais rapidamente com o tubo e também obteve maior frequência de batimento devido ao momento provocado pela força, obtida pela pressão, que sempre estará localizada no centro geométrico da parte traseira do projétil. O momento também depende da distância entre o centro geométrico e o centro de massa.

Por esta mesma razão, o primeiro contato é obtido em 1,93 ms e no primeiro caso, onde o projétil não tem o seu centro de massa deslocado, o primeiro contato se dá em 4,8 ms. A amplitude e período de batimento aumentam devido a aceleração do projétil. A frequência de batimento não é constante ao longo do tubo e varia de 1333 Hz a 1000Hz.

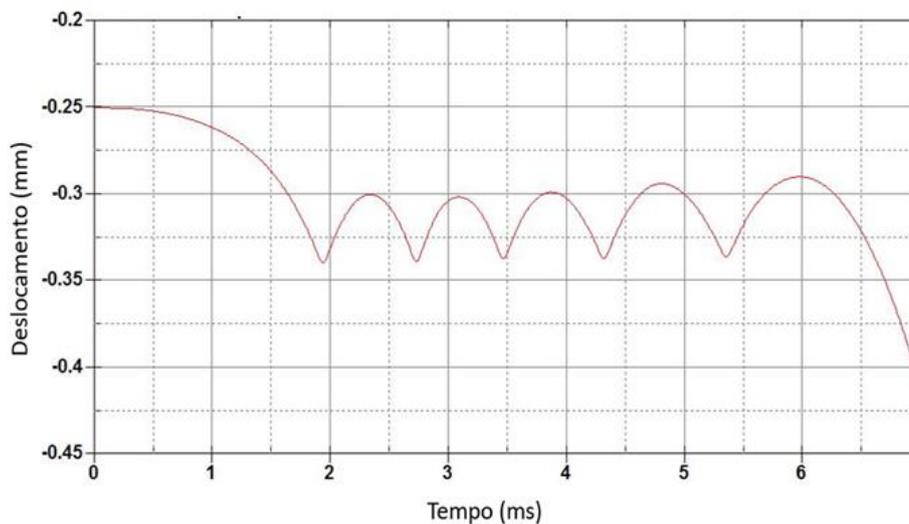


FIG 6.5 Deslocamento do projétil na direção Y para caso 2A.

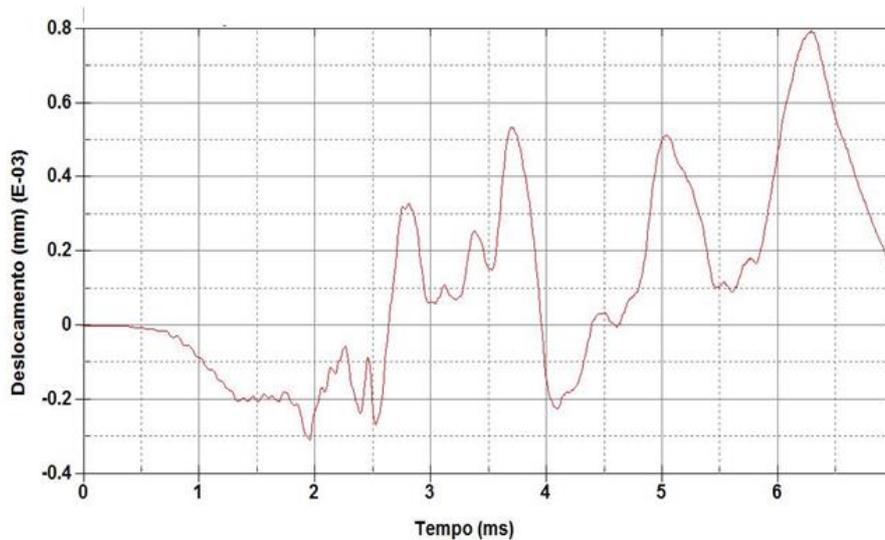


FIG 6.6 Deslocamento do projétil na direção Z para caso 2A.

Nas FIG. 6.6 e 6.7 podemos ver que o deslocamento e inclinação na direção z são pequenos, e podem ser considerados nulos para este estudo.

A FIG. 6.8 mostra a rotação do projétil e pode ser visto que ele fica entrando em contato com a parte inferior da superfície interna do tubo até sair pela boca do tubo. Neste caso ele obteve um ângulo de *pitch* de aproximadamente $-0,075$ em 6,5 ms, e ângulo de *yaw* de $-0,0001^{\circ}$, que pode ser considerado nulo, ao sair da boca do tubo. O projétil sai do tubo com inclinação para baixo diferindo do primeiro caso de estudo que sua inclinação foi para cima e não há desvio da trajetória na direção z.

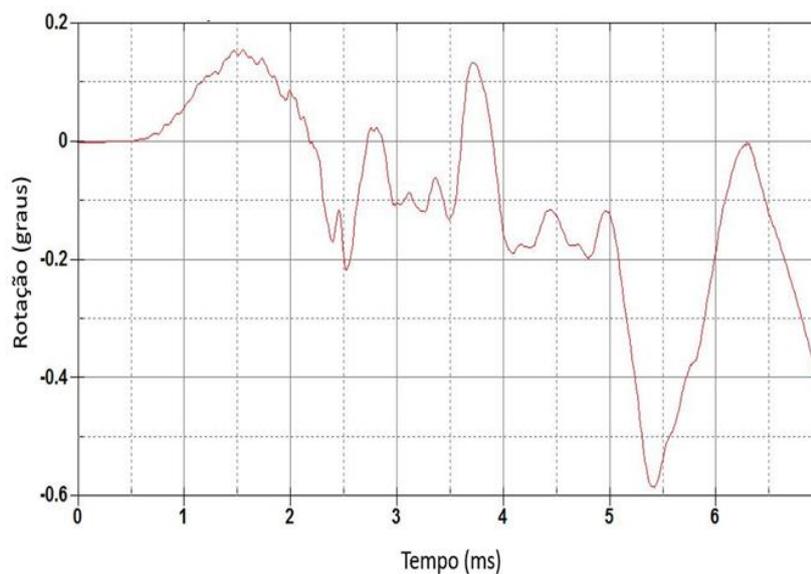


FIG 6.7 Rotação do projétil na direção Y para caso 2A.

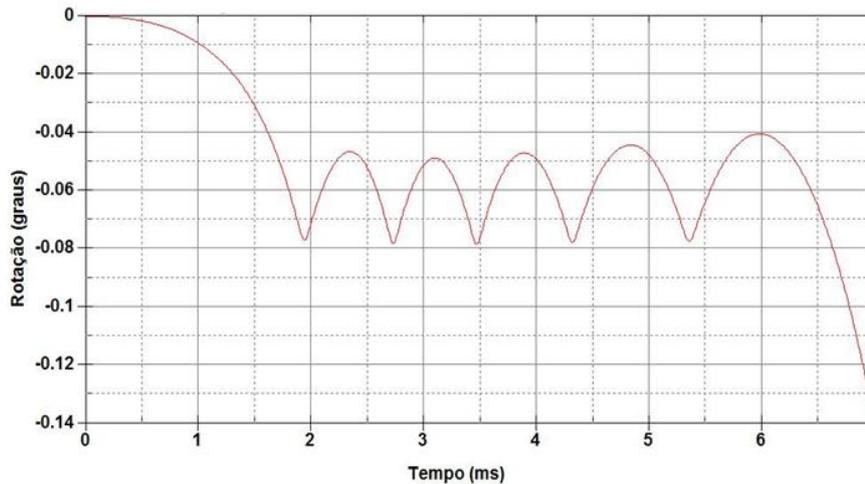


FIG 6.8 Rotação do projétil na direção Z para caso 2A.

Caso 3A

Ao entrar em contato com o tubo, a cinta de turgência começa a oscilar, pois ela está tentando penetrar no tubo devido à gravidade, embora sua penetração seja pequena comparada a folga, que é de 0,25mm. Ela é impedida de penetrar no tubo devido à força de contato entre as superfícies. Também é importante destacar que a penetração devido ao impacto da cinta de turgência com o tubo é da ordem de 0,07mm.

Ao iniciar o carregamento de pressão, pequenos deslocamentos podem ser vistos na FIG. 6.9, onde também ocorrem pequenas penetrações. Mesmo ocorrendo pequenos deslocamentos do centro de massa, eles demonstram que ocorre batimento, significa que o projétil praticamente se mantém encostado na parte inferior do tubo.

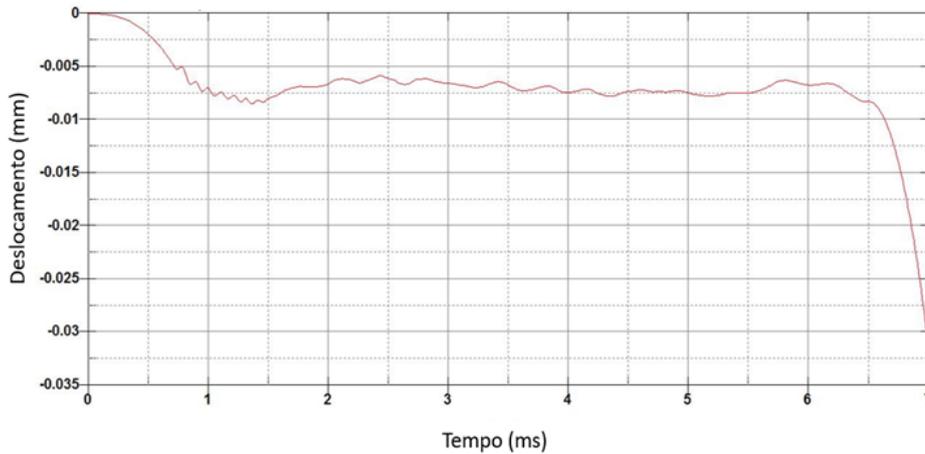


FIG 6.9 Deslocamento do projétil na direção Y para caso 3A.

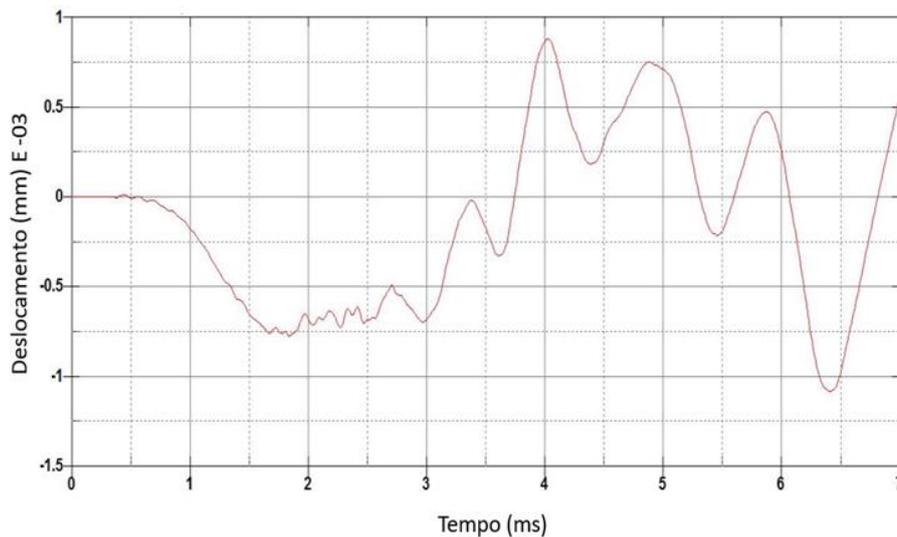


FIG 6.10 Deslocamento do projétil na direção Z para caso 3A.

A FIG. 6.10 mostra que o projétil tem deslocamentos desprezíveis, dentro do tubo para este tipo de configuração, e ele praticamente sairá da mesma forma que suas condições iniciais para direção z. Isto é confirmado pela FIG. 6.12, onde o ângulo que o projétil faz com a horizontal é praticamente nulo, mas no caso vertical, ele passa de $0,06^{\circ}$ para $0,072^{\circ}$.

Fica claro que o projétil sai do tubo com a mesma configuração inicial com ângulo de pitch $-0,06^{\circ}$ e ângulo de yaw praticamente zero e posição do centro de massa igual a $-0,25$ mm.

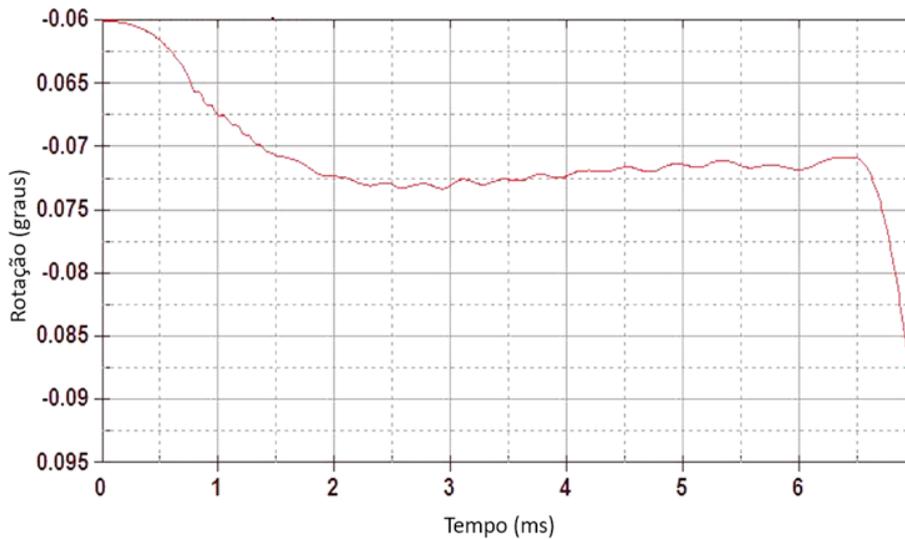


FIG 6.11 Rotação do projétil em relação ao eixo Z para caso 3A.

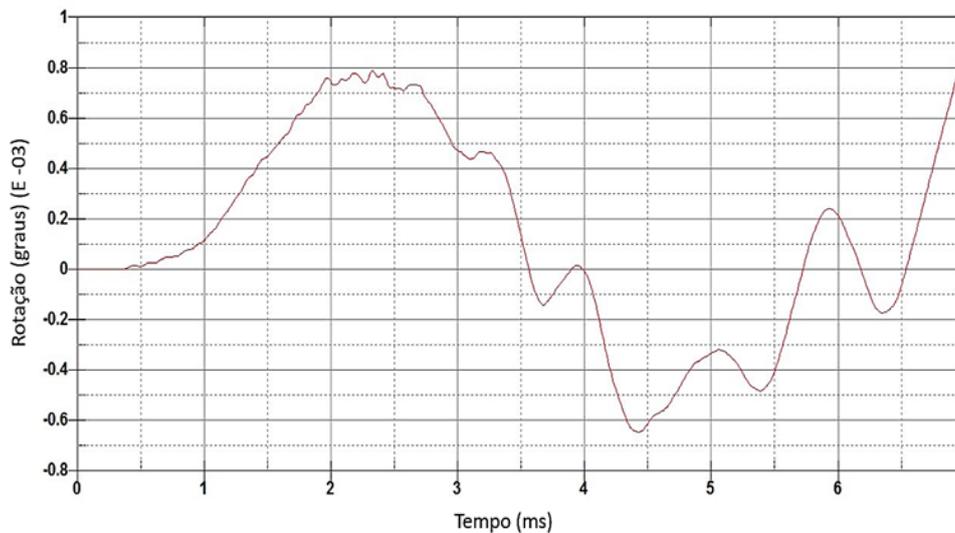


FIG 6.12 Rotação do projétil em relação ao eixo Y para caso 3A.

Caso 4A

Na FIG. 6.13 observa-se que no início da simulação, o projétil praticamente não se desloca na direção y, pois ele está sujeito somente a ação da gravidade e o carregamento de pressão só terá início após o instante 0,3 ms. Os impactos ocorrem em 2,7 ms em 5,1 ms e 6,0 ms. O intervalo entre 2,7 ms e 5,1 ms o projétil não possui energia suficiente para rotacionar até atingir a parede interna superior do tubo e por isso volta a descer.

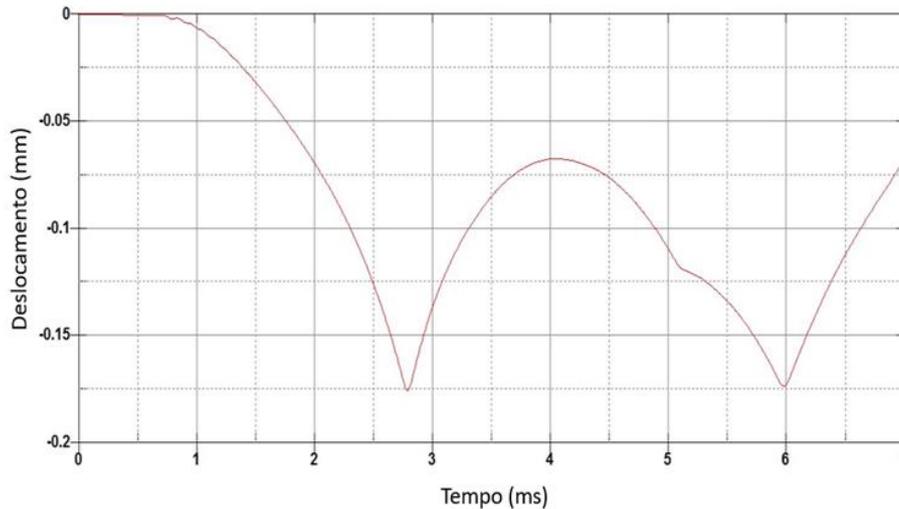


FIG 6.13 Deslocamento do CM do projétil na direção Y para caso 4A.

O comportamento do projétil obtido por ANSARI *et al.* (1988) é um pouco diferente do apresentado neste trabalho. O projétil tem condições de contorno que são diferentes das apresentadas aqui. Ele utilizou um modelo bidimensional considerando cada contato como uma mola linear, a saber, entre a cinta de forçamento e o tubo, e a cinta de turgência e o tubo.

Esta consideração permite que a cinta de forçamento se desloque para baixo, em toda a extensão da folga, devido à gravidade. Por esta razão, a amplitude de deslocamento e a rotação do projétil, após a colisão com o tubo, no modelo de ANSARI *et al.* (1988), são menores do que aqueles obtidos neste trabalho, conforme pode ser observado nas FIG. 6.13 e 6.14, 6.15 e 6.16.

Além disso, no modelo ANSARI *et al.* (1988) após a colisão a mola localizada na cinta de turgência empurra o projétil, que gira e comprime a mola localizada na cinta de forçamento que, por sua vez, empurra o projétil girando este causando este movimento de *zig-zag*.

Através da FIG. 6.14 pode ser visto que o projétil se desloca na direção z, durante o batimento, sendo os pontos de inflexão, aqueles em que ocorrem o batimento.

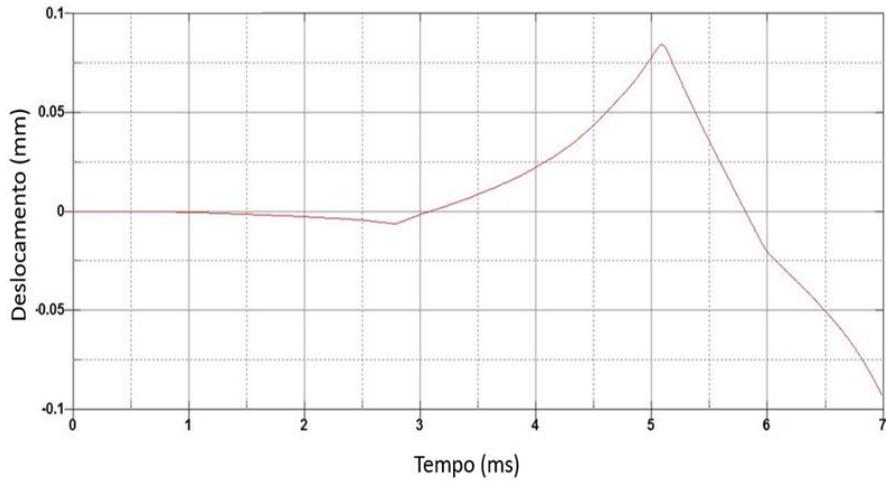


FIG 6.14 Deslocamento do CM do projétil na direção Z para caso 4A.

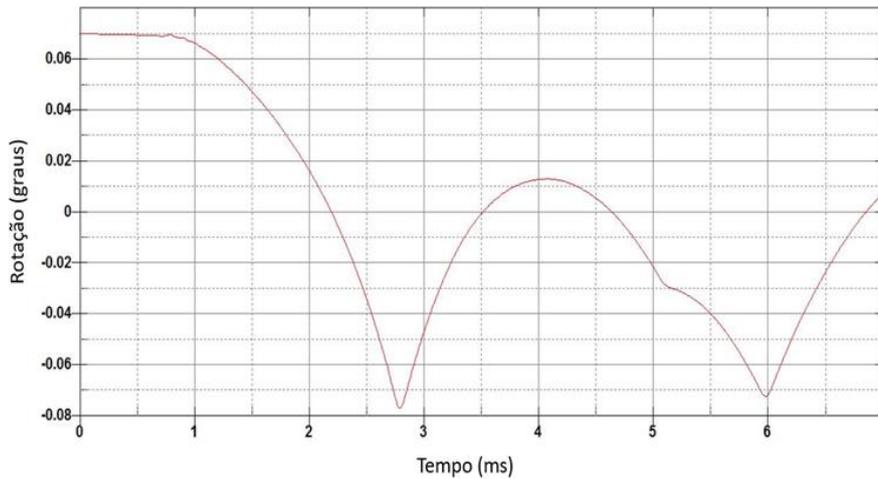


FIG 6.15 Rotação do projétil em relação ao eixo Z para caso 4A.

A rotação em relação ao eixo z obtida por ANSARI *et al.*(1988) se diferencia da apresentada na FIG. 6.15, devido a suas condições de contorno já mencionadas acima. Ao sofrer o impacto a mola utilizada entre a cinta de turgência e o tubo traciona, impulsionando o projétil para cima que por sua vez comprime a mola que está entre a cinta de forçamento e o tubo. Este movimento pode ser visto através da perturbação que ocorre entre 3 a 5 ms.

O projétil sai da boca do tubo com um ângulo de pitch de $-0,020^{\circ}$ ascendente e $+0,04^{\circ}$ de ângulo de yaw.

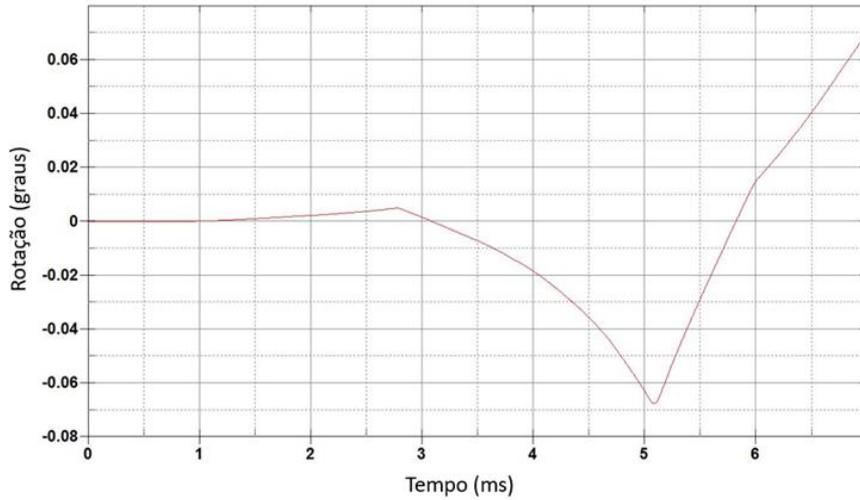


FIG 6.16 Rotação do projétil em relação ao eixo Y para caso 4A.

Caso 5A

Na FIG. 6.17 é possível verificar que o centro de massa do projétil se desloca lentamente para baixo, devido à gravidade, com aceleração constante, até que em aproximadamente 0,3 ms a pressão atinge o projétil, acelerando este, até ele colidir com a parede interna do tubo.

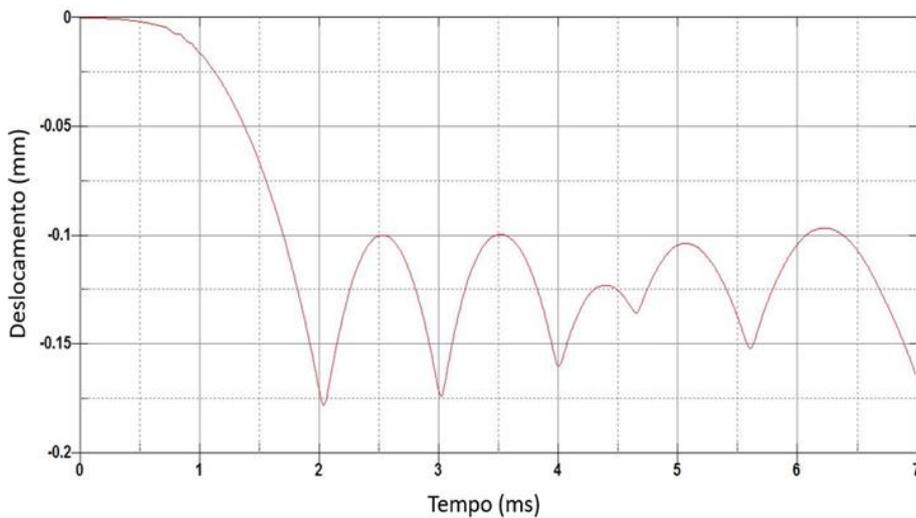


FIG 6.17 Deslocamento do CM do projétil na direção Y para caso 5A.

A FIG. 6.18 apresenta o deslocamento sofrido na direção z, mostrando que o número de colisões aumenta devido ao desbalanceamento do centro de massa do projétil. A partir de 3 ms o deslocamento na direção z começa a

interferir cada vez mais no batimento e a ser amplificado, consequentemente a amplitude do deslocamento na direção y diminui.

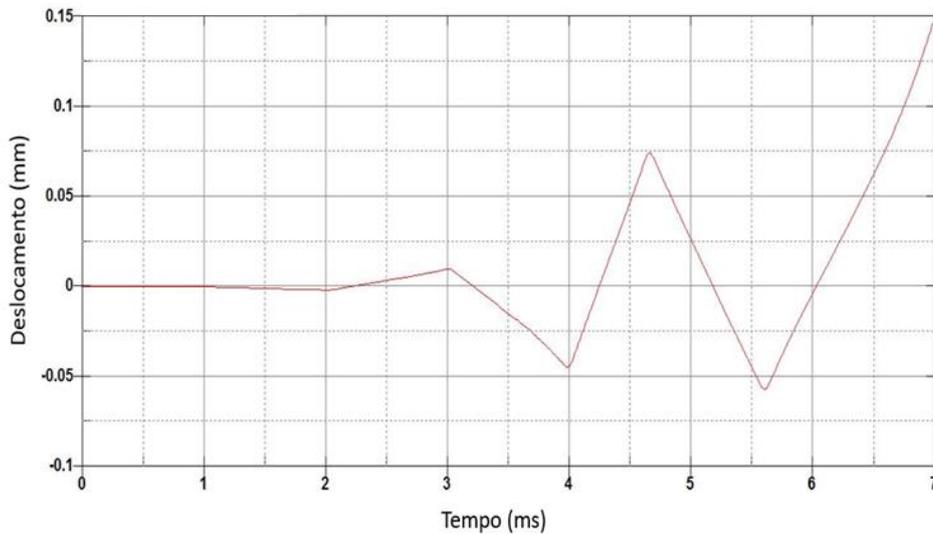


FIG 6.18 Deslocamento do CM do projétil na direção Z para caso 5A.

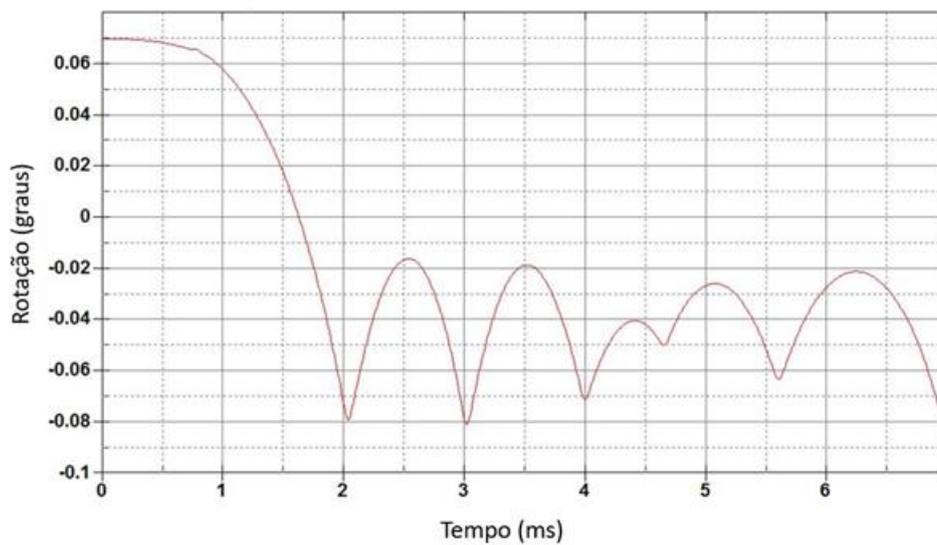


FIG 6.19 Rotação do projétil na direção Z para caso 5A.

O projétil sai do tubo com rotação negativa e decrescente na direção z, FIG. 6.19, e na direção y como pode ser visto na FIG. 6.20. O ângulo de pitch é de $-0,03^{\circ}$ e o ângulo de yaw é de $-0,05^{\circ}$. Ao sair do tubo ele continuará o mesmo movimento com amplitudes maiores e isto pode provocar um desvio significativo do alvo.

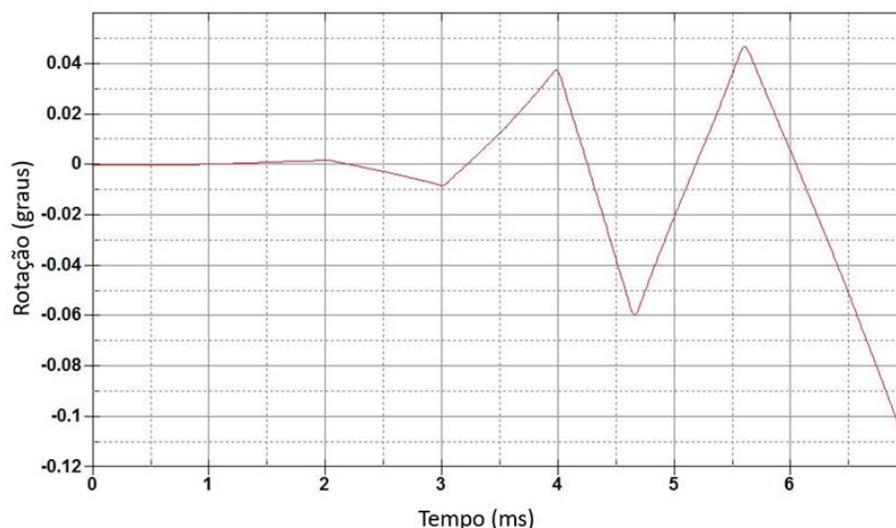


FIG 6.20 Rotação do projétil na direção Y para caso 5A.

É importante observar que a própria excentricidade da cinta de turgência em relação ao eixo do tubo pode ocasionar em um contato assimétrico e provocar desvios da trajetória na direção z que são vistos nas FIG. 6.18 até FIG; 6.20.

Caso 1B

As FIG. 6.21 e 6.22 mostram o deslocamento do projétil na direção y, podemos verificar que o projétil inicia sua trajetória descendo e depois passa a ter contato com a parte superior interna do tubo, onde ocorre o batimento que tem sua amplitude reduzida ao percorrer o tubo, ou seja, parte dessa energia transmitida para o tubo é absorvida em forma de deformação. Ao utilizar o tubo flexível, o projétil passou a ter uma trajetória curvilínea onde é gerada uma força centrípeta que o impulsiona para fora da curva, causando assim o batimento na parte superior interna do tubo.

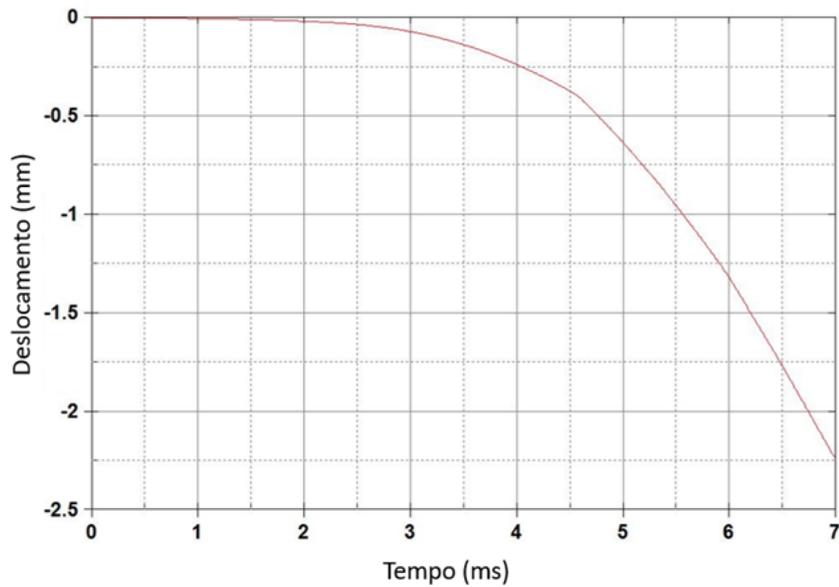


FIG 6.21 Deslocamento do CM do projétil na direção Y para caso 1B.

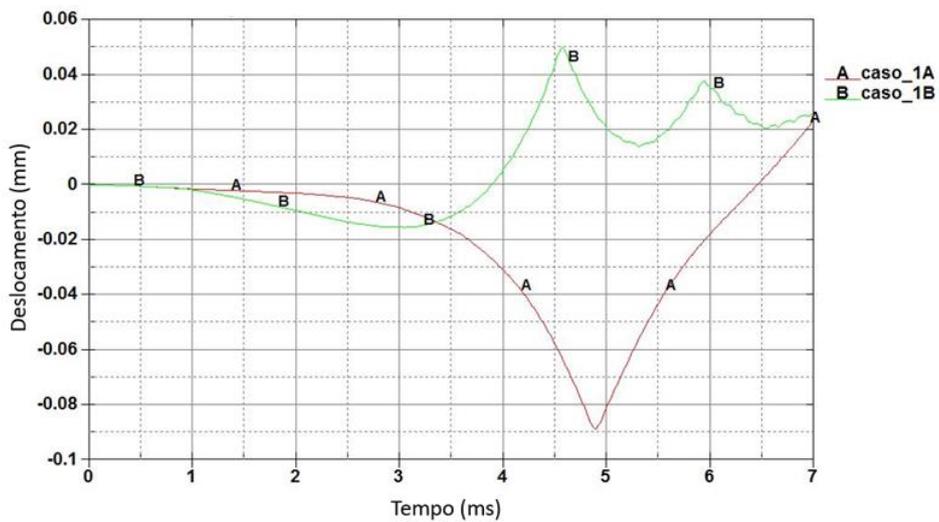


FIG 6.22 Deslocamento da boca do tubo na direção Y para caso 1B, desconsiderando o deslocamento do projétil devido a inclinação do tubo.

Na FIG. 6.23, o projétil colidiu com o tubo duas vezes, em 4,6 ms e em 5,9 ms. O projétil teve um maior desvio na direção z para o tubo flexível e não ocorreu batimento na parte inferior do tubo como ocorreu para o tubo rígido.

As FIG. 6.24 e 6.25 mostram como variam os ângulos de yaw e pitch que servem para informar a orientação do projétil e verificar qual o ângulo que o projétil faz com a linha de centro do tubo no momento em que ele sai do tubo.

Na saída da boca do tubo o ângulo de yaw é de $+0,014^{\circ}$ ascendente e de $-0,015^{\circ}$ descendente.

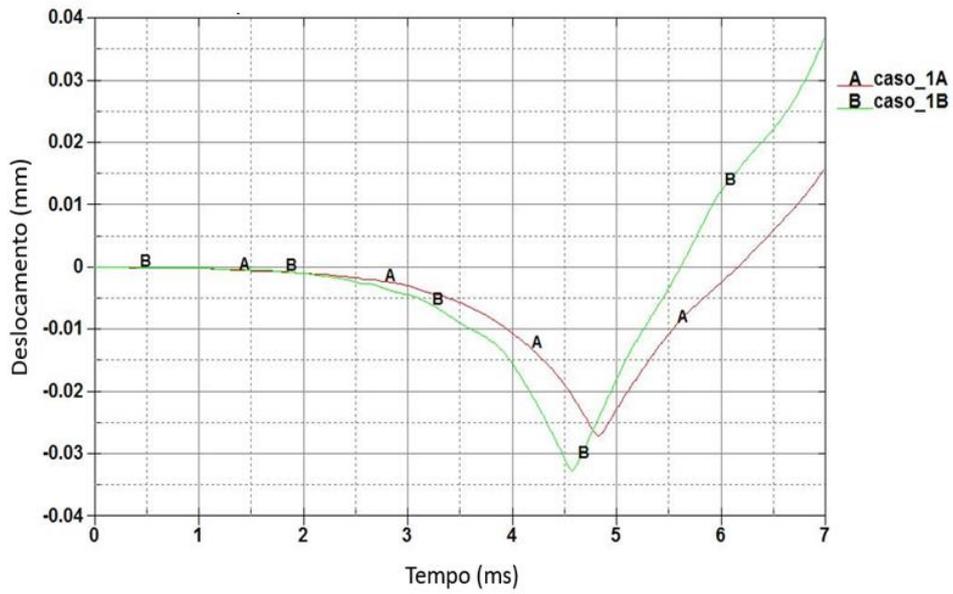


FIG 6.23 Deslocamento do CM do projétil na direção Z para o caso 1B.

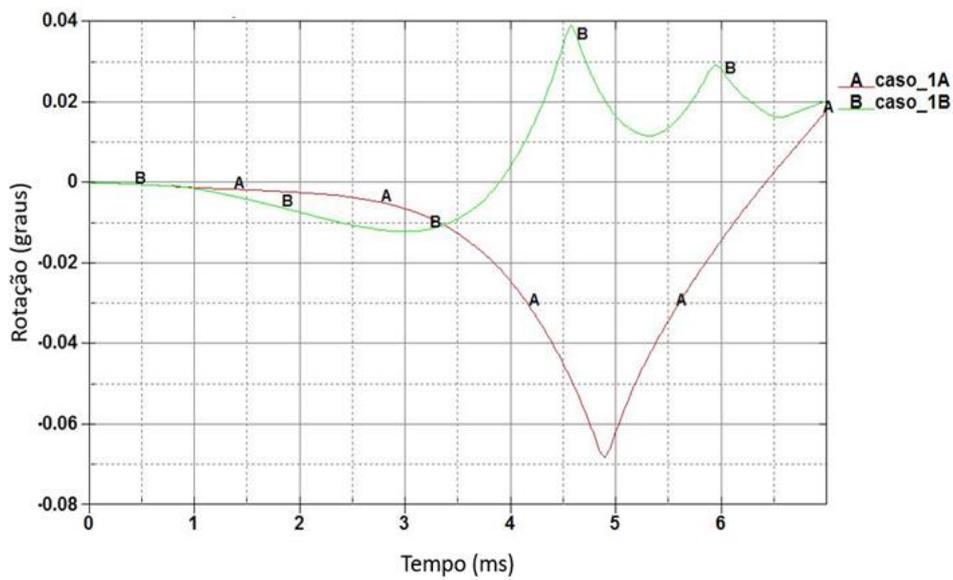


FIG 6.24 Rotação do projétil na direção Z para caso 1B.

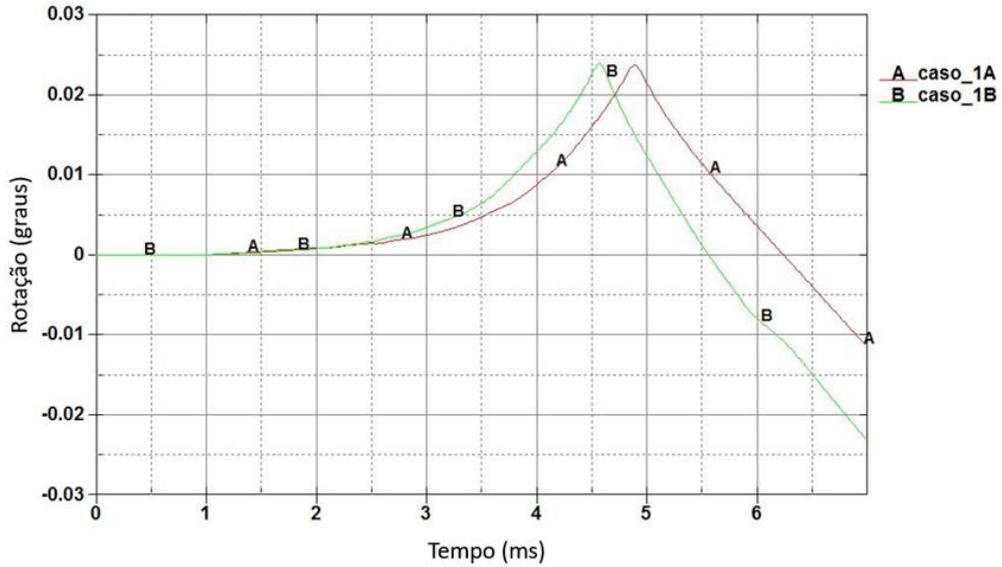


FIG 6.25 Rotação do projétil na direção Y para caso 1B.

O deslocamento obtido para os elementos, nas posições demonstradas da FIG. 6.26, podem ser vistos nas FIG. 6.27 e 6.28. Para este caso os deslocamentos da boca do tubo não são muito relevantes atingindo um máximo de 0,015 na direção y e na direção z desprezível.

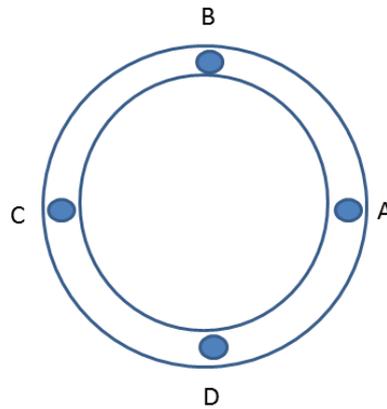


FIG 6.26 Posição dos pontos A, B, C e D na boca do tubo.

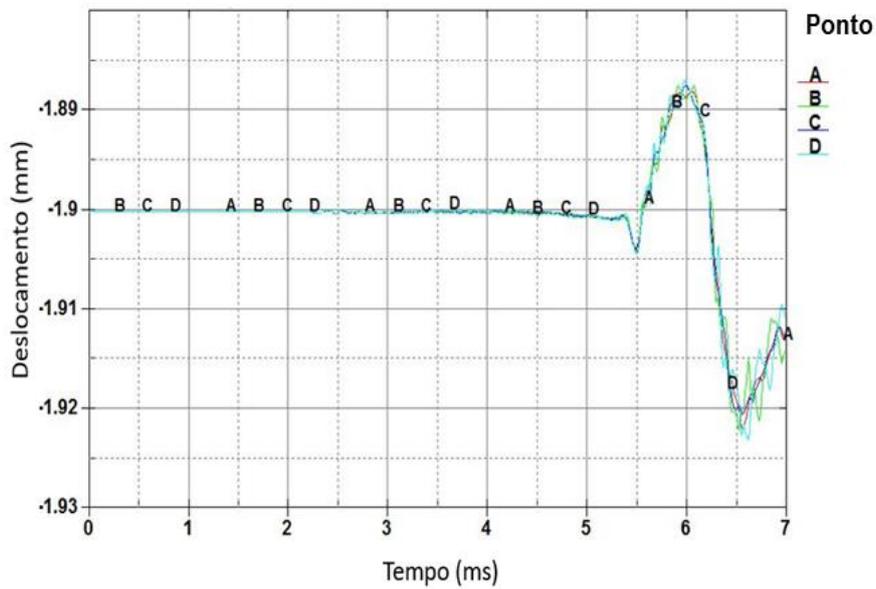


FIG 6.27 Deslocamento da boca do tubo na direção Y para caso 1B.

A FIG 6.28 apresenta os picos de tensão onde ocorrem os impactos do projétil com o tubo. As tensões vão diminuindo com o tempo juntamente com o deslocamento do projétil, pois força de contato na interação entre eles é a mesma. Esta força é a mesma que acelera o projétil provocando sua rotação e tensionando a região do impacto, localizada no tubo, deformando-o.

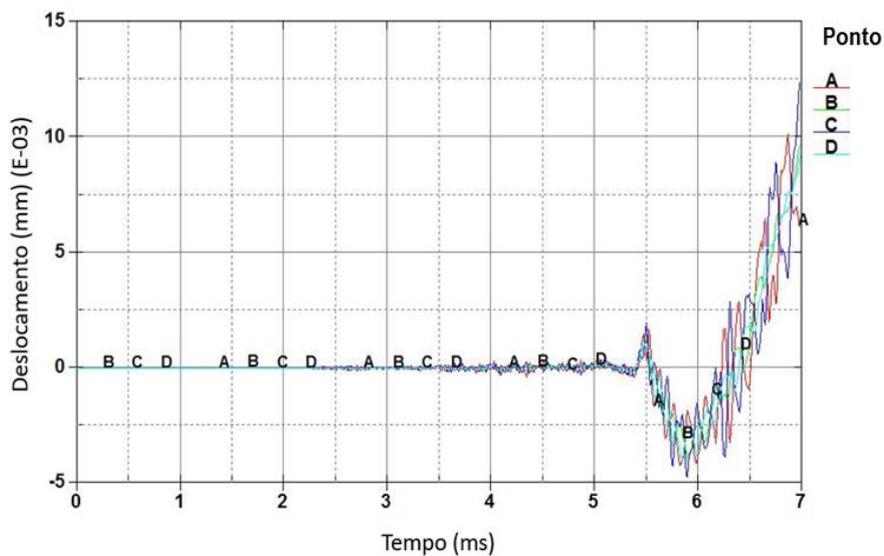


FIG 6.28 Deslocamento da boca do tubo na direção Z para caso 1B.

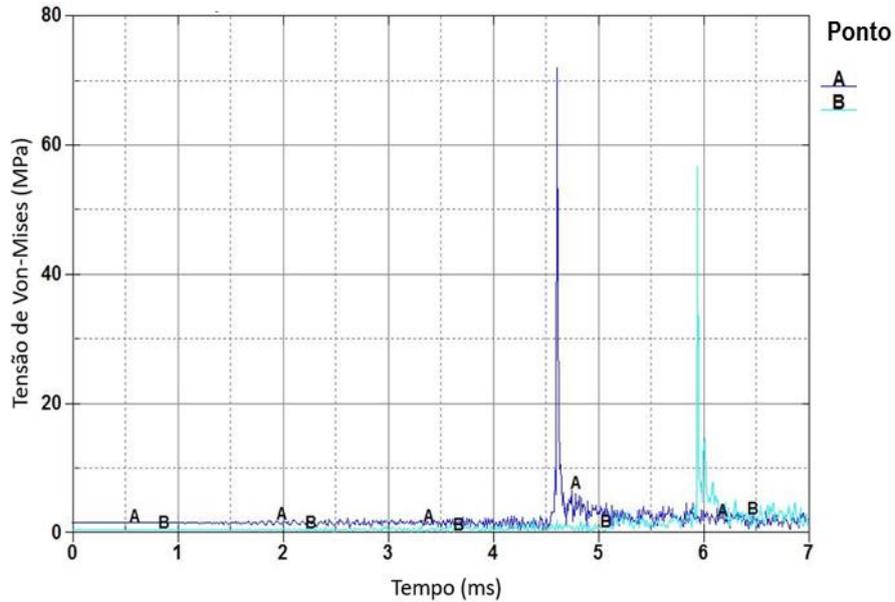


FIG 6.29 Tensões de Von-Mises ao longo do tubo para caso 1B onde A é mais próximo do tubo.

Caso 2B

Neste caso, o projétil inicialmente se desloca na direção y até entrar em contato com parte inferior interna do tubo. Como ele já possui energia suficiente ocorre o impacto impulsinando o mesmo para cima, porém ele não rotaciona a ponto de atingir a parte superior interna do tubo. Também podem ser vistos alguns pontos de inflexão onde ocorrem mudanças abruptas da curva, estes pontos demonstram as mudanças de trajetória após o impacto (FIG. 6.30 e 6.31).

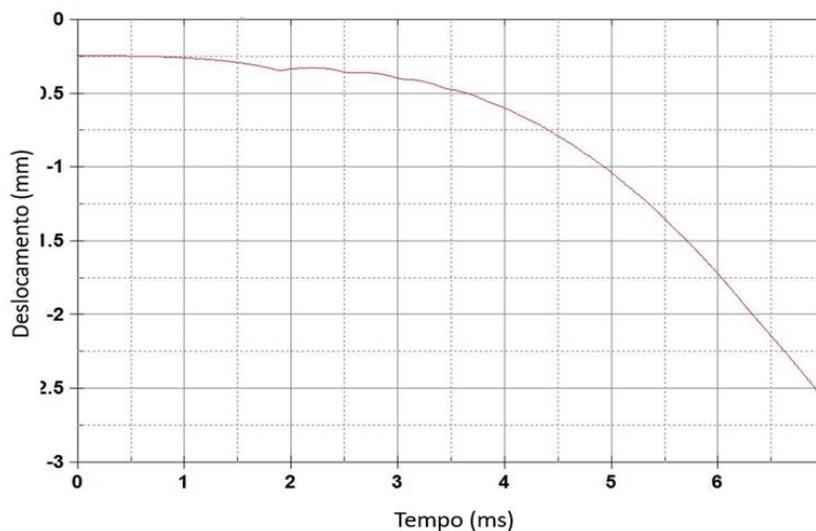


FIG 6.30 Deslocamento do C.M do projétil na direção Y caso 2B.

A FIG 6.31 mostra que o batimento sofre um decréscimo na sua amplitude caracterizando um tipo de amortecimento, isto é parte da energia transmitida no impacto é absorvida pelo tubo, através da sua deformação a cada impacto.

É importante observar que o projétil passa a ter um aumento da amplitude de deslocamento quando está próximo da boca do tubo em aproximadamente 6,2 ms. Isto se deve ao movimento da boca do tubo interagindo com o projétil que se movimenta em direção oposta. Sendo assim, parte desta energia é transferida para projétil movimentando ele para cima.

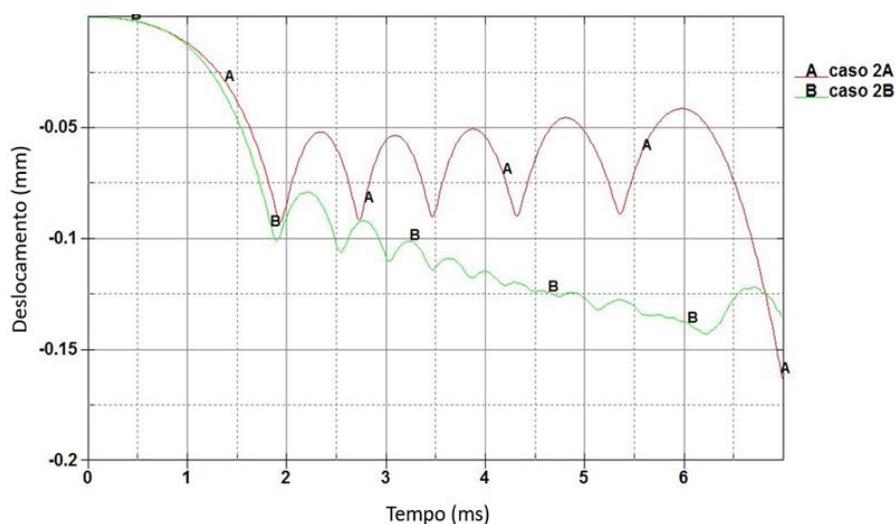


FIG 6.31 Deslocamento do C.M do projétil na direção Y ao desconsiderar a deformação do tubo caso 2B.

Pode-se notar que o projétil colide com a parte interna do tubo tanto na região negativa, em aproximadamente 2ms, quanto que na positiva, nos pontos de picos, FIG. 6.32. Embora, sua amplitude é muito pequena, podendo ser desprezível seu deslocamento na direção z.

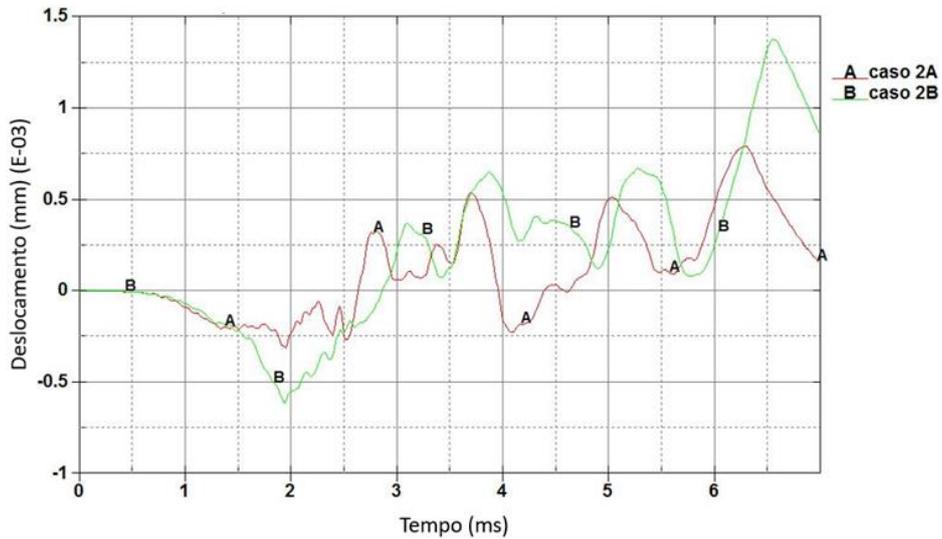


FIG 6.32 Deslocamento do C.M do projétil na direção Z caso 2B.

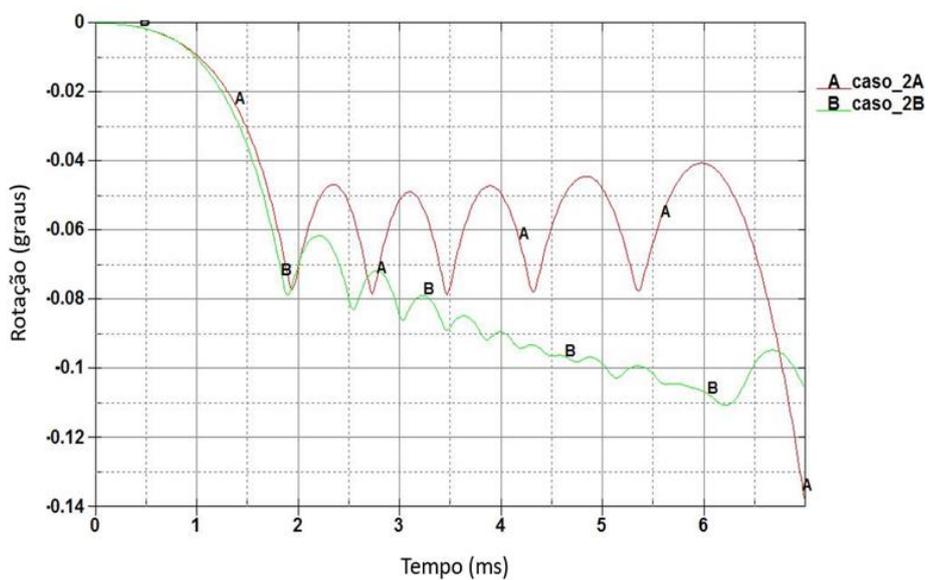


FIG 6.33 Rotação do projétil na direção Z para caso 2B.

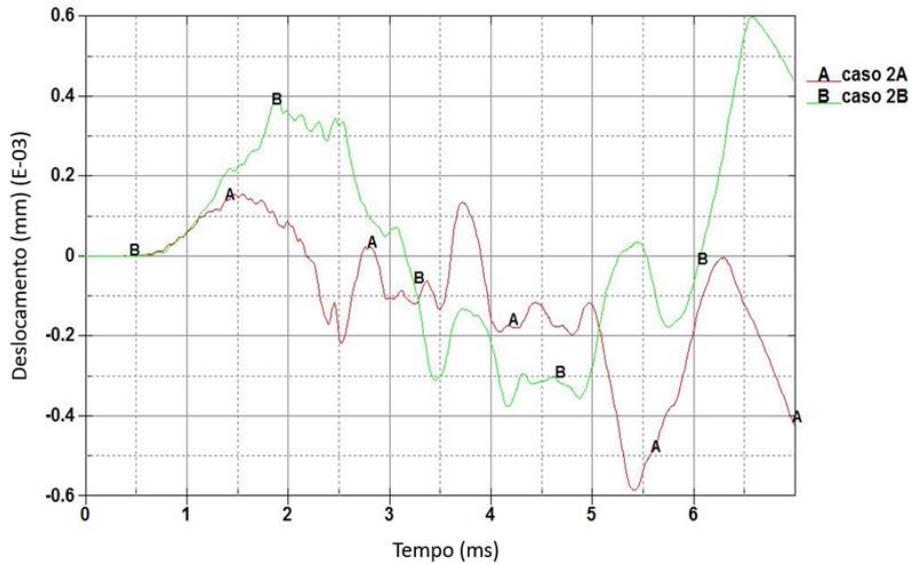


FIG 6.34 Rotação do projétil na direção Y para caso 2B.

A FIG. 6.35 apresenta o deslocamento da boca do tubo considerada nos pontos apresentados na FIG 6.26. Este comportamento é semelhante ao encontrado por (Chen, Michael M., 2010).

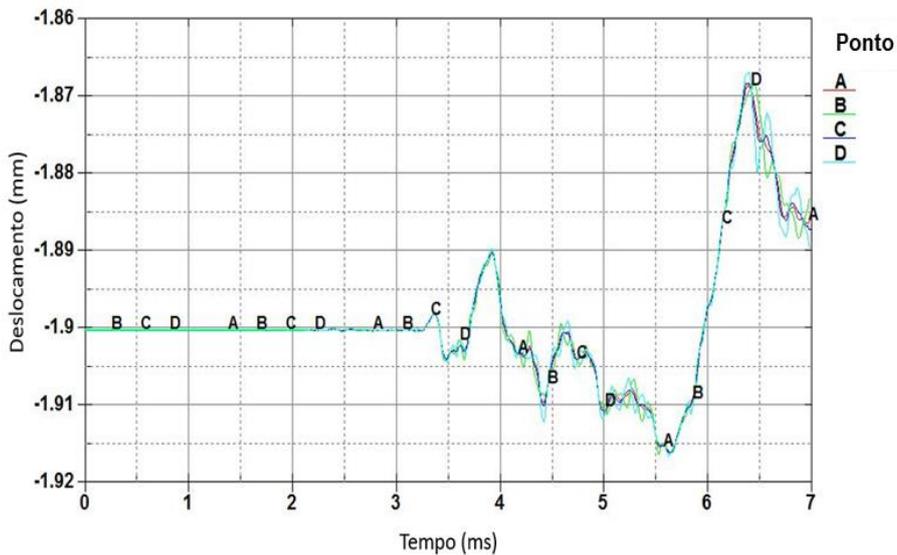


FIG 6.35 Deslocamento da boca do tubo na direção Y para caso 2B.

De acordo com a FIG. 6.36 os deslocamentos da boca do tubo na direção z são desprezíveis para estas condições, isto está de acordo com os deslocamentos praticamente nulos na direção z.

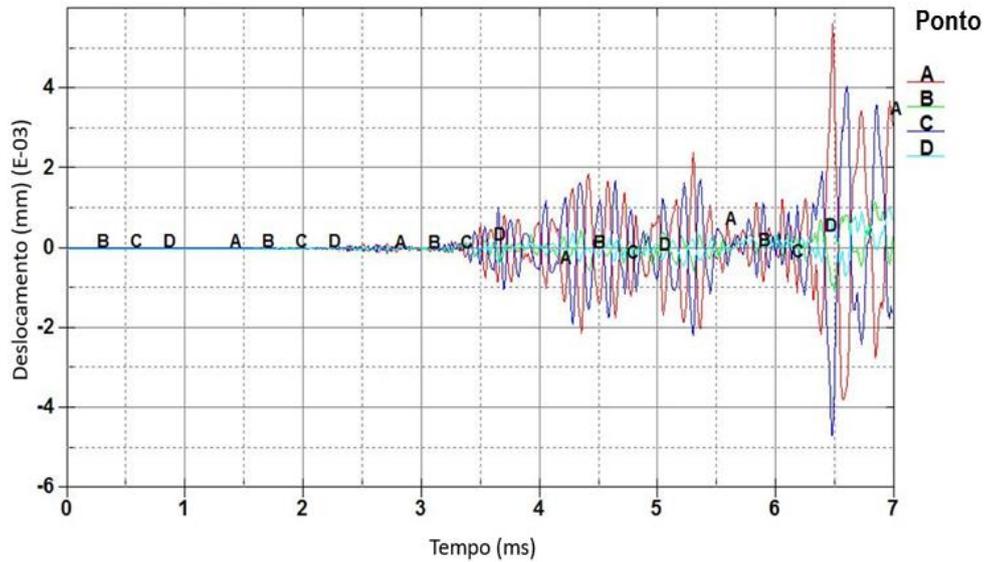


FIG 6.36 Deslocamento da boca do tubo na direção Z para caso 2B.

Na FIG. 6.37 são apresentados os picos de tensão que ocorrem durante a interação projétil-tubo. Estes valores são menores que a tensão de escoamento do aço que para uma análise estática que é de aproximadamente 200 MPa, demonstrando que o material elástico utilizado para o tubo é uma boa aproximação para esta análise, sabendo que para uma análise dinâmica este valor é bem maior.

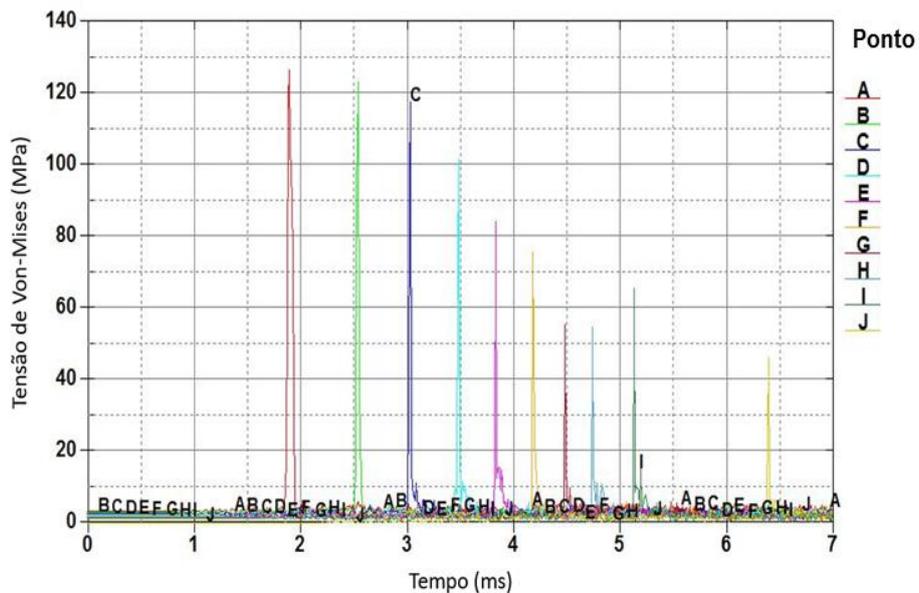


FIG 6.37 Tensão de Von-Mises ao longo do tubo sendo A mais próximo do engaste e J próximo da boca do tubo caso 2B.

As tensões, de forma geral, diminuem a cada impacto, pois parte desta energia é convertida em deformação do tubo. Existem alguns pontos onde a tensão permanece constante ou até aumenta. Isto ocorre porque existe uma onda de pressão que se desloca ao longo do tubo provocando pequenos deslocamentos e ela influencia no batimento que conseqüentemente influencia nas tensões localizadas. Outro motivo do aumento da tensão é o aumento da aceleração do projétil provocada pela curva de pressão.

Os deslocamentos obtidos pela propagação das deformações dos elementos do tubo, que chegam até a boca do tubo, podem ser visto na boca do tubo através da FIG.6.35.

Caso 3B

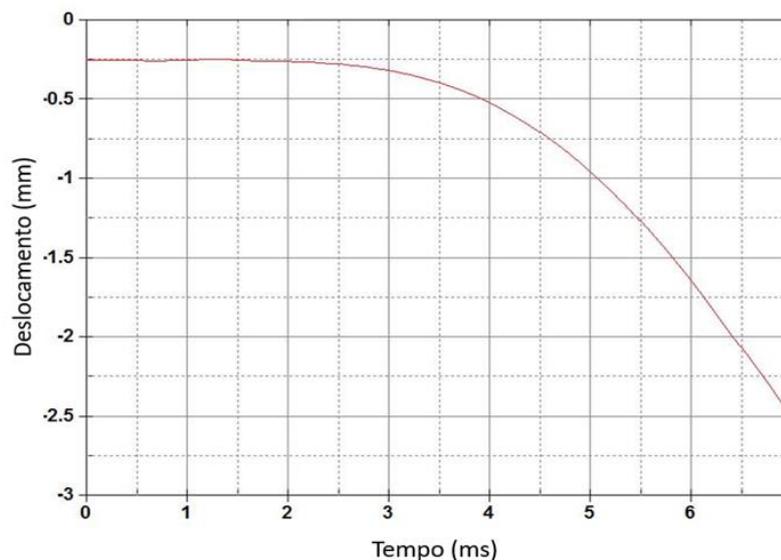


FIG 6.38 Deslocamento do projétil na direção Y caso 3B.

Através da FIG. 6.38 é difícil verificar o que ocorre com o projétil, por isso, é analisado a FIG. 6.39, onde pode ser visto que o projétil sofrerá o fenômeno do batimento, apesar deste valor ser muito pequeno comparado a folga. Pode-se considerar que o projétil mantém contato com o tubo a partir de 1 milissegundo e permanecerá em contato com o mesmosegundo o caminho do tubo deformado. O ângulo de yaw mantém sua configuração inicial, porém o de

pitch modifica devido ao caminho percorrido. O mesmo que ocorre com o caso 3A.

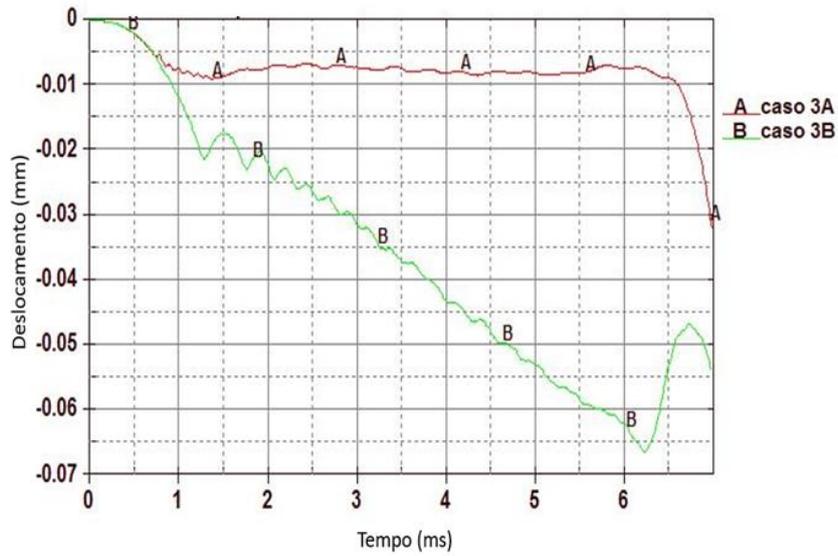


FIG 6.39 Deslocamento do projétil na direção Y desconsiderando o deslocamento devido a deformação do tubo caso 3 B.

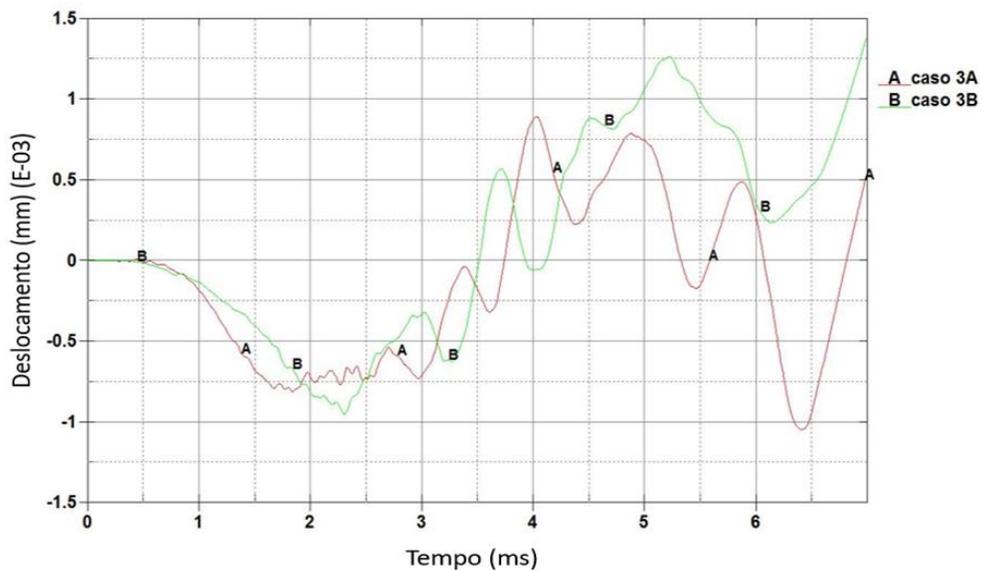


FIG 6.40 Deslocamento do projétil na direção Z caso 3B.

A FIG. 6.40 mostra que os deslocamentos na direção z são desprezíveis para este caso, conseqüentemente o movimento de yaw também é desprezível. Já o movimento de pitch acompanha o tubo até aproximadamente 6,3 ms.

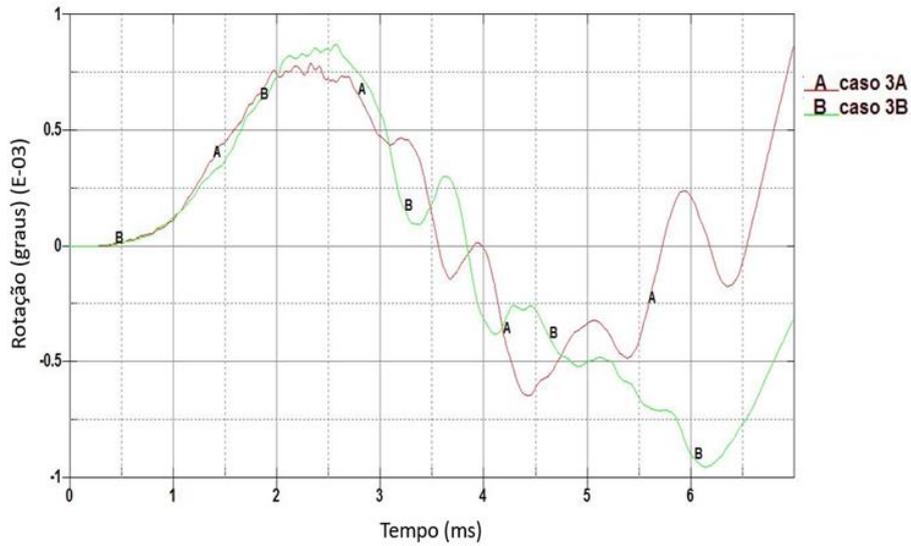


FIG 6.41 Rotação do projétil na direção Y caso 3B.

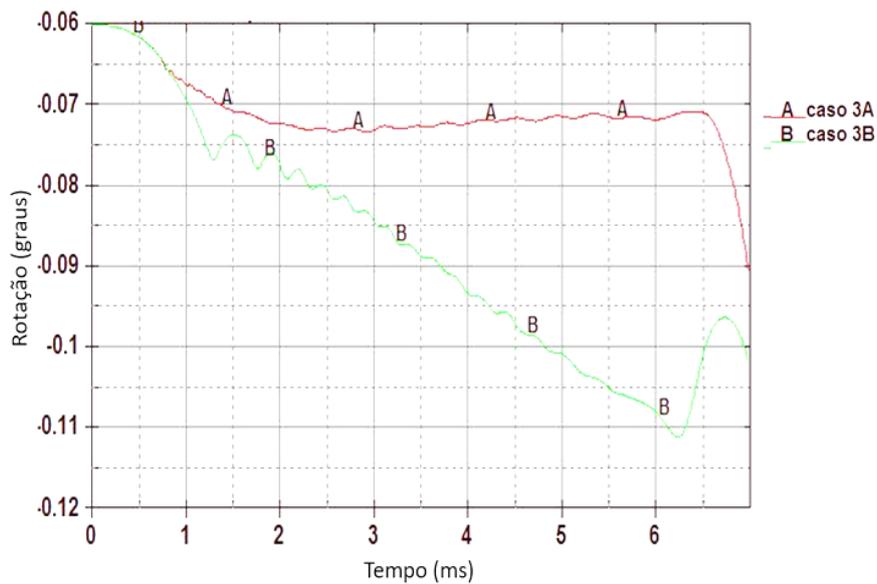


FIG 6.42 Rotação do projétil na direção Z caso 3B.

Os deslocamentos dos pontos A, B, C e D (FIG.6.26) encontrados na direção y são maiores do que nos casos estudados anteriormente indicam que apesar do projétil manter sua condição, em contato com o tubo, a boca do tubo sofrerá um deslocamento de aproximadamente 0,03 mm (FIG. 6.43). Os deslocamentos da boca do tubo, na direção z, são considerados desprezíveis (FIG. 6.44).

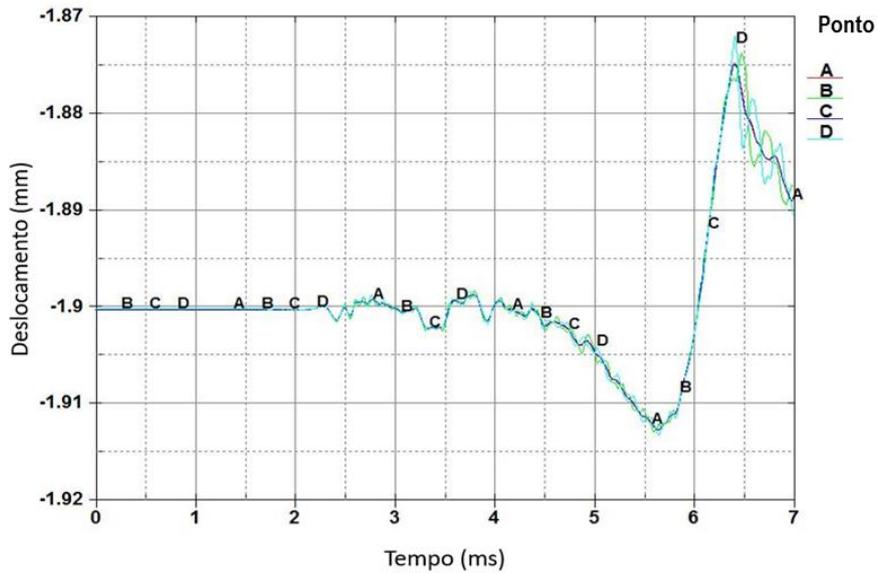


FIG 6.43 Deslocamento da boca do tubo na direção Y caso 3B.

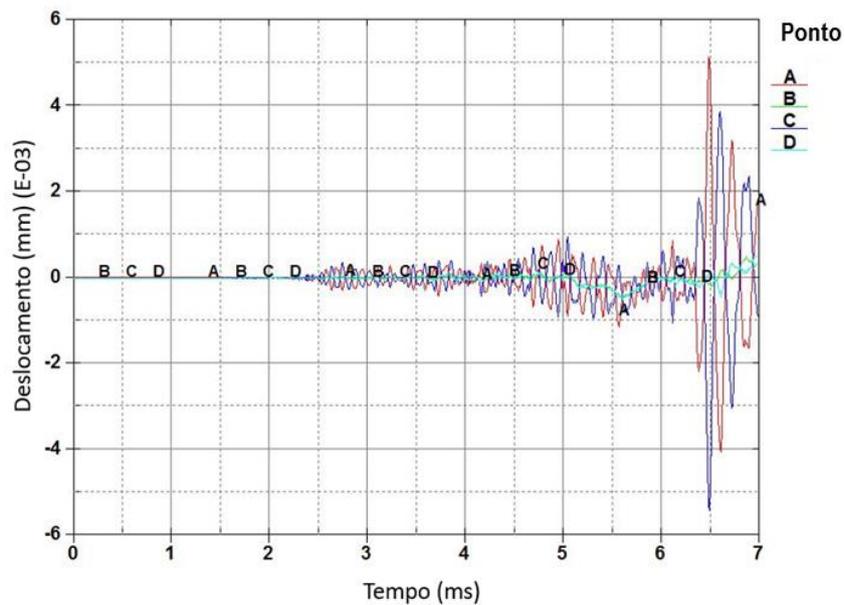


FIG 6.44 Deslocamento da boca do tubo na direção Z caso 3 B.

Para este caso em estudo, não é apresentado o gráfico das tensões de Von-Mises. Isto porque o projétil permanece em contato com o tubo e não há um impacto característico. Apenas a boca do tubo sofre deslocamentos que alteram sua posição final, e isto, pode interferir na posição do projétil ao sair do tubo alterando sua precisão ao alcançar o alvo.

Caso 4B

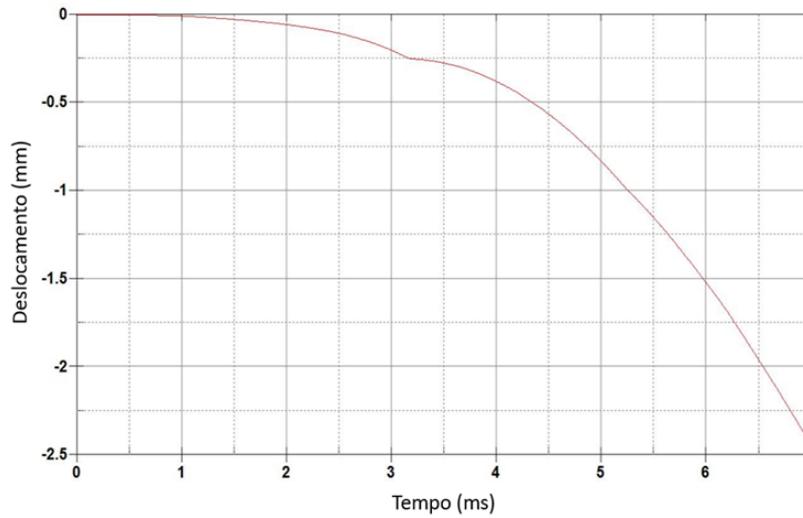


FIG 6.45 Deslocamento do projétil na direção Y caso 4B.

O caso estudado demonstra que antes do impacto o comportamento do projétil possui uma pequena diferença entre o caso 4A e 4B, mas a amplitude da trajetória do projétil diminui em ambas as direções a medida que o projétil avança na direção x. Isto altera a posição em que o projétil sai da boca do tubo.

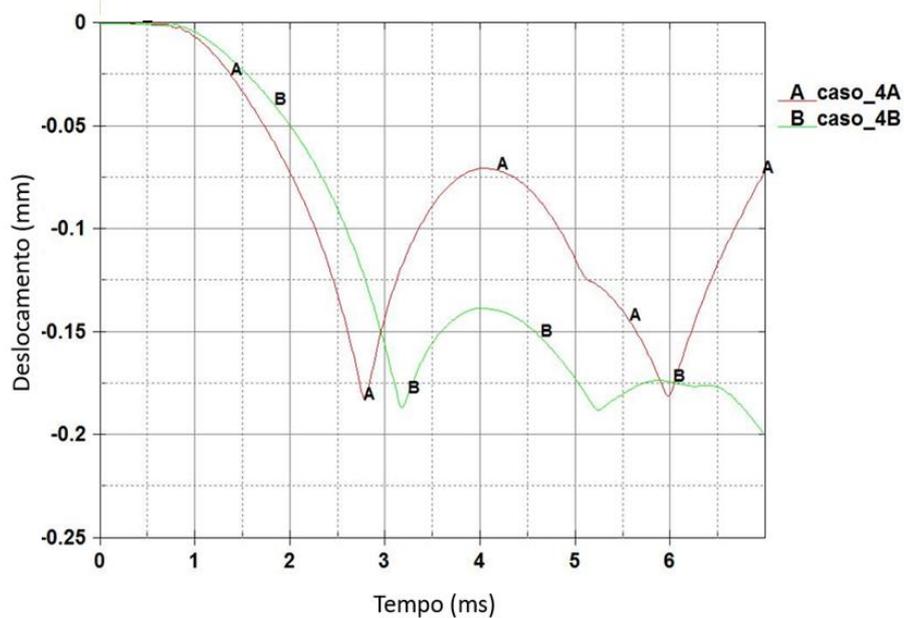


FIG 6.46 Deslocamento do projétil na direção Y desconsiderando o deslocamento devido a deformação do tubo caso 4 B.

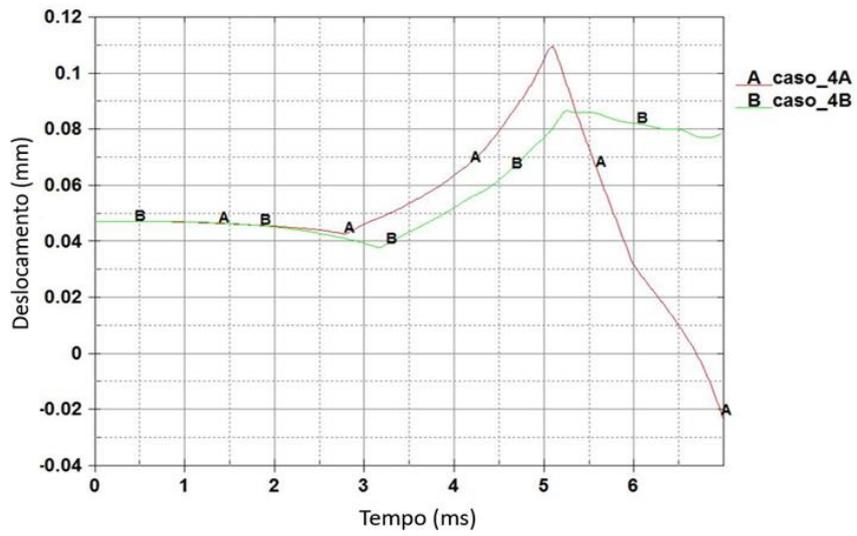


FIG 6.47 Deslocamento do projétil na direção Z caso 4B.

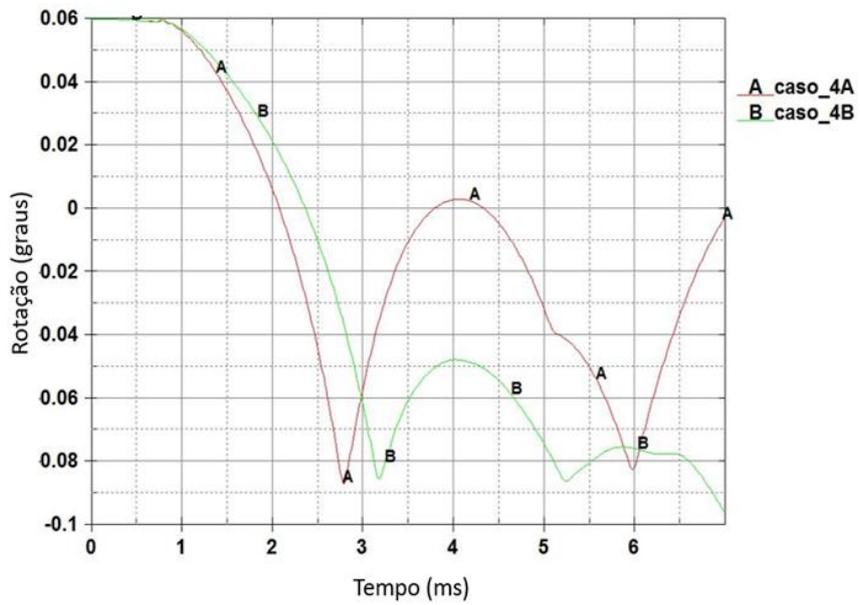


FIG 6.48 Rotação do projétil na direção Z caso 4B.

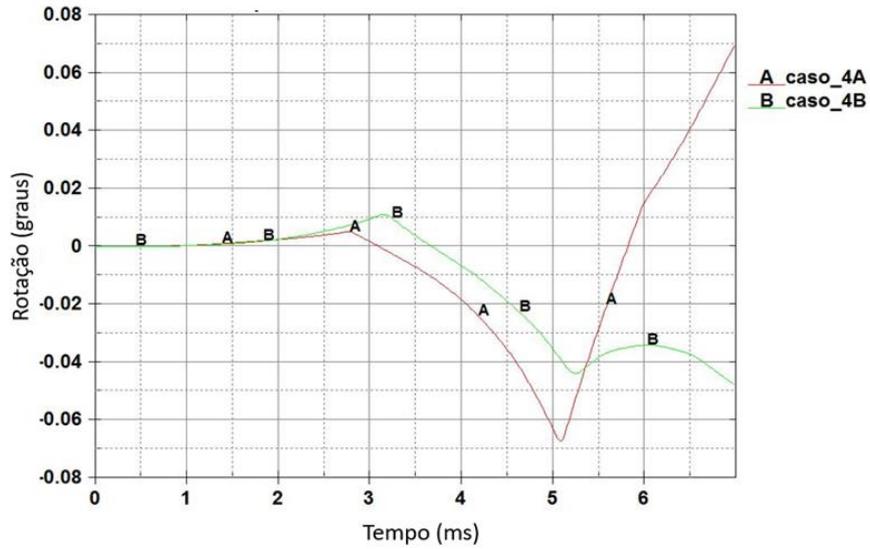


FIG 6.49 Rotação do projétil na direção Y caso 4B.

Os ângulos de pitch e yaw diferem muito dos ângulos obtidos no caso em que o tubo é considerado rígido. Isto demonstra que neste caso houve uma interação que influencia na forma com que o projétil sai do tubo. (FIG. 6.49)

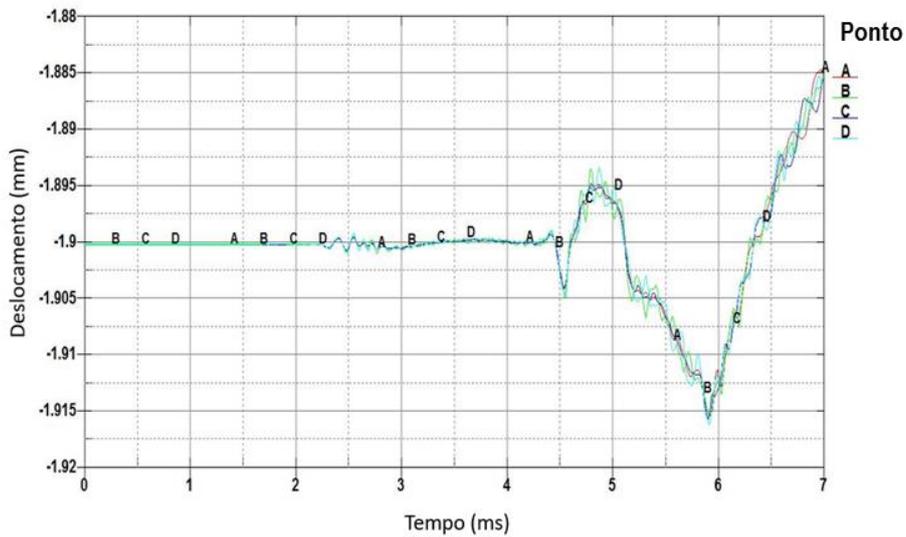


FIG 6.50 Deslocamento da boca do tubo na direção Y caso 4B.

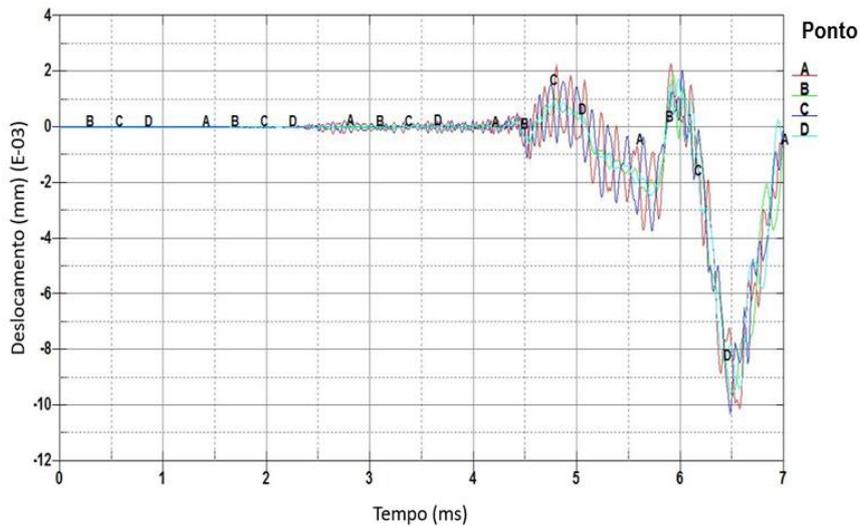


FIG 6.51 Deslocamento da boca do tubo na direção Z caso 4B.

O deslocamento dos pontos A, B, C e D da boca do tubo (FIG.6.36) também muda de direção a medida que o projétil se aproxima da boca do tubo conforme apresenta na FIG. 6.50. Este deslocamento acaba interferindo na trajetória do projétil e este comportamento não pode ser visto ao utilizar um modelo onde o tubo da arma é rígido.

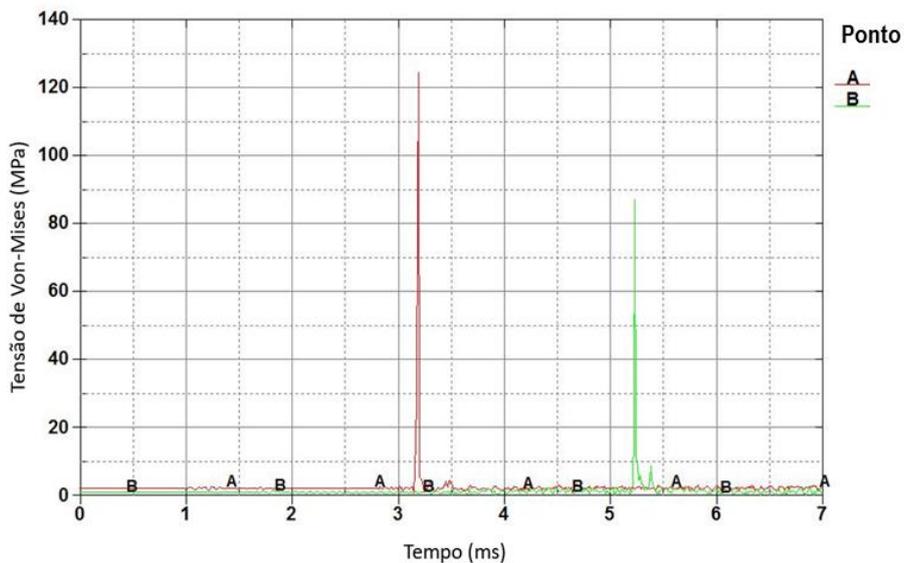


FIG 6.52 Tensão de Von-Mises ao longo do tubo sendo A mais próximo do engaste e J próximo da boca do tubo caso 2B.

Caso 5B

Este caso tem um comportamento semelhante a uma composição do caso 3 e 4, com frequência de batimento elevada e o projétil apresenta pequenos deslocamentos seguindo a trajetória do tubo.

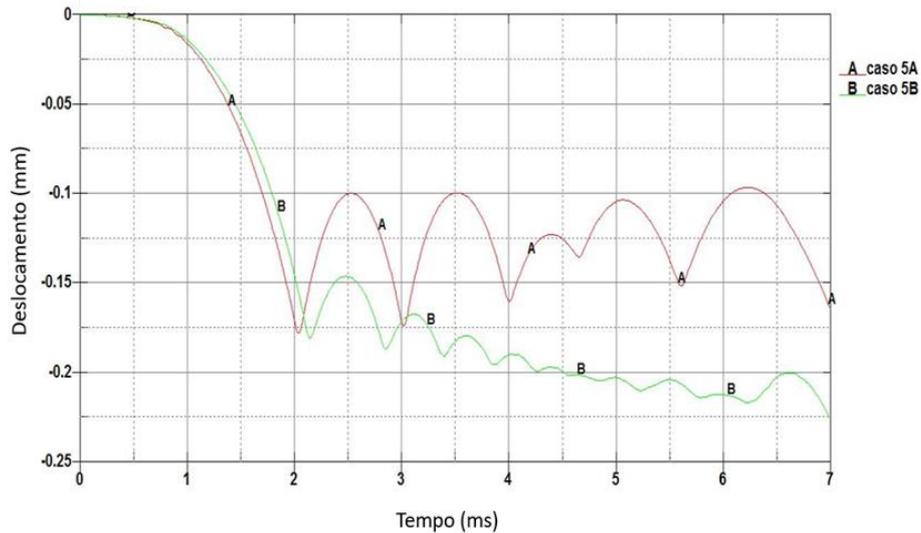


FIG 6.53 Comparação do deslocamento do projétil na direção Y caso 5B.

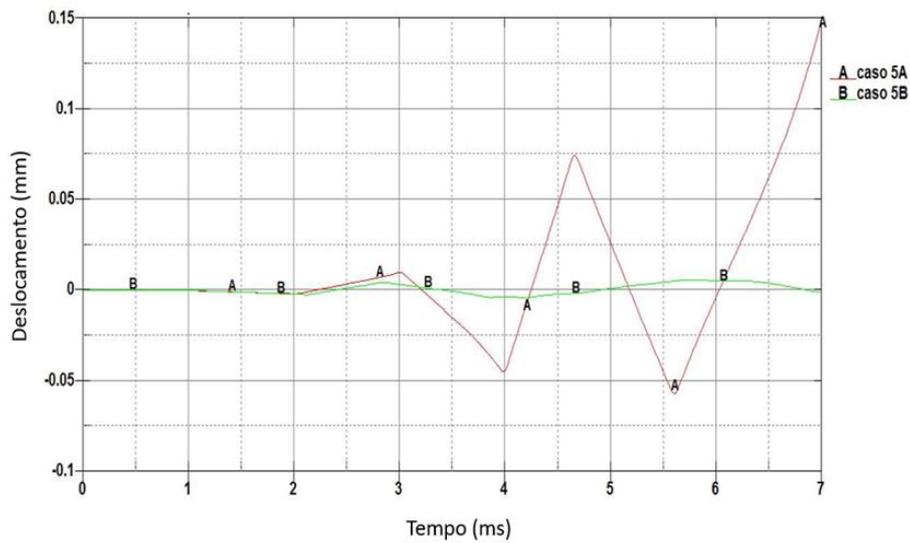


FIG 6.54 Comparação do deslocamento do projétil na direção Z caso 5B.

Ao comparar os resultados obtidos para tubo rígido com os do tubo flexível é possível ver que há uma decréscimo da amplitude de deslocamento nas

direções x e y. Consequentemente o mesmo acontece para os ângulos de pitch e de yaw (FIG. 6.55).

Também é importante notar que o deslocamento da boca do tubo irá modificar a amplitude do deslocamento do projétil ao se aproximar da saída do tubo (FIG. 6.57).

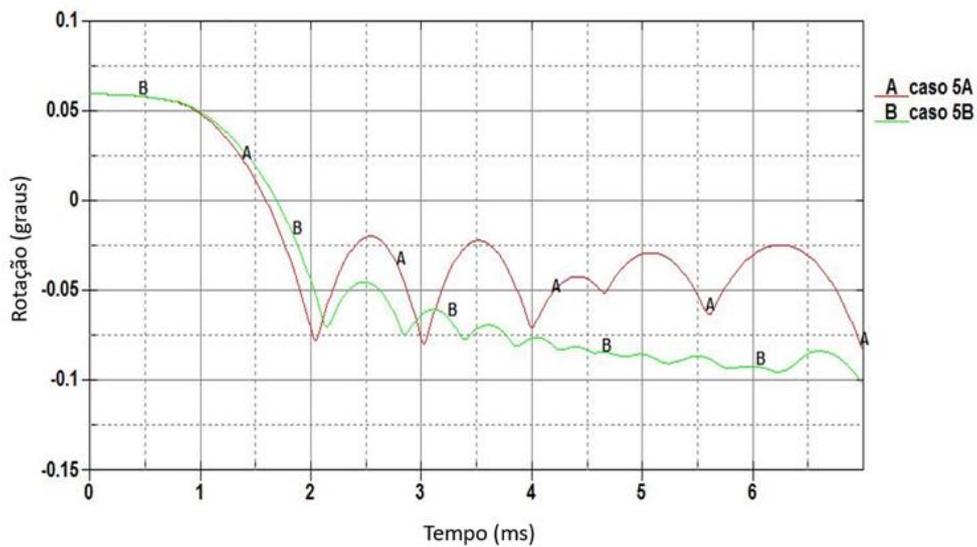


FIG 6.55 Comparação da rotação do projétil na direção Z caso 5B.

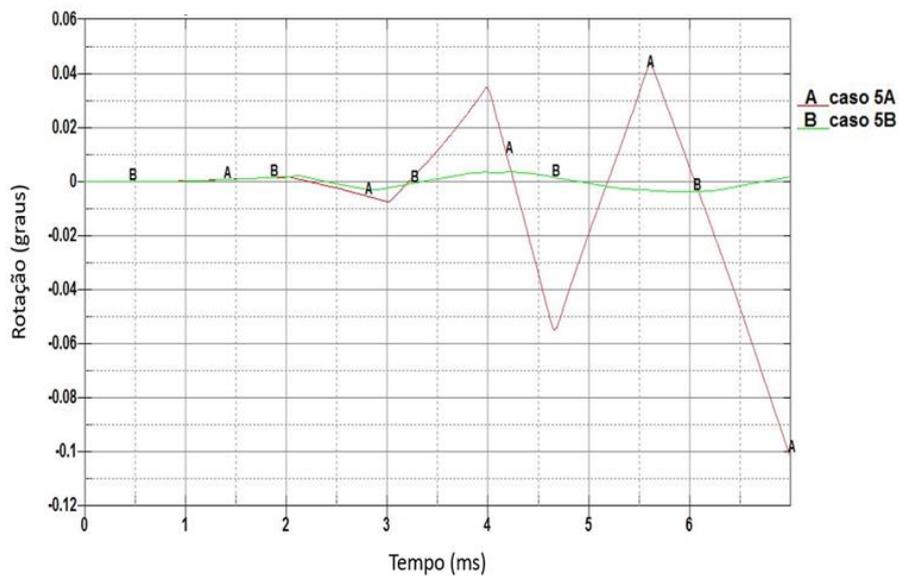


FIG 6.56 Comparação da rotação do projétil na direção Y caso 5B.

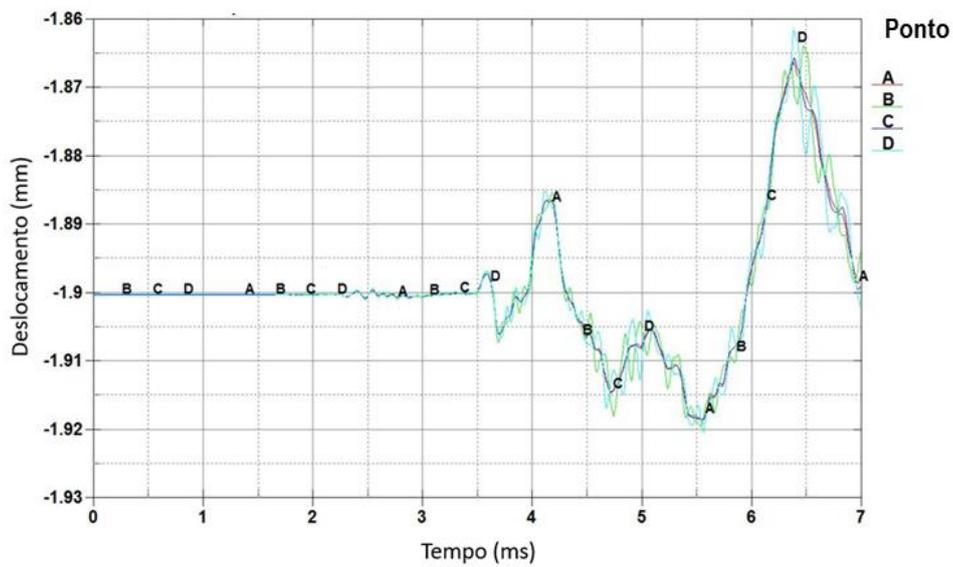


FIG 6.57 Deslocamento da boca do tubo na direção Y para caso 5B.

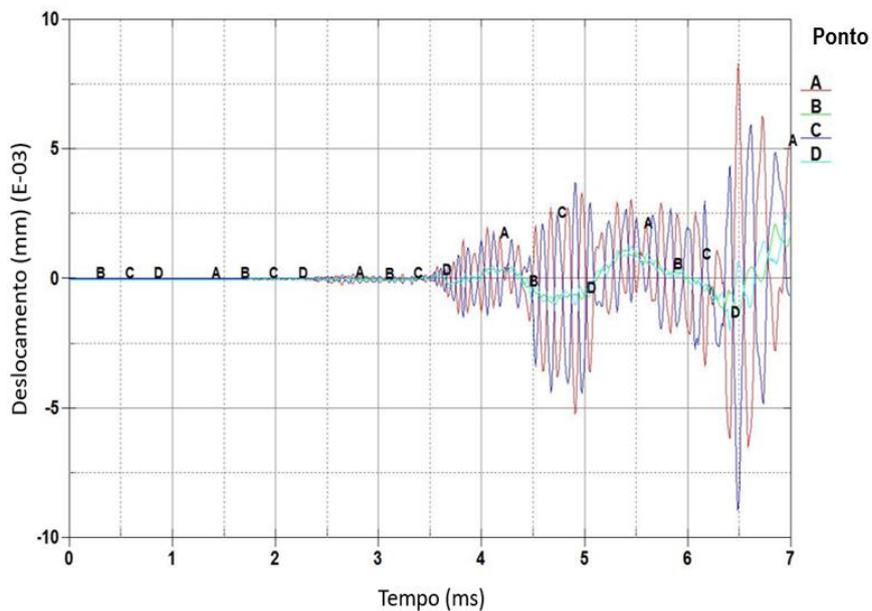


FIG 6.58 Deslocamento da boca do tubo na direção Z para caso 5B.

A TAB. 6.2 apresenta as condições iniciais para cada caso (o desvio do centro de massa e o ângulo de inclinação do projétil), o material utilizado e os resultados (deslocamentos do centro de massa do projétil, rotação do projétil, deslocamentos da boca do tubo).

TAB 6.2 Estudo de casos e resultados encontrados pelo modelo.

	Material do tubo	CONDIÇÕES INICIAIS		RESULTADOS					
		Ângulo de pitch inicial (graus)	Desvio de CM vertical (mm)	Deslocamento do C.M. do projétil (mm) (***)		Rotação do projétil (graus)		Deslocamento da boca do tubo (mm)	
		A	ycm	yp	Zp	pitch	yaw	yt	zt
caso 1A	Rígido	0	0	+0,005	+0,004	+0,005(*)	-0,005(**)	-	-
caso 1B	Flexível	0	0	+0,02	+0,022	+0,018(*)	-0,015(**)	-1,92	-0,0025
caso 2A	Rígido	0	-0,26	-0,075	6,00E-04	-0,075	-1,00E-04	-	-
Caso 2B	Flexível	0	-0,26	-0,125	0,0014	-0,1(*)	0,00055(*)	-1,875	0,004
Caso 3A	Rígido	-0,06	-0,26	-0,009	-9,00E-04	-0,71(**)	-0,0001(*)	-	-
Caso 3B	Flexível	-0,06	-0,26	-0,055	-5,00E-04	-0,1(*)	-0,00075(*)	-1,88	0,004
Caso 4A	Rígido	0,06	0	-0,12	-0,05	-0,02 (*)	+0,04 (*)	-	-
Caso 4B	Flexível	0,06	0	-0,175	+0,08	+0,08(**)	-0,038(**)	-1,8975	-0,01
Caso 5A	Rígido	0,06	-0,26	-0,11	0,063	-0,03 (**)	-0,05(**)	-	-
Caso 5B	Flexível	0,06	-0,26	-0,19	0,007	-0,08(*)	-0,003(*)	-1,875	-0,005

(*) ascendente
(**) descendente
(***) o deslocamento é medido desconsiderando a deformação do tubo (1,9 mm)

7. CONCLUSÃO

A abordagem do tema dedica-se a avaliar a relevância de parâmetros, ditos relevantes na literatura. Estes principais parâmetros estudados neste trabalho são: a deformação do tubo da arma devido à gravidade; o deslocamento da boca do tubo; o deslocamento do centro de massa do projétil e a inclinação do projétil.

Os resultados obtidos para a interação projétil e a arma são encontrados para algumas condições iniciais, obtendo o deslocamento lateral e vertical, a rotação do projétil na direção vertical e lateral, o deslocamento da boca do tubo e o comportamento das tensões sofridas pelo tubo. Estes resultados foram obtidos para o tubo rígido e flexível.

Com base nos resultados encontrados na seção anterior, podemos concluir que a flexibilidade do tubo influencia: na trajetória percorrida pelo projétil no interior do tubo; na amplitude do batimento; nos movimentos da boca do tubo, que podem ser significantes podendo alterar a trajetória no final do percurso.

O desbalanceamento de massa vertical provocou um aumento na frequência de batimento, movimento vertical predominante podendo ser desprezíveis os movimentos laterais, direção z, diminuição do ângulo de guinada. O aumento da frequência de batimento provoca deslocamentos significativos na boca do tubo que podem causar alterações da trajetória próxima à boca do tubo.

É possível verificar a influência do ângulo de inclinação do projétil positivo com o atraso no batimento e uma predominância do movimento na direção vertical em detrimento do movimento na direção lateral.

Ao utilizar como condição inicial o ângulo negativo do projétil verificou-se que o projétil permanece em contato com o tubo durante toda a trajetória implicando em maiores deslocamento da boca do tubo, por esta razão ocorrem desvios da trajetória do projétil no final do percurso. Praticamente o projétil passa a ser arrastado na superfície interna inferior do tubo transferindo maior energia para o tubo na direção y.

Quanto a sugestões para a continuidade do trabalho, pode-se destacar as seguintes linhas de ação:

1. Avaliar a sensibilidade do batimento variando o deslocamento do centro de massa na direção vertical e lateral.
2. Estudo da sensibilidade do batimento realizando pequenas modificações no ângulo inicial que o projétil faz com o plano xz e com o plano yz.
3. Verificar a influência de carregamentos externos durante o disparo. Estudando o batimento balístico, arma-projétil, quando o carro de combate percorre uma trajetória durante o disparo.
4. Avaliar os efeitos dinâmicos do batimento ao utilizar um tubo flexível com raiamento.
5. Estudar o engrazamento da cinta de forçamento no tubo no início do carregamento e avaliar seus esforços.
6. Realizar análise experimental utilizando equipamentos capazes de obter informações precisas em um tempo muito pequeno da ordem de milissegundos, utilizando como base o modelo citado por Rabern (1998).
7. Simular o comportamento do batimento levando em conta a excentricidade do tubo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSARI K. A., BAUCH J. W. Jr., **Dynamics of a balloting projectile in a moving gun tube**, US Army Ballistic Research Laboratory, AMSRL-WT-PD, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066, 1988, 91 p.
- ALVES F. A., **Elementos finitos: A base da tecnologia CAE**, Ed. Érica, 2013.
- BATHE K-J, **Finite Element Procedures**, Prentice-Hall, 1996.
- BURTON, LAWRENCE W., **A comparison of in-bore projectile motion from an electromagnetic railgun vs. that of conventional cannon barrel**, Us Army Research Laboratory, AMSRL-WT-PD, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066, 1993, 34 p.
- BÜYÜKCİĞVELEK F., **Analysis and control of gun barrel vibrations**, [Thesis of Master Degree], 2011, 159 p.
- CARLUCCI D. E., JACOBSON S. S., **Ballistics: theory and design of guns and ammunition**, Taylor & Francis Group, LLC, ISBN-13: 978-1-4200-6618-0, 2008. 501 p.
- CARLUCCI D. E., DECKER, R., VEGA, J., RAY D., **Measurement of in-bore side loads and comparison to first maximum yaw**, Science Direct, Defense Technology 12, 2016.
- CHEN, M.M., **Projectile balloting attributable to gun tube curvature**, Shock and Vibration 17, 2010, 39-53.
- ECHES, N., PAUGAIN N, DOFFÉMONT, C. **In bore behaviour of large calibre armour piercing fin stabilised discarding sabot projectiles**, 3rd European LS-DYNA Conference, 2001.
- ECHES N., COSSON D., LAMBERT Q., LANGLET A. **Modelling of the dynamics of a 40 mm gun and ammunition system during firing**, 7th European LS-DYNA Conference, 2009, 14 p.
- FARRAR C.L., LEEMING D. W., **Military Ballistics - A basic manual**, Pergamon Press Inc., 1983.
- GARNER J. M, GUIDOS B. J., PATTON J. B., **Muzzle motion measurements for the M198 when fired at 30 and 45 degrees**, 10th U.S. Army Gun Dynamics Symposium, April 23-26, 2001, Austin, Texas, p. 25-36.
- HASENBEIN R., HYLAND E., **Dynamic Strain Waves and Permanent Bore Enlargement**, **Proceedings of the seventh U.S. army symposium on gun dynamics**, NEWPORT, RHODE ISLAND, 1993, 504 p.

- KIM NAM-HO, **Introduction to nonlinear finite element analysis**, Springer, 2015.
- LANGLET, A. CHEVALIER O., SANSEIGNER L. F., **Mecanique et Interactions en Dynamique Rapide Sous Chargements Variables** . Assessment of the Lifetime of Gun Barrels Under High-Speed Moving Loads, Sciences de l'ingenieur [physics]. UNIVERSITE D'ORLEANS, 2015
- LEITE T. M. JR, **Modelagem da dinâmica de um canhão de carro de combate durante o tiro**, Dissertação de Mestrado, INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA, Rio de Janeiro, 2015.
- LODGE, D. W., DILKES, A. M., **Use Of An Instrumented 120mm Projectile For Obtaining In-Bore Gun Dynamics Data**, 12 p.
- LS-DYNA®, Livermore Software Technology Corporation, **Theory manual**, 2014.
- LS-DYNA®, Livermore Software Technology Corporation, **Keyword user's manual, vo.1**, 2014.
- LS-DYNA®, Livermore Software Technology Corporation, **Keyword user's manual, vo.2**, 2014.
- MACHADO, R. D., **Análise dinâmica não linear de sistemas rígidos-flexíveis**, Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro, 1983.
- NEWILL J.F., GUIDOS B. J., AND LIVECCHIA, **comparison between the m256 120-mm tank cannon jump test experiments and ARL's gun dynamics simulation codes for prototype KE**, , 10th U.S. Army Gun Dynamics Symposium, April 23-26, 2001, Austin, Texas, p. 160-175.
- PLOSTINS, P., **Launch Dynamics of APFSDS Ammunition**, Technical Report BRL-TR-2595 - Ballistic Research Laboratory - U.S. Army Laboratory Command, 1984. 53 p.
- RABERN, D. A., **Axially accelerated sabot rods subjected to lateral forces**, Thesis PhD Degree, The University of Arizona, 1988.
- RABERN, D. A., **Axially and lateral impulsive loading of kinetic energy projectiles during launch- Part I. Experimental investigations**, Impact Engng Vol. 12 No.1, pag. 44-64 Pergamon Press plc, 1992.
- RABERN, D. A., **Axially and lateral impulsive loading of kinetic energy projectiles during launch- Part II. Numerical Solution**, Impact Engng Vol. 12 No.1, pag. 65-88 Pergamon Press plc, 1992.

RAY S. E., NUSCA, M.J. AND NEWILL, J.F., **A study of projectile response to ballistics environment**, Us Army Research Laboratory, AMSRD-ARL-WM-BD, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066, 2005, 24 p.

ROSENBERG Z., DEKEL E., **Terminal ballistics**, Springer, 2012.

SNECK HENRY J., **Main battle tank flexible gun tube disturbance model: three-segment model**, US Army Armament Research Development and Engineering Center, 2002, 22p.

SOENCKSEN K. P., NEWILL J. F., GARNER J. M., AND PLOSTINS P., **Comparison of the 120-mm M831A1 projectile's experimental launch dynamic data with hydrocode gun-projectile dynamic simulations**, 10th U.S. Army Gun Dynamics Symposium, April 23-26, 2001, Austin, Texas, p. 200-212.

UNITED STATES ARMY, **Elements of Armament Engineering, Part Two, Ballistics**, Army Materiel Command Engineering Design Handbook Series, AMCP 706-107, 1968, 236 p.

UNITED STATES ARMY, **Guns Series - Gun Tubes**, Research and Development of Material - Engineering Design Handbook Series, AMCP 706-252, 1964, 100 p.

UNITED STATES ARMY, **Technical Manual: Army Ammunition Data Sheets – Artillery Ammunition, Guns, Howitzers, Mortars, Recoilless Rifles, Grenade Launchers and Artillery Fuzes** – Headquarters Department of the Army – 2000. 913 p.

WILKERSON S. A., HOPKINS, D. A., **Analysis of a Balanced Breech System for the M1A1 Main Gun System Using Finite Element Techniques**, Army Research Laboratory, AMSRL-WT-PD, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066, 1994, 35 p.

9. ANEXO

9.1 LICENÇA LS-DYNA

License Agreement

LS-DYNA Current Version - Limited Element
Livermore Software Technology Corporation

This is a legal license agreement ("Agreement") between Livermore Software Technology Corporation ("LSTC") and ("User").

User: Allan Ferreira

Address: [REDACTED]

COUNTRY: Brazil

Contact Name: Allan Ferreira

Contact Phone Number: [REDACTED]

e-mail: [REDACTED]

GRANT OF LICENSE: LSTC grants User the right to use the 100,000 Element Limited Version, one (1) copy of the software program LS-DYNA and related documentation (collectively "Software") for educational purposes only for the term of this Agreement. User shall not distribute, disclose, market, rent, lease, or transfer the Software to any third party. In any papers containing data obtained using LS-DYNA please reference LS-DYNA and the LSDYNA User's Manual.

TERM AND TERMINATION: Use of the Software shall commence upon execution of this Agreement, and will continue for a period of (182) days (termed "License Term"). If User does not purchase the Software prior to the expiration of the License Term, this Agreement expires automatically and User shall immediately destroy all copies of the Software including all media and manuals received with the license. **PLEASE NOTE:** If User thereafter licenses the Software, all terms and conditions of the LSTC's Software License Agreement, which is to be separately executed between LSTC and User prior to User's receipt of the Software, shall be in full force and effect, and the terms and conditions of this Agreement shall be null and void. This license term prohibits commercial/consulting usage and does not include technical support.

COPYRIGHT AND CONFIDENTIALITY: User understands that the Software is and shall remain the proprietary property of LSTC and is protected by the United States copyright laws and the International treaty provisions. User agrees to protect the Software with at least the same standard of care and procedure which User uses to protect its own proprietary information and in no event, less than a reasonable standard of care.

EXPORT CONTROL: User understands and acknowledges that the Software is subject to the export administration regulations of the U.S. Department of Commerce and other U.S. Governmental regulations. User agrees not to transfer the Software outside the country designated above.

WARRANTY: LSTC warrants that it is the owner of the Software and that shall indemnify and defend User against any and all claims that the Software infringes on any U.S. patent or copyright or violates any other proprietary right of a third party.

NO OTHER WARRANTY: User acknowledges that this license agreement is being provided to User "as is". EXCEPT AS PROVIDED ABOVE, LSTC DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. LSTC DOES NOT WARRANT THAT THE SOFTWARE WILL MEET USER'S REQUIREMENTS, OPERATE IN COMBINATIONS SELECTED BY USER, PRODUCE RESULTS DESIRED BY USER OR OPERATE WITHOUT INTERRUPTION OR ERROR FREE.

LIMITATION OF LIABILITY: LSTC SHALL NOT BE LIABLE FOR ANY LOSS OR DAMAGE THAT MAY ARISE IN CONNECTION WITH FURNISHING, PERFORMANCE, OR USE BY USER OF THE SOFTWARE, INCLUDING, WITHOUT LIMITATION, ANY DIRECT, INDIRECT, SPECIAL, INCIDENTAL, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES OF ANY KIND.

GOVERNING LAW: This agreement shall be subject to and interpreted in accordance with the laws of the State of California.

ENTIRE AGREEMENT: This Agreement sets forth the entire agreement and understanding of the parties and supersedes all prior oral and written agreements and understandings relating thereto. This Agreement shall only become effective when executed by both parties.



XCAE
LSTC Distributor for BR328
Date: 04/18/2017



Allan Ferreira
USER
Date: 04/18/2017