

Análise do projeto Canhão sem Recuo

Neves, A. M.; Vieira, T. A. C. J.; Iha, K.; Rocco, J. A. F. F.

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias CEP 12228-900 - São José dos Campos - SP - Brasil

Resumo — O projeto, "Canhão Sem Recuo análise da balística interna e externa", foi elaborado pelos alunos do 2º ano do fundamental do ITA. A idéia do projeto consiste em demonstrar e colocar em prática, a partir de um protótipo construído, um canhão portátil que apresenta o mínimo de recuo possível utilizando um sistema de tubeira na parte traseira. Tal protótipo estaria simulando de que maneira um verdadeiro canhão, relacionando-se às devidas proporções, após o disparo de um projétil, poderia se manter imóvel. Com esta proposta poder-se-ia adaptá-lo ao armamento de aeronaves, após um avanço bem significativo no projeto.

Para o estudo de tal idéia, foi necessário também o aprofundamento em outros campos científicos, como por exemplo, no campo da aeronáutica para discutir os possíveis tipos e modelos de tubeiras utilizadas na parte traseira do canhão. Além disso, utiliza-se o estudo da física por meio da mecânica que constitui o princípio básico de funcionamento do canhão. O campo de balística externa também foi explorado, bem como algumas noções intermediárias de resistência de materiais e engenharia de armamentos. Foram realizados testes em campo e simulações computacionais de resistência de materiais.

Palavras-chaves — Canhão, recuo, tubeira, armamento e resistência de materiais

I. INTRODUÇÃO E DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Desenvolvimento de canhões de grande potência nos dias de hoje, esbarra em um problema bastante difícil de ser resolvido. À medida que se tenta aumentar a energia cinética associada ao projétil, seja, conferindo-lhe maior velocidade na boca do cano, ou aumentando sua massa, acaba-se por aumentar também um efeito indesejável, porém fisicamente intrínseco ao disparo de qualquer arma de fogo: o recuo.

O recuo é o impulso que age no cano do armamento como reação a força que age propelindo o projétil para frente. Canhões são tipos de armamento que naturalmente apresentam enormes esforços de recuo, o que limita em muito sua aplicabilidade tanto para objetivos bélicos como pacíficos. Historicamente, sempre se tentou adotar medidas que minorassem os efeitos do recuo no desgaste e precisão do equipamento. Entre eles podemos citar sistemas complexos e por muitas vezes de custo elevado de amortecimento envolvendo molas, e amortecedores hidro-pneumáticos que acabavam por aumentar ainda mais a massa de um equipamento que já era de difícil mobilidade, inviabilizando seu uso em diversas ocasiões.

A idéia de criar um canhão sem recuo surge então como uma alternativa que solucionaria vários desses inconvenientes. Poder-se-ia utilizá-lo como armamento de grande potência lançando projéteis de grande massa a distâncias consideráveis

Alexandre Muniz Neves, muniz2009@hotmail.com Tel +55-12-39477820;; Thales Anaximandro thalesanax@gmail.com Tel. +55-12-39477860, Koshun Iha, koshun@ita.br Tel. +55-12-39476852; José Atílio Fritz Fidel Rocco friz@ita.br, Tel. +55-12-39475918

utilizando equipamentos de baixo custo, simplicidade de construção e cujo peso total possibilitaria sua utilização por apenas um operador, bem como fácil transporte e mobilidade atendendo a diversas circunstâncias de cada uso.

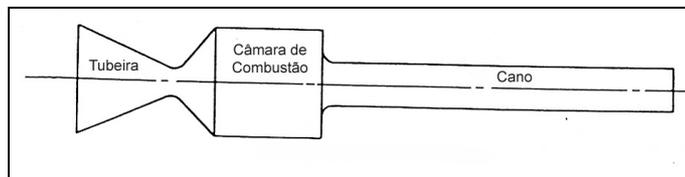


Fig. 1. Partes típicas de um canhão sem recuo: tubeira, câmara de combustão e cano

II. ANÁLISE TEÓRICA

A) Modelos Matemáticos

Grande parte da modelagem teórica envolvida no projeto do canhão sem recuo focalizou o escoamento dos gases de combustão pela tubeira de seção convergente-divergente localizada na culatra aberta do canhão. Os cálculos são derivados da termo-aerodinâmica e são essenciais para que se obtenha rendimento máximo ou o mais próximo possível do máximo dentro das condições de operação.

O escoamento dos gases pela geometria da tubeira foi modelado como sendo isentrópico, invíscido, compressível e unidimensional.

Escoamento compressível

Define-se escoamento compressivo aquele no qual o fluido apresenta variações notáveis de massa específica em seu trajeto. Deve ser levado em conta o intercâmbio de energia mecânica e energia interna do fluido. Considera-se a compressibilidade do gás, para efeitos de cálculo, em escoamentos em $M > 0,3$

Número de Mach

O número de Mach é uma razão entre a velocidade de um escoamento e a velocidade da propagação de perturbações mecânicas no fluido em questão

$$M = \frac{v}{c} \quad (1)$$

Velocidade do som

Considerando que as perturbações mecânicas em um fluido se dão de maneira isentrópica, a velocidade do som num meio varia de acordo com o estado termodinâmico do mesmo, e pode ser representada como um fator de compressibilidade pela seguinte equação:

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}}$$

Escoamento unidimensional

Se considerarmos que em qualquer ponto do interior da tuberia a velocidade no sentido longitudinal é muito maior que em qualquer sentido transversal, podemos modelar o escoamento como unidimensional, que pode ser previsto com a solução das seguintes equações: [1]

Equação da Continuidade:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2)$$

Equação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} v_x \rho dV + \int_{SC} v_x \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = F_s \quad (3)$$

Primeira Lei da Termodinâmica:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} e \rho dV + \int_{SC} (e + pv) \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \dot{Q} \quad (4)$$

Segunda Lei da Termodinâmica:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} s \rho dV + \int_{SC} s \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} \geq \int_{SC} \frac{1}{T} \frac{\dot{Q}}{A} dA \quad (5)$$

onde VC é o volume de controle considerado no cálculo, SC a superfície de controle (bordo de VC), v é o vetor velocidade, F é a força de superfície agindo no fluido p é a pressão estática, Q é a taxa de transmissão de calor, ρ é a densidade do fluido, e é sua energia interna específica e s sua entropia específica,

Para a condição de escoamento interno sem atrito (invíscido), em um canal com variação de área, temos, pela solução das equações:

$$\frac{dA}{A} = -\frac{dV}{V} - \frac{d\rho}{\rho} \quad (6)$$

De acordo com a definição de número de Mach, resulta:

$$\frac{dV}{V} = -\frac{dA}{A} \frac{1}{(1-M^2)} \quad (7)$$

ou seja, para escoamento subsônico ($M < 1$), decrementos de área (geometria convergente) geram incrementos na velocidade longitudinal do escoamento, que está de acordo com a equação de Bernoulli do medidor de Venturi.

Já para escoamentos supersônicos, o oposto acontece, a velocidade aumenta para incrementos de área de seção transversal do difusor (geometria divergente). A explicação para esse fenômeno é que à medida que o fluido sofre processo de expansão, ele cede energia interna para o escoamento na forma de energia cinética, acelerando-o.

Dessa forma, tendo a velocidade de propagação de frente de chama, dado típico de cada propelente, podemos dimensionar a geometria da tuberia de maneira a maximizar a velocidade de escape dos gases de combustão

B) Simulações Computacionais

Utilizou-se um pacote computacional que oferece ferramentas de análise tridimensional permitindo testar as condições de contorno nos quesitos força e pressão. O objetivo da utilização do software é validar o projeto “Canhão sem Recuo”, em condições do mundo real, a fim de otimizar o projeto além reduzir custos e ensaios reais.

Foi realizado ensaios na tuberia com um variado número de materiais os quais de destacam: alumínio, aços, ferros e ligas de titânio. Outros aspectos a serem considerados são: o custo do material, a facilidade de fabricação da tuberia, e o desgaste físico da peça. Esta última, o software deixa a desejar pois não simula as condições de umidade, corrosão devido o uso continuado de disparos e os gases provenientes da pólvora. Dessa forma foi realizado um gráfico de deformação, utilizando nos ensaios uma pressão de 50.000psi [1] como pressão majorada no interior da tuberia. A direção será determinada normal ao plano da garganta convergente e divergente da tuberia.

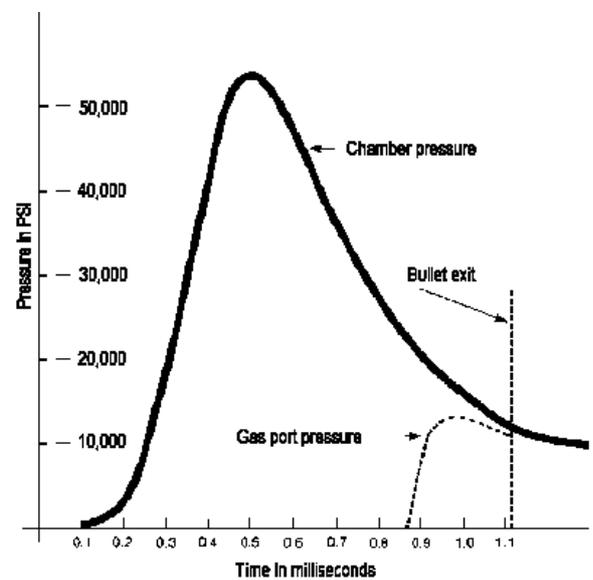


Fig. 2. Distribuição de pressão em uma câmara de combustão de um fuzil [2].

O resultado final de resistência de materiais dos materiais na tuberia foram os aços. Especificamente uma liga de aço AISI 1040 obteve resultados bem satisfatórios, pois apresentava fácil usinagem e limite de escoamento entre 62 e 85ksi. Observe o gráfico da deformação da tuberia padrão quando submetida a pressão interna de 50Ksi.

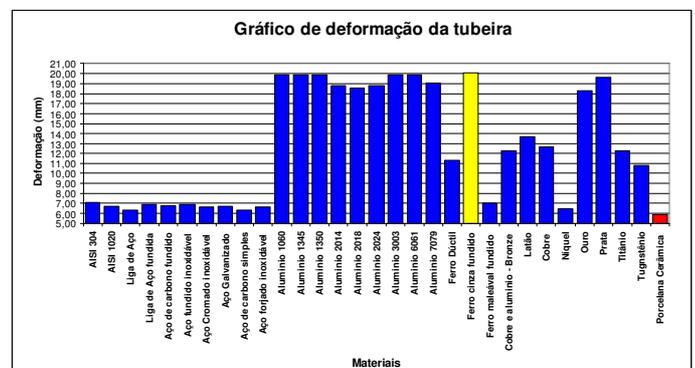


Fig. 3. Gráfico de alguns materiais utilizados na tuberia deformados.

Para maiores informações consulte o material da referência [3], que podem ser verificados os limites das tensões de escoamento

dos aços, alumínio e algumas ligas de titânio. Dessa forma pelos dados fornecidos pelos ensaios, tem-se a seguinte ordem de prioridade dos grandes grupos de materiais a serem utilizados pela tubeira do canhão sem recuo:

1. Aço
2. Ligas de Alumínio-Lítio
3. Ligas de Tugnstênio

Esta última, por apresentar custo elevado foi desconsiderado do trabalho. Quanto a parte do projétil, foi analisado somente a utilização de Nylon 6/10, material disponível para a confecção do artefato (projétil).

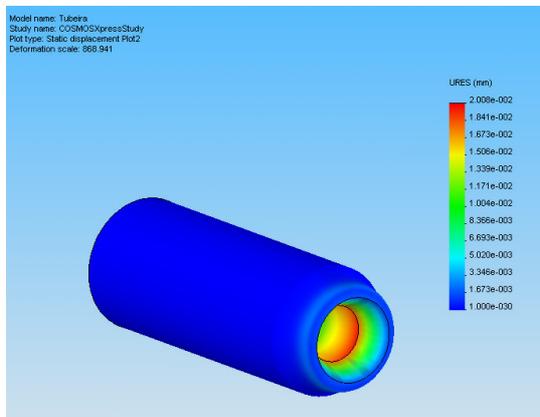


Fig. 4. Visualização das deformações na tubeira do canhão.

Nesta outra etapa do projeto de iniciação foi um estudo a respeito dos materiais no tubo do canhão, conforme mencionado anteriormente. As condições contorno são assim expressas. A pressão no interior do tubo são aplicadas na direção da parte interna pra externa, com valores variando entre 10×10^3 a 45×10^3 psi. (Veja a figura 5)

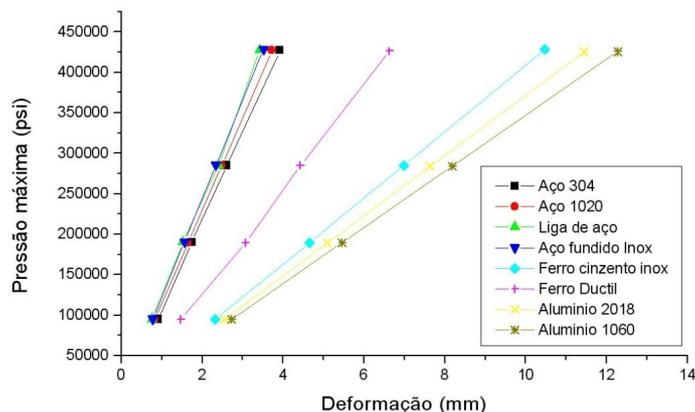


Fig. 5. Visualização das possíveis deformações no tubo do canhão.

Os resultados obtidos em uma primeira análise demonstram que as ligas de aço obtiveram um melhores rendimentos. Convém ressaltar que a deformação todos esses materiais utilizados neste ensaio faz parte da chamada deformação elástica. Já a deformação plástica é uma deformação permanente. Esta por sua vez, corresponde a porção não linear quando a deformação atinge o limite elástico. A convenção usual é definir a tensão de escoamento com sendo 0,2% da deformação de engenharia. Assim, quando o tubo atingir a região plástica suas propriedades mecânicas não serão as mesmas de anteriormente, comprometendo a segurança do disparo e do operador.

Para dimensionar as paredes do tubo do *Canhão sem recuo* foi necessário um estudo de balística interna e resistência dos materiais. Dessa forma, pode-se determinar a espessura do tubo pelo gráfico teórico da figura 6. No eixo y tem-se a tensão de escoamento a ser utilizado. As diversas curvas apresentam a pressão (psi) no interior do tubo.

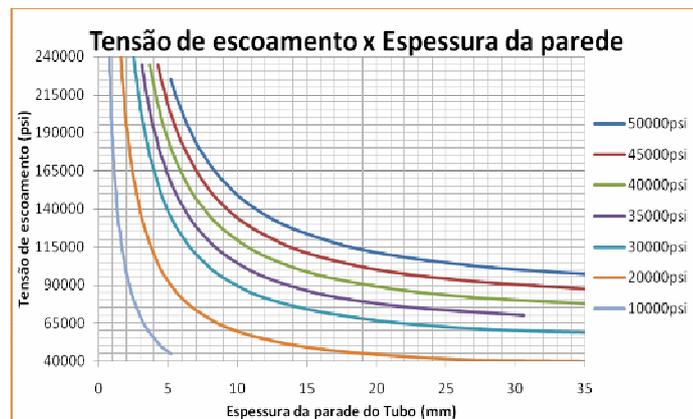


Fig. 6. Gráfico da tensão de escoamento dos materiais em relação a espessura da parede do tubo típico de um canhão sem recuo.

Assim, pode-se verificar o seguinte gráfico da figura 6 que exprime a tensão de escoamento do material e a espessura da parede. Uma liga de Titânio (Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr), por exemplo, apresenta uma tensão de escoamento da ordem de 150.000psi, o que implica que as paredes do tubo apresentariam um valor de apenas 8mm, para a situação crítica de 50.000psi. Logo a melhor escolha é um revestimento do tubo com ligas de titânio, conforme mencionado também na literatura existente no campo de armamentos.

Para validação do projeto do canhão também foi utilizado o recurso da simulação numérica em fluidodinâmica. O princípio da solução via simulação CFD é o emprego do método dos elementos finitos nas equações diferenciais que modelam o canhão. Nessa seção serão descritas as fases para a implementação da simulação fluidodinâmica da tubeira do canhão.

O objetivo da simulação CFD foi determinar o perfil de velocidade dos gases provenientes da combustão da pólvora negra no interior da tubeira. Uma vez determinada a magnitude de velocidade, é possível prever o deslocamento do armamento durante o disparo. O caso base consistiu em um tronco de cone como aproximação para a seção divergente do canhão. Nessa primeira simulação não foram considerados os efeitos térmicos nem de compressibilidade, mesmo a velocidade sendo supersônica. O perfil de velocidade obtido, para o interior da tubeira, é mostrado da Fig. 7

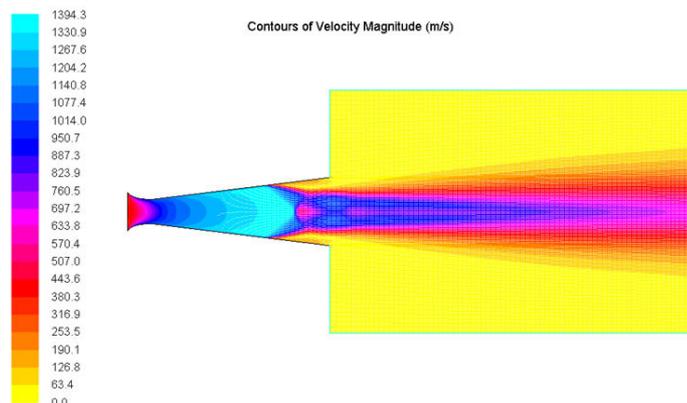


Fig. 7. Perfil de velocidade do escoamento dos gases.

A simulação final para a tubeira considerou os efeitos térmicos através da solução da equação de transporte de energia na forma de convecção e condução. Por fim, considerou-se os efeitos de compressibilidade do ar, o escoamento apresentou velocidades supersônicas [4]. O perfil de temperatura é exibido na Fig.8.

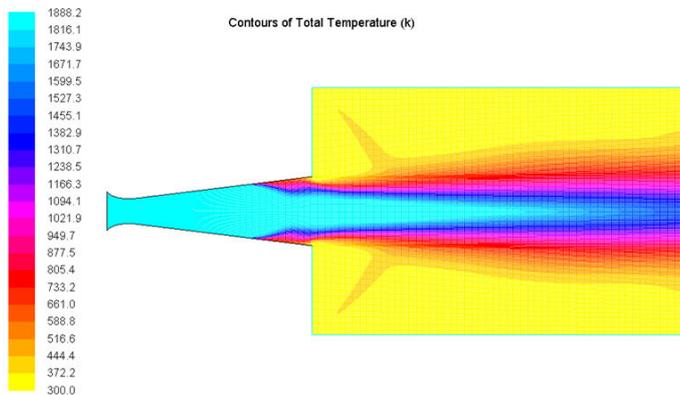


Fig. 8. Perfil de Temperatura do escoamento dos gases.

Conforme projetado, a simulação mostra que na seção convergente da tubeira ocorre aumento da velocidade do ar atingindo a velocidade supersônica. Após atingir a seção divergente, verificou-se que o gás permaneceu com o aumento de velocidade, devido a compressibilidade do ar.

Assim, através da simulação CFD, verificou-se, com a geometria projetada para a tubeira e as condições de contorno, a possibilidade de construção de um armamento sem recuo.

III. CONSTRUÇÃO DO CANHÃO

A construção do protótipo foi idealizada de maneira a atingir o máximo de simplicidade e funcionalidade, prescindindo de peças móveis e descontinuidades nas diversas estruturas que compõem o canhão, evitando assim concentração de tensões que poderiam culminar em falhas de material em disparos repetidos. Também se tentou atingir o mínimo de peso possível, uma vez que um dos propósitos do dispositivo de redução de recuo é aumentar a manobrabilidade do artefato, mantendo, no entanto uma grande margem de segurança em todos os componentes de acordo com as cargas a que serão submetidos em condições de operação nos ensaios. O terceiro aspecto considerado foi a versatilidade do equipamento. Dessa fora o canhão foi construído de maneira a possibilitar a utilização de diversas tubeiras de geometrias diferentes bem como cargas propelentes e projéteis de massas diferentes, para que se pudesse verificar o comportamento do canhão em diversas condições de operação.

O tubo do canhão tinha alma lisa e consistia em um tubo mecânico estirado a frio feito de aço ASTM A106, um aço dúctil, o que diminuiria o risco de fragmentação em caso de sobrecarga, e ao mesmo tempo razoavelmente resistente à corrosão, para que o tubo se prestasse a diversos ensaios sem se deteriorar, mesmo exposto a altas temperaturas e substâncias oxidantes formadas na deflagração da pólvora.

Como já se definiu nas fases iniciais do projeto o calibre da arma (32mm), as dimensões da parede do tubo de aço, podem ser calculadas através do gráfico da figura 8, que relaciona a tensão de escoamento do material utilizado, e espessura do tubo. Dessa forma o tubo tinha 1500mm de comprimento, 32mm de diâmetro interno e 6mm de parede, pesando 7,5 Kg. A culatra aberta do tubo recebeu 20mm de rosca interna para a fixação da tubeira.

A tubeira, de seção convergente-divergente elipsóide-cônica foi fabricada em alumínio 6061 por processo de usinagem em torno manual, e polida com lixas nº 1000 em sua superfície interna para oferecer o mínimo de atrito ao escoamento, maximizando a eficiência do canhão e reduzindo o acúmulo de depósitos de combustão em suas paredes entre os disparos. Convém ressaltar, que este material foi diferente do aço 1040 proposto nas simulações de resistência de materiais, devido a dificuldade inicial em usinar uma peça tão sofisticada em aço.



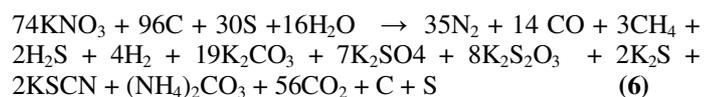
Fig. 9. Vista frontal da tubeira. (Cone divergente)

IV. ENSAIOS

Foram realizados três dias de ensaios reais, 11, 16 e 17 de outubro de 2006, Durante os três dias foram realizados sete disparos, um contra uma parede de terra, três contra uma parede de concreto e três contra uma chapa de aço de 1 mm de espessura.

A. Arranjo experimental

O propelente utilizado foi a pólvora negra. Ela, apesar de não mais ser usada atualmente como propelente balístico, foi escolhida para os ensaios pelos motivos explicitados a seguir. A pólvora negra tem velocidade de queima, energia de combustão e geração de mols gasosos menores que as pólvoras sem fumaça, o que certamente diminui em muito a potência do canhão, mas promove um ambiente mais seguro para ensaios preliminares, reduzindo os riscos relacionados a falhas estruturais ou ricochete de projéteis. Não obstante, a utilização de pólvora negra demonstra o conceito da mesa forma que propelentes mais potentes [5]. Além disso, a pólvora negra é de aquisição mais fácil que os propelentes balísticos mais avançados, alguns de uso restrito. Os inconvenientes relacionados à sua utilização são a grande geração de partículas sólidas na combustão, que se verifica pela fumaça branca em suspensão após o disparo. Alguns desses sólidos são bastante corrosivos, e podem atacar o metal do tubo-alma. Outro ponto negativo e sua relativa hidrofília. Uma vez que a pólvora absorve umidade, ela perde suas características de explosivo num processo irreversível. Para efeitos de cálculos foi considerada a seguinte reação química:



É importante ter em mente que essa reação é apenas uma condição ideal, bastante simplificada em relação à realidade. Ela não apresenta detalhes acerca do mecanismo das reações em cadeia envolvidas, sendo impossível através da mesma prever efeitos cinéticos relacionados a diferentes percentagens mássicas dos componentes envolvidos. A reação real depende

da constituição exata da pólvora e da forma como sua queima é iniciada.

Para a reação ideal o calor liberado é de 685 Kcal/Kg e o fator de expansão de volume é de 5100, formando 600g de produtos sólidos e 278 litros de gases. A reação real apresenta valores ligeiramente menores em ambos os quesitos. Os produtos sólidos, que representam em torno de 56% da massa final, são responsáveis pela fumaça branca densa característica da queima, ao ficarem em suspensão no ar próximo, formando um aerosol. O calor específico a pressão constante da pólvora foi estimado em 0,348 Kcal/Kg^oK, considerando os gases provenientes da combustão [6]. Vale lembrar que a velocidade de queima da pólvora negra é bastante influenciada pela temperatura e pouco pela pressão. Assim, foi possível estimar a pressão na entrada na tubeira e a energia contida nos cartuchos.

B. Preparação da Carga e cartucho

A massa propelente era acondicionada na forma de carga ensacada, em estojos cilíndricos de papel, preparados separadamente dos projéteis. As massas de pólvora negra eram medidas em balanças analíticas, com precisão de três casas decimais e então despejadas nos cartuchos, que eram em seguida lacrados e guardados longe de umidade. Foram preparados estojos de 30g, 40g e 50g.

C. Sistema de ignição

Dentro do estojo, no centro da carga cilíndrica, antes da colocação da pólvora, posicionava-se um squib detonante, um filamento de tungstênio utilizado para iniciar a deflagração por oferta de energia na forma de calor dissipado no filamento a partir da passagem de corrente elétrica. A corrente fornecida por uma bateria posicionada em local seguro, à distância, efetuava o disparo.

D. Projéteis

Construídos a partir de tarugos de nylon, por usinagem em torno de controle manual. A adoção do nylon se deu pelos motivos a seguir. O nylon é um material polimérico não inflamável, dessa forma não haveria o risco de combustão do projétil dentro do tubo. Ele também é macio, bem mais macio que o aço utilizado no tubo, de forma que não houvesse preocupação com a erosão da alma do tubo pela passagem do projétil em alta velocidade em disparos sucessivos; além disso, sua moldagem por remoção de material é fácil e rápida. Por fim, é um material pouco resistente a impactos, de forma que o risco de incidente por ricochete no alvo é pequeno, já que a probabilidade do nylon se quebrar em diversos pedaços no impacto é grande, como foi verificado posteriormente nos ensaios. Os projéteis fabricados pesavam entre 60g e 70g.

E. Procedimento experimental

O tubo foi posicionado a 30 m de distância do operador do disparo, seguro além de uma parede de terra. Próximo ao canhão ficavam apenas câmeras de vídeo utilizadas para posterior exame do disparo. O canhão ficou apoiado paralelamente ao solo sobre dois tijolos refratários lisos, de forma a diminuir ao máximo possível o atrito. Um fio de 35m de extensão conectava a bateria ao *squib* detonante, e o disparo era efetuado a comando do operador após certificarão de que as áreas próximas haviam sido evacuadas.

1) I Bateria de testes

No primeiro dia foi realizado no dia 11 de outubro de 2006 com condições climáticas favoráveis, isto é, tempo seco, pouco vento e temperatura de 25° C. A bateria consistiu de apenas um disparo demonstrativo realizado contra uma parede de terra localizada a 20m de distância da boca do canhão.

Foi utilizado um estojo contendo 30g de pólvora negra e um projétil de massa aproximadamente igual a 70g. O recuo foi suficiente para derrubar o canhão de seu apoio no tijolo refratário. É interessante notar, no entanto, que neste primeiro ensaio o canhão encontrava-se inclinado em relação a horizontal, o que torna difícil a análise dos resultados. Nessa situação qualquer desequilíbrio poderia ser suficiente para fazer o canhão deslizar de seu apoio somente pela ação de seu peso.



Fig.10. Arranjo experimental para o I disparo

2) II Bateria de testes

O segundo dia de testes foi realizado em 16 de outubro de 2006. O céu estava encoberto, alta umidade e temperatura ambiente de 20° C. Foram realizados dois disparos com arranjos experimentais em diferentes configurações.



Fig. 11. Arranjo experimental para o II disparo

O primeiro disparo foi realizado contra um muro de terra distante de 60m do canhão. Utilizando-se um estojo de 30g de pólvora.

O segundo disparo foi realizado, logo em seguida, contra um muro de concreto, distante 30m do canhão com estojo de 40g.

O projétil do primeiro disparo não pôde ser recuperado e o segundo fragmentou-se como era previsto ao colidir com a parede de concreto.

3) III Bateria de testes

No terceiro dia de teste, 17/10/2006, foram realizados 4 disparos. As condições climáticas eram desfavoráveis: choveu durante boa parte do ensaio e havia rajadas de vento.

O primeiro disparo foi realizado contra uma parede de concreto com carga de 30g. O projétil fragmentou-se, seus restos foram recuperados. Os três disparos seguintes foram efetuados contra uma chapa de aço de 1mm de espessura. Em todos os 4 disparos, o alvo situava-se a 30m de distância da boca do canhão.

Todos os disparos contra a chapa de aço perfuraram-na. As cargas utilizadas foram de 30g, 40g e 60g, respectivamente. A seguir é mostrada uma figura dos projéteis após o disparo dos mesmos.



Fig. 12. Arranjo experimental para o III disparo

V. CONCLUSÕES

Nestes sete primeiros ensaios de demonstração não foi utilizado nenhum equipamento que medisse com precisão a magnitude do impulso relacionado ao recuo, como um reparo deslizante ou suspenso, por exemplo. Também não se aferiu com precisão a inclinação do canhão em relação à linha do horizonte, o que também poderia alterar ou mascarar de maneira significativa os resultados. A abordagem dessa demonstração inicial foi, portanto, muito mais qualitativa que quantitativa.

Podemos, no entanto, perceber que o mecanismo adotado em grande parte das vezes reduziu de maneira quase total os efeitos do recuo associado ao disparo. Para uma velocidade estimada de 300 m/s (média medida pela contagem de quadros da câmera entre o disparo e o impacto do projétil no alvo) do projétil, teríamos uma velocidade de recuo da ordem de 3 m/s do canhão. Isso certamente não foi verificado, já que diversas vezes o canhão permanecia praticamente na mesma posição após o disparo.

VI. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a continuidade do projeto será avaliada a possibilidade da utilização de propelentes de maior potência e com normas mais rígidas de fabricação, no que diz respeito à granulação e composição química, e armazenamento. Dessa forma se tornará mais interessante o estudo de algumas áreas que tiveram pouca atenção até agora: a balística externa e sistemas eficientes de alimentação de projéteis.

Também se pretende utilizar na construção do canhão e dos projéteis materiais mais nobres e sofisticados, cuja fabricação

admita menos tolerâncias, com ferramentas por controle numérico, por exemplo, tornando o comportamento do conjunto como um todo mais previsível. Essas medidas garantirão uma notável melhora na repetitividade e confiabilidade dos ensaios e justificarão a adoção de mecanismos e equipamentos de medição de forças, temperaturas, pressões e velocidades para o estudo dos fenômenos envolvidos no experimento real.

Os avanços também serão positivos no sentido de validar os resultados obtidos em simulações computacionais de mecânica de fluidos e resistência de materiais, comparando-se vários modelos matemáticos além da literatura em armamentos e verificando sua proximidade com o fenômeno observado.

VII. AGRADECIMENTOS

Oficina Mecânica do Departamento de Física do ITA por ter contribuído com a usinagem da tubeira do canhão.

Departamento de Física do ITA, ao Prof. Silvério, por ter fornecido a oportunidade da participação na feira de Ciências.

Departamento de Mecânica do ITA por ter fornecido apoio técnico na construção dos projéteis.

Divisão de engenharia Aeronáutica do ITA por ter fornecido materiais didáticos a respeito do estudo dos bocais.

Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) por nos ter provido de material teórico. Agradecimentos especiais ao Major Franchitto, Capitão Blanco, Miscow.

Professor Orientador do Departamento de Química do ITA, Professor Iha, por ter auxiliado na busca de contatos com diversos profissionais das diversas áreas envolvidas no projeto do canhão.

Professor Orientador do Departamento de Química do ITA, Professor Fritz, por ter conduzido, ao longo do projeto, toda a parte relacionada ao desenvolvimento e preparação do propelente, bem como dimensionamento da tubeira para que fosse atingido o efeito desejado.

Instituto Militar de Engenharia (IME) por fornecer embasamento teórico, através do Coronel engenheiro Lonthfranc e o Coronel R1 Henriques, que auxiliou o aprendizado das técnicas envolvidas na manufatura de armamentos.

REFERÊNCIAS

- [1] R. W. Fox, A. T. McDonald and P. J. Pritchard. "Introdução à Mecânica dos Fluidos", LTC, 6ª Edição, 2006
- [2] Hatcher, Julian S., June 1962, "Hatcher's Notebook", Stackpole Books, 3rd edition, ISBN: 0811707954), 322 p
- [3] William D. Callister, Jr., 2000 "Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução", LTC, 5ª Edição, 246 - 263 p
- [4] Real, Eduardo Vila, 2006, "Simulação termodinâmica em tubeira de canhão sem recuo" Artigo do VIII SIGE
- [5] W. A. Sirignano, A. G. Merzhanov and L. De Luca, "Advances in Combustion Science: In Honor of Ya B. Zel'dovich", American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol 173, 2003
- [6] R. E. Sonntag, C. Borgnakke and G. J. Van Wylen, "Fundamentos da Termodinâmica", Edgard Blucher, 2006