

Estudo e análise do fenômeno do colapso de um cone de carga oca

Rafaela Valões Silva^a, Édio Pereira Lima Júnior^a, Guilherme Pinto Guimarães^b, Arnaldo Ferreira^a

^aInstituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais – SE/4
Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

^bCentro Tecnológico do Exército
Av. das Américas, 28705 - Barra de Guaratiba, Rio de Janeiro -
RJ, 23020-470

*rafaelavaloes@gmail.com

RESUMO: Simulações com carga oca foram realizadas para examinar a perfuração em uma rocha encontrada em sítios de produção de petróleo. Foram realizados estudos da interação do explosivo e do material metálico, a formação do jato e o comportamento dos alvos durante a penetração. Foi usada uma carga similar as utilizadas pelas prestadoras de serviço. Os alvos são o tubo de serviço, coluna de cimentação e reservatório com arenito Berea. A simulação da carga oca foi feita no modelo Euleriano, e para a penetração foi empregado o modelo Lagrangiano. O tempo de detonação na simulação foi menor que 2% comparado ao tempo calculado com a velocidade de detonação experimental do explosivo RDX. Os resultados obtidos permitiram uma melhor compreensão do fenômeno de perfuração e penetração de um jato metálico produzido pelo efeito de carga oca em diferentes materiais, fornecendo uma base sólida para futuro estudos.

PALAVRAS-CHAVE: Canhoneio. Carga oca. Explosivo.

ABSTRACT: Hollow-charge simulations were performed to examine drilling in a rock found at oil production sites. Studies of the interaction of explosive and metallic material, jet formation and target behavior during penetration were carried out. A load similar to that used by the service providers was used. The targets are the service pipe, cementing column and reservoir with Berea sandstone. The simulation of the hollow load was done in the Eulerian model, and for the penetration the Lagrangian model was used. The detonation time in the simulation was less than 2% compared to the time calculated with the experimental detonation speed of the RDX explosive. The results obtained allowed a better understanding of the phenomenon of drilling and penetration of a metallic jet produced by the effect of hollow load on different materials, providing a solid basis for future studies.

KEYWORDS: Cannonade. Charge Shaped. Explosive.

1. INTRODUÇÃO

A completação é um dos processos mais importantes para a produção de petróleo. Este processo consiste em perfurar o poço e comunicar a formação com o poço revestido. Na região do pré-sal, existem várias dificuldades em estabelecer esta comunicação. Uma delas é que as rochas desta região são extremamente heterogêneas, o que dificulta a estabilidade do poço. Outra é que essas rochas estão em torno de 7 mil metros de profundidade, sob a pressão da camada água do mar, de pós sal e de sal. Estas camadas fazem com que as rochas se tornem muito duras e compactadas.

Um dos métodos usados com mais frequência para estabelecer a comunicação entre o poço e a formação rochosa é a técnica de canhoneio. Esta técnica consiste em abrir a formação com cargas explosivas, que geram jatos de alta pressão e que podem penetrar a formação, abrindo canais para o escoamento do óleo.

O estudo sobre o colapso de carga oca é de grande importância para o desenvolvimento da técnica de canhoneio. Possui uma aplicação dual, visto que além do interesse na indústria do petróleo, também permite aplicação na indústria de defesa. É bem conhecido na área militar a importância do desenvolvimento de artefatos, que empregam o conceito de carga oca, para a perfuração de blindagens.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo das ondas de choque inicia na época em que os europeus começaram a investir no melhoramento do armamento. Essa necessidade surgiu para que os projetis pudessem atravessar rapidamente as trincheiras com sacos de areias. Em 1876, Mach publicou um trabalho sobre o fluido em volta dos projetis.

Para mostrar claramente a onda de choque, Mach faz

uso de variações da massa específica do ar na linha de frente do projétil. Ele também obteve um bom entendimento dos fundamentos de fluidos supersônicos com os efeitos do movimento dos projetis. Demonstrou a existência da onda de choque e sugeriu a importância da relação da velocidade de choque e a velocidade do som [1].

Com a Segunda Guerra Mundial (1939 a 1945), a carga oca foi desenvolvida para a destruição de carros de combate. O estudo do colapso e penetração com carga oca se iniciou com BIRKHOFF *et al* [2]. Em 1948, ele publicou um trabalho que verifica o aumento de penetração com a presença de uma camada de revestimento e o distanciamento do alvo chamado de stand-off. Os primeiros estudos publicados que fazem o uso da carga oca no processo de canhoneio em poço de petróleo são datados da década de 40. Empresas prestadoras de serviço de petróleo desenvolveram canhões a partir das cargas militares desenvolvidas na segunda guerra mundial. A partir daí, outras companhias e universidades, em sua maioria americanas, efetuaram o desenvolvimento e melhoramento do desempenho das cargas.

MEYERS [3] também discorre sobre ondas de detonação, a influência da impedância entre material metálico e explosivo e as equações de governo durante a propagação da onda de detonação, como as equações de conservação e estado. São verificados os pontos de von Neumann e Chapman-Jouguet que são de grande importância para compreensão da frente da onda de detonação e a sua descontinuidade. A FIG. 1 contém a estrutura da onda de detonação e os pontos de von Neumann e Chapman-Jouguet (P_{CJ}) no perfil de pressão e tempo. A pressão do ponto de Chapman-Jouguet (P_{CJ}), velocidades das partículas (P_{CJ}) e a velocidade de detonação (D) dependem do explosivo a ser detonado. O ponto de von Neumann apresenta-se na frente de onda enquanto que o ponto de Chapman-Jouguet é verificado após um tempo muito pequeno do ponto de von Neumann. Para fins de simplifi-

cação computacional, somente o ponto de Chapman-Jouguet é considerado nos cálculos.

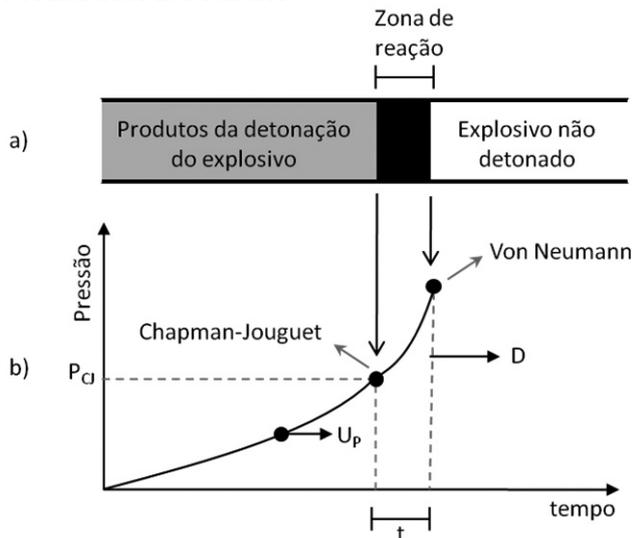


Fig 1: (a) estrutura de onda de detonação e (b) o perfil de pressão (adaptado de MEYERS, 1994).

Na frente da onda de choque considera-se uma descontinuidade em relação a pressão e a energia. E, para ultrapassar este fenômeno, é introduzida a viscosidade artificial de von Neumann e Richtmyer. A proposta é adicionar um termo à pressão, de modo que a mudança de pressão é distribuída ao longo de algumas células, em vez de ocorrer de forma descontínua. A adição do termo de viscosidade artificial muda as equações de conservação de massa e energia.

HUANG *et al* [4] em 2011 fez o uso da viscosidade artificial com o programa AUTODYN para realizar uma análise numérica de um típico problema de detonação de TNT sob a água, e observa os efeitos da viscosidade sobre o processo físico energético realizado. A viscosidade artificial é adicionada a pressão para solucionar as descontinuidades da onda de choque. Diferente do trabalho apresentado por MEYERS [3], cuja termo de viscosidade artificial é somente quadrática, o trabalho de HUANG *et al* [4] apresenta dois termos de viscosidade artificial: um quadrático e outro linear. A equação usada no programa AUTODYN apresenta estes dois termos.

3. MÉTODOS COMPUTACIONAIS

O método de Euler e de Lagrange foi utilizado, e estes têm suas equações desenvolvidas em diferenças finitas. A simulação da carga oca gera grandes deformações e o modelo Euleriano consegue suportar altas deformações e tensões, o comportamento do material não-linear, fragmentação e propagação de ondas de choque. Para a simulação da penetração do jato no alvo, o método de Euler também é testado, porém o que mostra eficiência na geração de resultados é o método de Lagrange. Isto se dá porque o modelo Euleriano produz mais gasto computacional para gerar resultados que o modelo Lagrangeano.

O método de Euler contém uma grade numérica fixa no espaço enquanto há o movimento de matéria em relação a grade. Este método é mais usado para representar fluidos, apresentando o efeito de suportar altas taxas de deformações ou situações de escoamento. Este método computacional tem como desvantagem o esforço computacional alto para manter as interfaces do material e dissipação numérica [5].

O processo de solução por Euler-Multimaterial, que é

o empregado no AUTODYN, esta descrito no trabalho de GÜREL [6] e no manual AUTODYN Theory Manual [7, 8]. Nas duas referências, as equações de conservação são descritas na forma de diferenças finitas utilizado um volume de controle. A resolução se dá em dois passos. No primeiro passo, chamado de Lagrangeano, as equações são atualizadas e progredem ao passo de tempo. No segundo passo, as variáveis são atualizadas e mapeadas na malha Euleriana.

No método de Lagrange a malha é fixa ao material simulado, e acompanha o movimento e a deformação do mesmo em regiões de distorção relativamente baixas. Este método é mais indicado para representar estruturas sólidas. Tem como vantagem a fácil adição de modelos complexos e a sua eficiência computacional, mas a malha pode ficar muito distorcida em regiões extremamente deformadas [5].

4. FORMULAÇÃO TEÓRICA

Para a simulação de uma carga oca são usados vários tipos de materiais e cada um apresenta comportamentos diferentes. Assim, para cada material são empregadas equações que descrevem essas transformações. As equações que estão contidas no código são equações de conservação, a equação de estado do material, de Mie-Grüneisen, de Jones-Wilkins-Lee e P-alpha, as equações constitutivas de Johnson-Cook, Von Mises e Concreto RHT.

O tratamento matemático das ondas de choque foi originalmente desenvolvido por Rankine e Hugoniot. As equações podem ser facilmente desenvolvidas ao considerar regiões imediatamente antes e após a frente de choque. O estado do meio na frente e após a onda de choque obedecem as leis de conservação de massa, momentum e energia [3].

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{Du}{Dt} \right) = -\nabla P \quad (2)$$

$$\frac{dE}{dt} + P \frac{dV}{dt} = 0 \quad (3)$$

ρ é massa específica, u é vetor velocidade, t é tempo, P é a pressão, V é volume específico e E é a energia interna específica por unidade de massa.

As equações de estado são essenciais para descrever a onda de choque em uma dada carga e um dado alvo. Somente com as equações de conservação não é possível calcular todas as variáveis. Assim, é necessário mais uma equação de estado para possibilitar a resolução do sistema. Uma dessas equações relaciona a velocidade de propagação da onda de choque com a velocidade de partícula:

$$U_s = C_0 + s_1 U_p \quad (4)$$

tem-se U_s que é a velocidade de propagação da onda de choque, U_p é velocidade da partícula, C_0 é velocidade do som e s_1 é constante empírica da equação de estado do material.

A equação de estado de Mie-Grüneisen permite calcular a pressão em um material sob a ação de uma onda de choque. Os termos P_H e E_H são pressão e energia de Hugoniot e que servem como valores de referência, γ é o coeficiente de Mie-Grüneisen.

$$P = P_H + \frac{\gamma}{V} (E - E_H) \quad (5)$$

A detonação do explosivo, a equação de estado que é usada para a detonação do explosivo é a de Jones-Wilkins-LEE.

$$P = A \left[1 - \frac{w\eta}{R_1} \right] \exp\left(-\frac{R_1}{\eta}\right) + B \left[1 - \frac{w\eta}{R_2} \right] \exp\left(-\frac{R_2}{\eta}\right) + w\rho E \quad (6)$$

A , B , R_1 , R_2 e w são parâmetros de ajuste experimental e η é a razão das massas específicas.

A relação da pressão para materiais porosos, como é o caso do cimento, foi sugerida por HERMANN [9] e está descrita a seguir:

$$\alpha = 1 + (\alpha_p - 1) \left[\frac{P_s - P}{P_s - P_e} \right]^n \quad (7)$$

n é o expoente de compactação ($n=3$ é normalmente usado). P_e é a pressão elástica e P_s é a pressão total de compactação. A porosidade do material no início da deformação plástica é dado por α_p [10].

Além das equações de estado, o material do jato e do alvo possuem um modelo de resistência. Neste trabalho faz-se o uso do modelo de Johnson-Cook para o revestimento, o modelo Concreto RHT para o concreto e modelo de falha Von Mises para o arenito Berea e o tubo de serviço.

O modelo de Johnson-Cook visa modelar o comportamento de resistência do material metálico do revestimento. A equação constitutiva do modelo de Johnson-Cook calcula a limite de escoamento dinâmico do material:

$$\sigma_y = (A + B \varepsilon_p^n) \left(1 + C \log \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) (1 - T_*^m) \quad (8)$$

A' , B' , C' , m e n são parâmetros obtidos experimentalmente para cada material. ε_0 é a taxa de deformação inicial que normalmente é $\varepsilon_0=1$. E T_*^m é a temperatura reduzida.

O modelo de falha de Von Mises foi proposto por von MISES [11] a fim de descrever escoamento plástico em metais. O critério de von Mises permite o cálculo simples da tensão equivalente e a deformação equivalente (σ_e). A tensão equivalente está relacionada com as tensões principais σ_1 , σ_2 e σ_3 .

$$\sigma_e = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (9)$$

O modelo de Concreto RHT é um modelo avançado de plasticidade para materiais frágeis desenvolvidos por RIEDAL et al em 1999 [12]. A equação geral deste modelo constitutivo está apresentada a seguir [9]:

$$f_{rup} = -Y_{TXC} (p) \cdot R_3 \cdot F_{AD} \quad (10)$$

Onde Y_{TXC} é a superfície de fratura, F_{AD} é o factor de aumento dinâmico e $R_{3(\theta)}$ é o terceiro termo de dependência invariante.

5. MODELAGEM COMPUTACIONAL

A modelagem computacional é a aplicação de modelos matemáticos e técnicas da computação à análise, compreensão e estudo da fenomenologia de problemas complexos. Na

modelagem computacional são verificadas as condições iniciais, como o material usado, as equações de estado e constitutivas usadas para cada material, a geometria da carga e do alvo, e malhas aplicadas.

Para a elaboração do projétil são usados três materiais. Um material metálico compõe o invólucro que envolve a carga que onde contém material explosivo e o revestimento. O revestimento contido na carga é também composto de um material metálico.

O material usado para o invólucro é o Aço 4340 que possui resistência ultra- alta a tração e pode ser usado em casos que exigem variados tipos e níveis de sollicitação. A equação de estado usada na simulação para o invólucro é a equação estado de Mie-Grüniesen, e a equação constitutiva é a equação de Johnson-Cook.

O material que compõe o explosivo para este trabalho é o RDX (Research Department X). A equação de estado para os explosivos usados é equação de Jones-Wilkins-Lee (JWL), que é uma simples relação da pressão com volume e energia, e esta equação descreve a expansão adiabática dos produtos de detonação de explosivos. Para o revestimento o material usado na carga é o cobre OFHC (Oxygen Free High Conductivity), que é um material livre de oxigênio e possui alta condutividade.

A equação de estado usada para simular o cobre OFHC é a equação de estado do material [13].

A carga usada para a simulação é uma carga similar às cargas empregadas por empresas prestadoras de serviço na indústria de petróleo. A Fig. 2 contém o desenho e o dimensionamento aproximado da carga empregada na simulação. A malha usada para simular o colapso da carga é a Euleriana. A distribuição da malha é de 0,3 por 0,3mm.

Os materiais usados no alvo são três também. Um deles é o tubo A25 PSL1 F usado como tubo de serviço, por onde desce o canhão e sobe o petróleo do reservatório. A norma API 5L 43ªed. [14] contém dados do tubo assim como o dimensionamento deste. Outro alvo é a coluna de cimentação composta pelo cimento CONC-35MPa que é usado para revestir e proteger o poço de possíveis precipitações.

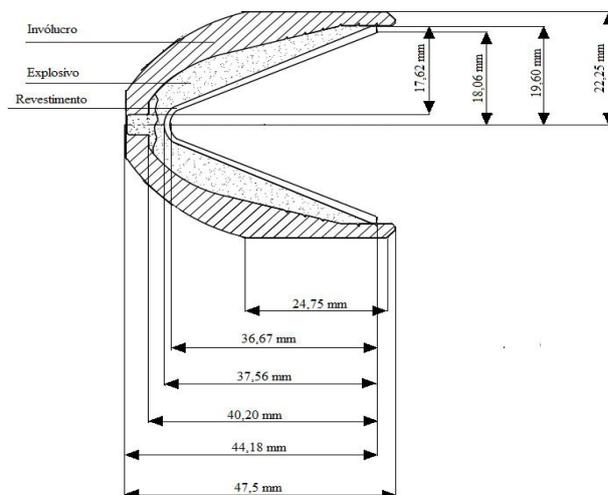


Figura 2: Carga oca 4" Port Plu Gun RDX

O material que compõe o alvo que simula o reservatório é o arenito Berea que é típico de locais que possuem petróleo. Para a simulação a rocha é considerada isotrópica, e se desconsidera a influência dos poros na rocha. Os valores de entra-

da para a equação de estado são aproximados fazendo o uso de valores de concreto com a massa específica próxima ao valor da rocha. A Tab. 1 tem os dados de entrada do arenito Berea.

Tab 1: Dados de entrada da rocha Berea (AUTODYN).

Parâmetro	Valor
Equação de estado do material	
Massa específica de referência ρ_0 (kg/cm ³) [15]	0,002631
Coefficiente de Gruneisen [16]	0,75
Parâmetro C0 [17]	2,6
Parâmetro s1 [18]	1,49
Temperatura de referencia (K)	300
Equação constitutiva de Von Mises	
Módulo de cisalhamento (GPa) [19]	6,0
Tensão de escoamento (MPa) [20]	71.6

Após a simulação da carga no enfoque Euleriano, ela é remapeada em uma malha Lagrangeana com a adição de dados do alvo. Alguns ciclos são passados de modo, que o jato seja bem formado e para que os materiais do involucro e explosivo sejam excluídos da malha. A Tab. 2 apresenta as camadas que são penetradas e os valores de cada uma.

Tab 2: Camadas de penetração e valores de espessura para o alvo.

Camadas	Primeira camada	Segunda camada	Terceira Camada
Material	Tubo A25 PSL1 F [14]	CONC-35 MPa [21]	Arenito Berea
Espessura (mm)	6,6	63,5	400
Altura (mm)	100	100	100

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram obtidos primeiramente na malha Euleriana para a detonação da carga, e posteriormente na malha Lagrangeana para a penetração do jato no alvo. A duração total para toda simulação em ambas as malhas é de cinco dias vinte e duas horas e nove minutos correspondendo a uma simulação de cinco minutos para o processamento de 12,24 μ s na malha Euleriana e de cinco dias vinte e duas horas e quatro minutos para a simulação de 3000 μ s na malha Lagrangeana. O passo de tempo a cada ciclo nesta simulação está entre μ s e μ s. Neste trabalho, as simulações numéricas foram realizadas utilizando-se os seguintes recursos computacionais: processador Intel(R) Core (TM) i5-3317U CPU @ 1,70 GHz 1,70 GHz, memória (RAM): 4,00 GB, sistema operacional de 64 Bits, softwares ANSYS AUTODYN e 14.5 MATLAB 8.0 (R2012b).

A simulação do explosivo ocorre por uma onda de detonação pontual iniciada na extremidade esquerda e avançando contra o revestimento. Os dados de saída do programa para malha Euleriana estão compostos pelos resultados obtidos no explosivo e no revestimento.

Os resultados obtidos no explosivo são as pressões máximas, velocidades máximas e tempo em que a onda de detonação percorre todo explosivo. A Fig. 3 representa os valores de pressão no tempo logo após a detonação ($t=1,018 \mu$ s) e no tempo em que a onda de detonação já passou por todo o explosivo ($t=6,306 \mu$ s) e se encontra na base do cone.

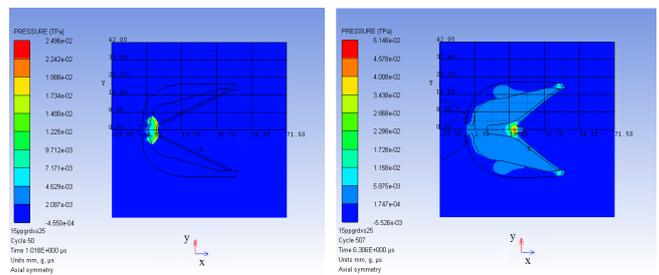


Figura 3: À esquerda a carga no tempo 1,018 μ s e à direita a carga no tempo de 6,306 μ s.

A Fig. 4 contém os resultados obtidos das máximas pressões dentro do explosivo até que a onda de choque passe por todo explosivo. Pode-se observar que o pico de pressão aumenta até 40,47 GPa no tempo 3 μ s e decai em seguida porque há diminuição da quantidade de explosivo não detonado na carga. Nesta mesma figura tem-se as máximas velocidades das partículas do explosivo até o tempo de 5,802 μ s. A velocidade máxima encontrada é 4080,0 m/s no tempo de 5,802 μ s.

A Fig. 5 ilustra as velocidades e pressões no tempo em que a frente da onda de detonação chega no final do explosivo ($t=5,802 \mu$ s) e todas as partículas passaram a ter velocidade. Com esta figura é possível observar as velocidades mais altas das partículas no revestimento em vermelho e ao final do explosivo na cor azul claro.

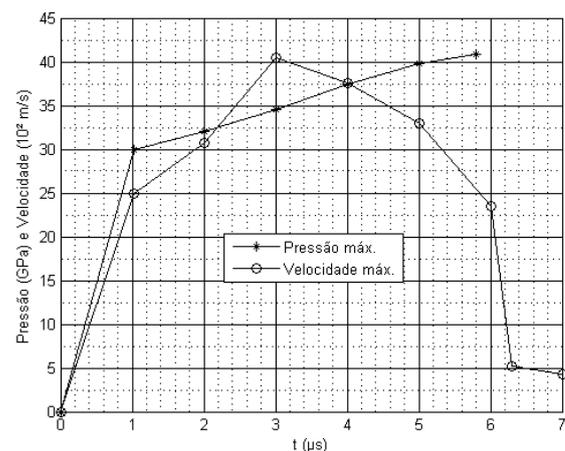


Fig 4: Pressões máximas no explosivo da carga oca até o tempo de 6,306 μ s e velocidades máximas das partículas de explosivo da carga oca até o tempo de 5,802 μ s.

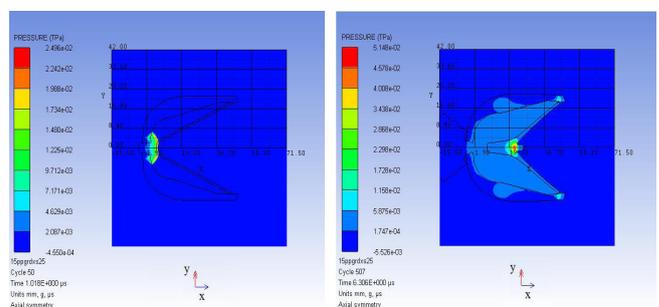


Fig 5: Pressões e Velocidades absolutas máximas da carga oca no tempo de 5,802 μ s.

A Tab. 3 mostra a comparação entre o tempo de detonação do explosivo obtido na simulação e o tempo obtido utilizando a velocidade de detonação teórica do explosivo RDX (8,180km/s). Os resultados obtidos entre os dois se apresentaram muito próximos, pois a diferença percentual é menor que 2%.

Tab 3: Valores do tempo de passagem do pico de onda na simulação e calculado pela velocidade de detonação do RDX, e a diferença percentual entre os dois.

Propriedade	Simulação	Velocidade de detonação do RDX	Diferença
Tempo (μs)	5,802	5,908	1,794%

A Tab. 4 contém os valores máximos de pressão e velocidade encontrados no explosivo RDX e o tempo em que esses valores são encontrados.

Tab 4: Valores máximos de pressão e velocidade de partícula encontrados no explosivo RDX nos respectivos tempos.

Propriedade	Valores	Tempo (μs)
Pressão máxima	40,47 GPa	3
Velocidade máxima	4080,0 m/s	5,802

Foram também verificados os valores das pressões e velocidades máximas encontradas no revestimento. A Fig. 6 contém as pressões e velocidades máximas no revestimento entre os tempos 0 μs e 12,24 μs. A pressão no revestimento cresce até 5 μs com 56,7 GPa e, ao longo do tempo, decresce seu valor. Isto ocorre porque no tempo de 6 μs, o pico da onda de detonação já chegou ao final do explosivo (t=5,802 μs). Então o revestimento não recebe mais onda de detonação e a tendência das pressões dentro do revestimento é atenuar. A velocidade máxima encontrada é no tempo de 7 μs, bem logo após a passagem de toda pressão da onda de detonação, que ocorre até o tempo de 6,306 μs. O fenômeno ocorre com a passagem de toda pressão da onda de detonação, as partículas adquirem um valor de velocidade. Quando não há o término da passagem da onda de pressão, as velocidades das partículas passam a diminuir com tempo.

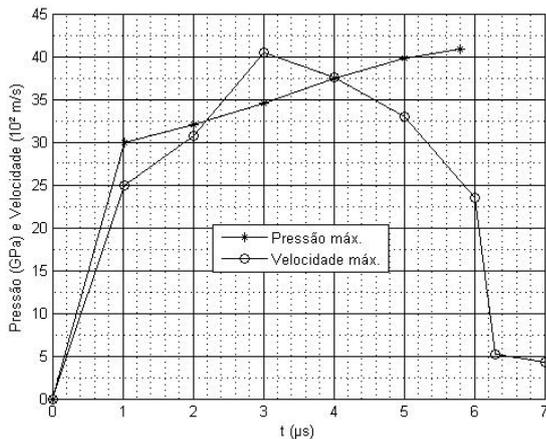


Fig 6: Pressões e velocidades máximas no revestimento da carga oca no tempo de 0 até 12,24 μs na malha Euleriana.

A Tab. 5 contém os valores máximos de pressão, velocidade e massa específica encontrados no revestimento, e o tempo em que esses valores são encontrados.

Tab 5: Valores máximos de pressão, velocidade e massa específica encontrados nos elementos do revestimento nos respectivos tempos

Propriedades	Valores	Tempo (μs)
Pressão máxima	56,70GPa	5
Velocidade máxima	7468 m/s	7
Massa específica máxima	0,01052kg/cm ³	5

A penetração nos alvos aço (tubo de serviço), concreto (CONC-35MPa) e o arenito Berea são realizados após a simulação na malha Euleriana até o tempo de 12,24 μs. Nesta simulação, a malha usada é a Lagrangeana. A contagem do tempo é reiniciada e recomeça do 0 μs. A carga é remapeada com as condições que estava na malha Euleriana.

O primeiro alvo que o jato encontra é o tubo de serviço A25 PSL1 F. O segundo alvo em que o ocorre a penetração é na coluna de cimentação. E o último alvo é o arenito Berea. A Tab. 6 contém os valores de tempo de cada penetração em cada alvo.

Tab6: Valores do tempo de passagem do jato em cada alvo.

Alvo	Tempo (μs)
Tubo de serviço A25 PSL1 F	2,6
Coluna de Cimentação	18,6
Arenito Berea	2978,8

A Fig. 7 mostra o início de penetração nos três alvos. O jato colide com o tubo de aço no instante de 0,2003 μs; a colisão com o concreto ocorre no instante 2,8 μs e com o arenito Berea ocorre no instante 21,40 μs.

A Fig. 8 mostra a penetração do jato e o acúmulo no final do túnel nos tempos de 2000 μs e de 3000 μs. Entre esses dois tempos não há muita diferença de penetração como mostra a Tab. 7.

Tab 7: Valores de penetração entre os tempos de 2000μs e 3000μs no arenito Berea.

Tempo (μs)	Penetração (mm)	Penetração (in)
2000	339,52	13,36
3000	339,8	13,38

Os picos de pressão para cada alvo estão em instante de tempo diferentes. Os picos ocorrem quando o jato inicia a perfuração no alvo. Pode-se observar os picos de pressão ao longo tempo na Fig. 9. A Tab. 8 contém os valores dos picos de pressão com cada material e seu respectivo tempo.

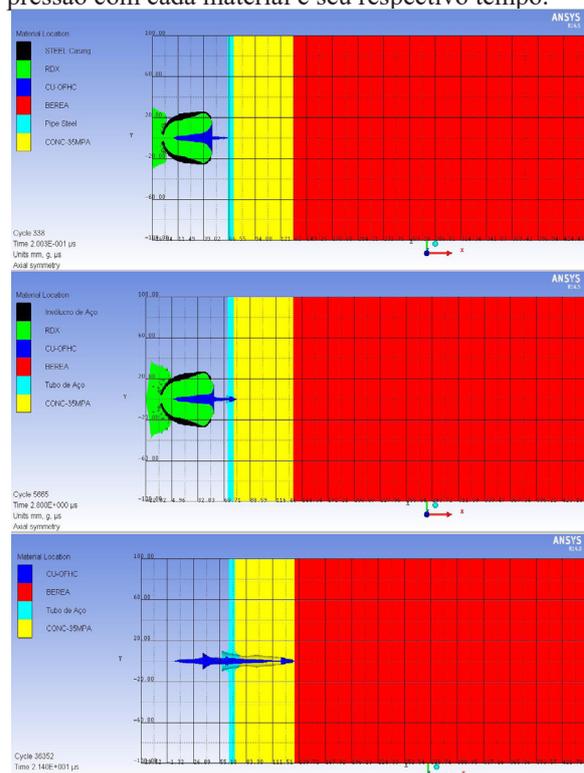


Fig 7: Colisão do jato em cada alvo nos tempos 0,2003 μs , 2,80 μs e 21,40 μs na malha Lagrangeana

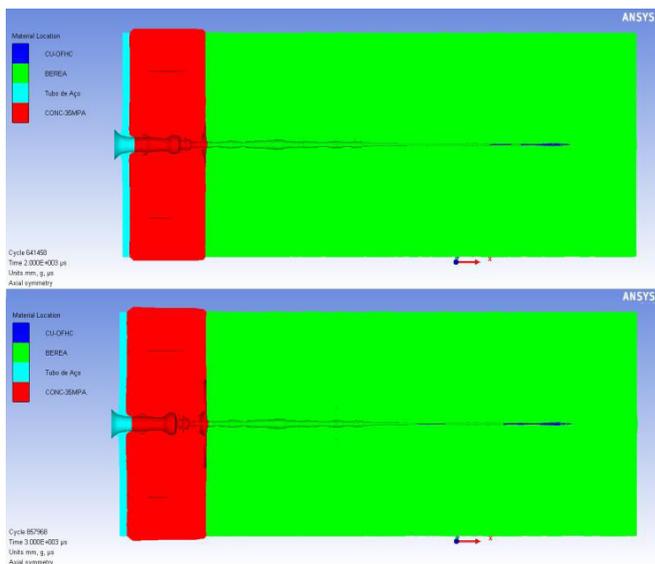


Fig 8: Localização do jato nos tempo de 2000 μs (acima) e 3000 μs (abaixo) na malha Lagrangeana.

Tab 8: Valores máximos de pressão encontrados nos alvos nos respectivos tempos.

Alvos	Pressão máxima (GPa)	Tempo (μs)
Tubo de serviço A25 PSL1 F	44,247	0,304
Coluna de Cimentação	27,09	4
Arenito Berea	8,868	60

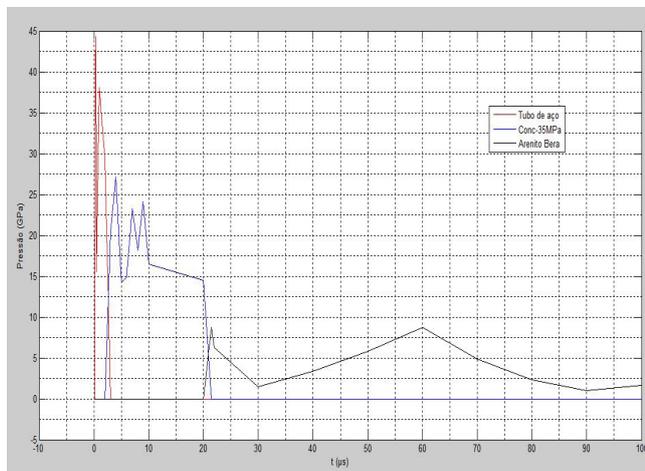


Fig 9: Pressões dos alvos entre os tempos 0 e 100 μs na malha Lagrangeana.

A Fig. 10 contém a posição do jato em cada instante de tempo. Pode-se verificar que a partir do instante 2000 μs a posição não se altera muito até 3000 μs . Isto se dá por conta da resistência do material que atenua a velocidade, como é verificado na Tab. 7 e Fig. 8, onde o valor da velocidade vai decrescendo. A Fig. 10 também contém as velocidades máximas encontradas no jato de 0 até 3000 μs . Depois do tempo de 2000 μs não há uma significativa variação da velocidade, assim como a posição do jato. A velocidade que aparece depois de 2000 μs no gráfico é a velocidade máxima que jato se acumula no fundo do túnel perfurado.

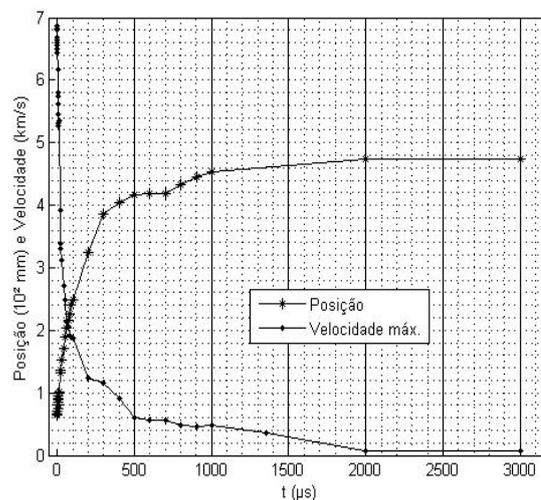


Fig 10: Posição e velocidades máximas do jato entre os tempos 0 e 3000 μs na malha Lagrangeana.

A Tab. 9 contém os valores dos picos de pressão em cada tempo que ocorre com impacto em cada material.

Tab 9: Valores das pressões máximas do jato nos tempos do impacto em cada alvo.

Alvos Impactados	Tempo (μs)	Pressão máxima (GPa)
Tubo de serviço A25 PSL1 F	0,2003	136,2
Coluna de Cimentação	33,107	2,8
Arenito Berea	5,449	21,4

A Tab. 10 contém os valores máximos de pressão encontrados no jato e o tempo em que eles se encontram.

Tab 10: Valores máximos de pressão, velocidade e posição encontrados no jato e seus respectivos tempos em relação a malha Lagrangeana.

Propriedades	Valores	Tempo (μs)
Pressão máxima	136,2GPa	0,2003
Velocidade máxima	6815 m/s	0
Posição Máxima	474,4 mm	3000

7. CONCLUSÕES

Os resultados na primeira simulação com a malha Euleriana permitiram verificar como ocorre a passagem da onda de choque e o que acontece com o revestimento que recebe o impacto da onda. Os resultados de pressões e velocidades tanto do explosivo quanto do revestimento proporcionaram a visualização da formação do jato e o efeito da quantidade de explosivo em cada tempo de detonação. Os valores das tabelas para a simulação na malha Euleriana estão dentro do esperado, como é o caso do valor dado pela Tab. 3 com diferença percentual menor que 2%.

Os resultados obtidos na malha Lagrangeana proporcionaram uma melhor compreensão do impacto do jato com cada alvo e o tempo de penetração em cada um. Foi verificado o quanto o jato penetra estes alvos e o efeito da resistência do material quanto decresce o valor da velocidade e a taxa de penetração. Um dos aspectos físicos que pode ser apresentado é o afinamento e o acúmulo de jato no final do túnel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bar, G., *Fundamentals of Compressible Fluid Mechanics*. Minneapolis. Versão 0.4.4.2 aka 0.4.4.1j. 2007.
- [2] Birkhoff, G., McDougall, D. P., Pugh, E. M. e Taylor, G.. Explosives with lined cavities, *Journal of Applied Physics*. Vol 19. p. 563-582. Junho de 1948.
- [3] Meyers, M. A.. *Dynamic behavior of materials*, John Wiley & sons, 1994. ISBN 0-471-58262-X.
- [4] Huang H., Jiao Q. J., Nie J. X. e Qin J. F.. Numerical Modeling of Underwater Explosion by One-Dimensional ANSYS-AUTODYN. *Journal of Energetic Materials*. Vol 28. 292-325. Julho 2011.
- [5] Santos, J. L.. *Simulação De Ensaio Balístico Dop*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Instituto Militar de Engenharia. 2012.
- [6] Gürel, Eser. *Modeling and Simulation of Shaped Charges*. 2009, 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Middle East Technical University, 2009.
- [7] AUTODYN. *Theory Manual*, ANSYS-Century Dynamics, Rev.4.3, 2005.
- [8] ANSYS AUTODYN, Asset # 1 - 237221309
- [9] Hermann, W.. Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials. *Journal of Applied Physics*. Vol 40. Pp2490-2499. Maio 1969.
- [10] ANSYS AUTODYN User's Manual. *Theory Manual*. Release 14.5. Out. 2012.
- [11] Von Mises, R. *Mechanik der festen Körper im plastisch deformablen Zustand*. Göttin. *Nachr. Math. Phys.*, vol. 1, pp. 582-592. 1913.
- [12] Riedel W., Harwick W., White D.M., Clegg R. A., "Advanced Material Damage Models for Numerical Simulation Codes, Final Report", EMI-report No. 175/03. ESA Contract No. 12400/97/NL/PA(SC), CCN No. 2. 1999.
- [13] Elshenawy, T. Q., M.. Influences of target strength and confinement on the penetration depth of an oil well perforator. *International Journal of Impact Engineering*. 8 :pp. 130-137, 2012.
- [14] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *API Specification 5L: Specification for Line Pipe*. ISO 3183. 2008.
- [15] Swift, R. P., Hagelberg C. R., Carney T. C., e Greening D.. Modeling Stress-Induced Damage from Impact Recovery Experiments. *Proceedings of the ETCE/OMAE 2000 Joint Conference: Energy for the New Millennium*. February 14-17, 2000, New Orleans, LA.
- [16] O'donnell, D. M. e Mckav M.W.. Calculation to support the design of a seismic source test. *Technical Report*. Defense Nuclear Agency. Virginia. EUA. 1995.
- [17] Van Den Abeele, K., Johnson, P. A.. Elastic pulsed wave propagation in media with second- or higher-order nonlinearity. Part II. Simulation of experimental measurements on Berea sandstone. *Journal of the Acoustical Society of America*. Volume 99. Issue 6. pp. 3346-3352. June 1996.
- [18] Sekine, T., Duffy, T. S.; Rubin, A. M., Anderson, W. W., Ahrens, T. J.. Shock compression and isentropic release of granite. *Geophysical Journal International*, vol. 120, issue 2, pp. 247-261. 1995.
- [19] Wang, H. F.. *Theory of linear poroelasticity with applications to geomechanics and hydrogeology*. Princeton University Press. 2000.
- [20] Busetti, S., Mish, K., Reches, Z.. Damage and plastic deformation of reservoir rocks -- Part 1. Damage fracturing. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. v. 96, no. 9, p. 1687-1709. 2012.
- [21] CHEVRON TEXACO. Data sheet for concrete coating of line pipe. PPL-DS-4807 [online]. 2002. Disponível: <http://www.networkintl.com/contents/auction/QFPIRA000HBW/QFPIRA00LCPK/QFPIRA001RN1CONCRETE%20DATA%20SHEET.pdf> [capturado em 05 ago. 2014].