

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

RAFAELA VALÕES SILVA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO COLAPSO DO CONE
DE CARGA OCA EMPREGADA NA INDÚSTRIA DE
PETRÓLEO**

Rio de Janeiro

2014

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

RAFAELA VALÕES SILVA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO COLAPSO DO CONE DE
CARGA OCA EMPREGADA NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO**

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. Arnaldo Ferreira – Ph.D.

Rio de Janeiro

2014

c1999

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha
Rio de Janeiro RJ
CEP: 22290270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmar 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).

662.27 Silva V., Rafaela

L732s Simulação Computacional do Colapso do Cone de Carga Oca
Empregada na Indústria de Petróleo / Rafaela Valões Silva. – Rio de Janeiro:
Instituto Militar de Engenharia, 2014.

155 f.: il., graf., tab.: – cm

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, 2014.

1. Formação

CDD 662.27

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

RAFAELA VALÕES SILVA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO COLAPSO DO CONE DE
CARGA OCA EMPREGADA NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO**

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. Arnaldo Ferreira – Ph.D.

Aprovada em 18 de dezembro de 2014 pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Arnaldo Ferreira – Ph.D. do IME – Presidente

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

Prof. Marco Antonio Santos Pinheiro – Ph.D. do IPRJ/UERJ

Eng. Antonio Claudio Soares – D.C. da Petrobras

Rio de Janeiro

2014

“Estuda. – Estuda com empenho. – Se tens de ser sal e luz, necessitas de ciência, de idoneidade. Ou julgas que, por ser cábula e comodista, hás-de receber ciência infusa?” (Caminho, 340 – São Josemaria).

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente pois sem Ele nada seria.

Segundo à minha família que me deu todo suporte durante este tempo.

Ao meu namorado Pedro Maimere que me ajudou com o desenvolvimento da apresentação e que sempre me apoiou.

Ao meu orientador Arnaldo, que se dedicou, me ensinou muito a fazer a pesquisa e me passou o conhecimento necessário para esta.

Ao meu colega acadêmico Alexis Armas Vaca que compartilhou comigo conhecimento e me auxiliou nos trabalhos.

Ao professor Édio Pereira Lima Júnior que me recebeu em sua sala para ajudar com o código computacional obrigada também.

À Luciana Peixoto que esteve a disposição para me explicar sobre rochas e o arenito Berea e ao Eduardo Silva do laboratório de canhoneio do CETEX que foi solícito em fornecer as informações sobre o experimento realizado.

Aos professores Marco Antonio Santos Pinheiro e Norberto Cella da UERJ que acreditaram em mim e me direcionaram para o mestrado no IME.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa durante todo o período de realização deste mestrado.

Aos demais professores da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e profissionais do Instituto Militar de Engenharia.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	10
LISTA DE TABELAS.....	15
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	18
RESUMO	24
ABSTRACT	25
1 INTRODUÇÃO	26
1.1 Considerações Iniciais	26
1.2 Motivação.....	28
1.3 Objetivos	29
1.4 Organização do Trabalho	30
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.1 Teorias do Colapso do Cone Metálico	31
2.1.1 Teoria do Colapso por Birkhoff et al	31
2.1.2 Teoria do Colapso por Pugh et al	34
2.1.3 Velocidade de Colapso por Defourneaux.....	37
2.1.4 Velocidade de Colapso por Gurney	38
2.1.5 Influência do Tempo de aceleração.....	40
2.2 Operação de Canhoneio	40
2.2.1 Métodos de Canhoneio.....	41
2.2.1.1 Método Sobre Pressão (Overbalance).....	42
2.2.1.2 Método Sub Pressão (Underbalance).....	43
2.2.1.3 Método Extrema Pressão (Extreme Overbalance).....	44
2.2.2 Tipos de Canhoneio.....	45
2.2.2.1 Tipo Convencional	45
2.2.2.2 Tipo Através da Tubulação (Through Tubing)	46
2.2.2.3 Tipo Perfuração Transmitida pela Tubulação (Tubing Conveyed Perforation -TCP)	47
2.3 Mecânica das Rochas	48

2.3.1	Tensões in Situ	48
2.3.2	Tensões ao Redor de um Poço	48
2.4	Ondas de Choque, Ondas de Detonação e Viscosidade Artificial	50
2.4.1	Ondas de Choque	50
2.4.2	Ondas de Detonação.....	52
2.4.3	Viscosidade Artificial.....	53
2.5	Métodos Computacionais	54
2.5.1	Introdução.....	54
2.5.2	Método de Euler	55
2.5.3	Método de Lagrange.....	55
2.5.4	Método de Diferenças Finitas	56
3	FORMULAÇÃO TEÓRICA.....	58
3.1	Introdução.....	58
3.2	Equações de Conservação	58
3.2.1	Conservação de Massa	58
3.2.2	Conservação de Momentum.....	60
3.2.3	Conservação de Energia	61
3.3	Equações de Estado (Eos – Equation of State)	62
3.3.1	Equações de Estado do Material	62
3.3.2	Equações de Estado de Mie-Grüneisen.....	63
3.3.3	Equação de Estado de Jones-Wilkins-Lee	63
3.3.4	Equações de Estado P-alpha.....	64
3.3.5	Equação de Estado Linear	65
3.3.6	Equações de Estado de Tillotson.....	66
3.3.6.1	Regiões de Interesse	66
3.3.6.2	Formulação Teórica das Regiões	67
3.4	Equações Constitutivas	68
3.4.1	Modelo de Johnson-Cook.....	68
3.4.2	Modelo de Falha de von Mises	69
3.4.3	Modelo Concreto RHT.....	70
3.4.3.1	Superfície de Ruptura.....	70
3.4.3.2	Dano	72

3.5	Modelo de Fratura de Johnson-Cook	72
3.6	Viscosidade Artificial.....	73
4	EXPERIMENTO.....	74
4.1	Descrição do Experimento	74
4.2	Carga Moldada	78
4.3	Alvos	78
4.4	Resultados	83
5	VALIDAÇÃO DO CÓDIGO.....	85
5.1	Simulação Computacional em uma Carga sem Invólucro e Geometria Plana.....	85
5.2	Simulação Computacional em uma Carga com Invólucro e Geometria Axial	92
6	MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	96
6.1	Materiais Usados na Carca Oca	96
6.1.1	Invólucro da Carga	96
6.1.2	Explosivo da Carga	97
6.1.3	Revestimento da Carga.....	98
6.2	Materiais Usados no Alvo	99
6.2.1	Revestimento do Poço A25 PSL1 F	99
6.2.2	Peça de Aço Simulando a Saída do Canhão.....	100
6.2.3	Revestimento do Poço de Aço 4140	101
6.2.4	Coluna de Cimentação	102
6.2.5	Rocha do Reservatório	104
6.3	Configuração Geométrica da Carga e Malha Aplicada.....	105
6.4	Configurações Geométricas dos Alvos e Malha Aplicadas na Primeira Simulação .	108
6.4.1	Efeito da Dimensão do Alvo	108
6.4.2	Efeito da Inércia da Parede do Cimento.....	110
6.5	Configurações Geométricas dos Alvos e Malha Aplicadas na Segunda Simulação .	111
6.5.1	Efeito da Contenção da Parede de Cimento	112
6.6	Configurações Geométricas dos Alvos e Malha Aplicadas na Terceira Simulação .	113
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	116
7.1	Resultados da Carga na Malha Euleriana.....	116

7.1.1	Resultados Obtidos no Explosivo	117
7.1.2	Resultados Obtidos no Revestimento.....	120
7.2	Resultados na Malha Lagrangeana para Penetração da Primeira Simulação.....	123
7.3	Resultados na Malha Lagrangeana para Penetração da Segunda Simulação.....	131
7.3	Resultados na Malha Lagrangeana para Penetração da Terceira Simulação	140
8	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	148
8.1	Conclusões	148
8.2	Sugestões.....	150
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 1.1	Efeito Munroe (MUNROE, 1900)	26
FIG. 1.2	À esquerda uma carga plana, ao centro uma carga oca sem revestimento e à direita uma carga com revestimento e com distância do alvo (BIRKHOFF et al, 1948).....	27
FIG. 1.3	Ilustração de um canhoneio em um poço petrolífero (COSTA et al, 2000)	27
FIG. 1.4	Ilustração de métodos de comunicação: à esquerda poço aberto, no centro o revestimento com aberturas e à direita a rocha já perfurada pelo método de canhoneio (CAULFIELD et al, 2007).	28
FIG. 1.5	Fluxograma com os dados de entrada e os resultados nas malhas Euleriana e Lagrangeana	30
FIG. 2.1	Formação do jato e escória a partir de um cone revestido (BIRKHOFF et al, 1948)	32
FIG. 2.2	Ilustração das velocidades no ponto de estagnação (HASENBERG, 2010)	32
FIG. 2.3	Configuração geométrica do processo de colapso (BIRKHOFF et al, 1948).....	33
FIG. 2.4	Processo de colapso do modelo PER (PUGH et al, 1952).....	34
FIG. 2.5	Vetores de velocidade de um elemento de colapso (PUGH et al, 1952).....	35
FIG. 2.6	Relação do vetor velocidade em relação ao movimento da junção (PUGH et al, 1952).....	35
FIG. 2.7	Ilustração da projeção da placa de metal através da detonação de um alto explosivo (HARRISON, 1981).....	37
FIG. 2.8	ϕ_0 e K em função do ângulo de inclinação entre a onda de choque e o revestimento (HARRISON, 1981).....	38
FIG. 2.9	Distribuição da velocidade para sanduiche de face aberta (MEYERS, 1994).....	39
FIG. 2.10	Classificação do canhoneio (BAIOCO e SECKLER, 2009)	41
FIG. 2.11	Dano por Sobre Pressão (Overbalance) (VIEIRA et al, 2011).....	42
FIG. 2.12	Método Sub Pressão (Underbalance) (VIEIRA et al, 2011).....	43
FIG. 2.13	Método Extrema Pressão (Extreme Overbalance) (VIEIRA et al, 2011).....	44
FIG. 2.14	Tipos de Canhoneio (BAIOCO e SECKLER, 2009).....	45
FIG. 2.15	Canhoneio Convencional (VIEIRA et al, 2011).....	46
FIG. 2.16	Canhoneio Através da Tubulação (Through Tubing) (VIEIRA, 2011).....	46

FIG. 2.17 Canhoneio de Perfuração Transmitida pela Tubulação (Tubing Conveyed Perforation - TCP) (VIEIRA et al, 2011)	47
FIG. 2.18 Tensões in Situ (ROCHA et al, 2009)	48
FIG. 2.19 Representação de um estado de tensões atuantes ao redor do poço em coordenadas cilíndricas (ROCHA et al, 2009).....	49
FIG. 2.20 Variação das Tensões ao redor do poço em função da distância em relação ao poço (ROCHA et al, 2009)	50
FIG. 2.21 Fotografia de Mach do projétil em um fluxo supersônico (BAR, 2007).....	51
FIG. 2.22 (a) estrutura de onda de detonação e (b) o perfil de pressão (MEYERS, 1994).....	52
FIG. 2.23 Solução de equações diferenciais para frente de choque com diferentes valores da constante adimensional da viscosidade artificial (c) (MEYER, 1994)	53
FIG. 3.1 Velocidade nas faces da célula infinitesimal (JUNIOR, 2012).	59
FIG. 3.2 Curva do comportamento do material dúctil poroso durante a compactação para o modelo P-alpha (ANSYS, 2011).....	64
FIG. 3.3 Regiões de interesse para EOS de Tillotson (ANSYS, 2011)	66
FIG. 4.1 À esquerda a estufa e à direita o arenito Berea dentro da estufa	74
FIG. 4.2 Cilindros contendo o arenito Berea saturado com o fluido isoparafina.....	75
FIG. 4.3 Ilustração do vaso de pressão para o experimento de canhoneio	76
FIG. 4.4 Vaso de pressão usado no experimento de canhoneio	76
FIG. 4.5 Equipamento de controle e acionamento de canhoneio.....	77
FIG. 4.6 À esquerda a visão lateral da carga, ao meio a carga em perspectiva e à direita a visão frontal da carga similar ao do experimento	78
FIG. 4.7 Peça de encaixe da carga para distanciamento ótimo até os alvos (“stand-off”).....	79
FIG. 4.8 Peça de Aço simulando a saída do canhão de aço	79
FIG. 4.9 Placa simulando o Revestimento do Poço de aço 4140.....	80
FIG. 4.10 Montagem do conjunto: acima é o encaixe da carga para distanciamento ótimo até os alvos, no meio o a saída do canhão e abaixo o Revestimento do Poço	80
FIG. 4.11 Peça com cimento perfurado ao meio e aço em volta.....	81
FIG. 4.12 Arenito Berea após o experimento exibindo a perfuração.....	82
FIG. 4.13 Arenito Berea seccionado: acima um lado do arenito Berea contendo o pedaço do jato no final do túnel (círculo vermelho) e abaixo com a medição da perfuração	83
FIG. 4.14 Peça de aço simulando a saída do canhão de aço perfurada após experimento.....	84
FIG. 5.1 Carga oca planar de GAZONAS et al (1995)	86

FIG. 5.2 À esquerda a configuração da carga inicial para este trabalho e à direita a configuração da carga inicial para o trabalho de NEVES (2013)	86
FIG. 5.3 Pressões devido a detonação da carga sem invólucro no instante de 1,5 μ s.....	88
FIG. 5.4 Empilhamento de massa na ponta do jato, à esquerda a carga no tempo de 12,0 μ s e à direita a carga do trabalho de NEVES (2013) neste mesmo instante.....	89
FIG. 5.5 Pressão máxima no revestimento da carga oca ao longo do tempo.....	90
FIG. 5.6 Massa específica máxima no revestimento da carga oca ao longo do tempo.....	91
FIG. 5.7 Velocidade máxima na ponta do jato da carga oca ao longo do tempo.....	91
FIG. 5.8 Carga usada para o modelo computacional (à esquerda) e usada para os testes experimentais (à direita) por ELSHENAWY(2014).....	93
FIG. 5.9 Carga simulada (à esquerda) e de ELSHENAWY(2014) (à direita) no tempo de 0 e 6,2 μ s.....	95
FIG. 6.1 Dimensões da carga moldada utilizada nas simulações.....	106
FIG. 6.2 Carga moldada discretizada na malha Euleriana no $t=0$ μ s	107
FIG. 6.3 Carga moldada discretizada na malha Lagrangeana no $t=4,414$ μ s com degeneração na célula $I=66$ $J=8$	107
FIG. 6.4 Alvo com falha na camada de concreto, com altura de 42,0 mm nas condições iniciais, em $t= 3622$ μ s.....	109
FIG. 6.5 Carga moldada na malha Lagrangeana com as camadas de alvo: tubo de aço A25 PSL1 F, cimento Conc-35MPa e o arenito Berea, em $t=0$ μ s na primeira simulação.....	111
FIG. 6.6 Carga moldada remapeada na malha Lagrangeana com as camadas de alvo: tubo A25 PSL1 F, cimento Conc-35MPa e o arenito Berea, em $t=0$ μ s da segunda simulação	112
FIG. 6.7 Camadas de alvo: saída do canhão de aço 4130, Revestimento do Poço de aço 4140, cimento Conc-35MPa e o arenito Berea, em $t=0$ μ s para a terceira simulação.....	114
FIG. 7.1 Diagrama de pressões: à esquerda a carga no tempo 1,018 μ s e à direita a carga no tempo de 6,306 μ s	117
FIG. 7.2 Pressões máximas no explosivo da carga oca até o tempo de 6,306 μ s.....	118
FIG. 7.3 Pressões e Velocidades absolutas máximas da carga oca no tempo de 5,802 μ s. ..	118
FIG. 7.4 Velocidades máximas no explosivo da carga oca até o tempo de 5,802 μ s.....	119
FIG. 7.5 Pressões máximas no revestimento da carga oca no tempo de 0 até 12,24 μ s na malha Euleriana.....	120
FIG. 7.6 Velocidades máximas no revestimento da carga oca no tempo de 0 até 12,24 μ s na malha Euleriana.....	121

FIG. 7.7 Massas específicas máxima no revestimento da carga oca no tempo de 0 até 12,24 μs na malha Euleriana	122
FIG. 7.8 Jato no tempo de 500 μs (acima) e 700 μs (abaixo) na malha Lagrangeana da primeira simulação.....	124
FIG. 7.9 Colisão do jato em cada alvo nos tempos 0,2003 μs , 2,80 μs e 21,40 μs na malha Lagrangeana da primeira simulação.....	125
FIG. 7.10 Localização do jato nos tempo de 2000 μs (acima) e 3000 μs (abaixo) na malha Lagrangeana da primeira simulação.....	126
FIG. 7.11 Pressões dos alvos entre os tempos 0 e 100 μs na malha Lagrangeana na primeira simulação.....	127
FIG. 7.12 Posição do jato entre os tempos 0 e 3000 μs na malha Lagrangeana na primeira simulação.....	128
FIG. 7.13 Velocidades máximas do jato entre os tempos 0 e 3000 μs na malha Lagrangeana na primeira simulação	129
FIG. 7.14 Pressões máximas do jato entre os tempos 0 e 700 μs na malha Lagrangeana na primeira simulação	130
FIG. 7.15 Colisão do jato em cada alvo nos tempos 0,2006 μs , 6,0 μs e 11 μs na malha Lagrangeana da segunda simulação	132
FIG. 7.16 Localização do jato nos tempo de 1000 μs (acima) e 2000 μs (abaixo) na malha Lagrangeana da segunda simulação	133
FIG. 7.17 Pressões dos alvos entre os tempos 0 e 100 μs na malha Lagrangeana da segunda simulação.....	134
FIG. 7.18 Posição do jato entre os tempos 0 e 3000 μs na malha Lagrangeana da segunda simulação.....	135
FIG. 7.19 Velocidades máximas do jato entre os tempos 0 e 3000 μs na malha Lagrangeana da segunda simulação.....	136
FIG. 7.20 Pressões máximas do jato entre os tempos 0 e 300 μs na malha Lagrangeana da segunda simulação.....	137
FIG. 7.21 Posição do jato no tempo de 1000 μs para o stand-off de 17,0 mm (acima) e 15,75 mm (abaixo) na malha Lagrangean da segunda simulação.....	138
FIG. 7.22 Colisão do jato em cada alvo nos tempos 0,5003 μs , 1,7 μs , 6,0 μs e 11,0 μs na malha Lagrangeana da terceira simulação	140

FIG. 7.23	Localização do jato nos tempo de 1000 μ s (acima) e 2000 μ s (abaixo) na malha Lagrangeana da terceira simulação	142
FIG. 7.24	Pressões dos alvos entre os tempos 0 e 90 μ s na malha Lagrangeana da terceira simulação.....	143
FIG. 7.25	Posição do jato entre os tempos 0 e 3000 μ s na malha Lagrangeana da terceira simulação.....	144
FIG. 7.26	Velocidades máximas do jato entre os tempos 0 e 3000 μ s na malha Lagrangeana da terceira simulação.....	145
FIG. 7.27	Pressões máximas do jato entre os tempos 0 e 1000 μ s na malha Lagrangeana da terceira simulação.....	146

LISTA DE TABELAS

TAB. 4.1	Propriedades do Arenito Berea	81
TAB. 4.2	Dados das espessuras das camadas e a da distância ótima (stand-off).....	82
TAB. 4.3	Diâmetros máximos e mínimos da perfuração produzida na placa de aço da saída do canhão, no Revestimento do Poço e no cimento	84
TAB. 4.4	Resultados obtidos no Arenito Berea	84
TAB. 5.1	Parâmetros da EOS Mie-Grüneisen do aço SAE 1006 (NEVES, 2013).....	87
TAB. 5.2	Parâmetros dos modelos constitutivos Elástico Perfeitamente Plástico e de Johnson-Cook, para o aço SAE 1006 (NEVES, 2013).....	87
TAB. 5.3	Parâmetros na relação linear de choque e parâmetros da EOS JWL do explosivo Composto B (NEVES, 2013)	87
TAB. 5.4	Dados dos valores de máxima pressão e distância percorrida pela onda de detonação no tempo de 1,5 μ s em relação ao trabalho de NEVES (2013).....	88
TAB. 5.5	Dados dos valores de máxima pressão e distância percorrida pela onda de detonação no tempo de 1,5 μ s e comparados à Pressão de Chapman-Jouguet e distância calculada com a velocidade de detonação do explosivo	89
TAB. 5.6	Dados dos valores da distância em que se localiza a ponta do jato no instante de 12 μ s.....	90
TAB. 5.7	Dados dos valores de máxima pressão, velocidade e massa específica no tempo de 0 a 15 μ s do trabalho de NEVES (2013) e da simulação	92
TAB. 5.8	Dados da geometria da carga do trabalho de ELSHENAWY(2014).....	93
TAB. 5.9	Dados de entrada para o aço e cobre (ELSHENAWY, 2014)	94
TAB. 5.10	Dados de entrada para o explosivo PE4 (ELSHENAWY, 2014)	94
TAB. 5.11	Valor da velocidade no tempo 12 μ s para simulação e para o trabalho de ELSHENAWY(2014)	95
TAB. 6.1	Dados de entrada do invólucro (aço 4340) (ELSHENAWY, 2012).....	97
TAB. 6.2	Dados de entrada do explosivo RDX (ELSHENAWY, 2012).....	98
TAB. 6.3	Dados de entrada do revestimento de cobre (CU-OFHC) (ELSHENAWY, 2012).....	98
TAB. 6.4	Dados de entrada do Revestimento do Poço A25 PSL1 F	100
TAB. 6.5	Dados de entrada da saída do canhão de aço 4130	101

TAB. 6.6 Dados de entrada da Revestimento do Poço 4140 (ROY, 2009)	102
TAB. 6.7 Dados de entrada para Equação Constitutiva na coluna de cimentação com CONC-35MPa (ELSHENAWY, 2012).....	103
TAB. 6.8 Dados de entrada para EOS na coluna de cimentação com CONC-35MPa (ELSHENAWY, 2012).	104
TAB. 6.9 Dados de entrada da rocha Berea	105
TAB.6.10 Dados de entrada da malha Euleriana	106
TAB. 6.11 Valores de espessura e altura para o alvo para primeira simulação	108
TAB. 6.12 Dados de entrada da malha Lagrangeana para simulação com 84 mm de parede para primeira simulação	109
TAB. 6.13 Dados de entrada da malha Lagrangeana na primeira simulação	110
TAB. 6.14 Valores de espessura e altura para o alvo para segunda simulação	112
TAB. 6.15 Dados de entrada da malha Lagrangeana na segunda simulação.....	113
TAB. 6.16 Valores de espessura e altura para o alvo para terceira simulação.....	114
TAB. 6.17 Dados de entrada da malha Lagrangeana na terceira simulação.	115
TAB. 7.1 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.....	119
TAB. 7.2 Valores máximos de pressão e de velocidade das partículas encontrados no explosivo RDX nos respectivos tempos	120
TAB. 7.3 Valores máximos de pressão, velocidade e massa específica encontrados no revestimento nos respectivos tempos	122
TAB. 7.4 Valores do tempo de passagem do jato em cada alvo na primeira simulação	123
TAB.7.5 Valores de penetração entre os tempos de 2000 μ s e 3000 μ s no arenito Berea na primeira simulação	126
TAB. 7.6 Valores máximos de pressão encontrados nos alvos nos respectivos tempos na primeira simulação	127
TAB. 7.7 Valores das pressões máximas do jato em cada alvo no respectivos tempo na malha Lagrangeana da primeira simulação.....	129
TAB. 7.8 Valores máximos de pressão, velocidade e posição encontrados no jato e seus respectivos tempos da primeira simulação.....	130
TAB. 7.9 Valores do tempo de passagem do jato em cada alvo na segunda simulação.....	131
TAB. 7.10 Valores de penetração entre os tempos de 1000 μ s, 2000 μ s e 3000 μ s no arenito Berea na segunda simulação	134

TAB. 7.11	Valores máximos de pressão encontrados nos alvos nos respectivos tempos na segunda simulação.....	135
TAB. 7.12	Valores das pressões máximas do jato em cada alvo nos respectivos tempos na malha Lagrangeana da segunda simulação	136
TAB. 7.13	Valores máximos de pressão, velocidade e posição encontrados no jato e seus respectivos tempos da segunda simulação	137
TAB. 7.14	Valores de penetração no arenito Berea entre os stand-off de 17mm e 15,75 no tempo de 1000 μ s	138
TAB. 7.15	Diâmetros de entrada no arenito Berea e máximos produzidos no tubo de aço, no cimento e no arenito Berea e diferença percentual entre o experimento e a segunda simulação	139
TAB. 7.16	Valores de penetração no arenito Berea para segunda simulação (distância ótima de 15,75mm) e o experimento, e diferença percentual entre eles	139
TAB. 7.17	Valores do tempo de passagem do jato em cada alvo na terceira simulação	140
TAB. 7.18	Valores de penetração entre os tempos de 1000 μ s, 2000 μ s e 3000 μ s no arenito Berea na terceira simulação.....	142
TAB. 7.19	Valores máximos de pressão encontrados nos alvos nos respectivos tempos na terceira simulação.....	144
TAB. 7.20	Valores das pressões máximas do jato em cada alvo nos respectivos tempos na malha Lagrangeana da terceira simulação	145
TAB. 7.21	Valores máximos de pressão, velocidade e posição encontrados no jato e seus respectivos tempos da terceira simulação	146
TAB. 7.22	Diâmetros máximo e mínimo de entrada na placa de aço 4130 da saída do canhão, tubo de aço 4140, no cimento e no arenito Berea e diferença percentual entre o experimento e a terceira simulação	147
TAB. 7.23	Valores de penetração no arenito Berea para a terceira simulação e para o experimento, e diferença percentual entre eles	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

ALE	Arbitrary Lagrangian-Eulerian (Lagrangeano e Euleriano Arbitrário)
API	American Petroleum Institute
BOP	Blow out Prevent (Prevenção de Erupção)
CETEX	Centro Tecnológico do Exército
EOS	Equation of State (Equação de Estado)
JWL	Jones-Wilkins-Lee
PER	Pugh, Eichelberger e Rostoker
RDX	Research Department X (Ciclotrimetilenotrinitramina)
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics (Método Hidrodinâmico de Partícula Suavizada)
TCP	Tubing Conveyed Perforation (Perfuração Transmitida pela Tubulação)

SÍMBOLOS

a e a_1	Constantes da equação Tillotson
A	Ponto de estagnação
A	Parâmetro de ajuste da Equação de Estado de Jones-Wilkins-LEE (Pa)
A_{falha}	Constante de superfície de ruptura
A_r	Área arbitrária (m ²)
A'	Tensão de escoamento (Pa)
A_1, A_2 e A_3	Parâmetros da Equação de Estado P-alpha
b e b_1	Constantes da equação Tillotson
b'	Módulo volumétrico do material
B	Ponto fixado no espaço
B	Parâmetro de ajuste da Equação de Estado de Jones-Wilkins-LEE (Pa)
B'	Constante de endurecimento
BQ	Coefficiente de transição de superfície frágil para dúctil
B_0 e B_1	Parâmetros da Equação de Estado P-alpha

c	Constante adimensional de viscosidade artificial
C	Massa do explosivo (kg)
C_v	Calor específico a volume constante (J/kg K)
C_0	Velocidade do som (m/s)
C_1 e C_2	Constantes empíricas
C'	Taxa de deformação constante
D	Dano
D_1, D_2, D_3	Constantes de dano do material para Modelo de Fratura de Johnson-Cook
D_4, D_5	Constantes de dano do material para Modelo de Fratura de Johnson-Cook
D_1 e D_2^*	Constantes do material utilizado para descrever o efeito de tensão de fratura em função da pressão para o Modelo Concreto RHT
e	Energia interna específica por unidade de massa (J/kg)
e_0	Energia interna específica inicial por unidade de massa (J/kg)
e_s	Energia de ponto de ebulição (J/kg)
e_v	Energia de vaporização (J/kg)
e_s'	Energia suficientemente grande para garantir que ele irá se expandir como um gás a grandes expansões (J/kg)
E	Energia (J)
E	Energia interna específica por unidade de massa (J/Kg)
E_0	Energia interna específica no instante inicial por unidade de massa (J/kg)
E_H	Energia interna específica Hugoniot (J/kg)
f_c	Resistência à compressão uniaxial não confinada (N)
F_{FAD}	Factor de aumento dinâmico
f_t	Resistência à tração uniaxial não confinada (Pa)
i	Ângulo entre a onda de choque causada pelo explosivo e o revestimento (graus)
J_1 e J_2	Representam o segundo e o terceiro invariantes do tensor desviador de tensões
k	Constante
K	Constante que depende do ângulo de inclinação entre a onda de choque e o revestimento
m	Expoente de amolecimento térmico
M	Massa (kg)

M	Massa do metal (kg)
M'	Massa por unidade de área de revestimento (kg/m ²)
n	Expoente de endurecimento
n'	Expoente de compactação
N_{RUP}	Expoente superfície de ruptura
P	Ponto em que se move a onda de detonação
P	Pressão (Pa)
P_{CJ}	Pressão de Chapman-Jouguet (Pa)
P_e	Pressão máxima que o material deforma elasticamente (Pa)
P_H	Pressão de Hugoniot (Pa)
P_0	Pressão no instante inicial (Pa)
P_S	Pressão total de compactação (Pa)
P'	Ponto final em que a onda de detonação se desloca
P^*	Pressão normalizada por f_c (Pa)
P_{spall}^*	Razão da resistência à tração uniaxial e resistência à compressão uniaxial (f_t/f_c)
P_1	Pressão obtida na região I para EOS de Tillotson (Pa)
P_2	Pressão obtida na região II para EOS de Tillotson (Pa)
P_3	Pressão obtida na região III para EOS de Tillotson (Pa)
P_4	Pressão obtida na região IV para EOS de Tillotson (Pa)
q	Termo de viscosidade artificial (Pa)
$Q_{2,0}$	Razão de tensão de compressão e tração a zero pressão
R_1, R_2	Parâmetro de ajuste da Equação de Estado de Jones-Wilkins-LEE
$R_3(\theta)$	Terceiro termo de dependência invariante
S	Entropia específica (J/kg)
s_1, s_2, s_3, \dots	Constantes empíricas da Equação de Estado do Material (s/m)
t	Tempo (s)
T	Temperatura (K)
T_{amb}	Temperatura ambiente (K)
t_e	Espessura do explosivo (m)
$T_{fusão}$	Temperatura de fusão (K)
t_m	Espessura do revestimento metálico (m)
T_*^m	Temperatura reduzida (K)

t_0	Tempo inicial (s)
t_0^*	Instante de tempo em que a onda de detonação passa pelo elemento de massa do revestimento (s)
T_0	Temperatura inicial (K)
u	Vetor velocidade (m/s)
u_x, u_y, u_z	Componentes do vetor velocidade (m/s)
u'	Energia interna específica (J)
u'_0	Energia interna específica inicial (J)
U_D	Velocidade de detonação (m/s)
U_p	Velocidade da partícula (m/s)
U_S	Velocidade de propagação da onda de choque (m/s)
U_0	Velocidade inicial da partícula (m/s)
U_0	Velocidade inicial da partícula (m/s)
V	Velocidade (m/s)
V	Volume específico (m ³ /kg)
\dot{V}	Variação do volume em relação ao tempo (m ³ /s)
V_e	Velocidade da escória (m/s)
$V_{\text{gás}}$	Velocidade do gás (m/s)
V_j	Velocidade do jato (m/s)
V_{lin}	Coefficiente de viscosidade artificial linear
V_{qd}	Coefficiente de viscosidade artificial quadrático
V_0	Velocidade em que o revestimento é concentrado para formar o jato (m/s)
V_0	Volume específico no instante inicial (m ³ /kg)
V_1	Velocidade em que o ponto de estagnação A se move através do eixo de simetria para o ponto B (m/s)
V_I	Velocidade das coordenadas de movimento na teoria do colapso de PUGH et al (m/s)

V_2	Velocidade em que o ponto o jato e a escória são o mesmo em relação ao observador no ponto A (m/s)
V_2	Velocidade com que o elemento de revestimento se move para o eixo na teoria de colapso de PUGH et al (m/s)
w	Parâmetro de ajuste da Equação de Estado de Jones-Wilkins-LEE
Y_{TXC}	Superfície de fratura
α	Ângulo do cone (graus)
α_p	Porosidade do material no início da deformação plástica
α'	Porosidade do material
α''	Expoente de deformação por tração
β	Ângulo formado entre movimento da parede e o jato (graus)
β_1 e β_2	Constantes da Equação de Estado de Tillotson
γ	Coefficiente de Mie-Grüneisen
δ	Ângulo entre a normal de V_0 com a parede do cone (graus)
δ''	Expoente de deformação por compressão
ϵ	Espessura da camada de revestimento (m)
ϵ_e	Deformação equivalente
ϵ_f	Deformação por fratura dinâmica
ϵ_p	Deformação plástica
ϵ_p^{frat}	Deformação eficaz da fratura
$\dot{\epsilon}$	Taxa de deformação (1/s)
$\dot{\epsilon}^*$	Taxa de deformação adimensional
$\dot{\epsilon}_p$	Taxa de deformação plástica normalizada(1/s)
$\dot{\epsilon}_0$	Taxa de deformação inicial (1/s)
$\dot{\epsilon}_{xx}, \dot{\epsilon}_{yy}, \dot{\epsilon}_{zz}$	Taxa de deformação nos eixos x, y e z
ϵ_1, ϵ_2 e ϵ_3	Deformações principais (Pa)
ϕ_0	Constante que depende do ângulo de inclinação entre a onda de choque e o revestimento
η	Razão entre massas específicas
μ	Razão de compressão

ρ	Massa específica (kg/m ³)
ρ_e	Massa específica do explosivo (kg/m)
ρ_f	Massa específica final (kg/m)
ρ_m	Massa específica do revestimento ou do metal (kg/m)
ρ_0	Massa específica no instante inicial (kg/m ³)
σ_a	Tensões axiais (Pa)
σ_{dev}	Tensão desviadora (Pa)
σ_e	Tensão equivalente (Pa)
σ_h	Tensão in situ na direção x (Pa)
σ_H	Tensão in situ na direção y (Pa)
σ_m	Tensão média das tensões principais (Pa)
σ_r	Tensões radiais (Pa)
σ_v	Tensão vertical in situ (Pa)
σ_{ov}	Tensão de sobrecarga (Pa)
σ_y	Limite de escoamento dinâmico do material (Pa)
σ_θ	Tensões tangenciais (Pa)
σ_1, σ_2 e σ_3	Tensões principais (Pa)
τ	Constante de tempo
ν	Coefficiente de Poison

RESUMO

O trabalho tem como objetivos estudar o processo de colapso de carga oca, por meio de simulação computacional e verificar a penetração nos alvos: placa de aço na saída do canhão, revestimento do poço composto por um aço também, coluna de cimentação e formação rochosa.

Os métodos empregados nas simulações são os de Euler e Lagrange e as equações se desenvolvem em diferenças finitas. Para validação do trabalho foram realizadas simulações em que os resultados são comparados com outras literaturas. Uma delas faz o uso do Método Hidrodinâmico de Partícula Suavizada (SPH – Smoothed Particle Hydrodynamics) do trabalho de NEVEZ (2013) e outra usa a teoria de PER (Pugh, Eichelberger e Rostoker) para cálculo das velocidades tanto da escória quanto da cabeça do jato do trabalho de ELSHENAWY (2012). Os resultados das simulações para validação se aproximaram dos resultados das literaturas, o que demonstra que o método é suficiente para estudo e aplicação. Outras simulações foram realizadas com base no experimento realizado no Laboratório de Canhoneio situado no Centro Tecnológico do Exército (CETEX).

Os resultados na 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, como previsto na literatura. As curvas dos gráficos, assim como os valores das tabelas para a simulação na malha Euleriana estão dentro do esperado, com diferença percentual menor que 2%.

Os resultados obtidos na malha Lagrangeana para primeira simulação permitiu o estudo do impacto do jato com cada alvo e o tempo de penetração em cada um. Pode-se observar as oscilações no perfil de pressões nos alvos devido as reflexões e interações das ondas de pressão produzidas. Um dos aspectos físicos que pode ser apresentado é o acúmulo e o afinamento do jato no final do túnel.

A simulação teve seus resultados mais próximos do experimento foi a terceira, pois os materiais usados eram similares, com exceção do arenito Berea. A mudança dos aços que compõe a saída do canhão e revestimento do poço proporcionou a diminuição percentual da penetração de 64% para 29,53% de diferença entre a segunda e a terceira simulações em relação ao experimento, o que significa que o modelo se aproximou mais do experimento. Esta diferença significativa de 29,53% é pertinente porque o modelo da rocha ainda contém as mesmas simplificações da segunda simulação.

ABSTRACT

The paper objective is to study the charge shaped collapse process by computer simulation and checking the penetration of targets: steel plate in the outlet tube, well casing comprises a steel well, cementing column and rock formation.

The methods used in the simulations are the Euler and Lagrange equations and develop in finite differences. The validation simulations were performed and compared with other results in others literatures. One of them is the hydrodynamic method Smoothed Particle (SPH - Smoothed Particle Hydrodynamics) used by NEVEZ (2013) and the other is the theory of PER (Pugh, Eichelberger and Rostoker) wich calculate the speeds of both the slag as the head of the jet used by ELSHENAWY (2012). The validation simulation results approach the literature, which indicates that the method is sufficient for the study and application. Other simulations were developed based on the experiment in cannonade Laboratory located at the Army Technology Center (CETEX).

The results in simulation with the Eulerian mesh allowed to verify how does the passage of the shock wave and what happens to the coating that receives the impact of the wave, as provided in the literature. The curves of the graphics, as well as the values of the tables to simulate the Eulerian mesh are as expected, with a lower percentage than 2% difference.

The results of the first simulation Lagrangian mesh to allow the study of the impact of the jet with each target and the penetration time in each. It can be observed oscillations in the pressure profile in the reflections due to targets and interactions of the produced pressure waves. One of the physical aspects that can be displayed is the accumulation and the thinning of the jet at the end of the tunnel.

The third simulation approach the experiment results, because the materials used were similar, except for the Berea sandstone. The change of the steel that forms the output shaft of the cannon and coating provided the percentage reduction of 64% to 29.53% penetration gap between the second and third simulations with respect to the experiment, which means that the model is approached most of the experiment. This significant difference of 29.53% is relevant because the model of the rock still contains the same simplifications of the second simulation

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A primeira referência sobre o princípio de carga oca foi em 1792 com Franz Xaver von Baader, um engenheiro de minas alemão. O princípio tornou-se conhecido como efeito Munroe em 1888, na Inglaterra e nos Estados Unidos. Munroe verificou, com um disco de nitrocelulose e outro de ferro, que a profundidade de penetração de uma carga explosiva era maior quando a face possuía concavidade, e esta era apoiada sobre o alvo. A FIG. 1.1 mostra o efeito Munroe, que produziu a gravação em uma placa utilizando explosivo.

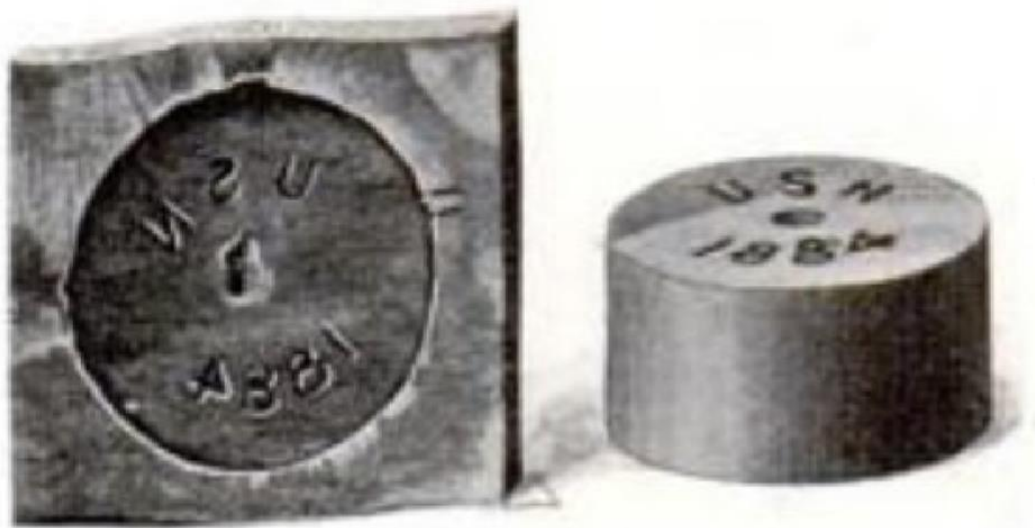


FIG. 1.1 Efeito Munroe (MUNROE, 1900).

Em 1910 o princípio ficou conhecido como Neumann, na Alemanha. Com a Segunda Guerra Mundial (1939 a 1945) a carga oca foi desenvolvida para a destruição de carros de combate. O estudo matemático do colapso e penetração com carga oca se iniciou com BIRKHOFF et al. Em 1948, ele publicou um trabalho que verifica o aumento de penetração com a presença de uma camada de revestimento e o distanciamento ótimo do alvo chamado de *stand-off*. A FIG. 1.2 mostra que à medida que se faz uma concavidade no explosivo (carga ao

meio) e se aumenta a distância do alvo (carga à direita) o efeito de perfuração aumenta em comparação a uma carga não moldada e junta ao alvo (à esquerda).

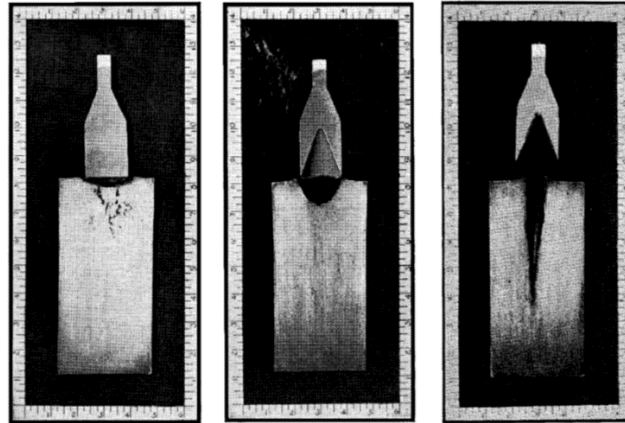


FIG. 1.2 À esquerda uma carga plana, ao centro uma carga oca sem revestimento e à direita uma carga com revestimento e com distância do alvo (BIRKHOFF et al, 1948).

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 foram as primeiras a desenvolverem 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. A FIG. 1.3 ilustra um processo de canhoneio onde o canhão (em cinza) que contém as cargas ocas (em vermelho) é descido por um cabo elétrico até a região que contém o petróleo (em preto) e depois é acionado, permitindo assim a comunicação entre o poço e o reservatório e possibilitando o fluxo de petróleo.

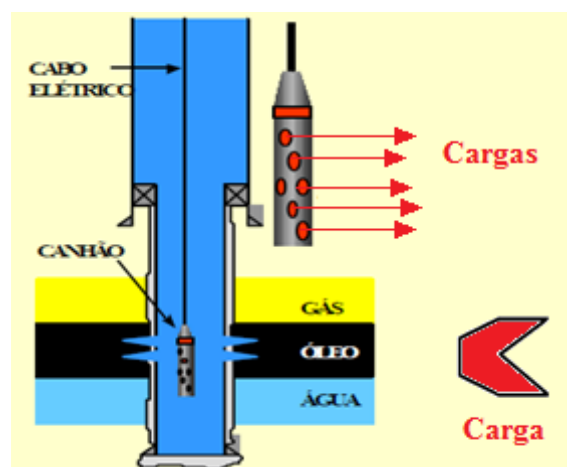


FIG. 1.3 Ilustração de um canhoneio em um poço petrolífero (COSTA et al, 2000).

1.2 MOTIVAÇÃO

A completação é um dos processos mais importantes para a produção de petróleo. Este processo consiste em revestir o poço e depois comunicar a formação com o poço revestido. 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 energia e que podem penetrar a formação. A FIG 1.4 contém exemplos de vários métodos de comunicação: à esquerda é o exemplo de um poço aberto e sem revestimento na região produtora, ao meio um poço revestido com tela e à direita um poço totalmente revestido e canhoneado por cargas ocas.

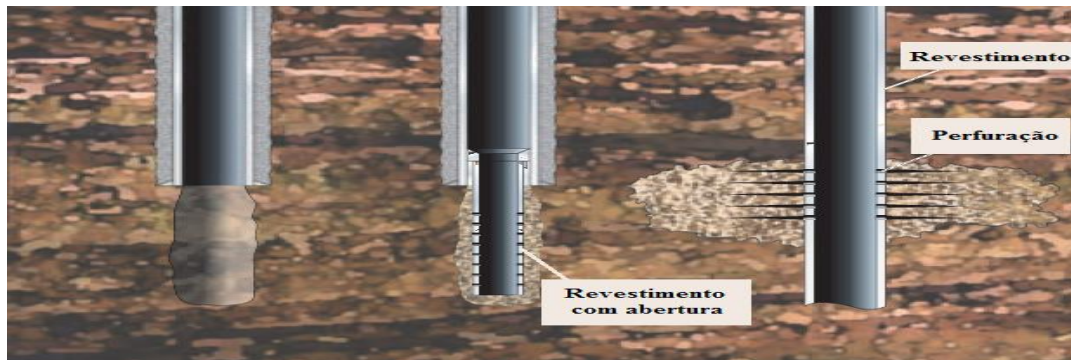


FIG. 1.4 Ilustração métodos de comunicação: à esquerda poço aberto, no centro o revestimento com aberturas e à direita a rocha já perfurada pelo método de canhoneio (CAULFIELD et al, 2007).

O estudo sobre o colapso de carga oca é de grande importância para o desenvolvimento da técnica de canhoneio. Este estudo tem 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, como é o caso da perfuração de blindagens.

Na indústria do petróleo a carga é utilizada na produção de túneis canhoneados em rochas que contêm petróleo. Um exemplo de rochas são as encontradas no pré-sal. A região do pré-sal existem várias dificuldades em estabelecer a comunicação. Uma delas é que as rochas desta região são extremamente heterogêneas, o que dificulta o entendimento do comportamento do fluxo de petróleo da formação para poço. Outra é que essas rochas estão em torno de 7 mil metros de profundidade, sob a pressão da camada de água do mar, de pós sal e de sal também. Estas camadas fazem com que as rochas se encontrem muito duras e compactadas.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho proposto são estudar o processo de colapso de carga oca, por meio de simulação computacional e verificar a penetração nos alvos, isto é: placa de aço na saída do canhão, revestimento do poço, coluna de cimentação e formação rochosa. A simulação é realizada no software AUTODYN da ANSYS Inc.

Durante a modelagem foram verificados a configuração geométrica da carga, o explosivo e as propriedades dos alvos. Outras verificações que foram feitas: a distância entre a carga e o alvo (“stand-off”) e a espessura dos alvos. Os resultados obtidos por meio da simulação foram as pressões máximas no explosivo, no jato e no alvo, as velocidades máximas do explosivo e do jato ao longo do tempo, massa específica do revestimento durante a detonação do explosivo e posição do jato na rocha. Os dados de penetração do jato em cada alvo são coletados e estudados neste trabalho.

O efeito de malha e a configuração geométrica inicial dos alvos foram avaliadas para modelagem dos mesmos. Para o primeiro teste, na carga foi aplicada a malha Euleriana com muitos materiais (Euler multi-material). Para os alvos a malha Euleriana foi empregada e observou-se que a malha não era adequada devido ao seu gasto computacional. Nos seguintes teste, a penetração no alvo foi simulada com a malha Lagrangeana, pois esta tem uma melhor eficiência computacional comparada a malha Euleriana. Foram realizadas simplificações geométricas, como o desenho da metade da carga, e na malha como o refinamento diferenciado em cada malha para melhor tempo computacional.

Na indústria do petróleo, e com o pré-sal, os tipos de formações exigem cada vez mais equipamentos eficientes durante a penetração. No processo de canhoneio a penetração começa primeiro na camada de aço que compõe o canhão, depois no revestimento da formação e cimento, e em seguida na própria formação. Para este trabalho a formação será simplificada como homogênea e isotrópica, e o poço canhoneado está na vertical.

A configuração do alvo possui vários tipos de materiais, a configuração da carga precisa ser bem projetada e o revestimento metálico deve ser adequado para se obter uma perfuração desejada. Os resultados obtidos nas simulações foram comparados aos da literatura para efeito de validação do código. Depois outros testes foram realizados e comparados a resultados experimentais realizados no laboratório de canhoneio no Centro Tecnológico do Exército (CETEX).

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho é organizado em oito partes. A primeira contém as considerações iniciais, motivação, objetivos e a organização deste trabalho. Na segunda parte são realizadas as revisões bibliográficas para elaboração da dissertação. A terceira parte contém toda formulação teórica que fornece a base de cálculo para a simulação. A quarta parte relata o experimento realizado no CETEX. A quinta parte é composta por um capítulo contendo a validação do código usado neste trabalho. A sexta parte é composta pela modelagem computacional da carga e do alvo. Na modelagem computacional ocorre a verificação dos dados de entrada para cada etapa da simulação. Na FIG. 1.5, o fluxograma ilustra o procedimento com os dados de entrada, a resolução com as malhas Euleriana e Lagrangeana, o remapeamento da carga e resultados. Na sétima parte são mostrados e verificados os resultados das simulações. A oitava e última parte é composta pelas conclusões e sugestões.

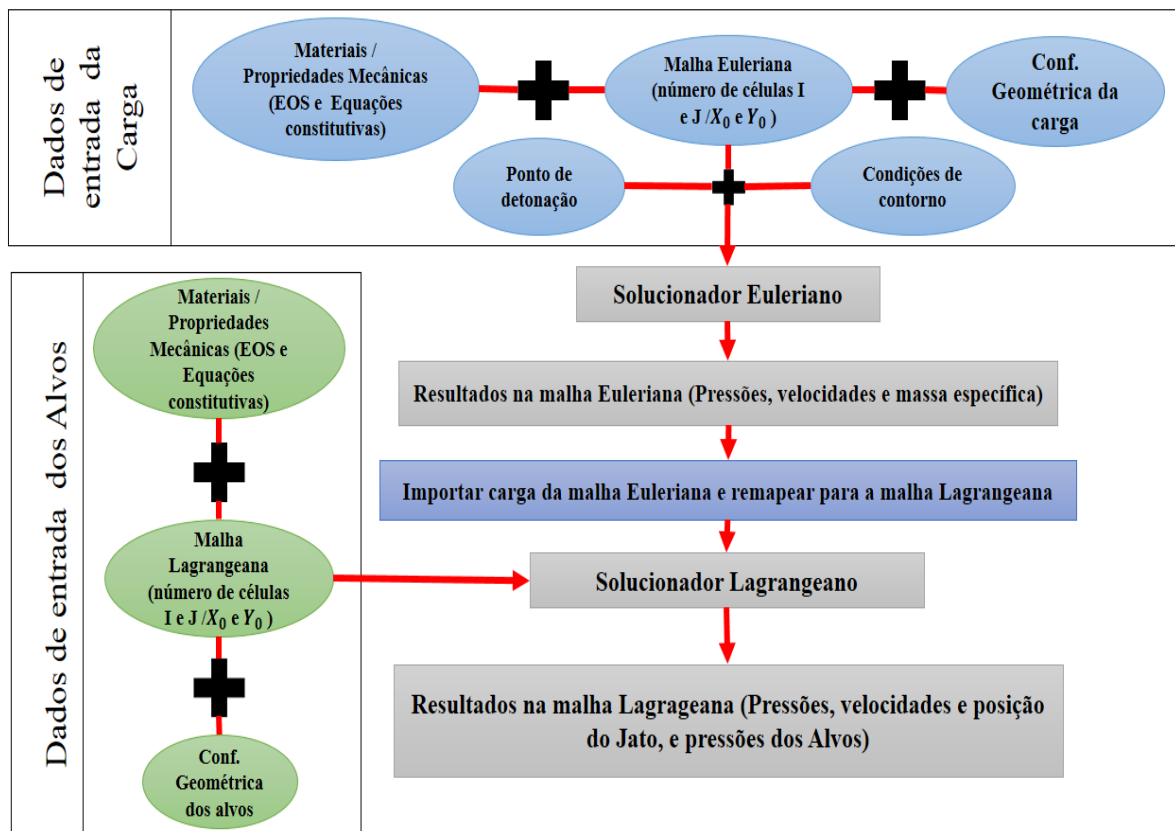


FIG. 1.5 Fluxograma com os dados de entrada e os resultados nas malhas Euleriana e Lagrangeana.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo contém a revisão bibliográfica realizada para a simulação da carga oca, entendimento do processo de canhoneio e os métodos computacionais. São estudados a teoria do colapso do cone metálico, a operação de canhoneio, a mecânica das rochas, ondas de choque, ondas de detonação, viscosidade artificial e os métodos computacionais de Euler, de Lagrange e de diferenças finitas usados para as simulações.

2.1 TEORIAS DO COLAPSO DO CONE METÁLICO

A teoria do colapso foi apresentada inicialmente por Birkhoff et al e depois por Pugh et al. O desenvolvimento consiste de equações analíticas para o entendimento das velocidades de colapso e de como funciona a formação do jato e seu alongamento. Outros trabalhos também foram realizados por Defourneaux e Gurney para estudar a velocidade de colapso, e por Randers-Pehrson e Chou et al para verificar a influência do tempo de aceleração.

2.1.1 TEORIA DO COLAPSO POR BIRKHOFF ET AL

O primeiro estudo realizado para o entendimento da formação de jato em carga oca revestida foi realizado em 1948. Este estudo tem como hipótese que todo o revestimento será concentrado para formar o jato com mesma velocidade V_0 . O ângulo formado entre o movimento da parede e o jato é denominado de β enquanto há a formação do jato e da escória no cone revestido, conforme é ilustrado na FIG. 2.1.

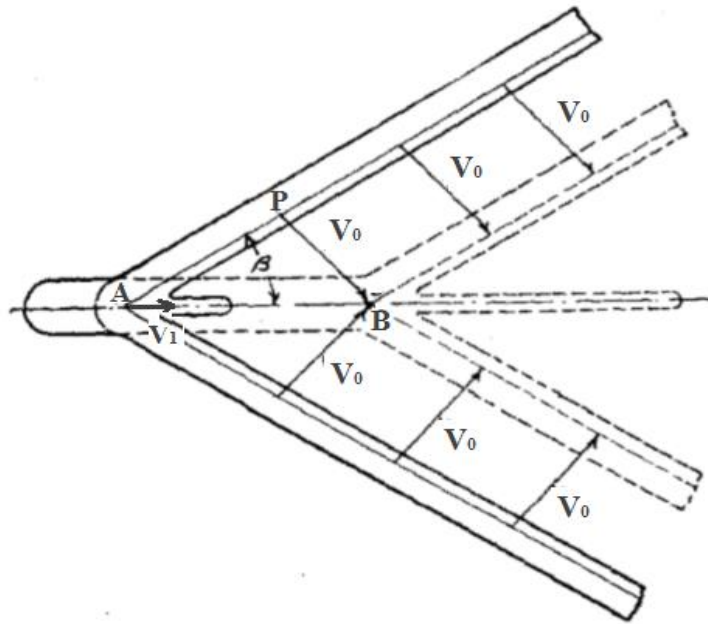


FIG. 2.1 Formação do jato e escória a partir de um cone revestido (BIRKHOFF et al, 1948).

O ponto A representa o ponto de estagnação, que se move através do eixo de simetria para o ponto B com velocidade V_1 . Tendo o ponto A como referência, o ponto P se aproxima do ponto com A com a velocidade de V_2 , como é apresentado na FIG. 2.2 a seguir:

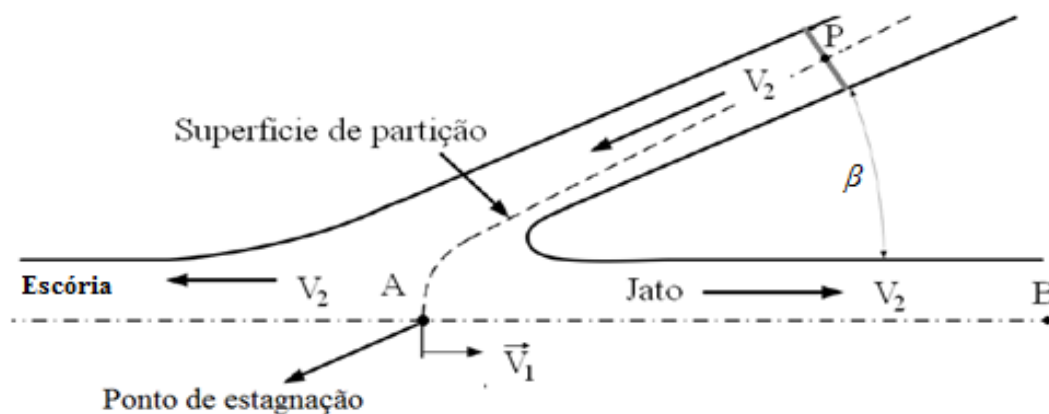


FIG. 2.2 Ilustração das velocidades no ponto de estagnação (HASENBERG, 2010).

Para este trabalho o revestimento é considerado praticamente incompressível, e sua massa específica é considerada constante. Considera também que os movimentos de colapso das paredes de revestimento sejam constantes. Através da equação de Bernoulli e levando em conta a hipótese de que todo processo ocorre em regime permanente, pode-se obter uma relação de pressão com velocidade como está na EQ 2.1

$$P + \frac{1}{2}\rho_0 V^2 = k, \text{ onde } k \text{ é uma constante.} \quad (2.1)$$

Do ponto de vista do observador no ponto de estagnação A, as velocidades do jato (V_j) e da escória (V_e) são as mesmas em módulo, ou seja V_2 . Apenas suas direções são diferentes. Nas EQ 2.2 e EQ 2.3 estão apresentadas as velocidades do jato e da escória.

$$V_j = V_1 + V_2 \quad (2.2)$$

$$V_e = V_1 - V_2. \quad (2.3)$$

A configuração geométrica apresentada na FIG. 2.3 contém a configuração do processo de colapso. Da configuração pode-se obter V_1 e V_2 , EQ 2.4 e EQ 2.5. A onda de detonação se move do ponto P ao ponto P' com velocidade de U_d , e α é o semiângulo do cone (BIRKHOFF et al, 1948).

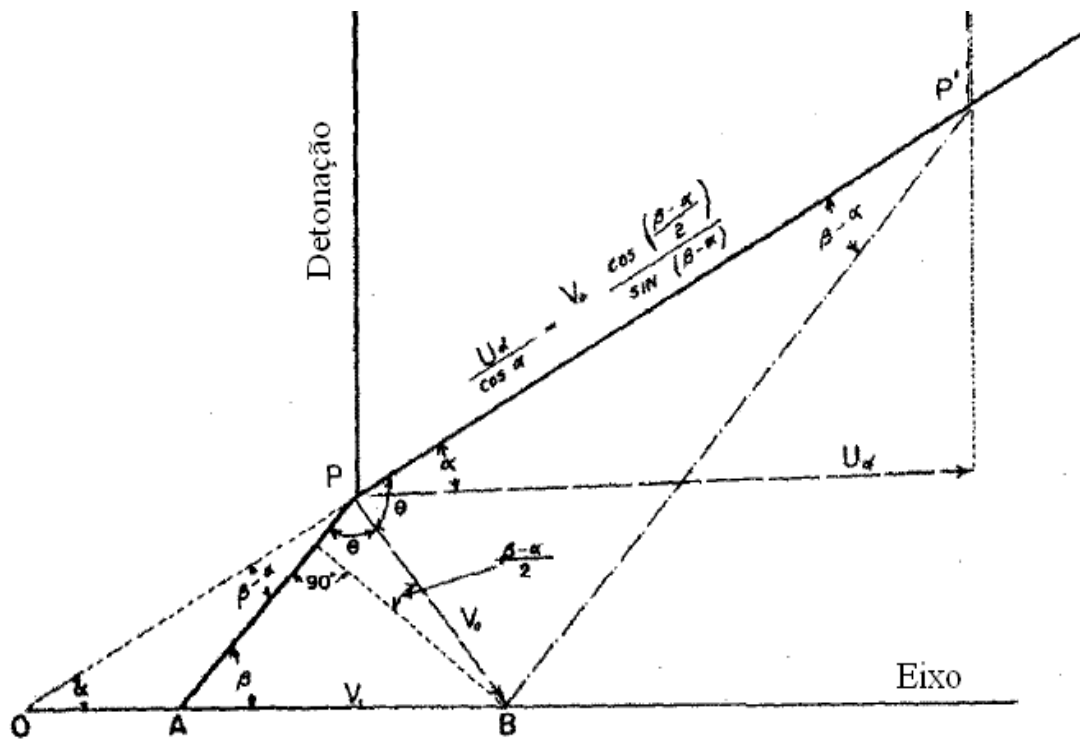


FIG. 2.3 Configuração geométrica do processo de colapso (BIRKHOFF et al, 1948).

$$V_1 = \frac{V_0 \cos\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)}{\text{sen } \beta} \quad (2.4)$$

$$V_2 = V_0 \text{sen}\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right) + \frac{V_0 \cos\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)}{\tan \beta} \quad (2.5)$$

Substituindo nas EQ 2.2 e EQ 2.3 as EQ 2.4 e EQ 2.5, tem-se a velocidade do jato e da escória:

$$V_j = V_0 \left[\frac{\cos\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)}{\sin\beta} + \operatorname{sen}\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right) + \frac{\cos\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)}{\tan\beta} \right] \quad (2.6)$$

$$V_e = V_0 \left[\frac{\cos\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)}{\sin\beta} - \operatorname{sen}\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right) - \frac{\cos\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)}{\tan\beta} \right] \quad (2.7)$$

Para o caso de uma onda de detonação plana que atravessa o eixo paralelamente, pode-se obter o ângulo β através da equação (BIRKHOFF et al, 1948):

$$\frac{U_D}{\cos\alpha} = \frac{V_0}{\sin(\beta-\alpha)} \cos\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right) \quad (2.8)$$

2.1.2 TEORIA DO COLAPSO POR PUGH ET AL

Conhecido como Modelo de PER devido aos autores Pugh, Eichelberge e Rostoker, este modelo admite que a velocidade de colapso decresce constante a partir do vértice. Diferente da teoria de Birkhoff et al, o gradiente de velocidade de colapso depende do ângulo colapso β , e este ângulo tem um valor diferente a cada elemento. Esta variação da velocidade de colapso produz o alongamento do jato e aumento da massa total formada nele, antes não verificada por Birkhoff. O processo de colapso do modelo PER não ocorre mais em regime permanente. A FIG. 2.4 apresenta o processo de colapso deste modelo.

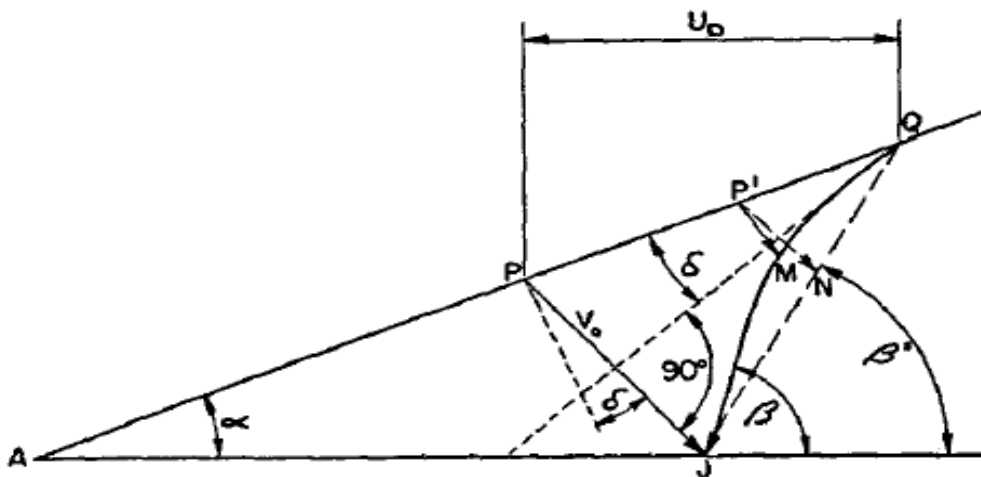


FIG. 2.4 Processo de colapso do modelo PER (PUGH et al, 1952).

Para o modelo de PER, os elementos do revestimento não se movem perpendicularmente à superfície original. Neste modelo os elementos das paredes formam um pequeno ângulo δ com a normal da velocidade V_0 , como está apresentado na FIG. 2.5.

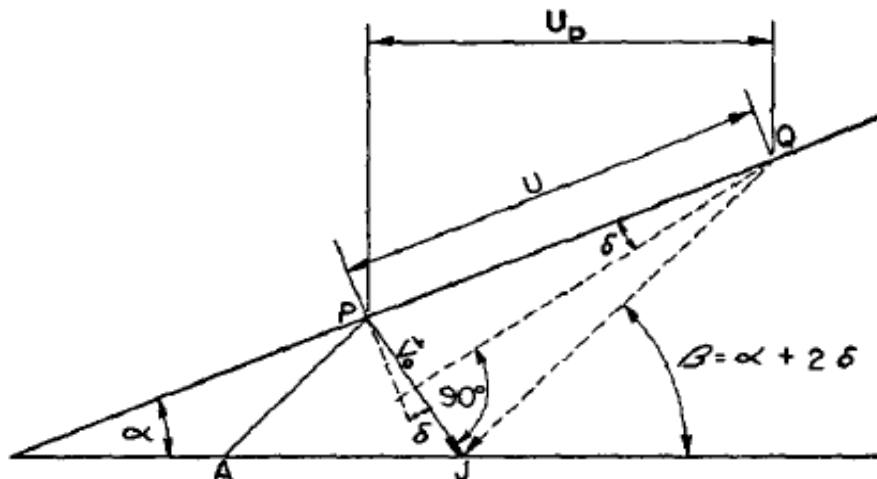


FIG. 2.5 Vetores de velocidade de um elemento de colapso (PUGH et al, 1952).

Com os vetores de velocidade de um elemento de colapso e a partir de considerações trigonométricas, pode-se obter o valor de δ (PUGH et al, 1952):

$$\text{sen } \delta = \frac{V_0}{2 U_D} \quad (2.9)$$

As variáveis V_0 e δ dependem da forma da carga e da posição original de cada elemento do cone. As velocidades do ponto de estagnação e do material em colapso em relação ao ponto de estagnação dependem dos ângulos δ , β e α . A FIG. 2.6 apresenta a relação geométrica desses ângulos no movimento da junção.

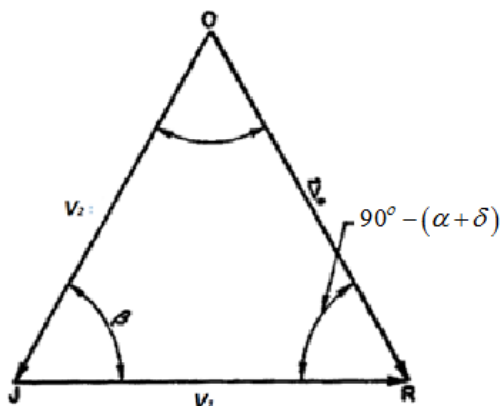


FIG. 2.6 Relação do vetor velocidade em relação ao movimento da junção (PUGH et al, 1952).

O eixo do cone está ao longo da reta JR , onde a velocidade das coordenadas de movimentos é V_1 . A reta OJ é onde o elemento do revestimento se move para o eixo com velocidade V_2 . Em coordenadas estacionária, este elemento se moveria com velocidade V_0 , como está na reta OR .

Aplicando a lei dos senos à FIG. 2.6, as velocidades de estagnação V_1 e de escoamento V_2 são:

$$V_1 = \frac{V_0 \cos(\beta - \alpha - \delta)}{\sin \beta} \quad (2.10)$$

$$V_2 = \frac{V_0 \cos(\alpha + \delta)}{\sin \beta} \quad (2.11)$$

Em coordenadas fixas as velocidades do jato e da escória são respectivamente:

$$V_j = V_0 \cos \sec \frac{\beta}{2} \cos \left(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2} \right) \quad (2.12)$$

$$V_e = V_0 \sec \frac{\beta}{2} \cos \left(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2} \right) \quad (2.13)$$

Tomando como coordenadas cilíndricas r e Z no ponto M da FIG. 2.4, e as coordenadas ($X \tan(\alpha)$ e X) da posição original P' de M no revestimento, tem-se que:

$$Z = X + V_0 (t - t_0) \sin(\beta + \alpha) \quad (2.14)$$

$$r = X \tan(\alpha) - V_0 (t - t_0) \cos(\alpha + \delta) \quad (2.15)$$

Onde t é o tempo de colapso desde quando a onda de choque passa pelo vértice do cone e t_0 é o tempo que leva a onda de choque do ponto A ao ponto P' da FIG. 2.4. Quando o elemento atinge o eixo de simetria do cone, o raio r assume o valor de zero e tem-se:

$$t - t_0 = \frac{X \tan(\alpha)}{V_0 \cos(\alpha + \delta)} \quad (2.16)$$

Calculando-se $\frac{\partial r}{\partial z}$ quando r é zero, esta derivada assume o valor igual a $\tan \beta$:

$$\tan \beta = \frac{\sin \alpha + 2 \sin \delta \cos(\alpha + \delta) - \left(x \sin \alpha (1 - \tan(\alpha + \delta) \tan \delta) \frac{\partial V_0}{\partial X} \right)}{\sin \alpha - 2 \sin \delta \cos(\alpha + \delta) + \left(x \sin \alpha (\tan(\alpha + \delta) \tan \delta) \frac{\partial V_0}{\partial X} \right)} \quad (2.17)$$

2.1.3 VELOCIDADE DE COLAPSO POR DEFOURNEAUX

Nos tópicos anteriores, para se realizar o cálculo da velocidade do jato e da escória é necessário conhecer as velocidades de estagnação V_1 e de escoamento V_2 . Estas por sua vez são dependentes da velocidade de colapso V_0 . A teoria de Defourneaux de 1970 sugere que a velocidade de colapso seja:

$$V_0 = \frac{2U_D}{\cos \alpha} \operatorname{sen} \left(\frac{\phi_0 t_e}{2e' + 2\phi_0 \rho \epsilon K} \right) \quad (2.18)$$

Onde ϕ_0 e K são constantes dependentes do ângulo de inclinação i . A FIG. 2.7 ilustra a projeção da placa de metal através da detonação de um alto explosivo, onde i é o ângulo entre a onda de choque causada pelo explosivo e o revestimento, ρ é a massa específica do matéria contido no revestimento, ϵ é a espessura da parede do revestimento, t_e é a espessura da camada de explosivo e U_D é a velocidade de detonação.

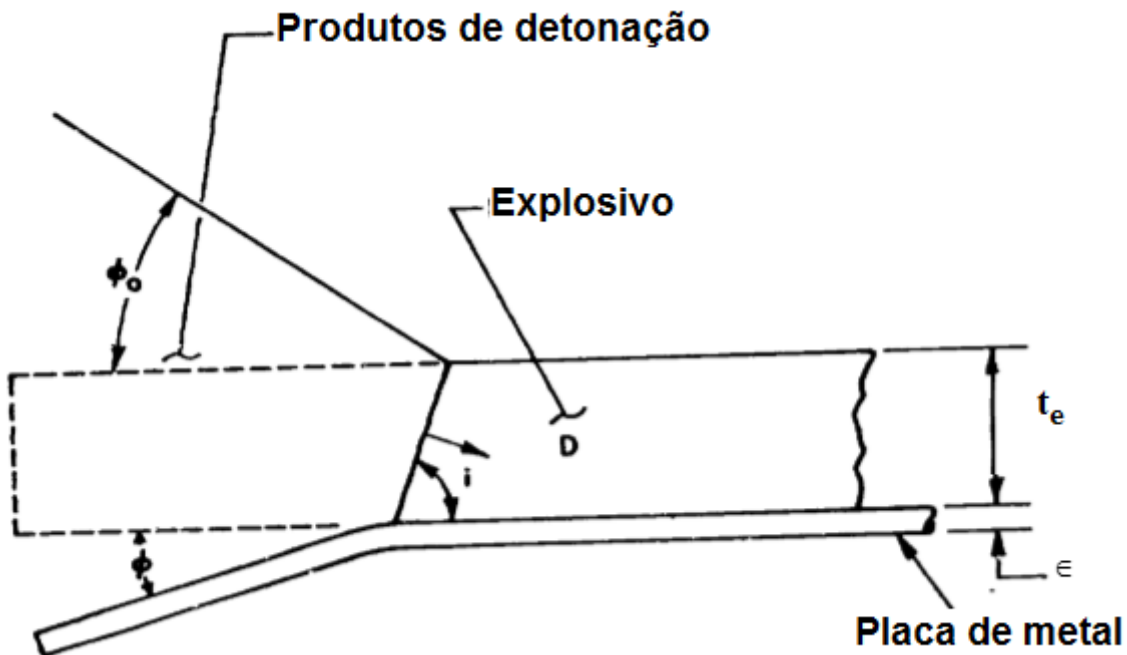


FIG. 2.7 Ilustração da projeção da placa de metal através da detonação de um alto explosivo (HARRISON, 1981).

A FIG. 2.8 ilustra a relação funcional entre ϕ_0 , K e i . A variável K apresenta valores ao longo do ângulo de inclinação i considerado para um modelo de desenho de carga oca, ou seja neste caso um revestimento cônico em um cilindro contendo explosivo.

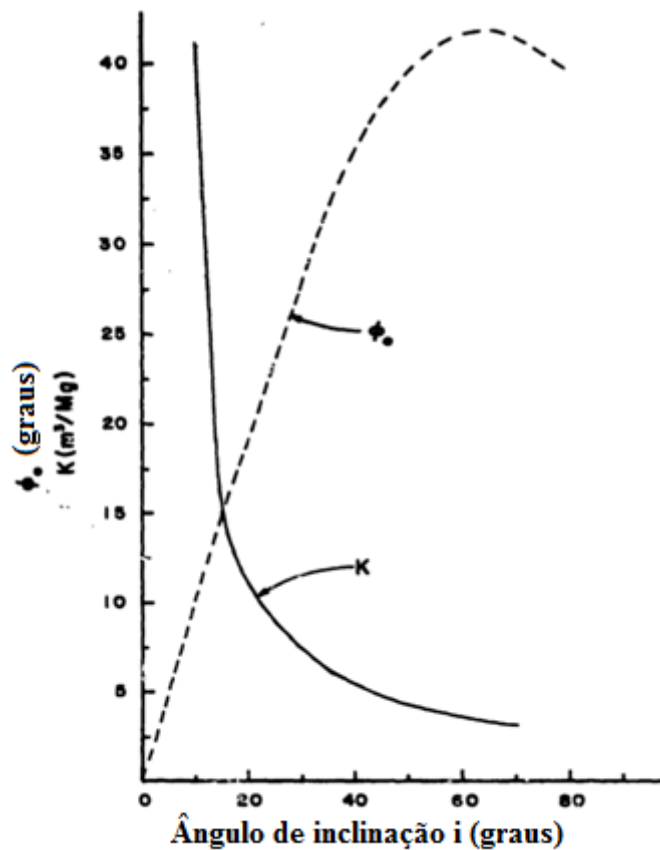


FIG. 2.8 ϕ_0 e K em função do ângulo de inclinação entre a onda de choque e o revestimento (HARRISON, 1981).

2.1.4 VELOCIDADE DE COLAPSO POR GURNEY

Em 1943, Gurney propôs uma abordagem simples que tem sido muito bem sucedida em prever a velocidade terminal de dispositivos explosivamente acelerados. Gurney concluiu que o fator dominante era a razão entre a massa do metal (M) e a massa do explosivo (C). Esta conclusão surgiu com a simples hipótese de que a energia química do explosivo foi transformada em energia cinética dos produtos explosivos e fragmentos de metal, e obteve expressões relativas a velocidade de fragmentos para a razão C/M . A FIG. 2.9 mostra a distribuição de velocidade para a forma da carga no modelo sanduíche de face aberta (placa mais explosivo apenas).

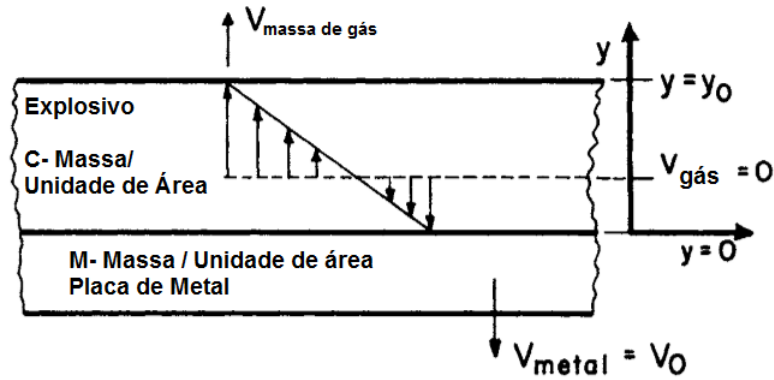


FIG. 2.9 Distribuição da velocidade para sanduiche de face aberta (MEYERS, 1994).

A distribuição de velocidades podem ser expressos como (variação linear):

$$V_{\text{gás}}(y) = (V_0 + V) \frac{y}{y_0} - V_0 \quad (2.19)$$

Com a conservação de energia para este tipo de carga tem-se:

$$E = \frac{1}{2} M V_0^2 + \frac{1}{2} \rho_e \int_0^{y_0} \left[(V_0 + V) \frac{y}{y_0} - V_0 \right]^2 dy \quad (2.20)$$

E com a conservação de momentum tem-se:

$$0 = -M V_0 + \frac{1}{2} \rho_e \int_0^{y_0} \left[(V_0 + V) \frac{y}{y_0} - V_0 \right] dy \quad (2.21)$$

A massa de explosivo é $C = \rho_e y_0$ e M massa de metal. Integrando fica:

$$V_0 = \sqrt{2E} \left[\frac{\left(1 + \frac{2M}{C}\right)^3 + 1}{6\left(1 + \frac{M}{C}\right)} + \frac{M}{C} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.22)$$

Uma expressão similar a essa, obtida pelo maior múltiplo comum das suas frações é:

$$V_0 = \sqrt{2E} \left[\frac{3}{1 + 5\left(\frac{M}{C}\right) + 4\left(\frac{M}{C}\right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.23)$$

A relação entre as massas pode ser calcula também da seguinte forma:

$$\frac{M}{C} = \frac{\rho_m}{\rho_e} \cdot \frac{t_m}{t_e} \quad (2.24)$$

Onde ρ_m e ρ_e são as massas específica linear do revestimento e do explosivo respectivamente, t_m e t_e são as espessuras do revestimento e explosivo.

2.1.5 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ACELERAÇÃO

Na realidade o revestimento não é instantaneamente acelerado até a velocidade final V_0 , nem é a sua direção final do movimento imediatamente alcançada. O resultado é um caminho curvo, gerado por uma aceleração do movimento. A equação de aceleração mais comumente utilizado, proposto por Randers-Pehrson em 1976, é exponencial (WALTERS & ZUKAS, 1989):

$$V(t) = V_0 \left[1 - \exp\left(\frac{t_0^* - t}{\tau}\right) \right] \quad (2.25)$$

Onde t_0^* é o instante de tempo em que a onda de detonação passa pelo elemento de massa do revestimento. Baseado em considerações de impulso inicial, CHOU et al (1983) sugerem a seguinte equação para a constante de tempo τ :

$$\tau = C_1 \frac{M' V_0}{P_{CJ}} + C_2 \quad (2.26)$$

C_1 e C_2 são constantes empíricas que dependem das configurações geométricas e só podem ser verificadas com dados experimentais ou simulação numérica, P_{CJ} é a pressão no ponto de Chapman-Jouget e M' é a massa por unidade de área do revestimento.

2.2 OPERAÇÃO DE CANHONEIO

O canhoneio é umas das etapas fundamentais da completação de poços petrolíferos, e tem como objetivo o estabelecimento de uma comunicação limpa e efetiva entre poço e formação, como mostra a FIG. 1.3. O poço como pode ser vertical, inclinado ou horizontal, em geral cimentado e revestido por um revestimento de aço, de modo a proporcionar estabilidade, e evitar desmoronamento. Por formação entende-se que é a região rochosa e porosa, preenchida de petróleo a alta pressão.

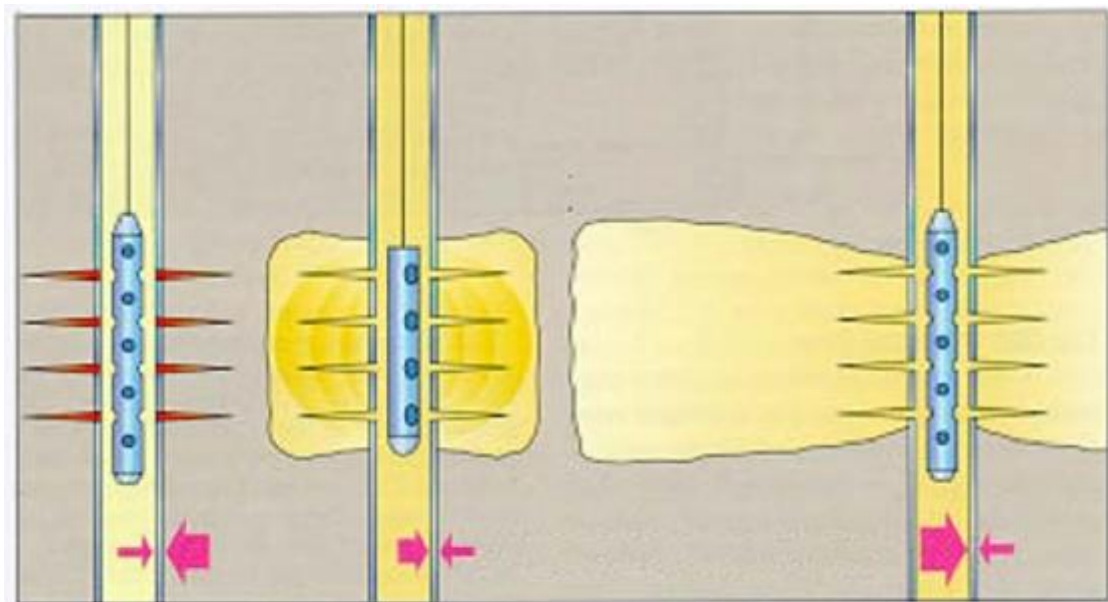
O canhão é composto por um tubo cilíndrico de aço, com furos, nos quais se alojam as cargas moldadas. Estas cargas contêm explosivo e um revestimento que permite abrir a comunicação. No processo de canhoneio, os canhões descem no poço, e quando este está posicionado em frente ao local desejado, os canhões são acionados de forma hidráulica, ou

mecânica, ou por um cabo elétrico, que por sua vez conduz um pulso detonador das cargas. Assim são abertos os furos nas zonas portadoras de óleo ou gás, permitindo o escoamento desses fluidos para o interior do poço.

As vantagens de se fazer este procedimento são a capacidade de viabilizar a produção de fluido de formações em poços revestidos, agregando mais estabilidade à completação, e a seletividade na produção, devido aos diversos níveis da formação onde ocorrem os disparos do canhão.

2.2.1 MÉTODOS DE CANHONEIO

A classificação dos métodos de canhoneio ocorre em função da pressão exercida junto à formação, podendo ser caracterizado como: Sobre Pressão (Overbalance) quando a pressão no reservatório é menor que no poço, Sub Pressão (Underbalance) quando a pressão no reservatório é maior que no poço ou Sobre Pressão Extrema (Extreme Overbalance) quando a pressão no poço é muito maior que na formação, como está representado na FIG. 2.10.



SUB PRESSÃO (UNDERBALANCE) SOBRE PRESSÃO (OVERBALANCE) EXTREMA PRESSÃO (EXTREME OVERBALANCE)

FIG. 2.10 Classificação do canhoneio (BAIOCO e SECKLER, 2009).

2.2.1.1 MÉTODO SOBRE PRESSÃO (OVERBALANCE)

O processo de Overbalance acontece quando o fluido de completção presente no poço exerce uma pressão maior no poço do que na formação. Devido a esta maior pressão, ocorre uma invasão do fluido de completção para dentro da área canhoneada. O processo se inicia com o disparo do canhão, e logo após com o fluxo entra na formação e empurra os resíduos dos explosivos, do cimento e do revestimento, assim como outras partículas existentes no fluido de completção (BAIOCO E SECKLER, 2009).

Com este método pode ocorrer a compactação dos detritos da explosão nos poros da formação. Isto pode dificultar o fluxo de petróleo da formação para o poço, implicando em queda de produtividade. Este fenômeno é chamado tamponamento. A FIG. 2.11 ilustra um dano causado por um Overbalance.

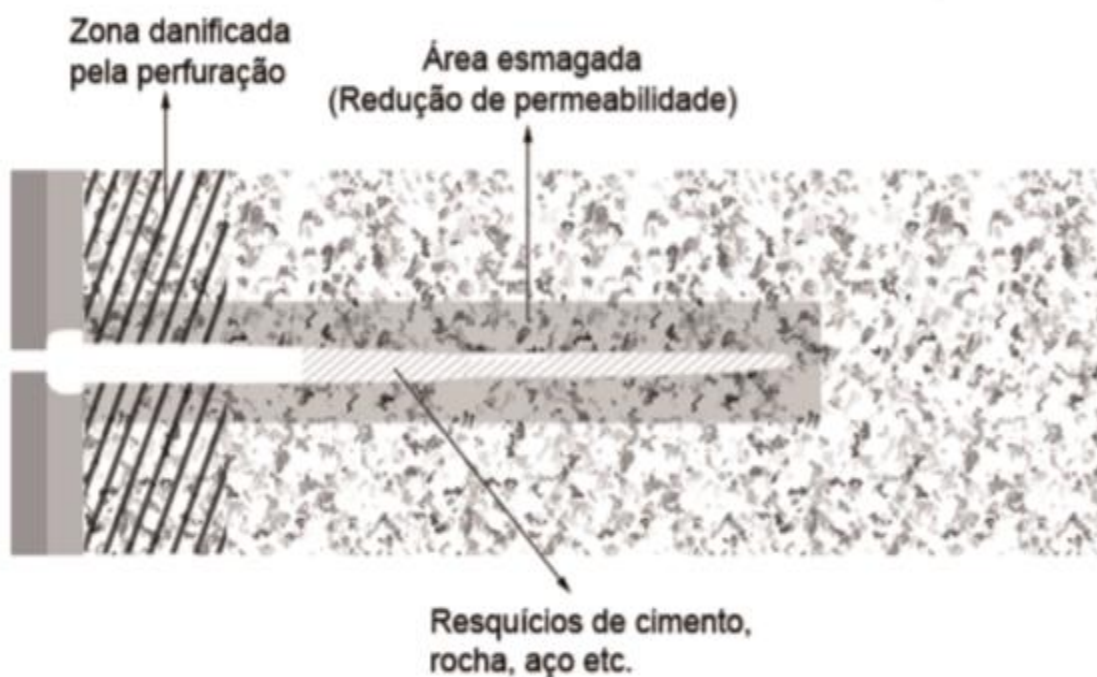


FIG. 2.11 Dano por Sobre Pressão (Overbalance) (VIEIRA et al, 2011).

No processo Overbalance, não é necessário usar as válvulas de fechamento de emergência do poço (BOP – Blow Out Prevent) durante o canhoneio, pois o poço possui uma pressão maior que o reservatório, o que impossibilita a invasão de petróleo para dentro do poço após os disparos. Assim, este método permite que os disparos sejam seguros. Os fluxos dos fluidos no método são controlados de acordo com as seções do poço (MATTA, 2007).

2.2.1.2 MÉTODO SUB PRESSÃO (UNDERBALANCE)

O processo de Sub Pressão (Underbalance) se dá contrário ao do Sobre Pressão (Overbalance). Assim, a pressão no poço é menor que a da formação, como mostra a FIG. 2.12. Como a pressão menor no poço, a produção se inicia logo depois que os disparos ocorram. Isto é uma vantagem, já que permite a limpeza dos detritos do canhoneio imediatamente após a explosão, prevenindo assim o tamponamento. Outra vantagem é que não há contaminação da formação pelo fluido de completação (BAIOCO E SECKLER, 2009).



FIG. 2.12 Método Sub Pressão (Underbalance) (VIEIRA et al, 2011).

Para este método de canhoneio é necessário a descida do tubo como mostra a FIG. 2.12. Pode-se dizer que este método é mais seguro que o Overbalance pois o poço não fica exposto, ou seja, sem uma coluna, o que é uma condição perigosa nas operações de completação (BAIOCO E SECKLER, 2009).

Entretanto, o método de Sub Pressão pode ter inúmeros problemas envolvendo instabilidade, deformação no revestimento do poço e produção de areia sedimentada no furo canhoneado. Alguns pesquisadores indicam que o poço canhoneado pelo o método Sobre Pressão pode obter melhores resultados que aquele com Sub Pressão para reservatórios de gás altamente pressurizados (COSTA et al, 2000).

2.2.1.3 MÉTODO EXTREMA PRESSÃO (EXTREME OVERBALANCE)

O método Extrema Pressão é uma variação do método Sobre Pressão. Trata-se de uma pressão altíssima no poço em relação à formação. Esta altíssima pressão assegura a completa remoção de quaisquer resíduos que possam bloquear a entrada dos canhoneados, forçando-os para o fundo dos túneis (COSTA et al, 2000).

Este método tem por objetivos criar pequenas fraturas de penetração que permitem o aumento de produção e ultrapassam a região danificada pelo fluido, além de limpar os furos canhoneados dos resíduos dos revestimentos, explosivos e sedimentos da formação (BAIOCO E SECKLER, 2009).

A elevada pressão no método Extrema Pressão é produzida por um acionamento feito diretamente na cabeça do poço, como é mostrado na FIG. 2.13. Os fluidos utilizados no poço são o fluido de completação ou ácido e N_2 (gás). (NARDONE, 2009)

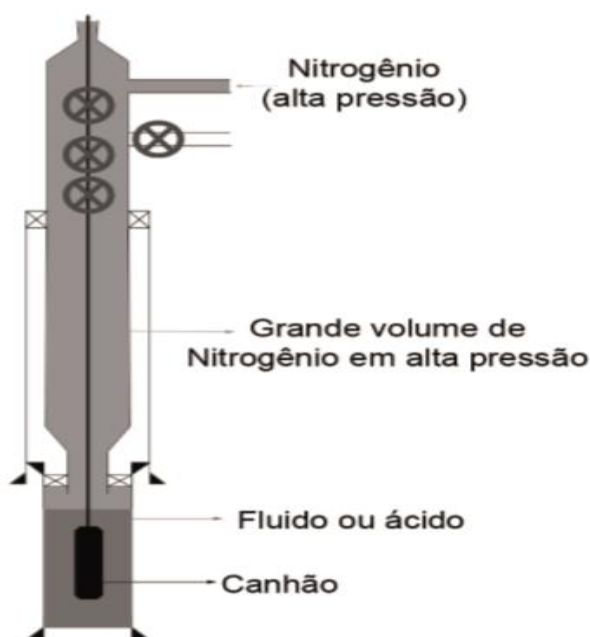


FIG. 2.13 Método Extrema Pressão (Extreme Overbalance) (VIEIRA et al, 2011).

O método que faz uso do ácido N_2 (gás) consiste em pressurizar a coluna de completação com nitrogênio, deixando um pequeno volume de fluido acima do intervalo a ser canhoneado. No momento em que ocorre o disparo das cargas e a abertura dos túneis (em cerca de 40 a 60 microssegundos), o líquido pressurizado, empurrado pelo gás e o próprio gás, fluem pelos canhoneados em alta velocidade, forçando os resíduos que se encontram nos túneis, a se

deslocarem para o fundo. A alta pressão gerada pela expansão do nitrogênio, também é suficiente para causar a fratura abrupta da formação (em cerca de 1 a 5 milissegundos), criando pequenas fraturas que irão se estender por poucos pés a partir de cada canhoneado e ultrapassar as áreas com dano (COSTA et al, 2000).

2.2.2 TIPOS DE CANHONEIO

Os tipos de canhoneio utilizados são: Convencional, Através da Tubulação (Through Tubing) e Perfuração Transmitida pela Tubulação (Tubing Conveyed Perforation-TCP). Os canhoneios do tipo Convencional e TCP são apresentados na FIG. 2.14.

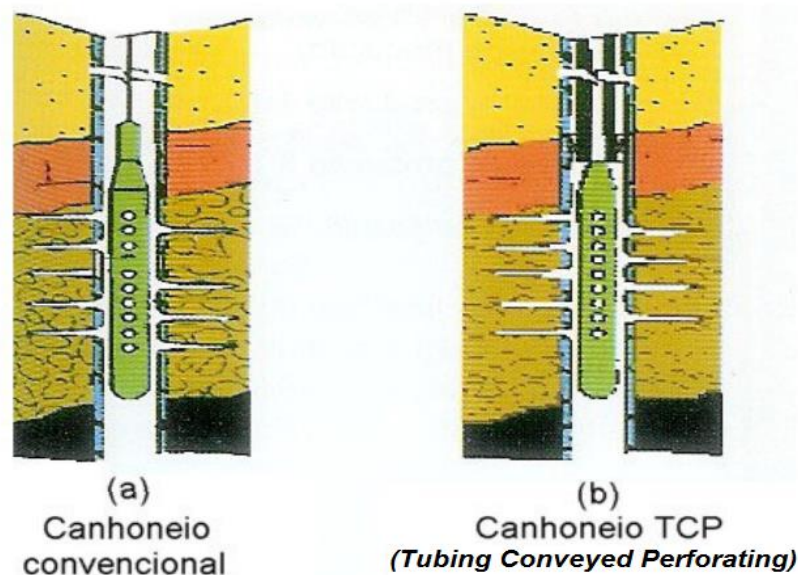


FIG. 2.14 Tipos de Canhoneio (BAIOCO E SECKLER, 2009).

2.2.2.1 TIPO CONVENCIONAL

No canhoneio do tipo Convencional o canhão é descido e acionado conforme o método Sub Pressão (Underbalance), e em seguida recupera-se o canhão e a coluna de produção desce. Na FIG. 2.15 contém a ilustração deste tipo de canhoneio (VIEIRA et al, 2011).

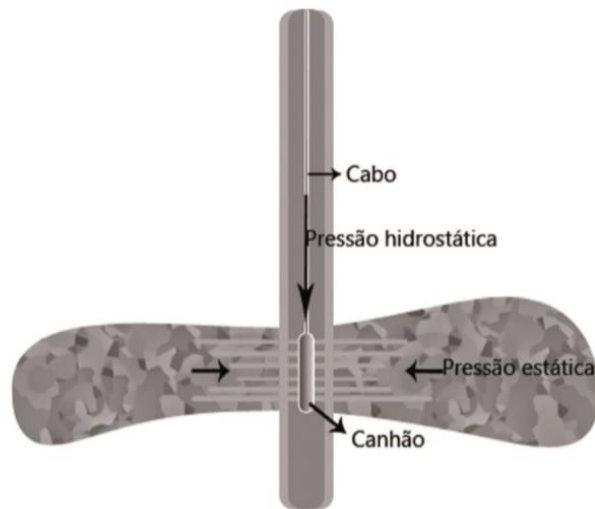


FIG. 2.15 Canhoneio Convencional (VIEIRA et al, 2011).

2.2.2.2 TIPO ATRAVÉS DA TUBULAÇÃO (THROUGH TUBING)

O sistema de Através da Tubulação (Through Tubing) consiste no canhoneio do revestimento em um intervalo abaixo da extremidade da coluna, com o uso de cargas unidirecionais. Este tipo de canhoneio necessita que a coluna seja gabaritada para dar suporte à estrutura, diferentemente do método convencional que não possui a coluna. A FIG. 2.16 apresenta este tipo de canhoneio (VIEIRA et al, 2011).

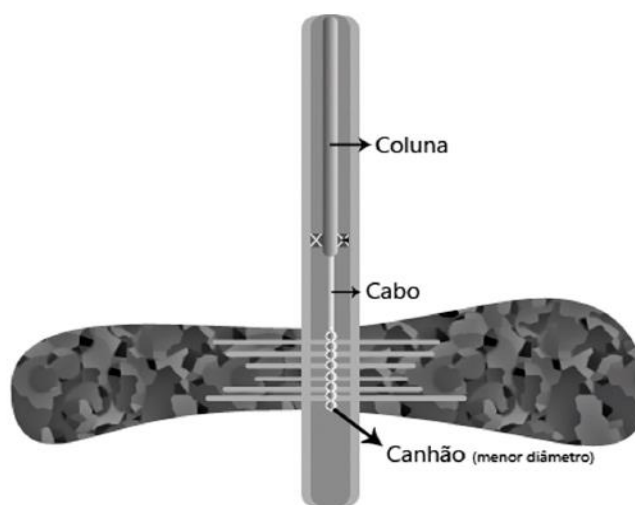


FIG. 2.16 Canhoneio Através da Tubulação (Through Tubing) (VIEIRA, 2011).

Inicialmente esse método foi desenvolvido para atender ao método de canhoneio Sub Pressão (Underbalance), porém, não obteve sucesso devido a diversos fatores, como baixo desempenho, problemas mecânicos e operacionais, etc (COSTA et al, 2000).

2.2.2.3 TIPO PERFURAÇÃO TRANSMITIDA PELA TUBULAÇÃO (TUBING CONVEYED PERFORATION - TCP)

Neste tipo de canhoneio faz-se uso de um canhão de grande diâmetro. O canhão pode ser disparado de forma hidráulica, elétrica ou mecânica. Após o disparo o canhão pode ser desconectado e abandonado temporariamente no fundo do poço, enquanto se processa a produção do fluido da formação, como está na FIG. 2.17.

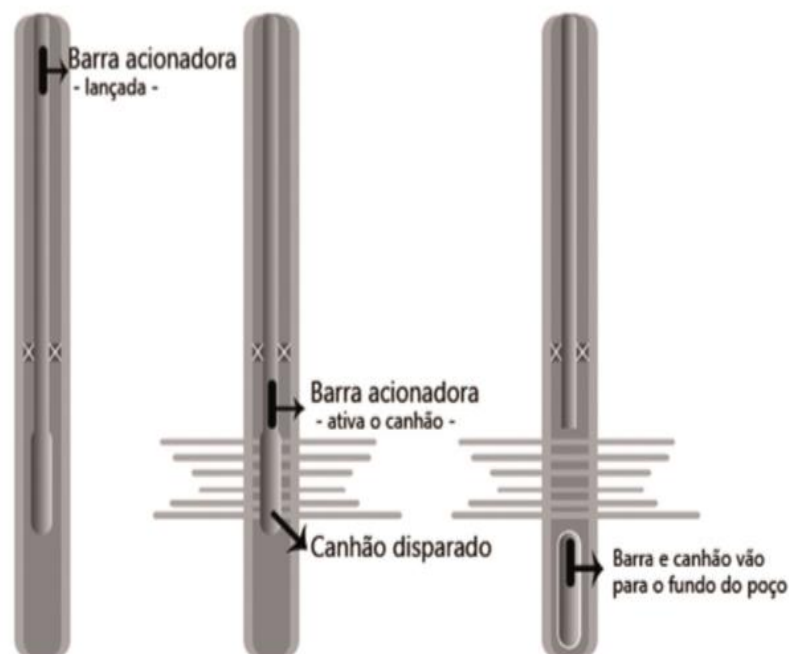


FIG. 2.17 Canhoneio de Perfuração Transmitida pela Tubulação (Tubing Conveyed Perforation-TCP) (VIEIRA et al, 2011).

2.3 MECÂNICA DAS ROCHAS

2.3.1 TENSÕES IN SITU

Quando um elemento da rocha se encontra em um estado de tensão compressivo e em equilíbrio, este estado é composto por três tensões, uma na vertical e duas na horizontal, as quais são denominadas como tensões in situ. A tensão vertical in situ (σ_v) é dada pelas camadas de rochas que se sobrepõem que assumem uma tensão de sobrecarga (σ_{ov}). Como reação, aparece na rocha tensões in situ horizontais σ_h e σ_H , como mostra a FIG. 2.18. Estas tensões podem ser iguais ou diferentes (ROCHA et al, 2009).

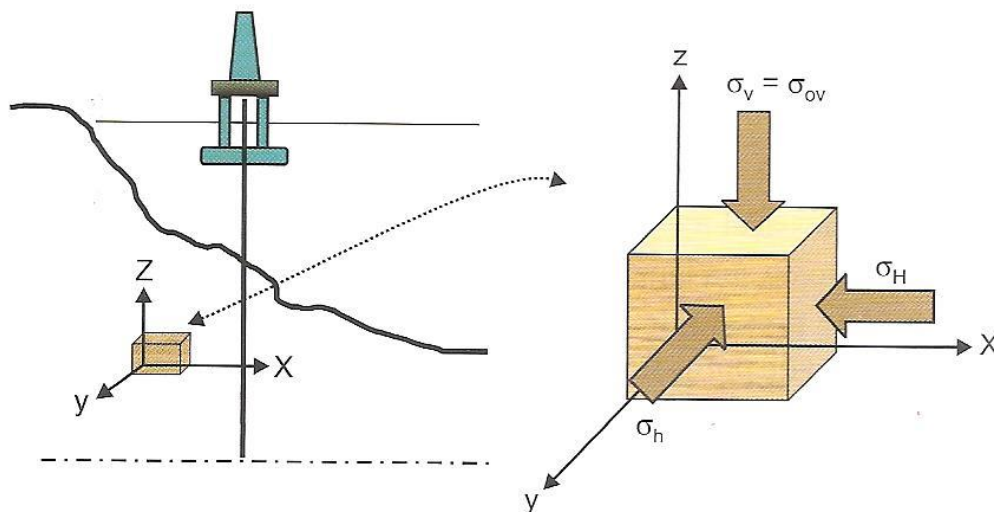


FIG. 2.18 Tensões in Situ (ROCHA et al, 2009).

2.3.2 TENSÕES AO REDOR DE UM POÇO

Quando ocorre a perfuração ou a retirada de um pedaço da rocha, a mesma sofre uma alteração no estado de tensões. Esta alteração é verificada principalmente na parede do poço e em sua vizinhança. Em uma tentativa de colocar o estado de tensões no estágio inicial, a parte

removida de rocha é substituída por fluido de perfuração. Contudo, este fluido não é capaz de recompor esse estado de tensão inicial, a alteração que permanece é causada pelas tensões in situ, propriedades do poço, pressão gerado pelo fluido de perfuração e a inclinação e direção do poço. As tensões ao redor do poço são de grande importância uma vez que grandes concentrações de tensões podem levar à ruptura da rocha e até mesmo perda de produção (ROCHA et al, 2009).

Os sistemas de coordenadas mais usados são os sistemas cartesiano e cilíndrico. O sistema cartesiano é usado para a situação da rocha que está em tensões in situ, como mostra a FIG. 2.18. Já as coordenadas cilíndricas é a mais usada para representar o estado de tensões ao redor do poço, como mostra a FIG. 2.19. As tensões ao redor do poço são classificadas com: tensões tangenciais (σ_θ) que são chamadas de hoop stress ou circunferencial, axiais (σ_a) e radiais (σ_r). As tensões tangenciais apresentam-se concentradas ao redor do poço quando é realizado um furo na rocha e não foi feito o preenchimento por fluido, ou baixo peso hidrostático em relação a formação. A origem das tensões radiais se dá quando há o preenchimento com o fluido de perfuração. A tensão axial é aquela que atua paralelamente ao poço (ROCHA et al, 2009).

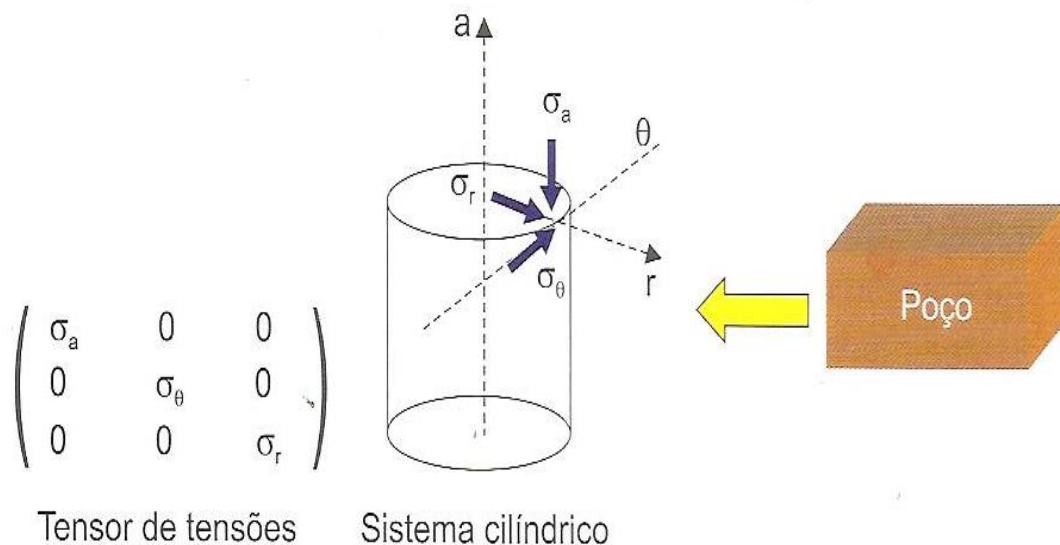


FIG. 2.19 Representação de um estado de tensões atuantes ao redor do poço em coordenadas cilíndricas (ROCHA et al, 2009).

As três tensões fazem parte do estado de tensão triaxial ao longo da parede do poço. A variação dessas tensões depende do alinhamento do poço, magnitude das tensões in situ, o comportamento das deformações das rochas e a configuração geométrica do poço. A FIG. 2.20 apresenta a variação destas tensões com relação a distância do centro do poço.

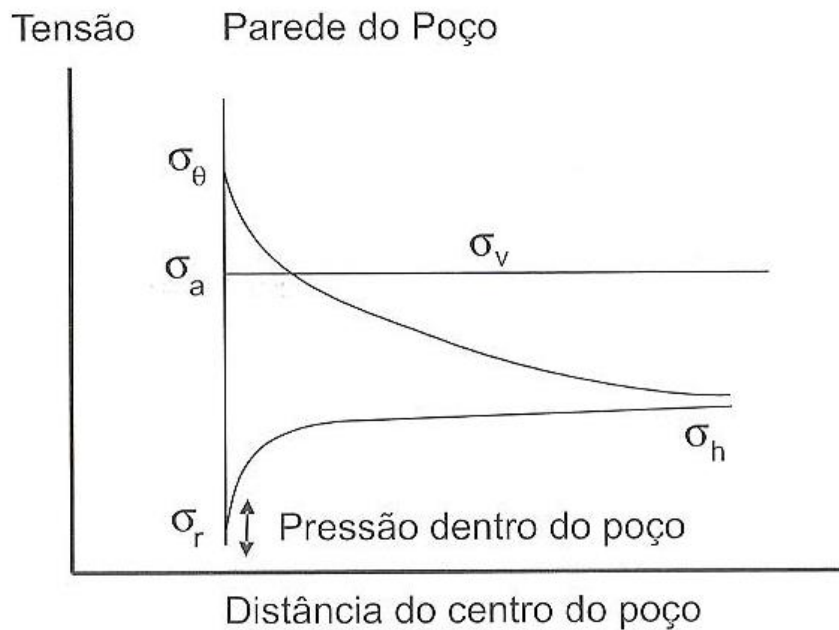


FIG. 2.20 Variação das Tensões ao redor do poço em função da distância em relação ao poço (ROCHA et al, 2009).

Com a FIG. 2.20 verifica-se que com o distanciamento do poço as tensões tendem as tensões in situ e o maior diferencial ocorre na parede do poço.

2.4 ONDAS DE CHOQUE, ONDAS DE DETONAÇÃO E VISCOSIDADE ARTIFICIAL

2.4.1 ONDAS DE CHOQUE

O estudo das ondas de choque se dá na época em que os europeus começaram a investir no melhoramento das máquinas de disparo. Essa necessidade surgiu para os projetis pudessem atravessar rapidamente as trincheiras com sacos de areias. Em 1876, Mach publicou um trabalho sobre o fluido em volta dos projetis. Neste trabalho, Mach usa seu conhecimento na ótica para estudar o fluido em torno dos projetis. Ele foi o primeiro a fotografar a onda de choque, como mostra a FIG. 2.21 (BAR, 2007).

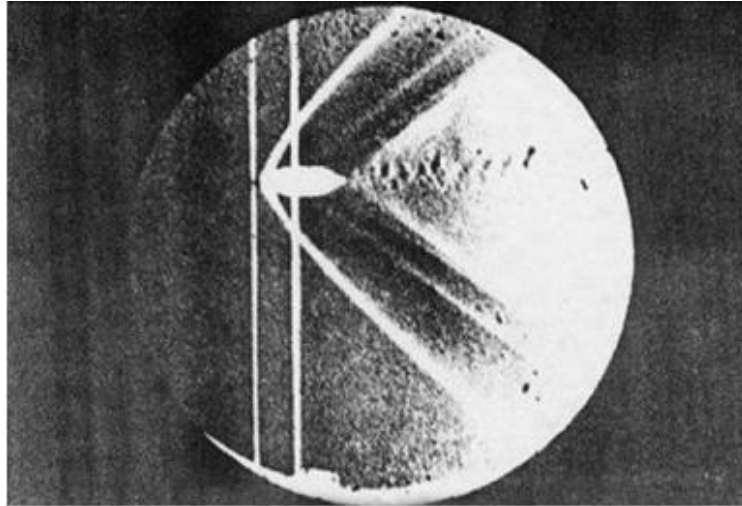


FIG. 2.21 Fotografia de Mach do projétil em um fluxo supersônico (BAR, 2007).

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 projéteis. No seu trabalho de 1876 demonstrou-se a onda de choque e sugeriu a importância da relação da velocidade de choque e a velocidade do som (BAR, 2007).

Em 1982, ZUKAS et al publica um trabalho sobre impacto dinâmico. É elaborado um código computacional para solucionar o fenômeno de penetração e perfuração de sólidos. Tem como informações de entrada as configurações geométricas iniciais e os materiais usados, além das condições iniciais. Depois ele faz uso das equações de estado e equações de conservação para a propagação da onda de choque. Este também faz uso do critério de fratura e relação tensão deformação para demonstrar os resultados.

MEYERS (1994) publicou um trabalho realizado sobre o comportamento dinâmico dos materiais e contém dois capítulos só sobre ondas de choque. Nestes capítulos o autor descreve como é a onda de choque e as equações de conservação com o tratamento hidrodinâmico do material devida as altas tensões. O autor apresenta também a Equação de Estado do Material que é a relação entre velocidade da onda de choque e das partículas. É também realizado o estudo sobre o impacto e como a onda entra no material e ocorre a reflexão no final do material, ou quando há a troca de material e a onda do pode aumentar sua pressão ou diminuir dependendo da impedância de choque entre os materiais.

2.4.2 ONDAS DE DETONAÇÃO

RINEHART et al em 1963 apresenta o trabalho do explosivo em material metálico. O autor nos primeiros capítulos fala sobre os explosivos, o comportamento da onda de detonação como a frente de onda, a região de reação dos produtos e de produtos já reagidos. Os aspectos químicos como a composição e propriedades do grão são estudados neste livro para verificação da onda. A equação de estado é a mesma da equação de choque. O distanciamento ótimo do explosivo em relação ao material metálico chamado de *standoff* é apresentado para verificação do comportamento da propagação da onda de detonação. Este trabalho contém ilustrações dos vários tipos de formatos de ondas e tabelas contendo as propriedades dos explosivos e dos materiais metálicos.

MEYERS (1994) 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. 2.22 contém a estrutura da onda de detonação e os pontos de von Neumann e Chapman-Jouguet (P_{CJ}) no perfil de pressão e tempo.

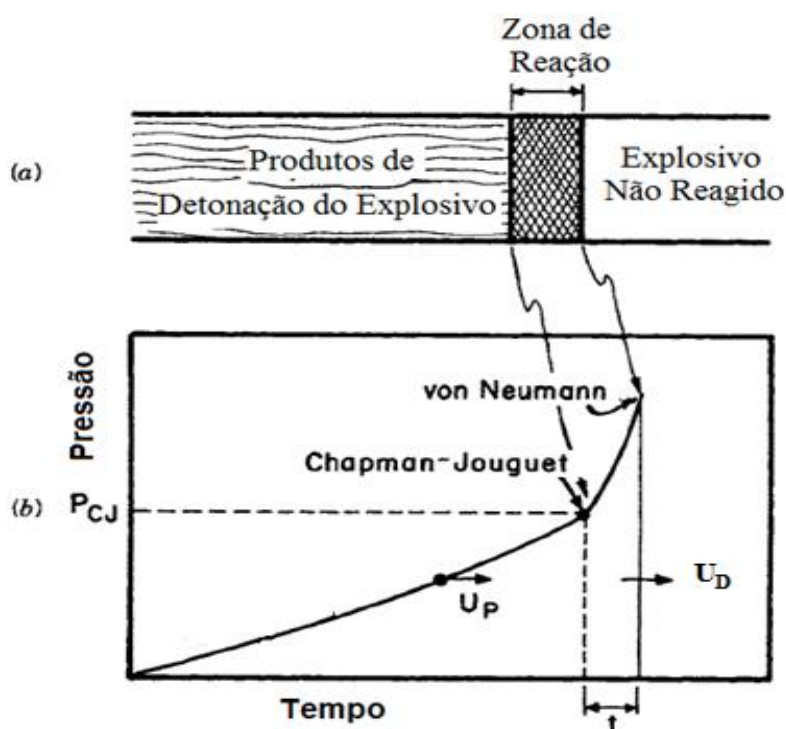


FIG. 2.22 (a) estrutura de onda de detonação e (b) o perfil de pressão (MEYERS, 1994).

A pressão do ponto de Chapman-Jouguet (P_{CJ}), velocidades das partículas (U_p) e a velocidade de detonação (U_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 simplificação computacional somente o ponto de Chapman-Jouguet é considerado nos cálculos

Ilustrações contendo gráficos de pressão e velocidade da partícula facilitam o entendimento das equações e as tabelas permitem verificar a diferença entre cada tipo de explosivo e sua interação com o material metálico.

2.4.3 VISCOSIDADE ARTIFICIAL

Na frente da onda de choque considera-se uma descontinuidade em relação a pressão e a energia. Esta consideração faz com que surjam oscilações espúrias na solução obtida. Para ultrapassar este fenômeno é introduzida a uma viscosidade artificial de von Neumann e Richtmyer. A proposta deles é de 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. A FIG. 2.23 mostra o efeito da adição do termo de viscosidade artificial para diversos valores da constante adimensional de viscosidade artificial (c) (MEYERS, 1994).

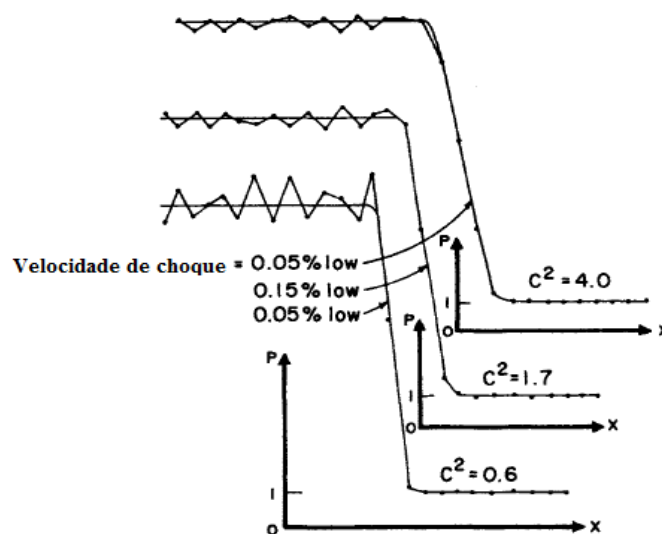


FIG. 2.23 Solução de equações diferenciais para frente de choque com diferentes valores da constante adimensional da viscosidade artificial (c) (MEYER, 1994).

YOSHIDA em 1986 publicou um trabalho contendo um código computacional hidrodinâmico Lagrangeano unidimensional que faz o uso da viscosidade artificial para gerar resultados das ondas de choque produzidas pelos explosivos. A viscosidade artificial é adicionada às equações para cálculo de pressão e energia, e os resultados apresentam a atenuação ou eliminação dos picos causados pelas descontinuidades da frente de choque.

HUANG et al em 2011 fez o uso da viscosidade artificial com o programa AUTODYN para realizar uma análise numérica de um típico problema de explosão de TNT debaixo da água, e observa os efeitos da viscosidade sobre o processo físico energético realizado. A viscosidade artificial é adicionada à pressão para solucionar as descontinuidades da onda de choque. Diferente do trabalho apresentado por MEYERS(1994), cuja o termo viscosidade artificial é somente quadrática, o trabalho de HUANG et al (2011) apresenta dois termos de viscosidade artificial: um quadrático e outro linear. A seção 3.6 apresenta estes dois termos e a equação usada no programa AUTODYN.

2.5 MÉTODOS COMPUTACIONAIS

2.5.1 INTRODUÇÃO

A ferramenta numérica que é usada neste trabalho é o software AUTODYN do ANSYS®. Esta ferramenta possui vários tipos de métodos computacionais, entre eles o método de Euler, método de Lagrange e o método da formulação Lagrangeana e Euleriana Arbitrária (Arbitrary Lagrange Euler - ALE), que faz o uso do método Euler em combinação com o método de Lagrange. Para cada método existe à disposição equações de governo nos métodos de elementos finitos para simulações em 3D, ou de diferenças finitas para modelagem em 2D.

O método usado para este trabalho é o método de Euler e de Lagrange, e estes têm suas equações desenvolvida em diferenças finitas. A simulação da carga oca gera grandes deformações e o modelo Euleriano consegue suportar altas deformações e tensões, comportamento não-linear do material, 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.

2.5.2 MÉTODO DE EULER

Este método 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, sua vantagem é poder 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 (SANTOS, 2012).

O processo de solução por Euler-Multimaterial é descrito no trabalho de GÜREL (2009) e no manual AUTODYN Theory Manual (2005). Nas duas referências as equações de conservação são descritas na forma de diferenças finitas utilizando um volume de controle. A resolução se dá em dois passos. O primeiro passo, chamado de Lagrangeano, a forma Lagrangeana das equações são atualizadas e progridem ao passo de tempo. No segundo passo, as variáveis são atualizadas e mapeadas na malha Euleriana.

O método de Euler é usado neste trabalho para elaboração da carga que contém o invólucro, explosivo e revestimento da carga, visto que este método possui grande capacidade de suportar deformações. O revestimento do cone de metal sofre grandes deformações quando é colidido no eixo e forma um jato de metal líquido.

2.5.3 MÉTODO DE LAGRANGE

No método de Lagrange, a malha é fixa ao material simulado. Assim a malha acompanha o movimento do material e a deformação do material 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 (SANTOS, 2012).

O método de processamento Lagrangeano usado no AUTODYN é baseado no trabalho de WILKINS (1964). Comparado com o método Euleriano, a formulação Lagrangeana tende a ser computacionalmente mais rápido a uma vez que não há transporte de material através das malhas. A principal desvantagem do método de Lagrange é que se ocorre o movimento de material em excesso, a malha numérica pode tornar-se altamente distorcida levando a uma solução imprecisa e ineficiente. A subrotina Erosão é utilizada para o tratamento de casos de malha altamente distorcida. Essa subrotina é incorporada ao código do AUTODYN para remover as células altamente distorcidas do cálculo, uma vez que uma tensão pré-definida (tensão geométrica instantânea, tensão geométrica incremental ou de deformação plástica efetiva) exceder um limite especificado. A principal razão para a utilização da subrotina erosão é remover elementos muito distorcidos de uma simulação antes de os elementos tornarem-se degenerados. Isso garante que a estabilidade na interação terá um nível razoável e as resoluções poderão continuar com o passo de tempo desejado. Uma vez que uma célula é removida do processo de cálculo, a massa no interior das células pode ser descartada ou distribuída para os nós de cada célula. Se a massa é mantida, há a conservação massa (AUTODYN, 2005).

O método Lagrangeano é usado neste trabalho para simular uma carga já detonada que penetra no alvo já definido na malha. Após alguns ciclos a simulação ocorre apenas com o jato e o alvo. Para fins de simplificação de cálculo, o explosivo e o involucro são retirados da malha após alguns passos de tempo quando o jato penetra no alvo.

2.5.4 MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

Para a simulação, as equações de conservação e de propagação da onda são dispostas através do método das diferenças finitas. Estas equações presentes no programa AUTODYN foram retiradas dos trabalhos de van LEER (1977, 1979). Neste trabalho são levantadas as equações de conservação em diferenças finitas no referencial Lagrangeano. O processo de diferenciação das equações ao longo do tempo é realizado pelo esquema chamado contra vento (*upwind*), que dependendo do sinal da direção da velocidade, a aproximação pode ser por diferença avançada ou atrasada. Para este método a precisão é de segunda ordem, pois o erro ($O\{(\Delta t)^2\}$) se apresenta na segunda ordem como mostra a equação de conservação de massa EQ. 2.27 retirada do trabalho de LEER (1979).

$$V = V_0 + \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right) \Delta t + O \{ (\Delta t)^2 \} \quad (2.27)$$

MEYERS (1994) apresenta também um capítulo com as equações de governo das ondas na forma de equações de diferenças finitas no referencial Euleriano e no Lagrangeano, base para a simulação computacional da propagação de ondas.

HASENBERG em 2010 baseou a sua aplicação de pesquisa no método de diferenças finitas no programa AUTODYN. Com a simulação usando o método de diferenças finitas, pode-se observar as velocidades na ponta do jato, a velocidade do jato, as distribuições da massa acumulada, o alongamento do jato e características específicas perturbadores durante a formação do jato.

No trabalho de ELSHENAWY (2012), ele faz o uso do método de diferenças finita no código do AUTODYN para a analisar as velocidades de colapso, e com a teoria analítica de PUGH et al (1952) que calcula o jato e as velocidades da escória e massas, o colapso e os ângulos de deflexão do elemento de revestimento da carga.

3 FORMULAÇÃO TEÓRICA

3.1 INTRODUÇÃO

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 contidas neste capítulo foram retiradas de trabalhos anteriores e do manual do programa ANSYS (2012). Este capítulo contém cinco seções, sem contar a seção introdutória. A primeira seção possui as equações de conservação, e a segunda a Equação de Estado do Material, de Mie-Grüneisen, de Jones-Wilkins-Lee, P-alpha e Linear. A terceira contém a equação constitutiva de Johnson-Cook, von Mises e Concreto RHT, na quarta o modelo de fratura de Johnson-Cook e na quinta o termo de viscosidade artificial.

3.2 EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO

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 dos meios na frente e após a onda de choque obedecem as leis de conservação de massa, momentum e energia (MEYERS, 1994).

3.2.1 CONSERVAÇÃO DE MASSA

Sabe-se que pela conservação de massa, a quantidade de massa por unidade de área que já passou pela frente da onda de choque é a mesma quantidade de massa por unidade de área que

está entrando na frente de onda de choque. As EQ. 3.1 e EQ. 3.2 são equações de conservação de massa.

$$A_r \rho_0 (U_s - U_0) = A_r \rho (U_s - U_p) \quad (3.1)$$

Para o $U_0 = 0$:

$$\rho_0 (U_s) = \rho (U_s - U_p) \quad (3.2)$$

Onde A_r é uma área arbitrária, U_s é a velocidade de propagação da onda de propagação de choque, U_0 é a velocidade inicial da partícula, U_p é a velocidade das partículas e ρ_0 é a massa específica inicial.

Para este trabalho, a equação de conservação de massa é usada na forma diferencial para o método Euleriano em 2D. A EQ. 3.3 é retirada de MEYERS (1994), que diz que a diferença entre taxa de entrada e saída é igual ao acúmulo de massa em um cubo infinitesimal. A FIG. 3.1 é a ilustração do cubo infinitesimal analisado.

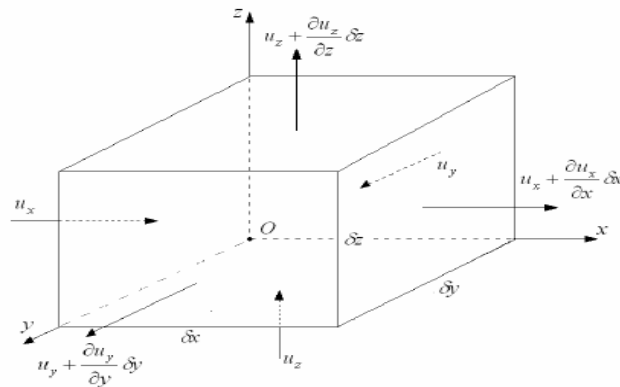


FIG. 3.1 Velocidade nas faces da célula infinitesimal (JUNIOR, 2012).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\rho_x u_x - (\rho_{x+\delta x} u_{x+\delta x})}{\delta x} + \frac{\rho_y u_y - (\rho_{y+\delta y} u_{y+\delta y})}{\delta y} + \frac{\rho_z u_z - (\rho_{z+\delta z} u_{z+\delta z})}{\delta z} \quad (3.3)$$

Quando δx , δy e δz tendem a zero tem-se a EQ. 3.4 e a EQ. 3.5

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho_x u_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho_y u_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_z u_z) \right] \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho u) \quad (3.5)$$

A equação de conservação de massa na forma Lagrangeana é apresentada na EQ 3.6.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot u = 0 \quad (3.6)$$

3.2.2 CONSERVAÇÃO DE MOMENTUM

Na conservação de momentum tem-se que a diferença de momentum é igual ao impulso por unidade de área da seção transversal (MEYERS, 1994). No lado esquerdo da EQ. 3.7 está a diferença de momentum e no lado direito o impulso. Onde

$$A_r \rho (U_s - U_p) U_p dt - A_r \rho_0 (U_d - U_0) U_0 dt = (P - P_0) A_r dt \quad (3.7)$$

Simplificando a equação, obtém-se a EQ. 3.8.

$$\rho (U_s - U_p) U_p - \rho_0 (U_s - U_0) U_0 = (P - P_0) \quad (3.8)$$

Com a EQ. 3.2 e EQ. 3.7 tem-se a EQ. 3.9:

$$\rho_0 (U_s - U_0) (U_p - U_0) = (P - P_0) \quad (3.9)$$

Se $U_0 = 0$:

$$(P - P_0) = \rho_0 U_s U_p \quad (3.10)$$

Na forma do referencial Euleriano a equação de conservação de momentum é deduzida da EQ. 3.11 até a EQ. 3.16, já a EQ. 3.17 está no referencial Lagrangeano. Para início de cálculo a força resultante é dada pelo somatório dos produtos da tensão ou pressão pela área da face, levando-se em conta o sentido em que a força resulta atua.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u = - \left[\frac{\delta \rho_x u_x^2}{\delta x} i + \frac{\delta \rho_y u_y^2}{\delta y} j + \frac{\delta \rho_z u_z^2}{\delta z} k \right] - \left[\frac{\delta P_x}{\delta x} i + \frac{\delta P_y}{\delta y} j + \frac{\delta P_z}{\delta z} k \right] \quad (3.11)$$

Como,

$$\frac{\delta \rho_x u_x^2}{\delta x} = u_x \frac{\delta \rho_x u_x}{\delta x} + u_x \rho_x \frac{\delta u_x}{\delta x}, \quad (3.12)$$

$$\frac{\delta \rho_y u_y^2}{\delta y} = u_y \frac{\delta \rho_y u_y}{\delta y} + u_y \rho_y \frac{\delta u_y}{\delta y} \text{ e} \quad (3.13)$$

$$\frac{\delta \rho_z u_z^2}{\delta z} = u_z \frac{\delta \rho_z u_z}{\delta z} + u_z \rho_z \frac{\delta u_z}{\delta z} \quad (3.14)$$

Tem-se que:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u = - [u \nabla (\rho u) + \rho u \nabla u] - \nabla P \quad (3.15)$$

E simplificando com a equação de conservação de massa, obtém-se a equação de conservação de momento:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u \right) = -\nabla P \quad (3.16)$$

Na forma Lagrangeana a equação de conservação de momento é:

$$\rho \left(\frac{Du}{Dt} \right) = -\nabla P \quad (3.17)$$

3.2.3 CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Na conservação de energia é dito que o acumulo de energia é igual a quantidade de energia que entra menos a quantidade de energia que sai do elemento analisado. E quando há o processo químico, esta parte de energia liberada também é adicionada a equação de conservação. A EQ 3.18 é a equação de conservação da energia simplificada na forma mais comum.

$$E - E_0 = \frac{1}{2}(P + P_0)(V_0 - V) \quad (3.18)$$

MEYERS (1994) também demonstrou a equação de conservação de energia primeiramente no referencial Euleriano e obtém a EQ 3.19.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(E + \frac{1}{2}u^2 \right) \rho + \nabla \left[\rho \left(E + \frac{1}{2}u^2 \right) u + P u \right] = 0 \quad (3.19)$$

Para o referencial Lagrangeano, MEYERS (1994) faz uso da primeira lei da termodinâmica, e assume que o processo é adiabático, como mostra as EQ 3.20 a EQ 3.22.

$$\frac{dE}{dt} = T \frac{dS}{dt} - P \frac{dV}{dt} \quad (3.20)$$

Para o processo adiabático reversível tem-se que:

$$\frac{dS}{dt} = 0 \quad (3.21)$$

No referencial Lagrangeano a equação de conservação de energia é:

$$\frac{dE}{dt} + P \frac{dV}{dt} = 0 \quad (3.22)$$

3.3 EQUAÇÕES DE ESTADO (EOS – EQUATION OF STATE)

As equações de estado são essenciais para descrever a onda de choque em uma dada carga e alvo. Com as equações de conservação somente não é possível calcular todas as variáveis. Assim, é necessário mais uma equação de estado para possibilitar a resolução do sistema.

A equação de estado pode ser determinada a partir do conhecimento das propriedades termodinâmicas do material e, idealmente, não devem precisar de dados dinâmicos para construir a relação. No entanto, a única forma prática de obter dados sobre o comportamento do material em altas taxas de deformação é realizar experiências dinâmicas bem caracterizadas.

Nesta seção são apresentadas quatro equações de estado que auxiliam na determinação das grandezas de estado. Uma dessas equações é a Equação de Estado do Material que faz a relação entre a velocidade de propagação da onda de choque com a velocidade de partícula. A equação de estado de Mie-Grüniesen que permite calcular a pressão em um material sob a ação de uma onda de choque. Com relação a detonação do explosivo, a equação de estado que é usada é a de Jones-Wilkins-Lee, apresentada na terceira seção. Para cálculo das pressões dentro de um meio poroso como o cimento as equações de estado P-alpha. A equação de estado Linear usada para o alvo revestimento do poço de aço 4140 é descrita na última seção.

3.3.1 EQUAÇÃO DE ESTADO DO MATERIAL

A Equação de Estado do Material é uma relação entre a velocidade da onda de choque e a velocidade de partículas. A EOS do Material é usada para simular o invólucro de aço 4340, o revestimento do poço A25 PSL1 F, o revestimento da carga de cobre CU-OFHC e o arenito Berea. Esta equação foi determinada experimentalmente e verificou-se que há uma relação com a velocidade do som (C_0) Existe também as constantes empíricas s_i ($i= 1,2,3,\dots, n$) que dependendo do tipo de material podem ser mais de uma como é visto na EQ 3.23

$$U_s = C_0 + s_1 U_p + s_2 U_p^2 + \dots \quad (3.23)$$

Para os materiais metálicos foi verificado que a Equação de Estado do Material se apresenta em uma relação linear. Isto se deve ao fato das constantes s_2 em diante terem um valor muito pequeno para os metais (JUNIOR, 2012). A EQ 3.24 é a equação geral na forma simplificada.

$$U_s = C_0 + s_1 U_p \quad (3.24)$$

3.3.2 EQUAÇÕES DE ESTADO DE MIE-GRÜNEISEN

Com as equações de estado de Mie-Grüneisen obtém-se a pressão em um material sólido, sob ação de uma onda de choque. As EOS de Mie-Grüneisen estão presentes na formulação e desenvolvimento da EOS do material no bando de dados do AUTODYN. Estas equações tem em sua expressão os valores de pressão e de energia calculada pelo choque de Hugoniot relacionadas com o volume específico do material, como é mostrado na EQ 3.25

$$P = P_H + \frac{\gamma}{V} (E - E_H) \quad (3.25)$$

Onde γ é o coeficiente de Mie-Grüneisen, P_H é a pressão de Hugoniot e E_H é a energia de Hugoniot. A EQ 3.26 e EQ 3.27 são as equações de pressão e energia de Hugoniot, respectivamente.

$$P_H = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu (1 + \eta)}{[1 - (s_1 - 1)\eta]^2} \quad (3.26)$$

$$E_H = \frac{1}{2} \frac{P_H}{\rho_0} \left(\frac{\eta}{1 + \eta} \right) \quad (3.27)$$

Onde η é a relação entre a massa específica final e a massa específica inicial (ρ_f/ρ_0).

3.3.3 EQUAÇÃO DE ESTADO DE JONES-WILKINS-LEE

A equação de estado de Jones-Wilkins-Lee calcula a pressão nos produtos gasosos da detonação do explosivo RDX (Research Department X) usado na simulação da detonação da carga. Esta equação apresentada na EQ 3.28, foi desenvolvida para descrever a expansão adiabática dos produtos de detonação de explosivos, com os coeficientes determinados experimentalmente (LEE, 2006).

$$P = A \left[1 - \frac{w\eta}{R_1} \right] \exp\left(-\frac{R_1}{\eta}\right) + B \left[1 - \frac{w\eta}{R_2} \right] \exp\left(-\frac{R_2}{\eta}\right) + w\rho E \quad (3.28)$$

Onde A , B , R_1 , R_2 e w são parâmetros de ajuste experimental e η é a razão das massas específicas final e inicial:

$$\eta = \frac{\rho_f}{\rho_0} \quad (3.29)$$

Os valores das constantes experimentais para alguns explosivos foram determinados através de um ensaio dinâmico. O ensaio é realizado por meio do teste de expansão do cilindro (ELSHENAWY, 2012). Para os explosivos deste trabalho, os valores das constantes acima referidos estão disponíveis na biblioteca de materiais do código do AUTODYN.

3.3.4 EQUAÇÕES DE ESTADO P-ALPHA

Em 1969, HERRMANN desenvolveu um conjunto de equações constitutivas para descrever o comportamento de materiais porosos dúctil de uma forma simples. O objetivo de HERMANN foi reproduzir resultados razoáveis para tensões baixas e altas em materiais porosos. O método leva em conta o comportamento termodinâmico de altas tensões e também o comportamento de compactação em pressões mais baixas (ROY, 2009).

A equação de estado P-alpha está presente no banco de equações do AUTODYN. Esta equação é usada para simular o cimento, devido a existência de porosidade no material (α'). A variação de P e alpha é mostrado esquematicamente na FIG. 3.2. O material se deforma elasticamente até um valor P_e de pressão e em seguida deforma plasticamente, até que o material é totalmente compactado a uma pressão P_s (ANSYS, 2011).

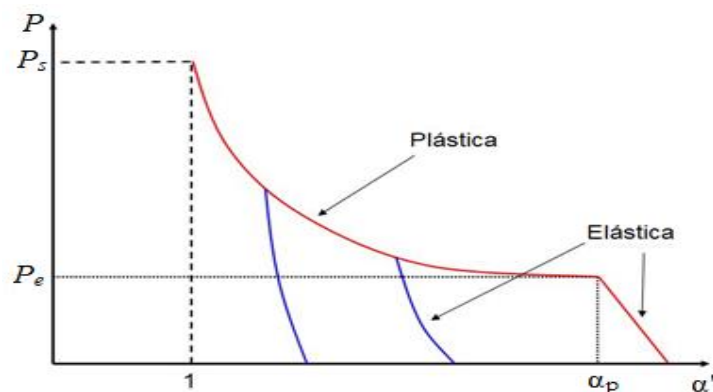


FIG. 3.2 Curva do comportamento do material dúctil poroso durante a compactação para o modelo P-alpha (ANSYS, 2011).

A relação de P com α para materiais porosos sugerida por HERMANN (1969) está descrita pela EQ. 3.30.

$$\alpha' = 1 + (\alpha_p - 1) \left[\frac{P_s - P}{P_s - P_e} \right]^{n'} \quad (3.30)$$

Onde 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 (ANSYS, 2011).

A fórmula geral da equação de estado linear polinomial para o material compactado está contida na EQ. 3.31. Esta é uma forma geral da equação de estado de Mie-Gruneisen (ANSYS, 2011).

$$P = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e \quad (3.31)$$

Os parâmetros A_1 , A_2 , A_3 , B_0 e B_1 são constantes, μ é a razão de compressão como mostra a EQ. 3.32, e e é a energia interna específica por unidade de massa.

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (3.32)$$

3.3.5 EQUAÇÃO DE ESTADO LINEAR

Para a modelagem do aço 4140 que compõe o revestimento do poço na terceira simulação com os parâmetros experimentais, a equação de estado chamada linear foi implementada para simular este material no software AUTODYN. Esta equação de estado do tipo linear é tipicamente usada, e faz a relação entre pressão P com a razão de compressão μ como mostra a EQ. 3.33 :

$$P = b'\mu \quad (3.33)$$

Onde b' é o módulo volumétrico do material. O módulo de volume pode ser utilizado para definir uma forma linear. Combinado com uma propriedade de módulo de cisalhamento, esta definição material é equivalente a usar o Módulo de Young e coeficiente de Poisson (GRUJICIC et al, 2006).

3.3.6 EQUAÇÕES DE ESTADO DE TILLOTSON

Estas equações de estado Tillotson são usadas para fornecer uma descrição precisa do comportamento do material metálicos, da pressão e da massa específica em fenômenos hipervelocidade. As EOS de Tillotson foram usadas para simular a saída do canhão de aço 4130.

3.3.6.1 REGIÕES DE INTERESSE

A região do plano de pressão-volume é dividida em quatro sub-regiões, como mostrado na FIG. 3.3:

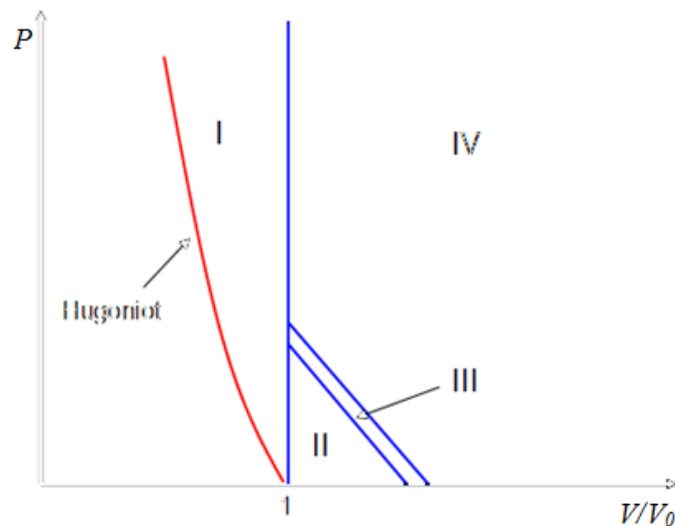


FIG. 3.3 Regiões de interesse para EOS de Tillotson (ANSYS, 2011).

A região do lado esquerdo do Hugoniot só pode ser alcançada por compressão adiabática (sem choque) e é irrelevante para os problemas impacto. Esta região é portanto excluída da formulação. A região I representa a fase comprimida do material e estende-se verticalmente até atingir pressões de cerca de 100 kPa. A região II descreve o material que foi chocado uma energia menor do que a energia no ponto de ebulição e_s . A região III é definida pela configuração:

$$e_s' = e_s + k e_v \quad (3.34)$$

Onde e_s' é energia suficientemente grande para garantir que ele irá se expandir como um gás a grandes expansões, e_v é a energia de vaporização, e_s a energia de ponto de ebulição, ambas

determinadas a partir de dados termodinâmicos. A constante k é determinada empiricamente para garantir um bom comportamento (ANSYS, 2011).

A região IV é a fase de expansão do material que chocou com uma energia e_s' (ANSYS, 2011).

3.3.6.2 FORMULAÇÃO TEÓRICAS DAS REGIÕES:

Para a região I ($\mu \geq 0$) a pressão P_1 é dada por uma Equação de Estado de Mie-Gruneisen:

$$P_1 = \left(a + \frac{b}{\omega_0} \right) \eta \rho_0 e + a_1 \mu + b_1 \mu^2 \quad (3.35)$$

Onde a , a_1 , b , b_1 são constantes, μ é a razão de compressão e η é a razão entre as massas específicas como mostra as EQ. 3.36 e EQ. 3.37. A variável auxiliar ω_0 está descrita na EQ. 3.38 abaixo:

$$\eta = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (3.36)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (3.37)$$

$$\omega_0 = 1 + \frac{e}{e_0 \eta^2} \quad (3.38)$$

A formulação para a Região II ($\mu < 0$ e $e \leq e_s$) é como a Região I, com uma pequena modificação de um termo para evitar dificuldades com μ , para valores negativos altos. A equação está descrita na EQ. 3.39.

$$P_2 = \left(a + \frac{b}{\omega_0} \right) \eta \rho_0 e + a_1 \mu \quad (3.39)$$

A formulação para a Região III ($\mu < 0$ e $e_s < e < e_s'$) está descrita na EQ. 3.40:

$$P_3 = P_2 + \frac{(P_4 - P_2)(e - e_s)}{(e_s' - e_s)} \quad (3.40)$$

A formulação para a Região IV ($\mu < 0$ e $e \geq e_s'$) está descrita na EQ.4.41:

$$P_4 = a\eta\rho_0 e + \left(\frac{b\eta\rho_0 e}{\omega_0} + a_1\mu e^{\beta_1 x} \right) e^{\beta_2 x^2} \quad (3.41)$$

Onde x é definido pela EQ. 3.42 e β_1 e β_2 são constantes.

$$x = 1 - \left(\frac{1}{\eta} \right) \quad (3.42)$$

3.4 EQUAÇÃO CONSTITUTIVAS

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 invólucro de aço 4340 e revestimento do poço de aço 4140, o modelo Concreto RHT para o cimento CONC-35 MPa e o modelo de falha von Mises para a placa de aço 4130 que simula a saída do canhão, o revestimento do poço A25 PSL1 F e o arenito Berea. Utiliza-se estes modelos para representar o comportamento de resistência dos materiais, sujeitos a grandes tensões, altas taxas de deformação ou altas temperaturas. Tais comportamentos podem surgir em problemas de intensa carga explosiva, ou devido ao impacto de alta velocidade (ANSYS, 2011).

3.4.1 MODELO DE JOHNSON-COOK

No modelo de Johnson-Cook pode-se observar variações no limite de escoamento do material, devida a elevação da temperatura e a deformação plástica, o que pode controlar o endurecimento e amolecimento do material (NEVES, 2013).

Este modelo é usado na simulação para o invólucro de aço 4340 e revestimento do poço de aço 4140. A equação constitutiva visa modelar o comportamento de resistência do material metálico do revestimento da carga. A equação constitutiva do modelo de Johnson-Cook calcula a limite de escoamento dinâmico do material, descrita pela EQ 3.43

$$\sigma_y = (A' + B' \varepsilon_p^n) \left(1 + C' \log \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) (1 - T_*^m) \quad (3.43)$$

Onde A' é tensão de escoamento inicial, B' é constante de endurecimento, C' é a taxa de deformação constante, m é o expoente de amolecimento térmico, ε_p é a deformação plástica, n é o expoente de endurecimento e $\dot{\varepsilon}_p$ é taxa de deformação plástica. A' , B' , C' , m e n são parâmetros obtidos experimentalmente para cada material (NEVES, 2013). $\dot{\varepsilon}_0$ é a taxa de deformação inicial que normalmente é considerado com valor unitário. T_*^m é a temperatura reduzida, calculada pela EQ.3.44 (NEVES, 2013).

$$T_*^m = \frac{T - T_{amb}}{T_{fusão} - T_{amb}} \quad (3.44)$$

A temperatura do material T é calculada utilizando-se a EQ 3.45.

$$T = T_0 + \frac{u' - u'_0}{C_v} \quad (3.45)$$

Onde T_0 é a temperatura inicial e C_v é o calor específico à volume constante.

3.4.2 MODELO DE FALHA DE VON MISES

O modelo de falha de von Mises (von MISES, 1913), foi proposto a fim de descrever escoamento plástico em metais. O critério de von Mises permite o cálculo simples da tensão e da deformação equivalentes. Este modelo é empregado para o cálculo das tensões no revestimento do poço A25 PSL1 F, a placa de aço 4130 que simula a saída do canhão e o arenito Berea.

A tensão equivalente está relacionada com as tensões principais σ_1 , σ_2 e σ_3 na EQ. 3.46.

$$\sigma_e = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.46)$$

Tensão equivalente, também chamada de von Mises é frequentemente usada em projetos, pois permite que qualquer estado de tensão tridimensional arbitrário possa ser representado como um único valor de tensão positiva. Tensão equivalente faz parte da teoria da máxima tensão de ruptura equivalente usada para prever quando o material falhará (ANSYS, 2011).

A deformação de von Mises ou equivalente é calculada com as deformações principais ε_1 , ε_2 e ε_3 na EQ. 3.47.

$$\varepsilon_e = \frac{1}{1+\nu} \left[\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.47)$$

Onde ν é o coeficiente de Poison.

3.4.3 MODELO CONCRETO RHT

O modelo de Concreto RHT (Riedel, Hiemaier e Thoma) é um modelo avançado de plasticidade para materiais frágeis desenvolvidos por Riedel, Hiemaier e Thoma em 1999. É particularmente útil para modelar a carga dinâmica de concreto. Ele também pode ser usado para outros materiais frágeis, tais como rochas e cerâmica, como é o caso do concreto CONC-35 MPa usado nas simulações. O modelo constitutivo Concreto RHT é uma combinação da plasticidade e o modelo de dano por cisalhamento (ELSHENAWY, 2012).

3.4.3.1 SUPERFÍCIE DE RUPTURA

A equação geral para a superfície de ruptura generalizada está apresentada na EQ. 3.48 (ANSYS, 2011).

$$F_{rup}(P, \theta, \dot{\varepsilon}) = \sigma_e - Y_{TXC(P)} \times R_{3(\theta)} \times F_{FAD} \quad (3.48)$$

Onde Y_{TXC} é a superfície de fratura que é dada pela EQ. 3.49.

$$Y_{TXC(P)} = f_c \left[A_{falha} \left(P^* - P_{spall}^* F_{FAD} \right) \right]^{N_{RUP}} \quad (3.49)$$

A variável f_c é a resistência à compressão uniaxial não confinada, A_{falha} é uma constante da superfície de ruptura, N_{RUP} é o expoente de superfície da ruptura, P^* é a pressão normalizada pela resistência à compressão não confinada f_c , P_{spall}^* é a razão da resistência à tração uniaxial não confinada e resistência à compressão uniaxial não confinada (f_t/f_c), e F_{FAD} é o fator de aumento dinâmico e é definido pela EQ. 3.50 e EQ. 3.51.

$$F_{FAD} = \left[\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right]^{\delta''} \text{ para } P > f_c/3 \text{ (compress\~{a}o)} \quad (3.50)$$

$$F_{FAD} = \left[\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right]^{\alpha''} \text{ para } P > f_t/3 \text{ (tra\~{c}o\~{a}o)} \quad (3.51)$$

Onde δ'' é o expoente da taxa de deforma\~{c}o\~{a}o por compress\~{a}o e α'' é o expoente da taxa de deforma\~{c}o\~{a}o por tra\~{c}o\~{a}o, $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deforma\~{c}o\~{a}o, $\dot{\varepsilon}_0$ é a taxa de deforma\~{c}o\~{a}o inicial e f_t é resist\~{e}ncia à tra\~{c}o\~{a}o uniaxial n\~{a}o confinada. $R_{3(\theta)}$ é o terceiro termo de depend\~{e}ncia invariante. A EQ. 3.52 é a equa\~{c}o\~{a}o que se calcula o $R_{3(\theta)}$.

$$R_3 = \frac{2(1 - Q_2^2)\cos\theta + (2Q_2 - 1)\sqrt{4(1 - Q_2^2)\cos\theta - 4Q_2}}{4(1 - Q_2^2)\cos^2\theta + (1 - 2Q_2)^2} \quad (3.52)$$

Onde θ é calculado pela EQ. 3.53 e Q_2 pela EQ. 3.54.

$$\cos(3\theta) = \frac{3\sqrt{3} J_3}{2(\sqrt[3]{J_2})} \quad (3.53)$$

$$Q_2 = Q_{2,0} + BQ \times P^* \quad (3.54)$$

BQ é o coeficiente de transi\~{c}o\~{a}o de superf\~{i}cie de fratura fr\~{a}gil para d\~{u}ctil e $Q_{2,0}$ é a raz\~{a}o entre a tens\~{a}o de compress\~{a}o e tra\~{c}o\~{a}o a press\~{a}o zero. J_2 e J_3 s\~{a}o o segundo e o terceiro termo invariante da tens\~{a}o desviadora. A EQ. 3.55 cont\~{e}m a matriz de tens\~{a}o desviadora. A EQ. 3.57 e 3.58 s\~{a}o as equa\~{c}o\~{a}es que calculam J_2 e J_3

$$\sigma_{dev} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 - \sigma_m & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_2 - \sigma_m & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_3 - \sigma_m \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

Onde σ_m é a tens\~{a}o m\~{e}dia das tens\~{o}es principais:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \quad (3.56)$$

$$J_1 = \frac{1}{2}(s_{11}^2 + s_{22}^2 + s_{33}^2) \quad (3.57)$$

$$J_2 = s_{11} \times s_{22} \times s_{33} \quad (3.58)$$

3.4.3.2 DANO

A deformação plástica da matéria permite o acúmulo de dano e a redução de resistência. O cálculo do dano acumulado é função da deformação eficaz da fratura ε_p^{frat} e a deformação plástica do material ε_p como mostra a EQ. 3.59. A EQ. 3.60 contém a equação que se obtém a deformação eficaz da fratura o material.

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\Delta \varepsilon_p^{frat}} \quad (3.59)$$

$$\varepsilon_p^{frat} = D_1 * \left(P^* - P_{spall}^* \right)^{D_2^*} \quad (3.60)$$

Onde D_1^* e D_2^* são constantes do material utilizado para descrever o efeito de tensão de fratura em função da pressão.

3.5 MODELO DE FRATURA DE JOHNSON-COOK

Este modelo leva em consideração o aquecimento do material. A EQ. 3.61 apresenta a equação fratura para o modelo de Johnson-Cook (ANSYS, 2011).

$$\varepsilon^f = \left[D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*} \right] + \left[1 + D_4 \ln[\dot{\varepsilon}^*] \right] \left[1 + D_5 T^* \right] \quad (3.61)$$

Onde ε^f é a deformação por fratura dinâmica, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 são constantes de dano do material, σ^* a razão entre a pressão e a tensão de escoamento, $\dot{\varepsilon}^*$ é a taxa de deformação plástica adimensional $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$, para $\dot{\varepsilon}_0=1,0 \text{ s}^{-1}$ e T^* é definida pela EQ. 3.62 (SANTOS, 2012).

$$T^* = \frac{T - T_{amb}}{T_{fusão} - T_{amb}} \quad (3.62)$$

Onde T_{amb} é a temperatura ambiente e $T_{fusão}$ é a temperatura de fusão do material.

3.6 VISCOSIDADE ARTIFICIAL

O termo viscosidade artificial é implementado à simulação para minimizar as oscilações numéricas causada pela descontinuidade na frente da onda de choque, o que provoca elevados gradientes de pressão tornando impossível a solução. Este termo é adicionado no componente de pressão hidrostática das equações de conservação de energia e momentum, com o objetivo de espalhar a frente de onda de choque por duas ou mais células. A EQ. 3.63 contém coeficiente de viscosidades artificiais que são chamados de quadrático (V_{qd}) e de linear (V_{lin}) (AUTODYN, 2005).

$$\left\{ \begin{array}{l} q = \rho \left[\left(V_{qd} \left(\frac{\dot{V}}{V} \right) \right)^2 - V_{lin} \left(\frac{\dot{V}}{V} \right) \right] \text{ para } \frac{\dot{V}}{V} < 0 \\ q = 0 \text{ para } \frac{\dot{V}}{V} = 0 \end{array} \right. \quad (3.63)$$

Onde \dot{V}/V é a taxa de variação de deformação, como mostra a EQ. 3.64.

$$\frac{\dot{V}}{V} = \dot{\epsilon}_{xx} + \dot{\epsilon}_{yy} + \dot{\epsilon}_{\theta\theta} \quad (3.64)$$

As variáveis $\dot{\epsilon}_{xx}$, $\dot{\epsilon}_{yy}$, e $\dot{\epsilon}_{\theta\theta}$, são determinados pela variação das velocidades \dot{x} e \dot{y} em relação aos eixos x e y, demonstradas na EQ. 3.65.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\epsilon}_{xx} = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} \\ \dot{\epsilon}_{yy} = \frac{\partial \dot{y}}{\partial y} \\ \dot{\epsilon}_{\theta\theta} = 0 \quad \text{para geometria plana} \\ \dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \frac{\dot{y}}{y} \quad \text{para geometria axial} \end{array} \right. \quad (3.65)$$

4 EXPERIMENTO

4.1 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado no Centro Tecnológico do Exército (CETEX). Este experimento foi usado como base para análise dos resultados computacionais. A carga usada é similar a que foi implementada ao código do trabalho. Os alvos usados no experimento são: uma camada de aço que é a saída do canhão, outra camada de aço 4140 que simula o revestimento do poço, uma camada cimento que simula a coluna de cimentação e o arenito Berea com fluido isoparafina contido em seus poros.

Antes de realizar o disparo da carga contra os alvos são realizados preparativos no arenito Berea. Primeiro este é secado em uma estufara para retirada total de fluido presente em seus poros como mostra a FIG. 4.1.



FIG. 4.1 À esquerda a estufa e à direita o arenito Berea dentro da estufa.

Depois do processo de secagem, o arenito Berea é saturado com o fluido isoparafina. Neste processo o arenito é posto em um cilindro, e sob vácuo o fluido isoparafina penetra nos poros do arenito como mostra a FIG. 4.2.



FIG. 4.2 Cilindros contendo o arenito Berea saturado com o fluido isoparafina.

O arenito Berea então é colocado no vaso de pressão onde contém a carga oca e os seguintes alvos: saída do canhão, revestimento do poço de aço 4140, cimento e arenito Berea como ilustra a FIG. 4.3. Em seguida o vaso de pressão exerce pressões tanto na região da carga moldada para efeito de simular o poço, quanto na região que contém os alvos para simular pressões existentes na formação. A rocha é fixada por um apoio que faz a regulagem para vários tamanhos de amostras conforme mostra a FIG. 4.3. Para efeito de confinamento da rocha no reservatório, o arenito é submetido à um confinamento com o fluido isoparafina dentro da câmara de confinamento contida no vaso de pressão, criando assim a pressão do fluido dentro do reservatório. A FIG. 4.4 contém o vaso de pressão usado no experimento.

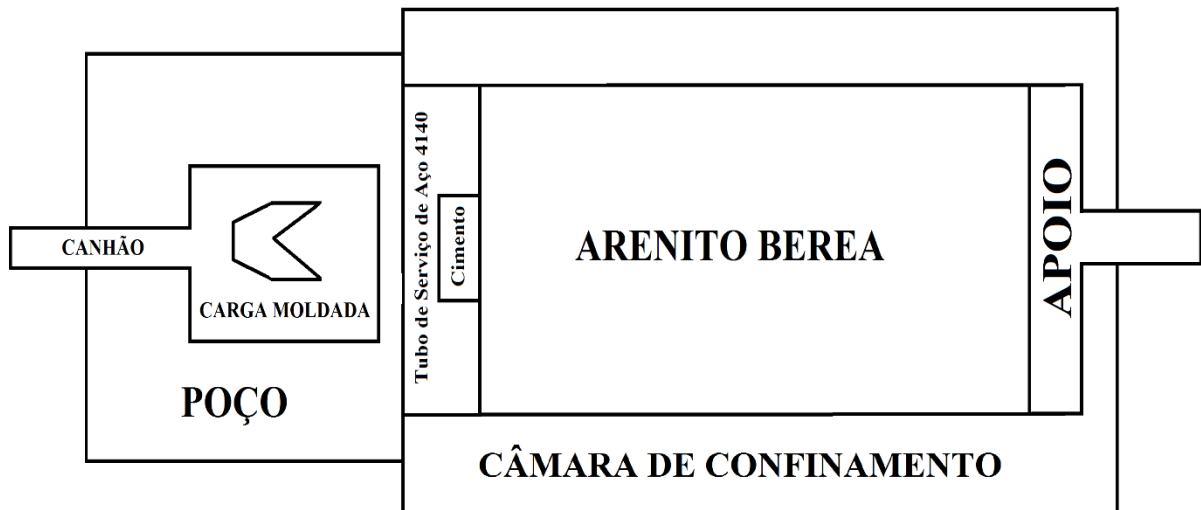


FIG. 4.3 Ilustração do vaso de pressão para o experimento de canhoneio.



FIG. 4.4 Vaso de pressão usado no experimento de canhoneio.

O acionamento do canhão ocorre depois que é realizado o teste de fluxo de fluido sem a rocha estar canhoneada (pré-fluxo). O disparo é acionado por um sistema de controle que também acompanha as condições do arenito Berea. O experimento é automatizado e conduzido por um sistema de controle que estava em outra sala por questão segurança. A FIG. 4.5 contém a foto do equipamento que possui o sistema de controle do experimento.



FIG. 4.5 Equipamento de controle e acionamento de canhoneio.

O teste de tiro foi feito pelo acionamento do canhão, onde ocorre a detonação do explosivo que cria a onda de detonação e colapsa o revestimento de cobre. O revestimento colapsado forma o jato que passa pela distância ótima entre a carga e o primeiro alvo (*stand-off*) em que se prolonga, atingindo assim a placa de aço da saída do canhão, o revestimento do poço de aço 4140, o cimento e causando a perfuração do arenito Berea.

Após a execução do teste de tiro é então realizado o pós-fluxo, isto é, é realizado o teste de fluxo de fluido na rocha canhoneada. O resultado é comparado com o obtido no pré-fluxo.

4.2 CARGA MOLDADA

A carga é composta por um invólucro, material explosivo e o revestimento. O invólucro é composto por alumínio. O explosivo é o RDX (Research Department X) e o material que compõe o revestimento é o cobre. A FIG. 4.6 ilustra uma carga similar à usada durante o experimento. Pode-se observar em azul o invólucro e rosado o revestimento de cobre que forma o jato após a detonação do explosivo contido dentro do cone.

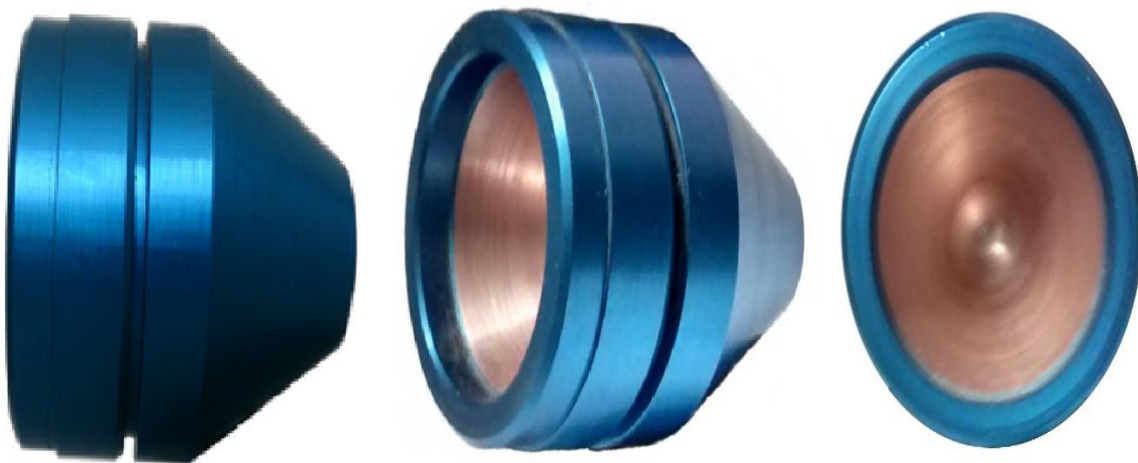


FIG. 4.6 À esquerda a visão lateral da carga, ao meio a carga em perspectiva e à direita a visão frontal da carga similar ao do experimento.

4.3 ALVOS

Antes de atingir os alvos, o jato percorre a distância ótima (*stand-off*). Para o experimento há uma peça onde a carga foi encaixada e fixada. Esta peça permite produzir o alongamento do jato o que favorece maior penetração nos alvos. A FIG. 4.7 mostra a peça usada para obter a distância ótima dos alvos.



FIG. 4.7 Peça de encaixe da carga para distanciamento ótimo até os alvos (“stand-off”).

Os alvos são compostos por quatro camadas. A primeira camada é a que compõe a saída do canhão, o material que a compõe é um aço com limite de resistência de 130 ksi. A FIG. 4.8 ilustra a camada de aço que é a saída do canhão.



FIG. 4.8 Peça de aço simulando a saída do canhão de aço.

A segunda camada é composta por uma camada de aço 4140 que representa o revestimento do poço onde descem os equipamentos usados no poço. A FIG. 4.9 contém foto desta camada de aço usada no experimento.



FIG. 4.9 Placa simulando o revestimento do poço de aço 4140.

As três peças das FIG. 4.7, FIG. 4.8 e FIG. 4.9 foram encaixadas e posicionadas em frente as últimas camadas. Na FIG. 4.10 tem-se a foto das três peças encaixadas na ordem de cima para baixo as peças das FIG. 4.7, FIG. 4.8 e FIG. 4.9.



FIG. 4.10 Montagem do conjunto: acima é o encaixe da carga para distanciamento ótimo até os alvos, no meio o a saída do canhão e abaixo o revestimento do poço.

A terceira camada contém o cimento e representa a coluna de cimentação. Esta coluna permite a estabilidade entre a formação rochosa e o poço. Para o experimento foi usado uma

peça de cimento envolvida com aço para encaixe e contenção do cimento A FIG. 4.11 ilustra a peça que contém cimento já perfurado no centro, após o tiro, e em volta a peça de aço.



FIG. 4.11 Peça com cimento perfurado ao meio e aço em volta.

A quarta camada de alvo usada pelo experimento foi o arenito Berea. Este arenito é muito usado para simular o reservatório que contém o petróleo. Este arenito possui poros, o que permite a presença de fluido dentro destes, como se fosse petróleo. O fluido usado para simular o petróleo foi o isoparafina de densidade de 72,4g/ml. Durante o teste o arenito continha este fluido isoparafina sob pressão em seus poros, e também estava sob pressão hidrostática exercida pelo equipamento ao fluido em volta do arenito Berea. A FIG. 4.12 contém a foto do arenito Berea, e as propriedades do arenito Berea estão presentes na TAB. 4.1.

TAB. 4.1 Propriedades do Arenito Berea

Propriedades	Peso (kg)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Porosidade (α)
Arenito Berea	24,194	177,292	454,025	18,1



FIG. 4.12 Arenito Berea após o experimento exibindo a perfuração.

A TAB. 4.2 contém os valores de distanciamento ótima da carga para o alvo (“*stand-off*”), as dimensões das camadas da saída do canhão, do revestimento do poço, do cimento e o arenito Berea.

TAB. 4.2 Dados das espessuras das camadas e a da distância ótima (*stand-off*).

Dados	<i>stand-off</i>	Saída do canhão	Revestimento do poço	Cimento	Arenito Berea
Espessura (mm)	15,748	3,175	12,7	19,05	454,025

4.4 RESULTADOS

Depois do teste a amostra de Berea foi retirada e cortada ao meio no sentido longitudinal para verificar o quanto o jato perfurou a rocha. Ao cortar a rocha foram obtidos dois pedaços de amostra do arenito: um contendo o pedaço do jato localizado no final do túnel (círculo vermelho) e o outro com a medição de quanto foi perfurado, conforme mostra a FIG. 4.13.

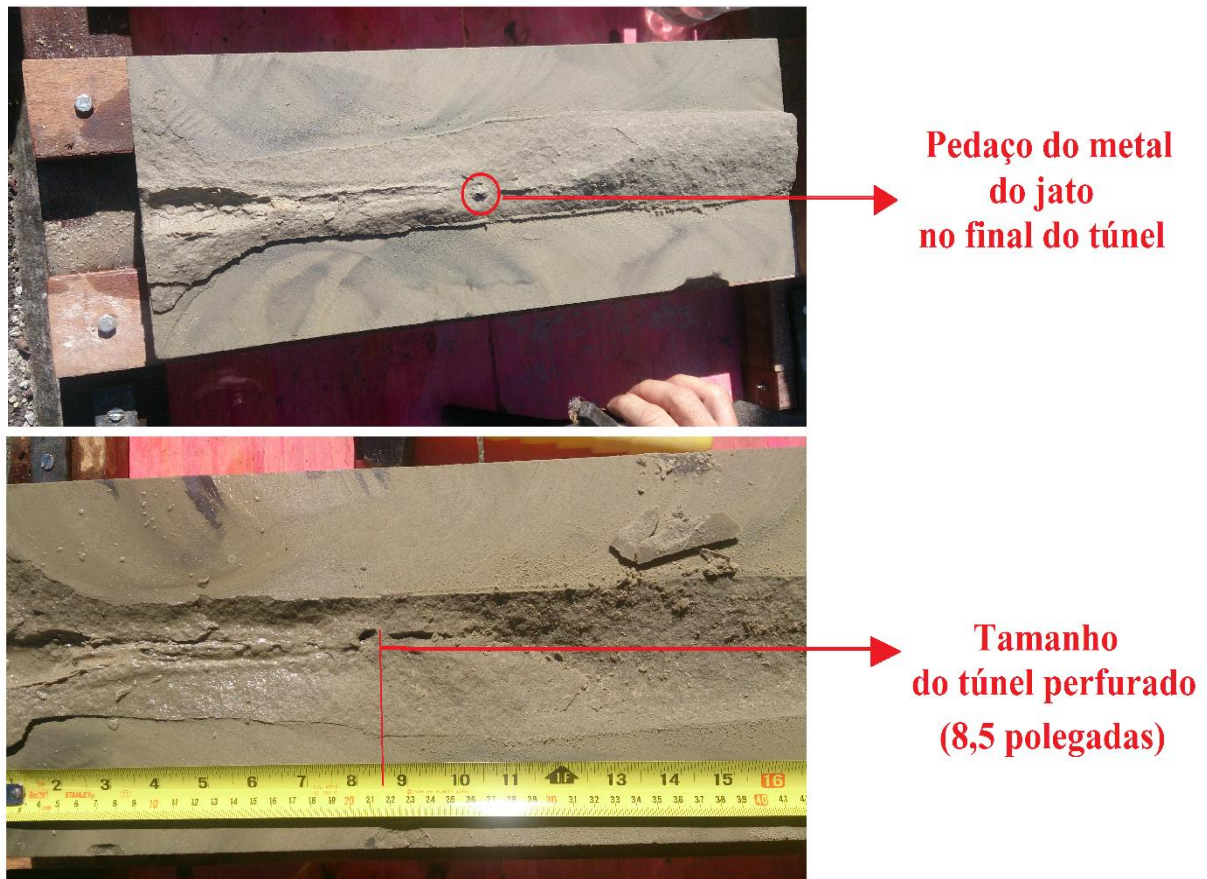


FIG. 4.13 Arenito Berea seccionado: acima um lado do arenito Berea contendo o pedaço do jato no final do túnel (círculo vermelho) e abaixo com a medição da perfuração.

Além da perfuração, os diâmetros produzidos com o canhoneio também foram verificados em cada alvo. A TAB. 4.3 contém os diâmetros máximos e mínimos produzidos nos alvos: placa de aço da saída do canhão, revestimento do poço e cimento. Os valores se apresentaram dentro do esperado, já que os valores de diâmetros máximos diminuem a cada alvo. O aumento do diâmetro mínimo entre a primeira e a segunda camada é esperado, pois o jato forma perfurações irregulares, como é mostrado na FIG. 4.14.

TAB. 4.3 Diâmetros máximos e mínimos da perfuração produzida na placa de aço da saída do canhão, no revestimento do poço e no cimento.

Peças	Placa de aço da saída do canhão	Revestimento do poço	Cimento
Diâmetro máx. (mm)	11,43	11,17	10,16
Diâmetro mín. (mm)	9,144	10,16	8,89



FIG. 4.14 Placa de aço simulando a saída do canhão de aço perfurada após experimento.

A TAB. 4.4 contém os valores de penetração na rocha, os diâmetros máximos e mínimos de entrada na rocha, diâmetro máximo no túnel e a 90% de comprimento do túnel do arenito Berea.

TAB. 4.4 Resultados obtidos no Arenito Berea.

Dados	Penetração (mm)	Diâmetro de entrada (mm)		Diâmetro máx. no túnel (mm)	Diâmetro a 90% de túnel (mm)
		Máximo	Mínimo		
Berea	215,9	15,748	14,9860	26,6192	11,43

5 VALIDAÇÃO DO CÓDIGO

Para a validação do código usado no AUTODYN foram simuladas duas cargas ocas de revestimento metálico. A primeira não possui invólucro e sua geometria é plana. Esta carga tem como referência o trabalho realizado por NEVES (2013), que faz uso do Método Hidrodinâmico de Partícula Suavizada (SPH – Smoothed Particle Hydrodynamics) para simulação da carga. A segunda carga é de aplicação civil, possui invólucro e sua geometria é axial. ELSHENAWY (2014) usa o programa AUTODYN para simular esta segunda carga e para cálculo da velocidade do jato usa a teoria de PER.

5.1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM UMA CARGA SEM INVÓLUCRO E GEOMETRIA PLANA

Para validação desta simulação foram comparados os resultados com os resultados computacionais de NEVES (2013) para uma carga composta pelo explosivo Composto B e revestimento de aço macio do tipo SAE 1006. Esta carga não possui involucro que envolve o explosivo, e sua geometria é plana. O explosivo possui 28,45 mm de comprimento, 25,4 mm de diâmetro, uma cavidade cônica com ângulo de 80° e simetria plana. O revestimento apresenta espessura de 1,35 mm. Esta carga foi retirada do trabalho publicado por GAZONAS et al em 1995. A diferença entre as cargas de GAZONAS et al(1995) e de NEVES (2013) é que a carga de GAZONAS et al(1995) contém invólucro e a do trabalho de NEVES (2013) não contém invólucro. A FIG. 5.1 contém a carga planar com involucro de GAZONAS et al (1995).

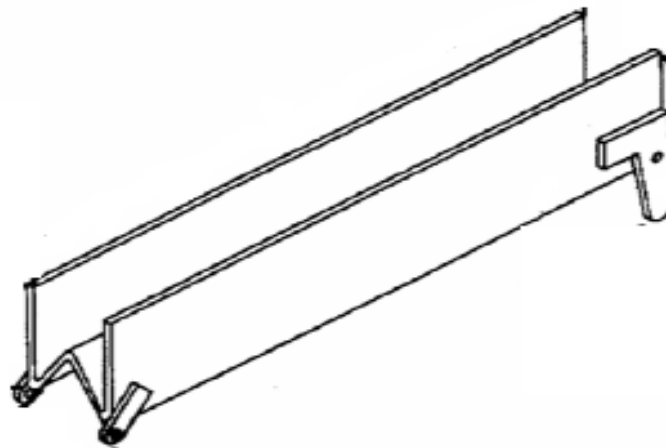


FIG. 5.1 Carga oca planar de GAZONAS et al (1995).

A simulação da carga é realizada na malha Euleriana com as equações de conservação descrita na seção 3.2 e Equação de Estado do Material e de JWL (Jones-Wilkins-Lee) descritas nas seções 3.3.1 e 3.3.3. Para descrever o comportamento tensão-deformação do jato faz-se uso da equação constitutiva do Modelo de Johnson-Cook, apresentada na seção 3.4.1. Na seção 3.6 contém a equação com a viscosidade artificial. Os valores das viscosidades artificial linear e quadrática para a simulação são 0,2 e 1,0 respectivamente.

A simulação do explosivo se dá por uma onda de detonação pontual no ponto (0,0) que se inicia-se na extremidade esquerda do explosivo e avançando contra o revestimento. A FIG. 5.2 onde contém tanto carga reproduzida neste trabalho como no de NEVES (2013), indicando total similaridade entre elas.

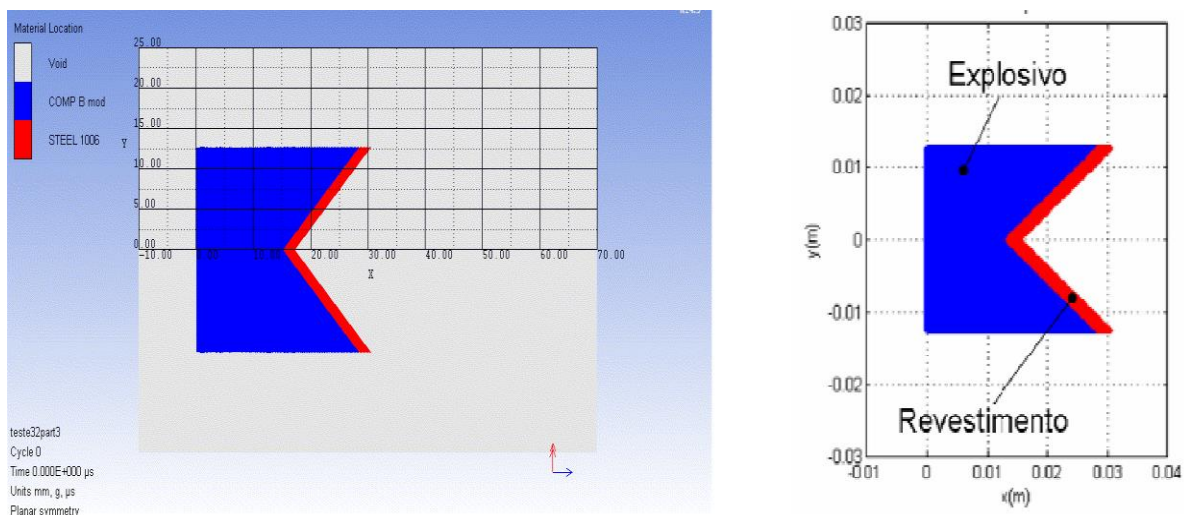


FIG. 5.2 À esquerda a configuração da carga inicial para este trabalho e à direita a configuração da carga inicial para o trabalho de NEVES (2013).

Os parâmetros para as equações de estado Mie-Grüneisen do aço SAE 1006 estão na TAB. 5.1 e a TAB. 5.2 contém os parâmetros do modelo constitutivo Elástico Perfeitamente Plástico e de Johnson-Cook. Para o explosivo Composto B é utilizada a equação de estado de Jones-Wilkins-Lee, cujo os parâmetros estão na TAB. 5.3,

TAB. 5.1 Parâmetros da EOS Mie-Grüneisen do aço SAE 1006 (NEVES, 2013).

Material	ρ_0 (g / cm ³)	C_0 (km / s)	s_1	γ
Aço SAE 1006	7,896	4,569	1,49	2,17

TAB. 5.2 Parâmetros dos modelos constitutivos Elástico Perfeitamente Plástico e de Johnson-Cook, para o aço SAE 1006 (NEVES, 2013).

Material	G (GPa)	σ_y (MPa)	A' (MPa)	B' (MPa)	C''	n	m	$T_{fusão}$ (K)
Aço SAE 1006	81,8	600,0	350,0	275,0	0,022	0,36	1,00	1811

TAB. 5.3 Parâmetros na relação linear de choque e parâmetros da EOS JWL do explosivo Composto B (NEVES, 2013).

ρ_0 (g/cm ³)	U_D (km/s)	C_0 (km/s)	P_{CJ} (GPa)	A (GPa)	B (GPa)	R_1	R_2	w	U_0 (J/kg)
1,717	7,980	3,078	29,5	524,2	7,678	4,20	1,10	0,34	4,95E6

O número total de partículas usados no modelo SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) de NEVES (2013) é de 30.850. Já neste trabalho a malha é composta por 890.000 nós, sendo que a distribuição da malha é de 0,04 mm por 0,1 mm acima da carga ($\Delta y=17$ mm) e refinada 0,04 mm por 0,04 mm na região da vertical em que se encontra a carga ($\Delta y=13$ mm).

Durante a simulação foram verificadas a pressão, velocidade absoluta do explosivo e massa específica do explosivo no revestimento dentro do tempo de 0 μ s até 15 μ s. A FIG. 5.3 apresenta

as pressões devido a detonação da carga, no instante de 1,5 μ s, considerado imediatamente antes da onda de choque atingir o vértice do revestimento

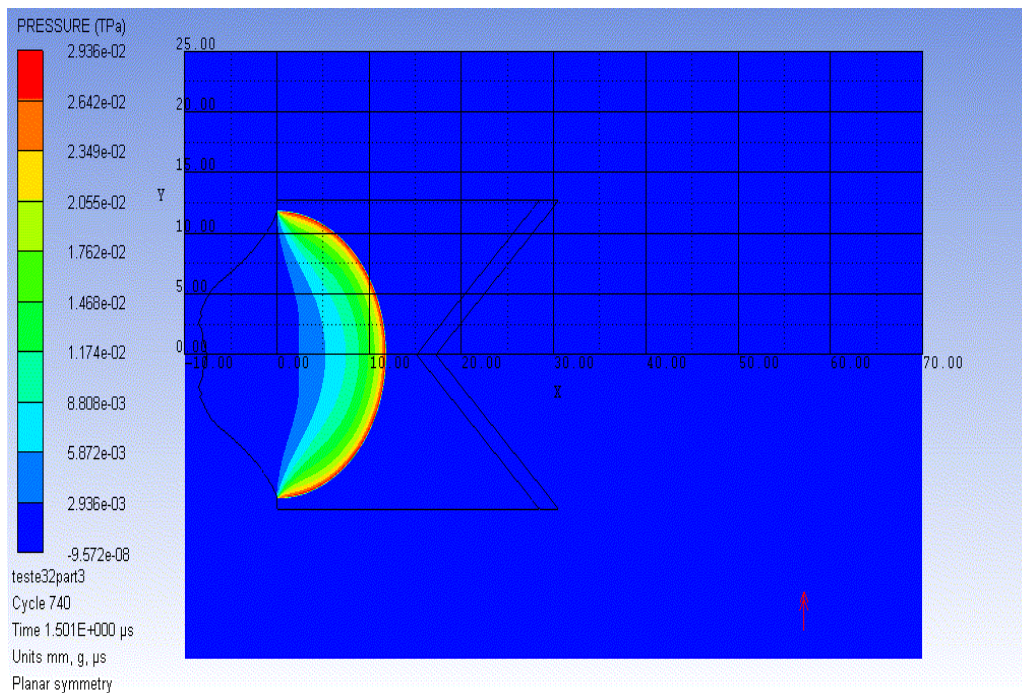


FIG. 5.3 Pressões devido a detonação da carga sem invólucro no instante de 1,5 μ s.

Os valores de máxima pressão e distância percorrida pela onda de detonação encontrados na simulação e no trabalho de NEVES (2013) no tempo de 1,5 μ s são apresentados na TAB. 5.4, assim como a diferença percentual entre os dois trabalhos. A TAB. 5.5 contém também os valores da pressão de Chapman-Jouguet e a distância calculada com a velocidade de detonação do explosivo, indicando também a diferença percentual entre os valores.

TAB. 5.4 Dados dos valores de máxima pressão e distância percorrida pela onda de detonação no tempo de 1,5 μ s em relação ao trabalho de NEVES (2013).

Dados	Máxima Pressão	Distância da onda de choque
Simulação	29,36 Gpa	11,652mm
NEVES (2013)	29,13Gpa	11,94mm
Diferença percentual entre NEVES (2013) e a Simulação	0,79%	2,41%

TAB. 5.5 Dados dos valores de máxima pressão e distância percorrida pela onda de detonação no tempo de 1,5 μs e comparados à Pressão de Chapman-Jouguet e distância calculada com a velocidade de detonação do explosivo.

Dados	Máxima Pressão	Distância da onda de choque
Simulação	29,36 Gpa	11,652mm
Pressão de Chapman-Jouguet	29,5Gpa	-
Distância calculada com a velocidade de detonação do explosivo.	-	11,97mm
Diferença percentual	0,475%	2,66%

Na FIG. 5.4, observa-se o fenômeno do empilhamento de massa na ponta do jato, semelhante ao de NEVES (2013) no tempo de 12 μs .

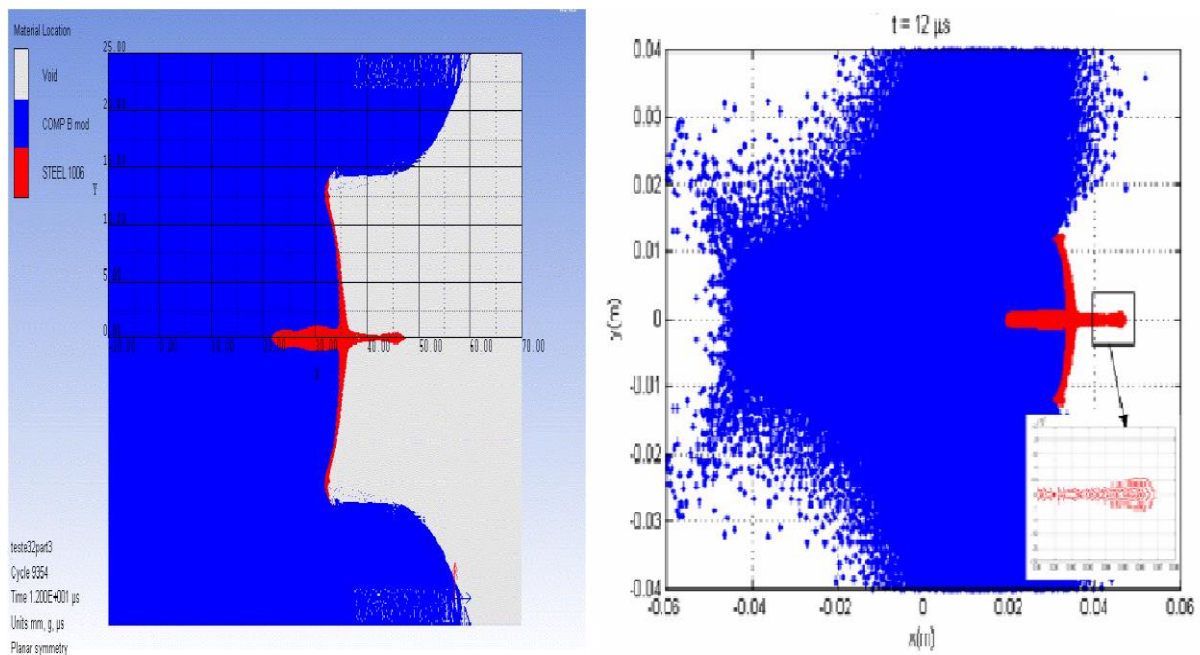


FIG. 5.4 Empilhamento de massa na ponta do jato, à esquerda a carga no tempo de 12,0 μs e à direita a carga do trabalho de NEVES (2013) neste mesmo instante.

A TAB. 5.6 contém o valor da distância em que se localiza a ponta do jato no instante de 12,0 μs e a diferença percentual entre o valor encontrado no trabalho de NEVES (2013) e a simulação.

TAB. 5.6 Dados dos valores da distância em que se localiza a ponta do jato no instante de 12 μ s.

Dados	Simulação (mm)	NEVES(2013) (mm)	Diferença percentual entre NEVES (2013) e a Simulação(%)
Localização da pontado jato	46,8	47,58	1,667

A simulação no AUTODYN foi de 0 até 15 μ s e com o passo de tempo na faixa de 10^{-9} s a 10^{-10} s. A duração do teste foi de 10 horas. As curvas obtidas para os valores máximos de pressão e massa específica do revestimento, coletados no mesmo instante de tempo de NEVES (2013) sem invólucro, estão apresentadas nas FIG. 5.5 e FIG. 5.6.

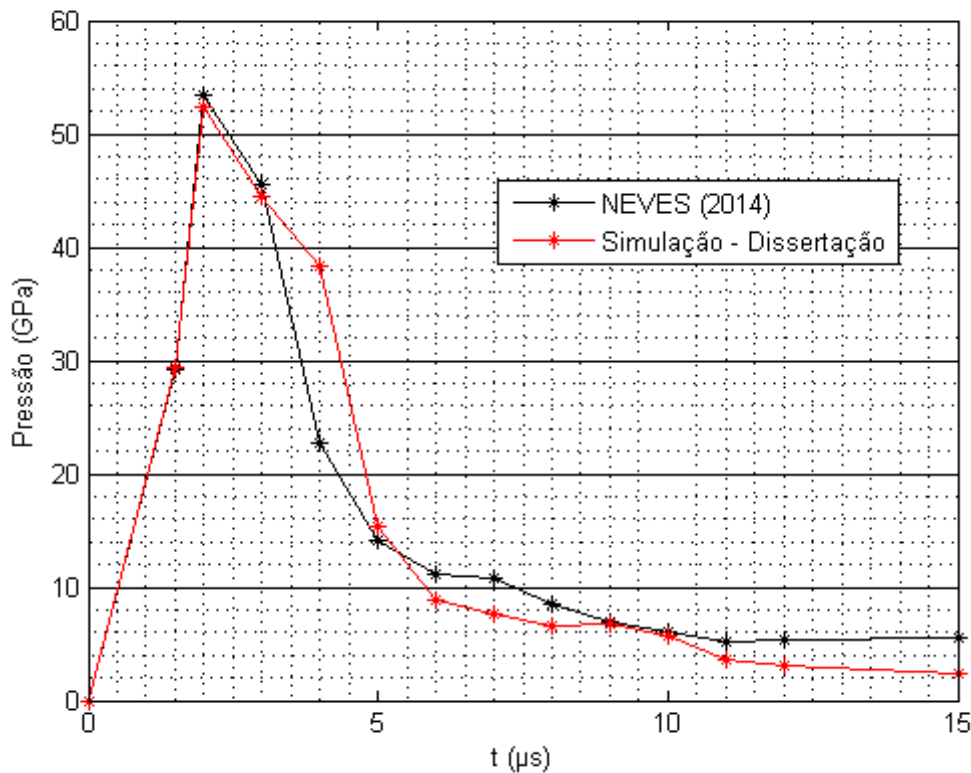


FIG. 5.5 Pressão máxima no revestimento da carga oca ao longo do tempo.

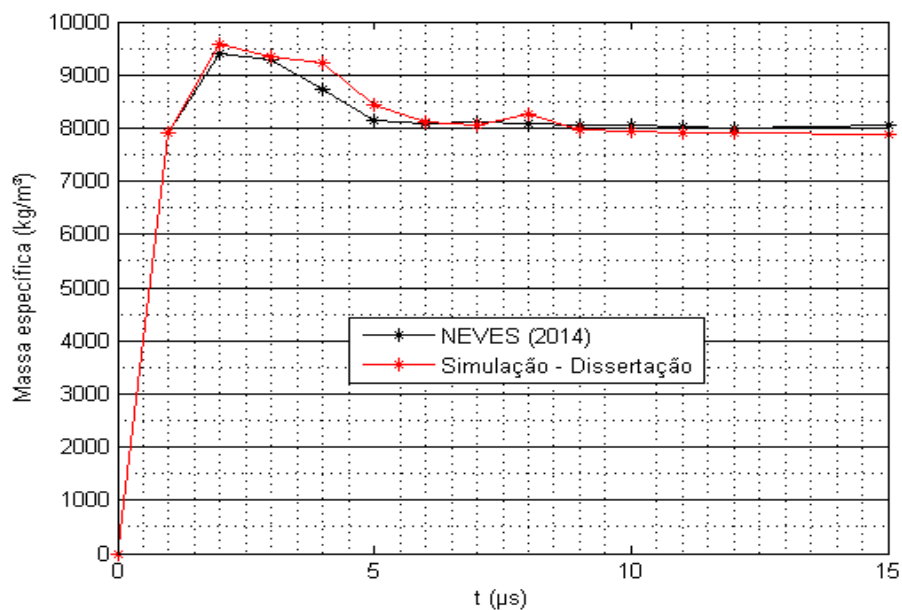


FIG. 5.6 Massa específica máxima no revestimento da carga oca ao longo do tempo.

Os valores das velocidades máximas dos jatos, nessa simulação e na simulação de NEVES(2013), estão apresentados na FIG. 5.7. A diferença entre os dois métodos se dá devido ao fato dos métodos possuírem aproximações diferentes, visto que um trabalho usa o método SPH e o outro método das diferenças finitas.

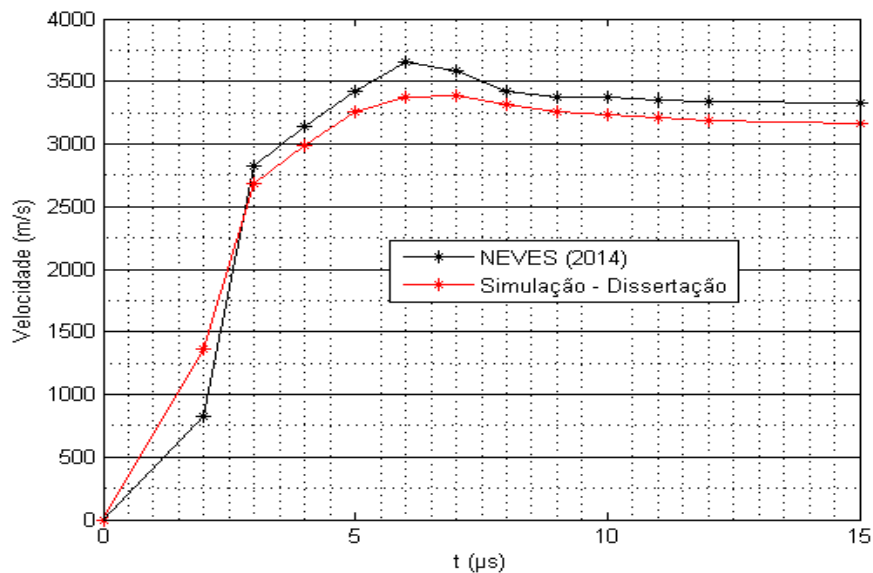


FIG. 5.7 Velocidade máxima na ponta do jato da carga oca ao longo do tempo

Foram comparados os valores máximos encontrado em cada gráfico apresentado e estão disponíveis na TAB. 5.7.

TAB. 5.7 Dados dos valores de máxima pressão, velocidade e massa específica no tempo de 0 a 15 μ s do trabalho de NEVES (2013) e da simulação.

	Simulação	NEVES (2013)	Diferença percentual
Pressão máxima	52,39 GPa	53,5 GPa	2,07%
Massa específica máxima	9570 kg/m ³	9409 kg/m ³	1,71%
Velocidade máxima	3650 m/s	3373,6 m/s	8,21%

5.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM UMA CARGA COM INVOLUCRO E GEOMETRIA AXIAL

Para a validação do código foi realizado a simulação da carga usada por ELSHENAWY (2014) em seu trabalho. Neste trabalho a carga usada tem aplicabilidade da perfuração de poços de petróleo e foi realizada duas simulações computacionais com o programa AUTODYN e testes experimentalmente. Na primeira simulação, ele fez uso da ferramenta JETTING, onde são calculadas as velocidades tanto da escória quanto da cabeça do jato com a teoria de PER (Pugh, Eichelberger e Rostoker). Na segunda simulação, ELSHENAWY implementa a carga na malha Euleriana e são verificadas o perfil e formato do jato. O teste experimental é realizado com o modelo API (2004).

A geometria da carga é da forma axial e diferentemente da anterior verificada com relação ao trabalho de NEVES (2013), esta possui involucro. O material que constitui o invólucro é o aço, o revestimento é o cobre e o explosivo usado na simulação é o PE4. A FIG. 5.8 ilustra a carga usada por ELSHENAWY (2014) nos testes experimentais e no modelo implementado no programa AUTODYN quanto a malha Euleriana. Os dados da geometria fornecida pelo trabalho de ELSHENAWY (2014) estão na TAB. 5.8.

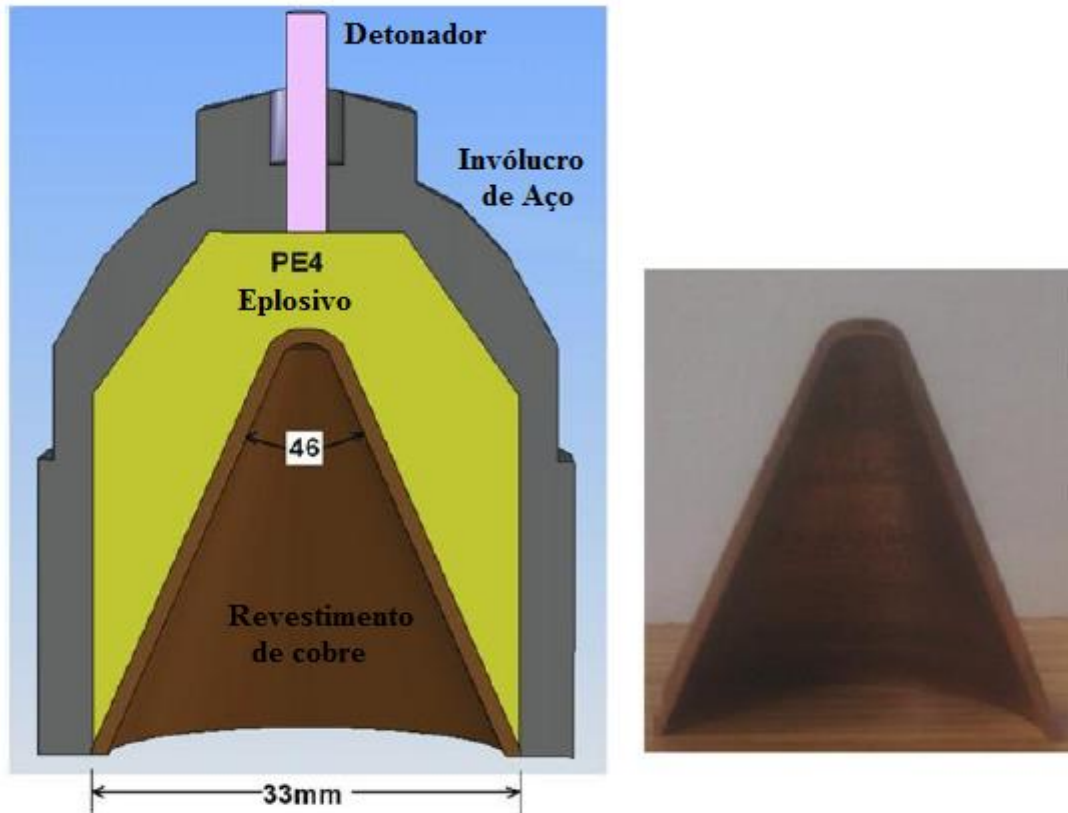


FIG. 5.8 Carga usada para o modelo computacional (à esquerda) e usada para os testes experimentais (à direita) por ELSHENAWY(2014).

TAB. 5.8 Dados da geometria da carga do trabalho de ELSHENAWY(2014).

Diâmetro da base do revestimento (mm)	Ângulo do vértice do cone	Espessura da parede do cone (mm)	Espessura do invólucro (mm)
33	46°	1,4	4,5

As equações de conservação usadas para simular a carga estão presentes na seção 3.2, as equações de estado do Material e de JWL (Jones-Wilkins-Lee) , presente nas seções 3.3.1 e 3.3.3 e a equação constitutiva é a Johnson-Cook na seção 3.4.1. A equação com as viscosidades artificial é a EQ. 3.63, apresentada na seção 3.6. Os valores para as viscosidades artificial para esta simulação é 1,0 para a quadrática e 0,2 para a linear. A TAB. 5.9 contém os parâmetros de entrada do cobre e do aço para as equações de estado. Os parâmetros da equação de estado do explosivo PE4 estão presentes na TAB. 5.10.

TAB. 5.9 Dados de entrada para o aço e cobre (ELSHENAWY, 2014).

Parâmetros	Aço	Cobre OFHC
Massa específica (g/cm ³)	7,83	8,90
A' (MPa)	792	-
B' (MPa)	510	-
n	0,26	-
C	0,014	-
m	1,03	-
γ	1,93	2,02
C_0 (m/s)	4568	3940
s	1,4	1,489
$T_{ambiente}$ (K)	300	300
$T_{fusão}$ (K)	2380	1356

TAB. 5.10 Dados de entrada para o explosivo PE4 (ELSHENAWY, 2014).

ρ_0 (g/cm ³)	A'' (kPa)	B'' (kPa)	R_1	R_2	U_D	P_{CJ} (kPa)	Energia por unidade de volume (kJ/m ³)	w
1,6	$6,098 \times 10^8$	$1,298 \times 10^7$	4,5	1,4	8193	$2,8 \times 10^7$	9×10^6	0,25

A FIG. 5.9 ilustra em diferentes tempos o alongamento do jato do trabalho de ELSHENAWY(2014) e a simulação. A simulação no AUTODYN foi de 0 até 18 μ s e com o passo de tempo na faixa de 10^{-9} s a 10^{-10} s. A duração do teste foi de treze minutos devido ao refinamento da malha que é de 0,3mm por 0,3mm.

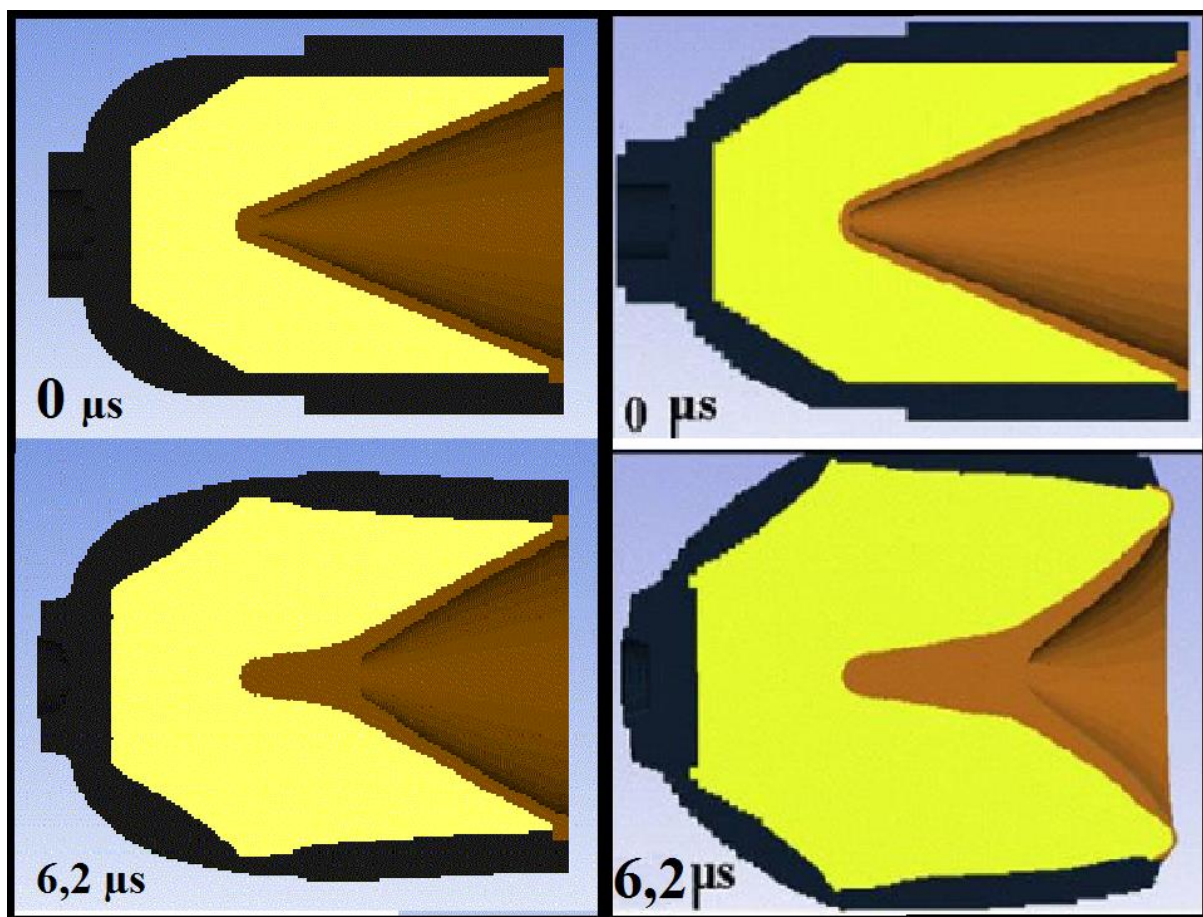


FIG. 5.9 Carga simulada (à esquerda) e de ELSHENAWY (2014) (à direita) no tempo de 0 e 6,2 μs .

As velocidades do jato encontradas no tempo de 12 μs da simulação e do trabalho de ELSHENAWY (2014) estão na TAB. 5.11. Nesta tabela há também o valor da diferença percentual das duas simulações. A diferença de 11,84% entre as duas simulações se dá pelo fato de ELSHENAWY utiliza além das equações implementadas na simulação deste trabalho, a ferramenta JETTING que calcula a velocidade da cabeça do jato e da escória pela teoria de PER (Pugh, Eichelberger e Rostoker) mencionada na seção 2.1.2.

TAB. 5.11 Valor da velocidade no tempo 12 μs para simulação e para o trabalho de ELSHENAWY(2012).

	ELSHENAWY(2012)	Simulação	Diferença %
Velocidade (m/s)	6698	5905	11,84%

6 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 verificados os dados de condições iniciais, como o material usado, as equações de estado e constitutivas usadas para cada material, a configuração geométrica da carga e do alvo, e malhas aplicadas.

Neste capítulo os materiais usados tanto para carga quanto para os alvos estão descritos nas seções 6.1 e 6.2 respectivamente. A configuração geométrica da carga oca usada em todas as simulações está descrita na seção 6.3. Para a modelagem dos alvos, foram feitos vários tipos de configurações geométricas. Uma contendo parâmetros retirados de literaturas descrita na seção 6.4 e outra com os parâmetros do experimento do capítulo 4 que está descrita na seção 6.5 e seção 6.6.

6.1 MATERIAIS USADOS NA CARGA OCA

Para a elaboração da carga oca são usados três materiais: o aço 4340 que compõe o invólucro, o explosivo RDX e o cobre OFHC que foi usado no revestimento.

6.1.1 INVÓLUCRO DA CARGA

O invólucro responde pelo grau de confinamento do explosivo em uma carga oca. As finalidades do invólucro em uma carga oca são fornecer uma fragmentação com estilhaços, evitar a liberação prematura da energia química do explosivo minimizando a quantidade de explosivo utilizado na carga e manter a pressão de detonação alta e, assim, alterar ou manter o gradiente de velocidade do jato (WALTERS & ZUKAS, 1989).

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 solicitação. Uma das aplicações importantes do aço 4340 é a sua utilização em componentes estruturais críticos para veículos espaciais e trens de pouso de aeronaves (ANAZAWA et al, 2012).

A equação de estado usada na simulação para o invólucro é a equação do material (ou de choque), e a equação constitutiva é a equação de Johnson-Cook. A TAB. 6.1 contém os dados de entrada para o AUTODYN que caracterizam o invólucro

TAB. 6.1 Dados de entrada do invólucro (aço 4340) (ELSHENAWY, 2012).

Parâmetro	Valor
Equação de Estado do Material	
Massa específica de referência ρ_0 (g / cm^3)	7,83
Coeficiente de Gruneisen	1,93
Parâmetro C_0 (km/s)	4,569
Parâmetro s_1	1,4
Temperatura de referencia (K)	300
Equação Constitutiva de Johnson-Cook	
Tensão de escoamento A' (MPa)	792
Constante de endurecimento B' (TPa)	510
Expoente de endurecimento n	0,26
Taxa de deformação constante C'	0,014
Expoente de amolecimento térmico m	1,03
Módulo de cisalhamento (GPa)	81,8
Temperatura de fusão (K)	2338

6.1.2 EXPLOSIVO DA CARGA

O explosivo usado para elaborar a carga oca deve ter alta velocidade de detonação e elevada densidade para proporcionar uma elevada pressão de detonação que resulte em grande

velocidade de ponta do jato metálico e maior profundidade de penetração. O explosivo usado neste trabalho é o RDX (Research Department X). A equação de estado para os explosivos usados é a 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 (ELSHENAWY, 2012). A TAB. 6.2 contém os dados de entrada do explosivo para a equação de Jones-Wilkins-Lee usados no programa AUTODYN.

TAB. 6.2 Dados de entrada do explosivo RDX (ELSHENAWY, 2012).

ρ_0 (g / cm ³)	U_D (km / s)	P_{CI} (GPa)	A (GPa)	B (GPa)	R_1	R_2	w	U_0 (kJ / m ³)
1,600	8,1	26	653,9	729,3	4,83	2,24	0,3	$5,62 \times 10^6$

6.1.3 REVESTIMENTO DA CARGA

O material usado no revestimento da 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. Os dados de entrada para o AUTODYN estão contidos na TAB. 6.3.

TAB. 6.3 Dados de entrada do revestimento de cobre (CU-OFHC) (ELSHENAWY, 2012).

Parâmetro	Valor
Equação de Estado do Material	
Massa específica de referência ρ_0 (g / cm ³)	8,9
Coefficiente de Grüneisen	2,02
Parâmetro C_0 (km/s)	3,940
Parâmetro s_1	1,489
Temperatura de referencia (K)	300

6.2 MATERIAIS USADOS NOS ALVOS

A primeira e segunda simulações contém três materiais e na terceira simulação foram implementados quatro materiais. A primeira e segunda simulações dos alvos são compostas pelo revestimento do poço, coluna de cimentação e a rocha do reservatório. O material do revestimento do poço é o tubo A25 PSL1 F, por onde desce o canhão. Para a coluna de cimentação o material empregado é o cimento CONC-35MPa que é usado para revestir e proteger o poço de possíveis desmoronamentos. O material que compõe o reservatório é o arenito Berea que é similar as rochas encontradas em campos de petróleo.

Na modelagem da terceira simulação os materiais são aqueles empregados no experimento, incluindo agora a placa de aço que simula a saída do canhão, que não foi usada nas outras simulações. O material usado na saída do canhão é o aço 4130, no revestimento do poço é o aço 4140, o cimento é o mesmo das simulações anteriores CONC-35 MPa e o material que simula a rocha é o arenito Berea.

6.2.1 REVESTIMENTO DO POÇO A25 PSL1 F

O revestimento do poço tem a função de permitir o fluxo de petróleo do reservatório à plataforma, conforme exemplifica a FIG.1.4. Durante o canhoneio, o revestimento do poço é a primeira camada de material com que o jato entra em contato para a primeira e a segunda simulações. Existem vários tipos de tubos, e o usado na primeira e segunda simulações é o tubo A25 PSL1 F. A norma API 5L 43^aed. contém dados do tubo, assim como o dimensionamento deste. A equação de estado usada no código computacional é a Equação de Estado do Material. Para a equação constitutiva tem-se a equação de von Mises. Os dados de entrada do revestimento do poço para o AUTODYN estão presentes na TAB. 6.4.

TAB. 6.4 Dados de entrada do revestimento do poço A25 PSL1 F.

Parâmetro	Valor
Equação de Estado do Material	
Massa específica de referência ρ_0 (kg/cm ³) ¹	0,0078
Coefficiente de Grüneisen ²	2,17
Parâmetro C_0 (km/s)	4,58
Parâmetro s_1 ³	1,49
Temperatura de referencia (K)	300
Equação Constitutiva de von Mises	
Módulo de Cisalhamento (GPa) ¹	79,9
Tensão de escoamento (MPa) ¹	172,0

¹ API 5L (2004);

² ELSHENAWY (2012);

³ MARSH (1980) Steel -304;

6.2.2 PEÇA DE AÇO SIMULANDO A SAÍDA DO CANHÃO

A saída do canhão é o material que compõe a primeira camada para terceira simulação. Para a simulação da saída do canhão o aço empregado é o aço 4130, devido ao valor do seu limite de resistência (130ksi) ser similar ao aço usado na placa que simula a saída do canhão. Os dados do aço 4130 foram retirados do banco de dados do próprio software AUTODYN. Os dados de entrada da peça de aço 4130 para o AUTODYN estão presentes na TAB. 6.5. A equação de estado usada é a de Tillotson e para a equação constitutiva tem-se a equação de von Mises.

TAB. 6.5 Dados de entrada da peça de aço 4130.

Parâmetro	Valor
Equação de Estado de Tillotson	
Massa específica de referência ρ_0 (kg/cm ³) ¹	0,0078
Parâmetro c	0,128
Parâmetro d	0,105
Parâmetro a	0,5
Parâmetro b	1,5
Parâmetro β''	5,0
Parâmetro β'	5,0
Parâmetro e_0 (kJ/g)	9,49
Parâmetro e_s (kJ/g)	2,44
Parâmetro e_s' (kJ/g)	10,19
Temperatura de referencia (K)	300
Calor específico (kJ/gK)	0,000452
Equação Constitutiva de von Mises	
Módulo de cisalhamento (GPa)	80
Tensão de escoamento (MPa)	435

6.2.3 REVESTIMENTO DO POÇO DE AÇO 4140

A revestimento do poço de aço 4140 é a segunda camada que o jato da carga oca penetra durante a terceira simulação. Os dados do aço 4140 foram tirados do trabalho de ROY, 2009. Os dados de entrada revestimento do poço de aço 4140 para o AUTODYN estão presentes na TAB. 6.6. A equação de estado do aço 4140 para a simulação é EOS Linear, a equação constitutiva usada é a do modelo de Johnson-Cook, e o modelo de fratura é de Johnson-Cook.

TAB. 6.6 Dados de entrada da revestimento do poço 4140 (ROY, 2009).

Parâmetro	Valor
Equação de Estado Linear	
Massa específica de referência ρ_0 (kg/cm ³)	0,007830
Módulo volumétrico b' (TPa)	0,159
Temperatura de referência (K) ³	300
Calor específico (kJ/gK)	0,000477
Equação Constitutiva de Johnson Cook	
Módulo de cisalhamento (GPa)	77
Tensão de escoamento A' (MPa)	655
Constante de endurecimento B' (TPa)	510
Expoente de endurecimento n	0,26
Taxa de deformação constante C'	0,014
Expoente de amolecimento térmico m	1,03
Temperatura de fusão (K)	1793
Equação Fratura de Johnson Cook	
Constantes D_1	0,05
Constantes D_2	3,44
Constantes D_3	-2,12
Constantes D_4	0,002
Constantes D_5	0,61
Temperatura de Fusão (K)	1793

6.2.4 COLUNA DE CIMENTAÇÃO

A coluna de cimentação serve para promover isolamento das zonas permeáveis, sustentação do revestimento e redução da corrosão do revestimento por fluidos corrosivos. O poço aberto é cimentado da base até uma altura determinada no projeto do poço, formando assim a coluna de cimentação. (ROCHA, 2010)

O material usado para a coluna de cimentação é o cimento CONC-35MPa para todas simulações. A equação de estado usada na simulação é a equação P-alpha, e a equação constitutiva é do modelo Concreto RHT. Os dados da coluna de cimentação estão na TAB. 6.7 e TAB. 6.8 para a simulação no AUTODYN.

TAB. 6.7 Dados de entrada para Equação Constitutiva na coluna de cimentação com CONC-35MPa (ELSHENAWY, 2012).

Equação Constitutiva Concreto RHT	
Módulo de cisalhamento (GPa)	16,7
Tensão de compressão (f_c) (MPa)	35
Relação entre tensão de tração e compressão (f_t/f_c)	0,26
Relação entre tensão de cisalhamento e compressão (f_s/f_c)	0,014
Constante de ruptura de superfície intacta A''	1,6
Expoente de ruptura de superfície intacta N''	0,61
Tens./Comp. Razão Meridiana (Q_2)	0,6805
Transição frágil para dúctil (BQ)	0,0105
Tensão elástica/ f_t	0,70
Tensão elástica / f_c	0,53
Constante de tensão de fratura B''	1,60
Expoente de tensão de fratura M''	0,61
Expoente da taxa de deformação por compressão δ	0,032
Expoente da taxa de deformação por tração α	0,036
Fratura	
Constante D_1	0,040
Constante D_2	1,0
Deformação mínima para a fratura	0,01
Fração residual do módulo de cisalhamento	0,13

TAB. 6.8 Dados de entrada para EOS na coluna de cimentação com CONC-35MPa (ELSHENAWY, 2012).

Equação de Estado P-alpha	
Massa específica dos poros (g/cm ³)	2,31
Velocidade do som nos poros (m/s)	2920
Pressão de compactação inicial P_e (MPa)	23,3
Pressão de compactação do sólido P_s (GPa)	6
Expoente de compactação n	3
Equação de estado do Sólido	Polinomial
Módulo Volumétrico A_1 (GPa)	35,27
Parâmetro A_2 (GPa)	39,58
Parâmetro A_3 (GPa)	9,04
Parâmetro B_0	1,22
Parâmetro B_1	1,22

6.2.5 ROCHA DO RESERVATÓRIO

O arenito usado para simular a rocha do reservatório nas três simulações é o arenito Berea. Este arenito é utilizado em trabalhos experimentais por possuir propriedades homogêneas e porosidade similar às encontradas em rochas de formação petrolífera. Na simulação, a rocha foi considerada isotrópica, e desprezou-se a influência dos poros na rocha. As equações usadas são as equações de conservação, Equação de Estado do Material e a equação constitutiva do modelo de falha de von Mises. Os valores de entrada para a equação de estado são de um cimento que possui a massa específica próxima ao valor da rocha. A TAB. 6.9 tem os dados de entrada do arenito Berea para o AUTODYN.

TAB. 6.9 Dados de entrada da rocha Berea.

Parâmetro	Valor
Equação de Estado do Material	
Massa específica de referência ρ_0 (kg/cm ³) ¹	0,002631
Coefficiente de Grüneisen ²	0,75
Parâmetro C_0 (km/s) ³	2,6
Parâmetro s_1 ⁴	1,49
Temperatura de referencia (K)	300
Equação Constitutiva de von Mises	
Módulo de cisalhamento (GPa) ⁵	6,0
Tensão de escoamento (MPa) ⁶	71.6

¹SWIFT et al (2000);

²DONNELL et al(1995);

³Van DEN ABEELE et al(1996);

⁴SEKINE et al (1995);

⁵STEEB (2012);

⁶BUSETTI (2012);

6.3 CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DA CARGA E MALHA APLICADA

A carga usada para a simulação é bastante similar as empregadas pelas prestadoras de serviço. A FIG. 6.1 contém o desenho e o dimensionamento aproximado da carga utilizada para realização da simulação, visto que as dimensões internas da carga não são disponíveis na literatura

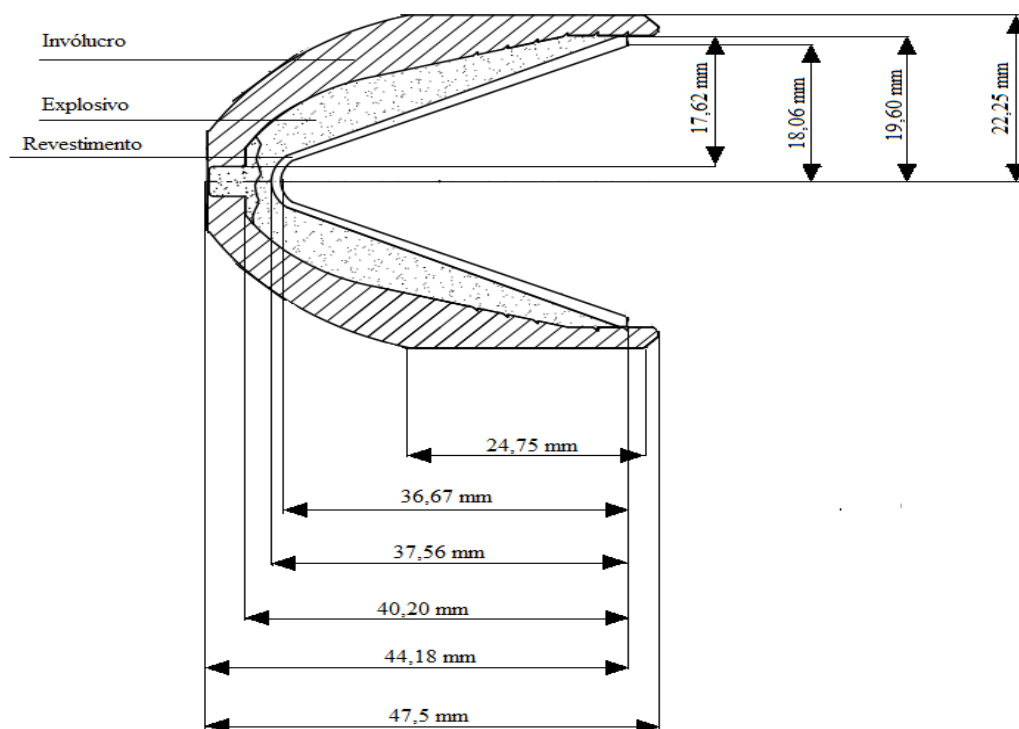


FIG. 6.1 Dimensões da carga moldada utilizada nas simulações.

A malha usada para simular o colapso da carga é a Euleriana por suportar a detonação do explosivo e as altas tensões que são geradas com a detonação. Os dados de entrada para esta malha estão contidos na TAB. 6.10. Onde DX é o comprimento da malha e DY é a altura da malha. A distribuição da malha é de 0,3 por 0,3mm. A FIG. 6.2 ilustra a malha Euleriana com os dados de entrada da carga. Os valores das viscosidades artificial linear e quadrática para a simulação são 0,2 e 1,0 respectivamente.

TAB. 6.10 Dados de entrada da malha Euleriana.

Dados	Valor
X_0 de origem (mm)	-15,5
Y_0 de origem (mm)	0
DX (mm)	87
DY (mm)	42
ΔI (células)	290
ΔJ (células)	140

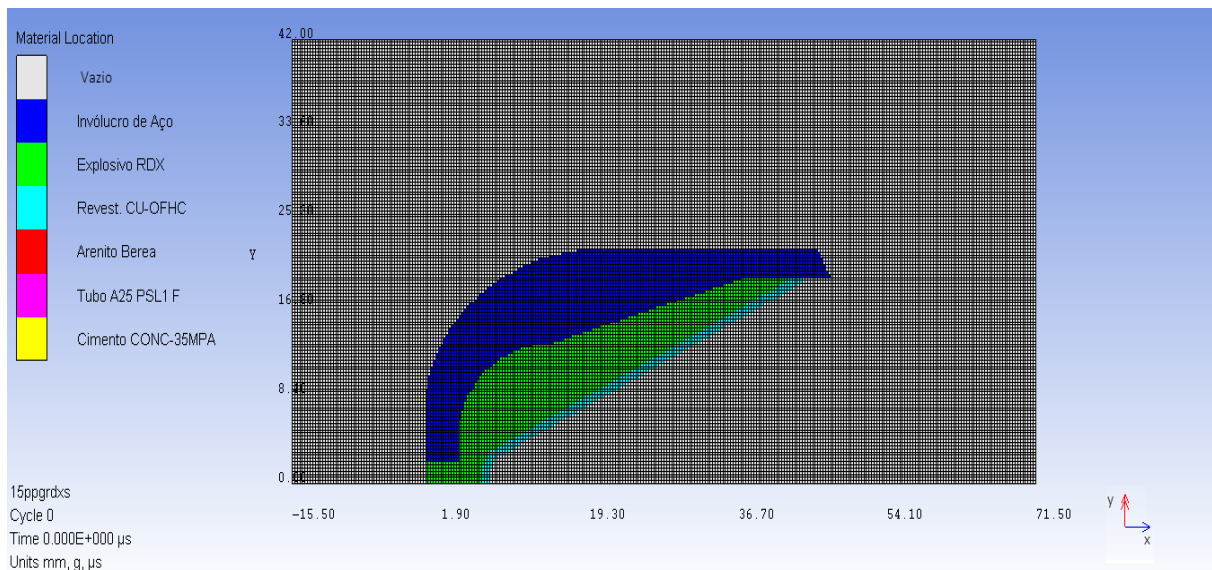


FIG. 6.2 Carga moldada discretizada na malha Euleriana no $t=0 \mu\text{s}$.

O uso da malha Lagrangeana para carga moldada também foi realizado. Entretanto, o uso de explosivo e a expansão dos gases ocasiona a degeneração da malha. Para retardar este tipo de falha na malha faz-se o refinamento. O refinamento da malha causa o aumento do processo de tempo, a simulação se torna mais lenta e o número de ciclos se torna maior, o que inviabiliza a solução.

A FIG. 6.3 contém a simulação realizada com a malha Lagrangeana nas mesmas condições da TAB. 6.10. Com o tempo de $4,414\mu\text{s}$ a malha degenerou-se, mesmo o explosivo não tendo sido totalmente detonado. Indicado na FIG. 6.3 o início da degeneração da malha na célula $I=66$ e $J=8$.

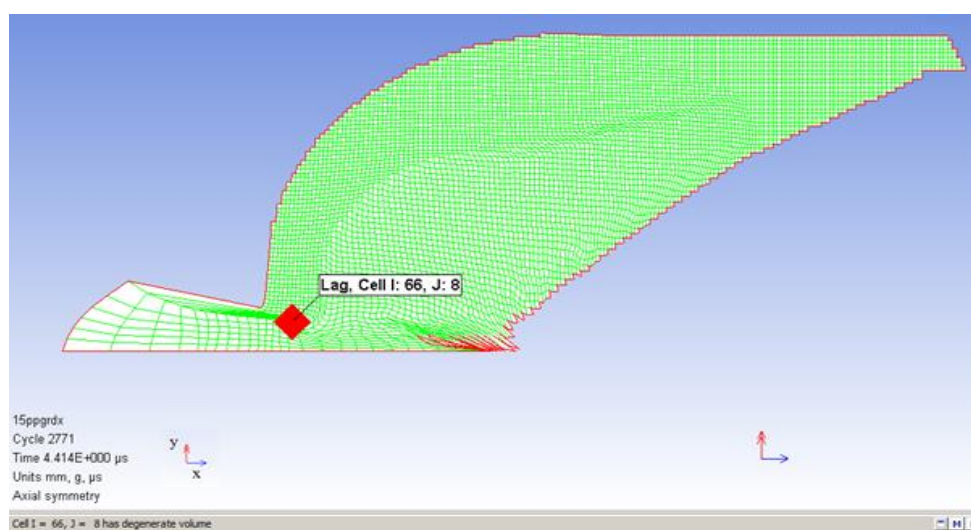


FIG. 6.3 Carga moldada discretizada na malha Lagrangeana no $t=4,414 \mu\text{s}$ com degeneração na célula $I=66$ $J=8$.

6.4 CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DOS ALVOS E MALHA APLICADAS NA PRIMEIRA SIMULAÇÃO

Após a simulação da carga no enfoque Euleriano, a mesma 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 para que os materiais do invólucro e explosivo sejam excluídos da malha. Para a configuração geométrica do alvo são verificadas três camadas de alvos. Os valores de entrada no código para os alvos revestimento do poço A25 PSL1 F, coluna de cimentação e rocha do reservatório estão dispostos respectivamente nas sessões 6.2.1, 6.2.4 e 6.2.5. Os valores dimensionais de cada carga que é penetrada estão na TAB. 6.11. A simulação nesta malha é realizada em uma nova contagem de tempo além do tempo de 12,24 μ s que se leva na simulação na malha Euleriana, assim o tempo reinicia em $t=0$ μ s para a malha Lagrangeana. . A distância ótima entre a carga e o alvo (stand off) para a simulação é de 1,7 cm. As dimensões e o tipo de material para o revestimento do poço A25 PSL F foram retirados da Tabela 24 da API 5L ISO 3183. Já a dimensão do cimento foi retirada da PPL-DS-4807 CHEVRON TEXACO (2002).

TAB. 6.11 Valores de espessura e altura para o alvo para primeira simulação.

Material	Tubo A25 PSL1 F ¹	Cimento CONC-35MPa ²	Arenito Berea
Espessura (mm)	6,6	63,5	400
Altura (mm)	100	100	100

¹ API 5L ISO 3183 (2008);

² CHEVRON TEXACO (2002);

6.4.1 EFEITO DA DIMENSÃO DO ALVO

Dependendo do dimensionamento do alvo, os resultados podem ser inconsistentes. Nesta simulação em que o valor da altura do cimento é menor, ocorreu a expansão da parede do mesmo, pois a parede não possui inércia suficiente para resistir aos esforços de expansão. A

FIG. 6.4 mostra o efeito da expansão da camada de cimento com diâmetro de 84 mm após a passagem do jato. A TAB. 6.12 contém dados da malha empregada nesta simulação.

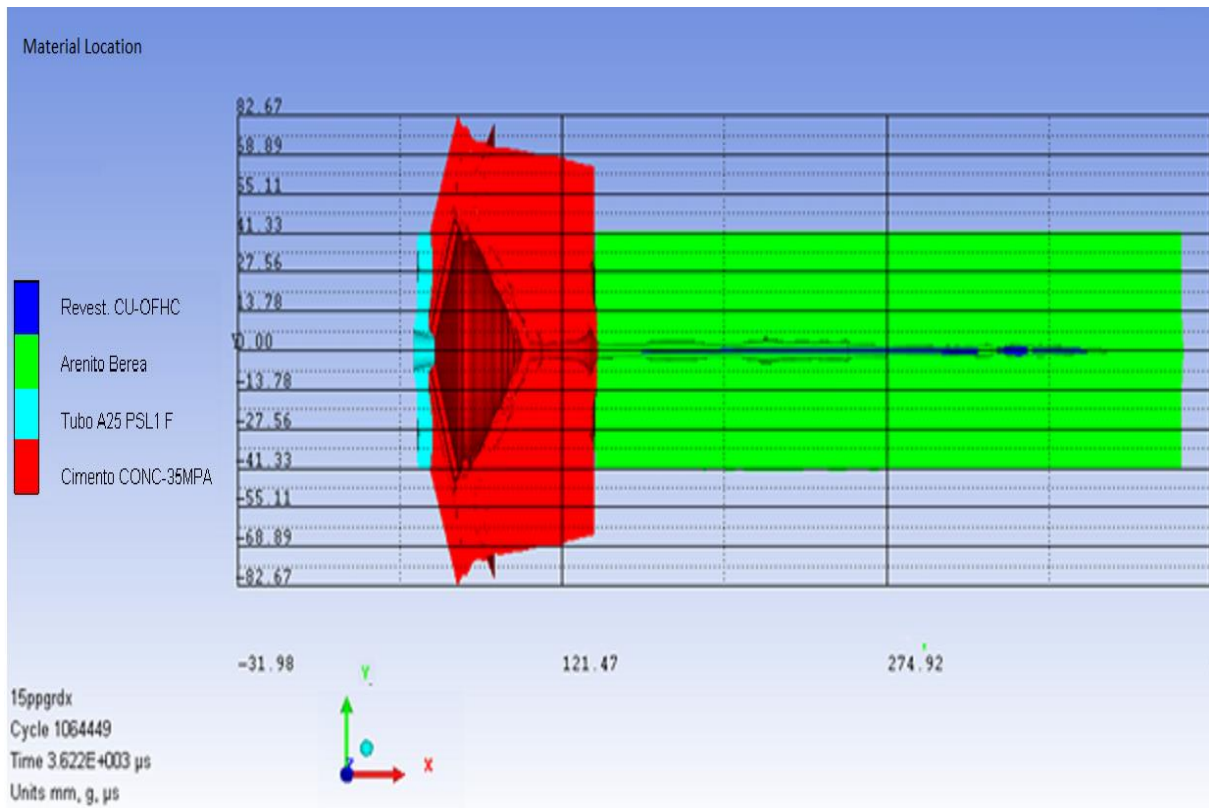


FIG. 6.4 Alvo com falha na camada de cimento, com altura de 42,0 mm nas condições iniciais, em $t= 3622 \mu s$.

TAB. 6.12 Dados de entrada da malha Lagrangeana para simulação com 84 mm de parede para primeira simulação.

Dados	Valor
X_0 de origem (mm)	-15,5
Y_0 de origem (mm)	0
DX (mm)	550,1
DY (mm)	42
ΔI (células)	1100
ΔJ (células)	200

Observe que neste exemplo foi empregado um valor de DY um pouco maior que a base do cone de carga oca, duas vezes o valor da base. Uma maneira de contornar este problema da

expansão da parede é aumentar a dimensão da altura do cimento. O aumento da parede proporciona o aumento de massa e o aumento da inércia da parede, o que evitará a expansão da parede e conseqüentemente a falha. Uma outra maneira é colocar condições de contorno que fixem a parede. Na terceira simulação, que reproduz o teste experimental, existe um material metálico envolvendo o cimento, o que impede sua expansão.

6.4.2 EFEITO DA INÉRCIA DA PAREDE DE CIMENTO

A malha usada durante a penetração é a malha Lagrangeana. Esta malha tem o tempo de gasto computacional menor que a Euleriana para simulações de penetração, o que facilita a agilidade da simulação e a obtenção de resultados. A TAB. 6.13 contém os dados da malha empregada na primeira simulação. A distribuição da malha é de 0,5 por 0,5mm. A FIG. 6.5 tem a carga remapeada após a detonação e os alvos na primeira simulação. A distância ótima entre a carga e o alvo (stand off) para a simulação é de 1,7 cm. O diâmetro usado na camada de cimento foi de 200,0 mm

TAB. 6.13 Dados de entrada da malha Lagrangeana na primeira simulação.

Dados	Valor
X_0 de origem (mm)	-15,5
Y_0 de origem (mm)	0
DX (mm)	550,1
DY (mm)	100
ΔI (células)	1100
ΔJ (células)	200

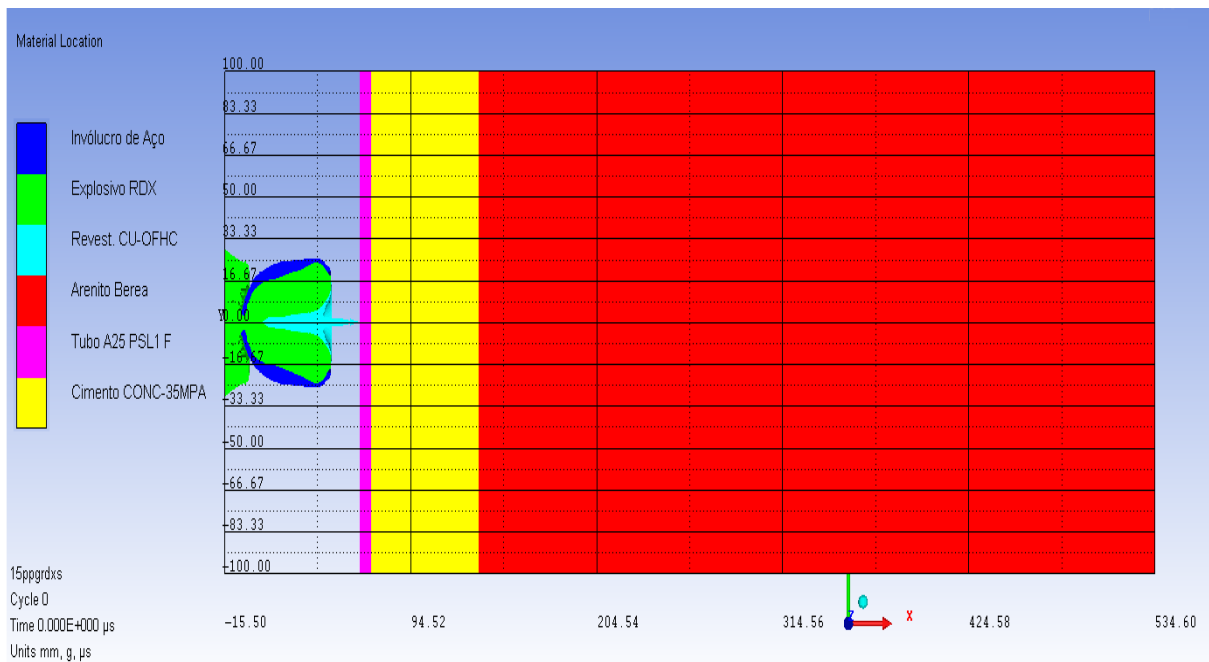


FIG. 6.5 Carga moldada na malha Lagrangeana com as camadas de alvo: tubo de aço A25 PSL1 F, cimento Conc-35MPa e o arenito Berea, em $t=0 \mu\text{s}$ na primeira simulação.

O efeito da inércia da parede proporciona resultado mais realísticos, pois no caso real as paredes podem chegar a 7 km de profundidade. O capítulo 7 contém os resultados obtidos com esta configuração de 200 mm de altura conforme indicado na FIG. 6.5.

6.5 CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DOS ALVOS E MALHA APLICADAS NA SEGUNDA SIMULAÇÃO

Nesta seção os parâmetros usados para as configurações físicas dos alvos são similares àqueles do capítulo 4. Os materiais usados são os mesmos da sessão 6.4, e os valores de entrada no código para os alvos revestimento do poço, do cimentação e rocha do reservatório estão dispostos respectivamente nas seções 6.2.1, 6.2.4 e 6.2.5. O remapeamento da carga oca é feito depois que a detonação da carga se deu até o tempo de 11,87 μs na malha Euleriana. Na malha Lagrangeana é feito a contagem a partir de 0 μs . As medidas de cada alvo que são empregadas nesta segunda simulação são similares ao experimento do capítulo 4. A camada do revestimento do poço A25 PSL1 F tem soma do valor da espessura do revestimento do poço do experimento com o valor da espessura de placa de aço da saída do canhão. A camada do cimento CONC-

35MPa e do arenito Berea é semelhante ao do experimento do capítulo 4. A TAB. 6.14 contém os parâmetros das camadas implementados no software.

TAB. 6.14 Valores de espessura e altura para o alvo para segunda simulação.

Material	Tubo A25 PSL1	Cimento CONC-35MPa	Arenito Berea
Espessura (mm)	15,875	19,05	454,025
Altura (mm)	88,5	80,5	88,5

6.5.1 EFEITO DA CONTENÇÃO DA PAREDE DE CIMENTO

Para conter o efeito de expansão do cimento descrito na seção 6.4.1 optou-se nesta simulação envolver a parede de cimento com aço. No capítulo 4 a FIG. 4.11 ilustra o cimento envolvido por um material metálico. O uso de material metálico faz com que o cimento não se expanda. Para a segunda simulação, a camada composta por cimento e é revestida com 8mm de aço do tubo A25 PSL1 F como ilustra a FIG. 6.6.

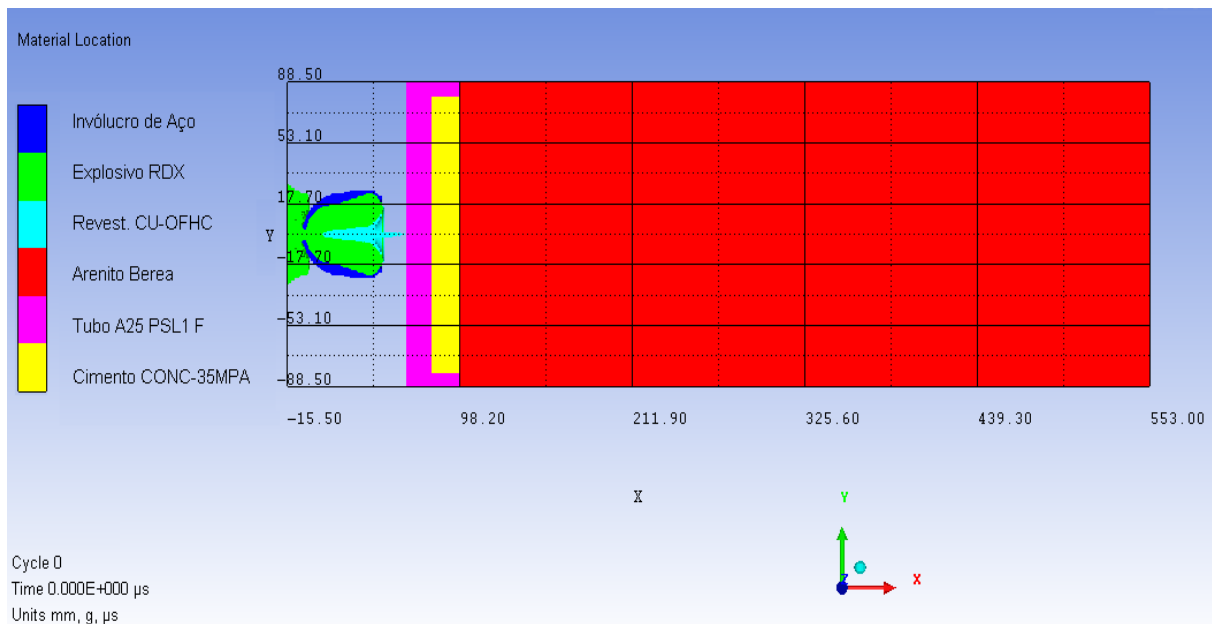


FIG. 6.6 Carga moldada remapeada na malha Lagrangeana com as camadas de alvo: tubo A25 PSL1 F, cimento Conc-35MPa e o arenito Berea, em $t=0 \mu\text{s}$ da segunda simulação.

A TAB. 6.15 contém os dados da malha empregada na simulação. A distribuição da malha é de 0,5 por 0,5mm. Foram simuladas duas distâncias entre a carga e o alvo (*stand off*) 15,75 mm que é a usada no experimento e 17 mm para comparação.

TAB. 6.15 Dados de entrada da malha Lagrangeana na segunda simulação.

Dados	Valor
X_0 de origem (mm)	-15,5
Y_0 de origem (mm)	0
DX (mm)	567,7
DY (mm)	88,5
ΔI (células)	1137
ΔJ (células)	177

6.6 CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DOS ALVOS E MALHA APLICADAS NA TERCEIRA SIMULAÇÃO

A terceira simulação contém parâmetros mais específicos sobre o experimento como a dimensão e o material usado nos alvos. O material usado para a terceira simulação são o aço 4130 para a placa de aço que simula a saída do canhão, devido ao seu limite de resistência de 130ksi ser o mesmo que o usado na placa da saída do canhão no experimento, o aço 4140 para o revestimento do poço, cimento CONC-35MPa para coluna de cimentação e o arenito Berea para a rocha que representa o reservatório. Os dados de entrada dos materiais estão dispostos nas sessões 6.2.2, 6.2.3, 6.2.4 e 6.2.5. O remapeamento da carga oca é feito depois que a detonação da carga se deu até o tempo de 11,80 μ s na malha Euleriana. Na malha Lagrangeana é feito a contagem a partir de 0 μ s. Para a configuração geométrica dos alvos são verificadas quatro camadas de alvos e os valores da configuração geométrica para cada alvo e a distâncias ótima entre a carga e o alvo (*stand off*) estão contidos na TAB. 6.16.

TAB. 6.16 Valores de espessura e altura para o alvo para terceira simulação.

Material	Stand off	Tubo de Aço 4140	Saída do Canhão de Aço 4130	Cimento CONC- 35MPa	Arenito Berea
Espessura (mm)	15,75	3,175	12,7	19,05	454,025
Altura (mm)	-	47,625	41,275	41,275	88,646

Assim como na segunda simulação, a terceira simulação contém uma espessura de 6,35mm de aço 4140 sobre o cimento CONC-35 MPa, como ilustra a FIG. 6.7.

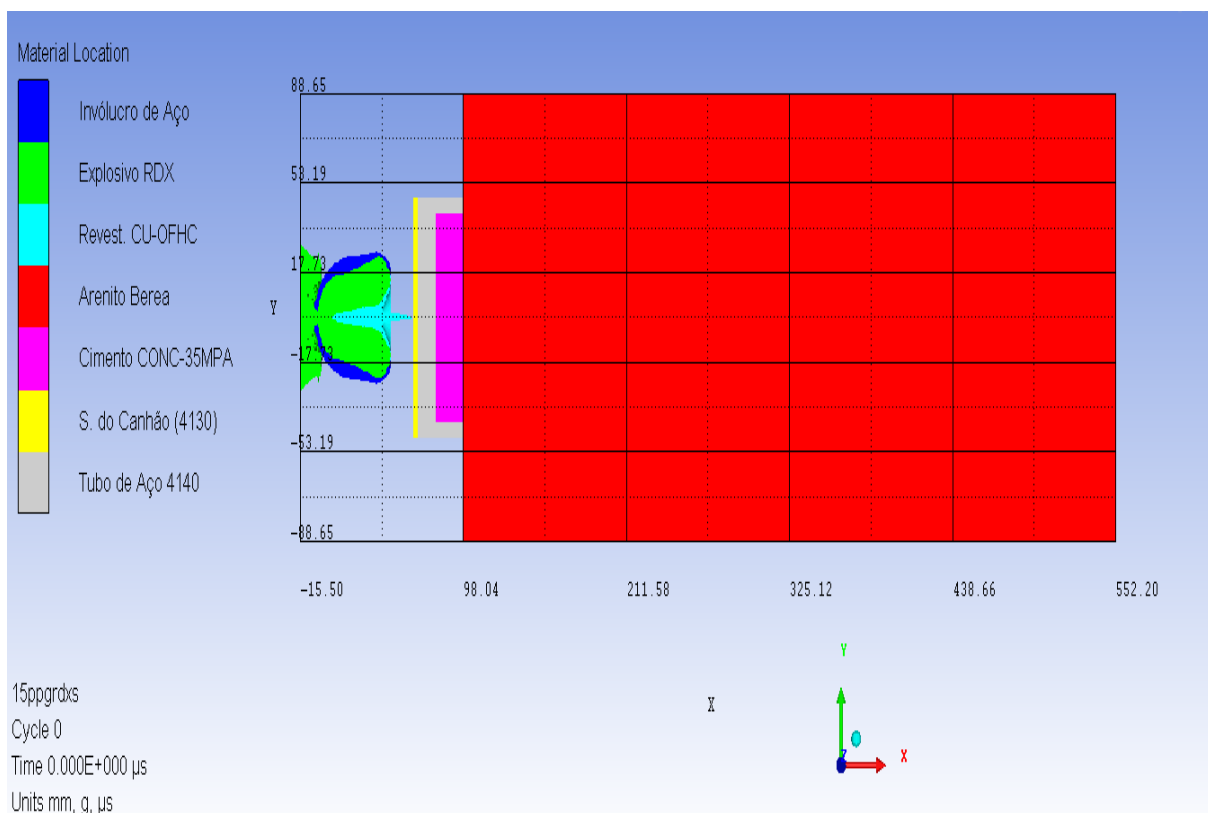


FIG. 6.7 Camadas de alvo: saída do canhão de aço 4130, revestimento do poço de aço 4140, cimento Conc-35MPa e o arenito Berea, em $t=0 \mu s$ para a terceira simulação.

A TAB. 6.17 contém os dados de entrada para malha empregada na terceira simulação. A distribuição da malha é a mesma da segunda simulação com 0,5 por 0,5mm.

TAB. 6.17 Dados de entrada da malha Lagrangeana na terceira simulação.

Dados	Valor
X_0 de origem (mm)	-15,5
Y_0 de origem (mm)	0
DX (mm)	567,7
DY (mm)	88,646
ΔI (células)	1136
ΔJ (células)	178

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram obtidos primeiramente para a simulação na malha Euleriana para a detonação da carga, e na malha Lagrangeana para a penetração do jato nos alvos. A duração da simulação na malha Euleriana é de cinco minutos. A duração total na malha Lagrangeana para primeira simulação é de cinco dias, vinte e duas horas, quatro minutos, para a segunda simulação é de cinco dias, vinte e duas horas e quarenta e três minutos e para a terceira simulação é de oito dias, vinte e uma horas e três minutos. A terceira simulação reproduz os dados do experimento do capítulo 4.

Neste trabalho, as simulações numéricas foram realizadas utilizando-se os seguintes recursos computacionais:

- Processador: Intel(R) Core (TM) i5-3470 CPU @ 3.20 GHz 3.20 GHz;
- Memória (RAM): 4,00 GB;
- Sistema Operacional de 64 Bits;
- ANSYS AUTODYN 14.0;

7.1 RESULTADOS DA CARGA NA MALHA EULERIANA

Os materiais usados na carga estão descritos na seção 6.1. O material que compõe o invólucro é o aço 4340, o explosivo é o RDX e o revestimento é o cobre livre de oxigênio e alta condutividade (CU-OFHC). Os dados de entrada dos materiais usados para compor a carga foram apresentados nas TAB. 6.1, 6.2 e 6.3. Os dados da configuração geométrica da carga estão na FIG. 6.1. As equações usadas foram apresentadas no capítulo 3. Os dados de entrada para a malha Euleriana estão na TAB. 6.10.

A simulação para carga durou 12,24 μ s na malha Euleriana e duração de cinco minutos de simulação. O passo de tempo está entre 10^{-3} μ s e 10^{-4} μ s a cada ciclo. A simulação do explosivo ocorre por uma onda de detonação pontual e inicia-se na extremidade esquerda avançando contra o revestimento. Os dados de saída do programa para malha Euleriana são compostos pelos resultados obtidos no explosivo e no revestimento.

7.1.1 RESULTADOS OBTIDOS NO EXPLOSIVO

Os resultados obtidos no explosivo RDX são as pressões máximas, velocidades máximas e tempo em que a onda de detonação percorre todo explosivo. A FIG. 7.1 contém os valores de pressão no tempo logo após a detonação ($t=1,018 \mu\text{s}$) e no tempo em que a onda de detonação já passou por todo o explosivo ($t=6,306 \mu\text{s}$). A pressão máxima no tempo de $1,018 \mu\text{s}$ foi $24,96 \text{ GPa}$ e no tempo de $t=6,306 \mu\text{s}$ foi de $51,48 \text{ GPa}$, ambas localizadas no revestimento de cobre CU-OFHC.

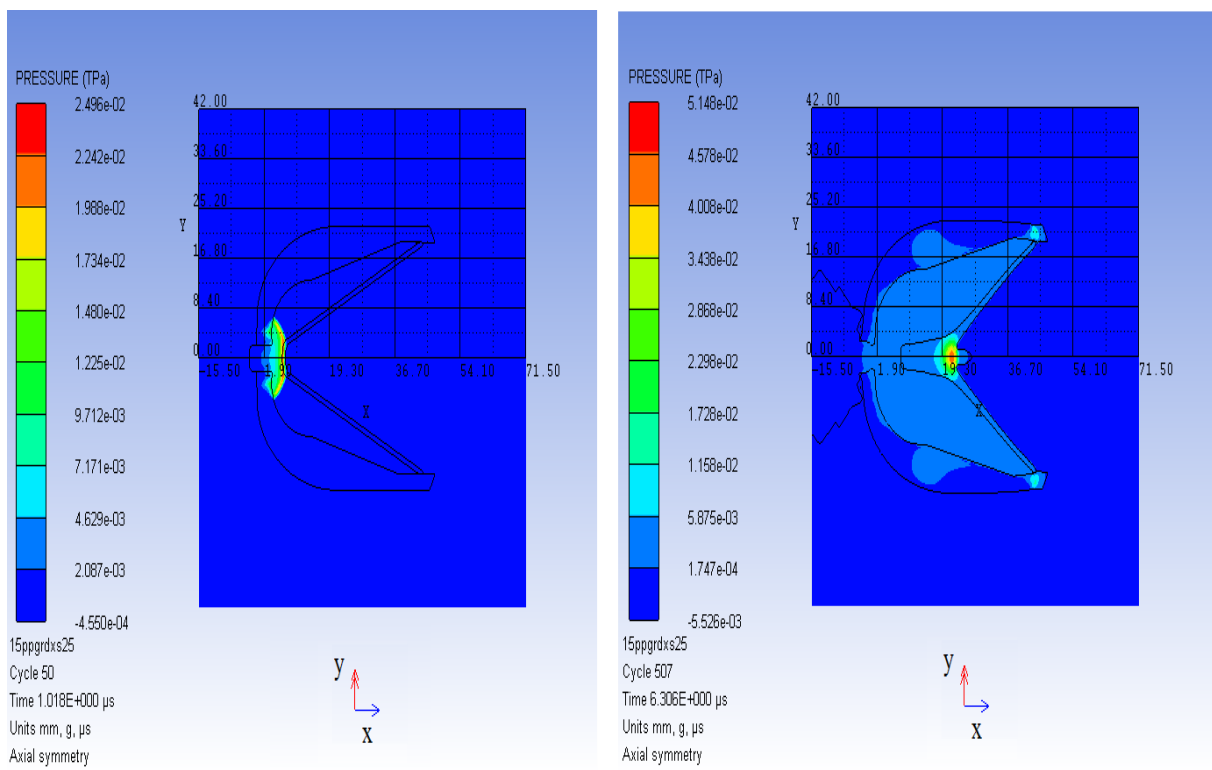


FIG. 7.1 Diagrama de pressões: à esquerda a carga no tempo $1,018 \mu\text{s}$ e à direita a carga no tempo de $6,306 \mu\text{s}$.

A FIG. 7.2 contém os resultados obtidos das máximas pressões dentro do explosivo RDX até que a onda de choque passe por todo explosivo. Pode-se observar que o pico de pressão aumenta até $40,47 \text{ GPa}$ no tempo $3 \mu\text{s}$ e decai em seguida. Isto ocorre porque no tempo de $3 \mu\text{s}$ a onda de detonação está no local da carga moldada que possui mais quantidade de explosivo por área, e após este local a quantidade de explosivo por área começa a diminuir.

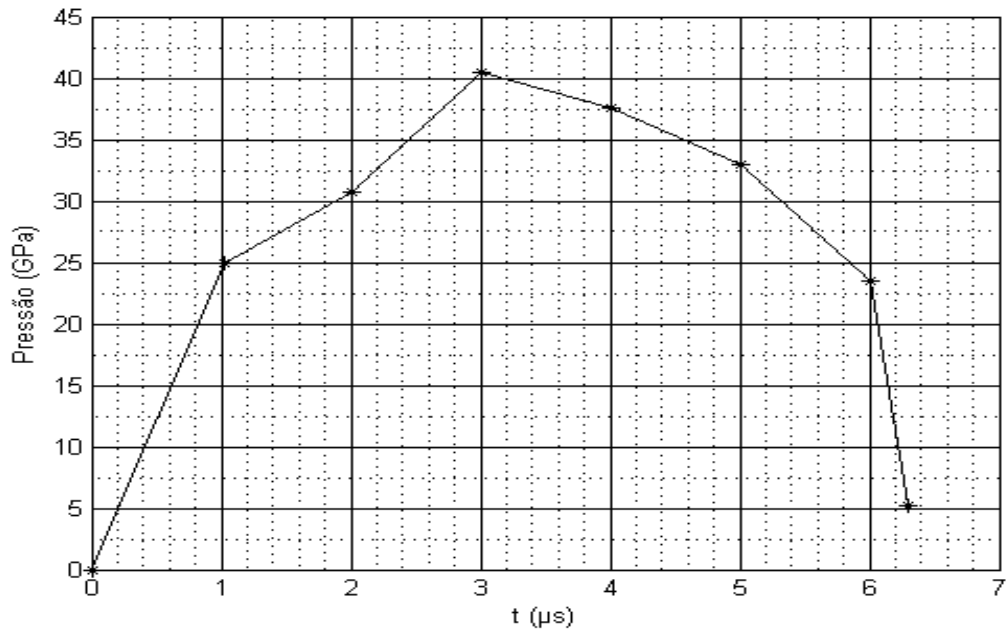


FIG. 7.2 Pressões máximas no explosivo da carga oca até o tempo de 6,306 μs.

A FIG. 7.3 ilustra as velocidades e pressões no tempo em que a frente da onda de detonação chega no final do explosivo ($t=5,802 \mu\text{s}$) e todas as partículas na região do revestimento passaram a ter velocidade. Com esta figura é possível observar a pressão (53,90GPa) e velocidade (6503 m/s) máximas das partículas no revestimento (em vermelho) e do explosivo (na cor azul claro) ao final da carga.

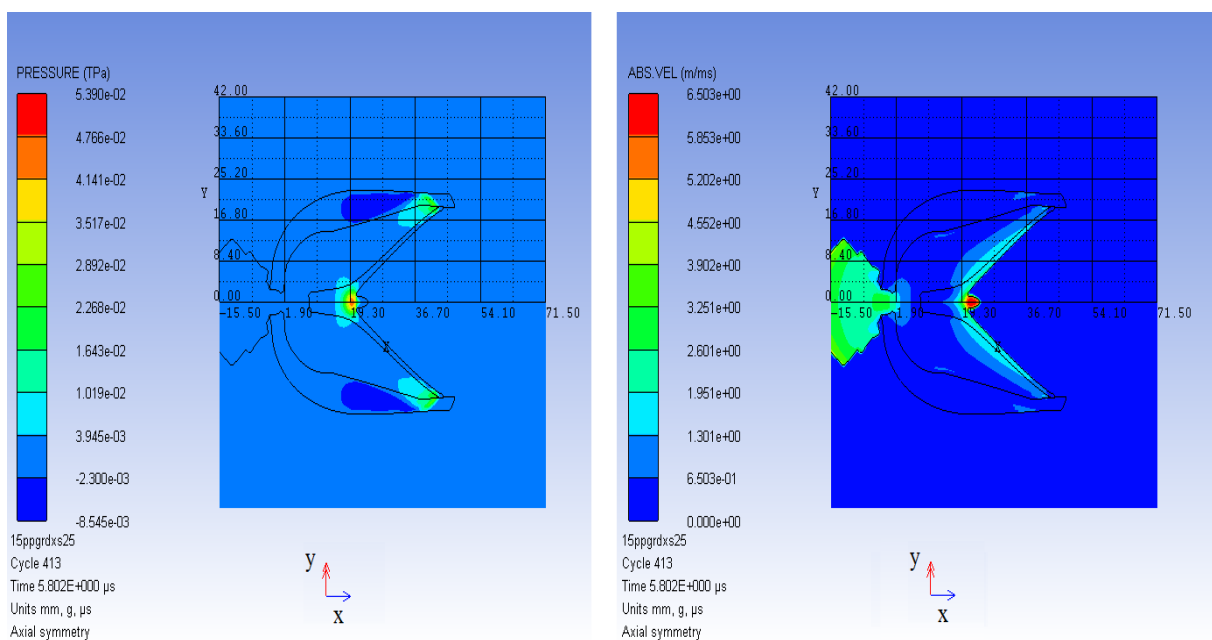


FIG. 7.3 Pressões e Velocidades absolutas máximas da carga oca no tempo de 5,802 μs.

A FIG. 7.4 apresenta as máximas velocidades dentro 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. Após este tempo não se tem resultados da velocidade do explosivo dentro da carga, porque o mesmo já foi todo detonado e as partículas de explosivo que apresentam velocidades estão fora do invólucro.

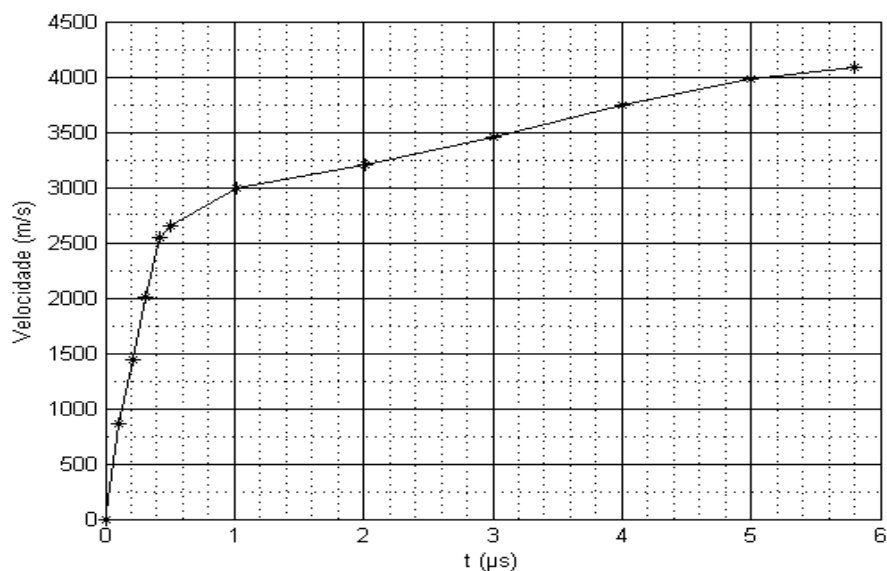


FIG. 7.4 Velocidades máximas no explosivo da carga oca até o tempo de 5,802 μ s.

A TAB. 7.1 mostra a comparação percentual do tempo que a onda de detonação chegou no final do explosivo calculado com a velocidade de detonação experimental do explosivo RDX (8,180 km/s) e o verificado na simulação. Os resultados obtidos entre os dois se apresentaram muito próximos, pois a diferença percentual é menor que 2%.

TAB. 7.1 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 (8,180 km/s)	Diferença percentual
Tempo (μ s)	5,802	5,908	1,794%

A TAB. 7.2 contém os valores máximos de pressão e velocidade encontrados no explosivo RDX e o tempo em que esses valores são encontrados.

TAB. 7.2 Valores máximos de pressão e de velocidade das partículas encontrados no explosivo RDX nos respectivos tempos.

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

7.1.2 RESULTADOS OBTIDOS NO REVESTIMENTO

Foram também verificados os valores das pressões, velocidades e massas específicas máximas encontradas no revestimento. A FIG. 7.5 contém as pressões máximas entre os tempos 0 μs e 12,24 μs . A pressão máxima no revestimento ocorre em 5 μs após o início de detonação do explosivo ($t_0 = 0$) com 56,7 GPa e a seguir seu valor decai com o tempo. Isto ocorre porque antes do tempo de 6 μs ($t=5,802 \mu\text{s}$) o pico da onda de detonação já chegou ao final do explosivo, como mostra a FIG. 7.3. No tempo de 5,802 μs a onda de detonação já percorreu todo material e pressão máxima no revestimento tende a diminuir.

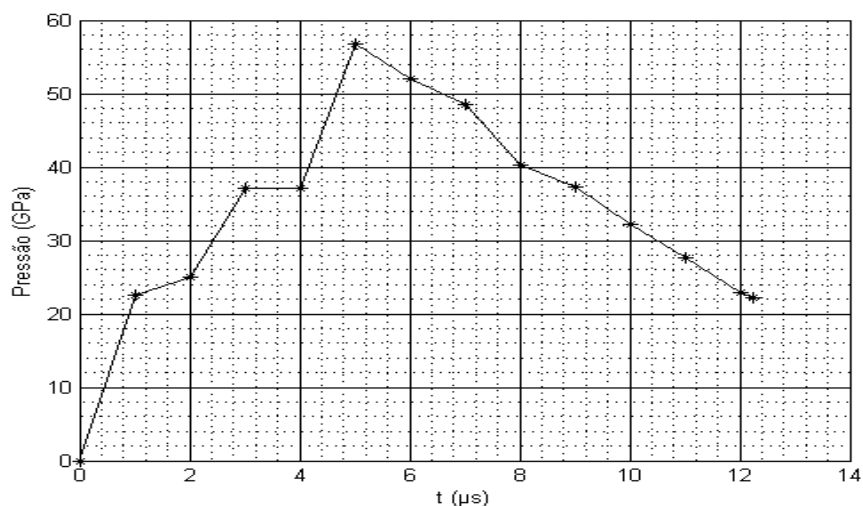


FIG. 7.5 Pressões máximas no revestimento da carga oca no tempo de 0 até 12,24 μs na malha Euleriana.

A FIG. 7.6 apresenta as velocidades máximas entre os tempos $0\mu\text{s}$ e $12,24\mu\text{s}$. O mesmo fenômeno observado na FIG. 7.5, é observado na FIG. 7.6, a velocidade máxima encontrada é no tempo de $7\mu\text{s}$, bem logo após a passagem de toda pressão da onda de detonação, que ocorre até o tempo de $6,306\mu\text{s}$. O fenômeno ocorre com a passagem de toda pressão da onda de detonação e as partículas passaram a ter uma velocidade. Quando não há mais passagem de pressão, as velocidades das partículas passam a diminuir com tempo como mostra na FIG. 7.6.

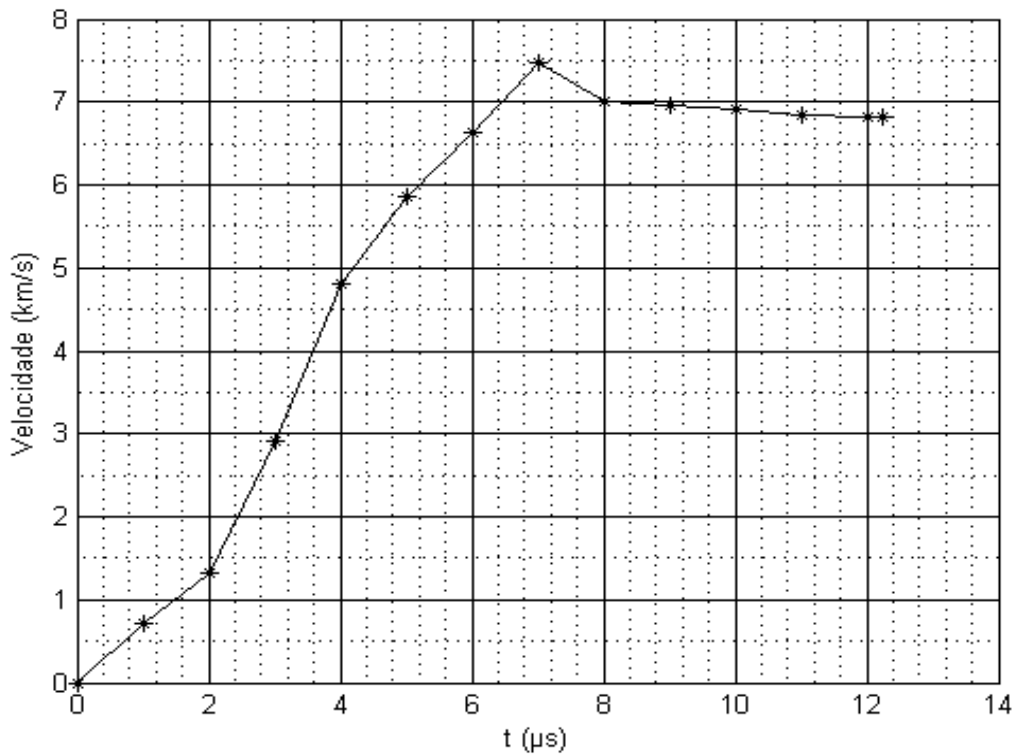


FIG. 7.6 Velocidades máximas no revestimento da carga oca no tempo de 0 até $12,24\mu\text{s}$ na malha Euleriana.

A FIG. 7.7 mostra as massas específicas máximas entre os tempos $0\mu\text{s}$ e $12,24\mu\text{s}$. A massa específica máxima é de $0,01052\text{kg}/\text{cm}^3$ no tempo de $5\mu\text{s}$ após o início da simulação ($t_0 = 0$). Depois deste tempo a massa específica começa a decrescer pois a pico de pressão termina de passar pelo explosivo no tempo de $5,802\mu\text{s}$.

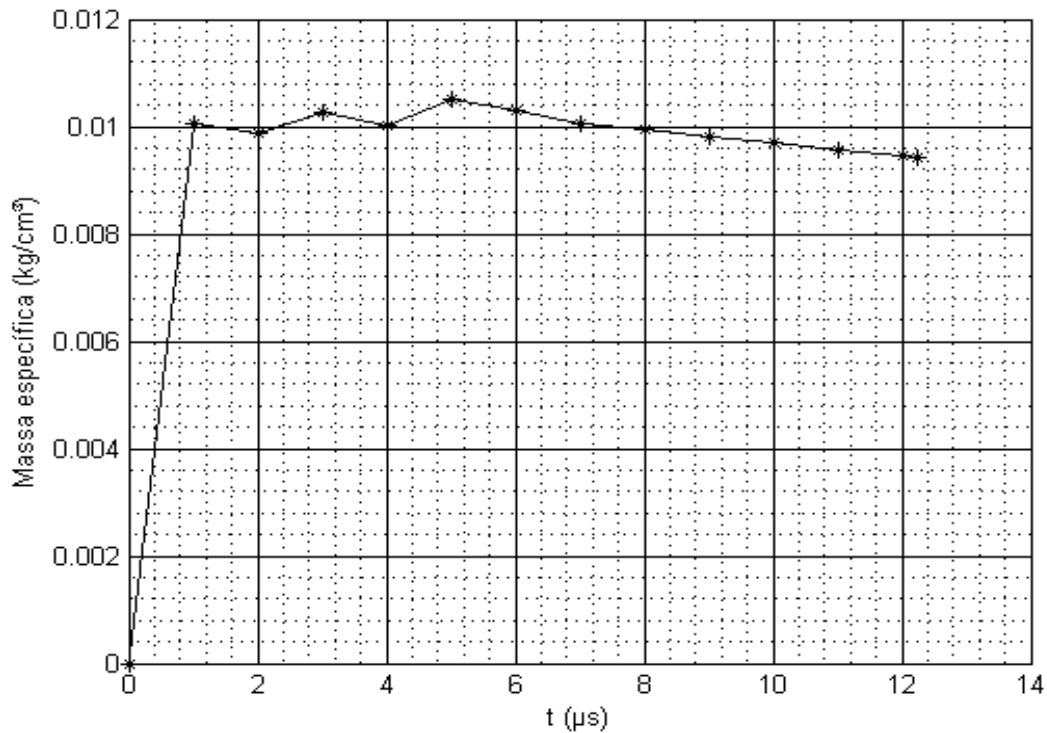


FIG. 7.7 Massas específicas máxima no revestimento da carga oca no tempo de 0 até 12,24 μs na malha Euleriana.

A TAB. 7.3 contém os valores máximos de pressão, velocidade e massa específica encontrados no revestimento, e o tempo em que esses valores são encontrados.

TAB. 7.3 Valores máximos de pressão, velocidade e massa específica encontrados no 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

7.2 RESULTADOS NA MALHA LAGRANGEANA PARA PENETRAÇÃO DA PRIMEIRA SIMULAÇÃO

A penetração nos alvos revestimento do poço aço A25 PSL1 F, cimento 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 e os dados de entrada para esta estão na TAB. 6.13 da seção 6.4. A contagem do tempo é reiniciada, e então a contagem recomeça do 0 μs . Os dados de entrada para o material do alvo estão nas TAB. 6.4, 6.7, 6.8 e 6.9 da seção 6.2. A carga é remapeada com as condições que estava na malha Euleriana. A simulação teve duração de cinco dias vinte, duas horas e quatro minutos. O teste foi simulado até o tempo de 3000 μs . O passo de tempo a cada ciclo nesta simulação está entre 10^{-3} μs e 10^{-4} μs .

O primeiro alvo que o jato encontra é o revestimento do poço A25 PSL1 F. O segundo alvo em que ocorre a penetração é na coluna de cimentação. O último alvo é o arenito Berea. A TAB. 7.4 contém os valores de tempo de cada penetração em cada alvo.

TAB. 7.4 Valores do tempo de passagem do jato em cada alvo na primeira simulação.

Alvo	Tempo (μs)
Revestimento do poço A25 PSL1 F	2,6
Coluna de Cimentação	18,6
Arenito Berea	2978,8

A simulação foi realizada até o tempo de 3000 μs e o tempo de penetração no arenito Berea foi de 2978,8 μs . No tempo de 500 μs inicia o acúmulo de massa de jato em direção ao final do túnel perfurado, conforme é mostrado na FIG. 7.8. Observa-se também na FIG. 7.8 o afinamento do túnel devido ao alongamento do jato que proporciona seu estreitamento.

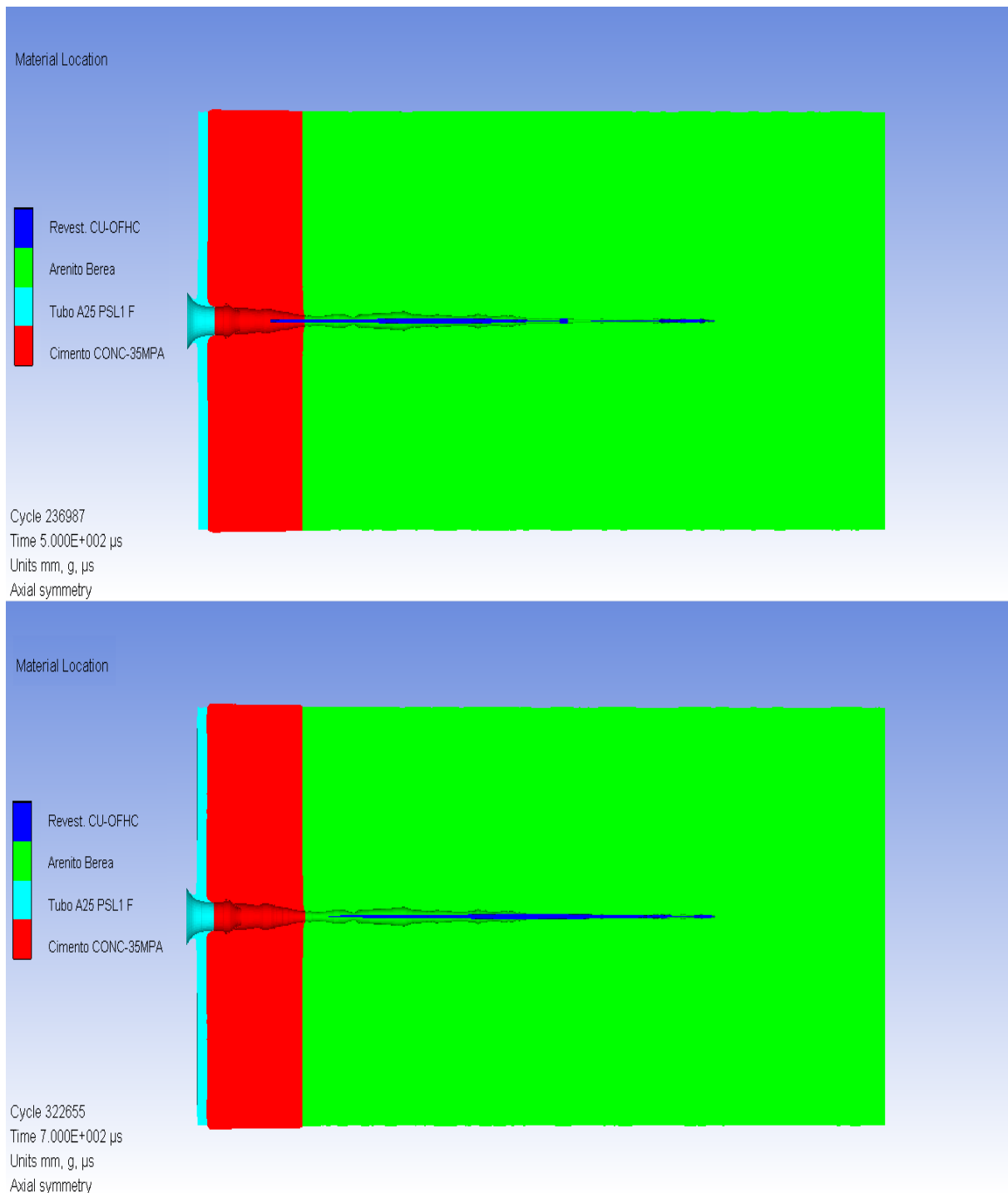


FIG. 7.8 Jato no tempo de 500 μ s (acima) e 700 μ s (abaixo) na malha Lagrangeana da primeira simulação.

A FIG. 7.9 mostra o início de penetração nos três alvos e o empilhamento do jato antes da penetração. O jato colide com o tubo de aço no instante de 0,2003 μ s, a colisão com o cimento ocorre no instante 2,8 μ s e com o arenito Berea ocorre no instante 21,40 μ s.

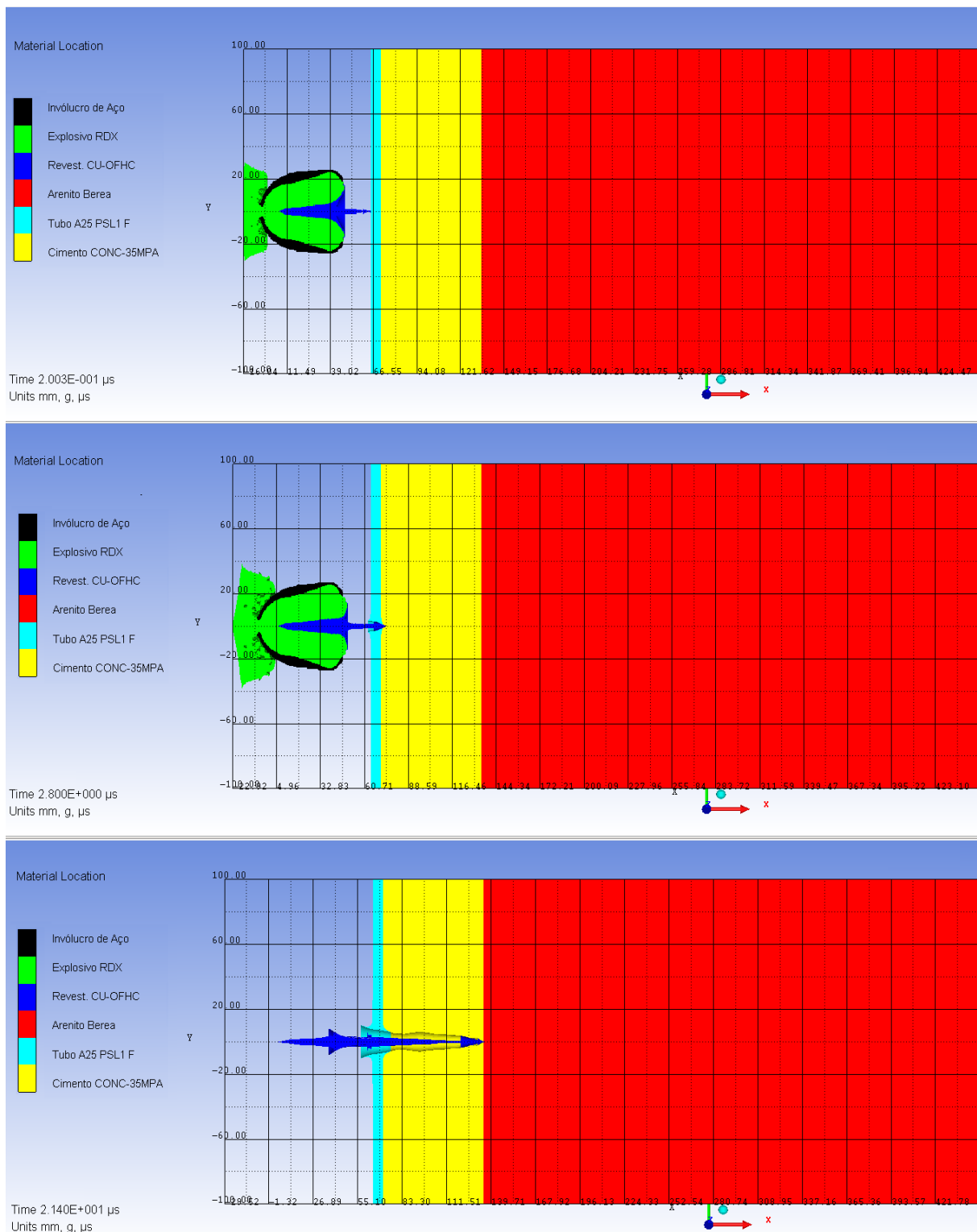


FIG. 7.9 Colisão do jato em cada alvo nos tempos 0,2003 μs , 2,80 μs e 21,40 μs na malha Lagrangeana da primeira simulação.

A FIG. 7.10 mostra a posição do jato e o acúmulo de material do jato no final do túnel nos tempos de 2000 μ s e de 3000 μ s. Entre esses dois tempos não há muita diferença de penetração como mostra a TAB. 7.5 e a FIG. 7.10.

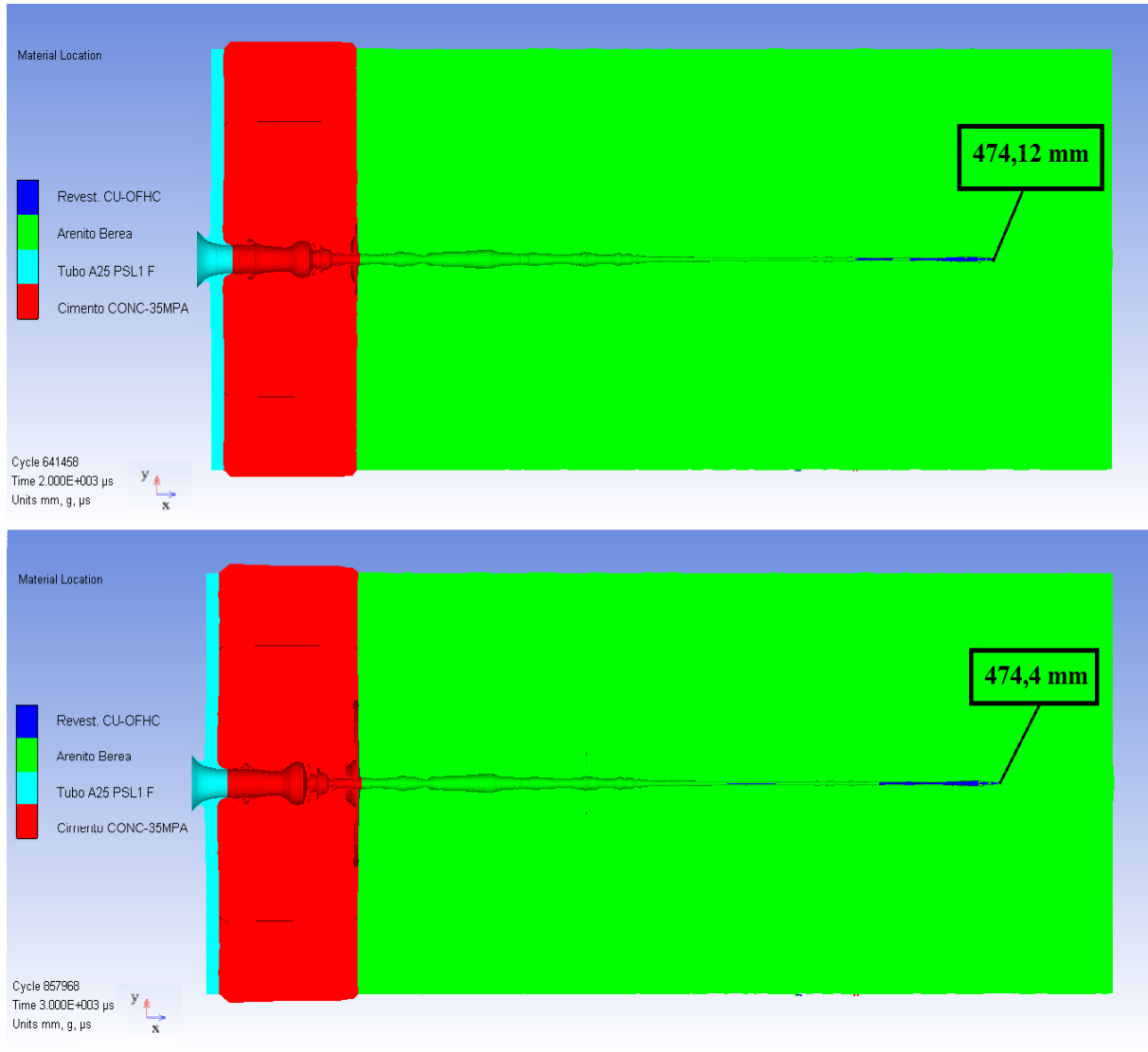


FIG. 7.10 Localização do jato nos tempo de 2000 μ s (acima) e 3000 μ s (abaixo) na malha Lagrangeana da primeira simulação.

TAB. 7.5 Valores de penetração entre os tempos de 2000 μ s e 3000 μ s no arenito Berea na primeira simulação.

Tempo (μ s)	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. 7.11. Observa-se também na FIG. 7.11, as oscilações no perfil de pressões devido as reflexões e interações das ondas de pressão produzidas. O pico de pressão (8,682GPa) no tempo de 60 μs no arenito Berea é causado pela reflexão da onda que chegou ao fim do material e encontrou com outra onda que estava indo em sentido contrário. A TAB. 7.6 contém os valores dos picos de pressão com cada material e seu respectivo tempo.

TAB. 7.6 Valores máximos de pressão encontrados nos alvos nos respectivos tempos na primeira simulação.

Alvos	Pressão máxima (GPa)	Tempo (μs)
Revestimento do poço A25 PSL1 F	44,247	0,304
Coluna de Cimentação	27,09	4
Arenito Berea	8,7381	21,40

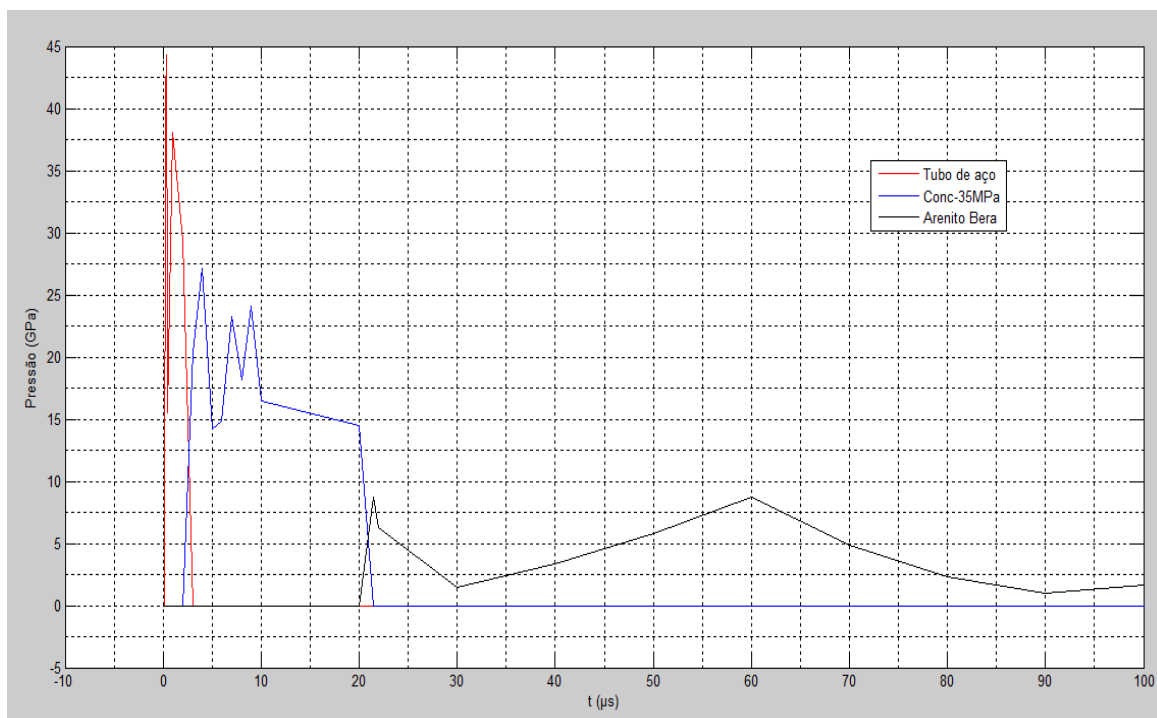


FIG. 7.11 Pressões dos alvos entre os tempos 0 e 100 μs na malha Lagrangeana na primeira simulação.

A FIG. 7.12 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 FIG. 7.13, onde o valor da velocidade vai decrescendo ao passo que o jato vá colidindo com cada material que possui uma resistência. A partir do tempo 500 μs na FIG. 7.12 não há um aumento significativo da posição do jato. A penetração produzida entre o tempo de 500 e 700 μs é de 0,484mm.

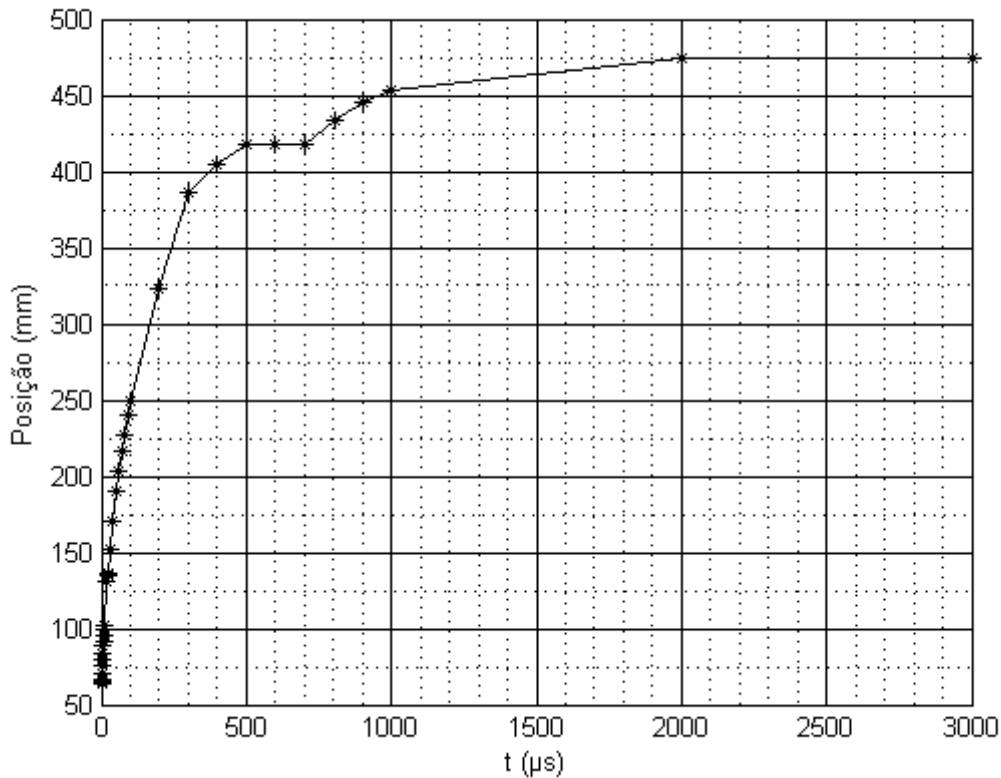


FIG. 7.12 Posição do jato entre os tempos 0 e 3000 μs na malha Lagrangeana na primeira simulação.

A FIG. 7.13 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.

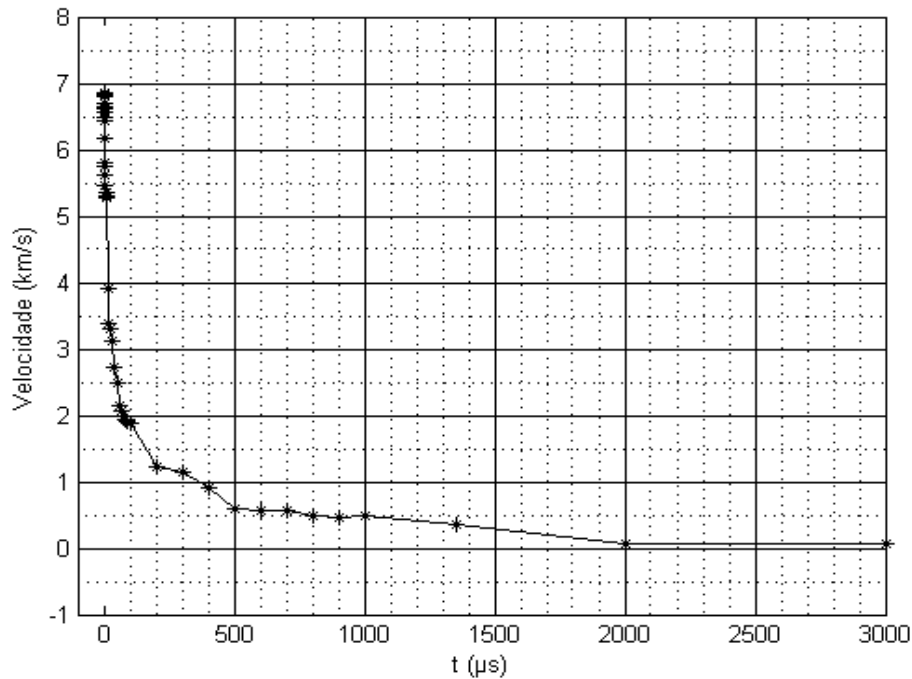


FIG. 7.13 Velocidades máximas do jato entre os tempos 0 e 3000 μs na malha Lagrangeana na primeira simulação.

A FIG. 7.14 contém as pressões máximas do jato entre os tempos 0 μs a 700 μs. No tempo de 22,0 μs a pressão no jato é de 5,073GPa. Depois desse tempo há as oscilações devido a interação do jato com os materiais já perfurados e depois de 100,0 μs não ocorrem variações de pressão significativas. As variações mais altas da pressão ocorrem quando há o impacto do jato com os três alvos. A TAB. 7.7 contém os valores dos picos de pressão em cada tempo que ocorre o impacto em cada material.

TAB. 7.7 Valores das pressões máximas do jato em cada alvo no respectivos tempo na malha Lagrangeana da primeira simulação.

Alvos Impactados	Tempo (μs)	Pressão máxima (GPa)
Revestimento do poço A25 PSL1 F	0,2003	136,2
Coluna de Cimentação	3,0	53,51
Arenito Berea	30,0	10,54

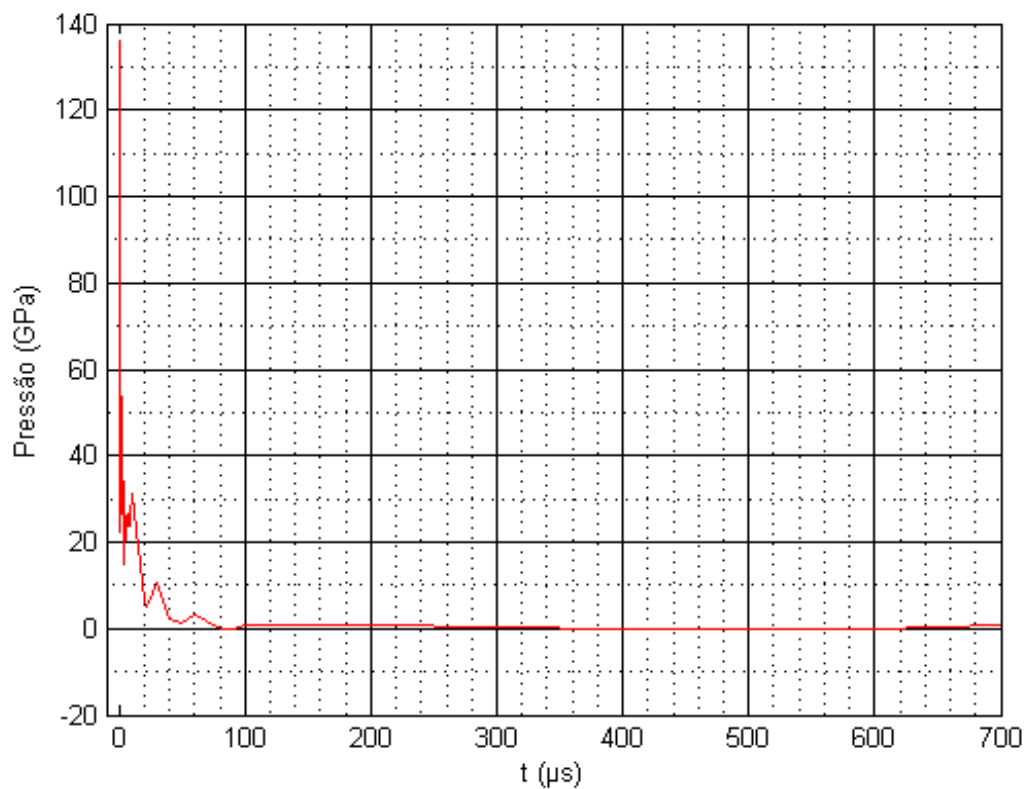


FIG. 7.14 Pressões máximas do jato entre os tempos 0 e 700 μs na malha Lagrangeana na primeira simulação.

A TAB. 7.8 contém os valores máximos e pressão encontrados no jato e o tempo em que eles se encontram.

TAB. 7.8 Valores máximos de pressão, velocidade e posição encontrados no jato e seus respectivos tempos da primeira simulação.

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

7.3 RESULTADOS NA MALHA LAGRANGEANA PARA PENETRAÇÃO DA SEGUNDA SIMULAÇÃO

A segunda simulação foi realizada com os alvos após a simulação da carga na malha Euleriana até o tempo de 11,87 μs e a distância ótima entre a carga e o alvo (*stand-off*) é de 15,75 mm, que é a mesma usada no experimento, e de 17,0 mm somente para comparação. Para a segunda simulação a malha usada é Lagrangeana e os dados de entrada para a malha estão na TAB. 6.15. Os dados de entrada das configurações geométricas dos alvos estão na TAB. 6.14, e os dados de entrada para os materiais dos alvos estão nas TAB.6.4, 6.7, 6.8 e 6.9. A carga é remapeada com as condições que estava na malha Euleriana. A contagem do tempo é reiniciada. A simulação durou cinco dias, vinte e duas horas e quarenta e três minutos, até o tempo de 3000 μs . O passo de tempo a cada ciclo nesta simulação está entre 10^{-3} μs e 10^{-4} μs .

Assim como na primeira simulação o primeiro alvo que o jato encontra é o revestimento do poço A25 PSL1 F, o segundo a coluna de cimentação com o cimento CONC-35MPa e o último alvo é o arenito Berea. A TAB. 7.9 contém os valores de tempo de cada penetração em cada alvo.

TAB. 7.9 Valores do tempo de passagem do jato em cada alvo na segunda simulação.

Alvo	Tempo (μs)
Revestimento do poço A25 PSL1 F	5,7994
Coluna de Cimentação	5
Arenito Berea	2989,2006

A FIG. 7.15 mostra o início de penetração nos três alvos e o empilhamento do jato antes da penetração. O jato colide com o tubo de aço no instante de 0,2006 μs , a colisão com o cimento ocorre no instante 6 μs e com o arenito Berea ocorre no instante 11,0 μs .

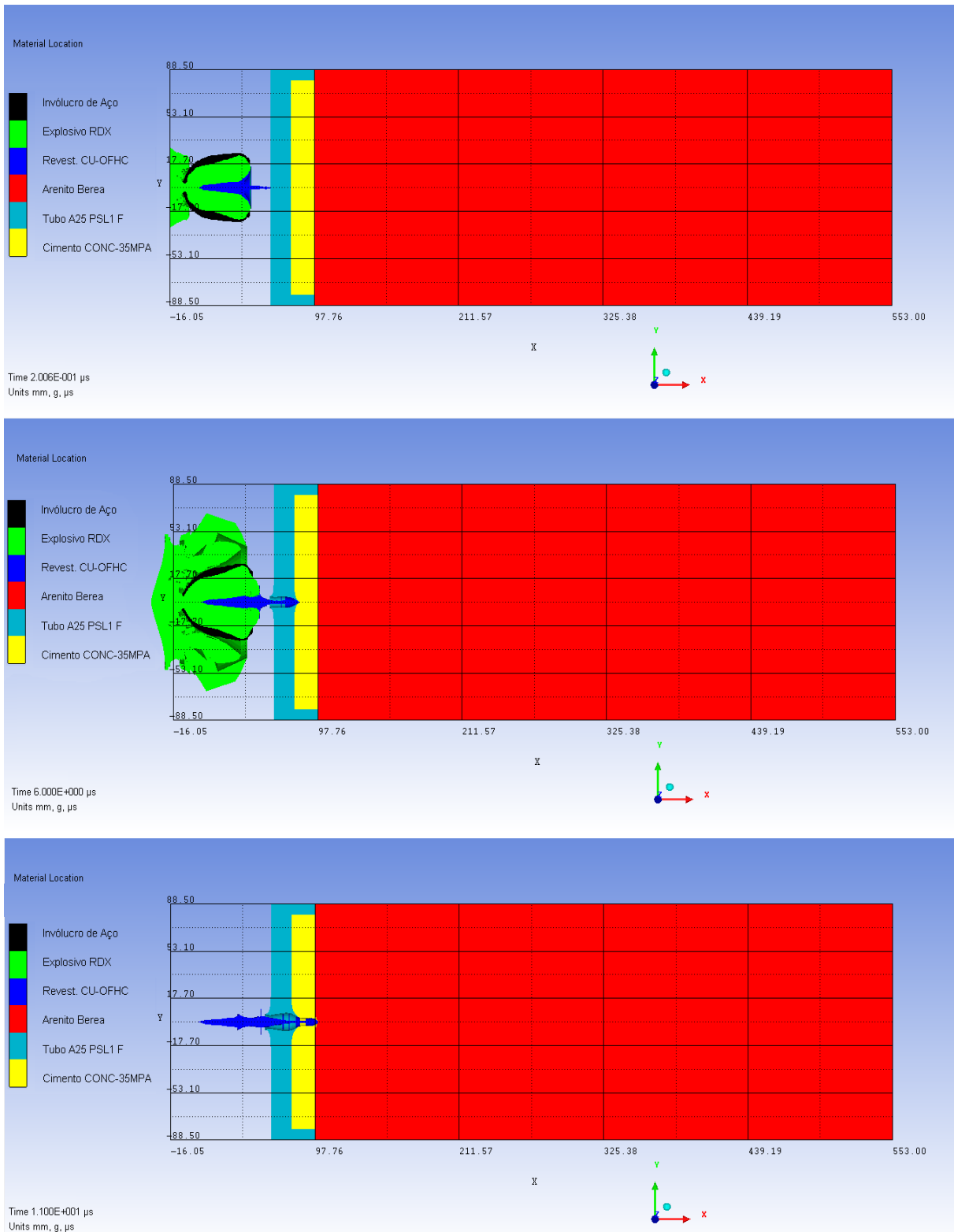


FIG. 7.15 Colisão do jato em cada alvo nos tempos 0,2006 μs , 6,0 μs e 11 μs na malha Lagrangeana da segunda simulação.

No tempo de 2000 μs ocorreu o acúmulo de massa de jato no final do túnel perfurado, conforme é mostrado na FIG. 7.16. Observa-se também o afinamento do túnel devido ao alongamento do jato que proporciona seu estreitamento em algumas regiões no tempo de 1000 μs . A penetração nos tempos 1000 μs , 2000 μs e 3000 μs estão na TAB. 7.10.

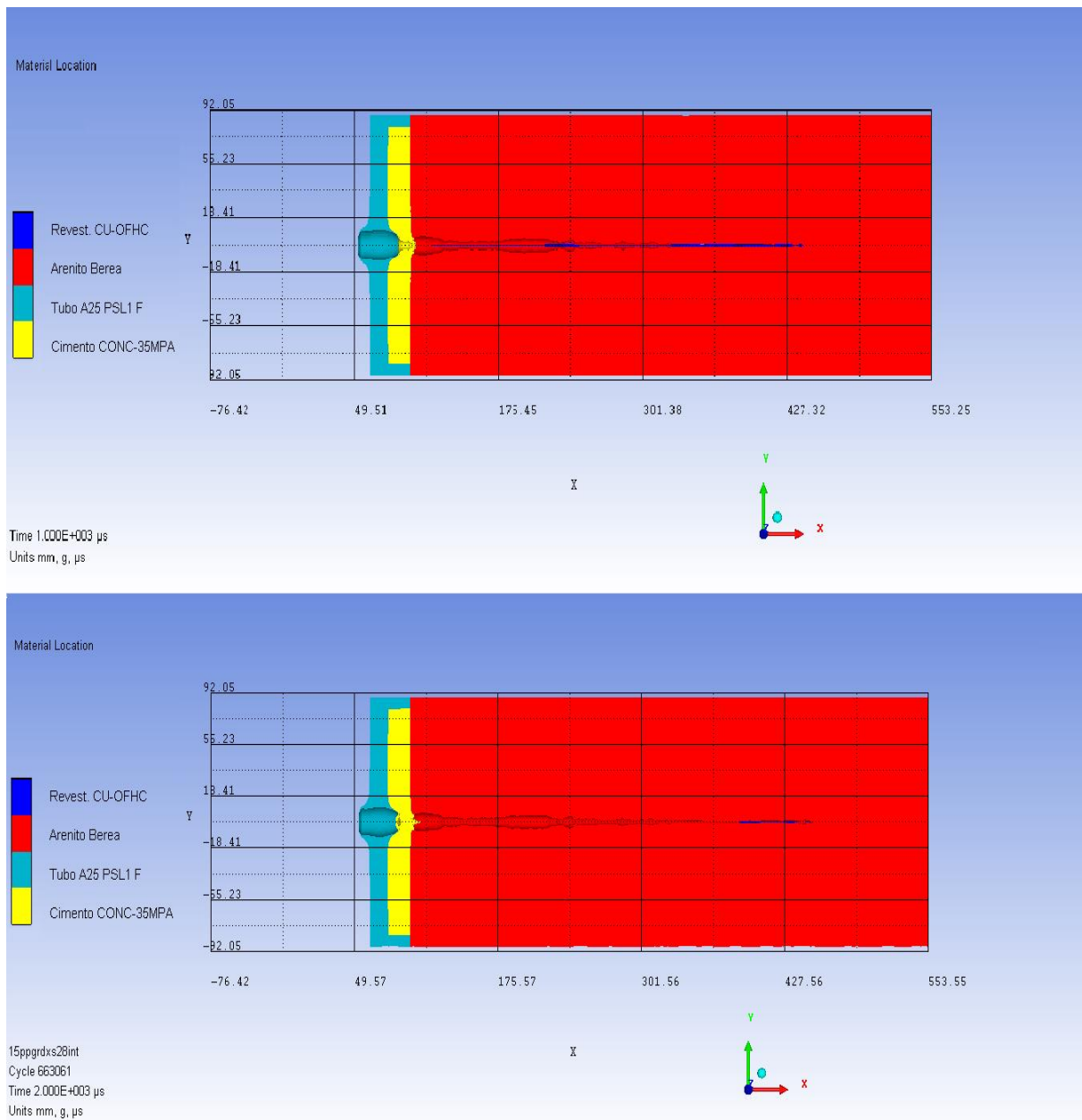


FIG. 7.16 Localização do jato nos tempo de 1000 μs (acima) e 2000 μs (abaixo) na malha Lagrangeana da segunda simulação.

TAB. 7.10 Valores de penetração entre os tempos de 1000 μs , 2000 μs e 3000 μs no arenito Berea na segunda simulação.

Tempo (μs)	Penetração (mm)	Penetração (in)
1000	343,14	13,51
2000	351,88	13,85
3000	354,56	13,94

Os picos de pressão para cada alvo estão em instante de tempo diferentes. Os picos ocorrem quando o jato impacta em cada alvo, e as reflexões dentro de cada material. Pode-se observar os picos de pressão em cada intervalo tempo de colisão na FIG. 7.17. O mesmo fenômeno visto na FIG. 7.11 da primeira simulação é verificado também na FIG. 7.17, onde há oscilações dos picos das pressões devido às reflexões e interações das ondas de pressão. O pico de 6,698 GPa no tempo de 60 μs surge pelo efeito de interação da onda que está indo em direção ao final do arenito Berea e outra que refletiu no final do arenito Berea. A TAB. 7.11 contém os valores dos picos de pressão com cada material e seu respectivo tempo.

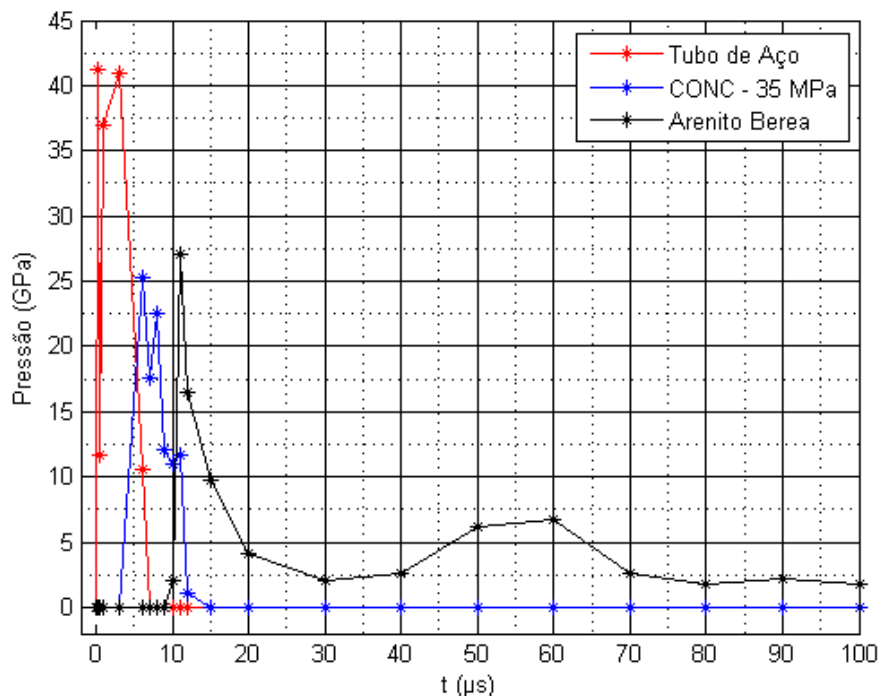


FIG. 7.17 Pressões dos alvos entre os tempos 0 e 100 μs na malha Lagrangeana da segunda simulação.

TAB. 7.11 Valores máximos de pressão encontrados nos alvos nos respectivos tempos na segunda simulação.

Alvos	Pressão máxima (GPa)	Tempo (μs)
Revestimento do poço A25 PSL1 F	41,116	0,2006
Coluna de Cimentação	25,28	6
Arenito Berea	27,04	11

A FIG. 7.18 contém a posição do jato em cada instante de tempo. Pode-se observar 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 FIG. 7.19, onde o valor da velocidade vai decrescendo.

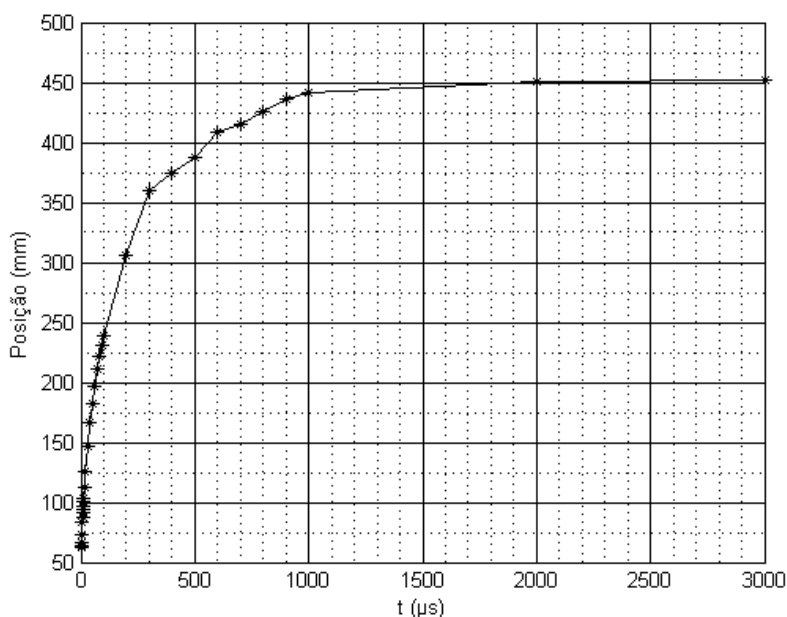


FIG. 7.18 Posição do jato entre os tempos 0 e 3000 μs na malha Lagrangeana da segunda simulação.

A FIG. 7.19 contém as velocidades máximas encontradas no jato de 0 até 3000 μs . A velocidade que aparece depois de 2000 μs no gráfico é a velocidade máxima do jato ao acumular no fundo do túnel perfurado.

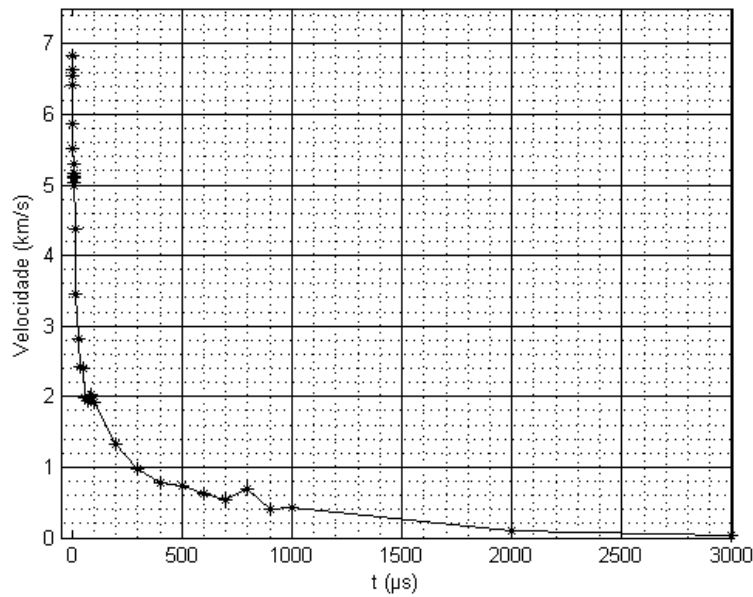


FIG. 7.19 Velocidades máximas do jato entre os tempos 0 e 3000 μ s na malha Lagrangeana da segunda simulação.

A FIG. 7.20 contém as pressões máximas do jato entre os tempos 0 μ s a 300 μ s. No tempo de 0,2006 μ s a pressão no jato é de 136,5 GPa. Depois desse há a oscilação pequena da pressão e esta não sofre grandes variações a partir do tempo de 80 μ s. As variações mais altas da pressão ocorrem quando há o impacto do com os três alvos. A TAB. 7.12 contém os valores dos picos de pressão em cada tempo que ocorre com impacto em cada material. A TAB. 7.13 contém os valores máximos de pressão encontrados no jato e o tempo em que eles se encontram.

TAB. 7.12 Valores das pressões máximas do jato em cada alvo nos respectivos tempos na malha Lagrangeana da segunda simulação.

Alvos Impactados	Tempo (μ s)	Pressão máxima (GPa)
Revestimento do poço A25 PSL1 F	0,2006	136,5
Coluna de Cimentação	3	33,18
Arenito Berea	11	4,632

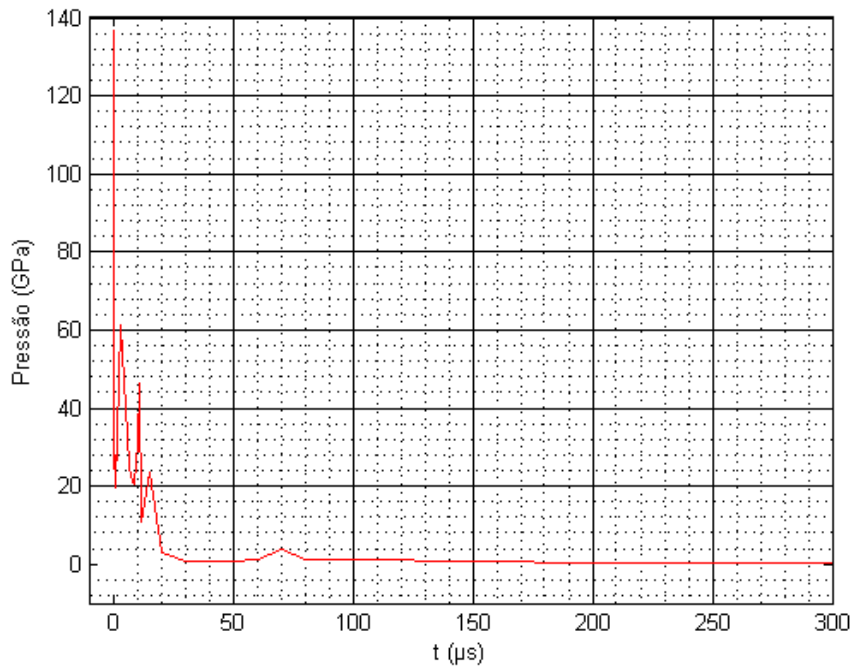


FIG. 7.20 Pressões máximas do jato entre os tempos 0 e 300 μs na malha Lagrangeana da segunda simulação.

TAB. 7.13 Valores máximos de pressão, velocidade e posição encontrados no jato e seus respectivos tempos da segunda simulação.

Propriedades	Valores	Tempo (μs)
Pressão máxima	136,5GPa	0,2006
Velocidade máxima	6828 m/s	0
Posição Máxima	452,23mm	3000

Também foi simulado a penetração com o distanciamento da carga em um ponto mais distante. A distância ótima entre a carga e o alvo (*stand-off*) usada foi de 17,0 mm, ou seja 1,25mm maior que os parâmetros do experimento. Verificou-se que a penetração também diminui como mostra a FIG. 21 no tempo de 1000 μs . A TAB. 7.14 contém os valores de cada penetração para cada distância ótima. Observou-se que o distanciamento da carga influencia na penetração. A diferença de 1,25mm de distância ótima gerou uma diferença de penetração de 18,45 mm (0,73 in).

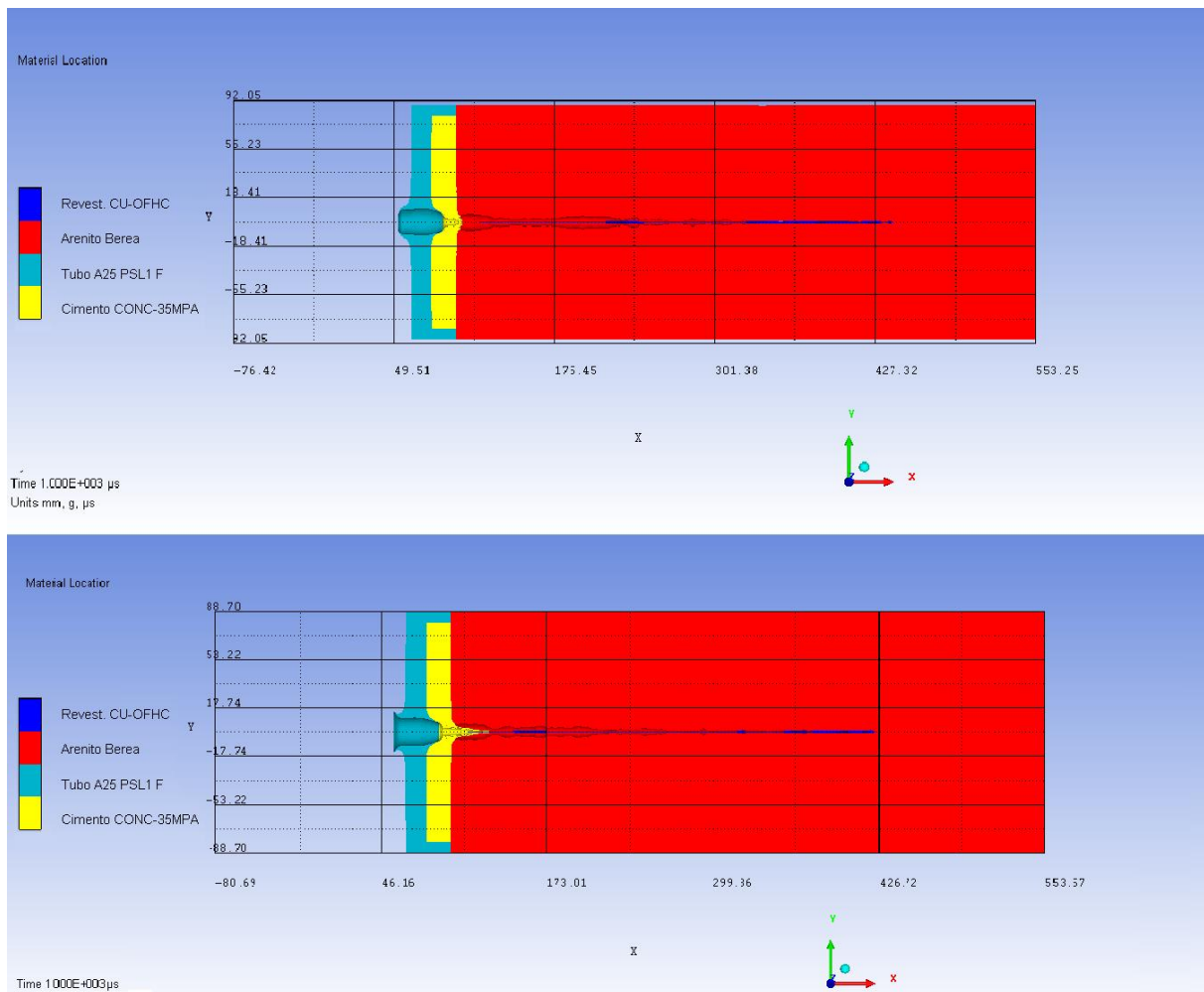


FIG. 7.21 Posição do jato no tempo de 1000 μs para distância ótima de 17,0 mm (acima) e 15,75 mm (abaixo) na malha Lagrangeana da segunda simulação.

TAB. 7.14 Valores de penetração no arenito Berea entre os distância de 17mm e 15,75 no tempo de 1000 μs .

stand-off (mm)	Penetração (mm)	Penetração (in)
17	325,11	12,8
15,75	343,56	13,53

Os resultados obtidos na simulação se distanciaram dos obtidos no experimento. Os diâmetros de entrada no arenito Berea, diâmetros máximo no tubo de aço, no cimento e no arenito Berea na simulação se apresentaram diferentes do experimento como demonstra a TAB. 7.15

TAB. 7.15 Diâmetros de entrada no arenito Berea e máximos produzidos no tubo de aço, no cimento e no arenito Berea e diferença percentual entre o experimento e a segunda simulação.

Dados	Diâmetros máximos (mm)			
	Tubo de Aço	Cimento	Arenito Berea	Diâmetro de entrada na Berea
Experimento (mm)	11,43	10,16	26,6192	15,75
Simulação (mm)	20,4	9,773	13,32	11,576
Diferença	78%	3,9%	50%	26,5%

Um dos motivos para que haja esta disparidade entre os valores dos diâmetros do tubo de aço é que o material empregado no experimento seja um aço mais resistente. Já no caso do cimento, os diâmetros se apresentaram bem próximos. No arenito Berea a diferença tanto no diâmetro máximo quanto no de entrada ocorreu provavelmente devido as simplificações no arenito, como a desconsideração da influência dos poros na rocha, as pressões do fluido presente dentro desta e tensões axiais.

A diferença percentual de penetração entre a simulação e o experimento foi de 64% como mostra a TAB. 7.16. Esta diferença percentual se deve ao fato das simplificações do modelo em relação ao arenito e as condições em que este se encontra durante a perfuração.

TAB. 7.16 Valores de penetração no arenito Berea para a segunda simulação (distância ótima de 15,75mm) e para o experimento, e diferença percentual entre eles.

Dados	Penetração (in)
Simulação	13,94
Experimento	8,5
Diferença	64%

7.4 RESULTADOS NA MALHA LAGRANGEANA PARA PENETRAÇÃO DA TERCEIRA SIMULAÇÃO

A terceira simulação foi realizada com os alvos após a simulação da carga na malha Euleriana até o tempo de 11,80 μs . A carga é remapeada com as condições que estava na malha Euleriana e realocada na malha Lagrangeana com os alvos: placa de aço simulando a saída do canhão de aço 4130, o tubo de aço 4140, coluna de cimentação com o cimento COM-35 MPa e o arenito Berea. A distância ótima entre a carga e o alvo (*stand-off*) é de 15,75 mm que é a mesma usada no experimento. Os dados de entrada para cada material usado no alvo estão contidos nas tabelas contidas nas seções 6.2.2, 6.2.3, 6.2.4 e 6.2.5 e os dados de entrada das configurações geométricas dos alvos estão na TAB. 6.16. Os dados de entrada para a malha estão na TAB. 6.17.

A simulação durou de oito dias, vinte e uma hora e e três minutos até o tempo de 3000 μs . O passo de tempo a cada ciclo nesta simulação está entre 10^{-4} μs e 10^{-5} μs . A TAB. 7.17 contém os valores de tempo de cada penetração em cada alvo.

TAB. 7.17 Valores do tempo de passagem do jato em cada alvo na terceira simulação.

Alvo	Tempo (μs)
Placa de Aço 4130 Simulando a Saída do Canhão	1,1997
Tubo de Aço 4140	4,3
Cimento CONC-35MPa	6
Arenito Berea	2989

A FIG. 7.22 contém o início de penetração nos quatro alvos e o empilhamento do jato antes da penetração. O jato colide com a placa de aço simulando a saída do canhão no instante de 0,5003 μs , a colisão no tubo de aço 4140 é no tempo de 1,7 μs , no cimento ocorre no instante 6,0 μs e com o arenito Berea ocorre no instante 11,0 μs .

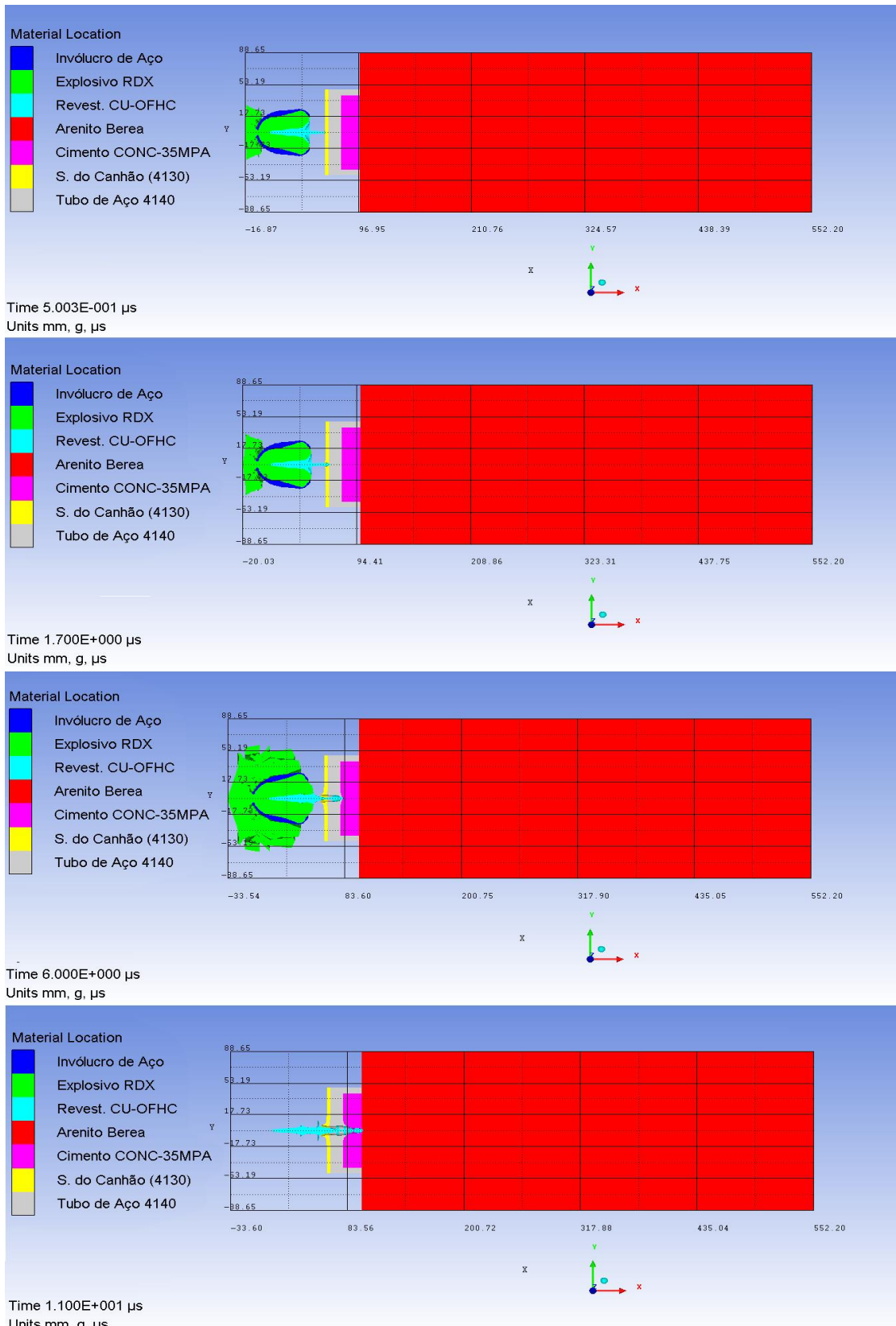


FIG. 7.22 Colisão do jato em cada alvo nos tempos 0,5003 μs, 1,7 μs, 6,0 μs e 11,0 μs na malha Lagrangeana da terceira simulação.

No tempo de 2000 μs já se tem o acúmulo de massa de jato no final do túnel perfurado assim como na segunda simulação. Observa-se também o afinamento do túnel devido ao alongamento do jato que proporciona seu estreitamento em algumas regiões no tempo de 1000 μs . A FIG. 7.23 contém a simulação no tempo de 1000 μs e 2000 μs . Os valores das penetrações entre 1000 μs , e 2000 μs são bem próximas. Já entre os tempos 2000 μs e 3000 μs não há variação significativa entre as penetrações, como mostra a TAB. 7.18.

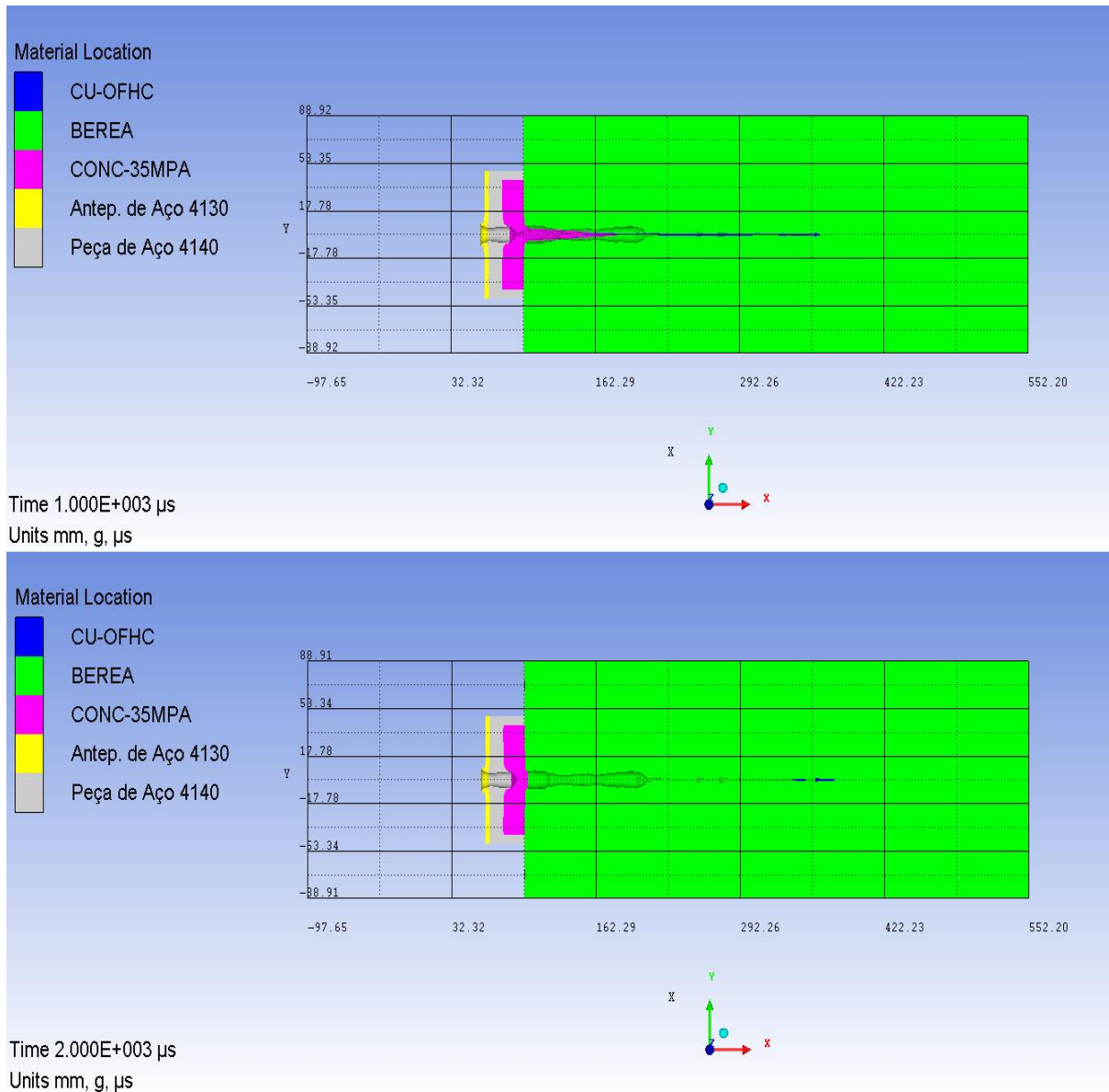


FIG. 7.23 Localização do jato nos tempo de 1000 μs (acima) e 2000 μs (abaixo) na malha Lagrangeana da terceira simulação.

TAB. 7.18 Valores de penetração entre os tempos de 1000 μ s, 2000 μ s e 3000 μ s no arenito Berea na terceira simulação.

Tempo (μ s)	Penetração (mm)	Penetração (in)
1000	267,997	10,55
2000	279,187	10,99
3000	279,637	11,01

Os picos de pressão para cada alvo estão em instante de tempo diferentes. Os picos ocorrem quando o jato impacta em cada alvo. Na terceira simulação foram coletados os dados de pressão de todos os alvos em todos os tempos. Pode-se observar na FIG. 7.24 que ocorrem mais oscilações no arenito Berea pela presença de mais uma camada de material com impedância diferente, que é a camada de saída do canhão. FIG. 7.24. A TAB. 7.19 contém os valores dos picos de pressão com cada material e seu respectivo tempo.

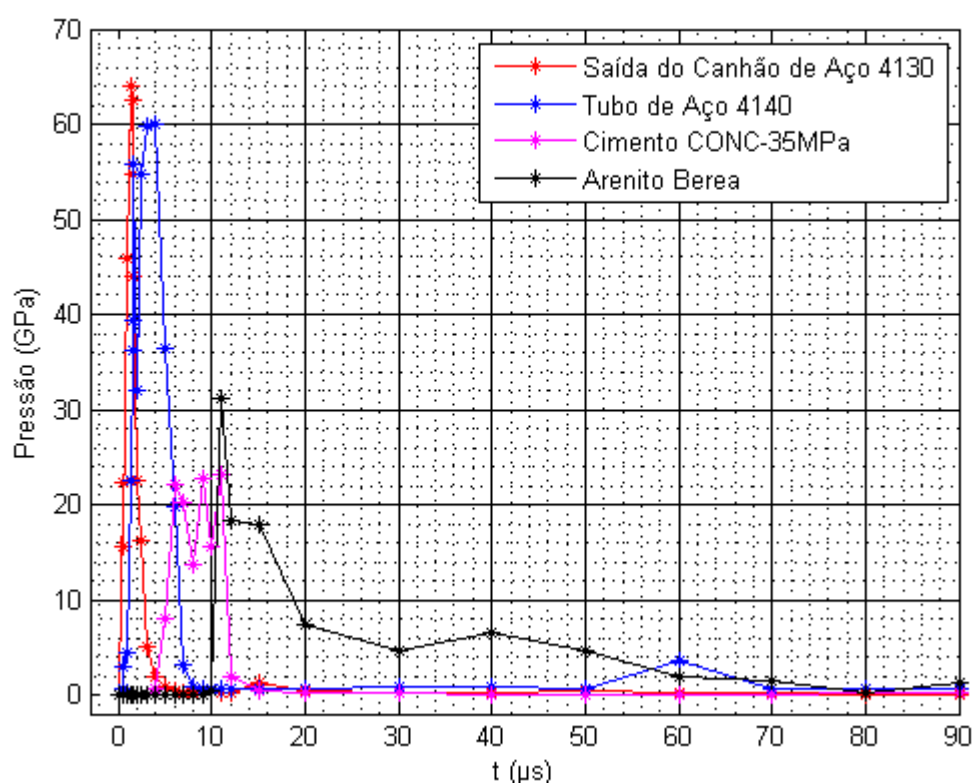


FIG. 7.24 Pressões dos alvos entre os tempos 0 e 90 μ s na malha Lagrangeana da terceira simulação.

TAB. 7.19 Valores máximos de pressão encontrados nos alvos nos respectivos tempos na terceira simulação.

Alvos	Pressão máxima (GPa)	Tempo (μs)
Placa de Aço 4130 Simulando a Saída do Canhão	64,03	1,4
Tubo de Aço 4140	59,95	4,0
Cimento CONC-35MPa	23,19	11,0
Arenito Berea	31,11	11,0

A FIG. 7.25 contém a posição do jato em cada instante de tempo. Pode-se observar que a partir do instante 1500 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 FIG. 7.26, onde o valor da velocidade vai decrescendo.

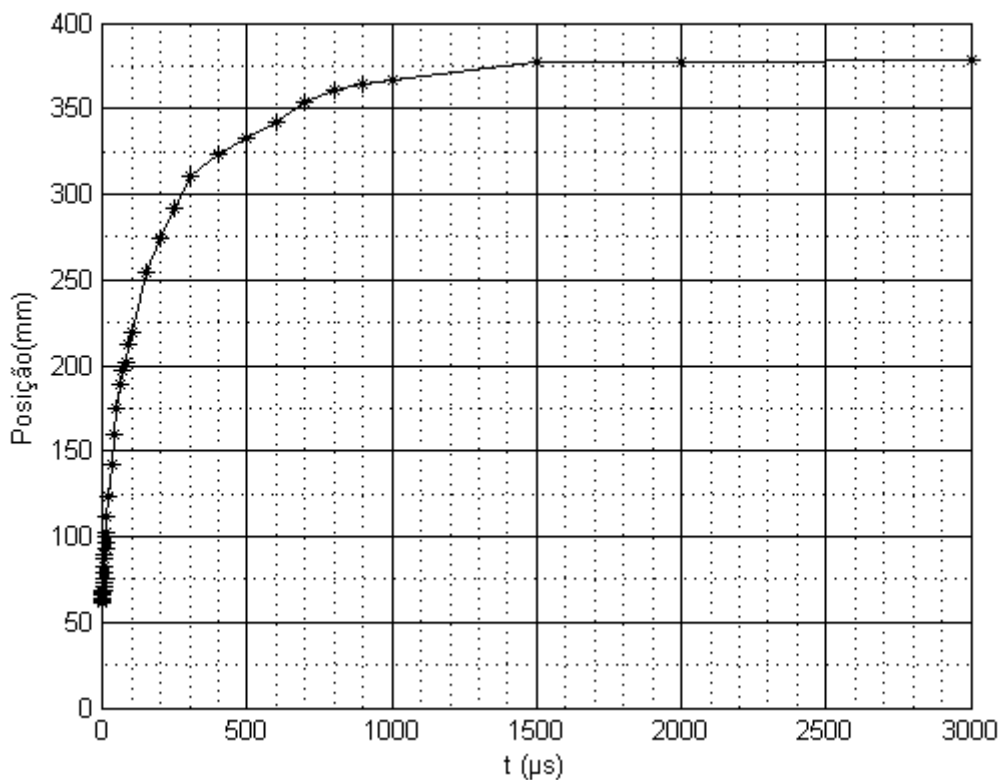


FIG. 7.25 Posição do jato entre os tempos 0 e 3000 μs na malha Lagrangeana da terceira simulação.

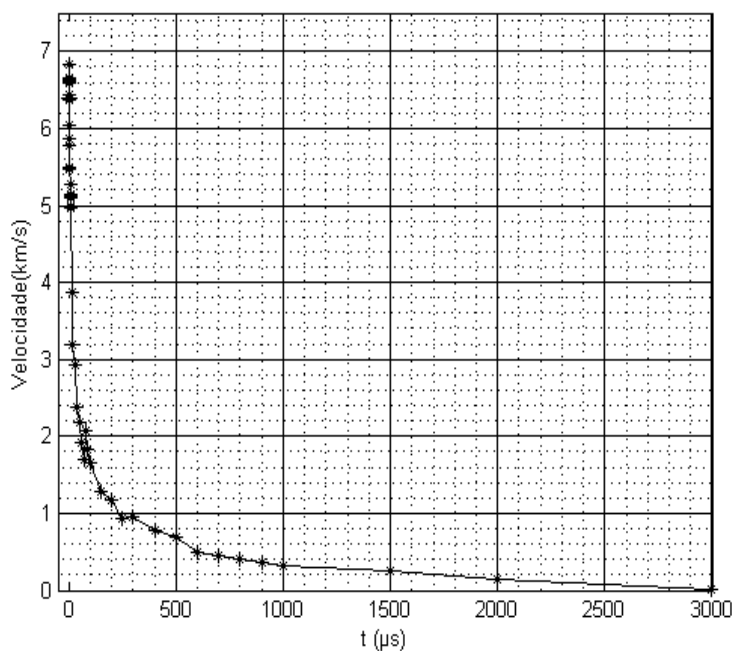


FIG. 7.26 Velocidades máximas do jato entre os tempos 0 e 3000 μs na malha Lagrangeana da terceira simulação

A FIG. 7.27 contém as pressões máximas do jato entre os tempos 0 μs a 1000 μs. No tempo de 1,7 μs a pressão no jato é de 95,91 GPa. Depois desse há oscilações da pressão e esta não sofre grandes variações a partir do tempo de 900 μs e depois não há mais significativa alteração até 1000 μs. As variações mais altas da pressão ocorrem quando há o impacto do jato com os quatro alvos. A TAB. 7.20 contém os valores dos picos de pressão em cada tempo que ocorre com impacto em cada material. A TAB. 7.21 contém os valores máximos de pressões encontrados no jato e o tempo em que eles se encontram.

TAB. 7.20 Valores das pressões máximas do jato em cada alvo nos respectivos tempos na malha Lagrangeana da terceira simulação.

Alvos Impactados	Tempo (μs)	Pressão máxima (GPa)
Placa de Aço 4130 simulando a saída do Canhão	1,7	95,91
Tubo de Aço 4140	3,0	58,19
Coluna de Cimentação	6,0	53,37
Arenito Berea	11,0	51,02

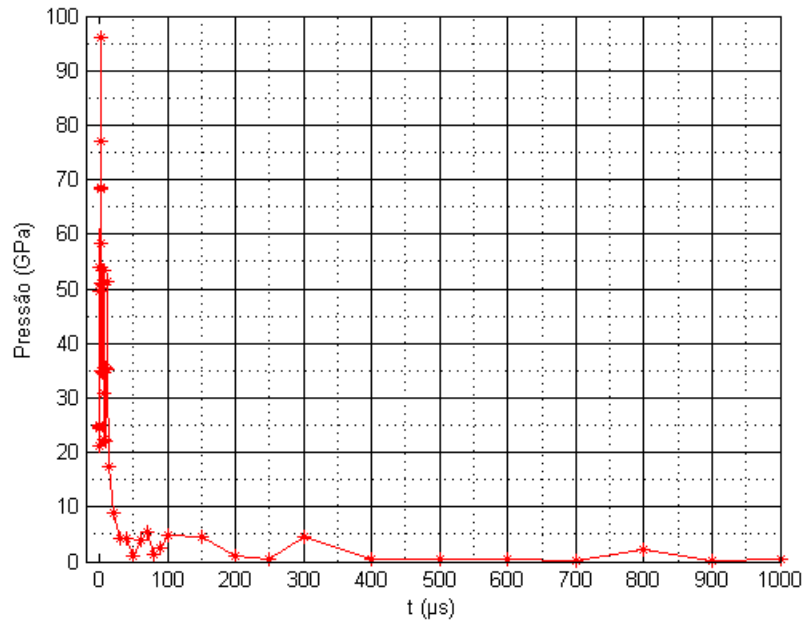


FIG. 7.27 Pressões máximas do jato entre os tempos 0 e 1000 μ s na malha Lagrangeana da terceira simulação.

TAB. 7.21 Valores máximos de pressão, velocidade e posição encontrados no jato e seus respectivos tempos da terceira simulação.

Propriedades	Valores	Tempo (μ s)
Pressão máxima	95,91GPa	1,7
Velocidade máxima	6828 m/s	0
Posição Máxima	377,8mm	3000,0

Os resultados obtidos na simulação se aproximaram do experimento. Os diâmetros de entrada no arenito Berea, diâmetros máximo no tubo de aço, no cimento e no arenito Berea na simulação se apresentaram mais próximos do experimento como demonstra a TAB. 7.22. Observa-se que a diferença percentual maior é com respeito ao arenito Berea, porque para este foram realizadas simplificações para a simulação. Entretanto os valores das diferenças percentuais dos diâmetros máximos diminuíram em relação a segunda simulação. Isto mostra que o modelo se aproximou do experimental.

TAB. 7.22 Diâmetros máximo e mínimo de entrada na placa de aço 4130 da saída do canhão, tubo de aço 4140, no cimento e no arenito Berea e diferença percentual entre o experimento e a terceira simulação.

Dados	Diâmetro Máximo			Diâmetro Mínimo		
	Exp. (mm)	Simulação (mm)	Dif.	Exp. (mm)	Simulação (mm)	Dif.
Placa de Aço 4130 Simulando a Saída do Canhão	11,43	13,83606	21,05%	9,1440	10,07418	10,17%
Tubo de Aço 4140	11,17	12,64576	13,22%	10,16	9,6278	5,24%
Cimento CONC-35MPa	10,16	10,47	3,05%	8,89	6,92584	22,09%
Arenito Berea	26,6192	14,136	46,90%	-	-	-
Diâmetro de entrada na Berea	15,748	14,136	10,24%	14,9860	12,5905	15,99%

A diferença percentual de penetração entre a simulação e o experimento foi de 29,53% como mostra a TAB. 7.23. Esta diferença percentual se deve às simplificações do modelo em relação ao arenito e as condições em que este se encontra durante a perfuração. A diferença percentual de penetração no arenito Berea da terceira simulação com o experimento se apresentaram menores que a diferença com a segunda simulação que foi de 64%.

TAB. 7.23 Valores de penetração no arenito Berea para a terceira simulação e para o experimento, e diferença percentual entre eles.

Dados	Penetração (in)
Simulação	11,01
Experimento	8,5
Diferença	29,53%

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

8.1 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um modelo computacional para simulações de cargas ocas empregadas na indústria do petróleo. As simulações são realizadas desde a detonação do explosivo, formação do jato e até a colisão com alvos: saída do canhão, revestimento do poço, coluna de cimentação e o arenito Berea que representa o reservatório que contém o petróleo.

Com o trabalho desenvolvido, e levando em consideração as simplificações adotadas e os resultados obtidos, pode-se concluir que:

1. O método de Euler permite modelar e a observar o fenômeno do colapso do revestimento metálico da carga oca de modo bastante satisfatório.

2. O método de Lagrange possibilitou a análise da penetração do jato nos alvos e a interação entre o jato e os mesmos. O método também possibilitou observar a interação entre as ondas de pressão dentro dos alvos.

3. As simulações para a validação do código proporcionaram o estudo e a interação ente as equações de conservação, estado e constitutiva e o termo de viscosidade. Na primeira simulação os resultados obtidos são próximos aos de NEVES (2013), o que mostra que o modelo é suficiente para simulação de cargas militares. Isto deve ao fato de os dois trabalhos usarem as mesmas equações, porém com métodos de soluções diferentes O comportamento do material e formação do jato são similares nos dois trabalhos. A onda de choque na simulação da carga sem involucro apresentou resultados menores que 1% (TAB. 5.5) de diferença na pressão dentro explosivo. A distância da onda de choque e a posição do jato na simulação apresentaram valores muito próximos aos do trabalho de NEVES (2013). O resultado que tem maior diferença percentual foi a da velocidade máxima com 8,21% (TAB.5.7). As diferenças nos resultados obtidos na primeira simulação se devem a diferença entre os métodos de aproximação, pois um fez-se aproximações pelo método SPH e outro pelo método de Euler.

4. Na segunda simulação para a validação do código a formação do jato se apresentou semelhante ao do trabalho de ELSHENAWY (2012), que faz uso de uma carga empregada na indústria petrolífera. O valor encontrado da velocidade da ponta do jato no tempo de 18 μ s na

simulação apresentou diferença de 11,84% (TAB. 5.11) em relação ao trabalho de ELSHENAWY (2012). Isto se deve ao método de cálculo da velocidade que na simulação se utilizou as equações de conservação e de estado e já o trabalho de ELSHENAWY (2012) faz uso da teoria de PER com o uso da opção JETTING. Mesmo com a diferença percentual, o método se mostrou eficiente para a simulação de uma carga empregada na indústria do petróleo.

5. Com a modelagem computacional foi possível elaborar a configuração geométrica da carga, verificar os materiais empregados, qual tipo de malha e refinamento usados para melhor processamento e os resultados.

6. Com a modelagem do alvo pode-se verificar também os materiais contidos no alvo, a configuração geométrica do alvo, o efeito da dimensão do alvo para a inércia e contenção da parede e o tipo e refinamento de malha empregado para simulação da penetração.

7. Os resultados na 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, como previsto na literatura. Os resultados de pressões e velocidades tanto do explosivo quanto do revestimento proporcionou a visualização da formação do jato e o efeito da quantidade de explosivo em cada tempo de detonação. As curvas dos gráficos, assim como os valores das tabelas para a simulação na malha Euleriana estão dentro do esperado, como é o caso do valor dado pela TAB. 7.1 com diferença percentual menor que 2%.

8. Os resultados obtidos na malha Lagrangeana para primeira simulação permitiu o estudo do impacto do jato com cada alvo e o tempo de penetração em cada um. Foi verificado o quanto o jato penetra nos alvos e o efeito da resistência do material quanto decresce o valor da velocidade e a taxa de penetração. Pode-se observar as oscilações no perfil de pressões nos alvos devido as reflexões e interações das ondas de pressão produzidas. Um dos aspectos físicos que pode ser apresentado é o acúmulo de jato no final do túnel e o afinamento do jato.

9. Os resultados da segunda simulação se aproximaram pouco dos resultados obtidos no experimento devido à implementação de materiais diferentes dos usados no experimento, como os aços presentes na saída do canhão e no revestimento do poço e as simplificações feitas na modelagem do alvo Berea. Durante o experimento a Berea estava com fluido em seus poros e sob o efeito de pressão uniaxial, o que garantiu o efeito mais realístico de um reservatório. Contudo, a simulação não possuía estas condições, o que gerou este distanciamento dos resultados. O resultado que mais se aproxima do experimento é com o cimento CONC-35MPa 3,9% de diferença no valor do diâmetro máximo (TAB.7.15). O resultado da penetração apresentou uma diferença de 64% (TAB. 7.16), o que mostra que o modelo precisava ser

modificado de modo que tornasse mais próximo do experimento. Os resultados da segunda simulação serviram de estudo da penetração do jato, como este perde velocidade, as pressões oscilando em cada material. A segunda simulação servir como passo para a terceira simulação.

10. A terceira simulação teve seus resultados mais próximos do experimento, visto que os materiais usados eram similares ao usado no experimento, com exceção do arenito Berea. Os resultados dos diâmetros máximos de cada alvo se aproximaram dos valores do experimento em comparação à segunda simulação como mostra a TAB. 7.23. A mudança dos aços que compõe a saída do canhão e revestimento do poço proporcionou a diminuição percentual da penetração de 64% (TAB. 7.16) para 29,53% (TAB. 7.23) de diferença entre as simulações e o experimento, o que significa que o modelo se aproximou mais do experimento. Esta diferença significativa de 29,53% é pertinente porque o modelo da rocha contém as mesmas simplificações da segunda simulação.

8.2 SUGESTÕES

Com a proposta de continuar a simular o colapso da carga moldada aplicada em alvos para indústria do petróleo, deve-se aprimorar os modelos da carga e dos alvos. A seguir estão algumas propostas a serem estudadas visando a melhorar os modelos e das continuidades ao trabalho:

1. Verificar o uso da teoria de PER com o uso da opção JETTING no software para análise do jato e escória.
2. Utilizar desenhos reais de cargas empregadas na indústria do petróleo para a geração de resultados mais precisos.
3. Implementar poros no arenito Berea ou outro tipo de arenito usado para simular reservatórios com petróleo.
4. Incluir fluído nos poros do arenito Berea ou outro tipo de arenito, ou formação rochosa a fim de proporcionar o efeito do petróleo no reservatório.
5. Aplicar fluído na região que contém o canhão com a carga para aproximar do efeito do poço completado com fluido de perfuração.
6. Confinar o arenito com algum fluido a fim de aprisionar e criar a câmara de confinamento do experimento, como é ilustrada na FIG. 4.3.

7. Mapear o túnel feito pela perfuração e simular a produção de petróleo.
8. Investigar as interações das ondas nos alvos e a velocidade do jato.
9. Investigar as interações das ondas nos alvos para efeito a espessura do túnel em cada tempo.
10. Investigar as oscilações máximas das pressões em cada alvo e a posição do jato nestes instantes.
11. Mudar os coeficientes de viscosidade artificial e verificar se as pressões no jato e nos alvos dos gráficos se modificam.
12. Coletar dados de temperatura.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Specification 5L: Specification for Line Pipe**. ISO 3183. 2008.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Specification 5L: Specification for Line Pipe**. 43 ed. 2004.

ANAZAWA, R. M., ABDALLA, A. J., HASHIMOTO, T. M. e PEREIRA, M. S.. **Caracterização microestrutural e mecânica dos aços 4340 e 300M após tratamentos térmicos isotérmicos e intercríticos**. VI Conferência Brasileira sobre Temas de Tratamento Térmico . Jun. 2012.

ANSYS AUTODYN User's Manual. Theory Manual. Release 14.0. 2011.

AUTODYN. **Theory Manual**, ANSYS-Century Dynamics, Rev.4.3, 2005.

BAIOCO, S. J. e SECKLER C. S.. **Desenvolvimento Do Modelo De Síntese E Otimização Aplicado A Procedimentos Decanhoneio De Poços De Petróleo**. 2009. 71p. Dissertação (Grau em Engenheiro De Petróleo) – Universidade Federal Do Rio De Janeiro, 2009.

BAR, G., **Fundamentals of Compressible Fluid Mechanics**. Minneapolis. Versão 0.4.4.2 aka 0.4.4.1j. 2007.

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.

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.

CAULFIELD, I., DUFRENE, K. J., MAHARAJ, M., et al. **Project Management Offshore Well Completions**, Oilfield Review, 2007.

CHEVRON TEXACO. **Data sheet for concrete coating of line pipe**. PPL-DS-4807 [online]. 2002. Disponível:<http://www.networkintl.com/contents/auction/QFPIRA000HBW/QFPIRA00LCPK/!QFPIRA00IRN1CONCRETE%20DATA%20SHEET.pdf> [capturado em 05 ago. 2014].

CHOU, P. C., CARLEONE, J., HIRSCH, E., FLIS, W. J., CICCARELLI, R. D. **Improved Formulas for Velocity, Acceleration and Projection Angle of Explosively Driven Liners**. Propellants, Explosives, Pyrotechnics., v. 8, dez. 1983, p. 175-183.

COSTA, A., CASTELO, B., NASCIMENTO, D., FONSECA, F., CRUZ, G. L., KLEIN, G., MOUSINHO, G. CALFA, L. F. F., SALGADO, P. S. E DIAS, V. B.. **Completação de poços**, Apostila da disciplina de Perfuração e Completação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dezembro de 2000.

DEFOURNEAUX, M. e JACQUES L.. "**Explosive Deflection of a Liner as a Diagnostic of Detonation Flows**," Proceedings Fifth Symposium (International) on Detonation, ACR-184 Office of Naval Research-Department of Navy, pp.'457-466, Pasadina, California, Agosto 18-21, 1970.

ELSHENAWY, T., Q., M.. **Influences of target strength and confinement on the penetration deth of na oil well perforator**. Interational Journal of Impact Engineering. 8 :pp. 130-137, 2014

ELSHENAWY, T.. **Criteria of design improvement of shaped charges used as oil well perforators**. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica, University of Manchester, 2012

GÜREL, E.. **Modeling and Simulation of Shaped Charges**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Middle East Technical University, 150p. 2009.

- GRUJICIC. M, PANDURANGAN, B., ZECEVIC, U., KOUDELA, K. L. e CHEESEMAN. B. **A. Ballistic Performance of Alumina/S-2 Glassreinforced Polymer-Matrix Composite Hybrid Lightweight Armor Against Armor Piercing (AP) And Non-AP Projectiles.** Multidiscipline Modeling in Mat. and Str., Vol. XX, No. XX, pp. 1-28, 2006.
- HARRISON, J. T.. **Improved analytical shaped charge code: BASC**, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen, 1981.
- HASENBERG, D.. **Consequences of Coaxial Jet Penetration Performance and Shaped Charge Desing Criteria.** 2010, 187p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Helmut Schmidt University, 2010.
- HERMANN, W.. **Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials.** Journal of Applied Physics. Vol 40. Pp2490-2499. Maio 1969.
- 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.
- JUNIOR, E. P. L.. **Simulação computacional do colapso do cone e carga oca sob efeito de onda de detonação.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica– Instituto Militar de Engenharia, 2012.
- LEE, Wen Ho. **Computer Simulation of Shaped Charge Problems.** New Jersey, World Scientific, 2006. 380p. ISBN 9812566236
- MARSH S. P et al.. **LASL Shock Hugoniot Data.** University of California. California. USA. 1980.
- MATTA P. S .**Aplicação de Algoritmos Genéticos para a Otimização da Produção em Poços de Petróleo Canhoneados.** Dissertação de doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2007.

- MEYERS, M. A.. **Dynamic behavior of materials**, John Wiley & sons, 1994. ISBN 0-471-58262-X.
- MUNROE, C. E.. **Explosives with Lined Cavities**. Popular Science, New York, v. 56, fev.1900, p. 444-455.
- NARDONE, P. J. **Well Testing Project Management “Onshore and Offshore Operations”**, Gulf Professional Publishing, 2009.
- NEVES, A. P. B.. **Modelagem computacional de uma carga oca**. Tese de Doutorado em Engenharia de Defesa, Instituto Militar de Engenharia, 2014.
- 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.
- PUGH, E. M., EICHELBERGER, R. J. e ROSTOKER, N.. **Theory of jet formation by charges with lined conical cavities**. Journal of Applied Physics, vol 23, p. 532-536, Maio de 1952.
- 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.
- RINEHART, J. S.. **Stress Transient in Solids**. Santa Fé, Novo Mexico, Hyperdynamics,1975, ISBN 0-913270-48-2
- ROY, O. C. W.. **Investigation of advanced personnel armor using layered construction**. 2009. Tese de Mestrado. Naval Postgraduate School, Monterey, California, December 2009.
- ROCHA, L. A. S., AZEVEDO, C. T.. **Projetos de Poços de Petróleo**. Editora Interciência, 2ª edição, 2009. ISBN 978-85-7193-214-2

- SANTOS, J. L.. **Simulação De Ensaio Balístico Dop**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Instituto Militar de Engenharia. 2012.
- 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.
- STEEB H., KURZEJAA P. S., FREHNERB M. E SCHMALHOLZC S. M. **Phase Velocity Dispersion and Attenuation of Seismic Waves due to Trapped Fluids in Residual Saturated Porous Media**. Soil Science Society of America. Vol. 11 No. 3. Setembro, 2012
- 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.
- 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.
- Van LEER, B..**Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme. IV. A new Approach to Numerical Convection**. J. Comp. Phys. 23, pp 276-299, 1977.
- Van LEER, B..**Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme. V. A Second Order Sequel to Godynov's Methos**. J. Comp. Phys. 32, pp 101-136, 1979.
- VIEIRA, A. G. O. e SANTANA, A. P. S. C.. **Canhoneio Em Poços Petrolíferos**, Cadernos de Graduação. 2011. ISSN 1980-1777.
- Von MISES, R. **Mechanik der festen Körper im plastisch deformablen Zustand**. Göttin. Nachr. Math. Phys., vol. 1, pp. 582–592. 1913.

YOSHIDA, M.. **™Program MY1DL One Dimensional Lagran- gian Hydrodynamic Code**,
CETR Report C-06-86 (1986), Center for Explosives Technology Research, 1986.

ZUKAS, J. A., NICHOLAS, T., SWIFT, H. F., Greszczuk, L. B. e Curran, D. R.. Impact
dynamics. New York 1982. 452 p. ISBN 0471086770.

WALTERS W. P. & ZUKAS J. A., **Fundamentals of Shaped Charges**, John Wiley &
Sons,1989.

WILKINS, M. L., ALDER, B., FERNBACK, S. e ROTENBERG, M.,. **Methods of
Computational Physics**. 3. ed. New York: Academic Press, 1964. pp 211-263.