

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Steven Meier

Simulação numérica de uma bomba de penetração

Trabalho de Graduação
2006

Infra-Estrutura

CONFIDENCIAL

CDU 620.178.7

Steven Meier

Simulação numérica de uma bomba de penetração

Orientador

Prof. Dr. Paulo Ivo Braga de Queiroz (ITA)

Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

CENTRO TÉCNICO AEROESPACIAL

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2006

CONFIDENCIAL

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão Biblioteca Central do ITA/CTA

Meier, Steven

Simulação numérica de uma bomba de penetração / Steven Meier.
São José dos Campos, 2006.
70f.

Trabalho de Graduação – Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica –
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2006. Orientador: Prof. Dr. Paulo Ivo Braga de Queiroz.

1. Análise estrutural. 2. Concreto armado. 3. Balística terminal. I. Comando-Geral de Tecnologia
Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura
Aeronáutica. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MEIER, Steven. **Simulação numérica de uma bomba de penetração**. 2006. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Steven Meier

TÍTULO DO TRABALHO: Simulação numérica de uma bomba de penetração

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2006

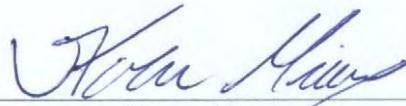
É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Steven Meier
H9B apto 102
São José dos Campos - SP
CEP: 12228-611

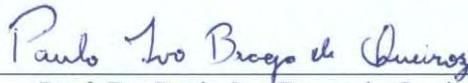
CONFIDENCIAL

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UMA BOMBA DE PENETRAÇÃO

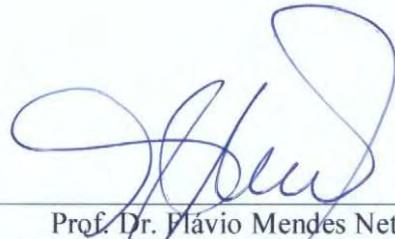
Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Steven Meier
Autor



Prof. Dr. Paulo Ivo Braga de Queiroz (ITA)
Orientador



Prof. Dr. Flávio Mendes Neto
Coordenador do Curso de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica

São José dos Campos, 22 de novembro de 2006

CONFIDENCIAL

Agradecimentos

Passados cinco anos, é hora de agradecer. Segundo reza a lenda, o aluno do ITA tem dois bons motivos para comemorar: ao conseguir entrar no ITA e, depois, ao sair. Não sejamos ingratos, temos muito a comemorar e a agradecer. Os longos caminhos percorridos madrugadas adentro fizeram com que muitos novos horizontes fossem descortinados.

Os agradecimentos cabem, portanto, não somente ao meu orientador, professor Paulo Ivo, pelo apoio imprescindível à realização desta atividade, como também a todos os demais professores e funcionários desta instituição que, direta ou indiretamente, contribuíram para que todo o suporte necessário fosse dado a cada um de nós formandos da turma 2006.

Agradeço também à toda a equipe da Divisão de Sistemas de Defesa, que colaborou imensamente com a execução deste projeto.

Em especial, gostaria de agradecer à Força Aérea Brasileira, pela oportunidade que me foi dada, ao permitir que eu complementasse minha formação durante esses cinco anos de graduação. Espero agora poder retribuir à altura das expectativas em mim depositadas.

Por fim, como não poderia deixar de ser, agradeço imensamente à minha esposa Simone e aos meus filhos Thales e Thomas, por todo o carinho e amparo emocional dispensados diuturnamente ao longo não apenas desses anos, mas de todo um relacionamento.

Apesar da maioria dos colegas não admitir, sentiremos enormes saudades destes cinco longos anos. Muitas histórias serão lembradas e revividas nos eventuais encontros dos “Sábados das Origens”. Muitos casos serão contados futuramente aos filhos e netos.

Se tivesse sido fácil, não deixaria esse gosto tão especial de vitória, de satisfação pelo dever cumprido. Obrigado a Deus por nos acompanhar hoje e sempre. Espero que nós também possamos ter deixado saudades.

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo simular numericamente o efeito das bombas de penetração de 500 kg e 1000 kg (BPEN-500 e BPEN-1000, respectivamente) em um alvo de concreto armado de alta resistência.

As ferramentas de simulação computacional empregadas foram o MSC.Patran, para o pré- e pós-processamento das informações referentes ao alvo e aos artefatos bélicos, e o MSC.Dytran, para a verificação do comportamento estrutural do alvo após o impacto das bombas.

A fim de validar o *software* Dytran, foram realizados ensaios experimentais no Campo de Provas Brigadeiro Velloso (CPBV) envolvendo o lançamento da bomba de fins gerais de 460 kg (BA-FG-460), num maciço rochoso de arenito.

Devido a restrições orçamentárias do projeto BPEN, não houve condições de construir o alvo em concreto armado. No entanto, para garantir maior precisão nos dados apresentados neste trabalho, deve-se obter amostras do arenito através de sondagens rotativas, e para a execução deste serviço está em andamento um processo licitatório.

Os resultados obtidos servirão de base para a homologação das bombas BPEN-1000 e BPEN-500 no cumprimento dos requisitos operacionais para os quais foram projetadas.

Lista de Figuras

Figura 1 – Representação esquemática da BPEN-1000.	4
Figura 2 – Seção transversal do alvo em concreto armado sem os pilares.....	8
Figura 3 - Esquema da distribuição das armaduras para uma taxa de armadura de 1%.....	9
Figura 4 - Esquema da distribuição das armaduras para uma taxa de armadura de 4%.....	10
Figura 5 – ECP de uma bomba guiada a laser sobre um alvo quadrado de aresta 30 m.	12
Figura 6 – Bomba de exercício BEX-11.	13
Figura 7 – Distribuição de acertos do 3°/10° GAv na modalidade BPGA.	14
Figura 8 – Distribuição das tensões de uma carga puntual.....	18
Figura 9 – Tensão máxima principal atuante sobre uma placa 10 m x 10 m.	21
Figura 10 - Tensão mínima principal atuante sobre uma placa 10 m x 10 m.....	21
Figura 11 – Tensão atuante sobre os pilares (80 cm x 80 cm) devida à compressão.....	23
Figura 12 – Tensão atuante sobre os pilares (80 cm x 80 cm) devida à flexão.....	23
Figura 13 – Seção transversal de um pilar tipo.	25
Figura 14 – ECPs de bombas convencionais e inteligentes sobrepostas ao alvo.	28
Figura 15 – Foguete Sonda II.	28
Figura 16 - Demarcação do CPBV no Mapa Geológico Juruena.....	32
Figura 17 - Clareira natural formada por afloramento rochoso.....	34
Figura 18 - Vista da superfície da pedreira selecionada.....	35
Figura 19 – BA-FG-460 equipada com ponteira de aço 4340.....	37
Figura 20 – Alvo demarcado sobre a pedreira.....	39
Figura 21 – Impacto da segunda bomba BA-FG-460 sobre a pedreira de arenito.	40
Figura 22 – Cratera produzida pela segunda bomba BAFG-460 na pedreira de arenito.....	41
Figura 23 – Primeiro protótipo da BPEN-1000 ainda em fase de testes.	42
Figura 24 – Modelamento da BPEN-1000 por elementos finitos.	43
Figura 25 – Modelamento do alvo por elementos finitos.....	44
Figura 26 – Visualização do modelo completo compreendendo a bomba e o alvo.	44

Lista de Tabelas

Tabela I – Preços de concreto convencional (Abatimento 5±1 cm – Brita 1).....	7
Tabela II - Cálculo do custo total de construção do alvo de concreto.....	11
Tabela III – Parâmetros de emprego da aeronave A-1 na modalidade BPGA.....	13
Tabela IV – Simulação do concreto $f_{ck} = 50$ MPa no Nastran.	19
Tabela V – Resultados de análise estática obtidos através do Nastran.	22
Tabela VI – Esforços solicitantes atuantes sobre os pilares.....	24
Tabela VII – Dados utilizados no dimensionamento através do <i>software</i> nFOCCA.....	24
Tabela VIII – Principais características do foguete Sonda II.....	29
Tabela IX – Formações geológicas na área do CPBV.....	33
Tabela X – Parâmetros dos lançamentos.....	38
Tabela XI – Parâmetros para determinação da profundidade de penetração.	49
Tabela XII – Profundidades de penetração em função da porcentagem de aço.....	50

Lista de Siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASA – Divisão de Sistemas Aeronáuticos
ASD – Divisão de Sistemas de Defesa
BA-FG – Baixo arrasto – fins gerais
BEX – Bomba de Exercício
BPEN – Bomba de Penetração
BPGA – Bombardeio Picado a Grande Altitude
CPBV – Campo de Provas Brigadeiro Velloso
CETEX – Centro de Tecnologia do Exército
ECP – Erro Circular Provável
EMAER – Estado-Maior da Aeronáutica
FAB – Força Aérea Brasileira
GAv – Grupo de Aviação
GEEV – Grupo Especial de Ensaios em Vôo
IAE – Instituto de Aeronáutica e Espaço
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP
ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica
MMA – Manual do Ministério da Aeronáutica
MPI – Ponto Médio de Impacto
NBR – Norma Brasileira
ROP – Requisito Operacional Preliminar
SPT – Standard Penetration Test

Lista de Símbolos e Abreviaturas

- A - área da seção transversal
- A_c - área da seção transversal de concreto
- A_s - área da seção transversal da armadura longitudinal de tração
- a - aceleração
- CRH - raio da seção ogival sobre o diâmetro da bomba (*Caliber Radius Head*)
- D - profundidade de penetração
- E - Módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto.
- F - fator referente à presença da armadura
- força
- f_c' - resistência à compressão simples
- f_{ck} - resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias de idade
- f_{yk} - resistência característica do aço comum ao escoamento
- G - Módulo de elasticidade transversal do concreto
- H - espessura
- I - impulso
- momento de inércia
- K_e - correção para efeito de borda no alvo de concreto
- L - largura
- L_n - comprimento do nariz da bomba
- m - massa
- N - coeficiente de forma do nariz da bomba
- N_d - força normal de cálculo
- N_k - força normal característica
- P - porcentagem volumétrica do aço em relação ao concreto
- Q - quantidade de movimento
- S - penetrabilidade do alvo, Fator S
- s - deslocamento
- T_c - espessura do alvo, medida em função do diâmetro da bomba
- t - tempo

t_c - tempo de cura do concreto, em anos. ($t_c \leq 1$)

V - velocidade de impacto

v - velocidade final

v_0 - velocidade inicial

W_1 - largura do alvo, medida em função do diâmetro da bomba

w - taxa mecânica de armadura

- momento estático

α - ângulo de impacto em relação ao solo

Δ - variação

γ - ângulo de mergulho da aeronave

γ_c - fator de segurança do concreto

γ_f - coeficiente de ponderação da ação

γ_s - fator de segurança do aço

ν - coeficiente de Poisson

- força adimensional

ρ - taxa geométrica de armadura longitudinal de tração

- massa específica

ϕ - diâmetro

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos.....	2
1.2	Projeto BPEN.....	2
1.3	Participação do ITA.....	4
2	Concepção do alvo em concreto armado.....	6
2.1	Estimativa de custos.....	6
2.1.1	Materiais empregados.....	6
2.1.1.1	Concreto simples ($f_{ck} = 50$ MPa).....	6
2.1.1.2	Armadura (aço CA-50).....	8
2.1.1.3	Custos adicionais.....	10
2.1.2	Custo total.....	11
2.2	Probabilidade de acerto.....	12
2.2.1	Modalidade BPGA.....	13
2.2.2	Resultados do 3º/10º GAv.....	14
2.2.3	Recuperação das bombas.....	15
2.3	Dimensionamento do alvo.....	15
2.3.1	Solução modular.....	15
2.3.2	Conversão de uma carga dinâmica em estática.....	16
2.3.3	Cargas totais atuantes.....	18
2.3.4	Distribuição da carga estática sobre a laje.....	18
2.3.5	Laje.....	19
2.3.5.1	Análise estática através do Nastran.....	19
2.3.5.2	Tensões máxima e mínima na flexo-compressão.....	20
2.3.5.3	Dimensionamento da armadura da laje.....	22
2.3.6	Pilares.....	22
2.3.6.1	Análise estática através do Nastran.....	22
2.3.6.2	Dimensionamento da armadura dos pilares.....	24
2.3.7	Fundações.....	25
3	Alternativas de projeto.....	27
3.1	Sistema de guiamento inteligente.....	27
3.2	Aceleração da bomba em trilhos.....	28

3.3	Simulação em micro-escala.....	30
3.4	Lançamento contra um alvo natural	31
4	Campo de Provas Brigadeiro Velloso	32
4.1	Características Geológicas do CPBV	32
4.2	Coordenadas geográficas da pedreira.....	34
5	Ensaio BA-FG-460.....	36
5.1	Características das bombas de fins gerais	36
5.2	Parâmetros de emprego	38
6	Ensaio BPEN-1000 e BPEN-500.....	42
7	Simulação Numérica.....	43
7.1	Parâmetros dos materiais	45
7.2	Resultados Obtidos	45
8	Método empírico.....	46
8.1	Condições de contorno	46
8.2	Equações de penetração para concreto	47
9	Conclusões.....	51
9.1	Sugestões de continuação do trabalho	51
	Referências Bibliográficas	53
	Apêndice A - Resultados do 3º/10º GAv na modalidade BPGA.	56
	Apêndice B - Parâmetros do concreto $f_{ck} = 50$ MPa empregados na simulação numérica.	58
	Apêndice C - Parâmetros do aço CA-50 empregados na simulação numérica.	59

1 Introdução

A grande vantagem das simulações numéricas consiste em permitir uma série de testes sobre estruturas ou protótipos, ainda na fase de pré-projeto, antes mesmo da concepção do primeiro modelo real, com um custo consideravelmente menor. As simulações não descartam o uso dos testes experimentais, mas esses passam a ser realizados em menor número e as principais informações obtidas nos ensaios podem ser utilizadas na calibração e aferição dos programas de análise numérica. As calibrações dos programas sobre os materiais empregados ou tipos de problemas modelados permitem a sua utilização em casos semelhantes subsequentes com maior garantia sobre a qualidade no nível de precisão das respostas. (QUARANTA NETO, 2002, p. 3).

No entanto, sabe-se que as simulações, por mais precisas e detalhadas que sejam, jamais reproduzem com perfeição uma situação real. Mesmo assim, é um dos melhores recursos disponíveis, ainda que não haja restrições orçamentárias para o projeto. Fazendo uso de uma metáfora, pode-se dizer que a simulação é como a bengala de um deficiente visual. Este instrumento não permite que o deficiente visual enxergue, mas indica-lhe o caminho correto a ser seguido.

Em muitas situações, um modelo adequado pode ser obtido utilizando-se um número de componentes ou elementos bem definido. Estes problemas são denominados discretos. Em outras situações, a subdivisão continua indefinidamente e o problema só pode ser resolvido através da matemática infinitesimal. Isto conduz a equações diferenciais, as quais implicam num número infinito de elementos. Estes problemas são denominados contínuos. Com o advento dos computadores, os problemas discretos geralmente podem ser resolvidos rapidamente, mesmo que o número de elementos seja elevado. Como a capacidade dos computadores é finita, os problemas contínuos só podem ser resolvidos através de manipulações matemáticas (ZIENKIEWICZ; TAYLOR, 2000, v. 1, p. 15).

Portanto, para melhor guiar seu caminho, a Divisão de Sistemas de Defesa (ASD) resolveu adquirir um programa de elementos finitos – MSC.Dytran – a fim de simular, dentre outros projetos, o impacto do protótipo de uma bomba de penetração numa estrutura de concreto armado de alta resistência.

1.1 Objetivos

O Estado-Maior da Aeronáutica publicou no mês de maio de 2003 os Requisitos Operacionais Preliminares para o desenvolvimento da Bomba de Baixo Arrasto de Penetração (COMANDO DA AERONÁUTICA, 2003).

Segundo o referido documento, a Necessidade Operacional foi estabelecida a partir da constatação da existência de uma lacuna a ser preenchida por esse tipo de armamento, no que diz respeito ao emprego de uma bomba com capacidade de penetração em alvos fortificados, do tipo casamata, e em interdição de pistas com alto grau de compactação, com opção para guiagem laser, possíveis de serem lançadas à grande e média altura, considerando-se a capacidade operacional das aeronaves A-1M, F-5M e F-X. Ainda de acordo com a Aeronáutica, a maior bomba do acervo da FAB (BA-FG-920) é capaz de perfurar uma laje de concreto de, no máximo, 1,2 m sem que ocorra a ruptura do casco.

A afirmação acima a respeito do desempenho da BA-FG-920 baseia-se única e exclusivamente na comparação com sua similar americana, a MK 84, pois aquela bomba nunca foi testada contra um alvo de concreto, nem ao menos em simulação.

O objetivo deste trabalho, então, é simular numericamente o comportamento estrutural de um alvo fortificado em concreto armado após o impacto de uma bomba de penetração.

1.2 Projeto BPEN

Dentre os requisitos técnicos mínimos exigidos para a bomba de penetração, destacam-se aqueles relevantes para a simulação do alvo em concreto armado:

- Corpo com alta resistência mecânica, capaz de penetrar 1,5 m em alvos de concreto de alta resistência; e
- Cabeça de guerra com alto poder de craterização, capaz de provocar crateras de 110 e 160 m² de área, respectivamente, similares às bombas BA-FG 460 e 920, em alvos de concreto de alta resistência.

Um ponto importante a ser observado diz respeito ao efeito de craterização esperado para as bombas de penetração. A exigência foi arbitrariamente estabelecida como similar à das bombas de fins gerais. Entretanto, a relação entre a carga explosiva e a massa total da bomba de penetração – que requer um casco mais resistente – é certamente menor que a de

fins gerais. Logo, espera-se que as bombas BPEN-500 e BPEN-1000 não atendam ao segundo requisito técnico citado anteriormente.

Numa rocha de alta resistência, como o granito, a BPEN-500 e a BPEN-1000 devem ser capazes de provocar crateras da ordem de 70 e 100 m², respectivamente (MÜLLER, 1979, p.18).

Outro detalhe relevante omitido nestes requisitos operacionais preliminares refere-se à especificação do concreto. A exigência especificada faz menção exclusivamente a um *concreto de alta resistência*.

No entanto, o conceito de concreto de alta resistência vem mudando ao longo dos anos. Ainda que existam nos dias de hoje condições de se obter concretos de resistência de 250 MPa, estes concretos são considerados experimentais, não se conhecendo obra alguma construída com esta especificação. Acredita-se que algumas das maiores especificações de resistência em concreto estrutural no Brasil tenham sido aplicadas na construção dos pilares do edifício E-Tower, em São Paulo, com resistência à compressão de 125 MPa em média, máximo de 149,9 MPa aos 28 dias e, aos 63 dias, na ordem de 155,5 MPa (FREITAS JÚNIOR, 2005).

Entretanto, concretos com resistência muito superior a 50 MPa necessitam de traços muito bem especificados, além de cuidados especiais no projeto das armaduras e na quantidade de aditivos empregados. Além disso, o controle necessário na umidade dos agregados torna quase proibitivo o seu uso em obras com volume elevado de concreto, como é o caso do alvo aqui tratado. Por fim, acredita-se que a maioria das fortificações feitas na América do Sul tenham mais de 15 anos de existência, o que torna muito improvável o emprego de concreto com resistências superiores a 30 MPa, pois o conceito de concreto de elevado desempenho foi amplamente difundido na década de 90. Portanto, julga-se que a resistência de 50 MPa seja adequada para o alvo em questão.

Com relação ao aço a ser empregado na armadura, também não há menção nos Requisitos Operacionais Preliminares quanto à sua especificação. As armaduras adequadas para o concreto podem ser constituídas essencialmente de barras de aço com resistência à tração variando entre 250 e 600 MPa. O aço CA-60 para construção civil ($f_{yk} = 600$ MPa) é geralmente utilizado em barras de até 9 mm de diâmetro, com superfície lisa. Portanto, seria necessária uma quantidade proibitiva de barras para armar adequadamente uma laje do porte aqui discutido. O aço CA-50 ($f_{yk} = 500$ MPa) deve ser então empregado na armadura do

alvo, pois suas barras são corrugadas em fábrica, para garantir a aderência com o concreto, e os diâmetros encontrados comercialmente chegam a 40 mm.

O primeiro protótipo real para a BPEN-1000, antes que fosse realizada qualquer simulação numérica, foi concebido com base no corpo da já existente BA-FG-920, aumentando-se a espessura da parede do tubo, e empenagem da bomba americana MK-84 (Figura 1).

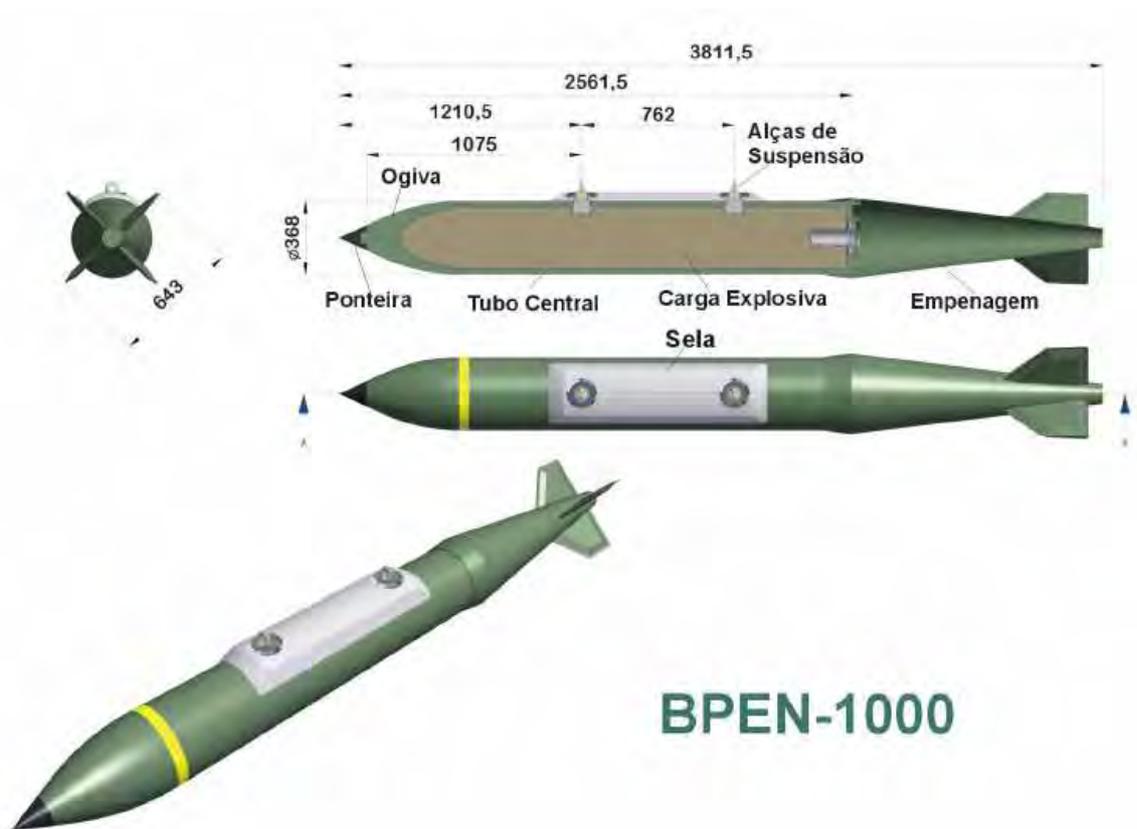


Figura 1 – Representação esquemática da BPEN-1000.

1.3 Participação do ITA

Em virtude da carência de engenheiros de infra-estrutura aeronáutica, ou mesmo engenheiros civis na Divisão de Sistemas de Defesa, a ASD solicitou, no ano de 2004, o apoio da Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica do ITA para dimensionar o alvo em concreto armado.

A coordenação deste projeto ficou a cargo do Professor Vertamatti, que, por sua vez, convidou o Professor Paulo Ivo e dois alunos do então 1º ano do curso profissional de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica a participarem do mesmo. Aos membros

envolvidos diretamente na execução do projeto, a ASD providenciou um treinamento de uma semana no *software* MSC.Dytran e disponibilizou o acesso ao programa na própria Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica.

Posteriormente, um dos alunos retirou-se, voluntariamente, do projeto, por motivos de ordem pessoal, e a continuação do estudo foi transformada neste Trabalho de Graduação.

2 Concepção do alvo em concreto armado

As dimensões sugeridas para o alvo pela própria ASD, pressupondo-se que não haveria um sistema de guiamento inteligente para a referida bomba, foram de 30 m de comprimento, por 30 m de largura, e 1,5 m de altura.

Como forma de minimizar os custos de construção, a sugestão apresentada pela ASD foi de que o alvo se apoiasse diretamente sobre o terreno. No entanto, caso esta laje fosse construída apoiada sobre a superfície do terreno, estariam sendo inseridas restrições aos deslocamentos e momentos fletores do alvo, que não condizem com o vão livre esperado sob a laje.

2.1 Estimativa de custos

Numa análise preliminar de custos, consideraram-se apenas as dimensões da laje, majorando os custos de construção em 20%, para levar em conta a existência das fundações, mísulas e pilares que irão suportar o alvo.

Neste levantamento preliminar, foram adotados como referência os valores de custos unitários praticados nos estados do Pará e Rio de Janeiro. Justificam-se estas referências pelo fato dos sítios mais prováveis para a construção do alvo serem o Campo de Provas Brigadeiro Velloso (CPBV), em Cachimbo – PA, e o Centro de Tecnologia do Exército (CETEX), localizado na Restinga da Marambaia – RJ. Os custos unitários foram estimados com auxílio da revista Construção Mercado (CONSTRUÇÃO MERCADO, out. 2005). Como estas localidades são afastadas dos centros comerciais, principalmente o CPBV, acredita-se que os custos ainda sofreriam alguma espécie de acréscimo de transporte, que não foram estimados neste trabalho.

2.1.1 Materiais empregados

2.1.1.1 Concreto simples ($f_{ck} = 50$ MPa)

O volume de concreto a ser empregado na construção do alvo, já computado o fator de majoração de 20%, é de 1620 m³.

A revista Construção Mercado fornece preços para o concreto convencional dosado em central até 45 MPa, para localidades no Pará e no Rio de Janeiro, e para o concreto preparado em betoneira até 25 MPa, conforme mostrado na Tabela I. A extrapolação dos preços pelo f_{ck} para 50 MPa forneceu para o concreto convencional dosado em central:

- R\$ 262,97 / m³ para o Rio de Janeiro; e
- R\$ 322,16 / m³ para o Pará.

Observa-se que estão incluídas em todas estas estimativas os materiais e a mão-de-obra, incluindo Taxa de Leis Sociais e Riscos do Trabalho (126,68% para Rio de Janeiro e São Paulo e 125,29% para as demais regiões). Destaca-se que o valor da mão-de-obra deve ser o responsável pelo preço mais baixo do concreto preparado em betoneira no Pará.

Considerando-se que a diferença entre os preços se manteria para qualquer valor de resistência à compressão simples, estimou-se o preço do concreto preparado em betoneira com $f_{ck} = 50$ MPa como sendo:

- R\$ 306,40 / m³ no Rio de Janeiro e
- R\$ 278,78 / m³ no Pará.

Tabela I – Preços de concreto convencional (Abatimento 5±1 cm – Brita 1).

f_{ck} (MPa)	Unidade	Fabricação	RJ	PA
25	R\$ / m ³	Preparado em Betoneira	233,45	183,42
		Dosado em Central	190,02	232,80
45	R\$ / m ³	Dosado em Central	248,38	304,29

Dadas as dificuldades de acesso aos locais prováveis da obra, especialmente no CPBV, e devido ao volume relativamente modesto do concreto a ser empregado, deve-se excluir o emprego de concreto dosado em uma central, instalada para este fim. Adota-se, portanto, o uso de concreto preparado em betoneira.

No entanto, para fins de planejamento, deve-se levar em conta que o volume de uma betoneira é de 8 m³ e a sua capacidade de produção gira em torno de 5 m³ por hora, quando operada por equipe especializada.

2.1.1.2 Armadura (aço CA-50)

A quantidade de aço a ser empregada nesta obra não se limita a atender às funções estruturais de uma laje comum. Trata-se de uma estrutura altamente resistente, projetada para resistir a esforços provenientes de cargas dinâmicas.

No entanto, como este trabalho é de caráter acadêmico, o limite máximo de armadura adotado foi o previsto em norma. Este limite é estipulado levando-se em consideração as dificuldades de concretagem e de utilização do vibrador para o adensamento do concreto. Eventualmente, em situações muito especiais, este limite poderia ser extrapolado. A compensação ocorreria com a substituição do agregado graúdo usualmente utilizado – Brita 1 – por outro menor – Brita 0. Além de permitir uma maior percentagem de armadura, a brita 0 possui superfície específica maior, contribuindo para aumentar ainda mais a resistência do concreto.

De acordo com a NBR-6118, a taxa de armadura máxima prevista em norma é de 4% da área da seção transversal, permitindo-se chegar a 8% em regiões de emenda, devido às sobreposições (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

Nesta estimativa preliminar, adotaram-se barras de aço de 25 mm de diâmetro. A área da seção transversal de concreto (A_c) é de 45 m², esquematizada na Figura 2. A área de aço, para cada uma das seções laterais pode atingir 4% deste valor ($A_s = 1,8 \text{ m}^2 = 18.000 \text{ cm}^2$).

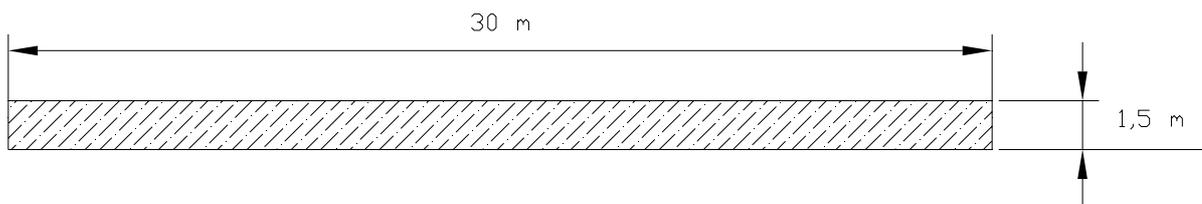


Figura 2 – Seção transversal do alvo em concreto armado sem os pilares.

Apenas para fins de comparação, foram considerados dois casos de armadura. No primeiro caso, a taxa de armadura adotada foi de 1% ($A_s = 4500 \text{ cm}^2$), sendo suficiente para suportar seu peso próprio e cargas superiores às convencionais. Apesar de ser considerada uma armadura elevada para padrões comuns de construção civil, é bastante plausível em construções especiais. Como a área de uma barra de 25 mm é aproximadamente igual a 5,0 cm², o número de barras requeridas para atingir este 1% é igual a 900. Adotando-se espaçamentos de 10 cm entre os eixos das barras, tem-se 3 camadas com 300 barras cada.

Este valor é válido para uma das seções laterais. Logo, considerou-se que seriam dispostas 3 camadas de barras em cada uma das direções horizontais, provendo uma separação vertical de 10 cm entre uma camada e outra. Sabendo-se que o peso do vergalhão de aço CA-50 com diâmetro de 25 mm é de 3,853 kgf / m (CONSTRUÇÃO MERCADO, out. 2005), tem-se uma taxa de armadura por volume de concreto de 154,12 kg / m³ (Figura 3).

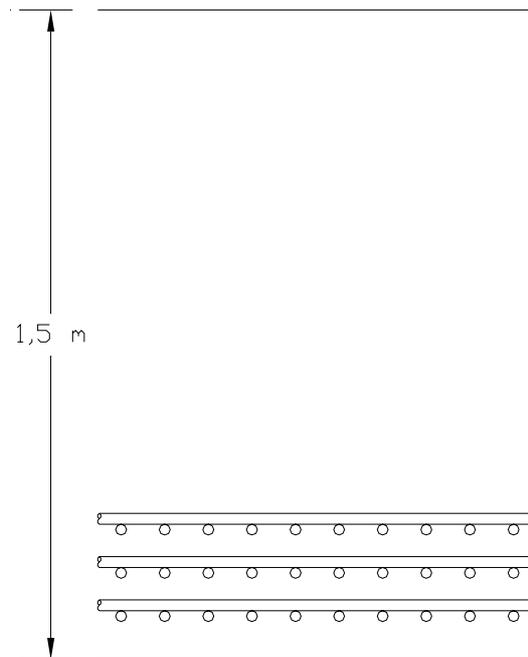


Figura 3 - Esquema da distribuição das armaduras para uma taxa de armadura de 1%.

No segundo caso, consideraram-se 12 malhas em cada uma das direções, com o mesmo espaçamento lateral entre as barras e distribuídas uniformemente ao longo da espessura da laje. Observa-se que esta armadura é bastante elevada, sendo justificável apenas no caso de uma casamata preparada para suportar cargas dinâmicas – eventualmente cíclicas – do impacto de uma bomba. Considera-se uma armadura de 18.000 cm² em cada uma das faces, ou 3.600 barras de 25 mm, o que equivale a uma taxa de armadura de 4% em cada uma das direções ou uma taxa de armadura por volume de concreto de 616,48 kg / m³. A Figura 4 apresenta um esquema da distribuição de armadura na peça.

A distribuição da armadura ao longo da seção transversal procurou coincidir os nós das barras com os nós da estrutura em concreto a fim de permitir uma equivalência entre ambos. Este procedimento permite uma redução no número de nós e se traduz por uma perfeita aderência entre o aço e o concreto.

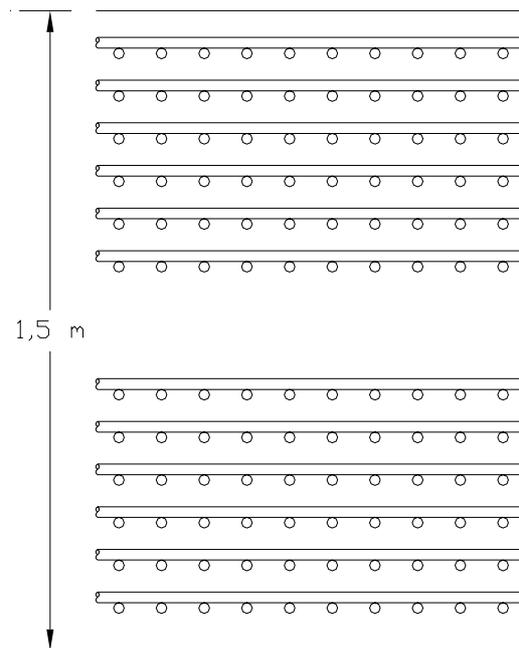


Figura 4 - Esquema da distribuição das armaduras para uma taxa de armadura de 4%.

Para ambas as localidades, o preço do vergalhão de aço CA-50 com diâmetro de 25 mm é de R\$ 3,02 / kg. No entanto, quando se considera o preço da armadura CA-50 já instalada ($100 \text{ kg} / \text{m}^3$ de concreto), os valores já são diferentes: R\$ 529,58 para o Rio de Janeiro e R\$ 497,10 para o Pará. Esta discrepância se observa pelo menor custo da mão-de-obra no Pará.

2.1.1.3 Custos adicionais

A revista Construção Mercado ainda fornece uma estimativa de formas de madeira compensada (com espessura de 12 mm) de $12 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ de concreto. Como o alvo se constitui basicamente de uma laje apoiada sobre 4 pilares, há a necessidade de formas para a laje e para os pilares. Ainda que as formas da laje em questão devam ser bastante diferentes das usuais, admitiu-se que a estimativa de custos fosse semelhante, compensando-se a quantidade menor de formas pela espessura maior das chapas a serem empregadas. O preço estimado pela revista foi de R\$ 485,13 / m^3 de concreto para o Rio de Janeiro e R\$ 379,30 / m^3 para o Pará.

Por fim, o lançamento e a aplicação do concreto têm um preço estimado de R\$ 21,29 / m^3 no Rio de Janeiro e R\$ 14,56 / m^3 no Pará (CONSTRUÇÃO MERCADO, out. 2005).

2.1.2 Custo total

A Tabela II fornece a composição do custo de construção do alvo por m³. Os custos de armadura foram majorados em 20% para contemplar perdas em corte dos vergalhões, ancoragem e transpasses. Conforme já exposto, o volume de concreto foi majorado em 20% para contemplar a existência das fundações, mísulas e pilares para suportar a laje.

Tabela II - Cálculo do custo total de construção do alvo de concreto.

Discriminação dos materiais e serviços	Unidade	Taxa de Armadura			
		$\rho = 1\%$		$\rho = 4\%$	
Localidade	UF	RJ	PA	RJ	PA
Concreto $f_{ck} = 50$ MPa preparado com betoneira	R\$/m ³	306,40	278,78	306,40	278,78
Armadura em aço CA-50 majorada em 20%	R\$/m ³	979,43	919,35	3917,72	3677,42
Formas de madeira	R\$/m ³	485,13	379,30	485,13	379,30
Lançamento e aplicação do concreto	R\$/m ³	21,29	14,56	21,29	14,56
Preço total por volume de concreto	R\$/m ³	1792,25	1591,99	4730,54	4350,06
Volume de concreto majorado em 20%	m ³	1620,00	1620,00	1620,00	1620,00
Preço total do alvo	R\$	2.903.443,53	2.579.028,22	7.663.468,91	7.047.100,15

Para diferentes taxas de armadura do alvo e diferentes localidades, o preço total do alvo variou entre R\$ 2.579.028,22 e R\$ 7.663.468,91. Estas estimativas devem ser consideradas preliminares, podendo mudar com o detalhamento de vários aspectos do projeto.

Entre estes aspectos, destacam-se:

- Preço dos materiais e serviços à época da construção;
- Preço do deslocamento de terceiros ao campo de prova; e
- Detalhamento do projeto do alvo.

2.2 Probabilidade de acerto

Mesmo com os custos bastante elevados para a construção do alvo, não existe a garantia de que os resultados de um ensaio de penetração serão satisfatórios, pois ainda há a necessidade do piloto acertar o alvo. O ROP EMAER 28 cita a opção de guiagem laser para a utilização do armamento (COMANDO DA AERONÁUTICA, 2003).

Cabe ressaltar, porém, que o Erro Circular Provável (ECP) de um sistema de guiamento laser – em vias de ser adquirido pela FAB – é da ordem de 10 m (Figura 5). Portanto, mesmo para uma bomba inteligente, não há plena garantia de acertar o alvo em questão.

O ECP é definido, segundo o Manual do Curso de Planejamento e Emprego do Armamento Aéreo, como sendo o raio de uma área circular ao redor do ponto médio de impacto, dentro da qual 50% das bombas, em média, cairiam. Qualquer bomba, portanto, seria igualmente provável de cair dentro do ECP ou além dele (MANUAL..., 1999).

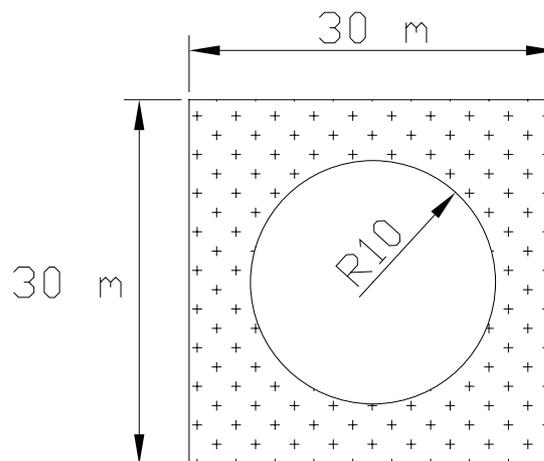


Figura 5 – ECP de uma bomba guiada a laser sobre um alvo quadrado de aresta 30 m.

Sem a opção de guiagem laser, contando única e exclusivamente com a perícia e habilidade dos pilotos, o valor de ECP certamente tenderá a aumentar.

Não basta, entretanto, acertar o alvo. A bomba deve possuir energia cinética suficiente para penetrar no alvo de concreto armado. Quanto maior for a energia cinética da bomba, maior a profundidade de penetração. Para isso, maior deve ser a altitude e a velocidade de lançamento.

Para atingir a velocidade de impacto prevista, em torno de 300 m/s, a modalidade de emprego mais indicada é o Bombardeio Picado a Grande Altitude (BPGA).

2.2.1 Modalidade BPGA

Para a modalidade BPGA, os parâmetros de lançamento para a aeronave A-1 podem ser verificados nos dados constantes da Tabela III.

Tabela III – Parâmetros de emprego da aeronave A-1 na modalidade BPGA.

Parâmetros de emprego	Unidades usuais	Unidades SI
Altura de lançamento	10.000 ft	3054 m
Velocidade indicada	400 kt	205,78 m/s
Ângulo de mergulho	45°	45°

Os esquadrões de caça realizam o adestramento de seus pilotos, nas operações táticas da Força Aérea, lançando bombas de exercício BEX-11 contra alvos de superfície.

A BEX-11 é uma bomba de exercício de 11 kg, constituída por um corpo de ferro fundido, apresentando um perfil aerodinâmico, vazado por um tubo central que possui alojamento para o cartucho sinalizador e conjunto percussor (Figura 6). O cartucho sinalizador caracteriza o ponto de impacto, pela emissão de uma fumaça branca, com diâmetro mínimo de 1 m e altura mínima de 6 m, de forma a permitir a sua visualização a uma distância de 1.500 m (INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO, 2006).



Figura 6 – Bomba de exercício BEX-11 (IAE/ASD, 2006).

Na falta de dados estatísticos referentes ao emprego de armamento real, recorreu-se aos dados do 3º/10º GAv, esquadrão sediado em Santa Maria – RS, lançando BEX-11 na modalidade BPGA.

2.2.2 Resultados do 3º/10º GAv

Os dados repassados pelo 1º Ten Av Ricardo – Chefe da Seção de Tiro e Bombardeio do 3º/10º GAv –, referentes às campanhas de qualificação dos anos de 2005 e 2006, na modalidade BPGA, podem ser verificados no Apêndice A.

Os dados apresentados revelaram uma distribuição aproximadamente normal, com significância da hipótese de aderência gaussiana de 0,741944 em relação ao eixo longitudinal de lançamento e 0,105493 em relação ao eixo transversal. Pode-se considerar estas significâncias satisfatórias e que as distribuições de acertos são gaussianas, portanto (GREENWOOD; NIKULIN, 1996, p. 9).

Os resultados dos lançamentos no estande de tiro em Saicã – RS, bem como o Ponto Médio de Impacto (MPI), foram reproduzidos na Figura 7.

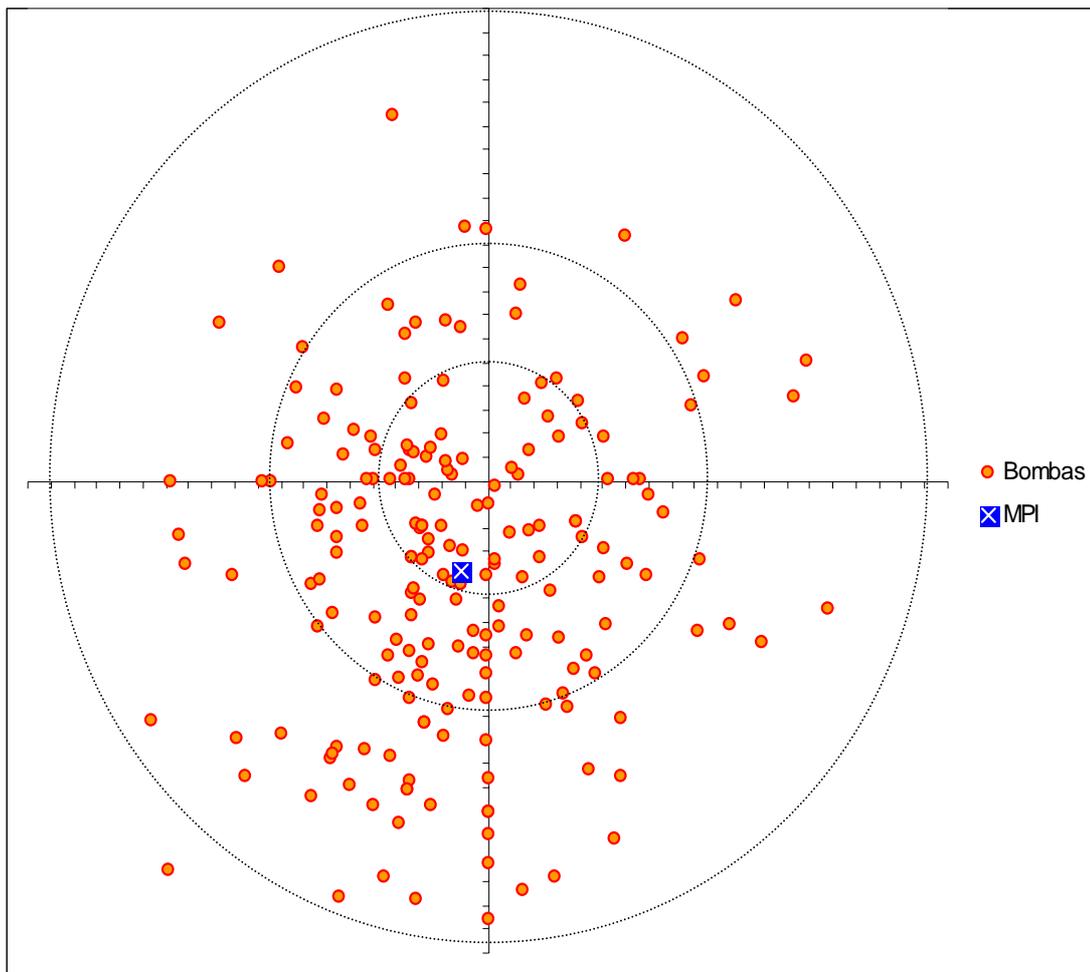


Figura 7 – Distribuição de acertos do 3º/10º GAv na modalidade BPGA.

Sobrepondo-se um alvo 30 m x 30 m centrado no bingo, conta-se um número de 26 impactos dentro desta área quadrangular. Em termos de porcentagem, como foram praticamente 200 lançamentos, pode-se dizer que a probabilidade de acertar o alvo em questão com uma única bomba é de aproximadamente 13%. Este resultado condiz com o obtido pelo cálculo via média e desvio padrão dos acertos (12,4%).

2.2.3 Recuperação das bombas

Existe a possibilidade, ainda não confirmada, de reutilizar as bombas que não acertarem o alvo. Espera-se que a ponteira, a ogiva e o tubo central não sofram maiores deformações após o impacto com o solo e, portanto, possam ser reaproveitados. Apenas a empenagem seria descartada a cada lançamento.

No entanto, caso o alvo venha a ser construído sobre uma superfície resistente, como uma pedreira, esta possibilidade deve ser descartada, pois as deformações plásticas em todo o corpo da bomba inviabilizariam a reutilização da mesma.

2.3 Dimensionamento do alvo

2.3.1 Solução modular

O recurso esperado para o desenvolvimento do projeto BPEN é de R\$ 1.750.000,00 e a construção do alvo em Cachimbo foi estimada em R\$ 7.047.100,15. Neste desenvolvimento estão incluídos os custos com a concepção dos artefatos bélicos, a produção da pré-série, a homologação das bombas e a construção do alvo.

Em virtude da carência de recursos para a construção de um alvo desta magnitude, foi elaborada uma proposta de construção modular para o alvo.

Os módulos teriam as seguintes dimensões: 10 m de comprimento, 10 m de largura e 1,5 m de espessura. Posteriormente, caso fossem liberados recursos adicionais, poder-se-ia construir os demais módulos para completar o alvo 30 m x 30 m. Pode-se inferir que a redução dos custos ocorreria de forma linear, ou seja, a construção de um módulo em Cachimbo custaria por volta de $\frac{1}{9}$ do valor original para um alvo 30 por 30, ou seja, R\$ 783.011,13.

A probabilidade de acerto também irá decrescer significativamente. Utilizando-se novamente os dados de emprego do 3º/10º GAv, constata-se, via média e desvio padrão, que a probabilidade de acerto neste novo alvo 10 por 10, com uma única bomba, cai para aproximadamente 1,5%.

Apesar da baixa probabilidade de acerto, por se enquadrar melhor nos recursos disponíveis, o dimensionamento do alvo e as futuras simulações serão todos realizados com este módulo de 10 m x 10 m.

2.3.2 Conversão de uma carga dinâmica em estática

Um dos dados necessários para começar o dimensionamento de uma estrutura qualquer diz respeito às cargas que irão atuar sobre a mesma. Estas cargas subdividem-se em permanentes e acidentais. No caso do alvo, a única carga permanente consiste no peso próprio da estrutura. Quanto às cargas acidentais, há também apenas uma carga atuante, que seria a bomba no momento do impacto. Em uma análise preliminar, estimou-se uma carga estática equivalente ao esforço induzido pela bomba, em um processo dinâmico. Como não se trata de uma estrutura esbelta, as cargas de vento foram desconsideradas.

O princípio adotado para efetuar a conversão de uma carga dinâmica numa carga estática foi o teorema do impulso. Segundo este teorema, o impulso resultante da aplicação de uma força sobre uma partícula é igual à variação de sua quantidade de movimento:

$$\vec{I} = \Delta\vec{Q}. \quad (1)$$

O impulso aplicado a um corpo também pode ser definido como o produto da força que age sobre esse corpo pelo intervalo de tempo:

$$\vec{I} = \vec{F}\Delta t. \quad (2)$$

Quanto ao conceito de quantidade de movimento, esta grandeza vetorial é definida pelo produto da massa do corpo pela sua velocidade vetorial:

$$\vec{Q} = m\vec{v}. \quad (3)$$

Reunindo as expressões (1), (2) e (3), obtém-se:

$$\vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v}. \quad (4)$$

O valor da massa da bomba é conhecido e aproximadamente igual a 1.000 kg. A variação de velocidade no momento do impacto até a sua desaceleração total foi estimada em 300 m/s, com base no *software* Ar-Solo – desenvolvido pelo próprio IAE/ASD – que calcula os parâmetros de impacto da bomba, tais como ângulo e velocidade de impacto a partir das condições de lançamento.

Para se descobrir a força resultante que age sobre a laje, ainda se faz necessário determinar o tempo de desaceleração da bomba.

Como a idéia do projetista estrutural é não permitir que a bomba atravesse a laje de concreto armado, arbitrou-se a profundidade de penetração em 1,2 m. Portanto, recorrendo uma vez mais às formulações da física elementar (Equação de Torricelli), tem-se que:

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta s . \quad (5)$$

Sendo a velocidade inicial igual a 300 m/s, a velocidade final igual a 0 m/s, e a distância percorrida igual a 1,2 m, obtém-se um valor de desaceleração igual a $a = -37.500 \text{ m/s}^2$.

Para a determinação do tempo de desaceleração recorre-se à:

$$v = v_0 + at . \quad (6)$$

Logo, supondo-se que a laje seja capaz de desacelerar totalmente a bomba após a mesma ter penetrado 1,2 m, tem-se que o tempo de desaceleração é igual a 8 ms.

Voltando à expressão (4), encontra-se a força resultante do impacto que atua sobre a laje:

$$F = \frac{m \Delta v}{\Delta t} = \frac{1000 \text{ kg} \times 300 \text{ m/s}}{8 \times 10^{-3} \text{ s}} = 37,5 \text{ MN} = 3.750 \text{ tf} .$$

Como esta transformação de uma carga dinâmica numa carga estática foi bastante simplificada e não está contemplando o impacto oblíquo, o que induziria esforços horizontais sobre os pilares, adotou-se um fator de majoração de 1,5. Desta forma, a força resultante com a qual se dimensionará o alvo tem o valor de $F = 56,25 \text{ MN} = 5.625 \text{ tf}$.

2.3.3 Cargas totais atuantes

Quanto ao cálculo do peso próprio da estrutura, considerou-se, de acordo com a NBR 6118, o valor da massa específica para o concreto armado igual a $2.500 \text{ kgf} / \text{m}^3$.

O volume do alvo $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$, acrescentando 20% no pré-dimensionamento para fundações, pilares e mísulas, é igual a 180 m^3 .

Tem-se, portanto, o peso próprio da estrutura igual a:

$$P = 180 \text{ m}^3 \times 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 4,5 \text{ MN} = 450 \text{ tf} .$$

Finalmente, somando as cargas do impacto e o peso próprio da estrutura, tem-se que a força total a ser descarregada nos pilares e nas fundações é igual a $F_R = 56,25 + 4,5 = 60,75 \text{ MN}$.

2.3.4 Distribuição da carga estática sobre a laje

A força resultante $F = 6.075 \text{ tf}$ não pode ser considerada uniformemente distribuída por toda a laje, pois se trata de uma carga que mais se aproxima de uma carga puntual.

Nesses casos, considera-se que a distribuição das tensões ocorre num cone de 45° a partir da vertical e adota-se a área de influência da carga na metade da espessura da laje, conforme se visualiza na Figura 8.

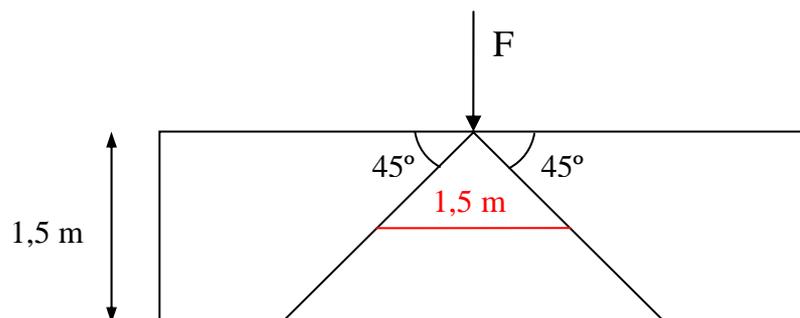


Figura 8 – Distribuição das tensões de uma carga puntual.

Durante as simulações, portanto, a força F será distribuída sobre uma área circular de diâmetro $1,5 \text{ m}$ ou, então, sobre uma área quadrangular equivalente de aresta $1,33 \text{ m}$.

2.3.5 Laje

2.3.5.1 Análise estática através do Nastran

Conforme já explanado no item 2.1.1, os materiais básicos empregados no projeto do alvo foram o aço CA-50 e o concreto C50.

Para a simulação estática, através do *software* Nastran, considerou-se a laje como um elemento de placa de espessura 1,5 m, atribuindo-se apenas as propriedades do concreto, de acordo com a Tabela IV. A malha da placa foi estruturada com elementos *Quad4*, estando apoiada em 4 pilares, definidos como *beam*.

O módulo de elasticidade pode ser obtido (em MPa) diretamente de:

$$E = 5600\sqrt{f_{ck}} \quad (7)$$

onde f_{ck} também é dado em MPa.

A NBR 6118 recomenda o valor $\nu = 0,2$ para o coeficiente de Poisson do concreto. “Se a massa específica real não for conhecida, para efeito de cálculo, pode-se adotar para o concreto simples o valor $2\,400\text{ kg/m}^3$ e para o concreto armado $2\,500\text{ kg/m}^3$ ” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 22).

Tabela IV – Simulação do concreto $f_{ck} = 50\text{ MPa}$ no Nastran.

Opções de Entrada		
Modelo Constitutivo	Linear Elástico	
Nome da Propriedade	Valor	Unidade
Módulo de Elasticidade (E)	3,96E+10	Pa
Coeficiente de Poisson (ν)	0,2	adimensional
Densidade (ρ)	2500	kg/m ³

2.3.5.2 Tensões máxima e mínima na flexo-compressão

O *software* Nastran fornece as informações referentes às tensões máxima e mínima na flexo-compressão. Para o caso da placa de concreto submetida à uma força distribuída numa área central, tem-se na área central da placa que (Figuras 9 e 10):

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{N}{A} + \frac{M}{w} = 4,88 \text{ E}+07 \text{ Pa} \quad (8)$$

$$\sigma_{m\acute{i}n} = \frac{N}{A} - \frac{M}{w} = - 4,99 \text{ E}+06 \text{ Pa} \quad (9)$$

onde w é o momento estático em um metro da seção da placa.

Para uma seção retangular:

$$w = \frac{I}{y_{m\acute{a}x}} = \frac{bh^3/12}{h/2} = \frac{bh^2}{6} \quad (10)$$

onde A é a área da seção transversal em um metro de largura da placa.

Das equações (8) e (9), obtem-se os valores de N e M :

- $N = 3,29 \text{ E}+07 \text{ N}$
- $M = 1,01 \text{ E}+07 \text{ N.m}$

MSC.Patran 2005 r2 13-Nov-06 11:04:23

Fringe: Default, A1:Static Subcase, Stress Tensor, , Max Principal, At Z2

Deform: Default, A1:Static Subcase, Displacements, Translational,

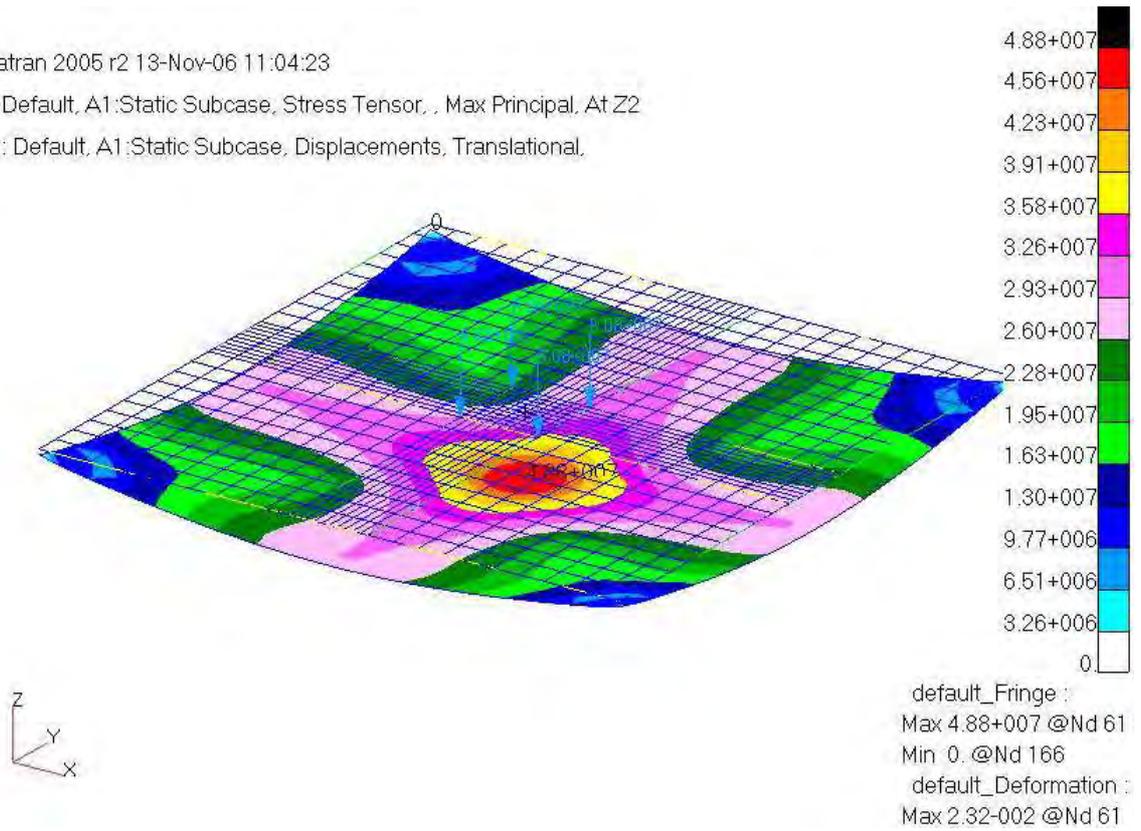


Figura 9 – Tensão máxima principal atuante sobre uma placa 10 m x 10 m.

MSC.Patran 2005 r2 13-Nov-06 11:04:59

Fringe: Default, A1:Static Subcase, Stress Tensor, , Min Principal, At Z2

Deform: Default, A1:Static Subcase, Displacements, Translational,

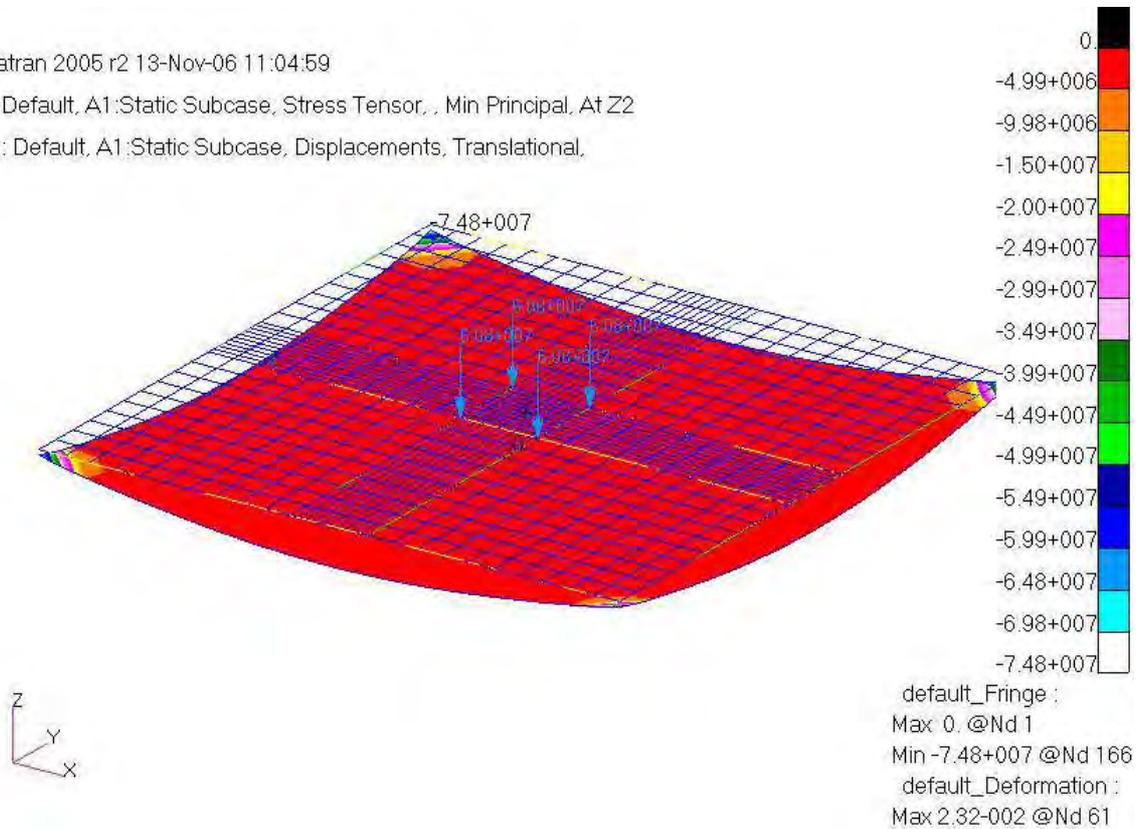


Figura 10 - Tensão mínima principal atuante sobre uma placa 10 m x 10 m.

2.3.5.3 Dimensionamento da armadura da laje

De posse dos valores da força normal e do momento atuantes sobre uma largura de um metro no centro da laje, verificou-se, através do *software* CONDE-1 (SANTOS, 1994), que a laje armada simetricamente com uma taxa de armadura $\rho = 4\%$ suportaria uma carga majorada em até 25%.

2.3.6 Pilares

2.3.6.1 Análise estática através do Nastran

O cálculo dos esforços atuantes sobre os pilares foi realizado através do *software* Nastran e o dimensionamento dos pilares através do programa nFOCCA (MEDEIROS, 2004).

Foram adotadas seções quadradas para os pilares e arbitraram-se os valores de 80 cm, 90 cm e 100 cm para a aresta da seção. Os resultados dos esforços atuantes podem ser verificados na Tabela V.

Tabela V – Resultados de análise estática obtidos através do Nastran.

Tensões máximas atuantes sobre os pilares	Pilares quadrados		
	80 cm x 80 cm	90 cm x 90 cm	100 cm x 100 cm
Tensão devida à compressão (Pa)	2,37 E+07	1,88 E+07	1,52 E+07
Tensão devida à flexão (Pa)	7,38 E+07	7,17 E+07	6,71 E+07

Para o cálculo dos esforços solicitantes, o concreto armado é considerado um material elástico linear isotrópico. Ainda que se saiba que isto não é verdadeiro, esta é uma prática adotada freqüentemente no cálculo estrutural e prevista em norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 23).

Os resultados da análise feita no Nastran para o pilar de seção 80 cm x 80 cm podem ser visualizados nas Figuras 11 e 12.

A tensão total devida à flexo-compressão que atua sobre os pilares é:

$$\sigma_{máx} = \frac{N}{A} + \frac{M_{xx}}{w_{xx}} + \frac{M_{yy}}{w_{yy}} \quad (11)$$

onde $\frac{M_{xx}}{w_{xx}} = \frac{M_{yy}}{w_{yy}}$ devido às condições de simetria da estrutura e atuação da carga no centro da laje. Portanto:

$$\sigma_{flexão} = 2 \times \frac{M_{xx}}{w_{xx}} \quad \text{e} \quad M_{xx} = M_{yy} = \frac{\sigma_{flexão}}{2} \times w. \quad (12)$$

Tabela VI – Esforços solicitantes atuantes sobre os pilares.

Esforços atuantes sobre os pilares	Pilares quadrados		
	80 cm x 80 cm	90 cm x 90 cm	100 cm x 100 cm
Esforço normal (N)	1,52E+07	1,52E+07	1,52E+07
Momento fletor (N.m)	1,61E+06	3,18E+06	5,59E+06

2.3.6.2 Dimensionamento da armadura dos pilares

A partir dos dados da Tabela VI foi feito o dimensionamento da armadura através do *software* nFOCCA, uma vez que os pilares estão sujeitos à flexão oblíqua composta.

Tabela VII – Dados utilizados no dimensionamento através do *software* nFOCCA.

Esforços atuantes sobre os pilares	Pilares quadrados		
	80 cm x 80 cm	90 cm x 90 cm	100 cm x 100 cm
N _d (kN)	15 200	15 200	15 200
M _{xd} (kN.cm)	161 000	318 000	559 000
M _{yd} (kN.cm)	161 000	318 000	559 000

Para todas as seções testadas, o nFOCCA calculou as bitolas comerciais adequadas a partir de uma determinada configuração de armadura previamente selecionada.

A rigidez à flexão da laje é muito superior à dos pilares. Assim sendo, a solicitação à flexão dos pilares é praticamente uma solicitação de rotação imposta. Logo, quanto maior a

seção do pilar, maiores serão os momentos que ele irá suportar e, conseqüentemente, maior sua armadura. Verificado este fato, passou-se para a etapa seguinte, que consistiu em otimizar a armadura da seção 80 cm x 80 cm.

Todas as armaduras testadas possuíam cobrimento mínimo de 10 cm. Após testar armaduras com 36, 32 e 20 barras, respectivamente com 3, 2 e 1 camadas de barras ao longo do perímetro da seção, adotou-se finalmente a armadura otimizada disposta na Figura 13. A bitola recomendada para esta seção é de 32 mm.

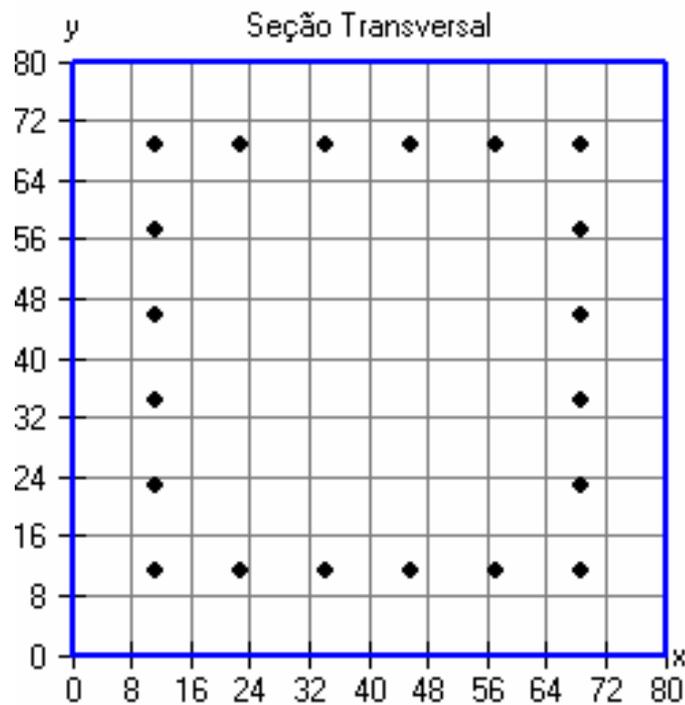


Figura 13 – Seção transversal de um pilar tipo.

2.3.7 Fundações

Caso o alvo venha a ser construído em Cachimbo, há diversos possíveis locais onde ele poderia ser erguido. O primeiro deles, mais próximo das instalações e da pista de pouso, seria sobre o bingo do alvo “J”. Trata-se de uma região arenosa e de fácil acesso. A restrição reside no tipo de fundação a ser adotada, pois este solo, aparentemente, não possui elevada capacidade de suporte. A fundação mais indicada seria uma do tipo profunda, porém há a necessidade de se efetuar uma sondagem na região a fim de se obter dados referentes à coesão do solo, ângulo de atrito e número de golpes SPT das diversas camadas.

Outro local indicado seria sobre a pedreira em arenito, pois este local dispensaria maiores cuidados com as fundações, pois se trata de uma superfície com elevada resistência e

capacidade de suporte. Apesar dos custos com as fundações neste local serem reduzidos, devem ser levados em conta a maior distância das instalações e a dificuldade de acesso, pois, apesar de existir uma estrada não pavimentada que leva à pedreira, esta não se encontra em bom estado de conservação.

Por fim, conforme apontado em 2.2.3, outro requisito que deve pesar na escolha do local onde será construído o alvo diz respeito à possibilidade de recuperação das bombas que não atingirem o alvo em concreto. Caso a bomba acerte uma superfície arenosa, existe a possibilidade de recuperação da mesma, excetuando-se a empenagem, para ser empregada novamente *a posteriori*. Esta possibilidade deve ser descartada caso a bomba venha a colidir com a pedreira, pois as deformações plásticas inviabilizariam a reutilização da mesma.

3 Alternativas de projeto

Como a estimativa de custos do alvo ultrapassou largamente o montante destinado ao projeto BPEN, buscaram-se alternativas de projeto que pudessem servir para validar os requisitos operacionais exigidos para a bomba de penetração.

Dentre as alternativas sugeridas, destacam-se: a utilização de um sistema de guiamento inteligente; o uso de trilhos para acelerar a bomba até a velocidade prevista de impacto; a simulação em micro-escala com armamento e alvo de dimensões reduzidas; e o lançamento da bomba em um alvo natural com características semelhantes ao concreto.

3.1 Sistema de guiamento inteligente

Caso se dispusesse de um guiamento inteligente para a bomba de penetração, poder-se-ia adotar realmente a solução modular, com um alvo de 10 m de largura por 10 m de comprimento. O custo de construção cairia quase linearmente com as dimensões do alvo, o que possibilitaria a construção do mesmo dentro do orçamento disponível.

A FAB está em vias de adquirir este tipo de guiamento da empresa israelense Elbit Systems Ltd. e seu custo unitário deve ficar por volta de US\$ 20 a 30 mil, sem contar o preço do designador, que não se destrói a cada lançamento.

Conforme ressaltado no item 2.2, o ECP de um sistema de guiamento laser é da ordem de 10 m. Portanto, mesmo para uma bomba inteligente, não há plena garantia de acertar o alvo em questão. Comparando-se, no entanto, os ECPs de uma bomba inteligente com o divulgado pelo 3°/10° GAv, evidencia-se a vantagem do emprego das chamadas bombas inteligentes (Figura 14).

Para fins de comparação e estimativa de custos, o preço final da BPEN-1000 deve ficar por volta de R\$ 25 a 30 mil.

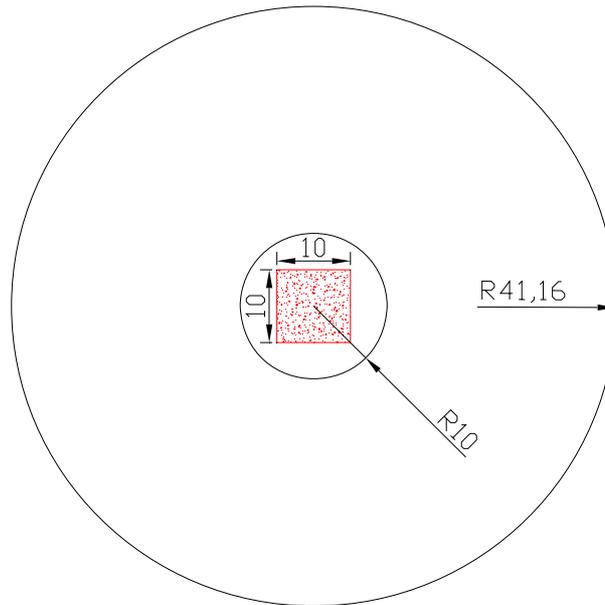


Figura 14 – ECPs de bombas convencionais e inteligentes sobrepostas ao alvo.

3.2 Aceleração da bomba em trilhos

Outra alternativa seria a construção de um alvo de dimensões reduzidas – algo como um bloco cúbico de aresta 1,5 m – a ser testado por uma bomba acelerada em trilhos. Porém, os trilhos disponíveis não são suficientemente longos para acelerar a bomba até que esta atinja a velocidade necessária de impacto no alvo, da ordem de 300 m/s.

Para acelerar a bomba até que esta atingisse os 300 m/s previstos no momento do impacto, pode-se empregar um foguete Sonda II, fabricado pela Avibrás (Figura 15).



Figura 15 – Foguete Sonda II (IAE/ASA, 2006).

Segundo dados extraídos da própria página do IAE (Tabela VIII), o foguete Sonda II possui um empuxo médio no vácuo da ordem de 32 kN e massa total na decolagem de 368 kg. Acrescentando os 1000 kg de massa da bomba, e estimando a massa do carrinho que conduziria a bomba sobre os trilhos em cerca de 200 kg, tem-se uma massa total a ser acelerada igual a 1568 kg.

Tabela VIII – Principais características do foguete Sonda II.

Foguete Sonda II	
Nº de estágios	1
Tipo de propelente	Sólido
Comprimento total (mm)	4.534
Diâmetro externo do propulsor (mm)	300
Massa total na decolagem (kg)	368
Empuxo médio no vácuo (kN)	32
Tempo de combustão (s)	18
Velocidade máxima (m/s)	1.419
Aceleração máxima (g)	7,2

Como o empuxo fornecido foi no vácuo, estimaram-se as perdas referentes às condições atmosféricas e ao atrito do carrinho com os trilhos em torno de 20%. Desta forma, o empuxo do foguete fica sendo igual a 25,6 kN. Desprezando a massa variável do foguete e recorrendo à 1ª Lei de Newton ($F = m \times a$), tem-se que:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{25600}{1568} = 16,3 \text{ m/s}^2$$

Para descobrir o comprimento necessário dos trilhos, recorre-se uma vez mais à expressão (5):

$$\Delta s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{300^2}{2 \times 16,3} = 2.760 \text{ m}$$

No Campo de Provas da Restinga da Marambaia, o comprimento dos trilhos é de 700 m. Cabe ressaltar que, em recente visita feita ao CETEX constatou-se o estado precário

de conservação dos trilhos. O último ensaio realizado nos trilhos ocorreu no ano de 2000 e, desde então, não foi feita a devida manutenção para a sua conservação. Os trilhos se encontram bastante oxidados e, no ano de 2003, foi feito um orçamento para restaurá-los. Este serviço foi orçado em US\$ 300 mil e acabou não sendo executado devido à falta de recursos disponíveis.

Para se ter uma vaga idéia das estimativas de custos da ampliação desses trilhos, o custo de construção dos 700 m atuais foi da ordem de US\$ 5 milhões, valor pago no princípio da década de 1990. Ou seja, caso esses valores fossem mantidos para os dias de hoje, seriam gastos cerca de US\$ 715 mil para cada novos 100 m de trilhos. Construindo os 2.000 m necessários, e considerando uma progressão linear, o orçamento excederia US\$ 14 milhões.

Há, então, duas opções: construir mais 2.000 m de trilhos e restaurar os 700 m existentes a um custo superior a US\$ 14 milhões, ou procurar outra alternativa.

3.3 Simulação em micro-escala

Uma outra alternativa levantada, desta vez apenas para validar as simulações através do *software* Dytran, sem verificar o comportamento e a integridade do casco da bomba de penetração, seria construir alvos de dimensões reduzidas – algo como uma placa de 1,0 m x 1,0 m x 0,15 m e usar um projétil do tipo perfurante para ensaiar a penetração.

Essa talvez seja a alternativa mais viável economicamente, com chances de ser reproduzida para diferentes situações de ângulo de impacto, espessura da placa, resistência do concreto e disposição da armadura, mas com o único inconveniente de não testar diretamente a bomba de penetração. No entanto, caso as condições observadas nas simulações computacionais sejam perfeitamente reproduzíveis nos ensaios de campo, não há razões que justifiquem o elevado dispêndio com o alvo em maior escala.

Deve-se frisar que, a cada ensaio, o alvo é completamente destruído. Para as simulações em micro-escala, o custo de construção de cada placa de concreto não deve exceder a casa das centenas de reais. Portanto, esta alternativa permite a reprodutibilidade de uma determinada condição de impacto, para checar se os resultados não sofrem desvios consideráveis.

3.4 Lançamento contra um alvo natural

Uma outra alternativa sugerida foi lançar a BPEN contra um alvo natural, como, por exemplo, uma pedreira e, em seguida, utilizando ferramentas de simulação computacional, verificar o comportamento da bomba contra um alvo de concreto armado. Entretanto, o ensaio de penetração em rocha possui certas limitações que devem ser computadas.

A principal limitação da pedreira diz respeito ao fato de a bomba colidir contra um maciço rochoso, e não contra um alvo de espessura limitada. Analogamente, pode-se comparar o maciço com o alvo sendo construído apoiado diretamente no solo e não sobre pilares. A espessura do alvo tornar-se-ia indefinida e o que mudaria seriam os materiais das suas diversas camadas.

Deve-se ressaltar que o modo principal de ruptura do alvo durante a penetração da bomba em um maciço consiste no esmagamento do material, enquanto o principal modo de ruptura do material durante a penetração da bomba num alvo de espessura limitada seria o cisalhamento. Logo, os dois modos de ruptura devem ser bem conhecidos, a fim de que o ensaio em rocha possa prover dados adequados para validar a penetração em concreto armado.

Outra característica importante das rochas diz respeito a sua heterogeneidade. Normalmente, elas apresentam comportamento anisotrópico, tanto em termos de deformabilidade como em termos de resistência. Além das dificuldades de se identificar todos os parâmetros de um material heterogêneo e anisotrópico, não se dispõe de modelo constitutivo adequado para levar todas estas peculiaridades em conta, de modo que devem ser utilizadas propriedades médias.

Apesar de todas as restrições anteriormente enunciadas, o lançamento da bomba contra um alvo natural é o único que alia duas condições consideradas importantes para o teste deste artefato bélico: o custo reduzido e a possibilidade de checar a integridade do casco da bomba após o impacto.

Como o Campo de Provas da Marambaia não dispõe de uma pedreira que sirva de alvo para a BPEN, a alternativa para a consecução deste objetivo seria encontrar um maciço rochoso no CPBV em Cachimbo.

4 Campo de Provas Brigadeiro Velloso

4.1 Características Geológicas do CPBV

A partir do mapa geológico da região de Cachimbo, obtido na biblioteca do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pôde-se fazer um levantamento prévio do tipo de rocha mais provável a ser encontrado na região do Campo de Provas Brigadeiro Velloso. A Figura 16 apresenta os limites do CPBV sobrepostos ao Mapa Geológico Juruena.

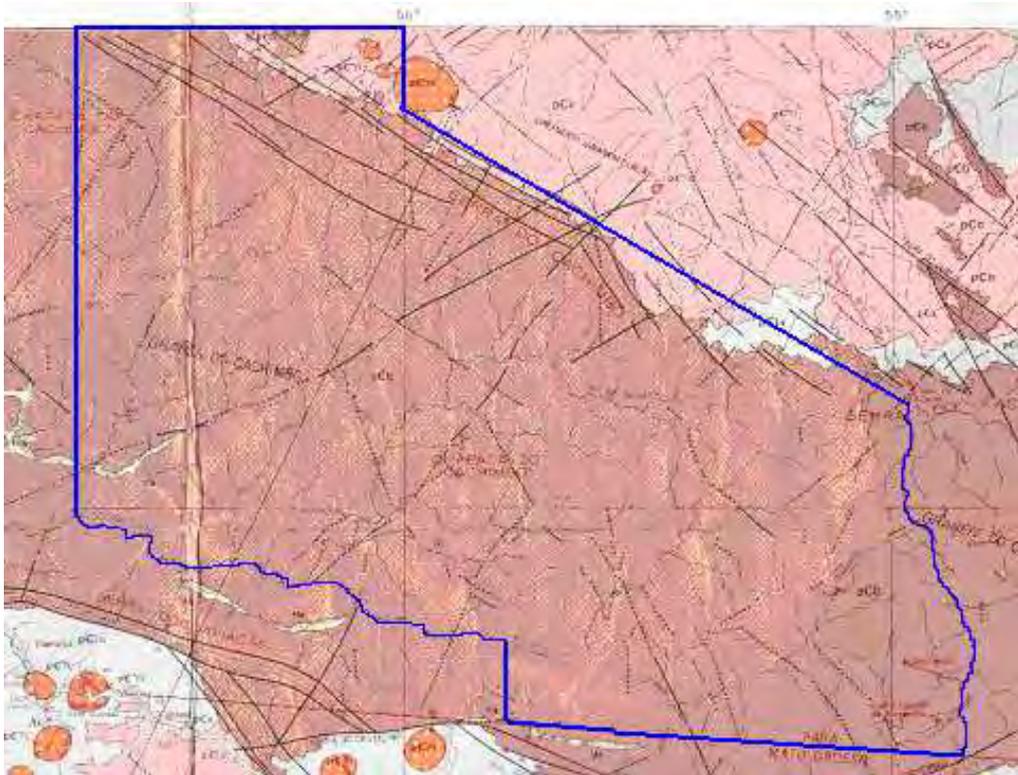
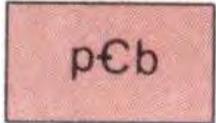
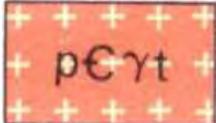
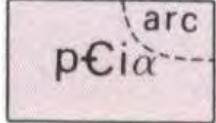
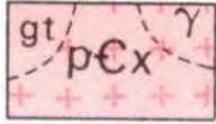


Figura 16 - Demarcação do CPBV no Mapa Geológico Juruena
(MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 1980).

A área de exercícios do CPBV é de 21.588,42 km². Para efeito de comparação, a área de Israel tem 21.946 km² e a de Sergipe 21.954 km². Nesta extensão tão ampla, pode-se identificar basicamente quatro formações geológicas, conforme dados constantes na Tabela IX.

Tabela IX – Formações geológicas na área do CPBV.

Legenda	Formações Geológicas
	<p>Grupo Beneficente: arenitos ortoquartzíticos, brancos, bem selecionados, sacaróides passando a arcoseanos e arcóseos claros a avermelhados, finos a médios, siltitos e folhelhos carmins, siltitos escuros, calcíferos, e com menor expressão calcários e <i>chert</i>; incluem-se ainda conglomerados intercalados; quartzitos, metassiltitos e ardósias relacionados a zonas de falhas; hornfelsitos.</p>
	<p>Granito Teles Pires: granitos, granófiros, microgranitos, tendência alasquítica, subvulcânicos, cratogênicos, exibindo feição circular, às vezes, textura <i>rapakivi</i>; manifestação magmática, intrusiva, correspondente ao vulcanismo subsequente da consolidação cratônica. Passíveis de mineralização a estanho, nióbio, tântalo, ouro, zircônio e titânio.</p>
	<p>Formação Iriri: riolitos, riodacitos, dacitos, andesitos ignimbritos ácidos, piroclásticas, aglomerados vulcânicos e rochas sedimentares associadas: conglomerados, arcóseos, siltitos, folhelhos e <i>chert</i>; vulcanismo subsequente ácido a intermediário, fissural, explosivo do estágio de transição de plataforma; arenitos e <i>chert</i>, arc.</p>
	<p>Complexo Xingu: gnaisses, migmatitos, anfibolitos, dioritos, granodioritos, granulitos, metavulcânicas e metabasitos, granitos de anatexia, γ; granulitos, gt.</p>

Entre os dias 03 e 05 de maio de 2006, foi realizada uma missão para o CPBV a fim de selecionar um alvo natural que pudesse ser empregado para o lançamento das bombas de penetração. Conforme se verifica na Figura 16, a maior parte do Campo de Provas Brigadeiro Velloso situa-se sobre o Grupo Beneficente, constituído de uma formação arenítica. Amostras de arenito branco foram coletadas de uma pedreira existente ao lado das instalações do Campo de Provas. Informações prestadas por membros do efetivo do CPBV indicam que este arenito foi empregado como brita para a pavimentação das estradas de acesso à pista do

aeródromo. Também foi informado que o mesmo material não é utilizado para brita em concreto armado devido ao seu elevado poder corrosivo.

4.2 Coordenadas geográficas da pedraira

Para a identificação de um alvo natural em rocha aflorante, contou-se com o apoio de um helicóptero UH-1H do 7º/8º GAv. Toda a tripulação foi orientada no sentido de procurar uma clareira formada por uma laje natural de rocha com dimensões mínimas de 30 m por 30 m. Algumas áreas foram selecionadas, sendo a mais favorável visualizada na Figura 17.

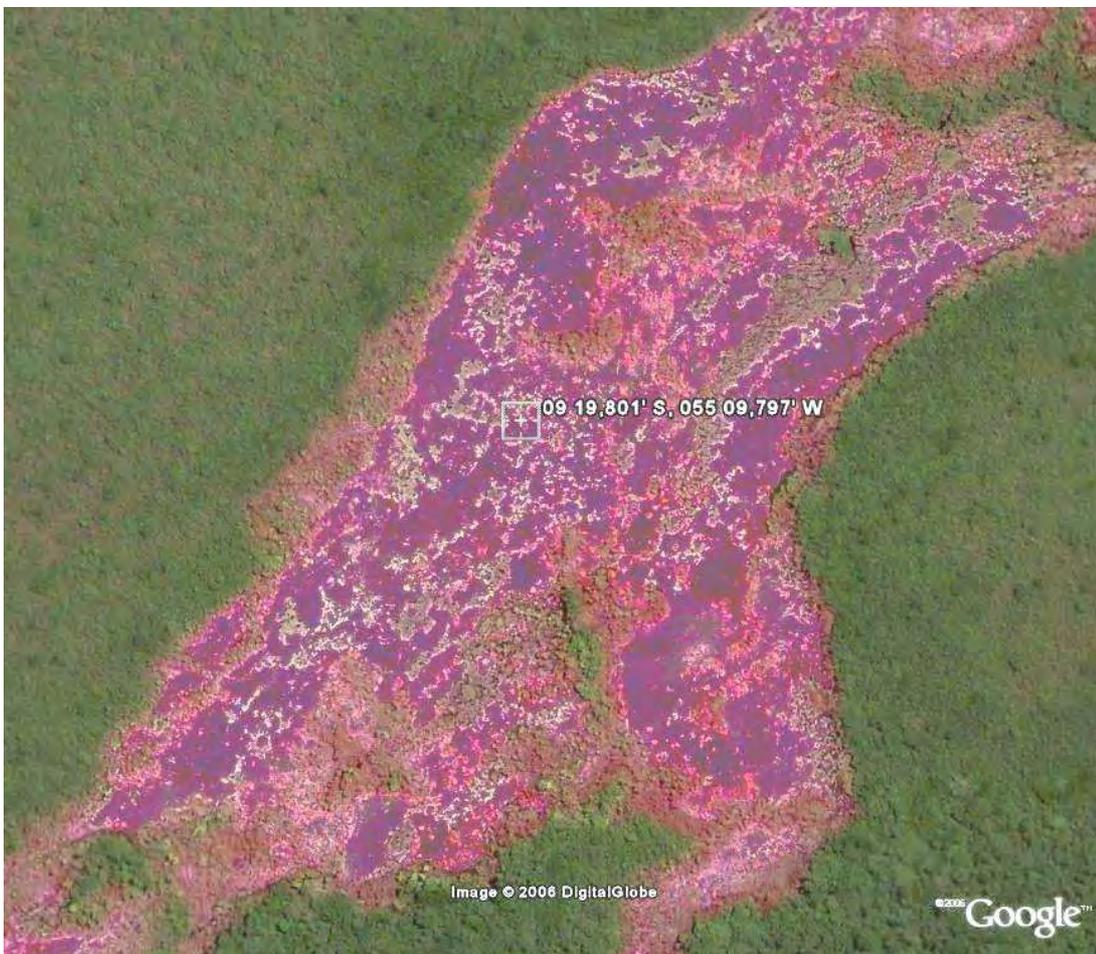


Figura 17 - Clareira natural formada por afloramento rochoso (IMAGEM..., 2006).

As dimensões dessa área superam largamente as exigências mínimas de 30 m por 30 m. Considerando-se toda a clareira, que não chega a ser visualizada integralmente na Figura 17, tem-se uma área favorável ao emprego do armamento de aproximadamente 75

hectares (2.500 m de extensão por 300 m de largura). Outra vantagem a ser citada para esta localidade é que a mesma possui acessos terrestres por estrada, ainda que não pavimentada.

A superfície visualizada na Figura 17 é praticamente horizontal e possui uma cobertura não uniforme de matéria orgânica que atinge não mais do que 10 cm de espessura. Ou seja, não há a necessidade de remoção desta camada de cima da laje natural. A rocha encontrada também é de arenito branco, semelhante ao encontrado na pedreira, tendo, no entanto, uma aparência mais escura devido à presença da matéria orgânica já citada (Figura 18).



Figura 18 - Vista da superfície da pedreira selecionada.

De posse do mapa geológico da região de Cachimbo, elaborado pelo Projeto RADAMBRASIL, aventou-se a hipótese de averiguar a existência de uma provável área ao norte do campo, onde poderiam ser encontradas rochas de diferente composição e mais resistentes que o arenito – conforme Tabela IX – como granitos e gnaisses. No entanto, por não possuir acesso terrestre, essa região foi descartada preliminarmente.

Outro motivo que pode ser apontado para dar preferência ao arenito em detrimento do granito, é que este último, apesar de ser mais resistente, é uma rocha ígnea e, portanto, mais sujeita a heterogeneidades em sua composição, o que dificultaria o modelamento e a própria acurácia da simulação.

5 Ensaio BA-FG-460

Entre os dias 05 e 07 de julho de 2006, foi feita uma campanha em Cachimbo para testar a penetração de uma bomba de fins gerais de 460 kg (BA-FG-460) na pedreira de arenito que havia sido previamente selecionada na missão de maio de 2006. Este ensaio não foi feito utilizando as bombas de penetração, pois, dentro do cronograma de desenvolvimento das mesmas, ainda não estavam prontas. Além do mais, havia a necessidade de saber se as bombas de fins gerais atenderiam aos requisitos exigidos para as bombas de penetração. Caso isso fosse verdadeiro, não haveria motivo para o desenvolvimento de um novo tipo de armamento.

5.1 Características das bombas de fins gerais

Enquanto as bombas de penetração devem ser capazes de, como o próprio nome sugere, penetrar numa estrutura reforçada, sem sofrer grandes deformações em seu casco, “as bombas de fins gerais foram concebidas para serem empregadas na maioria das operações de bombardeio, devendo unir grande efeito de sopro, alta temperatura de detonação e elevado poder de fragmentação, resultando um grande efeito terminal de demolição.” (MANUAL..., 1999)

A fim de aumentar sua capacidade de penetração, as bombas de fins gerais podem ser equipadas com uma ponteira de aço de elevada resistência. (MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA, 1980). Para a missão de Cachimbo, as bombas BA-FG-460 receberam ponteiras feitas com aço 4340, dureza Rockweel 45 (Figura 19).



Figura 19 – BA-FG-460 equipada com ponteira de aço 4340.

Independentemente do tipo de bomba que estaria sendo lançada na pedreira em Cachimbo, do ponto de vista do alvo, o interesse desta missão residia em:

- Determinar o raio de influência da bomba visível a olho nu, ou seja, a extensão da fragmentação.
- Determinar o tamanho dos fragmentos de rocha de acordo com a profundidade e o deslocamento da bomba, no intuito de definir o tamanho dos elementos finitos durante a simulação.
- Determinar o ângulo de impacto da bomba através de um goniômetro para saber se os dados provenientes do *software* ar-solo estão confiáveis.
- Determinar a trajetória da bomba após a mesma ter penetrado na pedreira.
- Checar visualmente a estratigrafia da pedreira antes da realização das sondagens rotativas para verificar se há descontinuidades no processo de sedimentação.
- Coletar amostras – blocos cúbicos de aresta aproximadamente igual a 30 cm – a fim de enviar essas amostras ao IPT e obter dados relativos à resistência à compressão simples.

- Determinar via GPS o ponto de impacto da bomba a fim de melhor planejar os próximos empregos, não permitindo lançamentos sucessivos na mesma área a fim de não mascarar os resultados.

5.2 Parâmetros de emprego

O voo de ensaio ocorreu no dia 06 de julho de 2006 no Campo de Provas Brigadeiro Velloso, utilizando a aeronave A-1B FAB 5653. Foram lançadas duas bombas BA-FG-460 com diferentes parâmetros de emprego, conforme Tabela X (COMANDO DA AERONÁUTICA, 2006).

Tabela X – Parâmetros dos lançamentos.

Lançamento	Velocidade		Altura		γ	Impacto estimado	
	kt	m/s	ft	m		Veloc. (m/s)	α
1	404	207,84	7920	2418,8	38°	312,78	55°
2	400	205,78	10160	3102,9	45°	334,39	61°

onde: γ é o ângulo de mergulho da aeronave; e

α é o ângulo de impacto em relação ao solo.

Não havia sido feita qualquer simulação para o impacto da bomba sobre a pedreira antes deste ensaio, de modo que não se dispunha sequer de uma estimativa do efeito de craterização a ser obtido. Uma das idéias desta missão, inclusive, era determinar o tamanho dos fragmentos a partir do ponto de impacto, a fim de fornecer uma maior precisão à simulação posterior com elementos finitos.

As bombas foram lançadas com carga inerte a fim de checar a sua capacidade de penetração e resistência do casco. Um helicóptero UH-1H do 7°/8° GAv foi designado para acompanhar o lançamento a uma distância segura. Para facilitar a visualização para o piloto do ponto de impacto desejado, foram pintadas circunferências concêntricas com cal – de raios aproximadamente iguais a 15 m, 30 m e 45 m – numa das laterais da pedreira (Figura 20).



Figura 20 – Alvo demarcado sobre a pedreira.

Uma das preocupações da equipe que estava fazendo o acompanhamento do lançamento era saber o envelope de fragmentação da bomba para que pudesse ficar fora do seu raio de ação. Porém, não há meios de se determinar o envelope de fragmentação de uma bomba inerte. Este desconhecimento fez com que alguns fragmentos passassem relativamente próximos ao helicóptero, que estava a 500 m de distância do alvo assinalado na pedreira, inclusive excedendo o helicóptero em altura, que estava mantendo cerca de 150 ft, ou 45 m de altura. Pode-se observar no detalhe assinalado em vermelho na Figura 21 um dos fragmentos que se desprende da bomba após o impacto com a pedreira.



Figura 21 – Impacto da segunda bomba BA-FG-460 sobre a pedreira de arenito.

Após o primeiro lançamento, a aeronave A-1 ficou mantendo um tráfego de espera enquanto o helicóptero foi avaliar, de maneira expedita, o dano causado pela bomba. Como os danos aparentes foram relativamente inócuos, optou-se por aumentar a altura de lançamento e o ângulo de mergulho para o segundo lançamento (Tabela X) a fim de prover maior energia cinética à bomba.

Mesmo assim, os danos causados foram apenas superficiais. A profundidade de penetração não excedeu 10 cm, descontada a camada de matéria orgânica, e a craterização aparente restringiu-se a uma área circular de diâmetro 1,30 m (Figura 22). O casco da bomba também não resistiu ao impacto, fragmentando-se em diversas partes.



Figura 22 – Cratera produzida pela segunda bomba BAFG-460 na pedreira de arenito.

Apesar dos resultados deste ensaio terem sido pouco expressivos em termos de penetração, deve-se ressaltar que se tratava de uma bomba de fins gerais, cuja característica reside justamente no elevado poder de fragmentação.

No entanto, para validar este experimento, deve-se obter os dados do arenito a fim de elaborar um modelo constitutivo que reproduza as características dessa rocha. Para a obtenção das amostras, em diversas profundidades, está em andamento um processo licitatório para a execução das sondagens rotativas.

6 Ensaio BPEN-1000 e BPEN-500

Dentre as diversas etapas para a homologação das bombas de penetração, está previsto um ensaio de separação entre a bomba e a aeronave em voo nivelado. Usualmente, este tipo de ensaio é realizado sobre o mar, pois não havia interesse em checar a estrutura e integridade do artefato bélico após a separação. A partir do projeto BPEN, foi solicitado que este ensaio fosse realizado sobre a pedreira em Cachimbo, sem que a preocupação em acertar o alvo seja determinante. Como as dimensões da pedreira são consideráveis – cerca de 2.500 m de extensão, por 300 m de largura – a probabilidade do piloto acertar o alvo é grande e, então, poder-se-ia coletar dados referentes à craterização e também à integridade do casco da bomba.

No entanto, em virtude de atrasos no cronograma de entrega das primeiras unidades (Figura 23), este ensaio teve de ser adiado para uma data ainda não definida.



Figura 23 – Primeiro protótipo da BPEN-1000 ainda em fase de testes.

7 Simulação Numérica

Todas as simulações numéricas dinâmicas foram feitas com o auxílio dos *softwares* MSC.Patran e MSC.Dytran. O Patran foi utilizado para o pré- e pós-processamento das informações referentes ao alvo e aos artefatos bélicos, e o Dytran para a verificação do comportamento estrutural do alvo após o impacto das bombas.

O modelamento das bombas ficou a cargo da Divisão de Sistemas de Defesa (Figura 24), enquanto o processamento do alvo foi parte integrante deste Trabalho de Graduação.

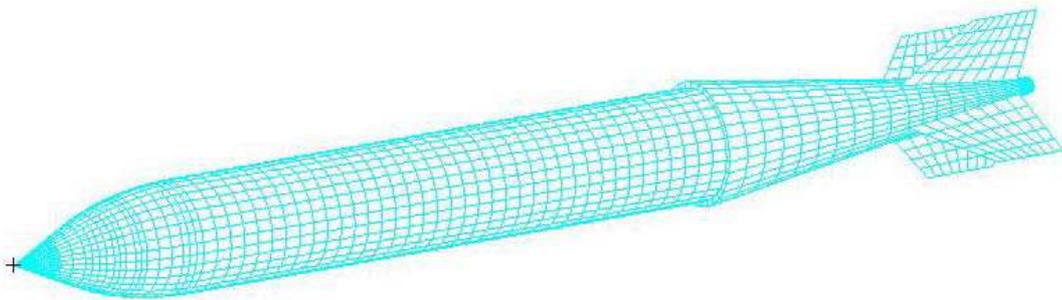


Figura 24 – Modelamento da BPEN-1000 por elementos finitos.

O alvo foi modelado com elementos sólidos para a estrutura em concreto e elementos de barras (*beam*) para a armadura dos pilares e da laje (Figura 25). A malha dos sólidos foi feita com elementos hexaédricos (*Hexa8*) a fim de facilitar a equivalência dos nós entre a laje e os pilares. Os pilares possuem 5 m de altura, pressupondo-se um pé direito de 2 m, e o engaste a 3 m da superfície do solo. Esta posição do engaste se justifica por se considerar que, a uma profundidade equivalente a 3 diâmetros do pilar, já não há mais flexão significativa devida aos esforços atuantes na superfície.

Na Figura 26 pode-se visualizar o modelo completo, com a bomba direcionada para o centro da laje, num impacto a 90°.

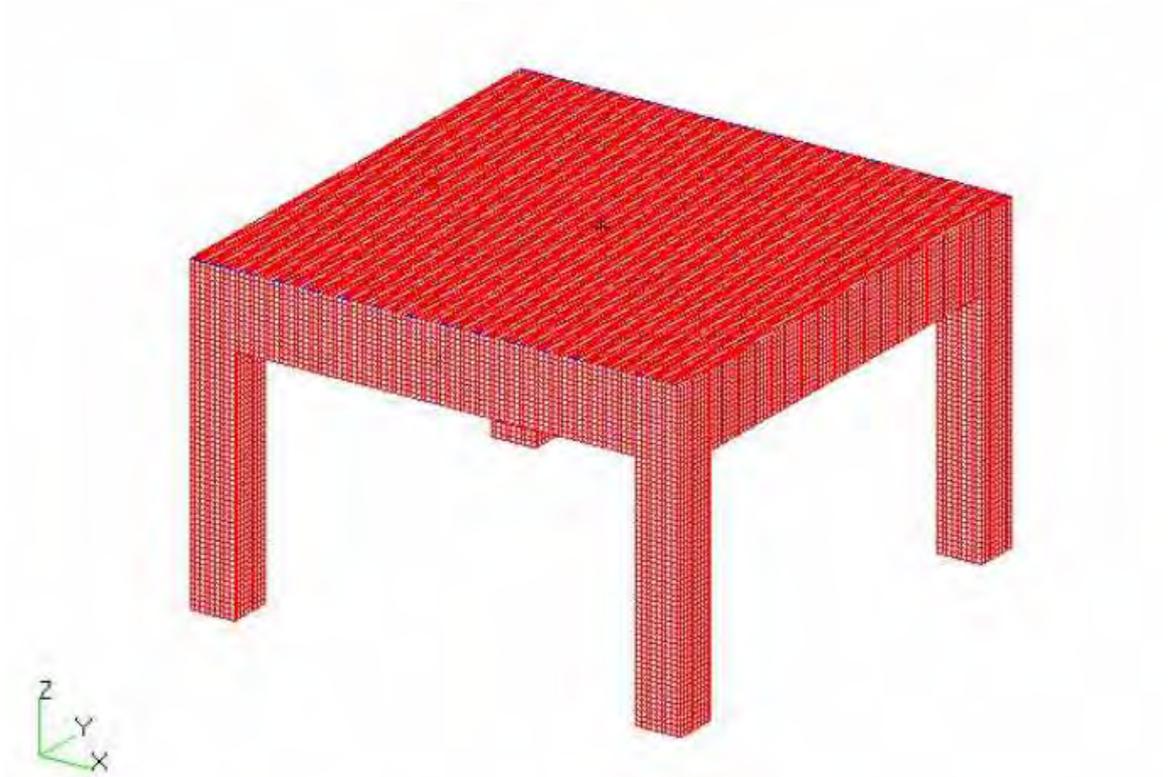


Figura 25 – Modelamento do alvo por elementos finitos.

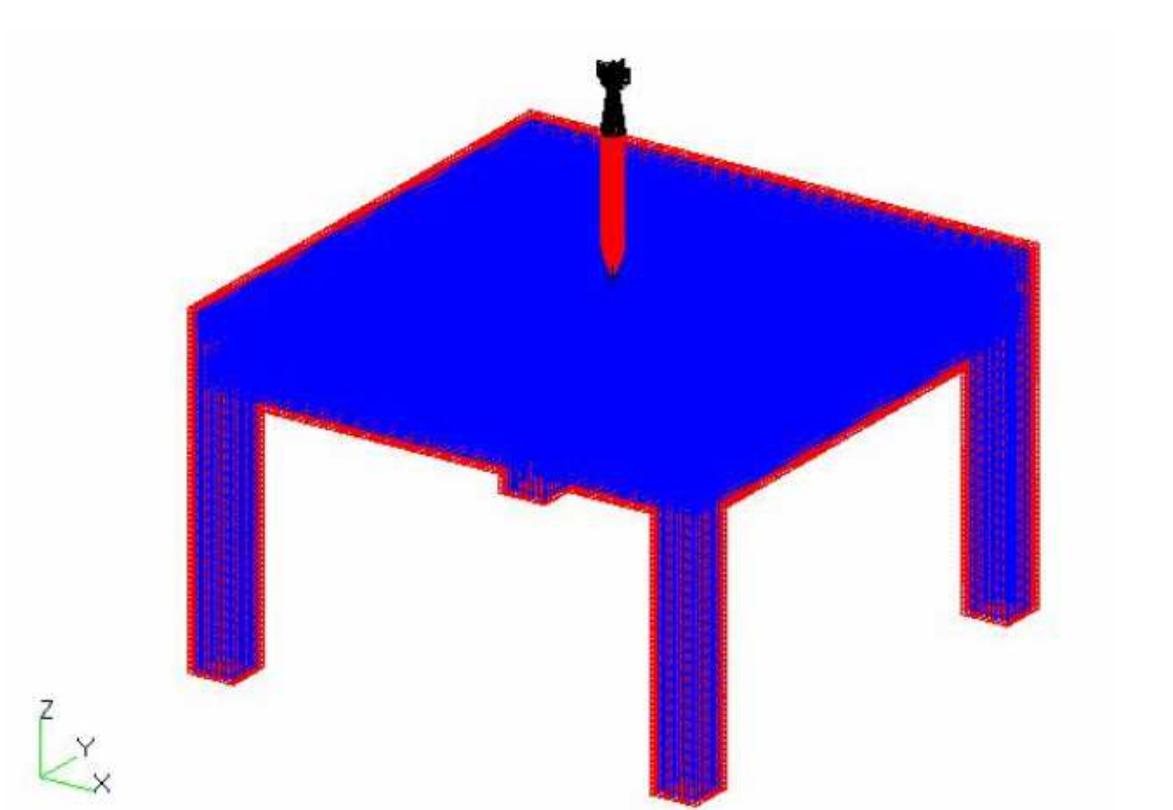


Figura 26 – Visualização do modelo completo compreendendo a bomba e o alvo.

7.1 Parâmetros dos materiais

Quando sujeito a elevadas tensões confinantes, o concreto pode sofrer deformações plásticas volumétricas. Para modelar este fenômeno, adotam-se modelos constitutivos do tipo “cap model”, que são elastoplásticos, com duas superfícies de plastificação, além da ruptura à tração. O “cap model” possui uma superfície de plastificação que se expande à medida que o concreto é comprimido (SIMO et al, 1988). Os parâmetros adotados na simulação podem ser verificados no Apêndice B.

Quanto ao aço das armaduras, adotou-se o modelo Johnson-Cook, que é um dos modelos constitutivos mais utilizados para situações dinâmicas. Os parâmetros do aço CA-50 (DEY et al, 2003) podem ser verificados no Apêndice C.

7.2 Resultados Obtidos

Uma vez importado o arquivo da bomba para realizar a simulação dinâmica, ocorreram diversos problemas que, infelizmente, não puderam ser contornados a tempo para a conclusão deste trabalho. O primeiro deles diz respeito a um problema de contato entre os elementos 3D da bomba e os elementos 1D das barras do alvo. Devido a uma incompatibilidade entre os elementos 3D e 1D, as barras precisaram ser modeladas como elementos 3D, o que, obviamente, aumentou expressivamente o número de elementos e exigiu a redução do alvo para um bloco cúbico de aresta 1,5 m a fim de limitar o número de elementos e permitir a execução da análise.

No entanto, mesmo assim houve outros erros que impediram o sucesso da análise, como o modelo constitutivo do concreto que não interagiu satisfatoriamente com outros modelos, como o Johnson-Cook, empregado para modelar os elementos em aço.

8 Método empírico

Como não foi possível determinar satisfatoriamente a penetração das bombas BPEN-500 e BPEN-1000 em concreto através da simulação numérica, optou-se por complementar este trabalho introduzindo um cálculo empírico a fim de estimar a profundidade de penetração dos artefatos bélicos em concreto armado de alta resistência.

Para tanto, utilizaram-se formulações empíricas para alvos de solo, rocha e concreto (YOUNG, 1997).

8.1 Condições de contorno

As seguintes condições de contorno, ou limitações, aplicam-se a todas as equações de penetração desenvolvidas por Young:

- a. A bomba permanece intacta durante a penetração.
- b. A bomba segue uma trajetória basicamente estável (Não há grandes variações na direção durante a penetração.)
- c. A velocidade de impacto é inferior a 1220 m/s. Em materiais mais resistentes, a condição de contorno de “integridade da bomba” (item ‘a’) provavelmente restringe o limite superior da velocidade de impacto. Em materiais menos resistentes, não há informações disponíveis sobre impactos a velocidades extremamente elevadas para validar as equações, de tal modo que o limite superior de velocidade é desconhecido.
- d. Quando a profundidade de penetração for inferior a 3 diâmetros da bomba, os resultados extraídos das equações são questionáveis.
- e. As equações não são válidas para penetração na água (estado líquido) ou ar.
- f. As equações não são aplicáveis para penetração em armaduras (não valem, por exemplo, para metais ou cerâmica).
- g. Peso mínimo da bomba: aproximadamente 2,270 kg para solo e 4,540 kg para rocha, concreto, gelo e solo congelado.
- h. O limite inferior para aplicar as equações nunca foi definido. De fato, a limitação ‘d’ anterior assemelha-se a um limite inferior de velocidade mais realístico para a maioria dos alvos.

8.2 Equações de penetração para concreto

As equações seguintes fornecem subsídios para se determinar a profundidade de penetração em camadas homogêneas de concreto.

Para $V \geq 61$ m/s:

$$D = 0,000018 \times S N (m/A)^{0,7} (V - 30,5) \quad (13)$$

onde: D - distância de penetração (m)

S - Penetrabilidade do alvo, fator S (adimensional)

N - Coeficiente de performance do nariz da bomba (adimensional)

m - massa da bomba (kg)

A - Área da seção transversal (m^2)

V - Velocidade de impacto (m/s).

Para bombas cujo nariz tenha o formato tangente ogival, qualquer uma das duas equações abaixo pode ser utilizada:

$$N = 0,18 \times L_n / \phi + 0,56 \quad (14)$$

$$N = 0,18 \times (CRH - 0,25)^{0,5} + 0,56 \quad (15)$$

onde: L_n - Comprimento do nariz da bomba (m)

ϕ - Diâmetro da bomba (m)

CRH - raio da seção ogival sobre o diâmetro da bomba (*Caliber Radius Head*).

Se o nariz da bomba for cônico, a equação a ser utilizada é:

$$N = 0,25 \times L_n / \phi + 0,56. \quad (16)$$

O nariz da BPEN pode ser considerado tangente ogival, o que torna recomendável o uso das expressões (14) ou (15).

O fator S para concreto é dado por:

$$S = 0,085 \times K_e (11 - P) (t_c \times T_c)^{-0,06} (35/f_c')^{0,3} \quad (17)$$

onde: K_e - Correção para efeitos das bordas no alvo de concreto

P - Porcentagem volumétrica do aço dentro do concreto

t_c - Tempo de cura do concreto, em anos ($t_c \leq 1$)

T_c - Espessura do alvo, medida em função do diâmetro da bomba

f'_c - Resistência à compressão simples (MPa).

A maioria dos alvos de concreto possuem uma porcentagem de aço que varia de 1% a 2%.

Se $t_c > 1$, então deve-se atribuir o valor $t_c = 1$. Este tempo de cura é independente do efeito do tempo de cura no aumento da resistência à compressão simples do concreto.

Se o alvo consistir de múltiplas camadas mais finas, cada camada deverá ser considerada individualmente. Quando $T_c < 0,5$, esta equação pode se tornar inadequada visto que os mecanismos de penetração tornam-se diferentes. Se $T_c > 6$, deve-se utilizar $T_c = 6$.

A resistência à compressão simples (f'_c) é a verificada por ocasião do ensaio e não a resistência a 28 dias. Caso não haja um corpo de prova com a mesma idade do alvo, será necessário estimar a resistência do concreto no momento do teste baseada na resistência a 28 dias.

O fator de correção para efeito de borda no alvo de concreto (K_e) é dado por:

$$K_e = (F/W_1)^{0,3} \quad (18)$$

onde: W_1 - Largura do alvo, medida em função do diâmetro da bomba

$F = 20$ para concreto armado, e 30 para não armado

Se $W_1 > F$, então $K_e = 1$.

Mesmo que as bombas BPEN-500 e BPEN-1000 sejam lançadas com os mesmos parâmetros de emprego previstos na Tabela III, os dados referentes à velocidade e ao ângulo de impacto serão ligeiramente diferentes, conforme pode ser visualizado na Tabela XI.

Tabela XI – Parâmetros para determinação da profundidade de penetração.

Parâmetros	Unidades	BPEN-500	BPEN-1000
Massa da bomba (m)	kg	508	940
Velocidade de impacto (V)	m/s	310	312
Ângulo de impacto (α)	graus	64	64
Diâmetro da bomba (d)	mm	323,8	368,0
Área da seção transversal (A)	m ²	0,08	0,11
Comprimento da ponteira	mm	135,6	135,6
Comprimento da ogiva	mm	373,7	463,0
Comprimento do nariz da bomba (L_n)	mm	509,3	598,6
Raio da seção ogival (R)	mm	809,5	920,0
Raio da seção ogival sobre d (CRH)	adimensional	2,50	2,50
Coefficiente de forma do nariz (N)	adimensional	0,84	0,85
Resistência à compressão simples (f'_c)	MPa	50	50
Volume de aço em relação ao concreto (P)	%	2	2
Fator referente à presença da armadura (F)	adimensional	20	20
Tempo de cura do concreto (t_c)	anos	1	1
Espessura do alvo (H)	mm	1 500	1 500
Largura do alvo (L)	mm	10 000	10 000
Espessura do alvo em função de d (T_c)	adimensional	4,63	4,08
Largura do alvo em função de d (W_1)	adimensional	30,88	27,17
Correção para efeitos das bordas no alvo (K_e)	adimensional	1	1
Penetrabilidade do alvo, Fator S (S)	adimensional	0,63	0,63
Profundidade de penetração (D)	m	1,20	1,58

Para diferentes porcentagens volumétricas de aço, mantendo-se os mesmos parâmetros de emprego anteriores, pode-se verificar na Tabela XII as diferentes profundidades de penetração.

Tabela XII – Profundidades de penetração em função da porcentagem de aço.

Volume de aço em relação ao concreto (%)	Profundidade de penetração (m)	
	BPEN-500	BPEN-1000
2	1,20	1,58
3	1,06	1,40
4	0,93	1,23
5	0,80	1,05
6	0,66	0,88
7	0,53	0,70
8	0,40	0,53

Cabe ressaltar, no entanto, que a condição de contorno apontada na letra 'd' questiona os resultados das equações quando a profundidade de penetração é inferior a 3 diâmetros da bomba. Os diâmetros das bombas BPEN-500 e BPEN-1000 multiplicados por três valem, respectivamente, 0,97 m e 1,10 m. Logo, a partir do volume de 4% em aço para a BPEN-500 e 5% para a BPEN-1000, as equações não são confiáveis.

Young também aponta uma imprecisão de 10% para o fator S e a propagação dos erros das equações de penetração e do fator S faz com que a imprecisão seja de aproximadamente 15% a 20% (YOUNG, 1997).

9 Conclusões

Este relatório apresentou o trabalho de graduação sobre a análise numérica da penetração de uma bomba em uma estrutura fortificada.

Após ter sido despendido tamanho esforço no estudo e caracterização do alvo em concreto armado, pode parecer que o objetivo do autor, e a recomendação a ser dada às autoridades, é que se construa o alvo o quanto antes para a verificação de todas as hipóteses aqui levantadas. No entanto, antes de se decidir pela construção deste alvo, deve-se levar em consideração que o resultado do impacto da bomba de penetração sobre a estrutura em concreto armado não será necessariamente satisfatório. Viu-se que existe uma grande probabilidade de que a bomba não venha a acertar o alvo, ou talvez que o acerte, porém em uma posição desfavorável, o que seria ainda pior.

Não se verificou neste trabalho a probabilidade da bomba colidir num dos pilares, o que muito provavelmente provocaria a ruína do alvo, sem, no entanto, contribuir para a análise proposta. Outra dificuldade de interpretação dos dados ocorreria caso a bomba viesse a colidir no topo da laje, porém numa distância próxima às extremidades.

Um outro detalhe a ser ressaltado é que este ensaio se trata de um ensaio destrutivo. O alvo seria completamente descartado logo após o primeiro impacto certo, pois os custos de recuperação da estrutura em concreto possivelmente excederiam o valor da própria construção em si.

Como se sabe que os recursos disponíveis são escassos, deve-se otimizá-los ao máximo e, portanto, recomenda-se a adoção de uma das possíveis linhas para a continuação deste trabalho apresentadas no tópico a seguir.

9.1 Sugestões de continuação do trabalho

Dentre as alternativas de projeto levantadas no capítulo 3, as mais indicadas são a simulação em micro-escala e o lançamento em alvo natural. Como já está em andamento o processo licitatório que executará as sondagens rotativas no Campo de Provas Brigadeiro Velloso, resta ainda a opção complementar de simular esses impactos em micro-escala, o que pode ser feito paralelamente ao estudo do impacto dos artefatos bélicos em rocha.

Esta opção da micro-escala, por ser mais econômica, permitiria a repetição dos ensaios em maior número e poderia ser feita também variando os diferentes parâmetros listados por

Young, como a resistência à compressão simples do concreto, o volume de aço em relação ao concreto, o tempo de cura do concreto, e as próprias dimensões do alvo (YOUNG, 1997).

No tocante às simulações numéricas, poder-se-ia simular o impacto não somente no ponto mais favorável à bomba, que é o centro da laje, mas também fazer com que ela venha a colidir no topo de um dos pilares, ou na própria face de um pilar, computando também o impacto oblíquo. Em simulações ainda mais refinadas, poder-se-ia incorporar os dados do solo onde este alvo viria a ser construído e simular o efeito de um impacto da bomba numa região próxima ao alvo sobre as fundações.

Adicionalmente, poder-se-ia verificar, também numericamente, se a capacidade atribuída à bomba BA-FG-920, e ao restante do arsenal disponível na FAB, corresponde aos seus requisitos operacionais.

Do ponto de vista numérico, deve-se investigar mais profundamente as razões da incompatibilidade entre os modelos de Johnson-Cook e o “Concrete”, assim como a possibilidade de se modelar o concreto armado (concreto e armadura) como um meio homogêneo equivalente.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

COMANDO DA AERONÁUTICA. *ROP EMAER 28*: Requisito Operacional Preliminar da Bomba de Baixo Arrasto de Penetração. [Brasília]: Estado-Maior da Aeronáutica, 2003. 27 f. Aprovado pela Portaria nº C – 13/3SC4, 22 maio 2003.

COMANDO DA AERONÁUTICA. Grupo Especial de Ensaios em Vôo. *Ofício nº 007/GEEV/C*: Lançamento de bomba BA-FG-460 contra pedreira em Cachimbo, 14 jul. 2006. 2 f. São José dos Campos, 2006.

CONSTRUÇÃO MERCADO. São Paulo: PINI, nº 51, out. 2005.

DEY, S.; BORVIK, T.; HOPPERSTAD, O.S.; LEINUM, J.R.; LANGSETH, M. *The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes*. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 70, nº 18, dez. 2003, pp. 2543-2558.

FREITAS JÚNIOR, José de Almendra. *Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência com o uso de materiais disponíveis na região metropolitana de Curitiba*. 2005. 128 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Orientador: Prof. Dr. Vladimir Antônio Paulon. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005. Disponível em: <<http://www.ppgcc.ufpr.br/dissertacoes.html>>. Acesso em: 19 nov. 2006.

GREENWOOD, Priscilla E.; NIKULIN, Mikhail S. *A Guide to Chi-Squared Testing*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996. 280 p.

IMAGEM de satélite da região de Cachimbo, 2006. Coordenada central: 09° 19,801' S, 055° 09,797' W. Escala indeterminável. Google Earth Beta. Versão 4.0.16XX. Acesso em: 12 nov. 2006.

INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO. Divisão de Sistemas de Defesa. *Bomba de Exercício BEX-11*. Disponível em: <<http://www.iae.cta.br/asd/Projetos/bex11.htm>>. Acesso em: 05 nov. 2006.

INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO. Divisão de Sistemas Aeronáuticos. *Desenvolvimento de foguetes de sondagem*: informações técnicas dos veículos operacionais e em desenvolvimento. Disponível em: <http://www.iae.cta.br/foguetesdesondagem_4.htm>. Acesso em: 11 nov. 2006.

MANUAL do Curso de Planejamento e Emprego do Armamento Aéreo. [Natal]: Grupo de Instrução Tática e Especializada, 1999. 3 v.

MEDEIROS, Gustavo Assis. *Programa para Análise e Dimensionamento da Área de Armadura de Seções Transversais de Concreto Armado Submetidas a Flexão Oblíqua Composta*. 2004. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica) Orientador: Flávio Mendes Neto. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2004.

MINISTÉRIO DA AERONÁUTICA. *MMA 136-1*. Manual de Seleção de Armamento, 01 set. 1980. [Brasília]: Estado-Maior da Aeronáutica, 1980.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Departamento Nacional da Produção Mineral. *Mapa geológico Juruena*. Projeto RADAMBRASIL, 1980. Escala 1: 1 000 000.

MÜLLER, Arno Mario. *Emprego de Explosivo TNT em Escavações*. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 1979. 45 p.

QUARANTA NETO, Francisco. *Modelagem de Problemas de Contato-Impacto Empregando Formulações Penalizadas do Método dos Elementos Finitos*. 2002. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/teses/doutorado/estruturas/2002/estdoutorado02.htm>>. Acesso em: 07 nov. 2006.

SANTOS, Lauro Modesto. *Sub-rotinas básicas do dimensionamento de concreto armado*. Vol. 1. São Paulo: Thot, 1994. 448 p.

SIMO, Juan C.; JU, Jiann-Wen; PISTER, Karl S.; TAYLOR, Robert L. *Assesment of Cap Model: Consistent Return Algorithms and Rate-Dependent Extension*. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 114, nº 2, pp. 191-218, fev. 1988.

YOUNG, C.W. *Penetration Equations*. Albuquerque NM: Sandia National Laboratories, 1997. Applied Research Associates, Inc., SAND97-2426 - Sandia Contract No. AN6295. Disponível em: <<http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/penetrator.htm>>. Acesso em: 06 nov. 2006.

ZIENKIEWICZ, O.C.; TAYLOR, R.L. *The Finite Element Method*. 5. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 3 v.

Apêndice A - Resultados do 3º/10º GAv na modalidade BPGA.

Nº do lançamento	Distância (m)	Posição (horas)	Nº do lançamento	Distância (m)	Posição (horas)	Nº do lançamento	Distância (m)	Posição (horas)
1	44	07:40	67	43	7:00	133	65	5:20
2	46	06:00	68	16	7:00	134	36	11:00
3	8	09:20	69	23	6:30	135	33	3:00
4	23	10:30	70	21	3:50	136	20	6:00
5	23	07:30	71	68	8:40	137	35	4:00
6	38	09:40	72	35	11:30	138	18	2:00
7	9	09:30	73	36	8:10	139	61	4:00
8	29	07:10	74	17	7:50	140	27	2:20
9	12	08:30	75	89	7:50	141	43	5:00
10	20	07:20	76	2	4:20	142	52	2:10
11	25	09:00	77	34	5:30	143	49	5:30
12	44	06:40	78	19	9:45	144	32	3:00
13	14	09:40	79	25	9:30	145	42	12:20
14	18	07:30	80	17	9:00	146	49	3:40
15	18	07:50	81	33	8:40	147	49	10:10
16	14	4:40	82	22	6:50	148	80	11:30
17	67	10:00	83	90	6:20	149	70	6:20
18	21	6:30	84	48	5:20	150	53	6:30
19	38	10:00	85	7	10:20	151	17	5:50
20	33	11:40	86	7	2:40	152	41	6:00
21	70	6:00	87	32	9:20	153	93	6:00
22	14	10:00	88	28	10:40	154	68	6:30
23	45	6:30	89	70	7:20	155	5	5:50
24	16	6:40	90	53	6:30	156	21	9:00
25	54	11:50	91	73	6:40	157	41	6:40
26	26	3:00	92	59	8:20	158	23	6:40
27	18	5:50	93	51	5:20	159	28	7:10
28	69	9:00	94	46	9:50	160	36	12:20
29	46	6:10	95	26	9:00	161	23	6:30
30	52	1:50	96	38	7:20	162	49	6:20
31	40	4:40	97	108	7:20	163	46	6:50
32	27	5:00	98	64	10:30	164	81	6:00
33	12	5:10	99	31	5:50	165	48	7:40
34	47	2:20	100	22	7:20	166	29	7:00
35	32	6:10	101	35	3:10	167	37	6:40
36	53	12:00	102	66	1:50	168	58	5:00
37	79	3:40	103	17	7:50	169	69	4:00
38	18	9:40	104	15	4:20	170	77	7:00
39	6	6:40	105	69	2:30	171	40	4:00
40	24	1:00	106	37	5:40	172	19	9:20
41	60	1:00	107	6	2:10	173	26	6:30
42	47	9:00	108	87	6:30	174	63	6:50

Nº do lançamento	Distância (m)	Posição (horas)	Nº do lançamento	Distância (m)	Posição (horas)	Nº do lançamento	Distância (m)	Posição (horas)
43	33	6:00	109	43	11:00	175	40	6:50
44	26	1:10	110	19	12:50	176	27	5:50
45	19	1:30	111	74	2:20	177	63	6:00
46	38	8:30	112	75	6:00	178	31	9:40
47	14	10:30	113	71	6:50	179	55	6:20
48	82	7:20	114	42	8:00	180	77	7:30
49	20	4:50	115	65	7:00	181	104	5:50
50	49	6:40	116	75	6:30	182	14	7:30
51	49	7:00	117	35	8:20	183	23	11:10
52	68	7:00	118	94	6:40	184	26	1:40
53	44	5:10	119	68	8:30	185	66	6:30
54	37	6:10	120	37	5:10	186	37	8:40
55	10	9:50	121	56	4:10	187	29	4:00
56	18	8:00	122	39	7:00	188	11	1:50
57	24	2:00	123	70	6:00	189	87	5:50
58	27	9:40	124	39	3:20	190	68	6:30
59	22	5:20	125	28	8:40	191	67	7:00
60	55	6:00	126	49	9:00	192	62	6:40
61	29	8:20	127	24	4:00	193	44	9:20
62	44	8:00	128	47	5:00	194	23	7:30
63	17	9:40	129	32	4:20	195	36	8:50
64	81	5:20	130	85	5:40	196	18	9:00
65	21	3:50	131	36	6:20	197	37	11:10
66	33	7:00	132	69	5:10	198	37	6:00
MPI	19,9	6:36	ECP	41,16				

Apêndice B - Parâmetros do concreto $f_{ck} = 50$ MPa empregados na simulação numérica.

Opções de Entrada		
Modelo Constitutivo	Concrete (DYMAT25)	
Válido Para	Sólido Lagrangeano	
Indicador de vetorização	Totalmente iterativo	
Nome da Propriedade	Valor	Unidade
Densidade	2.400	kg/m ³
Módulo de Cisalhamento	1,53 E+10	Pa
Módulo Elástico de Compressão Volumétrica	2,04 E+10	Pa
Parâmetro de Ruptura ALFA	2,66 E+07	Pa
Coefficiente Linear de Ruptura TETA	0,11	adimensional
Coefficiente Exponencial de Ruptura GAMA	8,00 E+06	Pa
Expoente de Ruptura BETA	6,38 E-08	1/Pa
Razão dos eixos da superfície de endurecimento	4,43	adimensional
Expoente da lei de endurecimento D	4,64 E-04	1/Pa
Coefficiente da lei de endurecimento W	0,42	adimensional
Expoente da lei de endurecimento X0	1,10 E+08	Pa
Coefficiente de endurecimento cinemático CBAR		
Coefficiente de endurecimento cinemático N		
Tensão de Ruptura à Tração	3,70 E+06	Pa
Coefficiente quadrático de viscosidade		
Coefficiente linear de viscosidade		

Apêndice C - Parâmetros do aço CA-50 empregados na simulação numérica.

Opções de Entrada		
Modelo Constitutivo	Johnson-Cook (DMAT)	
Tipo de Elemento	Sólido Lagrangeano	
Modo de Ruptura	Máxima Deformação Plana	
Modelo de Trincamento	Pressão de Trincamento	
Nome da Propriedade	Valor	Unidade
Densidade	7.850	kg/m ³
Módulo de Elasticidade	2,1 E+011	Pa
Coefficiente de Poisson	0,3	adimensional
Módulo de Cisalhamento	8,0 E+010	Pa
Módulo Elástico de Compressão Volumétrica	1,75 E+011	Pa
Tensão de escoamento estática	5,00 E+08	Pa
Parâmetro de endurecimento	5,1 E+08	Pa
Expoente de endurecimento		
Parâmetro de taxa de deformação	0,014	adimensional
Expoente de temperatura		
Taxa de deformação de referência		
Calor Específico	477	J/kg.K
Temperatura de Fusão	1.793	K
Temperatura ambiente		
Máxima Deformação Plástica	0,13	adimensional
Máxima Deformação Plástica à Compressão		
Pressão de Trincamento	-3,8 E+09	Pa

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 14 de novembro de 2006	3. DOCUMENTO N° CTA/ITA-IEI/TC-006/2006	4. N° DE PÁGINAS 70
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Simulação numérica de uma bomba de penetração			
6. AUTOR(ES): Steven Meier			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica – ITA/IEI			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1. Simulação numérica; 2. BPEN; 3. Concreto armado; 4. Alta resistência.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Análise estrutural; Concreto armado; Balística terminal; Bombas (explosivos); Análise numérica; Simulação computadorizada; Ensaios de impacto; Engenharia estrutural			
10. APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional Trabalho de Graduação, ITA, São José dos Campos, 2006. 70 páginas.			
11. RESUMO: <p>O presente trabalho tem por objetivo simular numericamente o efeito das bombas de penetração de 500 kg e 1000 kg (BPEN-500 e BPEN-1000, respectivamente) em um alvo de concreto armado de alta resistência.</p> <p>As ferramentas de simulação computacional empregadas foram o MSC.Patran, para o pré- e pós-processamento das informações referentes ao alvo e aos artefatos bélicos, e o MSC.Dytran, para a verificação do comportamento estrutural do alvo após o impacto das bombas.</p> <p>A fim de validar o <i>software</i> Dytran, foram realizados ensaios experimentais no Campo de Provas Brigadeiro Velloso (CPBV) envolvendo o lançamento da bomba de fins gerais de 460 kg (BA-FG-460), num maciço rochoso de arenito.</p> <p>Devido a restrições orçamentárias do projeto BPEN, não houve condições de construir o alvo em concreto armado. No entanto, para garantir maior precisão nos dados apresentados neste trabalho, deve-se obter amostras do arenito através de sondagens rotativas, e para a execução deste serviço está em andamento um processo licitatório.</p> <p>Os resultados obtidos servirão de base para a homologação das bombas BPEN-1000 e BPEN-500 no cumprimento dos requisitos operacionais para os quais foram projetadas.</p>			
12. GRAU DE SIGILO: () OSTENSIVO () RESERVADO (X) CONFIDENCIAL () SECRETO			