

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

THAYRONE SILVERIO OLIVEIRA

**SIMULAÇÃO DA EXPLOSÃO DE TRANSFORMADORES EM USINAS
HIDRELÉTRICAS VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

CAMPO MOURÃO

2019

THAYRONE SILVERIO OLIVEIRA

**SIMULAÇÃO DA EXPLOSÃO DE TRANSFORMADORES EM USINAS
HIDRELÉTRICAS VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, para obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientador: Prof. Jeferson Rafael Bueno, Dr. Eng.

CAMPO MOURÃO

2019



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

SIMULAÇÃO DA EXPLOSÃO DE TRANSFORMADORES EM USINAS HIDRELÉTRICAS VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

por

Thayrone Silverio Oliveira

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 9h do dia 01 de julho de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Leandro Waidemam

(UTFPR)

Prof. Me. Ângelo Giovanni Corelhano

(UTFPR)

Prof. Dr. Jeferson Rafael Bueno

(UTFPR)

Orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dr^a. Paula Cristina Souza

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus que permitiu eu chegar até este momento sem que faltasse a presença de pessoas boas ao meu lado.

Agradeço a essa instituição de ensino juntamente com seu corpo docente, que com o passar dos anos foram me moldando um profissional com princípios éticos.

Agradeço ao meu orientador professor Dr. Jeferson Rafael Bueno, por idealizar este tema e por ter dado suporte ao decorrer deste estudo. Juntamente ao Me. Murilo Limeira da Costa Neto, por ser essencial para o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço a meus pais Ismar e Auxiliadora, por me criarem e me educarem. A Joice minha companheira e melhor amiga que sempre me apoiou e me incentivou. A minhas irmãs Francieli e Daniele que fizeram parte e contribuíram com meu desenvolvimento como pessoa.

Por fim, agradeço aos meus amigos que deixaram cada dia da minha vida mais feliz e que contribuíram direta e indiretamente para minha formação tanto acadêmica quanto como ser humano.

RESUMO

Transformadores são componentes sujeito a explodirem devido a curtos-circuitos causando grande estrago principalmente em hidrelétricas, onde estes são mais potentes. Devido a este motivo este trabalho visa simular este fenômeno realizando análises estruturais em barreiras de proteção contra explosões, as *blast walls*. No decorrer deste trabalho buscou-se mostrar como funcionam os transformadores e o grande perigo envolvendo o colapso destes componentes, observam-se os vários fenômenos por trás de explosões e estuda-se a fluidodinâmica computacional que é um eficiente mecanismo na simulação destes fenômenos. Com estes conhecimentos idealizou-se uma situação hipotética onde há a explosão de um transformador de médio porte, realizou-se a simulação no software Ansys Autodyn, adicionou-se sensores de pressão em cinco lugares diferentes da barreira para descobrir a variação de pressão com o tempo de cada ponto, adotou-se a maior pressão em todo muro, logo após se fez a análise estrutural do *blast wall*, com os dados desta análise podem-se dimensionar tais estruturas para que suportem tais esforços, por consequência evitando prejuízos exorbitantes e podendo até mesmo salvar vidas. Em suma este trabalho visa analisar estruturalmente uma barreira contra explosões de transformadores.

Palavras-chave: *Blast Walls*. Fluidodinâmica. Transformador. Explosão.

ABSTRACT

Transformers are components subject to explode due to short circuits causing great damage mainly in hydroelectric where these are more powerful. Due to this reason, this work aims to simulate this phenomenon by carrying out structural analyzes on explosion protection barriers, blast walls. In the course of this paper, it is sought to understand how the transformers work and the great danger involving the collapse of this component, observe the various phenomena behind explosions and study the computational fluid dynamics that is an efficient mechanism in the simulation of these phenomena. With this knowledge, a hypothetical situation is idealized in which a medium-sized transformer explodes, the simulation is performed in the Ansys Autodyn software by adding pressure sensors in five different places of the barrier, discovering the pressure variation with the time of each point, adopting the greater pressure in every wall is made structural analysis of the blast wall, with the data of this analysis can be sized such structures to support such efforts, therefore avoiding exorbitant damages and even saving lives, in short, this work aims to analyze structurally a barrier against explosions of transformers.

Keywords: Blast Walls. Fluid Dynamics. Transformer. Explosion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Esquema da estrutura do trabalho.....	6
Figura 2: Destruição da usina de Sayano-Shushenskaya.	11
Figura 3: Transformador de alta potencia.	13
Figura 4: Desenho esquemático de um transformador típico.....	13
Figura 5: Elevação da pressão interna dentro do tanque de um transformador para diferentes tipos de curto-circuitos.	15
Figura 6: Modelos para malha no Ansys Autodyn.....	18
Figura 7: Volume finito típico unidirecional.	22
Figura 8: Volume de controle associado ao vértice p da malha.	24
Figura 9: Consolo curto: malha de elementos finitos e ação exterior.....	26
Figura 10: Consolo curto: malha deformada representada sobre estrutura indeformada.....	27
Figura 11: Tensões principais e respectivas direções.....	27
Figura 12: Consolo curto: campo de deslocamentos verticais.....	28
Figura 13: Consolo curto: campo de tensões normais segundo um eixo vertical.	28
Figura 14: Curva típica de pressão x distância de uma explosão.	33
Figura 15: Esquema das propriedades de uma onda de choque em movimento.	34
Figura 16: Variação de fases de uma explosão e seus efeitos ao longo do tempo.	37
Figura 17: Tipos básicos de explosão.	39
Figura 18: Interação de uma onda de choque atingindo uma superfície obliquamente.	41
Figura 19: Explosão na atmosfera - Efeito <i>Mach</i>	42
Figura 20: Modelo massa-mola equivalente utilizado pelo modelo SDOF.....	43
Figura 21: Representação da disposição do sistema de proteção em planta baixa.....	47
Figura 22: Representação da disposição do sistema de proteção em corte.....	47
Figura 23: Simulação teste.....	52
Figura 24: Esquemática da situação simulada.	53
Figura 25: Disposição de sensores no <i>Blast Wall</i>	54
Figura 26: Massa de ar discretizada com sensores posicionados.	55
Figura 27: Gráfico Pressão x Tempo de cada sensor.	56
Figura 28: Sobreposição dos gráficos Pressão x Tempo dos sensores.	57
Figura 29: Modelagem estrutural do <i>blast wall</i>	58
Figura 30: Diagrama de esforço cortante atuante na parede (kN).	59
Figura 31: Diagrama de momento fletor atuante na parede (kN*m).....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Número e quantidade de perdas por ano.....	8
Tabela 2: Perdas por destinação.	8
Tabela 3: Causas de falhas	9
Tabela 4: Distribuição de perdas por idade do transformador.	10
Tabela 5: Relação de alguns explosivos e sua referência em TNT.....	30
Tabela 6: Formulações sobre predições das sobrepressões de onda de choque ao ar livre.	32
Tabela 7: Fator de efetividade para barreiras flexíveis.	45
Tabela 8: Características do ar.	49
Tabela 9: Características da TNT.....	50
Tabela 10: Características termodinamicas do óleo mineral.	50
Tabela 11: Resultados medidos pelos sensores.	57

LISTA DE SIGLAS

ALE	Arbitrary Lagrange Euler
CFD	Computacional Fluid Dynamics
IMIA	International Association of Engineering Insurers
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
NLFEA	Non-Linear Finite Element Method
ODS	Observed Damage to Structures
SDOF	Single Degree of Freedom
SPH	Smooth Particle Hydrodynamics

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	3
1.1 OBJETIVOS.....	4
1.1.1 Objetivo Geral.....	4
1.1.2 Objetivos Específicos	4
1.2 Justificativa.....	4
1.3 Estrutura do Trabalho	5
2 ACIDENTES COM EXPLOSÕES DE TRANSFORMADORES E CUSTOS ASSOCIADOS	7
2.1 ESTATÍSTICAS ENVOLVENDO EXPLOSÕES DE TRANSFORMADORES .	7
2.2 FUNCIONALIDADE E COMPOSIÇÃO DOS TRANSFORMADORES	12
2.3 ESTUDO DO FENÔMENO DA EXPLOSÃO DE TRANSFORMADORES	14
3 INVESTIGAÇÃO VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL DAS DISTRIBUIÇÕES DE SOBREPRESSÕES E IMPULSOS DERIVADOS DA ONDA DE CHOQUE.....	16
3.1 ESTUDO DA FERRAMENTA AUTODYN E FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	16
3.2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS	22
3.3 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE O MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS .	24
3.4 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS..	25
4.1 ESTUDO SOBRE O FENÔMENO DA EXPLOSÃO	29
4.2 EFEITOS DA ONDA DE CHOQUE.....	33
4.3 INCIDENCIA DE ONDAS DE CHOQUE EM SUPERFÍCIES.....	36
4.4 DIMENSIONAMENTO DE <i>BLAST WALLS</i>.....	42
5 MÉTODO E MATERIAIS.....	46
5.1 FASE DE IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA	46
5.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	48
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
7 CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

Um estudo da *International Association of Engineering Insurers* (IMIA) analisou, nos diferentes países membros de sua organização durante os anos de 1997 a 2001 casos de falhas em transformadores chegando a conclusão que houveram perdas de 94 transformadores atingindo um prejuízo de 124 milhões de dólares, relacionados aos danos causados pela explosão e pelo tempo de ociosidade que as empresas enfrentaram no seu meio produtivo. Segundo estatísticas o número de transformadores incapacitados aumenta 2% ao ano (BARTLEY 2003).

O fenômeno da explosão de transformador é uma consequência de muitas causas possíveis, tais falhas vão desde a má isolamento do componente até mesmo por inundação na casa de máquinas. Sendo as causas diversas e ainda o grande potencial de perdas financeiras e de vidas associados surgiu à necessidade de se projetar um sistema de proteção contra explosões, mecanismo conhecido como *blast wall*.

Apesar de tal sistema estar sendo utilizado nas usinas brasileiras, não se tem a garantia de que o mesmo tenha sido adequadamente aplicado, principalmente porque não há muitos trabalhos acadêmicos com o propósito de investigar ou estudar esse método de proteção em hidrelétricas nacionais.

Contudo, questionou-se a efetividade das paredes antibomba em mitigar os efeitos da explosão de transformadores garantindo que tal ameaça explosiva não danifique as demais instalações de uma usina hidrelétrica. Assegurar que as ações da detonação não se esvaeçam minimiza a possibilidade que um acidente não se torne uma catástrofe generalizada.

Desta forma, este trabalho de conclusão de curso teve como principal objetivo simular a explosão de transformadores em usinas hidrelétricas via fluidodinâmica computacional. Para orientar as ações em direção a este objetivo foi pesquisado a ocorrência de explosões de transformadores e seus custos associados, foram investigadas como ocorrem as distribuições das sobrepressões e impulsos derivados da onda de choque via fluidodinâmica computacional, além de ter sido identificado os principais parâmetros para o dimensionamento de *blast walls*.

A metodologia consistiu na análise de *Blast Walls* de usinas hidrelétricas, simulando-as na plataforma computacional ANSYS, licença estudantil, utilizando sua

extensão Autodyn, que tem como principais características o estudo por elementos finitos e fluidodinâmica.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Simular a explosão de transformadores em usinas hidrelétricas via fluidodinâmica computacional.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar sobre ocorrências de explosões de transformadores e custos associados;
- Investigar como ocorrem as distribuições das sobrepressões e impulsos derivados da onda de choque via fluidodinâmica computacional;
- Identificar os principais parâmetros para o dimensionamento de *blast walls*.

1.2 Justificativa

A importância de se entender o efeito da explosão de transformadores e o método de proteção usando *blast walls* é bastante significativa, pois mesmo não sendo frequente seu acontecimento, quando o mesmo acontece pode causar grandes danos monetários e as vidas de trabalhadores que no ambiente executam suas funções.

O estudo dos sistemas *blast walls* empregados nas hidrelétricas brasileiras se faz necessário, pois o mesmo visa verificar se as casas de forças estão realmente protegidas e conseqüentemente as pessoas que ali trabalham.

A maioria das *blast walls* dimensionadas em hidrelétricas brasileiras, na época em que ocorreram seus projetos, foi calculada simulando um grande esforço de vento, porém atualmente sabe-se que quando ocorre uma explosão há uma elevada liberação de energia gerando uma onda de choque devido ao deslocamento de ar e ainda atua na estrutura o impulso.

Esses efeitos que surgem numa explosão tem um grau mais catastrófico que um vento de elevada velocidade, principalmente porque efeitos de explosão são efeitos mais rápidos e numa explosão não somente acontecem deslocamentos de ar.

O problema da explosão de transformadores está relacionado com a instabilidade elétrica do transformador ao decorrer de sua vida útil bem como a falta de dispositivos que previnam seu curto-circuito.

Devido aos elevados custos dos reparos e indenizações caso ocorra a explosão o investimento em estudos para a melhora do sistema de proteção *blast wall* deve ser considerado. Além disso, os reparos da casa de força deixam inoperante a usina podendo até parar totalmente a produção de energia.

1.3 Estrutura do Trabalho

Conforme a **Figura 1**, pode-se observar que partindo de um objetivo geral, 3 objetivos específicos foram traçados, onde cada um gerou um capítulo da revisão bibliográfica. Partindo disso, teve-se o embasamento para escrever sobre os materiais e métodos que foram utilizados nesta pesquisa.

A seguir a descrição detalhada de cada um dos capítulos:

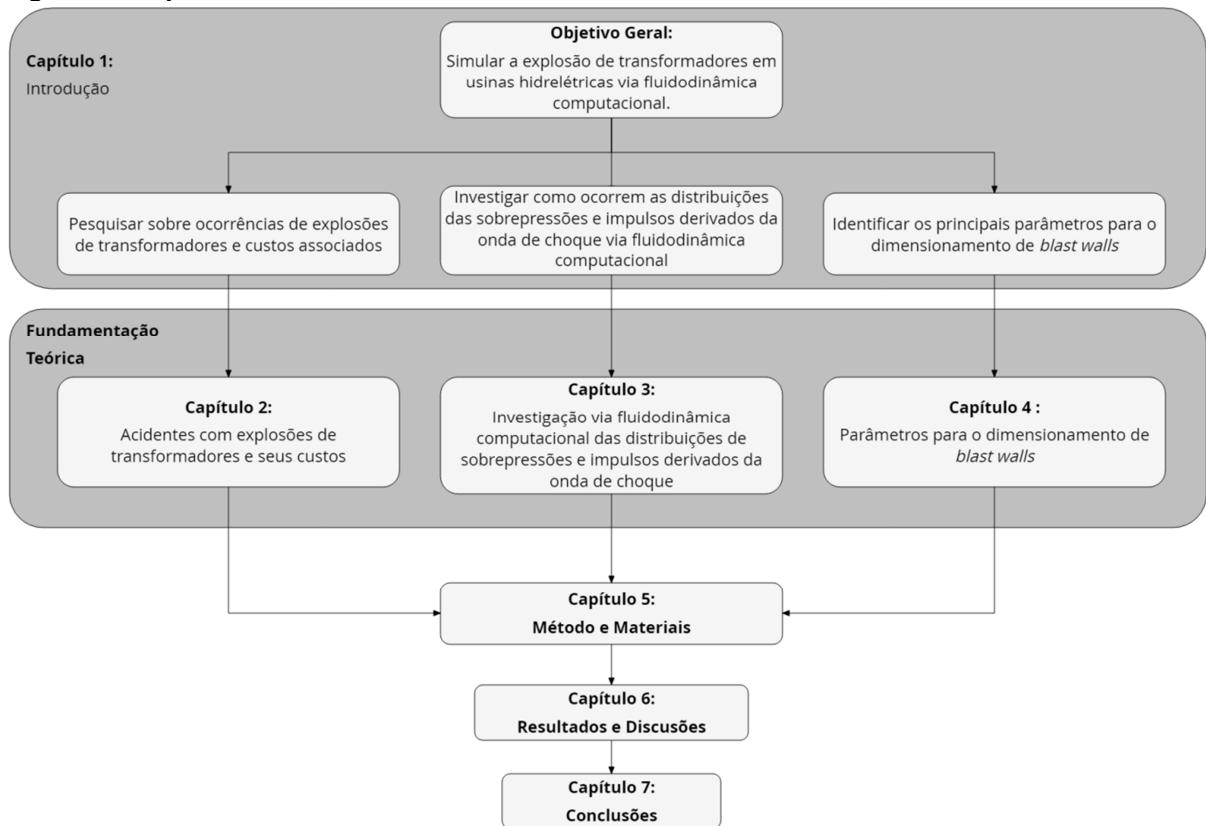
Capítulo 1 – Foram apresentados o objetivo geral e os específicos do trabalho proposto, além das justificativas que apontam a importância da pesquisa.

Capítulo 2 – Acidentes com explosões de transformadores e seus custos: Estudo geral sobre transformadores, análise do comportamento do transformador quando ocorre a explosão, investigação de acidentes que ocorreram envolvendo a explosão do componente e prejuízos associados.

Capítulo 3 – Investigação via fluidodinâmica computacional das distribuições de sobrepressões e impulsos derivados da onda de choque: Estudo aprofundado da modelagem numérica Autodyn, revisões bibliográficas de artigos técnicos publicados sobre o conceito da fluidodinâmica computacional, método dos elementos finitos, método das diferenças finitas e método dos volumes finitos.

Capítulo 4 – Parâmetros para o dimensionamento de *blast walls*: Revisões bibliográficas de artigos técnicos abordando o fenômeno da explosão e os tipos de proteção, análise do comportamento mecânico de elementos submetidos aos efeitos da detonação, e estudo dos critérios a serem considerados no design da peça.

Figura 1: Esquema da estrutura do trabalho.



Fonte: Autoria própria (2019).

Capítulo 5 – Método e materiais: Apresentam-se os meios empregados na coleta de dados para a criação do modelo computacional.

Capítulo 6 – Resultados e discussões: Referem-se ao problema hipotético idealizado, os resultados processados pelo Autodyn e além disso qual o significado físico do mesmo para a estrutura analisada.

Capítulo 7 – Conclusões: Apresentam-se as principais observações em um âmbito geral referente à pesquisa realizada e aos resultados captados e interpretados.

2 ACIDENTES COM EXPLOSÕES DE TRANSFORMADORES E CUSTOS ASSOCIADOS

Este capítulo se baseia em três fases principais, na primeira abordam-se estatísticas que comprovam que as explosões de transformadores geram enormes prejuízos para órgãos públicos e privados.

Na segunda parte estuda-se a funcionalidade dos transformadores, seus componentes internos e na última fase explica-se o motivo da explosão de transformadores, como ocorre tal fenômeno e seus principais métodos de falhas.

2.1 Estatísticas envolvendo explosões de transformadores

A perda de transformadores por explosão é um fenômeno que deve ser dado atenção, pois, mesmo que o fato não ocorra com uma determinada frequência, suas consequências são bastante devastadoras. Além de causar um grande risco à vida seu potencial de prejuízo é bastante elevado, apresenta-se a seguir fatos e dados que fundamentam essas afirmações.

Segundo estudo da *International Association of Engineering Insurers* (IMIA) apresentado em sua conferência anual, foram coletados dados de perdas de transformadores dos países que fazem parte de sua organização. Foram colhidos dados entre os anos de 1997 à 2001, entraram nas estatísticas somente transformadores com potência de 25 MVA e superiores. Foram solicitadas informações de ano da perda, potência em MVA, idade do transformador, quando ocorreu a falha, prejuízos causados com a explosão e prejuízos com o tempo que a empresa ficou parada, na questão monetária se converteu as unidades conforme a taxa de câmbio da época (BARTLEY 2003). A **Tabela 1** apresenta os dados coletados desses cinco anos.

Tabela 1: Número e quantidade de perdas por ano.

Ano	Número de Perdas	Prejuízo Total	Prejuízo com a Perda	Prejuízo com a Paralisação
1997	19	US\$ 40.779.507,00	US\$ 25.036.673,00	US\$ 15.742.834,00
1998	25	US\$ 24.932.235,00	US\$ 24.897.114,00	US\$ 35.121,00
1999	15	US\$ 37.391.591,00	US\$ 36.994.202,00	US\$ 397.389,00
2000	20	US\$ 150.181.779,00	US\$ 56.858.084,00	US\$ 93.323.695,00
2001	15	US\$ 33.343.700,00	US\$ 19.453.016,00	US\$ 13.890.684,00
Total	94	US\$ 286.628.812,00	US\$ 163.239.089,00	US\$ 123.389.723,00

Fonte: Retirado de Bartley (2003).

Deste total, o estudo ainda mostrou os usos específicos destes transformadores e se notou que a destinação com maior número de perdas e com o maior valor de prejuízo são equipamentos destinados ao sistema de geração de energia (BARTLEY, 2003), se enquadrando usinas eólicas, nucleares e hidrelétricas que por sua vez é o escopo deste trabalho. Encontram-se na **Tabela 2** as destinações dos transformadores que foram danificados.

Tabela 2: Perdas por destinação.

Ano	Geração de Energia		Industrial		Subestações de Serviço Público		Não Identificado		Anuais Totais	
1997	US\$ 29.201.329,00	3	US\$ 2.239.393,00	4	US\$ 5.243.075,00	11	US\$ 4.095.710,00	1	US\$ 40.779.507,00	19
1998	US\$ 15.800.148,00	8	US\$ 3.995.229,00	6	US\$ 5.136.858,00	11	US\$ -	0	US\$ 24.932.235,00	25
1999	US\$ 3.031.433,00	4	US\$ 24.922.958,00	4	US\$ 6.116.535,00	6	US\$ 3.320.665,00	1	US\$ 37.391.591,00	15
2000	US\$ 123.471.788,00	10	US\$ 24.724.182,00	4	US\$ 2.039.810,00	6	US\$ -	0	US\$ 150.235.780,00	20
2001	US\$ 32.082.501,00	11	US\$ -	0	US\$ 1.261.199,00	4	US\$ -	0	US\$ 33.343.700,00	15
Total	US\$ 203.587.199,00	36	US\$ 55.881.762,00	18	US\$ 19.797.477,00	38	US\$ 7.416.375,00	2	US\$ 286.682.813,00	94

Fonte: Retirado de Bartley (2003).

Pode-se notar analisando a **tabela 2**, que transformadores destinados à geração de energia são os que mais causam prejuízos isso se deve principalmente a dois fatores, o primeiro se dá pela alta potência dos transformadores utilizados que consequentemente faz com que esses componentes possuam um grande custo.

O segundo motivo se trata do potencial de prejuízo que se tem quando há uma explosão de transformador em uma usina de geração de energia, pois o ambiente em que se encontra possuem outros do mesmo e ainda outros componentes cujo custo é consideravelmente elevado, portanto na situação de um

estouro não somente terá prejuízos com o componente que entrou em colapso, mas também prejuízos relacionados com o em torno.

Outro parâmetro captado pelo estudo são os motivos que causaram tais perdas, foram identificadas onze causas de falhas sendo que a maioria das perdas concentram em dois motivos principais que são a falta de isolamento e em projeto. Deve-se ressaltar o grande número de motivos que não foram identificados, na **tabela 3** se observa estes dados.

Tabela 3: Causas de falhas

Causa da Falha	Número de Ocorrências	Total de Gastos
Falha no Isolamento	24	US\$ 149.967.277,00
Design/ Material/ Obra	22	US\$ 64.696.051,00
Não Informado	15	US\$ 29.776.245,00
Contaminação do Óleo	4	US\$ 11.836.367,00
Sobrecarga	5	US\$ 8.568.768,00
Fogo/Explosão (externa)	3	US\$ 8.045.771,00
Impulso de linha	4	US\$ 4.959.691,00
Manutenção/Operação Inadequada	5	US\$ 3.518.783,00
Inundação	2	US\$ 2.240.198,00
Perda de conexão	6	US\$ 2.186.725,00
Relâmpago	3	US\$ 657.935,00
Umidade	1	US\$ 175.000,00
Total	94	US\$ 286.628.811,00

Fonte: Retirado de Bartley (2003).

A causa mais frequente e que possui o maior gasto são falhas no isolamento do componente, incluindo-se instalação inadequada deterioração do isolamento e curto-circuito (BARTLEY, 2003). Apesar das inúmeras causas apresentadas, na maioria das vezes quando acontece uma falha nesse tipo de componente corre-se um grande risco de explosão devido a grande probabilidade de haver um curto-circuito oriundo dessas falhas.

Segundo Bartley (2003) a categoria idade não foi incluída neste grupo de falhas, pois ela não é uma consequência primaria e sim um fator que agrava a probabilidade de que algumas das causas acima aconteçam. Quando um transformador envelhece ele perde resistência mecânica e dielétrica. À medida que carga do sistema aumenta devido ao crescimento do sistema as tensões operacionais seguem o mesmo rumo. Em uma falha de transformador envelhecido

normalmente seu isolamento é enfraquecido chegando ao ponto de não poder mais sustentar as tensões mecânicas decorrentes de um curto. Na **tabela 4** tem-se as perdas por idade dos equipamentos.

Tabela 4: Distribuição de perdas por idade do transformador.

Idade do Componente (anos)	Quantidade de Perdas	Gastos
0-5	9	US\$ 11.246.360,00
6-10	6	US\$ 22.465.881,00
11-15	9	US\$ 3.179.291,00
16-20	9	US\$ 10.518.283,00
21-25	10	US\$ 16.441.930,00
Acima de 25	16	US\$ 15.042.761,00
Idade desconhecida	35	US\$ 207.734.306,00

Fonte: Retirado de Bartley (2003).

A média de idade em que os transformadores falham segundo esse estudo é de aproximadamente 18 anos, o que comprova a afirmação do autor da pesquisa que as falhas estão mais propensas a transformadores mais velhos.

Podem-se apontar também casos específicos em que se houve explosões de transformadores em hidrelétricas, confirmando o potencial danoso que esse fenômeno pode atingir nessas específicas condições.

Um caso bem claro desta situação ocorreu durante à tarde do dia 3 de junho de 2006, em Foz do Iguaçu, na usina hidrelétrica de Itaipu com a explosão de um de seus transformadores, tal fato considerado o mais sério registrado há 24 anos de operação. Deixando seis funcionários feridos sendo dois dos mesmos com queimaduras graves. O componente elétrico custava na época 1,5 milhão de dólares e o mesmo possuía seguro (PARO E BUSNARDO, 2006).

No dia 17 de agosto de 2009, ocorreu, na usina hidrelétrica Sayano-Shushenskaya no rio Yenisei, localizado na região siberiana russa de Khakassia, uma explosão causada por um transformador, com a ação de sua onda de choque a mesma causou danos à estrutura da barragem, assim, inundando a casa de máquinas e escoando 40 toneladas de óleo para transformador no percurso fluvial contaminando sua biodiversidade. Ao todo foram contabilizados 76 mortes e um prejuízo calculado para época de 1,3 bilhões de dólares (BBC, 2009).

Figura 2: Destruição da usina de Sayano-Shushenskaya.



Fonte: BBC (2009).

Analisando estes acontecimentos no Brasil e na Rússia, questiona-se o motivo pelo qual uma explosão de transformador pode ser de veras catastrófica em situações onde estes determinados componentes estão localizados em usinas hidrelétricas.

Em busca desta resposta deve-se entender a usual disposição de transformadores de alta potencia nestes tipos de usinas. Segundo Gedeon (1995) a escolha da localização de um transformador em uma usina está relacionada com o tipo de componente, em geral se determina por lugares onde não se tenha grandes perdas de energia e também que sua instalação seja facilitada. Possíveis locais onde os transformadores de alta potência podem ser colocados: entre a casa de força e a barragem, no convés do tubo de sucção, perto da casa de força, ou perto do pátio de comando.

Ao analisar os possíveis locais pode-se entender que todos eles estão em contato com zonas vitais ao bom funcionamento da barragem e se caso ocorra uma explosão de algum transformador os danos serão significativos. Portanto entende-se a gravidade dos acontecimentos em Itaipu e Sayano-Shushenskaya e ainda por meio das estatísticas da IMIA consegue-se compreender o alto nível de prejuízo nessas situações.

2.2 Funcionalidade e composição dos transformadores

Transformadores são componentes elétricos que possuem a função de elevar a tensão de uma rede para que a mesma atenda as necessidades requeridas, para determinada transferência de campos magnéticos.

Segundo Nogueira e Alves (2009), transformadores são equipamentos utilizados para transferir energia de um lado do circuito para o outro por meio de um fluxo magnético comum em ambos os lados.

Nas usinas que geram energia os transformadores de potência transformam em um nível mais alto a transmissão de energia para a rede principal. Por sua vez, a tensão da rede principal deve ser transformada novamente para uma voltagem mais baixa, assim a energia poderá ser utilizada para diversos propósitos (VALTA 2007).

Este equipamento é composto de enrolamentos, de um núcleo, de uma carcaça e buchas. Os enrolamentos são feitos de fios de cobre, pois possuem menos resistência que outros tipos de metais mais comuns, cada bobina é envolvida com material isolante podendo ser enrolamento primário que é disposto em torno do núcleo ou secundário que se localiza no topo do primário, entre os dois se coloca o isolante. O núcleo do componente é fabricado com um material ferromagnético, podendo ser maciço ou laminado, proporcionando alta permeabilidade magnética entre o circuito primário e secundário (NG 2007).

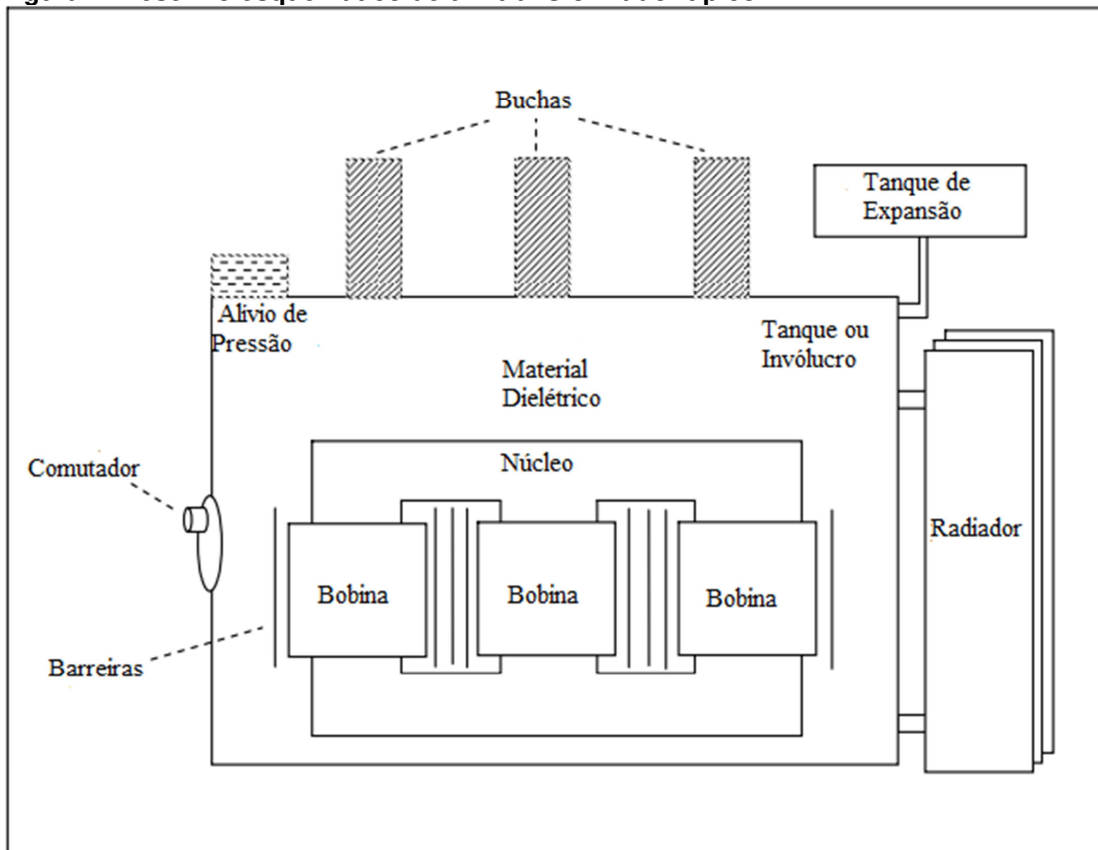
A bucha é uma estrutura isolante que fornece o caminho condutor isolando a entrada do mesmo energizado no tanque, entre os enrolamentos são instaladas barreiras de *Pressboard* aumentando a integridade dielétrica do transformador, o seletor de derivação é um dispositivo que regula a tensão, os radiadores fornecem o caminho para que o calor se dissipe (NG 2007). Pode-se observar na **figura 3 e 4** um transformador de alta potencia e a disposição de seus componentes.

Figura 3: Transformador de alta potencia.



Fonte: Retirado de Pontes (2001).

Figura 4: Desenho esquemático de um transformador típico.



Fonte: Retirado de Ng (2007).

2.3 Estudo do fenômeno da explosão de transformadores

Dos equipamentos presentes em uma hidrelétrica, o transformador é o que possui o maior potencial incendiário, devido à quantidade de óleo mineral nele contido, que é aproximadamente 40000 litros. Este óleo tem duas funções básicas, a primeira o transporte de calor, tal liberação provocada pelas perdas, a segunda como dielétrico entre componentes ativos e condutores de correntes (PONTES 2001).

Na ocorrência de um curto-circuito, o arco elétrico vaporiza o óleo criando um pico de pressão dinâmica com a velocidade aproximada de 1200 metros por segundo, devido ao reflexo de dentro do tanque o pico de pressão gerará ondas de choque, combinando todos os picos de pressão criam-se ondas de pressão estática, assim a pressão dentro do transformador será igual em todos os pontos, sabendo que este equipamento não possui grande resistência mecânica, entre 50 a 100 milissegundos do início do curto o tanque do transformador irá romper (TRANSFORMER PROTECTOR, 2012).

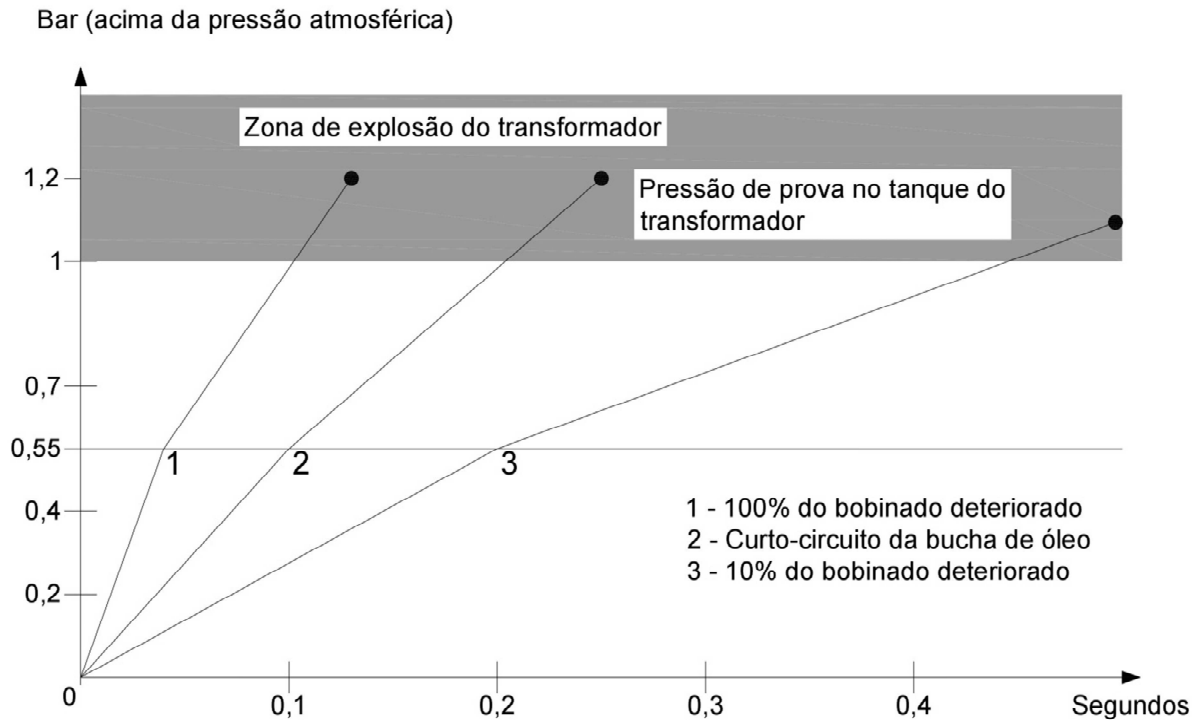
Segundo Pontes (2001) a explosão de um transformador tem como consequência a formação de uma *blast wave*, que se trata de uma onda de choque que incidirá frontalmente, seguida de uma onda de expansão que após retornará a pressão atmosférica. A magnitude da onda frontal depende das características da energia liberada. A energia proveniente é basicamente dos gases sob pressão do tanque do óleo, essa energia será usada para: expansão do transformador, ruptura do tanque, explosão (ondas de pressão), lançamento de fragmentos.

Os transformadores possuem proteções elétricas e válvulas de alívio de pressão. Segundo Sergi apud Pontes¹ (2001), em poucos casos válvulas de alívio de sobrepressão salvaram um transformador sob curto-circuito. Na maioria das explosões o sistema de proteção elétrico está funcionando normalmente, o motivo de tal ineficiência é a lentidão da ação do disjuntor pois ele responde ao tempo de 0,085 segundos que é insuficiente para conter uma explosão severa (PONTES, 2001).

A **figura 5** demonstra exemplos da elevação de pressão de um transformador de 250 MVA para diferentes tipos de incidentes.

¹ SERGI. **Previsão da explosão e incêndio de transformadores**. Referência:Ed4Sc03p. 1999. 28p.

Figura 5: Elevação da pressão interna dentro do tanque de um transformador para diferentes tipos de curto-circuitos.



Fonte: Retirado de Sergi (1999).

Pode-se analisar com a **figura 5** que a válvula de pressão realmente terá um funcionamento efetivo somente quando a bobina estiver com 10% de seu material deteriorado, provando que este método de alívio de pressão não é muito eficaz. Segundo Sergi apud Pontes² (1999), a pressão aproximada resistida por um tanque de transformador é de aproximadamente 1 bar acima da pressão atmosférica.

Pelo motivo dos transformadores de 100 MVA ou mais possuírem uma grande quantidade de óleo mineral em seu interior, cerca de 40000 litros, pode-se afirmar que o mesmo tem uma carga equivalente de 0,5 kg de TNT, portanto podendo comprometer todo ambiente ao seu redor (PONTES, 2001).

² SERGI. **Previsão da explosão e incêndio de transformadores**. Referência:Ed4Sc03p. 1999. 28p.

3 INVESTIGAÇÃO VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL DAS DISTRIBUIÇÕES DE SOBREPRESSÕES E IMPULSOS DERIVADOS DA ONDA DE CHOQUE

Neste capítulo, aborda-se principalmente o conceito da fluidodinâmica computacional, como surgiu, principais funcionalidades, explora-se os códigos CFD, quais métodos numéricos que o mesmo se utiliza, e principalmente os como os mesmos se comportam quando se trata de simulações com explosões.

3.1 Estudo da ferramenta Autodyn e fluidodinâmica computacional

A versátil ferramenta Autodyn é um tipo de hidrocódigo que tem sua análise explícita desenvolvida para lidar com problemas dinâmicos não lineares, como modelagem de penetração, impacto e explosões. Assim, esta ferramenta possibilita analisar a dinâmica de sólidos, fluidos e gases e ainda a interação entre os mesmos, considerando elevados níveis de tensões e deformações em um curto período de tempo. Aplicando-o a um estudo de explosão, o Autodyn pode ser utilizado na modelagem de casos como: modelagem de cargas explosivas para militares, simulações de explosões em que haja projéteis ou fragmentação envolvida, demolição, explosões no ar, no solo ou sob a água (NETO, 2015).

Segundo a cartilha da extensão Autodyn, o conjunto de dinâmicas explícitas do ANSYS permite que você capture a física de eventos de curta duração para produtos que sofrem forças dinâmicas transitórias altamente não-lineares.

O Autodyn é baseado principalmente em três tipos de conservação, a primeira é a lei de conservação da massa, afirma que a massa de um sistema fechado permanece constante, ou a matéria nunca é criada ou destruída e sim sofre transformações. O segundo é a lei de conservação de quantidade de movimento, é uma lei fundamental da natureza que afirma que o movimento total de um sistema que não tem contato com agentes externos é constante. O terceiro é a lei de conservação de energia, segundo ela em um sistema isolado a energia é constante, por consequência a energia não pode ser criada ou destruída (ABDELALIM, 2013).

Assim, os códigos hidrodinâmicos, também conhecidos como hidrocódigos, são ferramentas computacionais bastante úteis para o estudo do comportamento da

explosão e da onda de choque, eles baseiam-se na realização de cálculos hidrodinâmicos de cada material (ABDELALIM³ apud NETO, 2015).

A modelagem de explosões usando hidrocódigos está baseado em métodos numéricos como elementos finitos, volumes finitos e diferenças finitas. Se baseiam nestes modelos os CFD que dão uma aproximação mais precisa que modelos mais antigos adotados para simular o fenômeno, podendo considerar geometrias complexas no espaço tridimensional (BIRNBAUM ET AL.⁴ apud NETO, 2015).

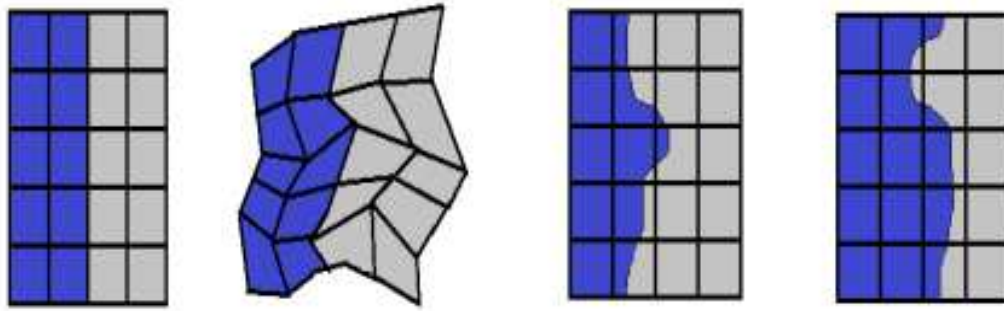
Segundo Fairlie (1998), processadores numéricos alternativos estão presentes no Autodyn e podem ser usados seletivamente para modelar diferentes situações de problemas, os processadores incluem:

- Lagrange: normalmente utilizado para modelar contínuos sólidos e estruturas, método no qual a malha se distorce com o material sua principal vantagem é o rápido processamento e o fornecimento de uma boa interface do material;
- Euler: usado para modelagem de gases, fluidos e estruturas de grande deformação cuja capacidade permite o fluxo de múltiplos materiais e a inclusão da resistência de materiais. Seu processador se utiliza de malha fixa através da qual o material flui, computacionalmente exige mais processamento, porém é a ferramenta adequada para modelar deformações maiores e fluxos de fluidos;
- ALE: processador que fornece o rezoneamento automático de grades, alternando entre o modelo de Lagrange e o modelo de Euler, não é indicada para modelagem de fluxos mais complexos;
- SPH: se trata de um método lagrangeano que não utiliza de malhas isso possibilita evitar o enredamento dos processos usuais ocorrido em Lagrange evitando também a utilização de algoritmos de erosão, sendo mais adequado para impacto/penetração.
- Elementos estruturais: Permitem o tratamento de elementos tipo “*shell*” e “*beams*”, sendo baseados numa formulação em elementos finitos (FAIRLIE, 1998).

³ ABDELALIM, O. 2013. **Blast hazard mitigation through vented suppressive shields**, Carleton University, Ottawa, Canadá.

⁴ BIRNBAUM, N. K, Clegg, R. A., Fairlie, G. E. 1996. **Analysis of Blast Loads on Buildings**, Century Dynamics Incorporated, Oakland, California.

Figura 6: Modelos para malha no Ansys Autodyn.



a) Malha Lagrangeana.

b) Malha Euleriana.

Fonte: Retirado de Neto (2015).

Abdelalim (2013) apresenta as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia em um fluido ideal, segundo Lagrange e Euler.

As equações (3.1), (3.2), (3.3), representam respectivamente as descrições Eulerianas de conservação de massa, de movimento e de energia, respectivamente:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (p u_c) = 0, \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial p u_c}{\partial t} + \nabla \cdot (u_c x(p u_c)) + \nabla P = 0, \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (u_c (E + P)) = 0, \quad (3.3)$$

em que:

u_c : Componente cartesiano de velocidade;

t: Tempo;

p: Massa específica;

∇ : Gradiente, constituído por um campo de vetores cujas componentes são derivadas parciais de uma função;

E: Energia;

P: Pressão.

As equações (3.4), (3.5), (3.6), representam respectivamente, as equações de conservação de massa, de movimento e de energia segundo Lagrange, a partir da derivada Lagrangeana.

$$\frac{Dp}{Dt} = -p \cdot (\nabla \cdot \nu), \quad (3.4)$$

$$\frac{D\nu}{Dt} = \frac{\nabla P}{p}, \quad (3.5)$$

$$\frac{De_i}{Dt} = -\frac{P}{p}(\nabla \cdot \nu), \quad (3.6)$$

sendo:

ν : Componente cartesiana de velocidade;

e_i : Energia interna;

D: Derivada de Lagrange.

A fluidodinâmica é uma linha de estudo que envolve problemas ligados a fluidos, termodinâmica, hidráulica, dentre outros. Em alguns nichos industriais é visível à importância de estudos na área da fluidodinâmica para se elevar a qualidade dos seus produtos, porém, necessita-se de um grande investimento para a obtenção destes resultados, pois os cálculos geralmente envolvem equações diferenciais parciais. Por este motivo, vêm-se investindo cada vez mais em modelagem matemática e simulações numéricas, estes métodos são conhecidos como fluidodinâmica computacional (CFD) (HERCKERT e NETO, 2004).

Durante muito tempo se utilizou de meios aproximados para o estudo das explosões, porém com o advento dos hidrocódigos e os códigos de fluidodinâmica computacional (CFD) este sendo considerado um hidrocódigo moderno, puderam considerar fenômenos como múltiplas reflexões da onda de choque, avaliação da fase negativa, efeito Mach, e considerações sobre a termodinâmica (NETO, 2015).

Segundo Lomax, Pulliam e Zingg (1999), o objetivo final do campo do CFD é compreender eventos físicos que ocorrem no fluxo de fluidos ao redor e dentro de objetos designados. Esses eventos estão relacionados à ação e iteração de fenômenos como dissipação, difusão, convecção, ondas de choque, superfícies escorregadias, camada limite e turbulência.

Nos casos de escoamentos laminares, o método é relativamente simples, pois as equações de Navier-Stokes sobre conservação de energia e massa resolvem esse problema. Porém a maioria dos escoamentos que acontecem na natureza são de caráter turbulento, este possui um alto nível de complexidade, por isso utiliza-se métodos numéricos que simulam esses fenômenos (HERCKERT E NETO, 2004).

O uso de métodos numéricos para a resolução de equações diferenciais parciais introduz aproximações que podem mudar a forma básica das equações, essas novas equações são constantemente referidas como equações diferenciais parciais modificadas. Sendo que estas não são iguais as originais elas irão simular fenômenos físicos de maneira que não são exatamente fidedignas ao original, matematicamente estes erros são conhecidos como erros de truncamento. Porém, não há nada de errado desde que o desvio permaneça em grandezas que podem ser desconsiderados pela engenharia (LOMAX, PULLIAM, ZINGG 1999).

Segundo Versteeg e Malalasekera⁵ apud Zannuto (2015), os códigos CFD são estruturados de forma que permitam a resolução de escoamentos de fluidos, esses códigos são compostos por três elementos principais: um pré-processador, um *solver* e um pós-processador.

O pré-processamento consiste na implementação de um problema envolvendo escoamento no código CFD através de uma interface e a transformação dos dados inseridos em uma forma adequada para ser processada pelo *solver*, nesta etapa se envolvem (VERSTEEG E MALALASEKERA⁵ APUD ZANNUTO 2015):

- Definição da geometria da região de interesse: domínio computacional;
- Geração da malha: a subdivisão do domínio em um número pequeno de subdomínios;
- Seleção dos fenômenos físicos e químicos a serem modelados;
- Definição das propriedades dos fluidos;
- Especificação de condições de contorno para as células que coincidem, ou tocam, uma fronteira do domínio;
- Definição de métodos numéricos e funções de interpolação.

Segundo Versteeg e Malalasekera⁵ (2007), a precisão da solução de um CFD, entre outros fatores, é governada pelo número de células subdivididas pela malha. Normalmente quanto maior o número de células mais perto da realidade estará a simulação. Malhas mais elaboradas são frequentemente não-uniformes, geralmente em áreas em que haja mais variações geométricas de ponto a ponto

⁵ VERSTEEG, H. K. MALALASEKERA, W. **Na Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**, 2ª ed. New York: Prendice Hall, 2007. 503 p.

possuem malhas mais finas e por outro lado áreas que não variam significativamente possuem uma malha mais grossa. Sendo assim, mais de 50% do tempo gasto em projetos de CFD são dedicados à composição da geometria e na definição da malha.

O *solver* é o elemento responsável pelo processamento das informações inseridas durante a etapa de pré-processamento. Sendo a técnica mais empregada pelos códigos CFD é a dos volumes finitos. As principais etapas são compostas por (VERSTEEG E MALALASEKERA⁶ APUD ZANNUTO 2015):

- Integração das equações de governança do fluido ao longo de todos os volumes de controle do domínio;
- Discretização, ou seja, conversão das equações em um sistema de equações algébricas;
- Solução do sistema de equações algébricas pelo meio de um método iterativo.

A primeira etapa consiste na integração das equações, é a parte que distingue o método dos volumes finitos de todos os outros métodos empregados pelo CFD, como o método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos (VERSTEEG E MALALASEKERA⁶ APUD ZANNUTO 2015). Uma grande vantagem de se utilizar o método dos volumes finitos é sua capacidade de manter o caráter físico de cada termo nas equações discretas, possibilitando maior robustez ao método (MALISKA⁷ APUD ZANNUTO 2015).

O pós-processamento é a etapa do código CFD responsável pela apresentação dos resultados oriundos da simulação. As etapas que constituem estes elementos são (VERSTEEG E MALALASEKERA⁶ APUD ZANNUTO, 2015):

- Visualização da malha e do domínio geométrico;
- Gráficos de vetores;
- Gráficos de linhas e contornos;
- Gráficos de superfície em 2D e 3D;
- Trajetórias de partículas;

⁶ VERSTEEG, H. K. MALALASEKERA, W. **Na Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**, 2ª ed. New York: Prendice Hall, 2007. 503 p.

⁷ MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**, 2ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2004. 453 p.

- Manipulação gráfica (tradução e rotação);
- Animações.

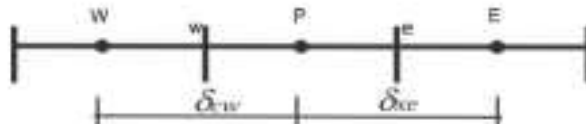
3.2 Conceitos básicos sobre o método dos volumes finitos

Segundo Gonçalves (2007), o conceito chave durante toda a formulação de volumes finitos é o princípio de conservação de uma determinada quantidade física expressa por equações que as governam atuando em qualquer volume finito, também chamado de volume de controle. Volumes cujas dimensões podem ser irregulares no tamanho ou na forma.

No centroide do volume de controle é armazenada uma variável ϕ , as equações discretizadas da variável dependente ϕ são obtidas integrando a equação governativa sobre cada um dos volumes de controle no domínio. Este processo de discretização torna-se mais conveniente levando em conta o fato de que todas as equações governativas possuem uma forma em comum que é a forma da equação geral do transporte (GONÇALVES 2007).

O método utiliza a equação diferencial na sua forma integral e para isso, torna-se necessário a discretização do domínio do problema a ser estudado. Então divide-se o problema em um número finito e contínuo de volumes de controle. Aplicando em cada um destes a equação de conservação. Tem-se na **figura 7** a representação de um volume finito típico para o caso unidirecional, onde os índices maiúsculos W, P e E representam os volumes internos enquanto os índices minúsculos w, e representam as faces (RAFAEL E VASCONCELLOS, 2012).

Figura 7: Volume finito típico unidirecional.



Fonte: Retirado de Rafael e Vasconcellos (2012).

As equações que governam o escoamento de fluidos são as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, respectivamente (3.7), (3.8) e (3.9), escritas no sistema cartesiano de coordenadas, seguintes (GONÇALVES 2007):

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(pu_j) = 0, \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(pu_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(pu_ju_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) + S^{u_i}, \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(pT) + \frac{\partial}{\partial x_j}(pu_jT) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x_j}\right) + S^T, \quad (3.9)$$

As equações acima podem ser escritas de uma forma geral para um campo escalar ϕ como uma equação geral de transporte na forma tensorial (GONÇALVES 2007):

$$\frac{\partial}{\partial t}(p\phi) + \frac{\partial}{\partial x_k}(pu_k\phi) = \frac{\partial}{\partial x_k}\left(T \frac{\partial \phi}{\partial x_k}\right) + S_\phi, \quad (3.10)$$

Ou na forma divergente

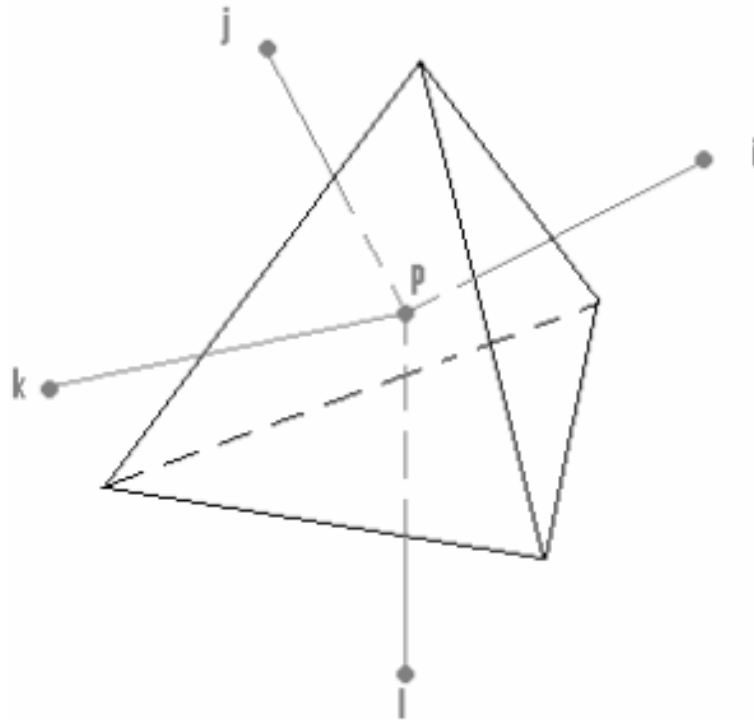
$$\frac{\partial}{\partial t}(p\phi) + \nabla(pu\phi) = \nabla(T\nabla\phi) + S_\phi, \quad (3.11)$$

que no caso particular de problemas estacionários, $\frac{\partial}{\partial t}(p\phi) = 0$, e onde o termo convectivo é nulo, $\nabla(pu\phi) = 0$, fica reduzida a:

$$\nabla(T\nabla\phi) + S_\phi = 0, \quad (3.12)$$

Assume-se que o domínio do problema esteja segmentado num conjunto de volumes de controle e que cada volume esteja conectado por seus centroides através de segmentos de reta, como demonstra a **figura 8** (GONÇALVES 2007):

Figura 8: Volume de controle associado ao vértice p da malha.



Fonte: Retirado de Gonçalves (2007).

As equações discretizadas da variável dependente ϕ são obtidas interagindo a equação governante sobre cada um dos volumes de controle do domínio, portanto a equação (3.12) da origem a uma nova equação por cada vértice p da malha. A definição dos volumes de controle no espaço se dá por meio de Voronoi no plano (GONÇALVES 2007).

3.3 Conceitos básicos sobre o método das diferenças finitas

O método das diferenças finitas consiste em particionar o domínio da função incógnita criando um domínio discreto e substituir as derivadas existentes no problema por aproximações de diferenças. Essas aproximações são determinadas pela expansão de Taylor. Assim, chega-se em equações discretizadas que podem ser utilizadas em programas computacionais (SOUSA, 2009).

O princípio fundamental do método das diferenças finitas (MDF) é aproximar através de expressões algébricas cada termo do modelo matemático em cada nó de malha. O modelo matemático representa o fenômeno físico para o qual se deseja solução. Este modelo é formado pelas equações governantes do problema, podendo

ser uma única equação ou por um sistema de equações diferenciais (Marchi e Schneider 2002).

Para aplicar o método primeiramente se divide a função em linhas paralelas aos dois eixos do plano sendo que as mesmas devem estar igualmente espaçadas. Este processo recebe o nome de discretização, ele possibilita que um problema contínuo seja aproximado por um discreto em dimensão finita (SOUSA 2009).

O próximo passo consiste na discretização das derivadas, ou seja, em aproximar as derivadas parciais que fazem parte da equação diferencial através das diferenças entre os nós da malha formada (SOUSA 2009).

3.4 Conceitos básicos sobre o método dos elementos finitos

A ideia principal do método dos elementos finitos é discretizar o domínio da função incógnita, representando-a ainda que de forma aproximada, por uma reunião de um número finito de elementos, e resolver não o problema original, mas sim um que lhe é associado – sua forma fraca. No caso de um domínio plano os elementos podem ser triângulos ou quadriláteros (GIACCHINI, 2012).

O método dos elementos finitos (MEF) tem como um dos objetivos a determinação de um estado de tensão e deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores. A formulação do MEF requer a existência de uma equação integral, de modo que seja possível substituir o integral sobre um domínio complexo (de volume V) por um somatório de integrais estendidos a subdomínios de geometria simples (de volume V_i). Essa técnica é ilustrada por meio da equação (3.13), que corresponde a integral de volume de uma função f (AZEVEDO 2003):

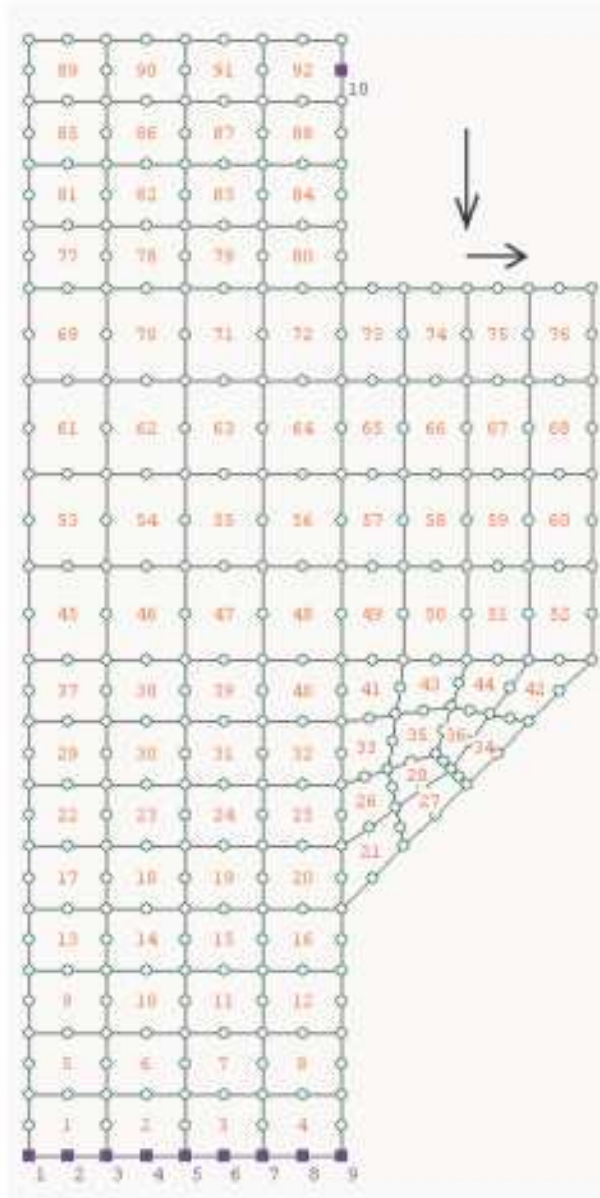
$$\int_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV. \quad (3.13)$$

Ao contrário de todos os métodos de cálculos estruturais utilizados no passado, na maioria das vezes o MEF tem utilidade prática se dispuser de um computador. Esse requisito é necessário devido a grande quantidade de cálculos que se devem realizar. Assim compreende-se o rápido desenvolvimento do MEF

tenha coincido com a generalização da utilização de computadores nos centros de investigação (AZEVEDO 2003).

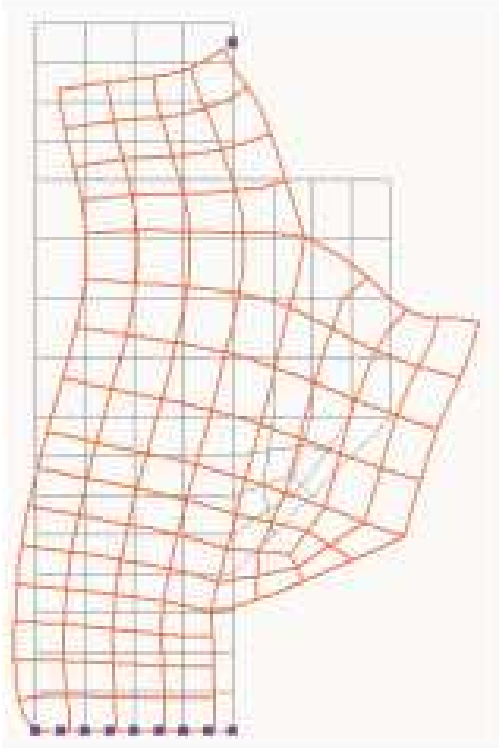
Na **figura 9, 10, 11, 12, 13** tem-se o exemplo de um consolo curto submetido a um esforço horizontal e um vertical, em que se foi analisado sua distribuição de tensões por meio do MEF.

Figura 9: Consolo curto: malha de elementos finitos e ação exterior.



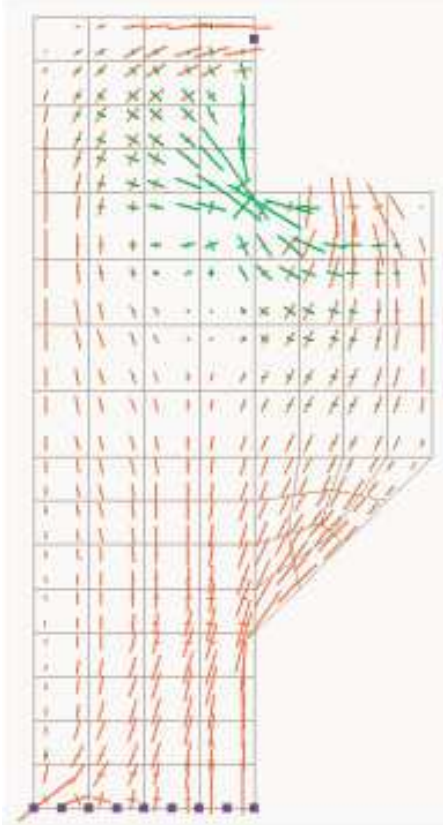
Fonte: Retirado de Azevedo (2003).

Figura 10: Consolo curto: malha deformada representada sobre estrutura indeformada.



Fonte: Retirado de Azavedo (2003).

Figura 11: Tensões principais e respectivas direções.



Fonte: Retirado de Azavedo (2003).

4 PARÂMETROS PARA O DIMENSIONAMENTO DE *BLAST WALLS*.

Neste capítulo, é subdividido o conceito da explosão em três partes, a primeira será o estudo da explosão propriamente dita, conceito de ondas de pressão e ondas de choque, o motivo da explosão ser um fenômeno temido e demais conceitos.

Na segunda parte aprofundam-se os efeitos da onda de choque impactando em superfícies, observam-se as fases negativas e positivas das mesmas e ainda se estudam as sobrepressões e os impulsos derivados dessas ondas.

Por fim, observam-se os principais parâmetros para o dimensionamento de *Blast Walls*, quais métodos que autores renomados utilizaram e as técnicas que podemos adotar no design desta essencial peça.

4.1 Estudo sobre o fenômeno da explosão

Segundo Gebbeken, Greulich e Pietzsch⁸ apud Bueno (2018), em casos que envolvem explosões, leva-se em conta que explosivos são capazes de exercer uma grande e repentina pressão em seu entorno, também uma rápida transformação de substâncias que estão no entorno em gases superaquecidos.

Explosões são fenômenos que tem como característica principal uma liberação repentina de energia podendo causar significativos desastres. Quando ocorrem em céu aberto causam grandes deslocamentos de gases, além de impor mudanças bruscas na temperatura e pressão e podem ser classificadas de acordo com sua natureza em três tipos (NETO 2015):

- Explosões mecânicas: são caracterizadas por uma liberação repentina de energia devido a grandes diferenciais de pressão como, por exemplo, a que ocorre quando acontece a ruptura de um recipiente de gases comprimidos;
- Explosões químicas: oriundas das reações físico-químicas de combustão nas quais a liberação súbita de energia é proveniente de

⁸ GEBBEKEN, N., GREULICH, S., & PIETZSCH, A. (2003). **Interaction of local and global structural behavior of buildings under catastrophic loadings**. In *Proceedings* Response of structures to extreme loading (p. 8). Toronto.

uma velocidade de reação extremamente alta e liberando como produto altas pressões e elevações bruscas de temperatura são geradas;

- Explosões nucleares: são geradas a partir dos processos de fissão e fusão nuclear, onde são responsáveis pela criação de partículas α e β além de raios X e gamma. São responsáveis por liberações de grandes quantidades de energia calorífica e de radiação, além de serem responsáveis por ondas de choque extremamente poderosas.

A magnitude de uma explosão é determinada conforme a quantidade de energia liberada e normalmente em medida é Joules (J). Em estudos envolvendo energia de explosões, devido a quantidade de experimentos e dados coletados envolvendo explosivos é aceitável utilizar-se de uma medida equivalente de TNT. Ele relaciona as mais variadas substâncias explosivas com o TNT que é mais fácil a produção e utilização em ensaios. A unidade kilotons é equivalente a 10^3 toneladas de TNT enquanto a megatons 10^6 . Na **tabela 5** se encontra as equivalências de TNT e alguns explosivos:

Tabela 5: Relação de alguns explosivos e sua referência em TNT.

Explosivo	TNT Factor
TNT	1
C4	1,18
Pólvora	0,55
Nitroglicerina	1,50
RDX	1,60

Fonte: Retirado de Usmani⁹ apud Neto (2015).

Os efeitos sofridos em um determinado local estão relacionados a dois principais fatores, são eles a quantidade de explosivos e a distancia deste ao local considerado. Significa que, quanto maior for a distancia do epicentro ao ponto de análise, menores serão os efeitos destrutivos da explosão (NETO, 2015).

⁹ USMANI, ZEESHAN-UL-HASSAN.2012. **Explosions Modeling – A Tutorial**. Autumn Simulation Multi- Conference, The society for Modeling & simulation International.

Para explosivos químicos foram desenvolvidos uma série de leis de escala que relacionam parâmetros básicos de uma explosão. Uma delas é a distância Z que foi obtida por Hopkinson apud Neto (2015). A expressão é representada pela equação (4.1).

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}, \quad (4.1)$$

onde :

Z: distância em escala;

R: distancia do epicentro até o ponto de referência;

W: massa de explosivo (TNT) ou energia de explosão.

Alguns estudos utilizando a distancia em escala Z apresentada na equação (4.1) conseguiram estimar valores de sobrepressões ao ar livre e que Neto e Doz (2017) comprovaram que estas estimativas estão bem proximas da realidade comparando-as com a fluidodinâmica computacional. Na **tabela 6** pode se observar estas expressões.

Segundo Bangash e Bangash (2006), o governo de Israel compilou um banco de dados desde 1968 chamado de ODS (Observed Damage to Structures). O ODS incluiu mais de 25000 eventos registrados no mundo, este banco de dados classificou as ocorrencias em categorias conforme a massa de TNT utilizada na explosão são essas:

- Pequena explosão: até 5 kg de TNT;
- Média explosão: até 20 kg de TNT;
- Grande explosão: até 100 kg de TNT;
- Imensa explosão: até 2000 kg de TNT.

O fenômeno mais destrutivo quando ocorre uma explosão é a *Blast Wave* (onda de explosão), que se trata de uma perturbação de pressão que é irradiada para longe da origem da explosão. Essa perturbação é devida a rápida expansão do material energetico contido no epicentro da explosão. Essa onda pode viajar a velocidade supersônica e ser considerada uma onda de choque (*shock wave*) ou

sônica e ser uma onda de pressão (*pressure wave*), sendo que a magnitude desta onda varia conforme a natureza da liberação e da distancia do epicentro (ASCE¹⁰ apud BUENO, 2018).

Tabela 6: Formulações sobre predições das sobrepressões de onda de choque ao ar livre.

Autor	Fórmulas de predição	Requisito	Unidade
Brode	$\Delta P = \frac{6,7}{Z^3} + 1$	$\Delta P > 10$	Bar
	$\Delta P = \frac{0,975}{Z} + \frac{1,455}{Z^2} + \frac{5,85}{Z^3} - 0,019$	$0,1 < \Delta P < 10$	Bar
Henrych	$\Delta P = \frac{14,072}{Z} + \frac{5,540}{Z^2} - \frac{0,357}{Z^3} + \frac{0,00625}{Z^4}$	$0,05 \leq Z \leq 0,3$	Bar
	$\Delta P = \frac{6,194}{Z} - \frac{0,326}{Z^2} + \frac{2,132}{Z^3}$	$0,3 \leq Z \leq 1$	Bar
	$\Delta P = \frac{0,662}{Z} + \frac{4,05}{Z^2} + \frac{3,288}{Z^3}$	$1 \leq Z \leq 10,$	Bar
Mill	$\Delta P = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z}$	-	kPa
Kinney	$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{z}{4,5} \right)^2 \right]}{\sqrt[2]{1 + \left(\frac{z}{0,048} \right)^2} \sqrt[2]{1 + \left(\frac{z}{0,32} \right)^2} \sqrt[2]{1 + \left(\frac{z}{1,35} \right)^2}}$	-	-
Newmark	$\Delta P = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \left(\frac{W}{R^3} \right)^{\frac{1}{2}}$	-	Bar

Fonte: Retirado de Smith e Hetherington¹¹; Moon¹²; Ngo et al¹³; Kinney e Graham¹⁴ apud Neto e Doz (2017).

As *Pressure Waves* são ondas de pressão que possuem menor amplitude e viajam abaixo da velocidade do som, são caracterizadas por um aumento gradual de pressão e um decaimento muito lento da mesma. Enquanto que as *Shock Waves* são ondas de alta pressão que viajam pelo ar ou por outros meios com uma velocidade supersônica. São caracterizadas por um aumento instantâneo de pressão seguido de um rápido decaimento (BUENO, 2018).

¹⁰ ASCE (Ed.). (2010). **Design of blast-resistant buildings in petrochemical facilities** (2nd ed.). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

¹¹ SMITH, P. D., HETHERINGTON, J. G. 1994. **Blast and Ballistic Loading of Structures**, Butterworth-Heinemann, Oxford.

¹² MOON, N. N. 2009. **Prediction of Blast Loading and Its Impact on Buildings**, Tese de Mestrado, Department of civil engineering, National Institute of Technology, Rourkela.

¹³ NGO, T., MENDIS, P., GUPTA, A., RAMSAY, J. 2007. **Blast Loading and Blast Effects on Structures**, Electronic Journal of Structural Engineering, 76-91.

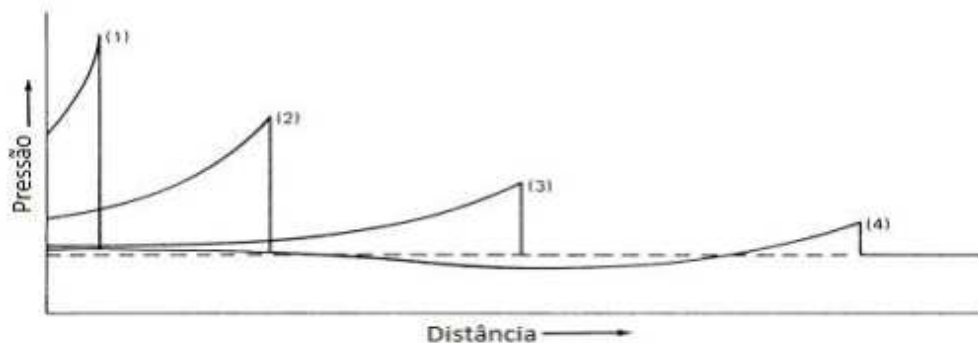
¹⁴ KINNEY, G. F., GRAHAM, K. J. 1985. **Explosive shocks in air**, Springer Science+Business Media, Second Edition, New York.

4.2 Efeitos da onda de choque

Os primeiros instantes após a detonação de um explosivo ao ar livre são caracterizados por um incremento brusco na temperatura e na pressão na região próxima ao epicentro da detonação. A energia liberada pela explosão passa a se propagar pelo ar, de forma radial, pela onda de choque gerada (NETO, 2015).

Durante a propagação da onda de choque pelo ar, partes dessa energia vão sendo perdidas ao longo da distância percorrida. Esse fenômeno pode ser mensurado pela redução expressiva das ações conforme o incremento das distancias. Esse fenômeno pode ser observado na **figura 14**, nela as indicações (1), (2), (3), (4) apontam uma redução de pressão conforme a distancia. Observam-se também que com o aumento da distancia surge-se uma fase de pressão de sucção (NETO, 2015).

Figura 14: Curva típica de pressão x distância de uma explosão.

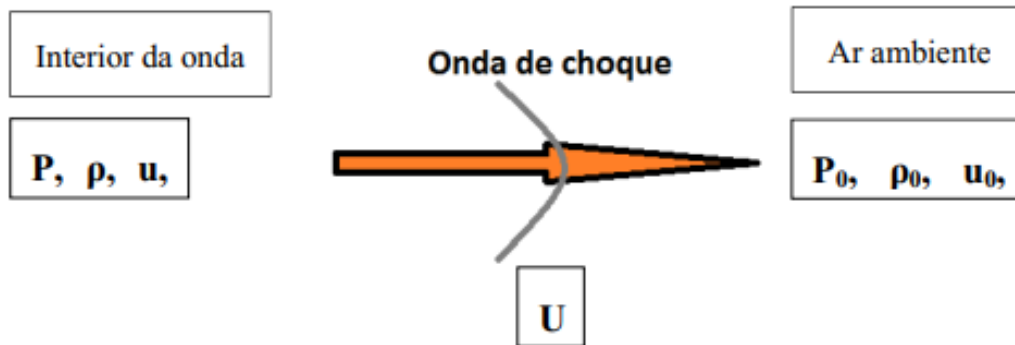


Fonte: Retirado de Kinney e Graham¹⁵ apud Neto (2015).

Segundo Neto (2015), a descrição de parâmetros básicos de uma onda de choque, pode ser desenvolvido tomando como base equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, definidas por Rankine-Hugoniot, representado na **figura 15**, e nas equações de conservação de massa (4.2), conservação de quantidade de movimento (4.3), equação de estado (4.4) e de conservação de energia (4.5).

¹⁵ KINNEY, G. F., GRAHAM, K. J. 1985. **Explosive shocks in air**, Springer Science+Business Media, Second Edition, New York.

Figura 15: Esquema das propriedades de uma onda de choque em movimento.



Fonte: Retirado de Graham¹⁶ apud Neto (2015).

$$\rho(U - u) = \rho_0 U, \quad (4.1)$$

$$P - P_0 = \rho_0 U u, \quad (4.2)$$

$$P = (\Upsilon - 1)\rho E, \quad (4.3)$$

$$E - E_0 = \frac{1}{2}(P + P_0)\left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho}\right). \quad (4.4)$$

onde:

P: é a pressão;

ρ : é a massa específica do gás;

u: é a velocidade do material;

U: é a velocidade de deslocamento da onda de choque;

E: é a energia;

Υ : é a razão entre o calor específico do gás a uma pressão constante e o calor específico do gás a um volume constante, as literaturas costumam adotar o valor de 1,4.

Utilizando a razão entre calores específicos Υ , e associando as relações de Rankine-Hugoniot é possível definir basicamente qualquer parâmetro da onda, por exemplo, sua massa específica, na equação (4.6) (NETO, 2015):

¹⁶ GRAHAM, R. A. 2010. *Shock Wave and High Pressure Phenomena*, Springer-Verlag, Berlin.

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{2\gamma + (\gamma + 1)\frac{\Delta P}{P_0}}{2\gamma + (\gamma - 1)\frac{\Delta P}{P_0}}, \quad (4.5)$$

Para se definir a velocidade da onda, equação (4.7), pode-se combinar (4.2), (4.3) e (4.6):

$$U = C_0 \sqrt{1 + \frac{(\gamma + 1)\Delta P}{2\gamma P_0}}, \quad (4.6)$$

Sendo:

U: Velocidade da onda de choque;

C_0 : Velocidade do som.

A partir disso pode se definir também a velocidade das partículas que se encontram atrás da onda de choque, tomando a equação (4.3) e aplicando nela (4.7) obtendo a equação (4.8) (NETO, 2015):

$$u = \frac{\Delta P}{\gamma P_0} \frac{C_0}{\sqrt{1 + \frac{(\gamma + 1)\Delta P}{2\gamma P_0}}}, \quad (4.7)$$

Sendo:

u: é a velocidade das partículas.

Pode-se também obter a pressão dinâmica do vento (q) que é causada pela agitação das moléculas de gás resultando em seu deslocamento, utilizando a equação (4.9), obtem-se a (4.10) (NETO, 2015):

$$q = \frac{1}{2} \rho u^2, \quad (4.8)$$

$$q = \frac{\Delta P^2}{2P_0\gamma + (\gamma - 1)\Delta P}, \quad (4.9)$$

Também se desenvolveu uma expressão que representa a sobrepressão refletida que se encontra com uma superfície sólida, representada na equação (4.11) (NETO 2015):

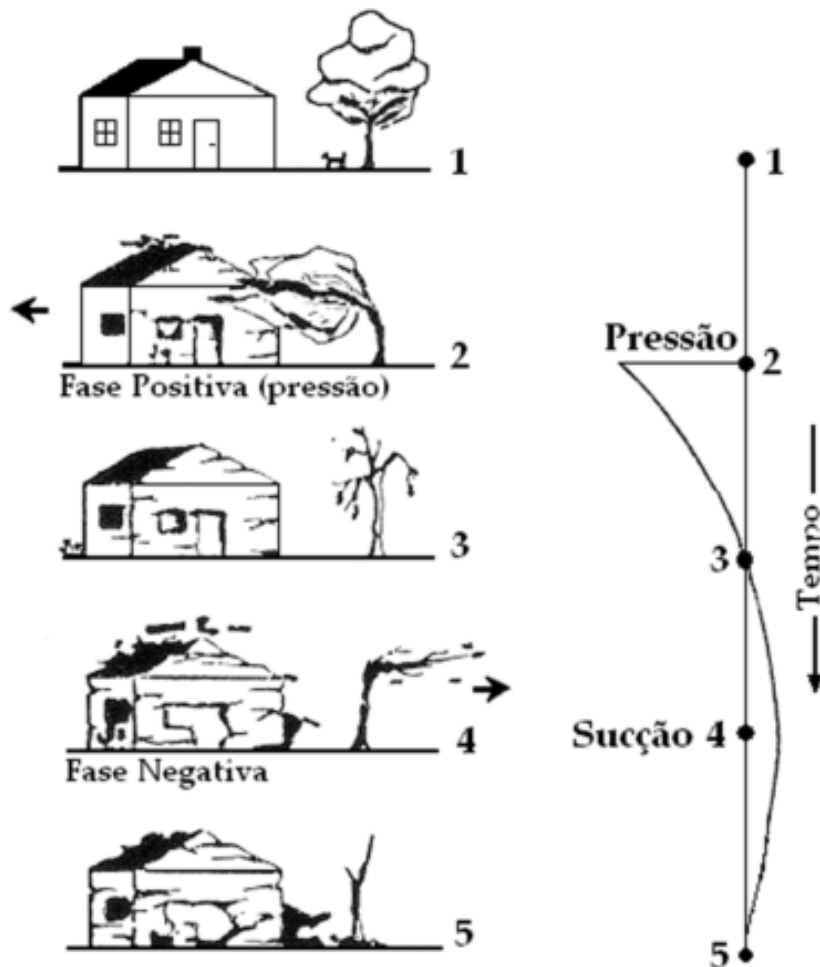
$$\Delta P_r = 2\Delta P \left(\frac{7 + 4 \frac{\Delta P}{P_0}}{7 + \frac{\Delta P}{P_0}} \right), \quad (4.10)$$

Ao observar a equação (4.11), para qualquer valor de pressão ambiente (P_0) e por consequência o valor da pressão incidente (ΔP), o valor da pressão refletida (ΔP_r) sempre será maior do que aquela que atingiu a superfície. Este é um fenômeno importante característico das ondas de choque.

4.3 Incidência de ondas de choque em superfícies

Podem-se observar na **figura 16** o gráfico de pressão em função do tempo para uma onda de choque. Com esse gráfico se pode observar parâmetros importantes, como: tempo de chegada, tempo de duração, sobrepressão máxima, fase positiva, fase negativa dentre outros (NETO, 2015; BUENO, 2018).

Figura 16: Variação de fases de uma explosão e seus efeitos ao longo do tempo.



Fonte: Retirado de White¹⁷ apud Bueno (2018).

O tempo de chegada define o tempo decorrido do início da explosão até que a onda de choque atinja o alvo. Na **figura 16** representada pelo intervalo entre o tempo 1 e o tempo 2 (NETO, 2015; BUENO, 2018).

Já o tempo de duração positivo representa os momentos em que se tem uma sobrepressão atuando sobre o ponto. Segundo a **figura 16** este tempo está representado entre o tempo 2 e o tempo 3 (NETO, 2015; BUENO, 2018).

Por fim o tempo de duração negativo representa os momentos em que se tem uma sucção atuando sobre o alvo. Segundo a **figura 16** este efeito está representado entre o tempo 3 e o tempo 5. Se pode observar também que no tempo 4 se tem o valor máximo de sucção no alvo (NETO, 2015; BUENO, 2018).

¹⁷ WHITE, G. (1997). **Nuclear, Biological, and Chemical (NBC) Reconnaissance and Contamination Avoidance**. Marine Corps Institute. Washington, DC.

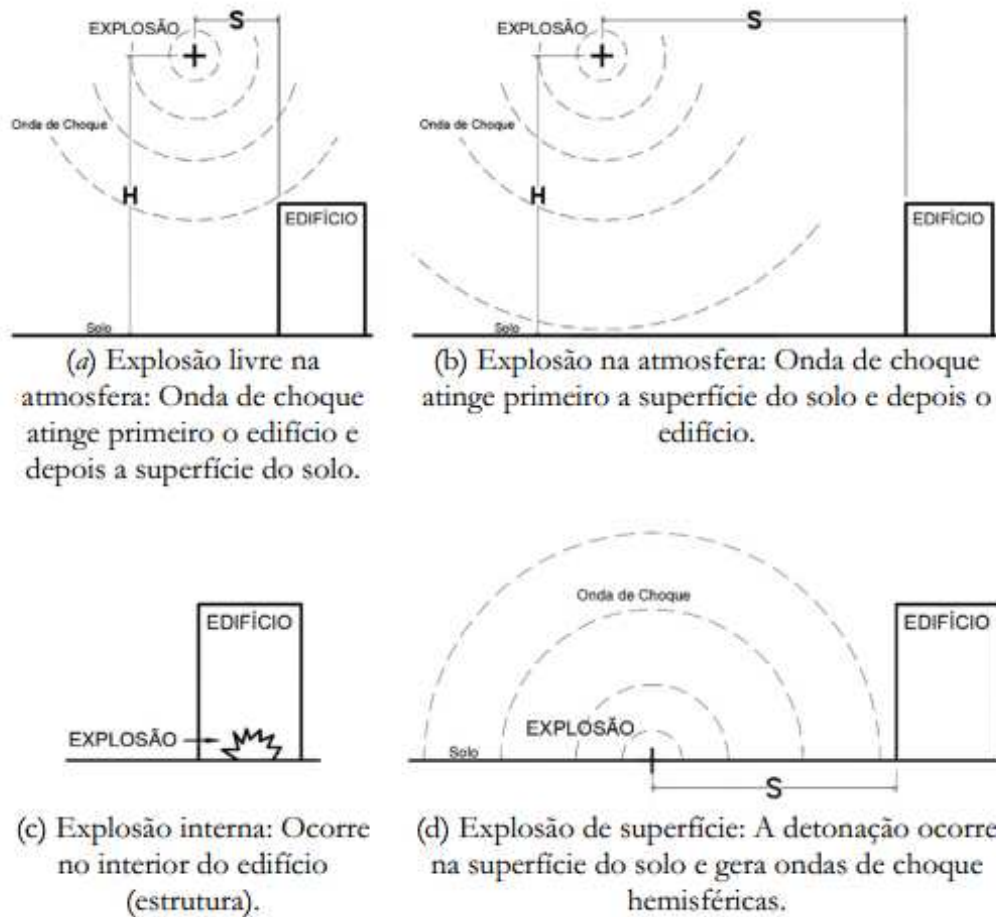
Segundo Bueno (2018), a duração do pulso negativo é muito maior que a duração do pulso positivo, porém possui uma intensidade muito menor. Durante a fase positiva as partículas se afastam do epicentro da explosão, enquanto na fase negativa as mesmas se aproximam. Este fluxo de partículas de ar causa uma pressão análoga à pressão do vento e é referida como pressão dinâmica. Esta pressão é menor em magnitude do que a onda de choque ou de pressão e transmite um esforço de arrasto, semelhante a do vento.

Segundo Bangash e Bangash (2006), a área integrada abaixo da curva da fase positiva e da fase negativa representa, respectivamente, o impulso positivo e o impulso negativo. O impulso representa a energia cinética que incide na superfície em análise. Além da sobrepressão que incide na superfície, possui também esta energia cinética, este é o principal ponto que se difere dos efeitos de um vento forte.

As explosões podem ser classificadas conforme a altura H onde está localizado seu epicentro, tomando como referencia um alvo ao qual se deseja analisar os efeitos do fenômeno. São classificadas em quatro categorias que podem ser observados na **figura 17** (KARLOS e SOLOMON¹⁸ apud BUENO, 2018).

¹⁸ KARLOS, V., & SOLOMON, G. (2013). **Calculation of blast loads for application to structural components**. Report EUR 26456 EN. <https://doi.org/10.2788/61866>

Figura 17: Tipos básicos de explosão.



Fonte: Retirado de Bueno (2018).

A Explosão Livre na Atmosfera (*Free-Air Bursts*) ocorre a uma altura H do solo. As ondas se propagam de maneira esférica e atingem o alvo que no caso da imagem é um edifício antes de entrar em contato com o solo, este fenômeno pode ser observado na **figura 17(a)**. Uma vez que a detonação é realizada a certa distancia do solo, não há pressão refletida e o carregamento no edifício é devido à pressão incidente e à pressão dinâmica da onda (DOE/TIC 1268¹⁹; TM-5-1300²⁰; UFC 3-340-02²¹ apud BUENO, 2018).

A Explosão na Atmosfera (*Air Bursts*) ocorre a uma altura H do solo, tem como característica uma onda de explosão que se propaga de maneira esférica e entra em contato primeiramente com o solo e após com o alvo, que no caso é um

¹⁹ DOE/TIC 11268. (1981). **A Manual for the prediction of blast and fragment loading on structures**. U.S. Department of Energy Manual. Amarillo, Texas: U.S. Department of Energy Manual.

²⁰ TM-5-1300. (1990). **Structure to resist the effects of accidental explosions**. Army Manual. Departments of the Army; the Navy; and the Air Force.

²¹ UFC 3-340-02. (2008). **Structures to resist the effects of accidental explosions**. U.S. Army Corps of Engineers; Naval Facilities Engineering Command; Air Force Civil Engineer Support Agency.

edifício, como pode ser observado na **figura 17(b)**. Devido ao fato da onda atingir primeiro o solo, uma nova onda é formada, a qual denomina-se *Mach Wave* (KARLOS & SOLOMON²²; TM-5-1300²³ apud BUENO, 2018).

A Explosão Interna (*Confined Explosion*) é quando ocorre uma explosão dentro de uma estrutura, como se apresenta na **figura 17(c)**. Devido à inúmeras superfícies refletoras no interior da estrutura, a pressão incidente sofrerá um grande efeito de ampliação das ondas. Quanto mais aberturas a estrutura tiver menores serão os danos (JANNEY²⁴; TM-5-1300²³ apud BUENO, 2018).

A Explosão de Superfície (*Surface Bursts*) ocorre quando um explosivo é detonado na superfície do solo ou próximo a ele, como mostrado na **figura 17(d)**. Imediatamente após a explosão a onda interage localmente com o solo e se propaga de maneira hemisférica até atingir o edifício. A onda principal se fundirá com a onda incidente do solo criando uma região *Mach* muito próxima ao local de detonação (BUENO, 2018).

Segundo Neto (2015), quando uma onda de choque encontra uma superfície sólida ou um obstáculo que possui um meio mais denso que aquele que a mesma se desloca, este obstáculo oferecerá resistência e a onda de choque será refletida. Este fenômeno é bastante complexo e para facilitar o entendimento as reflexões são divididas em três tipos:

- Reflexão Normal;
- Reflexão Oblíqua;
- Reflexão Mach.

A reflexão normal ocorre quando a superfície da onda de choque é paralela a superfície analisada, ou seja, se trata de um choque frontal com a superfície, este tipo de reflexão pode ser calculada por meio da equação (4.10) de Rankine-Hugoniot, considerando que na atmosfera a razão γ possui o valor de 1,4 (NETO, 2015).

²² KARLOS, V., & SOLOMON, G. (2013). **Calculation of blast loads for application to structural components**. Report EUR 26456 EN. <https://doi.org/10.2788/61866>

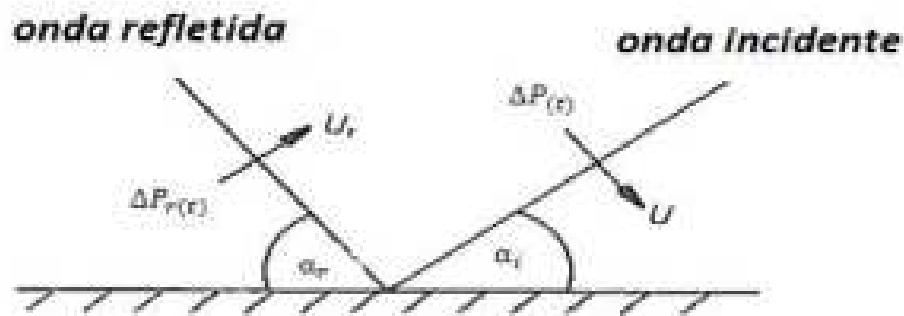
²³ TM-5-1300. (1990). **Structure to resist the effects of accidental explosions**. Army Manual. Departments of the Army; the Navy; and the Air Force.

²⁴ JANNEY, S. B. (2007). **Blast resistant design of steel structures**. University of Tennessee.

Observando a equação (4.10), nota-se que sempre a pressão da onda refletida será maior que a onda incidente, visto que a onda incidente se move em condições naturais do ambiente, por sua vez a onda refletida se move-se em um ambiente alterado com temperatura e pressão propício ao seu movimento.

A reflexão oblíqua tem o comportamento semelhante às normais, o que implica em coeficientes de reflexão similares. Porém quando uma onda de choque colide em uma superfície com um certo ângulo de incidência (α_i), o vetor de velocidade da onda faz um ângulo não nulo com a superfície. A onda refletida faz um ângulo (α_r), como representado na **figura 18** (NETO, 2015).

Figura 18: Interação de uma onda de choque atingindo uma superfície obliquamente.



Fonte: Retirado de Mays²⁵ apud Neto (2015).

Situações em que o ângulo de incidência estiver entre 0° e aproximadamente 40°, surge-se a reflexão *Mach* que deixa o problema mais complexo, esta reflexão faz com que gere ondas *Mach* (NETO, 2015).

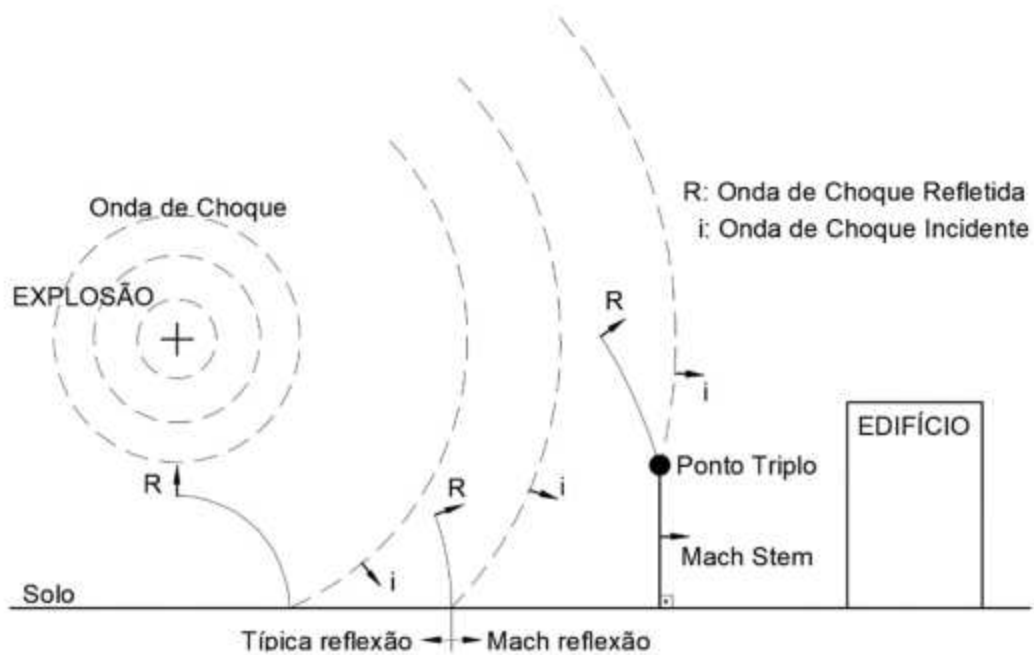
O efeito *Mach* pode ser explicado da seguinte forma: após a explosão cujo epicentro esteja em um ponto acima da superfície, formam-se duas ondas, a onda incidente e logo após a onda refletida. Devido ao fato da onda incidente ter aquecido o caminho a onda refletida sempre irá se propagar com uma velocidade superior. Em determinado ponto as duas se encontram, e por consequência se fundindo formando a *Mach Wave*, sendo o ponto que as duas ondas se fundem chamado de ponto triplo (*triple point*). A **figura 19** demonstra este fenômeno (KOCMAZ, SUTCU E TORUNBALCI²⁶, KARLOS e SOLOMON²⁷ apud BUENO, 2018).

²⁵ MAYS, G. C., SMITH, P. D. 1995. **Blast effects on buildings**. Thomas Telford, London.

²⁶ KOCMAZ, Z., SUTCU, F., & TORUNBALCI, N. (2008). **Architectural and structural design for blast resistant buildings**. In The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing - China.

²⁷ KARLOS, V., & SOLOMON, G. (2013). **Calculation of blast loads for application to structural components**. Report EUR 26456 EN. <https://doi.org/10.2788/61866>

Figura 19: Explosão na atmosfera - Efeito *Mach*.



Fonte: Retirado de Bueno (2018).

O efeito destrutivo das ondas *Mach* é superior ao das ondas incidentes, por esse motivo são executadas simulações cujos epicentros das explosões estejam um pouco elevado do solo, de modo a estimar a situação mais destrutiva (NETO, 2015).

4.4 Dimensionamento de *Blast walls*

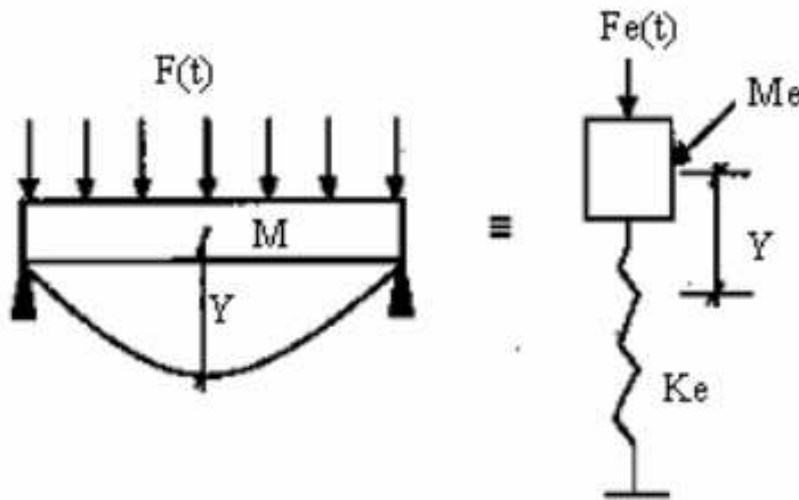
Um dos elementos estruturais cuja função é mitigar os efeitos de uma explosão é denominada barreira de proteção à explosão, também conhecido como *Blast Wall*. Trata-se de uma barreira física que separa um bem valioso de uma carga explosiva. Sua estrutura provável se caracteriza por um porte bastante robusto e maciço, porém também se encontram estudos com configurações diferentes (SMITH²⁸ apud BUENO, 2018).

De modo geral o projeto dos *Blast Walls* pode ser realizado tanto pelo modelo dinâmico de um grau de liberdade (SDOF), ou por meio de técnicas numéricas avançadas, como o método dos elementos finitos não-linear (NLFEA), o projeto com o método SDOF é normalmente utilizados em indústrias *offshore* para prever

²⁸ SMITH, P. D., HETHERINGTON, J. G. 1994. **Blast and Ballistic Loading of Structures**, Butterworth-Heinemann, Oxford.

respostas estruturais dinâmicas. Se trata de uma abordagem simples que idealiza a estrutura real como um modelo de massa-mola, e é portanto muito útil em procedimentos de projetos de rotina que podem obter resultados precisos em estruturas simples submetidas a uma deformação limitada, na **figura 20** pode-se observar o princípio do modelo SDOF. Por outro lado, o modelo NLFEA fornece uma análise detalhada do *Blast Wall* e é capaz de gerar um melhor quadro geral em termos das respostas do mesmo, como fambagem ou efeito de membrana, como estilhaços de material que irão se desprender do estrutura, características que não podem ser analisados pelo sistema SDOF (LOUCA e BOH, 2004).

Figura 20: Modelo massa-mola equivalente utilizado pelo modelo SDOF.



Fonte: Retirado de Louca e Boh (2004).

O NLFEA é provavelmente o método mais preciso para explicar os efeitos da onda de choque em uma estrutura, em essência o método discretiza uma estrutura contínua em um número de elementos que podem ser representados pela equação (4.12) que representa o deslocamento de cada partícula (LOUCA e BOH, 2004).

$$x = \sum_{i=1}^n N_i x_i, \quad (4.11)$$

Onde N_i é a função de interpolação, x_i o grau de liberdade nodal e n o número de graus de liberdade sendo considerados. Algumas das principais vantagens do método dos elementos finitos em relação a outros métodos, como o método de Rayleigh-Ritz, são que as funções de interpolações são relativamente

simples e as formulações em um programa de computador podem ser relativamente fáceis, como programas que envolvem fluidodinâmica computacional (LOUCA E BOH, 2004).

Alguns trabalhos desenvolveram fórmulas numéricas para quantificar a mitigação dos efeitos de uma explosão, segundo Zhou e Hao²⁹ apud Bueno (2018), podem-se utilizar as equações (4.13) e (4.14) para essa quantificação considerando que o material utilizado seja rígido.

$$AF_{P_{\max,rigid}} = -0,1359 + \left[0,3272 + 0,1995 \log\left(\frac{H}{S}\right) \right] \log\left(\frac{S}{W^{1/3}}\right) - 0,5626 \log\left(\frac{H}{S}\right) + 0,4666 \left(\frac{L}{S}\right), \quad (4.12)$$

$$AF_{I_{\max,rigid}} = 0,0274 + \left[0,4146 + 0,2393 \log\left(\frac{H}{S}\right) \right] \log\left(\frac{S}{W^{1/3}}\right) - 0,5044 \log\left(\frac{H}{S}\right) + 0,2538 \left(\frac{L}{S}\right). \quad (4.13)$$

Sendo:

$AF_{P_{\max,rigid}}$: o fator de ajustamento para a pressão máxima refletida para a barreira rígida (adimensional);

$AF_{I_{\max,rigid}}$: o fator de ajustamento para impulso máximo refletido para uma barreira rígida (adimensional);

S: distância entre o centro da carga do explosivo e o ponto alvo (m);

L: distância entre o centro da carga do explosivo e a barreira (m);

H: altura da barreira de proteção (m);

W: carga explosiva equivalente em TNT (kg).

Podem-se analisar os efeitos de mitigação em barreiras flexíveis utilizando fatores de efetividade conforme mostrado nas equações (4.15), (4.16) e na **tabela 7** (SCHULDT E EL-RAYES³⁰ apud BUENO, 2018).

$$AF_{P_{\max,Frangible}} = AF_{P_{\max,rigid}} \times EF_P, \quad (4.14)$$

²⁹ ZHOU, X. Q., & HAO, H. (2008). **Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier**. International Journal of Impact Engineering, 35(5), 363–375. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.03.003>

³⁰ SCHULDT, S., & EL-RAYES, K. (2017). **Quantifying Blast Effects on Constructed Facilities behind Blast Walls**. Journal of Performance of Constructed Facilities 31(4), 4017027-1–14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001015](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001015)

$$AF_{I_{\max, Frangible}} = AF_{I_{\max, rigid}} \times EF_I, \quad (4.15)$$

Tabela 7: Fator de efetividade para barreiras flexíveis.

Barreira		Fator de Efetividade	
Material	Espessura [m]	(EF_P)	(EF_I)
Madeira de Balsa (<i>Ochroma Pyramidale</i>) – Espessa	0.08	0.70	1.06
Madeira de Balsa (<i>Ochroma Pyramidale</i>) – Fina	0.02	1.33	1.33
Gelo – Parede Espessa	0.6	0.80	0.86
Gelo – Parede Fina	0.3	0.97	0.93
Poliestireno	0.05	0.78	1.01
Folha de polietileno	< 0.01	1.26	1.29
Areia – Parede Espessa	1.5	0.74	0.64
Areia – Parede Média	1.0	0.82	0.71
Areia – Parede Fina	0.5	0.86	0.78
Aço	0.2	1	1
Água – com sacos	0.1	0.71	0.91
Água – Preenchida	0.6	0.81	0.84

Fonte: Retirado de Rose, Smith e Mays³¹; Bogosian e Piepenburg³²; Schuldt e El-Rayes³³ apud Bueno (2018).

A estimativa da pressão e do impulso que atingirão a estrutura que se deseja obter se tem através da multiplicação dos valores da pressão máxima e do impulso máximo com os valores obtidos nas equações (4.12) e (4.13) se as mesmas forem barreiras rígidas ou pelos valores obtidos nas equações (4.14) e (4.15) se as barreiras forem flexíveis (BUENO, 2018).

³¹ ROSE, T. A., SMITH, P. D., & MAYS, G. C. (1997). **Design Charts Relating To Protection of Structures Against Airblast From High Explosives**. *Proceedings of the ICE - Structures and Buildings*, 122(2), 186–192. <https://doi.org/10.1680/istbu.1997.29307>

³² BOGOSIAN, D., & PIEPENBURG, D. (2002). **Effectiveness of frangible barriers for blast shielding**. In 17th International Symposium on the Military Aspects of Blast and Shock (p. 39). Las Vegas.

³³ SCHULDT, S., & EL-RAYES, K. (2017). **Quantifying Blast Effects on Constructed Facilities behind Blast Walls**. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 31(4), 4017027-1–14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001015](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001015)

5 MÉTODO E MATERIAIS

Para a metodologia da proteção contra explosão de transformadores a pesquisa foi dividida basicamente em duas fases, a primeira uma fase de coleta de dados descrita no item 5.1 e uma fase de simulação computacional descrita no item 5.2.

De acordo com Fregoneze et. al (2014) e com os objetivos propostos, este trabalho se trata de uma pesquisa de estudo de caso e exploratória. Pois, a proposta trata-se de uma análise aprofundada, exaustiva e detalhada que não busca generalizações e só tem validade para o universo a ser estudado.

Também a pesquisa exploratória tem como principais finalidades desenvolver, esclarecer e modificar conceitos elaborando problemas próximos a realidade para pesquisas posteriores, este tipo de pesquisa é recomendado quando o tema não foi muito abordado, que se enquadra no caso das estruturas de proteção contra explosões de transformadores (FREGONEZE et al., 2014).

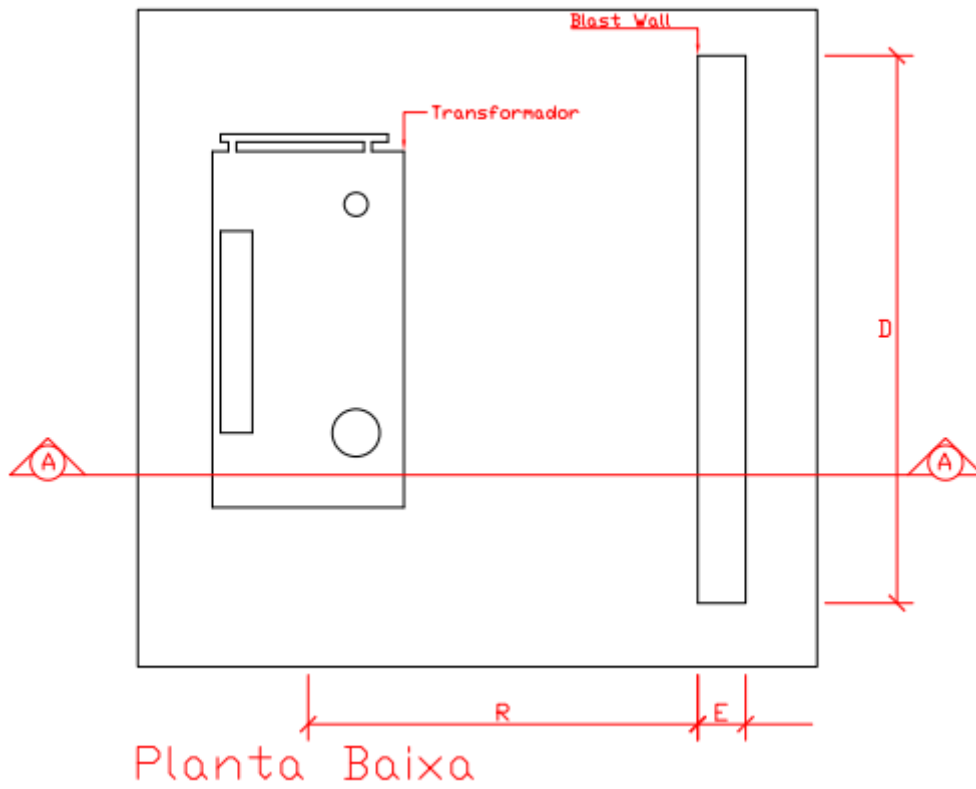
5.1 Fase de Identificação do Problema

O estudo de caso consistiu em idealizar uma situação hipotética realística do ambiente de uma casa de máquinas onde está localizado o transformador de potência com isolamento em óleo mineral. Neste modelo necessita-se dos seguintes dados:

- Distância entre o centroide do transformador e a face interna do *Blast Wall*;
- As três dimensões do *Blast Wall*;
- Potência do transformador;
- Volume de óleo nele contido.

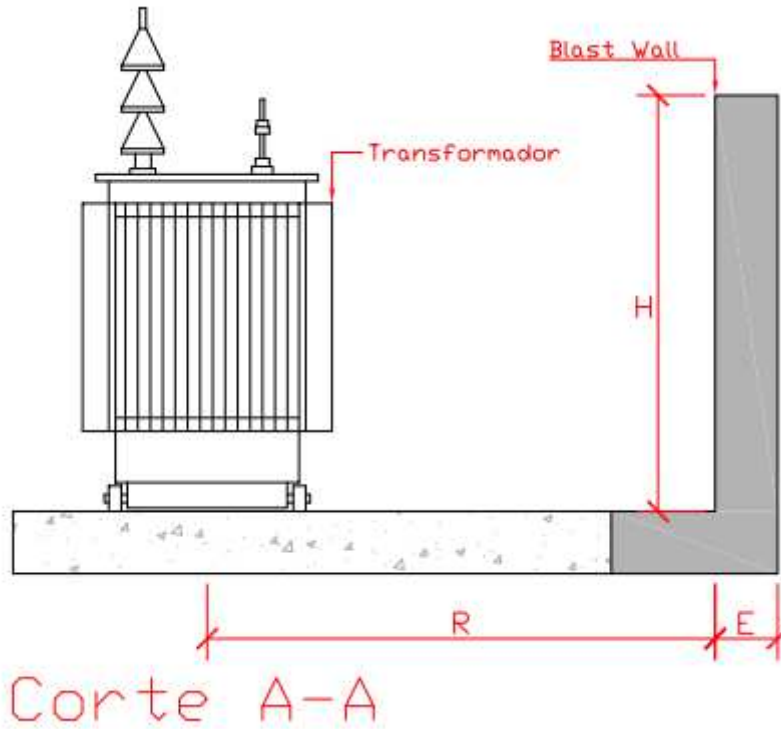
Nas **figuras 21 e 22** está representado a disposição do componente elétrico e do componente estrutural que será encontrado na sala de máquinas.

Figura 21: Representação da disposição do sistema de proteção em planta baixa.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 22: Representação da disposição do sistema de proteção em corte.



Fonte: Autoria própria (2019).

Sendo R a distância entre o centroide do transformador e a face de contato da parede antibomba, E, K e D a espessura, altura e largura da mesma respectivamente.

O modelo de transformador adotado foi um modelo de médio porte indicado para subestações, as dimensões H e D serão adotadas conforme as dimensões da face do transformador que estiver mais próxima do muro.

Determinados estes dados de entrada, se dá início a fase de análise computacional e modelagem estrutural.

5.2 Simulação Computacional

Tendo em mãos os dados adquiridos no problema hipotético, foi realizada a simulação computacional de uma situação hipotética de explosão do transformador. As análises foram realizadas utilizando o software ANSYS Autodyn, versão estudantil.

Na simulação foi o ponto de análise onde se deseja medir a sobrepressão na superfície do *blast wall*, o transformador com determinada potência foi substituído por uma carga de TNT equivalente, esta foi determinada segundo bibliografias como Pontes (2001). Outros critérios foram definidos conforme trabalhos já realizados de investigações semelhantes feitas com análise de efeitos de explosões como os de Neto (2015), Bueno (2018) e Luccioni e Ambrosini (2005).

Seguindo a ideia de Pontes (2001), foi determinada a carga de TNT equivalente se utilizando de três dados, o calor específico da TNT, o calor específico do óleo mineral isolante do transformador e o peso deste óleo contido no mesmo, utilizando a equação (5.1):

$$w_{tnt} = w_{oleo} * \frac{c_{oleo}}{c_{tnt}} \quad (5.1)$$

sendo:

w_{tnt} , a carga de TNT em kg;

w_{oleo} , massa do óleo mineral em kg;

c_{oleo} , calor específico do óleo;

c_{tnt} , calor específico da TNT.

Utilizar-se-á de uma malha de processamento de 100 mm pois conforme estudos de Luccioni e Ambrosini (2005) essa malha fornece uma solução precisa em casos de estudos de explosão, o ar envolto a simulação será considerado um gás ideal, e ainda as características dos materiais que são utilizados nas simulações serão os padronizados pelo software.

Nas **tabelas 8, 9, 10 e 11** descrevem as características de alguns dos materiais que serão utilizados.

Tabela 8: Características do ar.

Ar	
Equação de Estado	Gás ideal
Y (Razão entre o calor específico a pressão constante e o calor específico a um volume constante)	1,40
Massa específica de referência	0,001204 g/cm ³
Temperatura de referência	293,2 K
Calor específico - Cv	717,6 J/kgK

Fonte: Retirado de Neto (2015).

Tabela 9: Características da TNT.

TNT	
Equação de Estado	JWL
Massa específica	1,63 g/cm ³
C_1	373770 MPa
C_2	3747,1 MPa
r_1	4,15
r_2	0,9
Ω	0,35
Velocidade de detonação	6930 m/s
Energia	6000 MJ/m ³
Pressão	21000 MPa

Fonte: Retirado de Neto (2015).

Tabela 10: Características termodinâmicas do óleo mineral.

T (K)	ρ (g/cm ³)	C_p (kJ/kg.K)	μ (kg/s.m)	K (W/m.K)
260	0,908	1,76	12,23	0,149
280	0,896	1,83	2,17	0,146
300	0,884	1,91	0,486	0,144
320	0,872	1,99	0,141	0,141
340	0,860	2,08	0,053	0,139
360	0,848	2,16	0,025	0,137
380	0,836	2,25	0,014	0,136
400	0,824	2,34	0,009	0,134

Fonte: Prass (2013).

O epicentro da explosão se coincidiu com o centroide da massa de TNT. No programa para se medir sobrepressões, deve-se adicionar sensores nos pontos das

peças em que se deseja esses determinados dados. Portanto nestas simulações serão adicionados sensores no ponto do *Blast Wall* que esteja mais próximo da explosão.

Após a determinação da sobrepressão máxima incidente sobre o blast wall, foi simulado que a mesma pressão será incidente sobre o corpo inteiro na forma de uma carga distribuída, após fez-se a modelagem estrutural do muro para determinar máximo momento e máxima cortante característica que estará localizada na base da estrutura.

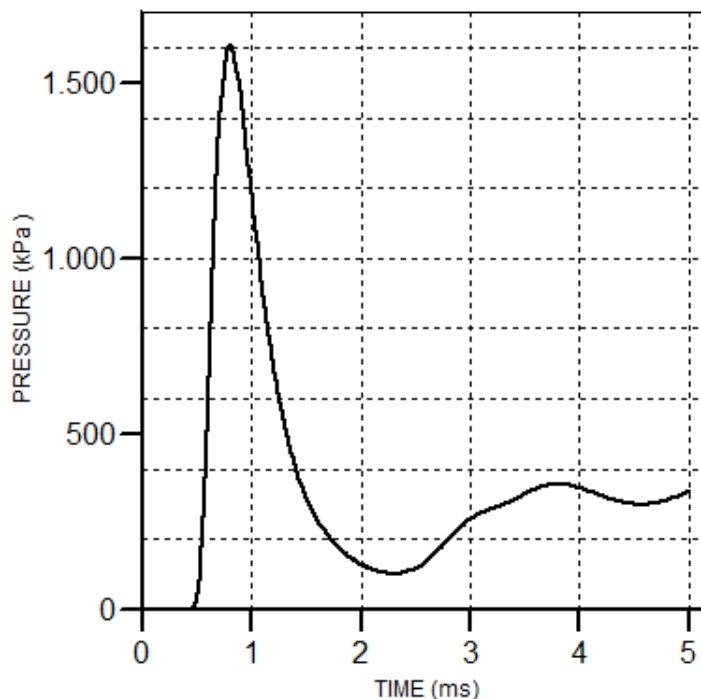
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Validação computacional

Para que haja a comprovação que há relativa coerência em simulações com a ferramenta Autodyn, foi refeita uma simulação realizada por Neto (2015). Nesta, foi simulado uma explosão derivada de uma carga de TNT de 6,8 kg, foi posicionado um sensor localizado a 1,5 metros de distância do epicentro da mesma. Desconsiderando reflexões de ondas de choque e com uma pressão inicial de 1 atm Neto (2015) constatou uma pressão máxima de 1580 kPa.

Após realizado a mesma simulação verificou-se o seguinte resultado apresentado na **figura 23**:

Figura 23: Simulação teste.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Verificou-se que aos 0,8 milissegundos obteve uma pressão máxima de 1606 kPa, bem próximo do resultado obtido por Neto (2015), portanto se confirma que a utilização da ferramenta Autodyn obteve resultados compatíveis.

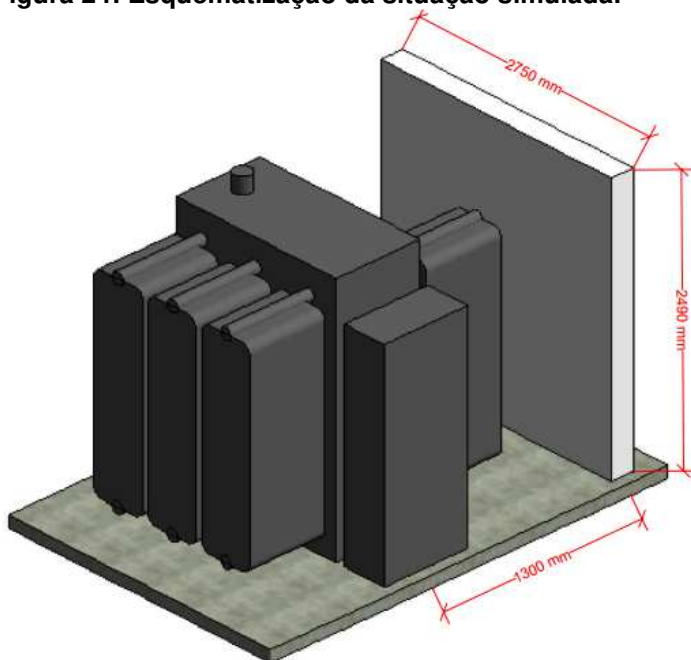
6.2 Idealização Hipotética

O modelo de transformador escolhido foi o de distribuição tipo subestação com a potência de 5 mVA da fabricante ABB transformadores, segundo seu catálogo o mesmo possui uma massa de 2000 kilogramas de óleo mineral. O dispositivo possui dimensões de 2750 milímetros de comprimento, 1550 milímetros de largura e 2490 milímetros de altura.

Para a determinação da distância entre o centroide do transformador e a face interna do muro utilizou-se a distância hipotética de 1,30 metros, que é o resultado do centroide da largura do dispositivo acrescido de 50 centímetros tal valor adicionado para facilitar a movimentação de funcionários caso haja a necessidade de alguma manutenção.

A altura e comprimento do muro são equivalentes ao comprimento e a altura do transformador, portanto seus dados respectivamente serão 2750 milímetros e 2490 milímetros, adotou-se também uma espessura hipotética de 20 cm, este valor adotado como espessura fictícia podendo ser alterado em um possível dimensionamento. Na **figura 24** retrata a situação que será simulada.

Figura 24: Esquemática da situação simulada.



Fonte: Autoria própria (2019).

6.3 Simulação Computacional

Antes que haja a simulação de fato deve-se calcular a carga de TNT equivalente para o transformador adotado para a simulação. Este se dá através da equação (5.1), adotando o calor específico do TNT igual a 4,55 mJ/kg.K e o calor específico do óleo mineral isolante de aproximadamente 1,91 kJ/kg.K, considerando a temperatura ambiente de 300 K que equivale a 26,85 graus celsius:

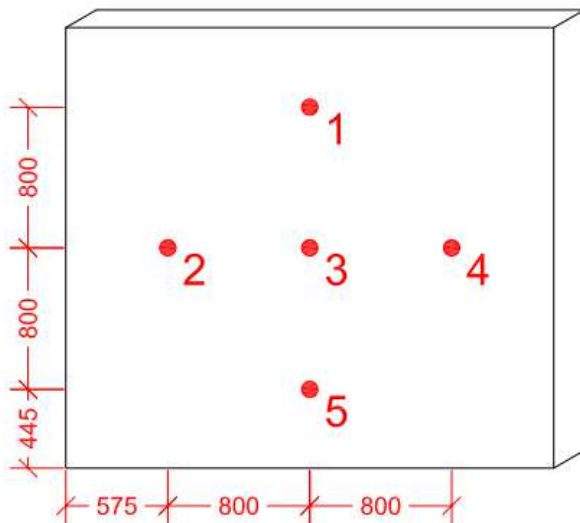
$$w_{tnt} = w_{oleo} * \frac{c_{oleo}}{c_{tnt}} \quad (5.1)$$

$$w_{tnt} = 2000 * \frac{1,91}{4550} = 0,84 \text{ kg}$$

Portanto, quando um transformador com a potência 5 mVA entra em curto e explode seu colapso equivale ao de 840 gramas de TNT, isto considerando que toda a energia contida no transformador seja liberada.

Determinou-se também o posicionamento dos sensores de pressão, estes auxiliam na medição da pressão em relação ao tempo, foi posicionado 5 sensores com suas posições demonstradas na **figura 25**.

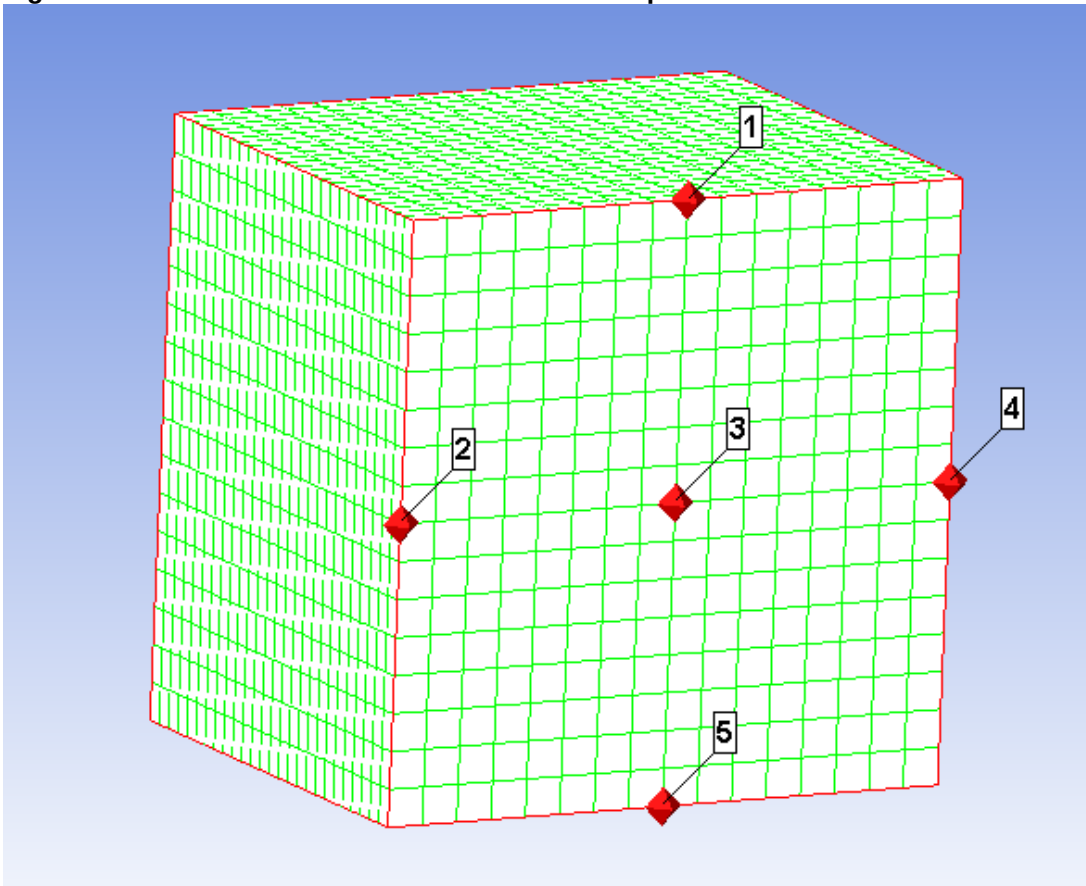
Figura 25: Disposição de sensores no *Blast Wall*.



Fonte: Autoria própria (2019).

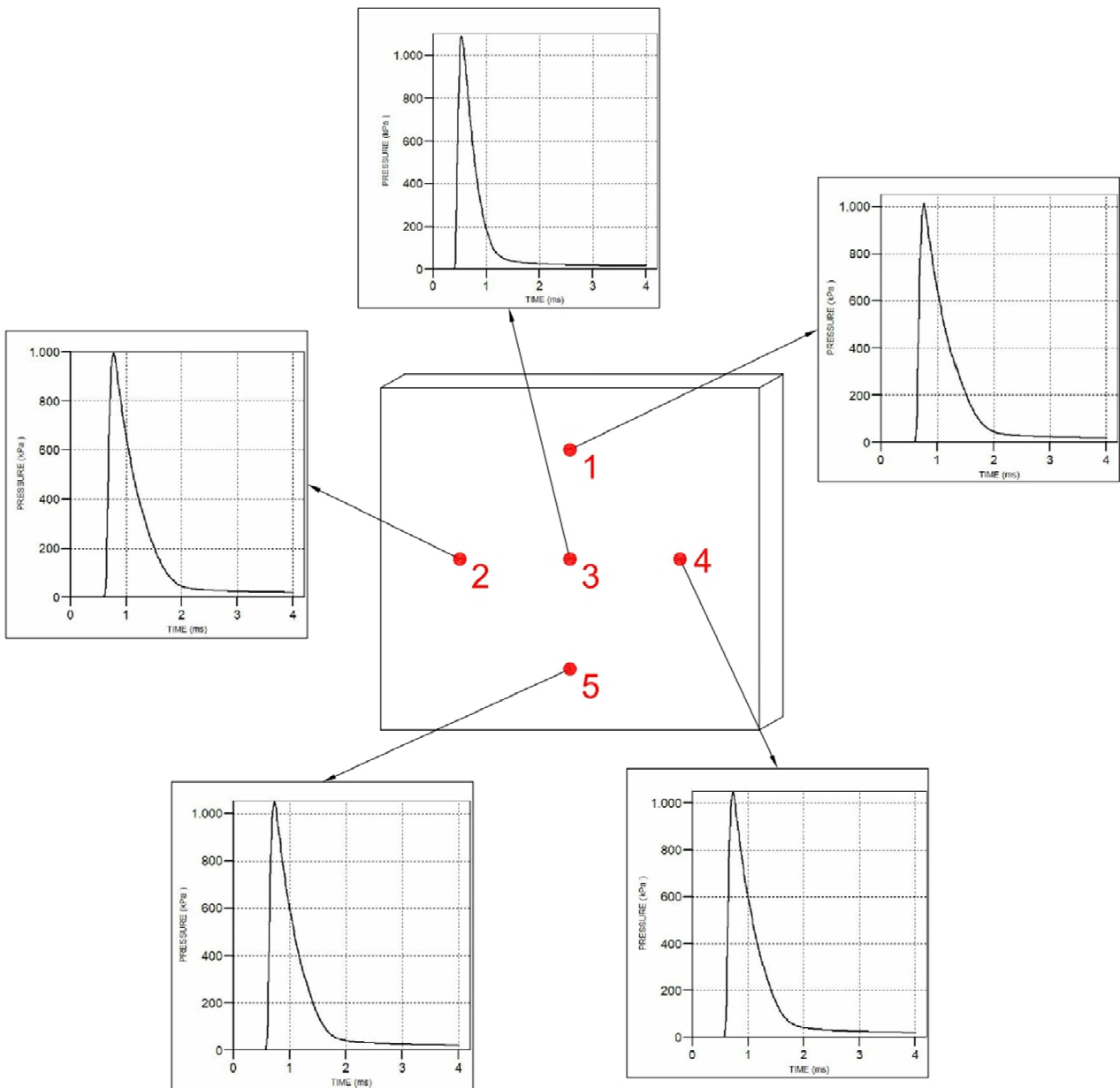
Nas simulações de explosões, utilizando o Autodyn, foi escolhida a malha Eulliriana 3D para materiais distintos com o tamanho do elemento discretizado de 10 cm, valor sugerido e adotado em algumas bibliografias como Luccioni e Ambrosini (2005). Para as condições iniciais, a temperatura foi considerada de 300 kelvin e a pressão inicial de 1 atm. Na **figura 26** pode-se observar a discretização dos elementos e na **figura 27** pode-se observar os resultados de sobrepressões em cada um dos sensores:

Figura 26: Massa de ar discretizada com sensores posicionados.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 27: Gráfico Pressão x Tempo de cada sensor.



Fonte: Autoria própria (2019).

Analisando a imagem acima observa-se que primeiramente que os cinco sensores possuem sobrepensões máxima bem próximas entre si, isso se dá pela pouca diferença de distância que os mesmos estão do epicentro da explosão. O formato dos gráficos tem essa configuração pois quando há o fenômeno da explosão a onda de choque demora alguns milissegundos para entrar em contato com o alvo, imediatamente quando entra ocorre uma sobrepensão brusca, após este início a

sobrecarga irá se decair exponencialmente até que a pressão no ponto de análise retorne ao valor da atmosférica.

Outro fato que se observa é a sobrepressão do sensor 3 ser a maior, isto é explicado por sua distância do epicentro da explosão ser o menor entre os sensores, se traçarmos uma reta entre o epicentro da explosão e o terceiro sensor esta reta será perpendicular ao plano da superfície do *blast wall*.

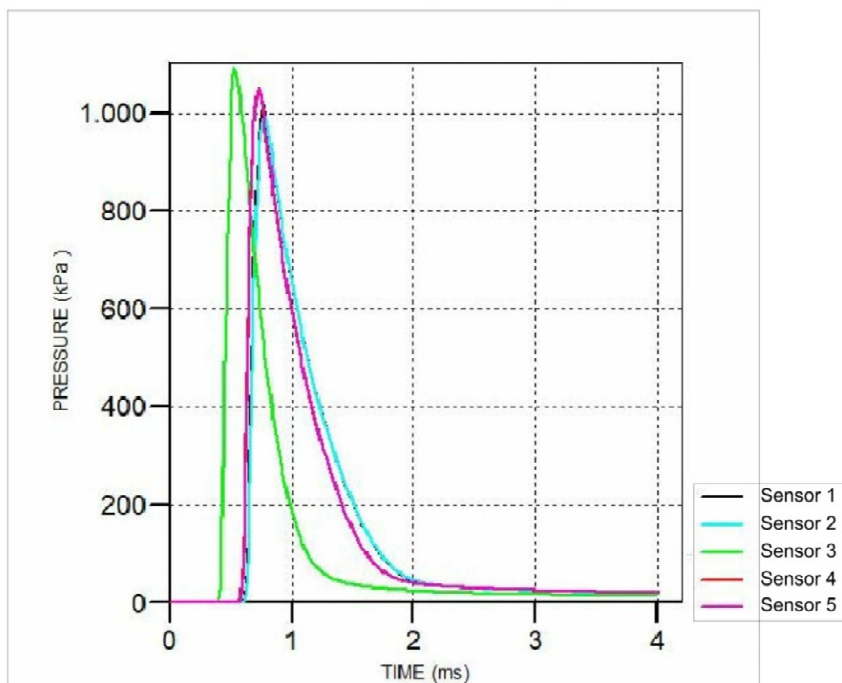
A seguir observam-se na **tabela 11** e **figura 27** os resultados de todos os sensores comparados entre si.

Tabela 11: Resultados medidos pelos sensores.

Sensor	Tempo de Chegada (ms)	Sobrepressão (kPa)
1	0,77309	1013,60
2	0,78252	992,83
3	0,53063	1088,60
4	0,73594	1048,70
5	0,73590	1047,10

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 28: Sobreposição dos gráficos Pressão x Tempo dos sensores.



Fonte: Autoria própria (2019).

Ao analisar os dados acima nota-se que a onda de choque entrou em contato primeiramente com o sensor 3, vê-se anteriormente que este obteve a maior

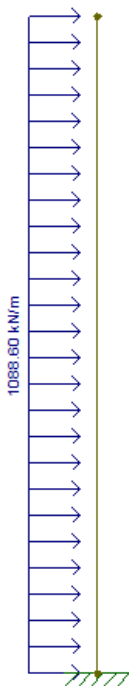
sobrepressão dos cinco, com estas duas informações pode-se chegar a conclusão que se a onda de choque estiver correndo livre, ou seja, não entrando em contato com nenhuma superfície, o poder de destruição da mesma é inversamente proporcional a sua distância percorrida.

6.4 Determinação dos Esforços Característicos

Após determinar os efeitos de onda de choque em diversos pontos deve-se estudar também o comportamento da estrutura quando solicitada a esta sobrepressão.

Para realizar este estudo simularemos no programa FTOOL, um programa de análise estrutura e dimensionamento baseado no método dos elementos finitos. A simulação consistiu em modelar um elemento unidimensional que representa a parede, nesta aplicou-se um esforço de superfície no valor da maior sobrepressão registrado pelos sensores, no caso a pressão de 1088,60 kPa medido pelo terceiro sensor. Para a estrutura se manter estável a mesma foi engastada em todo o comprimento da base. Assim como sugere a **figura 28**.

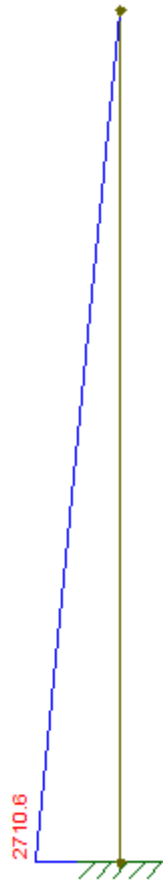
Figura 29: Modelagem estrutural do *blast wall*.



Fonte: Autoria própria (2019).

Ao ser processado este modelo conseguiu-se retirar o máximo momento de tombamento e o máximo esforço cortante que atuam no muro. Para a análise estática, desconsiderou-se o comportamento do material, pois o objetivo era obter apenas os esforços. Nas **figuras 29 e 30** apresentam-se os diagramas de esforços atuantes.

Figura 30: Diagrama de esforço cortante atuante na parede (kN).



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 31: Diagrama de momento fletor atuante na parede (kN*m).



Fonte: Autoria própria (2019).

Como esperado, as maiores intensidades de cortante e momento estão localizados na base da peça, ou seja, no seu engaste, a partir destes valores tanto se faz a verificação de uma estrutura já existente que apresente as mesmas características como também o dimensionamento da peça escolhendo determinados materiais e adotando os coeficientes de cálculo mais apropriados para esta situação sabendo que se tratam de esforços instantâneos e que a probabilidade de acontecer é relativamente baixa. Deve-se notar que, pelo fato de os esforços serem bem maiores no engaste, recomenda-se uma maior atenção na ancoragem da peça, pois em caso de explosões pode-se afetar também a estrutura em que o muro está ancorado.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho, para o melhor entendimento sobre a explosão de transformadores e seus efeitos em barreiras de proteção, foram realizados estudos sobre a mecânica das estruturas submetidos a ondas de choque. Além disso, foram consultadas bibliografias sobre simulações de explosões via fluidodinâmica computacional, além de artigos publicados com estatísticas de explosões de transformadores e custos (prejuízos) relacionados aos acidentes.

Também foi trabalhada uma melhor explicação sobre os programas de fluidodinâmica computacional, os métodos numéricos que ele utiliza e suas limitações. Ao simular via CFD uma explosão o programa utiliza o método dos elementos finitos, das diferenças finitas e dos volumes finitos, e quanto menor for a partícula de processamento mais parecido com a realidade a simulação será.

Pôde-se observar com este conteúdo o quão complexo é prever os efeitos de uma explosão incidindo em uma superfície devido a intensidade da carga e a velocidade que o fenômeno acontece.

Nota-se também que explosões de transformadores não são tão comuns, porém seu potencial destrutivo é bastante alarmante, por este motivo se deve considerar esse efeito em estruturas de hidrelétricas.

Ao se analisar a proposta e os resultados pôde-se verificar a magnitude dos esforços envolvidos atuando em uma pequena estrutura, tais esforços derivados de um transformador de médio porte destinado a subestações.

Contudo, este trabalho buscou auxiliar o estudo da análise estrutural de elementos sujeitos a esforços derivados de explosão, principalmente de transformadores, além de contribuir com o entendimento sobre a magnitude dos estragos causados por ondas de choque.

7.1 Sugestões de temas para futuros trabalhos

Em âmbito nacional, as pesquisas relacionadas com a análise de estruturas submetidas a ondas de choque são praticamente inexistentes. Devido a isso, a seguir são apresentados alguns tópicos importantes a serem investigados em pesquisas futuras, envolvendo análise de elementos submetidos a efeitos de onda de choque:

1. Estudo de estruturas submetidas à explosão de caldeiras por meio da fluidodinâmica computacional;
2. Dimensionamento de barreiras de proteção em concreto armado (e aço) submetidos a ondas de choque;
3. Estudo sobre a efetividade de barreiras de proteção contra explosões à base de sacos de água comparadas com barreiras de proteção em concreto armado;
4. Estudo sobre os efeitos estruturas em ancoragens de barreiras de proteção submetido a esforços derivados de ondas de choque;
5. Estudo sobre a efetividade de barreiras de proteção contra explosões em formato côncavo comparado com barreiras de proteção retas.

Acredita-se que o aprofundamento do tema seja de suma importância para o estudo do comportamento de estruturas submetidas a esforços derivados de ondas de choque.

REFERÊNCIAS

ABDELALIM, Omar. **Blast Hazard Mitigation through Vented Suppressive Shields**. 2013. 230 f. Tese (Doutorado) - Curso de Civil And Environmental Engineering, Civil And Environmental Engineering Department, Ottawa-carleton Institute Of Civil And Environmental Engineering, Ottawa, 2013.

ANSYS, EXPLICIT DYNAMICS. Canonsburg: Ansys Autodyn, 1970.

AZEVEDO, Álvaro F. M.. **MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003. 258 p

BANGASH, M.y.h.. **Shock, Impact and Explosion: Structural Analysis and Design**. London: Springer, 2009.

BANGASH, M.y.h.; BANGASH, T.. **Explosion-Resistant Buildings**. London: Springer, 2006.

BARTLEY, William H.. Analysis of Transformer Failures. **International Association Of Engineering Insurers**, Stockholm, v. 36, n. 1, p.1-12, jun. 2003. Anual.

BERG, H.-p.; FRITZE, N.. RELIABILITY OF MAIN TRANSFORMERS. **Reliability: Theory&applications**, San Diego, v. 2, n. 20, p.52-69, mar. 2011.

BUENO, Jeferson Rafael. **DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES E IMPULSOS DEVIDOS A EXPLOSÕES NÃO CONFINADAS EM EDIFÍCIOS E ELEMENTOS DE PROTEÇÃO À EXPLOSÃO**. 2018. 328 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

COSTA NETO, Murilo Limeira da. **UM ESTUDO DO FENÔMENO EXPLOSÃO E DAS ONDAS DE CHOQUE UTILIZANDO A FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**. 2015. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

COSTA NETO, Murilo Limeira da; DOZ, Graciela. ESTUDO NUMÉRICO DAS PRESSÕES DE ONDA DE CHOQUE EM DIFERENTES MEIOS E SUA

TRANSMISSÃO. **Associação Sul-americana de Engenharia Estrutural**, Passo Fundo, v. 14, n. 2, p.55-76, ago. 2017. Anual.

DUSENBERRY, Donald O.. **HANDBOOK FOR BLAST-RESISTANT DESIGN OF BUILDINGS**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.

EDRI, Idan E.; YANKELEVSKY, David Z.. Analytical model for response of arching masonry walls under blast loading. **International Conference On Protective Structures**, Poznan, v. 1, n. 5, p.122-130, 19 ago. 2018. Anual.

FAIRLIE, G e. The Numerical Simulation of High Explosives using AUTODYN-2D & 3D. **Expo '98, Institute Of Explosive Engineers 4th Biennial Symposium**, -, v. 4, n. 1, p.1-13, set. 1998. Anual.

FREGONEZE, Gisleine Bartolomei et al. **Metodologia científica**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.a., 2014.

GEDEON, P. E. Gilbert. **Planning and Design of Hydro-Electric Power Plants**. Washington: Department Of The Army U.s. Army Corps Of Engineers, 1995

GONÇALVES, Nelson Daniel Ferreira. **Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas**. 2007. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Matemática, Departamento de Matemática Aplicada / Departamento de Matemática Pura, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 2007.

HERCKERT, Matheus Guilherme; S. NETO, Aristeu da. Fluidodinâmica Computacional e Suas Aplicações. **Monografias**. Uberlandia, p. 1-16. fev. 2004. Disponível-em:

<<https://www.monografias.com/pt/trabalhos/fluidodinamica/fluidodinamica.shtml>>.

Acesso em: 18 nov. 2018.

LOMAX, Harvard; PULLIAM, Thomas H.; ZINGG, David W.. **Fundamentals of Computational Fluid Dynamics**. Washington: Nasa Ames Research Center, 1999. 275 p.

LONGINOW, Anatol; MNISZEWSKI, Kim R.. PROTECTING BUILDINGS AGAINST VEHICLE BOMB ATTACKS. **Practice Periodical On Structural Design And Construction**, Washington, v. 1, n. 1, p.51-54, fev. 1996.

LOUCA, L. A.; BOH, J. W.. **Analysis and Design of Profiled Blast Walls**. South Kensington: Health And Safety Executive, 2004.

LUCCIONI, Bibiana; AMBROSINI, Daniel. BLAST LOAD ASSESSMENT USING HYDROCODES. **Congreso Argentino de Mecánica Computacional**, Buenos Aires, v. 8, n. 1, p.329-344, nov. 2005. Anual.

MARCHI, Carlos Henrique; SCHNEIDER, Fábio Alencar. **INTRODUÇÃO À MECÂNICA COMPUTACIONAL**. Curitiba: Ufpr, 2002.

NG, Anthony Kwok-lung. **Risk Assessment of Transformer Fire Protection in a Typical New Zealand High-Rise Building**. 2007. 189 f. Tese (Doutorado) - Curso de Civil Engineering, Department Of Civil Engineering, University Of Canterbury, Christchurch, 2006.

NOGUEIRA, Daniel da Silva; ALVES, Diego Prandino. **Transformadores de Potencia: Teoria e aplicação tópicos essenciais**. 2009. 212 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

PARO, Denise; BUSNARDO, Érica. Explosão em Itaipu deixa seis feridos. **Gazeta do Povo**. Curitiba, p. 1-1. 05 jun. 2006. Disponível em: <<https://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/explosao-em-itaipu-deixa-seis-feridos-a1zu2upwp022cjem4brcade8e>>. Acesso em: 22 ago. 2018.

PONTES, Rosemeri Oliveira. **MODELO MATEMÁTICO PARA EXPLOSÕES EM TRANSFORMADORES**. 2001. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2001.

RAFAEL, Rosane Cordeiro; VASCONCELLOS, João Flávio Vieira de. O MÉTODO DE VOLUMES FINITOS APLICADO EM EQUAÇÕES UNIDIMENSIONAIS. **Congresso de Matemática Aplicada e Computacional**, Macapá, v. 33, n. 1, p.266-269, jun. 2012.

RUSSIA tackles Siberia oil slick: Chemical pollution from Monday's explosion at Russia's largest hydro-electric power station has killed fish and spread down a major Siberian river.. Chemical pollution from Monday's explosion at Russia's largest hydro-electric power station has killed fish and spread down a major Siberian river.. **British Broadcasting Corporation - BBC**. Kiev - Uk, 20 ago. 2009. p. 1-1. Disponível em: <<http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/8209663.stm#up>>. Acesso em: 22 ago. 2018.

SCHREIBER, Gerhard P.. **Usinas Hidrelétricas**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1978.

SOUSA, Nadson de. **Métodos de diferenças finitas: on eitos e interpretações**. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Matemática, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

TRANSFORMER PROTECTOR: The Only Proven Solution Against Transformer Explosions. Texas: Transformer Protector, 2012.

VALTA, Ville. OIL-INSULATED POWER TRANSFORMERS. **If's Risk Management Journal**. Washington, p. 13-15. fev. 2007.

ZANUTTO, Conrado Planas. **APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) NA AVALIAÇÃO DA HIDRODINÂMICA E DA TRANSFERÊNCIA DE MASSA EM ESTÁGIO DE COLUNA DE DESTILAÇÃO**. 2015. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.