

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

FÁTIMA MARIA NOGUEIRA DE SOUZA

**PROPOSTA PARA UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL EM SISTEMA DE GESTÃO, ANÁLISE DE
RISCO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAIS**

RIO DE JANEIRO
2010

FÁTIMA MARIA NOGUEIRA DE SOUZA

Proposta para Utilização da Simulação Computacional em Sistema de
Gestão, Análise de Risco e Avaliação de Desempenho Ambientais

Dissertação de Mestrado Profissional apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Ambiental da Escola Politécnica e da Escola de
Química da Universidade Federal do Rio de
Janeiro, como requisito parcial à obtenção do
título de Mestre em Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Josimar Ribeiro de Almeida
Co-orientadora: Prof^a. Dra. Laís Alencar de Aguiar

Rio de Janeiro
2010

FICHA CATALOGRÁFICA

S729p Souza, Fátima Maria Nogueira
Proposta para utilização da simulação computacional em sistema de gestão, análise de risco e avaliação de desempenho ambientais / Fátima Maria Nogueira de Souza. – 2010.
184 f.: il.; 29 cm.

Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2010.

Orientadores: Josimar Ribeiro de Almeida e Laís Alencar de Aguiar

1. Gestão ambiental. 2. Simulação computacional. 3. Risco
4. Avaliação de desempenho ambiental. I. Almeida, Josimar Ribeiro. II. Aguiar, Laís Alencar de. III. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química.
IV. Título.

CDD: 658.4083

FOLHA DE APROVAÇÃO

FÁTIMA MARIA NOGUEIRA DE SOUZA

PROPOSTA PARA UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM SISTEMA DE GESTÃO, ANÁLISE DE RISCO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAIS

Dissertação de Mestrado Profissional apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Escola Politécnica e da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental

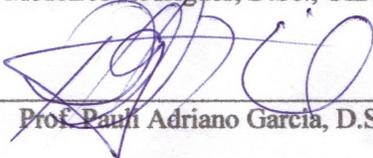
Aprovada em: 16/12/2010



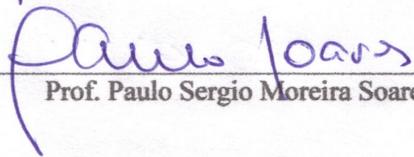
Prof. Josimar Ribeiro de Almeida, D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro



Prof. Fernando Altino Medeiros Rodrigues, D.Sc., Universidade Estadual do Rio de Janeiro



Prof. Paul Adriano Garcia, D.Sc., Universidade Federal Fluminense



Prof. Paulo Sergio Moreira Soares, D.Sc., CETEM/MCT

DEDICATÓRIAS

“Aos meus pais João e Zilda (in memoriam) e aos meus irmãos José Cláudio e Carmen Lúcia que sempre me apoiaram e confiaram em minhas escolhas, pelos ensinamentos, valores e amor que me transmitiram ao longo da vida”

“Ao meu marido Décio que sempre incentivou e apoiou minhas decisões e tem contribuído para minha evolução pessoal e profissional durante nossa feliz e especial união nos últimos 25 anos”

“Às minhas sobrinhas Ana Cláudia, Luiza e Maria Catarina e ao meu afilhado Walter, pelos momentos felizes compartilhados ao longo de nosso convívio”

"Você precisa fazer aquilo que pensa que não é capaz de fazer"
Eleanor Roosevelt

“O Conhecimento está Estruturado na Consciência”
Maharishi Mahesh Yogi

“Ame e Fazes o que Queres”
Santo Agostinho

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela determinação e persistência para vencer desafios e realizar este Mestrado e pela inspiração para desenvolver esta dissertação.

Aos Professores Josimar Ribeiro de Almeida e Laís Alencar de Aguiar pela confiança, orientação dedicada, atenção, paciência, disponibilidade nos atendimentos pessoal e por celular, sugestões para melhoria desta dissertação, materiais fornecidos para pesquisa deste trabalho e ensinamentos acadêmicos transmitidos nas matérias ministradas, as quais eu cursei durante o Mestrado.

À Professora Cláudia Morgado, à quem muito devemos pela maneira como se empenhou para a criação do Mestrado Profissional de Engenharia Ambiental e pelos ensinamentos acadêmicos transmitidos nas matérias ministradas, as quais eu cursei durante o Mestrado.

À Escola Politécnica da UFRJ, pela criação do Mestrado Profissional de Engenharia Ambiental e pela oportunidade de participar no processo de seleção para realização deste Mestrado.

Aos Professores Fernando Altino, Pauli Garcia e Paulo Soares, pela disponibilidade em participarem da Banca e pelas contribuições para a melhoria e enriquecimento deste trabalho.

À CAPES, pela autorização para a concretização deste Mestrado e pelo acompanhamento para a melhoria e continuidade do mesmo.

Ao Professor Assed Haddad pelos materiais disponibilizados para pesquisas desta dissertação e pelos conhecimentos transmitidos nas matérias, as quais eu cursei durante o Mestrado.

A todos os professores do Programa de Engenharia Ambiental pelos ensinamentos acadêmicos transmitidos nas matérias ministradas, as quais eu cursei durante o Mestrado.

À Valéria Vieira e demais funcionários da Secretaria do PEA e Bibliotecas da UFRJ, pela disponibilidade e paciência no atendimento às minhas dúvidas e pelo trabalho que têm realizado.

A todos os colegas das 3 turmas do Mestrado Profissional de Engenharia Ambiental do PEA, em especial à 1ª. turma e ao Grupo NASA pela troca de informações e experiências, pelo incentivo, amizade, ótimos momentos que passamos juntos e contribuições com materiais para a pesquisa e sugestões para este trabalho.

Ao meu marido Décio dos Santos Paiva, pelo apoio, paciência, compreensão e amizade durante toda a realização deste Mestrado.

Aos meus cunhados Lúgia Vidigal e Jorge Schons pelo incentivo constante e Dirceu dos Santos Paiva Filho que colaborou para as pesquisas desta dissertação com o fornecido de seus livros.

A todos aqueles que aqui não foram citados, mas que colaboraram de forma positiva para a realização desta dissertação.

SOUZA, Fátima Maria Nogueira. **Proposta para Utilização da Simulação Computacional em Sistema de Gestão, Análise de Risco e Avaliação de Desempenho Ambientais**. Rio de Janeiro, 2010. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) - Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

RESUMO

Neste trabalho propõe-se a utilização de uma ferramenta de simulação computacional em análise de risco, avaliação de desempenho e melhoria do Sistema de Gestão Ambientais. O processo de simulação computacional consiste na utilização de um programa de CAE (*Computer Aided Engineering*) para elaboração de um modelo matemático de um produto ou processo, execução de cálculos por meio de um método numérico e verificação dos resultados que representam o comportamento do modelo, quando submetido a condições de operação e carregamentos. Os resultados obtidos na análise podem ser utilizados para dimensionar um produto ou um processo, atestar a sua integridade e/ou funcionalidade e verificar os seus limites de carregamento ou de operação. São apresentados os benefícios, vantagens, metodologia, aplicações e resultados das análises estrutural e térmica. O programa realiza análises de integridade estrutural, confiabilidade, vulnerabilidade, causas e conseqüências, as quais podem fornecer dados para as análises qualitativa e quantitativa de risco ambiental. Pode-se efetuar também análises de otimização e melhoria de produtos ou processos que fornecem dados para índices de desempenho ambiental operacionais utilizados na avaliação de desempenho, segundo a Norma ABNT NBR ISO 14031:2004. Os resultados da análise que simula aspectos e impactos ambientais podem ser utilizados na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental, segundo a Norma ABNT NBR ISO 14001:2004. Os estudos de casos apresentados indicam que as hipóteses definidas neste trabalho são corroboradas. Os resultados apresentados mostram que a análise de simulação pode fornecer diagnósticos e valores significativos para complementar o estudo dos processos ambientais da empresa. A ferramenta de simulação computacional pode ser um diferencial para auxiliar a organização a aperfeiçoar seu Sistema de Gestão Ambiental, a prevenir ou mitigar riscos e impactos ambientais e a elaborar produtos e processos com melhor desempenho, maior qualidade e confiabilidade. Conseqüentemente, a empresa poderá reduzir seus custos e se tornar mais competitiva e/ou líder de mercado nos setores nos quais atua.

Palavras-chave: sistema de gestão ambiental, análise de risco ambiental, avaliação de desempenho ambiental, simulação computacional.

SOUZA, Fátima Maria Nogueira. **Proposta para Utilização da Simulação Computacional em Sistema de Gestão, Análise de Risco e Avaliação de Desempenho Ambientais**. Rio de Janeiro, 2010. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) - Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

ABSTRACT

This dissertation aims to propose the use of a computational simulation tool in environmental risk analysis, environmental performance evaluation and environmental management system. The process of computational simulation includes the use of a CAE (*Computer Aided Engineering*) program for developing a mathematical model of a product or process, performing calculations using a numerical method and verifying results that represent the behavior of the model when subjected to operational conditions and loads. Results obtained from the analysis must be verified by a qualified professional, with the objective of evaluating a product or process, assessing its integrity and/or functionality, and verifying their limits for operation or loads. The benefits, advantages, applications and methodology of simulation and results calculated by the program in implementing the structural and thermal analysis are showed in this dissertation. The results of the analyses of structural integrity, reliability, vulnerability, causes and consequences can be used in quantitative and qualitative analyses of environmental risk. The results of analyses that optimize or improve products or processes can be applied to operational environmental performance indicators, according to Norma ABNT NBR ISO 14031:2004. The results of the analyses that simulate environmental aspects and impacts can be used to improve the Environmental Management System, according to ABNT NBR ISO 14001:2004. The case studies presented indicate that the hypotheses defined in this dissertation are corroborated. The results show that simulation analysis can provide diagnostics and meaningful data to complement the study of environmental processes of the company. The tool of computational simulation can be a differential to help the organization to improve its Environmental Management System, to prevent or mitigate environmental risks and impacts, to develop products and processes with better performance, higher quality and reliability. Consequently, the company can reduce its costs and to become more competitive and/or market leader in the industry in which it operates.

Keywords: environmental management system, environmental risk analysis, environmental performance evaluation, computational simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo de Elementos Finitos de uma Plataforma <i>Offshore</i>	27
Figura 3.1 – Árvore de Eventos Genérica	74
Figura 7.1 – Distribuição de Temperaturas (30°C a 1358°C) no Modelo de Elementos Finitos do Piso da Plataforma devido ao Efeito do Incêndio de um Equipamento localizado no Piso da Inferior	126
Figura 7.2 – Modelo de Elementos Finitos da Plataforma utilizado na Análise Estrutural (de tensões) com os Elementos de Viga (rosa claro), de Treliça (rosa escuro) e de Tubo (azul)	127
Figura 7.3 – Distribuição de Tensões e a Deformação da Estrutura no Modelo de Elementos Finitos de Vigas do Piso da Plataforma, causadas pelo Aquecimento e Dilatação Térmica devido ao Efeito do Incêndio de um Equipamento	128
Figura 7.4 – Distribuição de Tensões de Tração, 0.383E7 Pa (azul) a 0.207E9 Pa (vermelho), e Deformações no Modelo de Elementos Finitos devido ao Aquecimento e à Dilatação Térmica das Vigas e do Piso da Plataforma	129
Figura 7.5 – Distribuição de Temperaturas (30.12°C a 132.64°C), Resultante do Efeito da Proteção Ativa (Dilúvio) no Modelo de Elementos Finitos de um Equipamento sob Efeito de Incêndio	136
Figura 7.6 – Distribuição de Temperaturas (30°C a 1342°C) ao longo da Espessura do Modelo de Elementos Finitos de um Trecho do Material da Proteção Passiva sob Efeito de Incêndio	136
Figura 7.7 – Modelo Simétrico de Elementos Finitos da Boca de Sino	138
Figura 7.8 – Distribuição de Tensões (13824 Pa a 0.118E9 Pa) na Parte Interna do Modelo de Elementos Finitos da Boca de Sino	140
Figura 7.9 – Modelo de Elementos Finitos da Guia de Tubos	144
Figura 7.10 – Modelo de Elementos Finitos com a Distribuição de Temperatura, 52,8°C a 480,78°C, na Guia Original após o ciclo de aquecimento, com refrigeração	145
Figura 7.11 – Modelo de Elementos Finitos com a Distribuição de Temperatura, 26,35°C e 358,14°C na Guia Modificada (com sulcos na face inferior), com refrigeração	146

Figura 7.12 – Modelo de Elementos Finitos do Duto com Aplicação dos Deslocamentos (símbolos azuis) e das condições de fixação (símbolos amarelos) para a Simulação da Mossa	150
Figura 7.13 – Modelo de Elementos Finitos do Duto Amassado com a Distribuição de Tensões Residuais (0.207E7 a 0.361E9 Pa), após a Retirada da Carga que Gerou o Amassamento	151
Figura 7.14 – Modelo de Elementos Finitos do Duto Amassado com a Distribuição das Deformações Residuais (-0.109 a 0.143),, após a Retirada da Carga que Gerou a Mossa	152
Figura 7.15 – Modelo Simétrico de Elementos Finitos da Peça PELIKELO: Corpo (cinza), Braço (azul) e Trava (verde)	155
Figura 7.16 – Distribuição das Tensões, 0.02 a 625,24 Pa, no Corpo do PELIKELO com a Carga de Ruptura	157
Figura 7.17 – Deformações Plásticas no Corpo do PELIKELO com a Carga de Ruptura	158
Figura 7.18 – Vista Geral da Barragem a Jusante	161
Figura 7.19 – Compressão das Juntas de Contração à Montante (Esquerda) e Abertura das Juntas de Contração à Jusante (Direita)	161
Figura 7.20 – Malha de Elementos Finitos do Modelo do Maciço Rochoso e da Barragem	162
Figura 7.21 – Malha de Elementos Finitos do Modelo dos Blocos Vertentes e Adjacentes	163
Figura 7.22 – Deformação da Barragem após a Expansão - Vista de Jusante	164

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação entre os Desempenhos dos Protótipos Físicos e Virtuais em Testes para Avaliação de Produtos e Processos	35
---	----

LISTA DE SIGLAS

AAF - Análise de Árvore de Falhas
ABNT NBR - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIQUIM - Associação Brasileira da Indústria Química
ABS - *American Bureau of Shipping*
ADA - Avaliação do Desempenho Ambiental
AE - Árvore de Eventos
AMFE - Análise do Modo de Falha e Efeitos
AIChE - *American Institute of Chemical Engineers*
ANSI - *American National Standards Institute*
API - *American Petroleum Institute*
APP - Análise Preliminar de Riscos/Perigos
BCSD - *Business Council for Sustainable Development*
BSI - *British Standard Institution*
CAD - *Computer Aided Design*
CAE - *Computer Aided Engineering*
CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBI - *Confederation of British Industry*
CCPS - *Center for Chemical Process Safety*
CEPAL-ONU - Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CERES - *Coalition for Environmentally Responsible Economies*
CMA - *Chemical Manufactures Association*
DFP - Diagramas de Fluxo de Processo (*Process Flux Diagrams – PFD*)
DIP - Diagrama de Instrumentação e Processo
DOD - *U.S. Department of Defense*
EOP(R) - Estudos de Operabilidade e Perigos/Riscos
EPA - *Environmental Protection Agency*
EMAS - *Eco Management and Audit Scheme*
ETA - *Event Tree Analysis*

EUROPIA - *European Petroleum Industry Association*

FMEA - *Failure Mode and Effect Analysis*

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler

FGV - Fundação Getúlio Vargas

FIERJ - Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro

FIESP - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo

FTA - *Fault Tree Analysis*

GEMI - *Global Environmental Management Initiative*

HazOp - Hazard and Operability Studies

HSE - *Health and Safety Executive*

IBMEC - Instituto Brasileiro de Mercado de Capitais

IBICT - Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia

ICBM - *Intercontinental Ballistic Missile*

ICC - *International Chamber of Commerce*

ICA - Indicador de Condição Ambiental

IDA - Indicador de Desempenho Ambiental

IDG - Indicador de Desempenho Gerencial

IDLH - *Immediately Dangerous to Life and Health* (Imediatamente Perigoso para Vida e Saúde),

IDO - Indicador de Desempenho Operacional

IEC - *International Electrotechnical Commission*

INEM - *International Network for Environmental Management*

INSEAD - *Institut Européen d'Administration des Affaires*

INTOSAI - *International Organization of Supreme Audit Institutions*

ISA - Instituição Suprema de Auditoria

ISO - *International Standardization Organization*

JSA - *Japan Standards Association*

KEIDAREN - *The Japan Federation of Economic Organizations*

NASA - *U.S. National Aeronautics and Space Administration*

NIOSH - *National Institute for Occupational Safety and Health, USA* (Instituto Nacional de Saúde e Segurança Ocupacional)

ONG - Organização Não Governamental

PDCA - *Plan, Do, Check and Act* (Planejar, Fazer, Checar e Agir)

P&ID - *Process and Instrumentation Diagrams*

PERI - *Public Environmental Reporting Initiative*

PHA - *Preliminary Hazard Analysis*

PWBLF - *Prince of Wales' Business Leaders Forum*

SAGE - *Strategic Advisory Group on the Environment*

SAI - *Supreme Audit Institutions*

SGA - *Sistema de Gestão Ambiental*

STEP - *Strategies for Today's Environmental Partnership*

TQEM - *Total Quality Environmental Management* (Administração da Qualidade Total Ambiental)

TQM - *Total Quality Management* (Administração da Qualidade Total)

WBCSD - *World Business Council for Sustainable Development*

WGEA - *Working Group on Environmental Auditing*

WICE - *World Industry Council for the Environmental*

WIF - *What-if*

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	17
2. CONTEXTUALIZAÇÃO	22
2.1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	26
2.1.1 Definição	26
2.1.2 Benefícios	27
2.1.3 Aplicações em Estudos Ambientais	28
2.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA	29
2.3 RELEVÂNCIA DO TRABALHO	33
2.4 OBJETIVOS	36
2.4.1 Geral	36
2.4.2 Específicos	36
2.5 HIPÓTESES	37
2.6 DELIMITAÇÃO	37
2.7 LIMITAÇÕES	38
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
3.1 GESTÃO AMBIENTAL	39
3.2 SISTEMAS DE GESTÃO AMBIENTAL	40
3.3 NORMAS DE SISTEMAS DE GESTÃO AMBIENTAL	44
3.3.1 A Norma BS 7750	45
3.3.2 A Norma ABNT NBR ISO 14001	47
3.4 ANÁLISE DE RISCO	52
3.5 ANÁLISE DE RISCO AMBIENTAL	56
3.6 ANÁLISE DE RISCO AMBIENTAL E A NORMA ABNT NBR ISO 14001	62
3.7 ANÁLISE DAS CONSEQÜÊNCIAS	64
3.8 ANÁLISE DE VULNERABILIDADE	67
3.9 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	68
3.10 FERRAMENTAS PARA ANÁLISES DE RISCOS	72

3.11 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL	80
3.12 INDICADORES DE DESEMPENHO AMBIENTAL	83
3.13 NORMA ABNT NBR ISO 14031	87
3.14 CERTIFICAÇÃO AMBIENTAL	91
3.15 ANÁLISE DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	95
4. METODOLOGIA DO TRABALHO	100
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	100
4.2 MÉTODO DA PESQUISA	104
4.3 TÉCNICA DA PESQUISA	106
5. METODOLOGIA DA ANÁLISE DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	109
5.1 DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	110
5.2 DEFINIÇÃO DO PROGRAMA ANSYS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	112
5.3 TIPOS E CARACTERÍSTICAS DAS ANÁLISES E DOS ELEMENTOS FINITOS	113
5.4 PROCEDIMENTO DA ANÁLISE DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	116
6. RESULTADOS OBTIDOS NA ANÁLISE DE SIMULAÇÃO	118
6.1 TIPOS DE RESULTADOS OBTIDOS NAS ANÁLISES COM O PROGRAMA ANSYS	118
6.2 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	120
7. ESTUDOS DE CASOS DE ANÁLISES DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	122
7.1 ANÁLISE TÉRMICA E DE TENSÕES PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO DE EM PLATAFORMA <i>OFFSHORE</i>	123
7.2 ANÁLISE DE TENSÕES E DE FADIGA DE UMA BOCA DE SINO	137
7.3 ANÁLISE TÉRMICA LINEAR TRANSIENTE DE UMA GUIA DE TUBOS	142
7.4 ANÁLISE DE TENSÕES EM DUTO DE ÓLEO ENTERRADO EM SOLO E SUBMETIDO À PRESSÃO INTERNA	148
7.5 ANÁLISE DE TENSÕES NÃO LINEAR ESTÁTICA DA PEÇA PELIKELO	154

7.6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UMA BARRAGEM: AVALIAÇÃO E SOLUÇÕES PARA AS ESTRUTURAS DE CONCRETO SUBMETIDAS À REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA)	160
8. CONCLUSÕES	166
9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	169
10. REFERÊNCIAS	170

1. INTRODUÇÃO

O processo de simulação computacional baseada no método de elementos finitos consiste na utilização de um programa desenvolvido em uma linguagem tal como FORTRAN ou outra similar, capaz de elaborar um modelo matemático de um produto ou processo, efetuar cálculos por meio de um método numérico e fornecer resultados que representem o comportamento do modelo, quando submetido a condições de operação e a cargas diversas.

Os resultados obtidos com o modelo devem ser analisados por um profissional que conheça o processo de simulação computacional e que tenha por objetivo dimensionar um produto ou um processo, atestar a sua integridade e verificar os seus limites de operação ou de carregamento.

As definições, benefícios e aplicações das análises de simulação computacional são apresentadas no Capítulo 2, Item 2.1, desta dissertação, e a metodologia da análise de engenharia, executada com o programa de simulação computacional ANSYS, uma ferramenta de CAE (*Computer Aided Engineering*), é definida no Capítulo 5.

Neste trabalho é apresentada uma proposta para a aplicação desta ferramenta de simulação, como fornecedora de resultados e comportamentos de produtos e processos, os quais podem ser utilizados na análise de risco e avaliação de desempenho ambientais e podem auxiliar a empresa a aperfeiçoar seu Sistema de Gestão Ambiental, a elaborar produtos e processos com melhor desempenho, maior qualidade e confiabilidade, a prevenir ou mitigar riscos e impactos ambientais e a reduzir custos entre outros benefícios que serão descritos ao longo deste trabalho.

Segundo CORRÊA (2009), com a implantação de um Sistema de Gestão Ambiental, a empresa pode se tornar mais inovadora, competitiva, obter maior retorno financeiro em suas operações e evoluir ambientalmente além das exigências da legislação, melhorando a sua imagem perante as partes interessadas (*stakeholders*) e seus índices no mercado financeiro, caso a empresa possua ações em Bolsas de Valores.

Até a década de 50, embora a tecnologia de simulação já estivesse em desenvolvimento, ainda não havia programas comerciais. As indústrias eram obrigadas a utilizar altos fatores de

segurança para elaborar seus projetos e dimensionar seus produtos e processos, significando isto um gasto excessivo de matéria prima. Como os projetos não eram totalmente confiáveis, havia grandes perdas e desperdícios de materiais oriundos de erros de processos durante a produção e de testes destrutivos, os quais precisavam ser realizados antes da fabricação dos produtos, para a verificação do comportamento e da resistência dos mesmos aos diversos carregamentos e às condições de operações.

Também nesta década muitas indústrias desenvolviam seus processos e produtos sem abordar aspectos ambientais, tais como, sistema de gestão, risco e avaliação de desempenho ambientais. Além disto, não analisavam as conseqüências de suas atividades sobre o meio ambiente e não providenciavam soluções para minimizar os impactos ambientais causados por suas ações.

Segundo FILHO (2003), na década de 1960, iniciaram-se em várias disciplinas estudos quantitativos sobre risco, definido como “a possibilidade de que ocorram processos ou circunstâncias adversas que possam acarretar danos”.

O risco ambiental foi definido por DAGNINO e JUNIOR (2007) como a possibilidade de ocorrência de eventos danosos ao meio ambiente e a análise de risco ambiental como a avaliação dos riscos que as atividades humanas impõem ao meio ambiente.

De acordo com FILHO (2003), os riscos ambientais de graves conseqüências, assim como os advindos dos avanços tecnológicos, começaram a ser considerados como chaves para a compreensão das características, das transformações e dos limites do projeto histórico da modernidade. Estes riscos teriam origem no próprio desenvolvimento científico e tecnológico, mas adicionavam aos avanços positivos, uma incerteza quanto ao aproveitamento que lhes atribuem a atividade econômica humana. Hoje se reconhece que somente por meio dessa perspectiva é possível abordar, em sua complexidade, a estimativa dos riscos.

Segundo ALMEIDA (2008), MOREIRA (2001) e MOURA (2004) na reunião do Clube de Roma (1968), foi divulgado o relatório “Os Limites para o Crescimento” (*Limits to Grow*) e abordado o tema da poluição dos rios europeus.

Ainda nos anos 60, surgiram também os primeiros programas comerciais de simulação computacional, os quais foram desenvolvidos para modelar, para efetuar cálculos variacionais complexos, que demandavam meses de trabalho e para dimensionar com segurança, estruturas, equipamentos, componentes mecânicos e processos sujeitos a condições de operações e de carregamentos, para os quais não existiam Normas técnicas ou experimentos em laboratórios, tais como o lançamento, as sobrecargas ou a explosão de um foguete.

De acordo com ALMEIDA (2008), MOREIRA (2001) e MOURA (2004), na década de 70 a discussão das questões ambientais foi marcada pela 1^a. Conferência Internacional sobre Meio Ambiente, que ocorreu em Estocolmo, em 1972. Neste evento foi abordada a degradação ambiental causada pelos altos níveis de desenvolvimento dos países ricos e a necessidade de se efetuarem controles ambientais internacionais para a redução de danos ao meio ambiente.

Em 1970, o então presidente americano Richard M. Nixon assinou uma ordem executiva e consolidou a criação de uma única agência ambiental americana: a *Federal Environmental Protection Agency* (EPA). Muito embora o foco primário da EPA tenha sido o de regulamentação e cumprimento de leis governamentais, e não o desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental, suas atividades vêm contribuindo para muitas empresas americanas desenvolverem uma cultura ambiental sistêmica (ALBERTON, 2003).

Na década de 70 houve um aumento nas atividades de regulamentação e de controle ambiental estimuladas pela EPA. Os Estudos de Impacto Ambiental (EIA) foram iniciados nos Estados Unidos, como pré-requisito para aprovação de empreendimentos potencialmente poluidores (MOURA, 2001). Surgiu também a Auditoria Ambiental como uma resposta à pressão pelo crescente rigor da legislação ambiental e pela ocorrência de acidentes ambientais de grandes proporções (ALMEIDA, 2004).

Ainda em 1970, o Eng. John Swanson, da Westinghouse (Pittsburgh, EUA) desenvolveu um programa de simulação computacional para dimensionamento de reatores nucleares e fundou a empresa Swanson Analysis Systems para desenvolver o programa ANSYS, com o qual foram realizadas as análises estruturais e térmicas apresentadas neste trabalho, como estudos que podem reduzir os riscos ambientais e melhorar o desempenho ambiental de produtos e processos.

Nos anos 80, os conceitos de proteção do meio ambiente começaram a se expandir. Degradações, acidentes e desastres ambientais, tais como vazamentos, contaminações com inúmeras mortes e danos à fauna e à flora, citados no Capítulo 2, contribuíram para mudanças nas políticas oficiais de meio ambiente e nos conceitos de gerenciamento ambiental na indústria. Esta década foi marcada por ações de planejamento ambiental e muitas indústrias começaram a incorporar a variável ambiental em seus planejamentos estratégicos. A discussão sobre o meio ambiente deixou de ser um tema isolado, para se incorporar em vários setores. Ainda nesta década surgiram ONGs (Organizações Não Governamentais) de proteção ao meio ambiente, compostas por integrantes dos movimentos ambientalistas dos anos 70 (ALMEIDA, 2008).

No Brasil, com o Plano de Controle da Poluição de Cubatão em 1983, desencadeou-se uma série de exigências para garantir a boa operação e manutenção de processos, tubulações e terminais de petróleo e de produtos químicos das unidades industriais locais, dando-se início ao uso institucional do estudo de risco ambiental.

Ainda na década de 80, os programas de simulação computacional começaram a ser ampliados para executarem análises estruturais e térmicas não lineares tais como impactos, choques, vibrações, ruídos, fadiga, mecânica da fratura e superaquecimentos entre outros. Também foram desenvolvidos módulos para análise de dinâmica de fluidos, com aplicações em escoamento e misturas de líquidos e gases, combustão e explosões.

Nos anos 90 houve um grande impulso com relação à consciência ambiental. Muitas empresas passaram a se preocupar com a racionalização do uso de energia e de matérias-primas, além de terem um maior empenho na promoção da reciclagem e reutilização de materiais, para evitarem ou reduzirem os desperdícios.

A Conferência Mundial de Meio Ambiente, sediada no Rio de Janeiro, em 1992, onde foram assinados os tratados globais da biodiversidade e do clima, entre outros, traduz a universalização da discussão ambiental. As indústrias passaram a ser responsabilizadas pelos efeitos ambientais de seus produtos e subprodutos, desde a obtenção da matéria prima até a disposição final dos mesmos como resíduos, além de começarem a ter responsabilidades tributárias pela geração de poluição (poluidor-pagador), visando a proteção ambiental (ALMEIDA, 2008).

Ainda nos anos 90, os programas de simulação computacional foram utilizados em análises térmicas e estruturais para simular incêndios em plataformas *offshore*, visando identificar as regiões críticas da plataforma, que deveriam receber a proteção passiva, uma manta de material isolante para revestir a estrutura metálica, capaz de resistir ao fogo e manter a integridade estrutural e a segurança, durante um determinado tempo, necessário para a evacuação do pessoal. Nesta época, estas análises eram solicitadas pelos engenheiros de segurança, mas ainda não se falava em análise de risco e avaliação de desempenho ambientais e sistema de gestão ambiental.

Ainda na década de 90, a Câmara Internacional de Comércio (*ICC - International Chamber of Commerce*), propôs estruturas lógicas que sistematizassem a gestão ambiental na indústria, compatibilizando-as com o interesse de qualidade e produtividade, surgindo assim o Sistema de Gestão Ambiental, formalizado pela *British Standard Institution* na Norma BS-7750 - *Specification for Environmental Management Systems* (ALMEIDA, 2008).

Em 1996 foi editada a Norma ABNT NBR ISO 14001 – Requisitos do Sistema de Gestão Ambiental, que atualmente, na versão de 2004, é utilizada na implantação do Sistema de Gestão Ambiental (SGA) nas empresas e para efetuar a certificação do SGA, de serviços, produtos e processos da empresa, mediante auditorias ambientais.

Em 1999 foram criadas as Normas ABNT NBR ISO 14031 – Diretrizes para a Avaliação do Desempenho (*Performance*) Ambiental, que inclui exemplos de indicadores ambientais e a ABNT NBR ISO 14032 - Exemplos de Avaliação do Desempenho Ambiental. Estas Normas podem ser utilizadas por empresas que possuem ou não o SGA, para medir o desempenho ambiental da empresa por meio de indicadores de desempenho gerencial e operacional e de condição ambiental.

Neste trabalho propõe-se aplicar a simulação computacional na análise de risco, avaliação de desempenho e certificação ambientais de produtos e processos, para a melhoria e evolução dos Sistemas de Gestão Ambiental das empresas que buscam um diferencial e pretendem se destacar no mercado no Século XXI, especialmente em relação aos seus aspectos ambientais.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO

No cenário competitivo do século XXI, condições e fatores tradicionais como custo de mão-de-obra, acesso a recursos financeiros e matéria prima, mercados protegidos ou controlados, podem ainda representar uma fonte de vantagem competitiva, porém em um grau muito menor do que no passado (HITT, IRELAND e HOSKISSON, 2002), especialmente se considerarmos os desafios ambientais que muitas empresas precisam enfrentar atualmente para se destacarem no mercado, vencerem os concorrentes e evoluírem em seus setores de atuação.

Atualmente, a competitividade das indústrias e de muitas empresas, cujas atividades afetam o meio ambiente, está ameaçada devido aos riscos ambientais de suas atividades e de seus processos, os quais têm acarretado muitos acidentes e desastres ambientais, que vêm causando degradações à fauna e à flora, inúmeras mortes de seres humanos, enormes prejuízos financeiros, perda de reputação e comprometimento da sustentabilidade.

Segundo FILHO (2003), o conceito de desastre pressupõe a ocorrência de dois fatores: a ameaça de uma situação e a vulnerabilidade das pessoas e dos bens. A ameaça refere-se à probabilidade da ocorrência de um evento físico capaz de ocasionar danos: terremotos, ciclones, inundações, acidentes industriais, etc. A vulnerabilidade, por sua vez, refere-se à propensão de uma sociedade ou de um grupo social sofrer danos a partir da ocorrência do evento físico. Reduzir a probabilidade de ocorrência do evento e a vulnerabilidade das pessoas permite mitigar os riscos de diversos tipos de desastres.

Neste contexto, a utilização de uma ferramenta de simulação computacional pode auxiliar na redução da ameaça e da vulnerabilidade dos riscos ambientais. Por meio da modelagem de um processo ou de um produto é possível prever e/ou identificar os pontos de falha e os limites de operação de equipamentos, estruturas, plataformas, embarcações e demais dispositivos que apresentam riscos e podem causar acidentes ou desastres ambientais, em condições diversas de carregamento ou aquecimento.

Segundo MOREIRA (2004) e MOURA (2001), nas décadas de 70 e 80, ocorreram diversos acidentes ambientais, os quais causaram grandes impactos sobre o meio ambiente e chamaram a

atenção do mundo para a ameaça dramática às condições de vida do planeta. Entre os principais acidentes ambientais ocorridos estão:

- Explosão de uma planta química da empresa NYPRO LTD, em Flixborough na Inglaterra em 1974, junto à unidade de oxidação de ciclohexano, matéria-prima utilizada na fabricação de nylon. Uma nuvem de aproximadamente 30 toneladas, composta principalmente por esse solvente inflamável, foi gerada a partir de ruptura ocorrida em uma tubulação instalada provisoriamente alguns meses antes, visando possibilitar a remoção de um dos reatores do processo, em cujo costado havia sido identificada uma trinca. Esta nuvem, em presença de fontes de ignição, explodiu, matando 28 pessoas e ferindo seriamente 36, além de destruir toda a planta industrial e grande área da circunvizinhança;
- A explosão da indústria química ICMESA, em Seveso na Itália em 1976, com o vazamento de dioxina e outras substâncias tóxicas, gerando mortes de animais, lesões e abortos em pessoas e grande contaminação de solo, ar e água em 1800 hectares;
- O vazamento acidental de isocianato de metila, em uma fábrica da Union Carbide, em Bhopal, na Índia, em 1984, resultando em 3800 mortos e 2700 deficientes, além da queda das ações da empresa, com enorme prejuízo financeiro e perda da liderança mundial para a concorrência;
- Incêndio e explosão do reator 4 com o rompimento do teto do edifício (sem reforço de aço) que abrigava o reator da Usina Nuclear de Tchernobyl, na então União Soviética, hoje Ucrânia, em 1986, com vazamento de material radioativo, que contaminou o solo, plantações, florestas, depósitos de água, peixes e animais em toda a região da Ucrânia, Belarus e norte da Europa, resultando em 51 mortes imediatas e inúmeras mortes posteriormente;
- O choque do navio *Exxon Valdez* com blocos de gelo ao se desviar do canal de navegação, no mar do Alasca, em 1989, com vazamento de óleo no mar, acarretando a contaminação de extensas áreas, com morte de peixes, frutos do mar e aves, além de grandes prejuízos e desgaste da imagem da empresa Exxon;
- Vazamento (estimado em menos de 100 quilos) de hidrocarbonetos leves, na plataforma *Piper Alpha* de extração de petróleo, operada pela Occidental Petroleum Ltd. e TEXACO, no Mar do Norte, Reino Unido em 1988. O produto vaporizou e em contato com fonte externa de ignição provocou explosão e incêndio que afetou todo o sistema de comunicação interna e boa parte dos sistemas automáticos de proteção da plataforma. A causa mais provável da perda de contenção do hidrocarboneto foi um vazamento em flange de uma bomba reserva, colocada em operação sem

seu o sistema de proteção contra sobrepressão (válvula de alívio). Desencadeou-se na seqüência, em efeito “dominó”, uma série de outros incêndios e explosões, que culminaram com a morte de 167 pessoas;

- O petroleiro *Prestige*, pertencente a uma empresa liberiana, e operado por armador grego, derramou 77 mil toneladas de crude no mar, em 2002, causando 42 milhões de euros em prejuízos financeiros.

Segundo CEPAL (2003), as perdas econômicas provocadas pelos desastres ambientais foram oito vezes maiores entre 1986 e 1995 do que na década de 1960.

De acordo com FILHO (2003), verifica-se uma curva ascendente de prejuízos, de 1990 a 1999, quando os grandes desastres ambientais do mundo somaram 480 bilhões de dólares, enquanto no biênio 1997-98, representaram um montante de 120 bilhões de dólares. Já no Brasil, estima-se que os danos ambientais geram prejuízos da ordem de 700 milhões de dólares ao ano, pois temos, em comparação com os EUA, por exemplo, 50% mais acidentes ambientais no setor industrial.

Uma semana depois do naufrágio de uma plataforma de petróleo no Golfo do México, aconteceu em abril de 2010, o maior desastre ambiental dos EUA, no Golfo do México, na costa da Louisiana, com a explosão e incêndio na torre da plataforma *Deepwater Horizon* de prospecção de petróleo da empresa British Petroleum (BP), quando a plataforma finalizava a perfuração de um novo poço (Jornal do Brasil, 2010b).

Neste desastre morreram 11 operários e os prejuízos financeiros da empresa estão estimados em torno de 32 bilhões de dólares, sendo 20 bilhões destinados a indenizações. O vazamento de petróleo se originou de três dutos submarinos que estavam instalados a 1.525 metros de profundidade e se romperam (VEJA, 2010). O poço é capaz de gerar cinco mil barris por dia, o equivalente a 800.000 mil litros de petróleo, que jorrou no mar desde o dia 20 de abril até o dia 16 de julho de 2010. Os especialistas estimaram que 354 a 698 milhões de litros de petróleo foram derramados no mar com grandes danos à flora e fauna marinha. A mancha de óleo ocupou uma área de 72 km por 170 km, maior do que a Jamaica (IGEDUCA, 2010).

Segundo o Jornal do Brasil (2010a), este acidente, sem precedentes, gerou questionamentos de engenheiros, autoridades e especialistas sobre a segurança e qualidade da prospecção marítima de

petróleo e gás natural em todo o mundo. O problema foi iniciado por um defeito no sistema denominado “*Blow Out Preventer*” (BOP).

Segundo especialistas, este acidente terá como consequência não apenas o reforço na segurança de todos os procedimentos de extração de petróleo e gás e da perfuração de poços, mas também o incremento na pesquisa de prevenção de acidentes e o aumento no rigor da fiscalização das atividades da indústria pelas agências reguladoras (CREARJ 83, 2010).

Diante de todos estes fatos, é imprescindível que as empresas façam maiores investimentos na segurança de seus projetos, produtos e processos, utilizando as tecnologias disponíveis, tais como a simulação computacional, para aumentar a confiabilidade dos mesmos e assim prevenir ou minimizar os riscos ambientais.

As organizações devem considerar em suas estratégias competitivas, a implantação de um Sistema de Gestão Ambiental, a certificação, a avaliação de risco e de desempenho ambientais de seus processos e produtos. Estas ações podem auxiliar as empresas a minimizar riscos, acidentes e desastres ambientais, além de prejuízos financeiros e sociais e a melhorar a imagem com relação à credibilidade, sustentabilidade, ética e responsabilidade social.

Segundo ALBERTON (2003), embora a certificação do Sistema de Gestão Ambiental não seja imperativa para as organizações, a qualificação da produção industrial, nos padrões internacionais de controle ambiental e eficiência energética, as credenciais disputam os mercados europeu e norte-americano, que seguem à risca tais padrões. Além disso, a necessidade de demonstrar um desempenho ambiental que atenda à legislação vigente, de prevenir impactos ao meio ambiente, de fortalecer a imagem institucional junto à comunidade, de reduzir riscos de multas e penalidades e, conseqüentemente, de aumentar a competitividade têm levado muitas empresas a implantarem um Sistema de Gestão Ambiental e a buscarem a sua Certificação.

Neste contexto, as análises de simulação computacional, propostas neste trabalho podem ajudar na minimização de riscos e na prevenção de acidentes ambientais, tais como os citados neste item. Por meio da modelagem e da análise de um protótipo virtual é possível reproduzir diversas condições de operação do equipamento e seus componentes, submetidos a altas cargas, avaliar o comportamento, a integridade estrutural e a confiabilidade dos mesmos.

O programa pode ser utilizado também para redimensionar produtos ou processo em caso de constatação de falhas e para simular possíveis medidas mitigadoras, caso ocorra um acidente, por meio do dimensionamento de novos dispositivos de reparo e de testes com os protótipos virtuais.

2.1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

2.1.1 DEFINIÇÃO

A simulação computacional é uma ferramenta que pode ser utilizada para análises de engenharia. O programa é utilizado para a modelagem de um produto (modelo) ou processo, incluindo suas condições de contorno ou de fixação e seus carregamentos de operação, tais como, cargas estruturais, fluxos de calor, temperaturas, velocidades, acelerações, correntes elétricas e campos eletromagnéticos. Por meio de um método numérico o software executa os cálculos, simula o comportamento do modelo e gera os resultados que podem ser visualizados por meio de figuras, gráficos e listagens (BATHE, 2007).

Entre os principais resultados fornecidos pelo programa, ao longo do modelo, têm-se os deslocamentos, tensões, pressões de contato, deformações, fatores de fadiga e de mecânica da fratura, temperaturas, fluxos de calor, coeficientes de filme, velocidades de escoamento de fluidos (líquidos e gases), concentrações de misturas, campos magnéticos e correntes elétricas entre outros (ANSYS, 2009).

Para a elaboração do modelo matemático sólido ou protótipo virtual pode-se utilizar um programa de desenho do tipo CAD (“*Computer Aided Design*”) ou o programa de simulação computacional CAE (“*Computer Aided Engineering*”), no qual o profissional também elabora o modelo de elementos finitos, como apresentado na Figura 2.1, define o tipo de análise a ser realizada, solicita a execução dos cálculos e verifica os resultados, como será descrito no Capítulo 5, referente à metodologia da análise de simulação computacional (MOAVENI, 2008).



Figura 2.1 – Modelo de Elementos Finitos de uma Plataforma *Offshore*

2.1.2 BENEFÍCIOS

Os programas de CAE são utilizados para desenvolver projetos de produtos e processos, incluindo o dimensionamento, as modificações e as otimizações. Alguns programas, tais como o ANSYS, possuem métodos para a execução de análises probabilísticas de tensões (ANSYS, 2009).

Os principais benefícios das análises de simulação para as análises ambientais são:

- Verificação da integridade estrutural de um produto ou o desempenho de um processo nas condições de projeto, de operação e de sobrecarga visando mitigar riscos e/ou efeitos de aspectos ambientais e colaborar na melhoria de um Sistema de Gestão Ambiental (SGA);
- Simulação de condições de carregamento para atendimento a requisitos de Normas técnicas;
- Melhoria de desempenho de produtos e processos por meio de análises comparativas, alterações e possíveis otimizações das variáveis de projeto visando colaborar na avaliação de desempenho ambiental;
- Identificação de situações de riscos e simulação de aspectos ambientais que podem causar danos ambientais, nas diversas etapas de operação ou de utilização de produtos e processos;
- Fornecimento de diagnósticos e dados numéricos sobre o comportamento de produtos e processos, submetidos a condições de operação ou de acidente, a serem utilizados nas análises de

confiabilidade, vulnerabilidade, causas e conseqüências, avaliação e gerenciamento de risco por meio da análise de riscos ambientais.

Na análise dos resultados, o profissional pode verificar se os valores encontrados atendem aos fatores de segurança exigidos pelas normas técnicas ou pode identificar os pontos de falha que levam a danos parciais, colapso do produto ou à perda de controle de um processo, por não atenderem os requisitos das normas ou por estarem submetidos a condições de acidentes.

Executando a análise em etapas é possível reproduzir as situações de riscos ou de acidentes diversos em seqüência e analisar as causas, efeitos e conseqüências de uma ação sobre a seguinte.

Nas análises de simulação pode-se efetuar modificações ou combinações de diversas variáveis de projeto de um produto ou processo. Os resultados obtidos podem ser utilizados para avaliar o desempenho do objeto em estudo, por meio da comparação dos valores calculados nas diversas condições de projeto.

2.1.3 APLICAÇÕES EM ESTUDOS AMBIENTAIS

Entre as principais aplicações da simulação computacional, para modelagem de situações complexas e fenômenos diversos, os quais são complexos ou muito difíceis de serem reproduzidos e testados em laboratórios ou bancadas, com o uso de protótipos físicos, e que podem causar danos, acidentes ou desastres ambientais, destacam-se:

- Impacto ou choque de embarcações transportadoras de óleo ou produtos tóxicos contra obstáculos diversos, que podem causar fraturas nas mesmas, levando ao derramamento destas substâncias e causando a poluição nos corpos d'água com destruição da fauna e flora;
- Elevações de pressão ou de temperatura (sobrecargas), de equipamentos ou dutos com gases ou substâncias tóxicas e/ou inflamáveis, as quais podem causar trincas e/ou rupturas nos mesmos, gerando vazamentos e explosões, com incêndios e contaminações ambientais diversas;
- Aquecimentos e resfriamentos ou cargas e descargas repetitivas de equipamentos, que contenham substâncias tóxicas ou perigosas, cujos ciclos de trabalho podem levar à fadiga do material e causar trincas que podem se propagar causando o rompimento do material e gerando vazamentos que podem contaminar o ar, o solo e a água;

- Queda de aeronaves ou explosão sobre ou próximo ao edifício do reator de usinas nucleares, as quais podem danificar ou romper o reator, devido às ondas de choque e vibrações, causando emissões radioativas com contaminações de pessoas, da fauna e da flora;
- Incêndios em instalações diversas, tais como plataformas *offshore*, petroquímicas, indústrias químicas e siderurgias, os quais podem causar explosões e danificar ou superaquecer estruturas e equipamentos com produtos inflamáveis e/ou tóxicos, levando à perda de integridade estrutural e colapso dos mesmos, trazendo como conseqüências mortes de pessoas, vazamentos e derramamentos de substâncias perigosas no ar, solo, e água;
- Deformações permanentes (mossas) causadas por sobrecargas diversas em equipamento que armazena substância perigosa ou tóxica. Estes danos podem comprometer a integridade estrutural do equipamento e/ou de seus componentes mecânicos, gerando trincas (fissuras) que podem se romper a qualquer momento, durante o seu ciclo de trabalho, causando vazamentos que levam a contaminações do ar, água e solo;
- Quedas de barragens, estradas e encostas com geração de áreas degradadas, poluição dos corpos d'água e mortes de pessoas, da fauna e da flora;
- Incêndio em equipamento situado em plataforma, navio, refinaria, indústria química e siderúrgica entre outras, com emissões de radiação e aquecimento de equipamentos, estruturas e instalações próximas, que pode causar mortes de pessoas, além da perda da integridade e colapso das estruturas, com danos e acidentes ambientais diversos;
- Superaquecimento de fornos e reatores, em siderúrgicas e usinas nucleares, que podem causar danos ou destruição de materiais e/ou equipamentos, incêndios, explosões e emissões de radiações, com mortes de pessoas e contaminações ambientais diversas;
- Vibrações e ruídos em instalações diversas e equipamentos, que podem causar desconforto ambiental para pessoas e gerar trincas e/ou danificar componentes mecânicos, gerando prejuízos para as pessoas e a empresa.

2.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA

A Norma ABNT NBR ISO 14001:2004 que define os requisitos para a implantação do SGA e a certificação ambiental e a Norma ABNT NBR ISO 14031:2004, que fornece as diretrizes para a avaliação de desempenho ambiental não mencionam o uso da ferramenta de simulação

computacional. No entanto, a mesma pode ser utilizada para atender alguns dos requisitos destas Normas, relativos a prevenção de riscos ambientais, melhoria do Sistema de Gestão Ambiental e avaliação de desempenho ambiental.

No item 4.4.7, a Norma ABNT NBR ISO 14001:2004 define que a “organização deve estabelecer, implementar e manter procedimento(s) para identificar situações potenciais de emergência e acidentes que possam ter impacto(s) sobre o meio ambiente e sobre como a organização responderá a estes”.

Uma das principais capacidades do programa de simulação é o fornecimento de diagnósticos, isto é, comportamentos e resultados numéricos, que podem ser utilizados na análise de riscos para minimizar riscos ambientais, os quais podem levar a acidentes ambientais. Algumas das situações que podem apresentar tais riscos e que podem ser analisadas com o programa estão descritas no Item 2.1.3 deste trabalho.

Segundo MOREIRA (2001), quanto aos requisitos da Norma ABNT NBR ISO 14001:2004, a organização deve identificar as possíveis situações emergenciais e definir formas de mitigar os impactos ambientais associados, para atender às situações de emergência. O Coordenador do Plano de Emergência deve efetuar a análise dos riscos identificados no levantamento dos aspectos ambientais e selecionar as situações emergenciais de maior abrangência.

De acordo com SERPA (1992) apud ALMEIDA (2007), a análise de risco ambiental consiste na identificação sistemática de elementos e de situações de uma instalação que possam gerar riscos e o gerenciamento de risco é a implantação de medidas e procedimentos técnicos e administrativos que têm como objetivos controlar e reduzir os riscos constatados na fase da análise. Estes procedimentos visam capacitar a empresa para que ela possa reduzir a probabilidade de ocorrência de acidentes e tomar medidas adequadas, quando da ocorrência dos mesmos.

Segundo ALMEIDA (2007), dependendo do potencial de risco do empreendimento e das características do meio onde ele se localiza, a análise de riscos pode ser qualitativa, quando preliminar e/ou quantitativa, quando são calculados os riscos e as vulnerabilidades, dependendo da fase do projeto. Os objetivos das análises são:

- Identificar e classificar os eventos perigosos por meio de inspeções, investigações e questionários entre outras ações;
- Determinar, por meio de cálculos de probabilidade, a frequência com que estes eventos ocorrem, no caso de análise de risco quantitativa;
- Analisar, por meio de modelos matemáticos, os efeitos e danos associados;
- Determinar as técnicas de controle e mitigação.

A elaboração de estudos quantitativos de análise de riscos requer a estimativa das frequências de ocorrência de falhas de equipamentos relacionados com as instalações ou atividades em análise. Estes dados podem ser difíceis de serem estimados, em função da indisponibilidade de estudos de histórias de acidentes ou de falhas, em bancos de dados de acidentes, os quais não foram registrados ou os quais ainda não aconteceram, como é o caso dos riscos, falhas, acidentes e impactos ambientais que a exploração do pré-sal pode causar no meio ambiente.

Os programas que utilizam a simulação computacional com protótipos virtuais podem modelar condições de operações e de acidentes, que na maioria dos casos não são possíveis de serem reproduzidas em laboratório. O programa de simulação pode efetuar cálculos e analisar situações complexas de eminência ou ocorrência de acidentes e fornecer informações sobre a integridade de estruturas, equipamentos e processos diversos durante suas operações e após a ocorrência de explosões, incêndios, vazamentos, quedas, impactos, falhas diversas e rupturas entre outras situações.

Os diagnósticos fornecidos na simulação computacional são aplicáveis à análise e gerenciamento de riscos e nas previsões de falhas de produtos e processos. Os resultados podem fornecer contribuições significativas para a minimização das situações de riscos e impactos ambientais, redução da ocorrência de acidentes e aumento da confiabilidade do objeto em estudo, como mostrado nos estudos de casos.

Com relação às situações de risco, CREMONESI (2000) apud MOREIRA (2001) afirma que é por meio da certificação ambiental que a organização atesta que possui um gerenciamento preventivo das situações de risco potencial e que atende a todos os requisitos de uma Norma Internacional, tal como a Norma ABNT NBR ISO 14001, para suas atividades, produtos,

processos e serviços. Para a obtenção desta certificação é necessário implantar inicialmente na organização um Sistema de Gestão Ambiental, no qual se analisam as situações de risco potencial, através da análise de risco.

Por meio da simulação computacional é possível modelar, testar e analisar o comportamento e/ou o desempenho de produtos e processos, em suas condições de operação, sobrecarga e acidentes. Os resultados fornecidos podem ser utilizados na análise e prevenção de situações de risco ambiental potencial e na avaliação de desempenho ambiental.

O Item 3.1.1 da Norma ABNT NBR ISO 14031:2004, define que a “Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA) é um processo de gestão interna que utiliza indicadores para fornecer informações, comparando o desempenho ambiental, passado e presente, de uma organização com seus critérios de desempenho ambiental”.

Como definido no Item 3.2.2 desta Norma, os indicadores de desempenho podem ser:

- Gerenciais: que fornecem informações sobre esforços gerenciais para influenciar o desempenho ambiental das operações da organização;
- Operacionais: que fornecem informações sobre o desempenho ambiental das operações da organização;
- De Condições Ambientais: que fornecem informações sobre a condição do ambiental local, regional, nacional ou global.

Por meio da simulação computacional é possível combinar, estudar e otimizar as variáveis de projeto, as quais serão escolhidas com base nos aspectos ambientais significativos da empresa, os quais são definidos pela Norma ABNT NBR ISO 14031:2004 no Item 2.2. como “elementos das atividades, produtos ou serviços de uma organização que podem interagir com o meio ambiente”. Desta forma é possível dimensionar os produtos e processos para se obter a melhoria do desempenho ambiental dos mesmos e conseqüentemente da empresa, tais como, reduções de poluição, do consumo de energia, de materiais, de temperaturas, de níveis de ruído e de vibrações dentre outros. As variações de desempenho podem ser avaliadas e medidas por meio de indicadores de desempenho ambiental operacionais.

A simulação computacional é adequada para a análise de questões ambientais, pois é uma ferramenta de tecnologia limpa que contribui para a prevenção de danos ambientais. Por meio da análise numérica é possível efetuar diversos testes com o uso do protótipo virtual, com os seguintes benefícios, reduzindo-se:

- O desperdício de material, os quais podem ocorrer quanto é necessário destruir o protótipo físico em testes de bancada;
- Os acidentes, os quais podem acontecer durante testes em laboratório;
- Os custos de materiais e de energia, os quais são consumidos durante os testes de bancada;
- O tempo do ciclo do projeto e do produto, uma vez que os testes virtuais são muito mais rápidos do que aqueles realizados em bancadas e laboratórios;

Os testes com os protótipos virtuais também podem validar um teste de bancada, que seja requerido por uma certificadora, ou complementar um ensaio não destrutivo.

Os fatos apresentados acima indicam que a ferramenta de simulação computacional possui muitas vantagens, benefícios e aplicações que podem auxiliar a comunidade científica em projetos multidisciplinares envolvendo estudos ambientais. As análises podem também complementar a análise de risco e a avaliação de desempenho ambientais, relacionadas às Normas ABNT NBR ISO 14001:2004 e 14031:2004, e contribuir para o aperfeiçoamento do Sistema de Gestão Ambiental da organização.

2.3 RELEVÂNCIA DO TRABALHO

Atualmente, para que as empresas se destaquem no mercado e evoluam, é relevante que sejam inovadoras e possuam diferenciais para vencerem a concorrência e agregarem mais valor aos seus produtos, processos e serviços.

Além disto, os projetos de equipamentos e os processos requisitados pelas indústrias *offshore*, nuclear, aeroespacial e de mineração entre outras, estão exigindo cálculos cada vez mais complexos, uma vez que não há normas técnicas que atendam os dimensionamentos destes

produtos e processos em determinadas condições de operação, tais como elevadas temperaturas e altos carregamentos.

Neste contexto, propõe-se neste trabalho a utilização do programa de simulação computacional nas análises ambientais, o qual pode trazer um diferencial para as empresas que pretendem implantar e/ou aperfeiçoarem seu Sistema de Gestão Ambiental, incluindo a análise de risco e a avaliação de desempenho ambientais, com o uso de indicadores de desempenho ambiental.

O programa ANSYS, a ferramenta de análise utilizada neste trabalho, tem se destacado na área de simulação, em especial pelas capacidades e aplicações desenvolvidas nos últimos anos, para atender às demandas tecnológicas, tais como: materiais compósitos (polímeros), explosões, escoamento de fluidos multifásicos (gases, líquidos e sólidos), dispersão de gases, combustão, concentrações de plumas que podem causar explosões, métodos de solução probabilísticos e de otimização de variáveis de projeto tais como dimensões, materiais e temperaturas entre outras.

É relevante também o uso da simulação computacional nos casos em que os produtos, processos, estruturas e equipamentos, entre outros objetos a serem testados, são muito complexos e operam em condições difíceis de serem reproduzidas em laboratório, tais como:

- Pela tecnologia envolvida, ajustes e calibrações necessárias;
- Por apresentarem riscos de acidentes durante os testes;
- Pelos altos custos, complexidade e longo tempo para reprodução do protótipo físico, tais como uma plataforma *offshore*, um navio, um reator nuclear e uma barragem entre outros;
- Pelas condições de operação a serem reproduzidas, tais como: rupturas de equipamentos, dutos e embarcações contendo substâncias, em alta temperatura e com alta pressão, rupturas de vasos de pressão devido a vazamentos e concentrações de gases inflamáveis (quando é necessário utilizar a substância real), que podem causar a destruição do equipamento, gerar altas temperaturas e causar incêndios entre outros acidentes.

As validações das análises numéricas podem ser efetuadas entre diferentes programas, com a utilização de diversos modelos e diferentes tipos de elementos finitos, dos mais simples aos mais complexos, como será descrito posteriormente.

A simulação pode se tornar um recurso tecnológico importante para as empresas, pois em relação ao protótipo físico, os custos e o tempo de análise são bem menores e a simulação de diferentes materiais, geometrias, calibrações e ajustes são fáceis de serem efetuados no programa.

Também é possível acompanhar o comportamento do modelo em cada etapa de carregamento, verificar o limite de operação com segurança e as sequências acidentais, do início do dano até a destruição do produto, falha ou descontrole de um processo e colapso da estrutura. Estes resultados podem ser utilizados nas análises de causas, conseqüências e vulnerabilidade.

Na Tabela 1 é apresentada uma comparação entre os desempenhos dos protótipos físico e virtual em testes para avaliação do comportamento de produtos e processos. Pode-se observar que o protótipo físico apresenta vantagens nos principais itens envolvidos nos testes.

Variáveis	Protótipo Virtual	Protótipo Físico
Custos de construção	Baixo	Alto
Reprodução de danos, acidentes e desastres ambientais	Sem limite	Limitada
Tempo de construção	Curto	Longo
Calibração e ajustes	Fácil, rápido	Difícil, complexa, lento
Precisão: resultados	Obtida com a convergência	Não é garantida em 1 teste
Perigos nos testes	Não existe	Diversos
Riscos ambientais/Acidentes	Não existe	Altos: explosões, intoxicações, contaminações, queimaduras, etc
Testes para mudanças: geometria e material, destruição do objeto	Curto prazo, baixo custo	Longo prazo, alto custo de construção de novos modelos
Verificação das causas e conseqüências dos danos e acidentes	Resultados obtidos em cada etapa de uma análise (sequências acidentais)	Somente resultado final ou execução de testes parciais para acompanhamento dos acidentes

Fonte: elaboração própria, 2010

Tabela 2.1 – Comparação entre os Desempenhos dos Protótipos Físicos e Virtuais em Testes para Avaliação de Produtos e Processos

Pelo exposto, pode-se estimar que os diagnósticos fornecidos na análise de simulação são relevantes na predição e prevenção de acidentes e desastres ambientais e podem ser úteis na análise de confiabilidade e de riscos ambientais, a verificação de suas causas e conseqüências, a

avaliação de desempenho ambiental e a melhoria do Sistema de Gestão Ambiental da empresa, como proposto neste trabalho.

2.4 OBJETIVOS

2.4.1 GERAL

Propor a utilização da análise de simulação computacional por meio do método de elementos finitos como uma ferramenta complementar para a previsão, análise, avaliação, controle, gerenciamento e mitigação de riscos e impactos ambientais, avaliação de desempenho ambiental e aperfeiçoamento do Sistema de Gestão Ambiental da organização.

2.4.2 ESPECÍFICOS

- Descrever os conceitos e as capacidades do programa de simulação computacional, que podem ser utilizadas para gerar dados e informações úteis na análise de risco e na avaliação de desempenho ambientais e no aperfeiçoamento do Sistema de Gestão Ambiental;
- Apresentar os benefícios, aplicações, características e procedimentos das análises de simulação computacional e os diversos resultados que podem ser fornecidos para a análise de risco e a avaliação de desempenho ambientais e para o aperfeiçoamento do Sistema de Gestão Ambiental;
- Especificar requisitos, características e comportamentos dos modelos virtuais e apresentar resultados das análises de simulação, em estudos de casos, que podem ser úteis na identificação das causas, efeitos e consequências dos acidentes, na prevenção e minimização de riscos e acidentes ambientais, na avaliação do desempenho ambiental e no aperfeiçoamento do Sistema de Gestão Ambiental;
- Definir os procedimentos de verificação e de validação dos resultados das análises de simulação visando fornecer dados mais precisos para a complementação da análise de risco e da avaliação de desempenho ambientais e para o aperfeiçoamento do Sistema de Gestão Ambiental.

2.5 HIPÓTESES

- H1: Os resultados da análise de simulação, que indicam as condições da integridade estrutural e da confiabilidade de estruturas, produtos ou processos, podem ser úteis na análise de risco ambiental;
- H2: Os resultados da análise de simulação de otimizações ou alterações efetuadas para a melhoria de desempenho em produtos ou processos, podem ser úteis na avaliação de desempenho ambiental e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental;
- H3: Os resultados da análise de simulação que indicam falhas ou danos em um objeto, com potencial para causar acidentes ambientais, podem ser úteis na análise de risco ambiental e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental;
- H4: A análise de simulação computacional permite a avaliação das causas e conseqüências dos danos em objetos, os quais podem gerar acidentes ambientais, fornecendo resultados úteis na análise de risco ambiental e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental;
- H5: A análise de simulação computacional permite a identificação das áreas de vulnerabilidade, fornecendo resultados úteis na análise de risco ambiental e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental.

2.6 DELIMITAÇÕES

As diretrizes e procedimentos das análises de simulação numérica, apresentados neste trabalho, são baseados no programa ANSYS, que utiliza o Método dos Elementos Finitos. Os resultados obtidos nas análises podem ser utilizados na análise de risco ambiental e no aperfeiçoamento do Sistema de Gestão Ambiental, relacionados à Norma ABNT NBR ISO 14001:2004, e à avaliação de desempenho ambiental, relacionada à Norma ABNT NBR ISO 14031:2004.

Os estudos de casos apresentados neste trabalho, com aplicações das análises de simulação computacional, estruturais e térmicas, cujos resultados podem ser utilizados na análise de risco e

na avaliação de desempenho ambientais e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental são executados com o Programa ANSYS.

2.7 LIMITAÇÕES

As pesquisas bibliográficas são efetuadas em bases de dados científicas, normas e livros técnicos e revistas científicas. Os estudos de casos técnicos com soluções de engenharia obtidas por meio da simulação computacional são trabalhos de consultoria executados pela autora desta dissertação e artigos pesquisados em anais de congressos e seminários de engenharia e em conferências internacionais sobre aplicações da simulação numérica na engenharia.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As pesquisas realizadas para a elaboração deste trabalho visam identificar aplicações da análise de simulação computacional em análise de risco e avaliação de desempenho ambientais e na implantação e/ou aperfeiçoamento do Sistema de Gestão Ambiental de uma organização.

Com os meios utilizados para efetuar a revisão bibliográfica desta dissertação, não foram encontradas referências técnicas nas quais o programa de simulação computacional, que utiliza modelos e o método de elementos finitos, tenha sido utilizado como ferramenta auxiliar em análise de risco e avaliação de desempenho ambientais ou na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental.

As normas ambientais ISO que definem requisitos para a implantação e/ou aperfeiçoamento de um Sistema de Gestão Ambiental e para a avaliação de desempenho ambiental de um SGA, de produtos, processos e atividades de uma organização não incluem como um requisito, a utilização das análises de simulação computacional.

A Instrução Técnica DECON 06/2007, no Item 1 do Anexo 1, Análise de Riscos, subitem 1.4.7 “Alcance dos Efeitos Físicos Danosos”, define que se deve determinar o alcance dos efeitos

físicos decorrentes dos cenários submetidos à análise de vulnerabilidade. Esse cálculo deve utilizar modelagens matemáticas conceituadas e as condições meteorológicas da região (FEEMA, 2007).

Como base para o estudo proposto, apresenta-se aqui a evolução da análise de risco e suas ferramentas, da análise de risco ambiental e das normas técnicas ambientais ISO ABNT NBR 14001 e 14031, que tratam da implantação e/ou melhoria de Sistema de Gestão Ambiental (SGA), da avaliação de desempenho ambiental do SGA, de produtos, processos e atividades.

Também é apresentada a evolução da simulação computacional, a qual é uma ferramenta de inovação tecnológica que pode ser utilizada no desenvolvimento e evolução do Sistema de Gestão Ambiental de uma organização e para analisar a significância dos seus aspectos e impactos ambientais (BVQI, 2000).

3.1 GESTÃO AMBIENTAL

Como parte da proposta desta dissertação está relacionada ao aperfeiçoamento do Sistema de Gestão Ambiental, incluem-se nesta revisão bibliográfica alguns conceitos sobre sistemas de gestão da qualidade e de gestão ambiental, os quais são abordados a seguir.

Segundo RUSSO e FOUTS (1997) apud ALBERTON (2003), Até a década de 70, nos países desenvolvidos, as empresas limitavam-se a evitar acidentes locais, e combater acidentes do trabalho. As respostas das organizações às questões ambientais eram de natureza tipicamente corretiva e constituíam-se, na instalação de equipamentos de controle da poluição nas saídas, como chaminés e redes de efluentes líquidos.

Segundo a autora, com os choques do petróleo, em 1973 e 1979, o controle ambiental deixou de ser apenas uma atividade de combate à poluição e passou a integrar-se nas práticas e processos produtivos como uma função da produção e do desenvolvimento, contribuindo para a redução de custos e passivos ambientais, melhoria das condições de trabalho e da imagem da empresa e facilitando a implantação de programas de qualidade. O princípio básico tornou-se o da prevenção, envolvendo a substituição de equipamentos, máquinas, materiais e recursos energéticos, o desenvolvimento de novos processos e produtos, o reaproveitamento e economia

de materiais e energia, a reciclagem de resíduos e a minimização da geração de poluentes e passivos ambientais.

Conforme BARBIERI (1997), nos anos 80, as tecnologias de prevenção da poluição começaram a focalizar as mudanças sobre produtos e processos, a fim de reduzir rejeitos e prevenir a contaminação do ambiente.

ALBERTON (2003) cita que no final da década de 80, a proteção ao meio ambiente deixou de ser somente uma exigência punida com multas e sanções, passando a se configurar num quadro de ameaças e oportunidades, em que as conseqüências passaram a significar a própria permanência ou saída do mercado já competitivo da época. O mercado de capitais também captou prontamente essa tendência e passou a considerar cada vez mais o aspecto ambiental em suas decisões de investimento, o que levou as organizações a integrarem o controle ambiental em sua gestão administrativa.

Segundo BOIRAL e SALA (1998), nos anos 90, a proteção ambiental deixou de ser uma função exclusiva da produção para tornar-se também uma função da administração, passando a ser contemplada na estrutura organizacional, interferindo no planejamento estratégico e tornando-se uma atividade importante na organização da empresa, tanto no desenvolvimento das atividades de rotina, como na discussão dos cenários alternativos, gerando políticas, metas e planos de ação.

Com esta perspectiva estratégica, iniciou-se o processo de redução dos custos por meio de uma produção mais limpa, aproveitando-se as oportunidades geradas pela valorização da consciência ambiental, por meio de diferenciação na produção e comercialização de produtos e embalagens de baixo impacto ambiental e do desenvolvimento de novas tecnologias para a solução dos problemas ambientais.

3.2 SISTEMAS DE GESTÃO AMBIENTAL

De acordo com MORROW e RONDINELLI (2002), muitas tecnologias de produção compatíveis com o meio ambiente têm sido desenvolvidas ou estudadas nas últimas décadas. No entanto, boas tecnologias sem um apropriado sistema de gestão ou um específico conjunto de leis para proteger

o meio ambiente, tendem a ser descartadas. Este cenário contribuiu para que as empresas começassem a desenvolver metodologias racionais para a gestão de todas as atividades concernentes aos aspectos do meio ambiente que integrassem em uma estrutura única as políticas de proteção, os programas e as práticas corporativas ambientais. Esta estrutura poderia ser entendida como um sistema de gestão ambiental.

Conforme ÁVILA (2006), em 1979, a ISO formou o TC 176, comitê técnico responsável por estudar e harmonizar todos os sistemas da qualidade existentes e criar uma Norma no campo da qualidade. Essa Norma deveria ser voluntária e igualitária. O resultado foi a publicação, em 1987, do conjunto de Normas ISO 9000 com o título de *Quality Management and Quality Assurance*. Desde sua publicação, as certificações segundo a ISO 9000 vêm crescendo em todo o mundo e se tornando, em algumas situações, diferenciais para a realização de negócios.

Segundo ALBERTON (2003), no início da década de 80, a filosofia TQM – *Total Quality Management* (Administração da Qualidade Total) nasceu como o resultado da busca frenética da indústria dos EUA por um sistema que direcionasse e corrigisse suas ações, até então guiadas por uma visão de curto prazo, e diminuísse o distanciamento entre as indústrias americana e japonesa, com uma visão empresarial sistêmica de médio e longo prazo. A TQM ajudou na integração dos assuntos ambientais ao cotidiano dos negócios e mostrou às lideranças empresariais que a administração ambiental proporciona uma oportunidade e não um problema.

De acordo com CULLEY (1998) apud ALBERTON (2003), no início da década de 90, os Três Grandes (*The Big Three*) da indústria automotiva americana (General Motors, Ford e Chrysler) desenvolveram outros requisitos para um Sistema de Qualidade, o QS 9000. O propósito do programa era harmonizar e padronizar a qualidade dos produtos de fornecedores, por meio da melhoria contínua, da confiabilidade do produto (prevenindo defeitos) e da redução de custos (reduzindo as variações e minimizando o desperdício). Os requisitos QS 9000 têm um nível mais alto de exigências se comparados às exigências internacionais gerais da ISO 9000, pois a indústria automobilística americana tem reconhecido a importância de incluir a administração ambiental na administração de qualidade.

Para PORTER e VAN DER LINDE (1995), a administração da qualidade total tem grande potencial para reduzir a poluição e levar a inovações e benefícios compensatórios. Em relação à melhoria da qualidade e desempenho ambiental, os autores indicam o uso do controle estatístico de processos para reduzir as variações e diminuir o desperdício.

A filosofia TQM também teve sua influência no desenvolvimento de outros sistemas de gestão, um dos quais é o TQEM - *Total Quality Environmental Management* (Administração da Qualidade Total Ambiental), criado pela *Global Environmental Management Initiative* (GEMI), uma ONG fundada em 1990 por 21 grandes empresas multinacionais. O TQEM tem a finalidade de buscar o aperfeiçoamento das atividades produtivas a partir da qualidade total, porém com o intuito de obter melhorias sob o ponto de vista ambiental.

Segundo FLORIDA (1999) e MILES E COVIN (2000) apud ALBERTON (2003), a abordagem TQEM, utiliza o sistema de prevenção combinado com os conceitos de gestão da qualidade, tais como análise do ciclo de vida, melhoria contínua e uma abordagem para redução dos impactos ambientais e custos totais, ao mesmo tempo em que aumenta o valor tanto para consumidores quanto para acionistas.

Os programas implementados pela EPA (*Environmental Protection Agency*), o EMAS (*Eco Management and Audit Scheme*), a ISO 14000 e outros programas de prevenção da poluição seguem a abordagem do tipo TQEM e estão tipicamente utilizando a política ambiental para ganhar algum tipo de vantagem competitiva baseada nos custos.

Segundo TINOCO e KRAEMER (2004) apud FERRON (2009), um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) pode ser definido como um conjunto de procedimentos para um melhor relacionamento com o meio ambiente, tendo por base um planejamento das atividades empresariais e visando à minimização ou a eliminação dos possíveis impactos ao meio ambiente, por meio de ações preventivas.

De acordo com HARRINGTON e KNIGHT (2001) apud FERRON (2009), um Sistema de Gestão Ambiental (SGA), quando estrategicamente implantado, pode trazer diversos benefícios econômicos e refletir-se tanto em ganhos de mercado como em redução de custos, além de

facilitar o acesso às fontes de recursos financeiros, principalmente os chamados financiamentos sustentáveis e a entrada nos mercados internacionais, sobretudo o europeu e norte-americano.

Para FREIMANN e WALTHER (2001) apud AVILÁ (2006), o sistema de gestão ambiental é uma estrutura padronizada, utilizada pelas empresas, para sistematicamente gerenciar as atividades que afetam o meio ambiente natural, por meio da integração de procedimentos e processos envolvendo treinamento, monitoramento e registros. Estas atividades englobam pessoas, instrumentos e ações com o propósito de coletar e processar dados que possibilitem informações ambientais para gerenciamento e tomada de decisão.

Segundo a definição da Norma ABNT NBR ISO 14050:2004, item 2.1, um SGA “é a parte do sistema de gestão global que inclui estrutura organizacional, atividades de planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos, processos e recursos para desenvolver, implementar, atingir, analisar criticamente e manter a política ambiental”.

Para GILBERT (1995) apud ALBERTON (2003), o objetivo principal de um SGA é controlar sistematicamente o desempenho ambiental, promovendo sua melhoria contínua. É constituído de procedimentos ambientais que estabelecem responsabilidades específicas e definem quando, onde e o que deve ser observado, para que as atividades sejam conduzidas em conformidade com as políticas ambientais estabelecidas, e integrado aos esforços existentes em outras áreas.

Algumas das motivações para a implantação de um sistema de gestão ambiental estão relacionadas à prevenção de potenciais impactos ambientais negativos, melhorias da conscientização ambiental dos empregados e atendimento de demandas de clientes. A projeção de uma melhor imagem corporativa e a expectativa de ampliação de mercado a partir desta imagem, também são apontadas como motivações importantes (MELO e VIEIRA, 2002; MORROW e RONDINELLI, 2002).

HADDAD et al. (2007) sugerem a utilização de um sistema de gestão integrado, segurança, ambiental e qualidade, o qual trás para a organização redução de custos com certificações, registros, auditorias, treinamentos, documentação e gerenciamento, sistematizando requisitos e indicadores de desempenho e promovendo uma larga análise crítica do sistema.

3.3 NORMAS DE SISTEMAS DE GESTÃO AMBIENTAL

De acordo com ALBERTON (2003), as diretrizes e princípios para uma boa gestão do meio ambiente foram estabelecidos e promovidos por muitas organizações nacionais e internacionais, tais como: a *International Chamber of Commerce* (ICC), o *Business Council for Sustainable Development* (BCSD), a *Confederation of British Industry* (CBI), a *Coalition for Environmentally Responsible Economies* (CERES), o *Global Environmental Management Initiative* (GEMI), a *Public Environmental Reporting Initiative* (PERI), a *International Network for Environmental Management* (INEM), a *The Japan Federation of Economic Organizations* (KEIDAREN), o *World Industry Council for the Environmental* (WICE), a *European Petroleum Industry Association* (EUROPIA), o *American Petroleum Institute* (API), a *British Standard Institution* (BSI), a *Prince of Wales' Business Leaders Forum* (PWBLF), a *Chemical Manufactures Association* (CMA) e a *International Standardization Organization* (ISO).

São apresentadas a seguir, de forma resumida, as principais Normas com suas características e princípios ambientais, os quais são iniciativas destinadas a estabelecer um padrão de gerenciamento ambiental aplicável por diferentes segmentos econômicos:

- *Responsible Care Program*, 1984: Consiste de princípios diretivos, seis códigos de práticas gerenciais, painel público consultivo e grupos de liderança. É voluntário e não certificável. É exigido pelos membros da *Chemical Manufactures Association*. No Brasil é coordenado pela ABIQUIM desde 1990;
- Modelo WINTER, 1989: Sistema integrado de administração com consciência ecológica, criado por George Winter na Alemanha. Consiste de vinte módulos integrados visando a facilitar a implementação do SGA. É voluntário e não certificável;
- *Coalition for Environmentally Responsible Economies* (CERES), 1989: Consiste de dez princípios diretivos que enfatizam a necessidade das organizações de proteger o planeta e agir de forma responsável em relação ao ambiente. É voluntário e não certificável;
- *Strategies for Today's Environmental Partnership* (STEP), 1990: Guia para a indústria de petróleo americana que possibilita um aprimoramento de sua performance ambiental, de saúde e de segurança. É voluntário e não certificável;

- *Eco-Management and Audit Scheme* (EMAS), 1993: Sistema de regulação ambiental que permite às indústrias da Comunidade Européia obter um registo publicado no jornal oficial da União Européia. Colaborou para determinação das condições de elaboração da Norma BS 7750. É certificável por meio da publicação no jornal oficial da União Européia;
- *British Standard Institution* (BSI), 1994: Especificação para o desenvolvimento, implementação e manutenção de um SGA para assegurar e demonstrar conformidade com as declarações da empresa quanto à política, objetivos e metas ambientais. É voluntário e certificável;
- *International Standardization Organization* (ISO), 1996: Norma ambiental internacional que especifica os requisitos relativos a um SGA, permitindo à organização formular sua política e objetivos que levem em conta os requisitos legais e informações referentes aos impactos ambientais significativos. É voluntário e certificável.

Segundo ALMEIDA (2008), no início da década de 90, surgiu o conceito de Sistema de Gestão Ambiental, formalizado pela *British Standard Institution* (BSI) na Norma BS 7750 – *Specification for Environmental Management Systems*. O sistema proposto na referida Norma, por sua vez, apóia-se nos conceitos de Gestão da Qualidade definidos na Norma BS 5750, que deu origem à série de Normas internacionais ISO 9000.

A Norma BS 7750 serviu de base para as Normas Ambientais da Série ISO 14000, em especial a ISO 14001:2004, um dos focos deste trabalho. Ambas serão detalhadas nos itens seguintes.

3.3.1 A NORMA BS 7750

Na década de 90, num momento em que as empresas questionavam-se sobre como gerenciar o relacionamento entre as atividades produtivas e o meio ambiente, a Norma de Gerenciamento Ambiental BS 7750, publicada pelo Instituto Britânico de Normalização (*British Standard Institution – BSI*), veio direcionar as organizações quanto às providências a serem adotadas.

Segundo MOURA (2004), a BS 7750 foi elaborada para compatibilizar as exigências com os regulamentos da União Européia, particularmente os especificados no EMAS, de forma a permitir que qualquer instalação industrial certificada por seu atendimento à Norma (a partir de

órgão certificador cujas credenciais sejam reconhecidas pelo país membro onde se localiza) seja também considerada apta à certificação pelos padrões da União Européia.

O trabalho na BS 7750 começou em 1991 com a formação de um comitê técnico no BSI, no qual inúmeras organizações empresariais, técnicas, acadêmicas e governamentais estavam representadas. A publicação da versão inicial foi em 1991, apenas para a fase de consulta pública. A versão oficial foi publicada no início de 1992 e testada em um programa piloto no Reino Unido, envolvendo cerca de 500 participantes, incluindo 230 organizações que implementaram a Norma, a qual foi revisada em 1994 (ALBERTON, 2003).

O BSI (*British Standardization Institution*), reconhecido internacionalmente pela elaboração da Norma BS 5750: Sistemas da Qualidade (que serviu de base para a Série ISO 9000), formulou a BS 7750 de tal forma que os princípios de gestão de Sistemas de Qualidade fossem compartilhados por ambas. Assim, segundo REIS (1995) apud ALBERTON (2003), as organizações que já implementaram um sistema de gestão compatível com a BS 5750 poderiam utilizá-lo como base para o SGA.

Trata-se de um documento importante para a gestão ambiental, pois serviu de referência para quase todos os sistemas de gestão ambiental existentes. Segundo GILBERT (1995), a Norma modificou o vocabulário da comunidade ligada à área do meio ambiente e introduziu um novo enfoque para a resolução de problemas ambientais, da auditoria ambiental à gestão ambiental, da identificação e resolução de problemas ‘a jusante’ à previsão e gerência de problemas ‘a montante’.

A Norma BS 7750: Especificações para Sistemas de Gestão Ambiental/1992 é composta de um único documento, numerado de modo a refletir sua associação com o padrão da Norma BS 5750 de Sistemas da Qualidade, destinada a gerentes de organizações de qualquer tamanho (GILBERT, 1995).

A BS 7750 não estabelece exigências absolutas para o desempenho ambiental, além do atendimento à legislação e Normas aplicáveis e de um compromisso para com a melhoria contínua do SGA, mas exige que as organizações formulem políticas, estabeleçam objetivos e disponibilizem as informações sobre efeitos ambientais significativos.

A Norma BS 7750 especifica os requisitos para o desenvolvimento, implantação e manutenção de sistemas de gestão ambiental que visem a garantir o cumprimento de políticas e objetivos ambientais definidos e declarados e expressa que o atendimento às exigências por ela formuladas não confere imunidade em relação às obrigações legais (CAMPOS, 2001 apud MELO, 2006).

Com o enfoque sistêmico da BS 7750, foi possível demonstrar que a abordagem macro da qualidade exige a inclusão das questões ambientais, que deixam de ser apenas um custo adicional, passando a ocupar um importante lugar entre os fatores de sucesso de um produto ou de uma empresa (REIS, 1995 apud ALBERTON, 2003).

Em setembro de 1996, os 15 países representativos da União Européia votaram em aceitar a Norma ABNT NBR ISO 14001 como o padrão europeu para gestão ambiental. Essa decisão resultou no abandono de outros padrões de gestão ambiental nacional na Europa, incluindo a BS 7750.

Porém, o impacto que a BS 7750 teve no desenvolvimento da Norma ISO 14001 não pode ser ignorado. A partir da BS 7750 passos concretos em direção à formulação de uma Norma ambiental internacional foram dados. As várias empresas, inicialmente as inglesas e posteriormente as européias, que implementaram os princípios e procedimentos por ela sugeridos alcançaram, com rapidez e eficiência, resultados altamente vantajosos, principalmente por meio da redução de conflitos (multas e penalidades) com órgãos públicos de controle ambiental, com as comunidades, com os sindicatos e com seus empregados. O padrão BS 7750 pode ser considerado como o ‘Pai’ do padrão ISO 14001 (CULLEY, 1998 apud ALBERTON, 2003).

3.3.2 A NORMA ABNT NBR ISO 14001

Como um dos focos deste trabalho é a certificação segundo o padrão internacional ABNT NBR ISO 14001:2004, este item abrange, além das características dessa Norma, algumas considerações sobre a *International Standardization Organization* (ISO) e o processo de estruturação das normas por tal organização, bem como o relacionamento das normas ambientais com as de qualidade.

A ISO foi fundada em 1947 para promover o desenvolvimento de padrões internacionais. É uma federação mundial, não-governamental, com sede em Genebra, na Suíça. Possui mais de 110 países participantes, entre eles o Brasil, cuja representante é a ABNT NBR. A *American National Standards Institute* (ANSI), o *British Standards Institute* (BSI) e a *Japan Standards Association* (JSA) são os representantes dos EUA, Reino Unido e Japão, respectivamente.

A ISO tem como objetivo propor normas que representem o consenso desses diferentes países para homogeneizar métodos, materiais e seu uso, em todos os domínios de atividades (tipicamente de natureza técnica), exceto no campo eletro-eletrônico, cuja responsabilidade é da *International Electrotechnical Commission* (IEC).

A adoção dos padrões ISO é voluntária. Porém, apesar dos países membros não possuírem a obrigação de adotar ou apoiar esses padrões em sua forma final, eles são desenvolvidos por meio de um processo de construção consensual, resultando dessa forma em padrões aceitáveis para a maioria dos países membros.

Os trabalhos da ISO são realizados por meio de Comitês Técnicos (TC), os quais são compostos por especialistas dos países membros, cada qual com responsabilidades específicas no âmbito do tema a ser padronizado (MOREIRA, 2001).

Antes da ECO-92, a ISO desenvolvia trabalhos relacionados com meio ambiente por meio de comitês independentes como ISO/TC 146 – Qualidade do Ar, ISO/TC 147 – Qualidade da Água e ISO/TC 190 – Qualidade do Solo, voltados à elaboração de normas técnicas de especificação de critérios e metodologias de medição de parâmetros (ALBERTON, 2003).

Em 1992, como consequência da Conferência da ONU de Meio Ambiente e Desenvolvimento, a ECO-92, foi proposta a criação de um grupo especial para a elaboração de normas relacionadas com o tema meio ambiente.

O *Strategic Advisory Group on the Environment* (SAGE), grupo criado em agosto de 1991, focalizando as preocupações levadas à Conferência, foi encarregado de estudar a necessidade e estrutura potenciais e de padrões internacionais, para administração ambiental, bem como propor as ações necessárias para um enfoque sistêmico de normalização ambiental e certificação. O

SAGE formou seis subcomitês para rever diferentes aspectos dos SGAs: sistema de gestão ambiental, auditoria ambiental, rotulagem ambiental, avaliação da desempenho ambiental, análise do ciclo de vida e termos e definições (MOURA, 2004).

Os compromissos assumidos pelos países durante a ECO-92, o sucesso da ISO 9000, a objetividade da BS 7750 e os trabalhos do SAGE levaram a ISO a assumir o encargo de formular uma norma universal de gerenciamento ambiental.

Ainda segundo MOURA, 2004, baseando-se nas recomendações e na estrutura proposta pelo SAGE, a ISO criou, em março de 1993, o ISO/TC 207 – Gestão Ambiental, com a incumbência de elaborar a Série ISO 14000. Este comitê é subdividido em seis Subcomitês internacionais e um grupo especial de trabalho (WG), sediados em países diferentes e designados cada um para desenvolver normas de assuntos específicos. Há também um grupo de integração com o TC 176, responsável pela formulação da ISO Série 9000. Cada Subcomitê é composto de representantes de vários países membros, sendo responsável pelo desenvolvimento de parte da norma, a qual, para aprovação final passa pelo TC 207 e finalmente pela própria ISO. Os comitês técnicos, tanto para a ISO 9000 como para a ISO 14000, têm sede no Canadá.

Em novembro de 1996 existiam 51 países participantes, 17 países observadores e 25 organizações coligadas envolvidas no desenvolvimento dos padrões ISO 14000, com participações variadas em cada Subcomitê.

Para ALBERTON (2003), um dos objetivos da ISO 14000 é homogeneizar a linguagem das normas ambientais regionais, nacionais e internacionais, agilizando assim as transações no mercado globalizado.

Segundo MOREIRA (2001), a Série ISO 14000 se divide em dois grupos de normas, conforme o objetivo:

1º. grupo: Normas voltadas para a avaliação do produto, abordando: o ciclo de vida do produto (ISO 14040 a 14043), a rotulagem ambiental (ISO 14020, 14022 a 14024), e os aspectos ambientais em normas de produtos (ISO *Guide* 64);

2º. grupo: Normas voltadas para a avaliação da organização, abordando: os sistemas de gestão ambiental (ABNT NBR ISO 14000, 14001, 14004 e 14010), o desempenho ambiental (ABNT NBR ISO 14031 e 14032) e a auditoria ambiental (ABNT NBR ISO 14010 a 14012, 14014 e 14015).

Os dois grupos de normas, de produto e de gestão, são independentes, ou seja, a adoção de uma norma não é pré-requisito para outra, sendo todas voluntárias. Porém, pode ser um diferencial perante os concorrentes e um atrativo para a sociedade e para aqueles que valorizam a proteção ao meio ambiente. A certificação ambiental é obtida por meio da Norma ABNT NBR ISO 14001:2004.

O Brasil, por intermédio do Grupo de Apoio à Normalização Ambiental (GANAA), criado em 1994 e vinculado à ABNT, vem participando ativamente da elaboração das normas ambientais, ao contrário do que ocorreu com as normas de Gestão da Qualidade.

Os princípios introduzidos pela Norma ABNT NBR ISO 14001 de Sistemas de Gestão Ambiental certamente não são novos. Muito do que está contido nesse padrão já foi estabelecido por outros, muitas vezes com maior clareza e rigor, como o *Responsible Care® Program*, o EMAS e os Princípios CERES.

A Norma ABNT NBR ISO 14001:2004 propõe um conjunto de orientações às empresas para a inserção da variável ambiental em seu sistema de gestão do negócio, determinando que a organização tenha controle sobre sua interação com o meio ambiente e sobre a geração dos impactos ambientais significativos, reais ou potenciais. Por meio da inserção de mecanismos de maneira integrada e sistemática e da disseminação da responsabilidade ambiental por toda a organização, visa ao controle e à melhoria contínua do desempenho ambiental.

Segundo ALBERTON (2003), a Norma ABNT NBR ISO 14001:2004 exige o compromisso da organização com a melhoria contínua e com o atendimento da legislação, mas não estabelece requisitos absolutos para o seu desempenho ambiental, os quais devem ser definidos pela empresa, a qual decide o nível de complexidade de seu SGA e em quais atividades, processos e produtos a norma é aplicável.

Segundo a Norma ABNT NBR ISO 14001:2004 a empresa deve melhorar continuamente, procurando utilizar a melhor tecnologia disponível, dentro das suas possibilidades de investimento, visando à evolução de seu desempenho ambiental. Assim, pode ocorrer que duas empresas com atividades semelhantes alcancem desempenhos ambientais diferentes, estando ambas em conformidade com a Norma.

A Norma ABNT NBR ISO 14001 se baseia no ciclo PDCA (*plan, do, check, act*), ou seja: planejar, executar, verificar e agir corretivamente). O ciclo PDCA pode ser utilizado tanto para manter um estágio alcançado e impedir o retorno para o patamar inferior como para promover melhorias, redefinindo metas. No item 4 e anexo A da Norma ABNT NBR ISO 14001:2004 fica clara a analogia ao ciclo PDCA quando são expostos os requisitos do Sistema de Gestão Ambiental da seguinte forma: planejamento, implementação e operação, verificação e ação corretiva e análise crítica pela administração.

Para MORROW e RONDINELLI (2002), a utilização de um padrão como a Norma ABNT NBR ISO 14001, auxilia as organizações a simplificar e integrar programas de proteção ambiental por meio de uma estrutura mais coerente. A implantação do sistema de gestão que atenda os requisitos da Norma ABNT NBR ISO 14001 facilita o desenvolvimento de um sistema de gestão voluntário que sinaliza aos *stakeholders* um comprometimento com a melhoria do desempenho e redução dos riscos ambientais.

Segundo MELNYK, SROUFE e CALANTONE, 2003a, 2003b apud ÁVILA (2006), a Norma ABNT NBR ISO 14001 é um padrão de processos e não de desempenho. Ela não direciona uma empresa a otimizar seu nível de desempenho ambiental, mas orienta no sentido da construção de um sistema voltado ao alcance de objetivos ambientais. O pressuposto básico desta abordagem é que implementando melhorias ao longo dos processos de fabricação, a empresa desenvolveria melhores práticas de gestão ambiental e, como consequência, melhoraria seu desempenho.

Conforme RONDINELLI e VASTAG (2000) apud ÁVILA (2006), as empresas utilizam a Norma ABNT NBR ISO 14001:2004 de duas formas. Algumas documentam seu sistema de gestão ambiental e se declaram possuidoras de um sistema de gestão que atende os requisitos da

Norma. Outras organizações optam por um processo de certificação oficial por meio de auditoria externa registrada

De acordo com MOURA (2004), a Norma ABNT NBR ISO 14001:2004 define que a organização deve estabelecer e manter procedimentos para identificar os aspectos ambientais de suas atividades, produtos ou serviços que possam ser controlados e sobre os quais se presume que a mesma tenha influência, a fim de determinar aqueles que tenham ou possam ter impactos significativos sobre o meio ambiente.

Para o autor, aspectos ambientais são todos os elementos das atividades de uma organização, processos, produtos ou serviços, que podem interagir com o meio ambiente, tais como: matéria-prima, consumo de água e energia, emissões atmosféricas e de efluentes líquidos, geração de ruído, incêndios e explosões entre outros. A identificação destes aspectos é importante para a realização da avaliação de desempenho ambiental da organização.

A organização deve assegurar que os aspectos relacionados aos impactos significativos sejam considerados na definição de seus objetivos ambientais.

3.4 ANÁLISE DE RISCOS

Segundo MORIATY e ROLAND, 1983 apud VINCOLI, 2006, até os anos 40 os projetistas de sistemas e os engenheiros utilizavam o método de “tentativa e erro” para elaborar projetos com segurança. Os equipamentos operavam até apresentar problemas ou se romperem, causando acidentes. A partir dos anos 50, o programa aeroespacial contribuiu para o crescimento de projetos de sistemas mais seguros. No início dos anos 60, um dos primeiros sistemas desenvolvidos, incluindo um programa de segurança, foi o *Minuteman Intercontinental Ballistic Missile* (ICBM).

De acordo com VINCOLI (2006), em julho de 1969, a *U.S. Department of Defense* (DOD) formalizou os requisitos de segurança de sistemas publicando o MIL-STD-882 – *System Safety Program Requirements*. Desde então, a NASA (*U.S. National Aeronautics and Space Administration*) desenvolveu programas e aprimorou a segurança de sistemas, especialmente após

o desastre da *Challenger* em 1986 e da perda do Columbia em 2003, com o propósito de reduzir riscos de falhas e acidentes.

Segundo CAMACHO (2004), um marco no desenvolvimento de uma metodologia que conceituou e avaliou o risco ao homem devido às operações das plantas nucleares, no início da década de 70, foi o Relatório WASH 1400 (USAEC, 1975), um guia de procedimentos para avaliação probabilística de segurança, a ser utilizado como instrumento de avaliação da segurança destas plantas nucleares. Em 1978, foi conduzido um estudo abrangente envolvendo instalações não nucleares no Reino Unido, que deu origem ao Relatório CANVEY.

O conceito de risco definido no WASH 1400 está associado a dois outros conceitos: de um lado a consequência de um dado cenário acidental e do outro lado, a chance de que este cenário ocorra. O risco é definido como sendo o produto da consequência de um cenário acidental, pela sua respectiva frequência de ocorrência. Neste caso, o cálculo do risco utiliza informações de duas áreas distintas do conhecimento. De um lado os chamados modelos de consequência e vulnerabilidade e do outro a engenharia da confiabilidade, que serão descritos em itens seguintes.

Em 1982 foi realizado um estudo abrangente de avaliação de perigos envolvendo instalações não nucleares em Rijnmond, localizada no Delta do Reno entre o Rotterdam e o Mar do Norte, o Relatório RIJNMOND.

Em 2000 foi desenvolvido pelo Instituto Americano de Engenheiros Químicos – AIChE, o Guia de Procedimentos (*Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*) para avaliação dos riscos relacionados à segurança das plantas de processo em geral.

A Análise de Risco constitui um importante instrumento para a identificação de riscos em uma unidade produtora ou em uma determinada atividade. A análise consiste no exame sistemático de uma instalação industrial (projeto novo ou unidade existente) com o objetivo de identificar os riscos presentes no sistema e fornecer informações sobre as ocorrências potencialmente perigosas e suas possíveis consequências (MEYER, 2005).

De acordo com GLASMEYER (2006), o estudo de Análise de Risco deverá compreender as seguintes etapas:

- Caracterização do empreendimento e da região;
- Identificação de Perigos e consolidação de hipóteses acidentais;
- Estimativa dos efeitos físicos (danos e perdas);
- Análise de Vulnerabilidade para todos os cenários de risco identificados;
- Estimativa de frequências;
- Estimativa e Avaliação de Riscos;
- Gerenciamento de Riscos.

Segundo a FEPAM (2001), o risco industrial é igual à intensidade de perigo dividido pela quantidade de salvaguardas, sendo que perigo pode ser representado pela quantidade de material perigoso capaz de ser liberado acidentalmente para o meio e as salvaguardas são combinações de fatores que tendem a minimizar os efeitos danosos de liberações acidentais. O principal fator de salvaguarda que deverá ser considerado para fins de classificação são a distância entre o ponto de liberação do material perigoso e a população.

Para atividades de categoria de nível de risco 4, de acordo com a FEPAM (2001), é requerida a análise quantitativa de riscos (AQR) das instalações, com as seguintes etapas:

- Objetivos e abrangência do estudo;
- Informações gerais sobre a região onde se localiza a atividade;
- Descrição técnica dos sistemas e das instalações em geral;
- Identificação dos Eventos Iniciadores;
- Avaliação da frequência de ocorrência dos cenários;
- Análise de Vulnerabilidade;
- Avaliação dos Riscos;
- Identificação de medidas para redução dos riscos;
- Reavaliação dos riscos considerando-se a implementação das medidas;
- Discussão sobre eficiência ou não das medidas.

Segundo LEES (1996) apud CAMACHO (2004), os modelos de consequência e vulnerabilidade servem para avaliar, no caso de um acidente, a área atingida por um nível particular de efeito físico bem como a parcela dos recursos (pessoas, estruturas, meio ambiente em geral) que sofrerá

um tipo particular de dano. É a determinação de uma espécie de resposta dos recursos, aos efeitos físicos submetidos.

De acordo com HENLEY e KUMAMOTO (1996) apud CAMACHO (2004), a engenharia de confiabilidade permite avaliar o desempenho de componentes, equipamentos ou sistemas de uma planta, no cumprimento de suas missões. As técnicas de engenharia de confiabilidade, tais como árvores de eventos e árvores de falhas, permitem determinar a chance de ocorrência e a frequência de ocorrência dos cenários acidentais.

Nos últimos anos muitas técnicas e métodos usados para aperfeiçoar as tarefas dos sistemas de segurança têm evoluído com o objetivo de identificar, eliminar ou controlar perigos e reduzir riscos a um nível aceitável nas operações dos sistemas.

Seguem alguns conceitos de riscos com diferentes visões de seus autores.

Na visão BERNSTEIN (1997) apud MEYER (2005), a palavra risco é uma derivação italiana antiga para *risicare*. Seu significado resume-se a uma expressão do pensamento que muito tem a ver com a evolução social, científica e tecnológica do Homem: *ousar*. Sob esta raiz, o risco vem a ser uma “opção” da humanidade e não um “destino” divinamente traçado.

Para BASTIAS (1977) apud MEYER (2005), risco é uma ou mais condições de uma variável com potencial suficiente para degradar um sistema, interrompendo e/ou ocasionando o desvio das metas de maneira total ou parcial, e/ou aumentando os esforços programados em termos de pessoal, equipamentos, instalações, materiais e recursos financeiros entre outros aspectos.

Segundo ANSELL, J. e WHARTON, F. (1992) apud MEYER (2005), o risco está associado a uma falha de um sistema, sendo a possibilidade desta falha, usualmente entendida em termos de probabilidade. No entanto, os autores preferem trabalhar com a possibilidade de falha de um sistema ao invés da probabilidade, alegando que a visão probabilística somente se preocupa com a ocorrência de um evento dentro de uma população, enquanto que, ao analisar a possibilidade de falha, passa a preocupar-se com um evento em particular.

De acordo com GLASMEYER (2006), para a quantificação de riscos, ou seja, a sua expectativa, faz-se necessário a introdução de dados provenientes da teoria das probabilidades, uma vez que as falhas e defeitos em equipamentos ou instalações são conseqüências de uma complexa interação de seus componentes individuais.

Segundo MOURA (2004), o risco reflete a incerteza associada a um perigo, com um evento imaginário ou com a possibilidade de acontecer no futuro, que cause uma redução de segurança. É a probabilidade de perda ou danos em pessoas, sistemas e equipamentos em um determinado período de tempo, como resultado de uma situação de perigo.

Para o autor, o risco é função da probabilidade ou da freqüência de ocorrência de um acidente e de um dado tipo de dano resultante do acidente, ou seja, a magnitude das conseqüências. Em geral, há uma tendência a associar o risco mais à probabilidade de ocorrência do evento do que às conseqüências, embora o correto seja associar as duas variáveis.

De acordo com MOREIRA (2001), freqüência e probabilidade são fatores excludentes entre si, pois se a análise se refere a um aspecto que ocorre efetivamente, avalia-se sua freqüência e se a análise se refere a um risco, cujo evento pode ou não ocorrer, avalia-se sua probabilidade. Na visão clássica a probabilidade é uma freqüência relativa.

3.5 ANÁLISE DE RISCO AMBIENTAL

De acordo com FILHO e NEWMAN, 2001 apud ALMEIDA, 2008, o estudo de risco ambiental apareceu como disciplina formal nos Estados Unidos entre 1940 e 1950, paralelamente ao lançamento da indústria nuclear e também para a segurança de instalações (“*safety hazard analysis*”) de refinamento de petróleo, indústria química e aeroespacial.

Segundo GLASMEYER (2006), com o aprimoramento das atividades industriais, especialmente a partir da década de 70, ocorreu a necessidade do aperfeiçoamento de instalações de processo, principalmente em indústrias químicas e petroquímicas, que passaram a demandar a utilização de novos produtos e fontes de energia cada vez mais complexos, maiores temperaturas e pressões de

trabalho dos equipamentos, operações em regime de fluxo contínuo, aumento de interligação entre processos e outros fatores que agravaram as condições de risco das mesmas.

Como decorrências destes novos riscos, denominados riscos tecnológicos, diversos acidentes passaram a ser registrados, muitos dos quais apresentando conseqüências extremamente graves aos trabalhadores, às comunidades vizinhas a estas instalações e ao próprio meio ambiente.

Inicialmente estas circunstâncias foram assimiladas como conseqüências naturais do próprio progresso que a atividade industrial vinha experimentando, sem que suas reais causas merecessem uma análise mais apurada.

Entretanto, a magnitude destes acidentes despertou a preocupação da comunidade científica e das autoridades responsáveis pela regulamentação de atividades operacionais, as quais passaram a discutir mecanismos destinados à adequada gestão de riscos, em especial para instalações onde sejam encontrados riscos de acidentes de grandes proporções.

A partir destas discussões e estudos, foram estabelecidos, inicialmente na Europa e seqüencialmente nos Estados Unidos, requisitos regulatórios para a prevenção de acidentes em Instalações de Riscos Maiores.

De acordo com GLASMEYER (2006), as primeiras discussões efetivas sobre o tema risco ambiental ocorreram no início da década de 1970, conduzidas por grupos preocupados com a questão da irreversibilidade de danos ao meio ambiente, causados por determinadas atividades econômicas, em especial oriundas de atividades industriais. O termo Risco Ambiental passou a ser relacionado aos danos causados pelo homem ao ambiente natural, por meio da poluição e da exaustão de recursos naturais.

Segundo a USEPA (1989), a análise de risco ambiental era originalmente associada ao estudo dos riscos toxicológicos a que os humanos estariam expostos devido à presença de substâncias artificiais no ambiente. Entretanto, esta análise passou a incorporar os riscos que as atividades humanas impõem ao ambiente como um todo, incluindo-se os riscos aos próprios seres humanos. Esta interpretação pressupõe uma visão mais ampla da realidade, onde os humanos fazem parte do que se denomina ambiente, evitando a tradicional cisão entre sociedade humana e natureza.

Em 1972, na primeira Conferência Mundial sobre o Meio Ambiente das Nações Unidas, ocorrida na Suécia, a questão dos impactos negativos ao meio ambiente provenientes das atividades humanas conduziu à criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) no qual é dada grande ênfase a questão da gestão de riscos ambientais.

Segundo HADDAD et al. (2009), no Brasil, a preocupação com a segurança ambiental e de pessoas próximo a indústrias, cresceu a partir de 1981, com a aprovação da Lei 6.938/1981, que determina que toda nova instalação deve apresentar um estudo de suas vulnerabilidades e licença para operar.

Em 1992, na Conferência RIO 92 o risco ambiental passou a ser objeto central de debate, com a formalização do Princípio da Precaução como mecanismo destinado a orientar a tomada de decisões em relação a riscos introduzidos pelas atividades humanas ao meio ambiente. Este princípio compreende a garantia contra riscos que, de acordo com o estado atual do conhecimento, ainda não possam ser identificados (FOSTER, 2002 apud GLASMEYER, 2006).

Segundo MOURA (2004), a realização de análise de riscos ambientais e estudo de confiabilidade das plantas ou instalações industriais, tem-se revelado como uma ferramenta interessante no auxílio à determinação de impactos ambientais em potencial. Pode identificar ações preventivas e preparar respostas às emergências. Os órgãos ambientais têm estimulado a sua realização, sobretudo as análises quantitativas, que mostram, em termos numéricos (probabilísticos), os riscos ambientais, retirando um pouco o caráter subjetivo que existe na análise qualitativa.

O autor alerta para o fato de que ao se realizar a análise de risco ambiental deve-se refletir sobre as seguintes variáveis:

- A gravidade da consequência do evento ou impacto ambiental, ou severidade, que dará uma graduação das consequências, desde a morte de pessoas e elevados danos ambientais até consequências desprezíveis para pessoas e o meio ambiente, na ocorrência do evento ou do impacto ambiental considerado;
- A probabilidade ou frequência de ocorrência de um determinado impacto ambiental. A frequência é avaliada quando se trata de um impacto que ocorre com uma certa constância (por exemplo, o lançamento de um determinado efluente industrial em um curso d'água) enquanto a

probabilidade considera os impactos potenciais, que normalmente não ocorrem, mas para os quais existe uma chance de que ocorra (por exemplo, o rompimento de um tanque contendo amônia, cujo vazamento poderia contaminar um curso d'água próximo).

De acordo com MOURA (2004), a empresa deve definir uma prioridade para a solução dos inúmeros impactos ambientais que podem ser identificados durante a implantação do Sistema de Gestão Ambiental. Para esta priorização, o autor sugere a utilização da Matriz de Risco que é definida pelas categorias da gravidade (severidade: I, II, III e IV) das consequências dos eventos ou impactos ambientais no eixo horizontal e pelo nível da frequência ou probabilidade de ocorrência destes impactos no eixo vertical (frequências: A, B, C, D e E).

Segundo o autor, as categorias de gravidade das consequências são definidas para indicar uma medida qualitativa do pior evento que esteja ocorrendo ou que tenha risco de ocorrer, resultante de erros do operador, condições ambientais, projeto e/ou procedimentos inadequados ou falhas e funcionamento inadequado de sistemas, subsistemas ou componentes. As denominações e níveis das categorias são:

- Catastrófica (I): perigo à vida de pessoas ao redor da área, como resultado dos produtos e processos envolvidos, riscos elevadíssimos para o meio ambiente;
- Crítica (II): ameaça à saúde das pessoas ao redor da área, prejuízo sério ao meio ambiente em casos de acidentes, não conformidade com requisitos legais, consumo significativo de recursos naturais;
- Marginal (III): não conformidade com requisitos internos (normas), prejuízo moderado ao meio ambiente, não conformidade com a política ambiental da empresa, possível prejuízo à reputação da empresa, consumo moderado de recursos naturais;
- Desprezível (IV): impacto baixo ou muito baixo sobre o meio ambiente, evento dificilmente detectado.

Ainda segundo MOURA (2004), a frequência ou probabilidade de ocorrência de impactos ambientais é determinada por pesquisa, análise e avaliação do desempenho histórico do sistema (ou de sistemas semelhantes), podendo ser descrita em ocorrências reais ou potenciais por unidade de tempo, evento, população, itens ou atividades. As denominações e os níveis de frequência são:

- Freqüente (A): ocorre freqüentemente ou tem alta probabilidade ou ocorre permanentemente quando iniciada a atividade;
- Provável (B): Ocorrerá várias vezes na vida do sistema ou do item;
- Ocasional (C): Ocorrerá algumas vezes na vida do sistema ou do item;
- Remota (D): Não se espera que ocorra (embora haja alguma expectativa), ao longo da vida do sistema ou do item;
- Improvável (E): Pode-se assumir que não irá ocorrer, ao longo da vida do sistema ou do item.

Para cada combinação da freqüência ou da probabilidade de ocorrência com a gravidade das consequências, é atribuído um valor. MOURA (2004) sugere as seguintes classificações e valores para os efeitos destas combinações:

- Crítico (valor igual ou superior a 9): situações de alta gravidade com probabilidade de ocorrência considerada alta que são condições inaceitáveis. Neste caso, deverão ser tomados cuidados mais expressivos, com ações para gerenciar os riscos e modificar os sistemas;
- Significativo (inferior a 9 e igual ou superior a 6): idem ao anterior
- Reduzido: (inferior a 9 e igual ou superior a 4): situações em que é prudente realizar ações de gerenciamento de risco
- Marginal (inferior a 4): idem ao anterior

Os impactos ambientais com os maiores valores dos efeitos devem ser selecionados e priorizados na análise de risco ambiental.

De acordo com ALMEIDA (2008), a avaliação de riscos ambientais tem como principal vantagem fornecer informações sobre a tipologia de um acidente em potencial, facilitando dessa forma, a implementação de ações preventivas que minimizem a possibilidade de medidas mitigadoras, caso ocorra o acidente.

Seguem alguns conceitos de risco ambiental, com diferentes visões de seus autores.

Segundo a NZEPA (1991) apud CAMACHO (2004), o risco ambiental é o produto da freqüência do cenário acidental pela respectiva consequência. A quantificação das consequências deve considerar não apenas o dano à integridade física direta, mas também avaliações de natureza

ecológica e econômica, entre outras, dos efeitos adversos provocados pelas liberações acidentais no ambiente.

De acordo com WESSBERG et al. (2008), o risco ambiental é aquele cujas consequências têm efeitos para a saúde humana, as condições de vida e ambiente de vida, o solo, as águas superficiais e subterrâneas, o ar, o clima, a flora, a fauna, bem como a biodiversidade, a estrutura das comunidades, edifícios, paisagem, paisagem urbana, patrimônio cultural e toda a interação entre esses elementos.

A Análise de Risco Ambiental engloba as seguintes etapas:

- Definição do escopo da análise: objetivos, limites, conjunto de dados e informações;
- Identificação, classificação e priorização dos aspectos e impactos ambientais;
- Definição das frequências ou probabilidades de ocorrência de cenários de acidentes ambientais;
- Análise de Consequências (perdas e/ou danos);
- Análise de Vulnerabilidade;
- Cálculo dos Riscos Ambientais (probabilidades e consequências);
- Avaliação dos Riscos Ambientais;
- Gerenciamento dos Riscos Ambientais: prevenção (redução das frequências ou probabilidades) e proteção (redução de consequências) contra os riscos ambientais.

O controle e redução dos riscos ambientais fazem parte do gerenciamento ambiental de riscos.

Riscos tecnológicos ambientais são todos os problemas relativos aos contaminantes ambientais e que estão, de uma maneira ou de outra, associados ao crescente processo de industrialização. Este tipo de risco vem ocorrendo desde o final do século passado, em que ao lado do incremento das pesquisas, do desenvolvimento e da difusão de novas tecnologias, os processos de produção e seus produtos ocasionam um aumento no risco de acidentes, causando danos aos ecossistemas e à saúde do homem (BERGER, 1982).

3.6 ANÁLISE DE RISCO AMBIENTAL E A NORMA ABNT NBR ISO14001

Neste trabalho, uma das proposições é a utilização da análise de simulação como uma ferramenta de auxílio à organização, na avaliação dos aspectos e impactos ambientais, mencionados na Norma ABNT NBR ISO 14001:2004 . Estes aspectos e impactos podem ser identificados com o auxílio da análise de risco ambiental e modelados na análise de simulação computacional.

De acordo com BVQI (2000), a avaliação de risco ambiental, embora não seja um requisito direto da Norma ABNT NBR ISO 14001:2004, pode ser uma ferramenta útil para o atendimento de alguns dos seguintes requisitos da Norma:

“- Item 4.3.1 Aspectos Ambientais:

A organização deve estabelecer, implementar e manter procedimento(s):

- a) Identificar os aspectos ambientais de suas atividades, produtos e serviços, dentro do escopo definido do seu SGA, que a organização possam influenciar, levando em consideração os desenvolvimentos novos ou planejados, as atividades, produtos e serviços novos ou modificados;
- b) Determinar os aspectos que tenham ou possam ter impacto(s) significativo(s) sobre o meio ambiente (isto é, aspectos ambientais significativos).”

“- Item 4.4.6 Controle Operacional

A organização deve identificar e planejar aquelas operações que estejam associadas com os aspectos ambientais significativos, identificados de acordo com sua política, objetivos e metas ambientais para assegurar que elas sejam realizadas sob condições específicas por meio de:

- a) Estabelecimento, implementação e manutenção de procedimento(s) documentado(s), para controlar situações onde sua ausência possa acarretar desvios em relação à sua política e aos objetivos e metas ambientais;
- b) Determinação de critérios operacionais no(s) procedimento(s);
- c) Estabelecimento, implementação e manutenção de procedimento(s) associado(s) aos aspectos ambientais significativos identificados de produtos e serviços utilizados pela organização, e a

comunicação de procedimentos e requisitos pertinentes a fornecedores, incluindo-se prestadores de serviço.”

“- Item 4.4.7 Preparação e Resposta à Emergência

A organização deve estabelecer, implementar e manter procedimento(s) para identificar situações potenciais de emergência e acidentes que possam ter impactos sobre o meio ambiente e sobre como a organização responderá a estes.

A organização deve responder às situações reais de emergência e aos acidentes, e prevenir ou mitigar diversos impactos ambientais associados.

A organização deve periodicamente analisar e, quando necessário, revisar seus procedimentos de preparação e resposta à emergência, em particular após a ocorrência de acidentes ou situações emergenciais.

A organização deve também periodicamente testar tais procedimentos, quando exequível.”

“Item 4.5.1 Monitoramento e Medição

A organização deve estabelecer, implementar e manter procedimento(s) para monitorar e medir, regularmente as características principais de suas operações que possam ter um impacto ambiental significativo. O(s) procedimento(s) devem incluir a documentação de informações para monitorar o desempenho, os controles operacionais pertinentes e a conformidade com os objetivos e metas ambientais da organização.

A organização deve assegurar que equipamentos de monitoramento e medição calibrados ou verificados sejam utilizados e mantidos, devendo-se reter os registros associados.”

Segundo BVQI (2002), considerando os itens da Norma citados acima, a determinação e a avaliação dos aspectos ambientais significativos é a chave para a criação de um completo SGA. Os aspectos ambientais, definidos no item 3.5 são as causas dos impactos ambientais, os quais são as conseqüências advindas destes aspectos. A significância dos mesmos é designada pela

organização a partir da análise de alguns fatores entre os quais, o risco, que é considerado como qualquer aspecto que possa ocasionar danos à saúde, propriedade ou ao meio ambiente.

De acordo com MOURA (2004), após a identificação dos aspectos e impactos ambientais, é necessário avaliar situações possíveis de ocorrerem, as quais não ocorrem durante situações normais do processo produtivo, e situações de risco, que na eventualidade de acidentes poderiam gerar impactos catastróficos, com graves conseqüências para pessoas e para o meio ambiente.

As avaliações das situações de risco se fazem por meio do Gerenciamento dos Riscos, que segundo MORGADO (2002) é uma ciência que permite ao homem conviver de maneira mais segura com os riscos a que estão expostos. Tem a função de proteger os seres humanos, seus recursos materiais e o meio ambiente. Em uma organização, um programa de gerenciamento de risco tem o objetivo de identificar, analisar e avaliar os riscos existentes e assim decidir como esses serão tratados.

3.7 ANÁLISE DAS CONSEQUÊNCIAS

Segundo ERICSON (2005), esta metodologia foi desenvolvida nos Laboratórios Nacionais CCA RISO, na Dinamarca, na década de 70, especialmente para auxiliar nas análises de risco e de confiabilidade de usinas nucleares em países escandinavos.

CROWL e LOUVAR(2001) apud GLASMEYER (2006), indicam que os métodos de Avaliação de Riscos devem incluir não somente a Identificação de Incidentes, mas também a análise de suas conseqüências. Enquanto a primeira descreve “como” os eventos podem acontecer, a segunda deve identificar a expectativa de danos esperados em sua decorrência, incluindo possíveis lesões e perdas de vidas, danos ao meio ambiente, materiais e outros decorrentes da paralisação de atividades.

Segundo GALVÃO e NEWMAN (2001), tomando-se por base as hipóteses acidentais definidas na fase de identificação dos riscos, cada uma delas deverá ser estudada em termo das possíveis conseqüências que podem ser ocasionadas por esses eventos, mensurando-se, também, os impactos e danos causados.

Segundo KIRCHHOFF (2004), a análise de conseqüências envolve atividades que tentam relacionar as fontes de perigo com os receptores potenciais, tais como:

- Caracterização da quantidade, forma e taxa de material e energia liberadas para o meio ambiente;
- Estimativa, por meio de medições e/ou modelagem, do transporte de materiais e propagação de energia pelo meio ambiente, na direção dos receptores de interesse;
- Avaliação dos efeitos na saúde e segurança relacionados aos níveis de exposição projetados, especialmente no que se refere às concentrações atmosféricas;
- Identificação dos impactos ambientais;
- Estimativa de perdas e danos à propriedade e outros impactos econômicos.

Segundo MEYER (2005), a análise de conseqüência busca a estimativa das áreas potencialmente sujeitas aos efeitos físicos danosos (sobre pressão, radiação térmica e nuvem de gases tóxicos) de liberações acidentais de substâncias perigosas ou de energia descontrolada. O objetivo principal é definir a extensão da área no entorno das instalações industriais que pode estar sujeita aos efeitos de possíveis acidentes, considerando as condições ambientais predominantes da região.

Ainda conforme a autora, a metodologia de uma análise de conseqüência consiste na aplicação de modelos matemáticos com suporte de computação para quantificar os efeitos dos possíveis acidentes. Estes efeitos físicos possuem o potencial de ocasionar danos às pessoas, às instalações e ao meio ambiente e sua extensão é proporcional à intensidade do efeito físico causador do dano. Os cálculos permitem dimensionar o alcance dos impactos dos acidentes no espaço da instalação industrial e de sua vizinhança.

De acordo com DUARTE, 2002 apud MEYER, 2005, os dados utilizados para o cálculo são: características dos equipamentos, parâmetros de operação e condições do ambiente (dados meteorológicos, topografia, etc). A partir desses dados é possível saber a que distância os efeitos do acidente se farão sentir, com que intensidade e em quanto tempo.

Segundo CAMACHO (2004), para a avaliação das áreas vulneráveis, a primeira etapa é a “caracterização do cenário de acidente”, que consiste na apresentação de todas as condições físicas e hipóteses necessárias para a determinação dos efeitos físicos do acidente, tais como o

produto vazado, a localização do vazamento na instalação e as suas condições físico-químicas no momento do vazamento. Na segunda etapa, aplicam-se os modelos de cálculo, que permitem estimar uma variada gama de eventos acidentais, obtendo-se assim a delimitação das áreas que poderão ser atingidas por cada um dos efeitos físicos de interesse. Pode-se determinar a quantidade de produto que é liberada para o ambiente durante um certo tempo (denominada “taxa de emissão”), e em seguida determinar a evolução espacial e a temporal desses efeitos.

Conforme DUARTE (2002) apud MEYER (2005), os cálculos são realizados em modelos de espalhamento de líquidos sobre superfícies de corpos d’água, de misturas e diluições, de dimensionamento de chama, de espalhamento de líquidos de baixa e alta viscosidade, de espalhamento de substâncias criogênicas, gases com baixa temperatura de ebulição, sobre corpos d’água e evaporação das mesmas, de espalhamento e resfriamento de substâncias químicas de alta pressão de vapor, de mistura e diluição de substâncias químicas de alta pressão de vapor (substâncias altamente solúveis em água) e de evaporação de líquidos com temperatura de ebulição abaixo da temperatura ambiente.

Segundo o autor, pode-se também utilizar modelos secundários que permitem avaliar a intensidade e o alcance espacial dos efeitos conforme as características do acidente. De modo geral, os submodelos permitem caracterizar os seguintes eventos: ignição, explosão, “*flash fire*”, incêndio em poça e vazamento de gases tóxicos. O espaço definido pelos modelos sobre o qual, em algum grau, deve haver impacto do acidente, é denominado “espaço vulnerável”.

De acordo com PETROBRAS (1991) apud MEYER (2005), as conseqüências dos acidentes são estimadas com base nos resultados das análises de vulnerabilidade e de conseqüências.

Para MEYER (2005), as análises de vulnerabilidade e de conseqüências fornecem informações aplicáveis ao planejamento de controle de emergências, com indicações das áreas internas e externas que são afetadas pelos impactos do acidente. Estas áreas devem ser objeto de planejamento de medidas para proteção, a fim de se impedir a ocorrência de efeitos negativos sobre os trabalhadores (espaço interno) e sobre a população vizinha (espaço externo).

3.8 ANÁLISE DE VULNERABILIDADE

De acordo com GLASMEYER (2006), empreendimentos que apresentem Índice de Risco igual a 3 devem preparar e submeter aos órgãos responsáveis pelo licenciamento ambiental, a Análise de Vulnerabilidade, baseada em critérios determinísticos com dados relativos à área do entorno, considerando populações e demais áreas sensíveis ao cenário de riscos mais crítico (maior Índice de Risco).

Para o autor, o resultado da Análise de Vulnerabilidade deverá ser apresentado sob a forma de mapas da região, com destaque para o layout da instalação analisada, sobre a qual seriam traçadas as curvas demarcatórias das áreas de vulnerabilidade identificadas para os efeitos decorrentes de emissões tóxicas, incêndios ou explosões.

Ainda segundo GLASMEYER (2006), para a delimitação de áreas vulneráveis devem ser considerados os seguintes limites (*endpoints*):

- Para substâncias tóxicas, considerar a dispersão máxima, até o ponto de concentração equivalente ao valor máximo da concentração da substância no ar à qual pode se expor uma pessoa por 30 minutos sem danos irreversíveis, o qual é denominado IDLH - *Immediately Dangerous to Life and Health* (Imediatamente Perigoso para Vida e Saúde), estabelecido pelo Instituto Nacional de Saúde e Segurança Ocupacional (*National Institute for Occupational Safety and Health* - NIOSH - USA) ou calculado conforme já referenciado, em função da Concentração Letal 50 (CL50) da substância em análise;
- Para dispersão de substâncias inflamáveis, considerar a dispersão máxima, até que seja atingido o limite inferior de inflamabilidade da substância;
- Para situações que representem risco de incêndio em poças de fogo (incêndio oriundo de poças de materiais vertidos e lançados em fase líquida a um determinado local de contenção, também conhecido como *pool fire*) ou jatos de fogo (incêndio proveniente da perda de contenção de gases inflamáveis que, ao escoarem em alta velocidade e encontrando fonte de ignição, provoquem fogo nas proximidades do ponto de vazamento, também conhecido como *jet fire*), deverá ser calculada e demarcada a curva equivalente ao nível de fluxo térmico igual a 5 KW/m^2 , correspondendo ao limite para o qual sejam esperadas as primeiras lesões de elevada gravidade a indivíduos expostos;

- Para situações que representem risco de explosão de qualquer natureza (nuvens de vapor, explosões físicas, confinadas ou não confinadas), sejam obtidas as curvas de sobrepressão equivalentes a 5 kPa, ou 500 mbar (correspondendo ao limite para apresentação de lesões sérias e irreversíveis, bem como danos em estruturas e quebra de vidros) e 14 kPa, ou 140 mbar (correspondendo ao limite de tolerância estimado para 1% da população exposta).

Sempre que os mapas obtidos indicarem presença de populações externas ou áreas sensíveis no interior das áreas de risco calculadas por este critério, deverá ser efetuada a reclassificação do Índice de Risco, que passará a ser considerado como 4, sendo exigida a realização de Estudos de Análise Quantitativa de Riscos para o cenário em estudo.

3.9 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

Segundo NETO (2007), o aumento de acidentes industriais e na área militar levou à pesquisa de metodologias que invertessem esse processo, nascendo daí a engenharia de confiabilidade de sistemas, cujo foco inicial foi a segurança das áreas aeronáutica, aeroespacial e nuclear.

De acordo com KHATER (2009), a análise de confiabilidade começou a se desenvolver com o surgimento da indústria aeronáutica, após a Primeira Guerra Mundial, que trouxe a necessidade de desenvolvimento dos primeiros procedimentos para esta análise no tempo. Os primeiros avanços no desenvolvimento de análises matemáticas, no contexto da engenharia de confiabilidade ocorreram na década de 40, mais associadas a equipamentos militares durante a Segunda Guerra Mundial e evoluíram conforme histórico descrito a seguir.

Em 1941, o engenheiro alemão Robert Lusser, projetista de aviões e aviador, desenvolveu uma equação relacionada à confiabilidade de um sistema em série. Nesta época, surgiram as primeiras tentativas de alcançar a melhoria de qualidade associada a uma manutenção preventiva.

Na década de 50, com o aparecimento da indústria aeroespacial e eletrônica associada à implantação da indústria nuclear, ocorreram grandes avanços no desenvolvimento de metodologias de cálculo para aplicações em estudos da confiabilidade. Nessa época os analistas reconheceram que a confiabilidade devia ser aplicada, principalmente, no projeto.

Na década de 60, tanto os desenvolvimentos práticos como teóricos continuaram a avançar, com destaque para a proposição de H.A.Watson, da teoria de “Análise de Árvore de Falhas”, em 1961. Sob o foco da aplicação prática, foram estabelecidos os fundamentos da análise de confiabilidade em sistemas mecânicos (estruturas), baseados em modelos denominados esforços e resistência.

Nas décadas de 70 e 80 ocorreu a consolidação da aplicação dos conceitos, metodologias e técnicas de análise de confiabilidade, em particular nos países detentores de tecnologia de ponta que implantaram definitivamente essas técnicas em diversos setores da engenharia.

A partir da década de 80, os países possuidores de tecnologia avançada implantaram definitivamente as técnicas de análise de confiabilidade em diversas áreas da engenharia. No Brasil, houve uma aplicação prática da confiabilidade nos setores de telecomunicações, elétrico, de armamento e nuclear.

Segundo EBELING (1997) apud BARROS (2003), a confiabilidade de um determinado item pode ser definida como sua capacidade de realizar uma função requerida durante um determinado período de tempo, submetido a um determinado meio, em condições de projeto.

KECECIOGLU (1991) apud BARROS (2003), salienta que a confiabilidade é a melhor maneira quantitativa de medir a integridade dos componentes, produtos ou sistemas. É a probabilidade dos componentes, produtos ou sistemas desempenharem suas funções pré-estabelecidas sem falhas em um determinado ambiente por um período de tempo desejado em um dado nível de confiança.

Segundo O’CONNOR (1988), a análise de confiabilidade é o estudo sobre as falhas que podem ocorrer com o produto durante o seu ciclo de vida, ou seja, não é um simples cálculo da taxa de falha ou da probabilidade de um componente ou sistema falhar, mas sim a procura, análise, avaliação e correção de todas as falhas que podem ocorrer com o produto, em todo o seu ciclo de vida.

Segundo a FEPAM (2001), na análise quantitativa de riscos deve ser efetuada uma avaliação quantitativa da frequência de ocorrência de cada evento iniciador, utilizando-se dados existentes em referências bibliográficas e bancos de dados internacionais. Para eventos iniciadores

complexos que envolvam falhas de sistemas, deverão ser construídas e avaliadas as árvores de falhas específicas para cada situação.

Nesta análise quantitativa, também deverão ser avaliadas as frequências de ocorrência dos diversos cenários de acidente capazes de ocorrer após um dado evento iniciador. Estes cenários envolvem falhas de eventuais sistemas de segurança que venham a ser demandados em cada caso, diferentes direções e faixas de velocidade do vento e possibilidades de ignição imediata retardada e podem ser determinados por meio da construção de árvores de eventos para cada evento iniciador. A probabilidade de falha (indisponibilidade) dos sistemas de segurança deve ser avaliada por meio da análise de confiabilidade com a técnica quantitativa de Construção de Árvore de Falhas ou outras ferramentas equivalentes a esta.

De acordo com BONFIETTI (2003), a confiabilidade de um sistema, item ou componente pode ser definida como sendo a probabilidade de que o mesmo execute a função para a qual foi projetado, por um período de tempo determinado.

Conforme HAVIARAS (2005), a confiabilidade pode ser definida como a possibilidade de um componente, equipamento, ou sistema executar a sua função, sob condições de operação estabelecidas, por um período de tempo específico, sem apresentar falhas. Está associada com a operação de um produto com sucesso, ou seja, que este execute as funções para o qual foi projetado, preferencialmente com ausência de paradas para manutenção ou de falhas.

Segundo o autor, em geral, a confiabilidade é representada em termos de uma probabilidade e de acordo com suas características podem ser utilizadas algumas distribuições para representar a probabilidade de falha, obedecendo a critérios de falhas bem definidos, que possibilitam determinar a partir de que momento o produto sob análise é considerado com desempenho abaixo daquele apontado como aceitável e, portanto, considerado com a ocorrência de falha.

De acordo com BARROS (2003), a análise de confiabilidade de um sistema consiste, basicamente, na investigação do potencial de falha do sistema e na avaliação das conseqüências dessas falhas, para a obtenção de informações importantes a respeito da performance de sistemas e equipamentos levando à implementação de melhorias, ainda durante a fase de projeto, evitando que eventuais alterações sejam efetuadas no futuro, a um custo bastante alto.

Segundo o autor, admite-se que a confiabilidade do sistema seja máxima no instante em que o sistema começa a operar, isto é, admite-se que o sistema esteja funcionando corretamente no início da operação.

A técnica da árvore de falhas tem sido essencial em estudos de análise probabilística de segurança de instalações nucleares e tem apresentado grande aplicabilidade em estudos de análise de risco realizados para as indústrias de processos químicos.

Segundo GLASMEYER (2006), a confiabilidade de equipamentos é obtida a partir do denominado “Tempo Médio Entre Falhas (TMEF)”.

A expressão que permitirá a mensuração da confiabilidade de um sistema é dada pela Lei Exponencial de Confiabilidade, representada pela fórmula a seguir (DE CICCIO e FANTAZZINI, 1993 apud GLASMEYER, 2006):

$$R = e^{-at} = e^{-t/T} \quad \text{ou} \quad R(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t') dt' \right] \quad (1)$$

Onde: $e = 2,718$ e $a =$ taxa de falha (dado fornecido individualmente para cada componente do sistema), $t =$ tempo de operação, $T =$ tempo médio entre falhas (TMEF)

A proporção t/T , ou tempo de operação por tempo médio entre falhas, é de extrema importância e permite concluir que para o aumento da confiabilidade de um sistema será necessário aumentar o tempo médio entre falhas para um mesmo tempo de operação.

Outro aspecto a considerar no processo de identificação de probabilidades de falha refere-se à interação entre os diversos subsistemas do processo em análise, que podem estar dispostos de forma paralela e serial entre outras.

Na primeira situação será requerida a falha simultânea dos sistemas de proteção paralelos para a materialização da falha sobre o elemento a ser protegido. Esta estruturação é representada pela função lógica “E” (AND).

Já na configuração serial, a probabilidade de falha será dada pela falha individual de apenas um dos subsistemas, e será representada pela função lógica “OU” (OR). Valores relativos às taxas ou

probabilidades de falhas podem ser encontrados em diversas fontes da literatura ou podem ser obtidas através da análise de simulação computacional, que também fornece fatores de segurança para tensões, deformações e deslocamentos atuantes em objetos e temperaturas atuantes em processos entre outros resultados.

3.10 FERRAMENTAS PARA ANÁLISES DE RISCOS

De acordo com a CETESB (2003), o Gerenciamento de Risco é um processo de controle de riscos, incluindo a formulação e implantação de medidas e procedimentos administrativos e técnicos, com o objetivo de prevenir, reduzir e controlar riscos, além de manter uma instalação operando dentro de padrões de segurança considerados toleráveis ao longo de sua vida útil.

Segundo MORGADO (2002), algumas ferramentas podem ser utilizadas para auxiliar cada uma das fases do Gerenciamento de Riscos. Segue uma breve descrição das principais técnicas e métodos utilizados no Gerenciamento de Riscos, com suas principais características e aplicações segundo ERICSON (2005), GLASMEYER (2006), VINCOLI (2006) e NETO (2007):

a) Análise Preliminar de Riscos/Perigos – APP (*Preliminary Hazard Analysis* – PHA)

Este método corresponde a uma adaptação da Norma Militar Americana MIL-STD-882 de 1969. A APP foi aplicada primeiramente como revisão nos novos sistemas de mísseis Atlas, após a destruição de quatro silos desse armamento. A necessidade, neste caso, era o fato de que tais sistemas possuíam características de alto risco, por utilizarem combustíveis líquidos perigosos. Assim, a APP foi aplicada com o intuito de verificar a possibilidade de não utilização de materiais e procedimentos de alto risco ou, no caso de tais materiais e procedimentos serem inevitáveis, no mínimo estudar e implantar medidas preventivas. Segundo AICHE/CCPS (2000), a sua descendência de normas militares proporciona uma facilidade na identificação de liberação de energia de forma descontrolada ou de vazamentos ou perdas de contenção.

A APP consiste na identificação de perigos, suas causas, suas possíveis conseqüências, a magnitude destas conseqüências, a definição de medidas preventivas ou corretivas e responsáveis por ações previstas em decorrência da identificação de perigos. É adequada na análise de sistemas

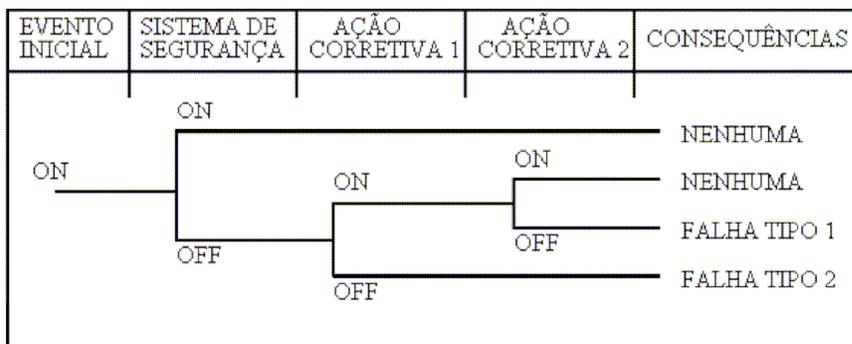
que apresentam baixa similaridade com quaisquer outros sistemas existentes, sendo utilizado principalmente em fases de desenvolvimento, implantação e operações de novos sistemas. É uma técnica abrangente que informa as causas que ocasionaram a ocorrência de cada um dos eventos e as suas respectivas conseqüências. Com os dados obtidos, pode-se fazer uma avaliação qualitativa da severidade das conseqüências e a freqüência de ocorrência do cenário de acidente, obtendo-se dessa forma o risco associado ao evento.

Esta técnica necessita ser complementada por outras mais detalhadas e apuradas. Também requer uma equipe com grande experiência em várias áreas de atuação como: processo, projeto, manutenção, instrumentação e segurança. As informações manipuladas para a classificação dos riscos a partir da Matriz de Risco devem ser utilizadas com critério, pois elas são geradas a partir da sensibilidade de um técnico executor da metodologia em conjunto com um operador ou responsável com maior experiência no sistema em questão, não sendo um resultado de natureza determinística.

b) Árvore de Eventos – AE (*Event Tree Analysis* – ETA)

Segundo AICHE/CCPS (1992) apud NETO (2007), uma análise por árvore de eventos, apresentada na Figura 3.1, mostra graficamente os resultados de um acidente advindo de um evento iniciador, sejam eles uma falha específica de um equipamento ou uma falha humana. A metodologia busca determinar as freqüências das conseqüências decorrentes dos eventos indesejáveis, utilizando encadeamentos lógicos a cada etapa de atuação do sistema. Em sua elaboração são consideradas as respostas dos sistemas de proteção e as possíveis ações dos operadores que se seguem ao evento iniciador. A relação de falha ou sucesso dessas respostas irá determinar os resultados possíveis (os acidentes).

Essa metodologia fornece uma descrição qualitativa das combinações de eventos que produzirão situações de emergência, ou seja: o conjunto de falhas ou erros humanos que conduzem ao acidente. Obtém-se uma estimativa quantitativa das freqüências ou probabilidade de ocorrência e uma descrição passo a passo da seqüência de eventos, sucessos ou falhas das funções de segurança que se seguem à ocorrência do evento iniciador.



Fonte: AICHE/CCPS (1992) apud NETO (2007)

Figura 3.1 – Árvore de Eventos Genérica

Para elaborar uma árvore de eventos são efetuados os seguintes passos:

- Definição do evento iniciador que pode conduzir ao acidente;
- Definição dos sistemas de segurança que irão atuar mitigando o evento iniciador;
- Estabelecer uma árvore lógica de decisões as várias seqüências de acontecimentos que podem surgir a partir do evento inicial;
- Calcular as probabilidades de cada ramo do sistema que conduz a alguma falha (acidente).

A análise dos resultados leva à identificação das potenciais fraquezas do sistema com relação aos sistemas e segurança ou aos planos de emergência estabelecidos.

A construção começa com o evento iniciador e caminha se subdividindo em vários braços em função da resposta SIM/NÃO, como por exemplo: Um equipamento de proteção falhou? Essa pergunta é geralmente binária (S/N), porém pode também ser em termos percentuais (100%, 20% ou 0% no caso de estar se referindo a uma falha de uma válvula de controle). Cada braço é condicionado a uma resposta do braço anterior da árvore.

A quantificação de uma árvore de eventos é relativamente simples, a probabilidade associada a cada braço, por meio da aplicação da condicional SIM/NÃO, dará as respostas de todos os braços conduzindo a eles. A soma das probabilidades para todos os resultados deve ser igual à unidade. O somatório da probabilidade desses resultados é a probabilidade do braço que os originaram.

Uma análise de árvore de eventos é uma metodologia adequada para a análise de sistemas com muitos dispositivos de segurança ou procedimentos de emergência embutidos, com o propósito de identificar os vários acidentes que podem ocorrer em um sistema complexo.

Para elaboração de uma análise de árvore de eventos é necessário o conhecimento prévio dos eventos potenciais iniciais (que pode ser feito por meio de uma árvore de falhas), do conhecimento das funções de segurança do sistema e dos planos de resposta às emergências.

A análise pode ser elaborada por um analista, com apoio de um grupo de especialistas dos sistemas a serem estudados, com duração de três a cinco dias, para pequenos sistemas, até três ou cinco semanas, no caso de sistemas complexos.

Segundo HSE (2001), os pontos fortes de uma análise de árvore de eventos são:

- Amplamente aceita e utilizada;
- Adequada para muitos perigos no estudo quantitativo de riscos que surgem de seqüência de falhas sucessivas;
- Forma clara e lógica de apresentação;
- Simples e de fácil compreensão.

Como pontos fracos tem-se:

- Perda da eficiência no caso de ocorrência de muitos eventos combinados, com muitos ramos redundantes;
- Todos os eventos devem ser assumidos como eventos independentes;
- Perda de clareza quando aplicada a sistemas que não terminam em uma falha simples ou um estado de operação do sistema.

c) Análise de Lista de Verificação (*Checklist Analysis*)

Uma análise de lista de verificação utiliza um procedimento ou uma lista de verificação previamente elaborada para verificar as condições de um sistema e sua conformidade com normas ou padrões vigentes. Pode ser utilizada em qualquer estágio do ciclo de vida de uma instalação, é de fácil compreensão e permite uma ampliação dos conhecimentos da instalação pelo fato de comparar as condições da instalação com os requisitos previamente formulados.

Pode ser utilizada na verificação de conformidade legal de uma instalação para se averiguar se a mesma está em conformidade com as normas e regulamentações pertinentes. Como resultado final obtém-se uma lista de questões baseadas nas deficiências encontradas ou nas diferenças em relação à normalização e de recomendações para adequação da instalação.

Uma lista de verificação normalmente possui um conjunto de perguntas a serem preenchidas com: “sim”, “não”, “não aplicável” ou “necessário maior informação” o que permite a verificação do status da instalação e o conhecimento das deficiências em relação às normas que geraram o lote de perguntas.

A seguir é apresentado um modelo de Lista de Verificação de Condições de Perigos em Relação a um Parque de Tanques de Produtos Perigosos - Perda de Contenção de Materiais (AIChE/CCPS, 2000):

Identificação de prováveis fontes de vazamentos:

- Isolamentos deficientes, drenos abertos, flanges descobertos;
- Falha de controle de instrumentação de segurança;
- Formação de fluxo bifásico (líquido/gás), expansão, contração;
- Presença de produtos em fase de vapores condensados;
- Alterações em condições normais de descarga;
- Colapso mecânico de equipamentos;
- Condições de sobrecarga;
- Transbordo, contra-fluxo, fluxo reverso;
- Pressão excessiva, perda de vácuo.

d) E-Se – (*What if – WIF*)

Método de menor formalismo, utilizado na identificação de perigos onde a partir da aplicação do questionamento: “O que aconteceria se...” são promovidas discussões relativas a desvios que possam ocorrer em processos. Com base nas prováveis respostas a esta questão, a equipe que desenvolve a análise deve decidir sobre os perigos potenciais e sobre meios de prevenir que estes venham a provocar danos. WELLS (1997) apud GLASMEYER (2006), apresenta esta técnica como um meio apropriado para encorajar discussões destinadas à identificação de perigos em

áreas normalmente não abrangidas por processos formais de avaliação de segurança. Sua abrangência é limitada em relação a estudos mais complexos.

e) Análise Por Árvore de Falhas – AAF (*Fault Tree Analysis-FTA*)

Segundo LEES (2005) apud NETO (2007), a Análise de Árvore Por Falhas foi criação dos Laboratórios da *Bell Telephone* em 1961, a pedido da Força Aérea Americana para avaliação do sistema de controle do Míssil Balístico *Minuteman*. O principal conceito na árvore de falhas é a transformação de um sistema físico em um diagrama lógico estruturado (a árvore de falhas), onde são especificadas as causas que levam à ocorrência de um específico evento indesejado de interesse, chamado evento topo.

De acordo com a ABS (2001) trata-se de uma técnica de avaliação de frequência, dedutiva, focada em um acidente em particular ou uma falha, seja sistêmica ou de equipamento. Uma árvore de falhas é um modelo gráfico que mostra as várias combinações possíveis de falhas básicas dos equipamentos e/ou erros humanos que possam resultar no evento topo (acidente). Esse tipo de análise promove uma descrição qualitativa dos problemas potenciais em forma de combinação de eventos causadores do evento topo e uma estimativa quantitativa das frequências de falhas. Isso permite que o Analista de Riscos identifique os pontos mais críticos e estabeleça medidas preventivas ou mitigadoras nesses pontos para redução da frequência do acidente.

Segundo o HSE (2001) algumas das finalidades da árvore de falhas são:

- Avaliação da frequência do evento topo, baseado nas estimativas das taxas de falhas de cada componente da árvore;
- Apresentação de risco, de forma a mostrar como os vários fatores contribuintes se combinam para produzir o evento indesejável;
- Identificação de perigo, usado qualitativamente para identificar combinações de eventos básico que são suficientes para causar o evento de topo.

O evento indesejado recebe o nome de evento topo por uma razão lógica, pois na montagem da árvore de falhas o mesmo é colocado no nível mais alto, no topo do diagrama. Os eventos do nível inferior recebem o nome de eventos básicos ou primários, pois são eles que dão origem a todos os eventos de nível mais alto.

Segundo TAYLOR (2000) apud NETO (2007), em análises de sistemas complexos, com muitos graus de redundância a construção da árvore torna-se muito complexa, chegando a atingir milhares de eventos, como é o caso da indústria nuclear. Uma abordagem utilizada para se estabelecer um ponto de corte, conhecida como *cut set*, é manter a combinação de eventos de um determinado ramo da árvore dentro de um valor de probabilidade pré-definido.

Para cada evento de nível inferior, deve ser verificada qual condição lógica é necessária para produzir o evento do nível superior. Por exemplo: se um único evento básico ocasiona a ocorrência do evento topo utiliza-se uma porta lógica "OU" (OR) para representar essa ligação. Caso o evento topo só ocorra se todos os eventos básicos estiverem presentes utiliza-se então o conector "E" (AND).

A árvore de falhas é uma metodologia que se aplica bem em análises de sistemas com alta redundância. Se o caso da análise for um sistema particularmente vulnerável a uma falha única, o uso de uma FMEA ou um HAZOP deverá ser mais aconselhado, pois são ferramentas de identificação.

Segundo a AICHE/CCPS (2000), as Árvores de Falha são utilizadas também como complemento de análises anteriores como uma APP/APR ou um HazOP (*Hazard and Operability Studies*) nas quais se encontre um importante cenário que necessite de um estudo mais detalhado.

f) Análise do Modo de Falha e Efeitos – AMFE (*Failure Mode and Effect Analysis- FMEA*)

Nesta análise são relacionados os equipamentos utilizados em um determinado processo, aos quais são associadas possíveis falhas em seus modos operacionais. A probabilidade de falhas é obtida em função do tempo médio, entre falhas, esperado para os subsistemas em análise. Deve ser identificada também a sistemática que permitirá a detecção da falha, uma vez que a confiabilidade dos sistemas de detecção influirá diretamente no resultado final da análise.

A confiabilidade é definida como a probabilidade de uma missão ser concluída com sucesso dentro de um tempo específico e sob condições específicas. A FMEA foi desenvolvida por engenheiros de confiabilidade para permitir aos mesmos, determinar a confiabilidade de produtos. Para isto é necessário o estabelecimento de como e quão freqüentemente os

componentes desse produto tendem a falhar, e qual o efeito dessa falha para o comportamento do equipamento ou sistema.

Resulta desta avaliação a categorização de perigos, que permitirá identificar a criticidade de cada elemento dentro do processo global em análise, e possibilitará a definição de ações de compensação e reparos necessárias.

De acordo com ABS (2000) a FMEA pode ser aplicada para qualquer sistema, sendo porém muito utilizada na identificação de modos de falha em sistemas elétricos e mecânicos como ferramenta de suporte à elaboração de planos de manutenção desses equipamentos, pois o método foca sistematicamente as falhas de cada equipamento envolvido.

g) Estudos de Operabilidade e Perigos/Riscos (*Hazard and Operability Studies - HazOp*)

Esta técnica, desenvolvida na década de 60, pela *Imperial Chemical Industries (ICI)*, teve forte impulso a partir de 1977, com sua publicação no Guia da Associação das Indústrias Químicas do Reino Unido (*Chemical Industries Association – CIA*). É destinado à identificação de possíveis desvios operacionais de processo, das condições de projeto, permitindo a identificação de perigos a eles associados.

No HazOp são estudadas as conseqüências da combinação de palavras guias com variáveis de processo, resultando no desvio a ser analisado. As principais palavras-guia aplicáveis na análise são: não, nenhum, nulo, mais que, menos que, reverso, outro, tal qual, maior, menor, ausência, mais, menos, maior nível, menor nível, parcial, outra, tal qual. Estas palavras-guia devem ser associadas à totalidade de variáveis de processo: fluxo, temperatura, pressão, nível, mistura, reação, fase, composição, comunicação, etc. Combinando as palavras-guia com as variáveis de processo, o grupo responsável pela elaboração do estudo deve identificar possíveis perigos e estabelecer medidas de proteção necessárias para a sua contenção.

Para o desenvolvimento do estudo torna-se necessário o detalhamento do sistema a ser analisado, incluindo diagramas de fluxo de processo (*Process Flux Diagrams – PFD*), diagramas de processo e instrumentação (*Process and Instrumentation Diagrams – P&IDs*), detalhamento e especificação de materiais e equipamentos, balanços de massa e de energia.

O HazOP requer também a formação de grupos de trabalho multidisciplinares, compostos por representantes das áreas de engenharia de processo e engenharia de projetos; responsáveis pelas atividades operacionais; representantes de segurança, saúde ocupacional e meio ambiente; laboratório, e outros especialistas devidamente treinados, bem como a existência de um líder para a condução dos estudos.

CRAWLEY et al. (2002) apud GLASMEYER, 2006 apresenta este método como um dos principais meios destinados à análise de risco em instalações industriais, encontrando aplicabilidade tanto para novos projetos, processos e operações, como para modificações implantadas e processos existentes.

3.11 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL

Segundo TOCCHETTO (2004), a avaliação de desempenho ambiental possibilita às empresas o planejamento de intervenções nos processos e a implantação de ações que buscam melhorias no sistema de gestão.

Embora seja inegável a importância e a contribuição do SGA, para CALASANS (2005), as organizações atualmente encontram-se inseridas num mercado cada dia mais competitivo e globalizado e, por isso, não devem se limitar apenas à identificação e à minimização dos impactos ambientais que suas atividades causam ao meio ambiente. No cenário do Século XXI, as empresas precisam investir também na avaliação do desempenho ambiental, conciliando aspectos sócio-ambientais às estratégias, objetivos e metas organizacionais, para se destacarem e evoluírem no mercado competitivo.

Segundo o autor, o principal objetivo das metodologias de avaliação de desempenho é estabelecer o grau de evolução ou estagnação de seus processos. Desta forma, os princípios, metodologias ou sistemas de avaliação de desempenho podem ser utilizados como instrumentos na adoção das novas posturas, desde que devidamente inseridos nos Sistemas de Gestão Ambiental (SGAs). Os indicadores a serem definidos para a medição do desempenho devem estar alinhados às estratégias e objetivos da organização, de forma a rever e redirecionar não só decisões, mas também procedimentos.

Ainda de acordo com CALASANS (2005), historicamente, os sistemas de avaliação de desempenho das empresas eram voltados para aspecto financeiro. Somente na década de 90 começaram a surgir algumas metodologias ou sistemas de avaliação de desempenho envolvendo questões, tais como desempenho e qualidade dos processos e produtos, satisfação dos clientes, motivação dos funcionários e desempenho ambiental.

VERSCHOOR e REIJNDERS (2001) afirmam que a avaliação de desempenho deve compreender a medida de desempenho do processo e a qualidade dos produtos, além dos custos e também os riscos: de processo, de produto e resultantes das decisões de substituição.

De acordo com a Norma ABNT NBR ISO 14031:2004, o desempenho ambiental é “o conjunto de resultados alcançados com a gestão dos aspectos ambientais da organização”.

Segundo MOURA (2004), a avaliação de desempenho ambiental é uma ferramenta gerencial para auxiliar a identificar e a avaliar, com realismo e objetividade, se os processos produtivos, produtos e serviços estão de acordo com os padrões estabelecidos pela alta administração na Política Ambiental, legislação ou outros documentos e compromissos assumidos pela empresa. A avaliação, feita na fase inicial da implantação do Sistema de Gestão Ambiental, deve ser repetida ao longo do desenvolvimento das atividades da empresa com a coleta de dados, sua análise e a realização de registros, com o propósito de conhecer o problema e fixar objetivos e metas realistas, dentro de um processo de melhoria e aperfeiçoamento contínuo.

De acordo com HRONEC (1994) apud MELO (2006), embora já exista um grande número de empresas certificadas pela Norma ABNT NBR ISO 14001:2004, a implantação de um SGA não garante o seu gerenciamento por si só. Para o autor, a administração consome muito tempo elaborando declarações de missão, mas quase sempre se afasta dos detalhes envolvidos no desenvolvimento do conjunto de medidas de desempenho. Tais medidas são sinais vitais da organização que qualificam e quantificam o modo como as atividades atingem suas metas.

Conforme HARRINGTON (1997), as medições são essenciais e fornecem informações adequadas para que possam ser tomadas ações preventivas e/ou corretivas em busca das metas e objetivos estabelecidos por ela. O que não pode ser medido, não pode ser controlado, gerenciado e melhorado. Sem melhorias, todo resultado será uma surpresa. As medições são o ponto de

partida para as melhorias, porque possibilitam o entendimento da situação da organização em um determinado momento e ajudam na definição de metas para o alcance do desempenho desejado. Sem indicadores as mudanças e melhorias necessárias ao processo são severamente prejudicadas.

KAPLAN e NORTON (1997) e TACHIZAWA (2005) apud MELO (2006) afirmam que tudo o que não é medido não é gerenciadora. O que não pode ser medido não pode ser avaliado e, conseqüentemente, não há como decidir sobre ações a tomar. Assim, as empresas que não monitoram um conjunto de indicadores de desempenho ambiental podem não estar gerenciando seu desempenho.

De acordo com MELO (2006), para garantir o sucesso nos resultados da organização, visando uma maior competitividade, é necessário que as empresas monitorem continuamente os aspectos críticos do negócio por meio de um sistema de medição do desempenho, composto por um conjunto de indicadores relacionados a seus objetivos estratégicos.

As certificações pelas normas ambientais podem constituir o primeiro passo no sentido de se definir indicadores de desempenho ambiental, tendo em vista a necessidade da empresa em monitorar os requisitos exigidos pela norma para demonstrar a eficácia do seu Sistema de Gestão Ambiental. Por meio dos indicadores é possível efetuar um controle transparente e sistemático do sistema de gestão ambiental e definir os objetivos da organização para simplificar, quantificar, analisar e comunicar o desempenho dos processos.

Em relação ao tipo de indicadores, de acordo com LIMA (2004) os indicadores utilizados nos Sistemas de Gestão Ambiental podem ser:

- Indicadores ambientais: que traduzem dados relativos a determinado componente ou conjunto de componentes de um ou vários ecossistemas;
- Indicadores de desenvolvimento sustentável: compreendem informações relativas às várias dimensões do desenvolvimento sustentável: econômicas, sociais, ambientais e institucionais;
- Indicadores de desempenho ambiental: que se preocupam em refletir os efeitos sobre o meio ambiente dos processos e técnicas adotados para realizar as atividades de uma organização.

De acordo com XIE e HAYASE (2007), a Norma ABNT NBR ISO 14031:2004 ajudou a distinguir três tipos de Indicadores de Desempenho Ambiental: Indicadores de Desempenho Gerencial, Indicadores de Desempenho Operacional e Indicadores das Condições Ambientais. Segundo DITZ e RANGANATHAN (1997) e BENNETT e JAMES (1998) apud XIE e HAYASE (2007), indicadores semelhantes foram desenvolvidos pela *Organization for Economic Co-Operation and Development* (OECD) para avaliar o desempenho ambiental de países. Estes indicadores estão relacionados e fornecem um suporte claro e lógico para o gerenciamento do desempenho ambiental da organização.

Neste trabalho a proposta de utilização da simulação computacional se aplica aos Indicadores de Desempenho Ambiental Operacionais.

3.12 INDICADORES DE DESEMPENHO AMBIENTAL

Para BERGAMINI (1999), a utilização de indicadores confiáveis de desempenho ambiental é uma medida necessária para conferir transparência aos negócios das empresas. Eles sintetizam as informações quantitativas e qualitativas que permitem a determinação da eficiência e efetividade da empresa, no emprego dos recursos disponíveis, de um ponto de vista ambiental.

Segundo GASPARINI (2003), os indicadores de desempenho ambiental visam demonstrar as práticas organizacionais no sentido de minimizar os impactos ao meio ambiente decorrentes de suas atividades. Esses indicadores referem-se ao uso de recursos naturais demonstrados em valores monetários e em valores absolutos de quantidade ou consumo, considerando também as iniciativas de gerenciamento ambiental, os impactos significativos relacionados ao setor da atividade e as respectivas ações de minimização.

De acordo com LIMA (2004), os indicadores de desempenho ambiental preocupam-se em refletir os efeitos sobre o meio ambiente dos processos e técnicas adotadas para realizar as atividades de uma organização.

Para TOCCHETTO (2004), os indicadores de desempenho ambiental são medidas diretas ou indiretas da qualidade ambiental e expressam o desempenho ambiental das empresas. São

utilizados para avaliar, mostrar a situação e as tendências das condições de um dado ambiente, e ainda permitem verificar a eficiência das ações implantadas e compará-las com empresas concorrentes.

No estudo realizado pela autora em relação ao conjunto de indicadores de desempenho ambiental, verificou-se que:

- O conhecimento inconsistente a respeito dos impactos ambientais aumenta a subjetividade do processo de escolha dos indicadores de desempenho;
- A definição equivocada de um conjunto de indicadores de desempenho ambiental resulta na tomada de decisão ineficiente para a resolução de problemas de forma pontual;
- O uso de indicadores em empresas de auto-impacto permite modular intervenções que busquem reduzir os riscos dos processos, produtos e serviços, no sentido de garantir a sustentabilidade ambiental;
- A escolha adequada de indicadores de desempenho ambiental possibilita a implantação de medidas preventivas, que resultam em aumentos de produtividade, competitividade e melhoria contínua do sistema de gestão.

Segundo CORBETT e PAN (2002), há dificuldade, por parte das empresas, em trabalhar com os dados de monitoramento. Muitas vezes, mesmo tendo detalhado os dados de desempenho de processos, não sabem usá-los para o controle, ou estabelecem metodologias inadequadas para a avaliação. O monitoramento da eficiência dos tratamentos implantados, convencional ou alternativo, permite o planejamento de ações que visam um melhor desempenho.

De acordo com TOCCHETTO (2004), os indicadores ambientais são ferramentas de gerenciamento, monitoramento e de comunicação entre ambientes e pessoas. Eles devem refletir a respeito de alterações, em relação à melhoria ou redução de desempenho. A escolha dos indicadores é importante para a elaboração de diagnósticos e também para o monitoramento de processo ao longo do tempo, auxiliando a tomada de decisão nas intervenções quando requeridas.

Para ZOBEL e BURMAN (2003), o processo de avaliação do desempenho ambiental é cercado de grande subjetividade, devido à ausência de padronização para a definição de parâmetros. A escolha dos indicadores de desempenho está relacionada com a percepção ambiental das

empresas a respeito do impacto das atividades desenvolvidas, dos produtos e serviços. Esta dificuldade é devido à não existência de uma medida universal para avaliar comparativamente os diferentes aspectos ambientais.

De acordo com MARQUES et al. (2003) apud TOCCHETTO (2004), como não existem indicadores universais, cada organização deve definir indicadores específicos, que sejam eficientes no sentido de cumprir as condições descritas, sensíveis, com boa base estatística, principalmente quando utilizados para monitoramento de longo prazo e em número suficiente para representar de forma mais completa o que se quer mensurar.

Os autores mencionam ainda que os indicadores devem ser:

- Aplicáveis a vários sistemas;
- Mensuráveis e de fácil medição;
- De fácil obtenção e baixo custo;
- Concebidos de tal forma que os próprios operadores possam medir;
- Sensíveis às mudanças do sistema e capazes de indicar tendências;
- Representantes dos padrões de qualidade dentro dos princípios de sustentabilidade.

De acordo DAROIT (2001), não existe um padrão definido de indicadores que permita a comparação entre empresas.

CORBERT e PAN (2002) indicam que a Norma ABNT NBR ISO 14031:2004 tem como um dos seus aspectos-chave a avaliação do desempenho ambiental, ou seja, “documentar procedimentos para monitorar e medir, em uma base regular, as características chave de suas operações e atividades que têm impactos significantes”.

A Coalition for Environmentally Responsible Economie (CERES) e o World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) também são exemplos de organizações que buscam desenvolver indicadores que atendam a um padrão (DEMAJOROVIC e SANCHES, 1999).

LEHNI (1998) apud TOCCHETTO (2004) indicam que o WBCSD desenvolveu um conjunto com sete componentes a partir dos quais as empresas podem avaliar e melhorar a sua eco-eficiência, por meio das seguintes ações:

- Reduzir uso de materiais em bens e serviços;
- Reduzir o uso de energia em bens e serviços;
- Reduzir ou eliminar dispersão de substâncias tóxicas;
- Elevar o índice de reciclagem de materiais;
- Maximizar o uso de recursos naturais renováveis;
- Aumentar a durabilidade do produto;
- Utilizar mais adequadamente bens e serviços.

A fim de manter a flexibilidade e aplicabilidade a diversos setores e permitir a harmonização dos indicadores existentes, o WBCSD (1999) recomenda um sistema com dois níveis de indicadores:

- Centrais genéricos: válidos para todos os tipos de empresas, embora não tenham igual valor ou importância para todas elas;
- Suplementares específicos: têm sua relevância e pertinência variável conforme o tipo de empresa ou o setor a que ela pertence.

Outras instituições, tais como, como o *Factor 10 Club*, a *Landys & Gyr Corp.*, a *Electrowatt*, a *National Academy of Engineering* dos EUA e a Universidade de Lund, na Suécia, desenvolveram sistemas de indicadores de ecoeficiência.

A seleção de indicadores serve para verificar a eficiência das ações implementadas e ainda permitirá compará-las com as empresas concorrentes. A avaliação ambiental se tornou mais valiosa e importante do que nunca: esse instrumento oferece as bases para a formulação de políticas e planos que levam em consideração os potenciais e restrições naturais, permitindo o manejo dos riscos e impactos de atividades, e projetos de desenvolvimento (RODRIGUES, 1998 apud TOCCHETTO, 2004).

Em um estudo realizado por PACHECO (2001) sobre a inserção de indicadores de medição do desempenho para o sistema de gestão ambiental, foi ressaltada a relevância da inserção de indicadores de desempenho relacionados aos objetivos estratégicos, para o alcance do sucesso do SGA da empresa. O sistema de medição, composto por indicadores de desempenho deve estar relacionado aos fatores críticos de sucesso para o SGA, contribuindo assim de forma efetiva para a melhoria do desempenho ambiental e aumento da sua competitividade.

Para DEMAJOROVIC e SANCHES (1999), a sociedade pode ser beneficiada pelo estabelecimento e divulgação de indicadores de desempenho ambiental, nos segmentos:

- Empresas: mediante a divulgação de seus relatórios e indicadores de desempenho ambiental, podem oferecer de forma potencial uma melhor imagem e valor agregado a clientes e acionistas;
- Instituições financeiras: podem relacionar o desempenho ambiental ao valor financeiro de uma empresa e incorporar os indicadores de desempenho ambiental como elemento de análise para a tomada de decisão quanto ao oferecimento de investimentos, seguros e empréstimos;
- Consumidores: podem escolher produtos e produtores com base no desempenho ambiental de seus processos de produção, uso e disposição dos recursos pelas empresas;
- Comunidades: podem obter acesso rápido e fácil às informações sobre o desempenho ambiental de fábricas e comparar operações, firmas e indústrias em todo o mundo;
- Agências governamentais: podem monitorar o desempenho das empresas e obter informações mais acuradas para desenvolver políticas relacionadas.

Os autores expõem ainda que apesar desse crescente interesse e aplicabilidade, as opiniões quanto ao que se deve medir, variam muito e, com exceção de exigências regulatórias em alguns países, que focam tipicamente em emissão de poluentes, vazamentos e outras medições de desacordo ambiental, não há ainda um padrão definido de indicadores que permita a comparação entre empresas ou mesmo entre nações.

No Brasil, um dos caminhos para o controle dos processos produtivos é a realização da Avaliação do Desempenho Ambiental da Indústria – ADA, a qual verifica como a empresa está respondendo às questões ambientais e garante que ela se torne, ou permaneça competitiva. A implementação da ADA é pautada no uso de indicadores ambientais (FIESP, 2003).

3.13 NORMA ABNT NBR ISO 14031

De acordo com MELO (2006), como referência conceitual à seleção de indicadores de desempenho ambiental, surgiu na Europa, em 1999, a Norma ABNT NBR ISO 14031:2004 – “Gestão Ambiental – Avaliação do Desempenho Ambiental – Diretrizes” que trata especificamente das diretrizes para a avaliação de desempenho ambiental e da adoção de

indicadores de desempenho ambiental, com inclusão de mais de 100 indicadores ilustrativos no Anexo A.4.

A Norma ABNT NBR ISO 14031:2004 define que a avaliação do desempenho ambiental é um processo e uma ferramenta de gestão interna, planejados para prover uma gestão com informações confiáveis e verificáveis, em base contínua, para determinar se o desempenho ambiental de uma organização está adequado aos critérios estabelecidos pela administração da organização. A Norma é aplicável a todas as organizações, independente do tipo, tamanho, localização e complexidade.

De acordo com a Norma ABNT NBR ISO 14031:2004, a avaliação do desempenho ambiental utiliza indicadores para fornecer informações, comparando o desempenho passado e presente, com seus critérios estabelecidos, por meio do modelo PDCA – Planejar, Fazer, Checar e Agir (*Plan, Do, Check e Act*) apresentado no Item 3.1.1.1.:

- a) Planejar – planejamento e seleção de indicadores para ADA;
- b) Fazer – utilização de dados e informações que inclui: coleta de dados relevantes, análise e conversão de dados em informações, avaliação das informações que descrevam o desempenho ambiental da organização, relato e comunicação das informações que descrevam o desempenho ambiental da organização;
- c) Checar e agir – análise crítica e melhoria da ADA.

Para implementação e eficácia da ADA é essencial o comprometimento da administração. Convém também que a ADA seja apropriada ao tamanho, localização e tipo da organização, bem como suas necessidades e prioridades.

A Norma ABNT NBR ISO 14031:2004 descreve duas categorias gerais de indicadores a serem considerados na condução da Avaliação de Desempenho Ambiental:

a) Indicadores de Condição Ambiental – ICA: fornece informações sobre as condições locais, regionais, nacionais ou globais da qualidade do meio ambiente, sob a forma de resultados de medições efetuadas de acordo com os padrões e regras ambientais estabelecidos pelas normas e dispositivos legais;

b) Indicadores de Desempenho Ambiental – IDA: fornece informações sobre o desempenho ambiental de uma organização. São classificados em dois tipos:

- Indicadores de Desempenho Gerencial – IDG: fornece informações sobre os esforços gerenciais para influenciar positivamente o desempenho ambiental de uma organização;

- Indicadores de Desempenho Operacional – IDO: fornece informações sobre o desempenho ambiental das operações do processo produtivo de uma organização com reflexos no seu desempenho ambiental.

O Item 3.2.2 da Norma define que as organizações selecionam indicadores para ADA como um meio de apresentar dados ou informações qualitativas ou quantitativas, de uma forma mais compreensível e útil, as quais são transmitidas por meio de indicadores e podem ser expressas como medições diretas ou relativas, ou como informações indexadas.

No Item 3.2.2.1 da Norma, na Ajuda Prática no. 2, são definidas algumas características de dados para indicadores de ADA:

- Medição de cálculos diretos: dados ou informações básicas tal como toneladas de contaminantes emitidos;

- Medição ou cálculos relativos: dados ou informações comparados ou relacionados a outro parâmetro, tal como, nível de produção, quantidade de contaminantes emitidos por tonelada de produto manufaturado;

- Indexada: dados ou informações descritivas convertidas para unidades ou para uma forma que relacione a informação a um padrão ou base de referências escolhidas, tal como emissões de contaminantes no ano;

Agregada: dados ou informações descritivas do mesmo tipo, mas de diferentes fontes, coletadas e expressas como um valor combinado, tal como, toneladas de contaminante emitido na produção de um produto em um ano, determinado pela soma de emissões a partir de múltiplas instalações;

Ponderada: dados ou informações descritivas modificadas pela aplicação de um fator relacionado à sua significância.

De acordo com MELO (2006), os parâmetros relevantes e confiáveis para as medições do desempenho ambiental podem ser encontrados na Norma ABNT NBR ISO 14031:2004, que traz uma série de exemplos de indicadores para avaliar o desempenho ambiental das empresas, tais como:

a) Desempenho Gerencial - agrupados no item 4.2.2 do ANEXO A: Implementação de Política e Programas, Conformidade, Desempenho Financeiro e Relações com a Comunidade.

b) Desempenho Operacional - agrupados no item 4.3.2 do ANEXO A: Materiais, Energia, Serviços de Apoio às Operações da Organização, Instalações Físicas e Equipamentos, Fornecimento e Distribuição, Produtos, Serviços Fornecidos pela Organização, Resíduos e Emissões.

O Item 3.2.2.3 da Norma ABNT NBR ISO 14031:2004 define que os Índices de Desempenho Operacional se relacionam a:

- Entradas: materiais (ex.: processados, reciclados, reutilizados ou matérias-primas, recursos naturais), energia e serviços;
- Fornecimento de insumos para as operações da organização;
- Projeto, instalação, operação (incluindo situações de emergência e operações não rotineiras), manutenção das instalações físicas e dos equipamentos da organização;
- Saídas: produtos (ex.: principais produtos, subprodutos, materiais reciclados e reutilizados), serviços, resíduos (ex.: sólidos, líquidos, perigosos, não perigosos, recicláveis, reutilizáveis) e emissões (ex.: emissões para a atmosfera, efluentes para água ou solo, ruídos, vibrações, calor, radiação, luz) resultantes das operações da organização;
- Distribuição das saídas resultantes das operações da organização.

3.14 CERTIFICAÇÃO AMBIENTAL

Segundo OLIVEIRA (2004), a certificação é uma atividade formal realizada para atestar que uma determinada organização, ou parte dela, ou determinados produtos, estão em conformidade com alguma norma específica.

A Certificação Ambiental é o conjunto de atividades desenvolvidas por um organismo independente da relação comercial, com o objetivo de atestar publicamente, por escrito, que um produto, processo ou serviço está em conformidade com os requisitos especificados (INMETRO, 2006 apud ALMEIDA, 2008).

De acordo com o INMETRO (2006), a Norma ABNT NBR ISO 14001:2004 é a referência normativa que se tem como base para se efetuar a certificação ambiental do Sistema de Gestão Ambiental, dos processos, produtos e serviços de uma organização.

Para BA (2002), a decisão de adotar a Norma ABNT NBR ISO 14001 e certificar-se segundo a mesma, não é motivada somente por exigências contratuais, pela busca de melhoria e da competitividade internacional. Tal certificação relaciona-se, para muitas empresas, a um investimento estratégico de antecipação às pressões econômicas associadas à legislação ambiental, às políticas governamentais, à imagem perante a opinião pública e à evolução do mercado.

A certificação não é concedida pela ISO, que é uma entidade normalizadora internacional, mas sim por uma entidade de terceira parte devidamente credenciada e independente (INMETRO, 2006 apud ALMEIDA, 2007).

Para MORROW e RONDINELLI (2002), a utilização de um padrão como a Norma ABNT NBR ISO 14001, auxilia as organizações a simplificarem e integrarem os programas de proteção ambiental por meio de uma estrutura mais coerente. A implantação do Sistema de Gestão Ambiental (SGA) que atenda os requisitos da Norma ABNT NBR ISO 14001 facilita o desenvolvimento de um sistema de gestão voluntário que sinaliza às partes interessadas (*stakeholders*) um comprometimento com a melhoria do desempenho e redução dos riscos ambientais.

Estudos de DARNALL (2006) indicam que muitas empresas estão efetuando certificações ambientais, considerando sistematicamente seu relacionamento com o meio ambiente, para atenderem à legislação ambiental, se tornarem mais competitivas, com um diferencial no mercado, ou para atenderem aos *stakeholders*. Estas empresas adotam políticas ambientais, procedimentos para controle e atendimento de regulamentações legais, avaliações de aspectos e impactos ambientais, determinam um conjunto de metas ambientais e diretrizes para alcance das mesmas e implementam procedimentos operacionais, para auditorias internas e para tomada de ações corretivas e revisão do SGA.

Segundo RONDINELLI e VASTAG (2000), a certificação ambiental por meio da Norma ABNT NBR ISO 14001 trás inúmeras vantagens para o processo operacional, pois auxilia as organizações a reduzirem incidentes ambientais, aumenta a eficiência pela remoção de desperdícios de produção e processos de distribuição e conscientiza os colaboradores sobre os impactos das operações.

Quanto às estratégias das organizações, MORROW e RONDINELLI (2002) verificaram que a certificação ambiental tem se mostrado uma fonte significativa como vantagem de diferenciação e veículo para fortalecimento da imagem e responsabilidade social da empresa.

De acordo com GAVRONSKI (2003), o processo de certificação de um Sistema de Gestão Ambiental de acordo com a Norma ABNT NBR ISO 14001 passa pelas seguintes etapas:

- Fase de implantação do sistema: são realizadas auditorias internas, por parte da própria empresa, para verificação do atendimento dos requisitos;
- Fase de pré-avaliação: são produzidos relatórios sobre o *status* do sistema, com sinalização para correções e melhorias preparatórias para a etapa de avaliação;
- Fase de avaliação: é efetuada uma análise do sistema implantado com relação aos requisitos da Norma ABNT NBR ISO 14001 e caso a auditoria verifique o atendimento aos mesmos, ocorre a recomendação para emissão de certificado.

Segundo ALMEIDA (2008), a certificação ambiental pode se aplicar a produtos, processos produtivos, atividades e plantas industriais, envolvendo atividades tais como: análise de documentação, auditorias e inspeções na empresa, além de coleta e ensaios de produtos, no

mercado e/ou na fábrica, para avaliar a conformidade e sua manutenção. Entre os seus principais benefícios para a empresa, tem-se: a garantia da implantação eficaz dos sistemas de controle e da qualidade, diminuindo a perda de produtos e os custos da produção, com o aumento da competitividade das empresas certificadas frente às não certificadas.

Para ALMEIDA (2008) as certificações podem ser:

- Compulsória (regulamentar): está associada à garantia da segurança do consumidor ou da saúde pública e é estabelecida de forma estatutária por organismos nacionais ou supra-nacionais;
- Voluntária: adota como referencial um conjunto de padrões de qualidade aceito pelos competidores do setor específico. Para ter credibilidade, o sistema de certificação precisa se ajustar a determinados critérios normativos.

Ainda de acordo com o autor, para se obter a certificação ambiental do SGA, de um produto, processo ou atividade, a empresa precisa ser submetida a uma auditoria ambiental, que é um conjunto de atividades de auditoria voltada para o meio ambiente e deve ser realizada por um organismo credenciado pelo INMETRO.

De acordo com a Norma ABNT NBR ISO 19011, auditoria ambiental “é o processo sistemático e documentado de verificação, executado para obter e avaliar, de forma objetiva, evidências de auditoria para determinar se as atividades, eventos, sistema de gestão e as condições ambientais especificados ou as informações relacionadas a estes estão em conformidade com os critérios de auditoria, e para comunicar os resultados desse processo ao cliente”.

Segundo ALENCAR (2010), auditoria ambiental é o procedimento de exame e avaliação periódica ou ocasional do comportamento de uma empresa em relação ao meio ambiente.

ALMEIDA (2008) cita que atualmente as Instituições Supremas de Auditoria (*Supreme Audit Institutions* – SAI) estão engajadas em três tipos básicos de auditorias com uma perspectiva ambiental: financeira, de fiscalização e cumprimento e de desempenho. Cada um destes tipos está formalmente descrito e definido em padrões de auditoria da Organização Internacional das Entidades Superiores de Fiscalização (*International Organization of Supreme Audit Institutions* – INTOSAI) e nas orientações elaboradas pelo Grupo de Trabalho da INTOSAI sobre Auditoria Ambiental (*Working Group on Environmental Auditing* – WGEA).

Neste trabalho propõe-se aplicar a simulação computacional em certificações ambientais, visando a melhoria de desempenho do SGA da empresa, de seus produtos e processos. Desta forma, as auditorias relacionadas a estas certificações são as Auditorias Ambientais, de Sistemas de Gestão Ambiental (SGA) e de Desempenho Ambiental.

Seguem algumas características e objetivos destas auditorias, segundo ALMEIDA (2008):

a) A Auditoria de Desempenho tem como objetivos:

- Garantir que os indicadores de desempenho relacionados ao meio-ambiente reflitam o desempenho da entidade;
- Garantir que os programas ambientais sejam conduzidos de modo econômico, eficiente e eficaz.

b) A Auditoria de Sistemas de Gestão Ambiental (SGA) é uma ferramenta de gestão que compreende uma avaliação sistemática, documentada, periódica e objetiva do desempenho da organização, do gerenciamento e dos equipamentos de controle ambiental, com o fim de auxiliar a proteção ambiental por:

- Facilitar o controle gerencial das práticas ambientais;
- Avaliar a conformidade com as políticas da companhia, que devem incluir o atendimento aos requisitos regulatórios.

A Auditoria de SGA tem como objetivos:

- Verificar se, além do cumprimento das diretrizes estabelecidas, as mesmas são consistentes e pertinentes, quando confrontadas com os objetivos estabelecidos pela organização;
- Permitir que diferentes pontos de vista e opiniões possam emergir de pessoas com diferentes formações e culturas, contribuindo para a melhoria do sistema.

As Auditorias de SGA podem ser de:

- Adequação: Envolvem a avaliação da adequação de Programa de Gestão Ambiental;
- Conformidade: envolvem a medição de conformidade com relação a legislações, programas, sistemas, procedimentos, especificações, por meio da análise da documentação e de sua efetividade nos locais de uso.

Segundo ALMEIDA (2008), a Auditoria Ambiental tem como objetivo verificar se o sistema se baseia na avaliação dos aspectos e impactos ambientais e se é orientado para o controle e a melhoria do desempenho ambiental. Podem ser de:

- Levantamento e Caracterização: referem-se a avaliações, inspeções e investigações ambientais das instalações industriais, equipamentos e atividades de controle da poluição, e na ocorrência de acidentes, contemplando um ou mais aspectos ambientais da organização;
- De Conformidade: envolvem a verificação do cumprimento, pela organização, de leis, regulamentos e licenças ambientais aplicáveis às suas atividades, produtos e serviços.

3.15 ANÁLISE DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Segundo ASSAN (2003), há mais de dois mil anos, filósofos gregos já haviam elaborado teorias nas quais supunham que todas as coisas eram formadas por inúmeras partículas, tais como:

- Leucipo e Demócrito estabeleceram que tudo era constituído por um número infinitamente grande de partículas denominadas, pelo último, de átomos;
- Eudócio criou o método da exaustão, que consiste em inscrever e circunscrever figuras retilíneas em figuras curvilíneas, para calcular áreas de figuras curvas e volumes de sólidos como esferas e cones. Ele pensava em discretizar, isto é, dividir a figura contínua em partes para facilitar certos cálculos. Este raciocínio serviu de base para a elaboração dos métodos numéricos utilizados atualmente nos programas que executam análises de simulação computacional.

Na década de 40, MCHENRY e HRENNIKOFF (1941) apud ASSAN (2003) substituíram um elemento estrutural contínuo, tal como uma placa, por uma estrutura formada por barras, seguindo a geometria original e mantendo as mesmas condições de vinculação e cargas.

De acordo com ASSAN (2003) e MOAVENI (2008), a primeira pessoa a desenvolver o Método dos Elementos Finitos foi COURANT, um matemático de renome, que utilizou interpolação polinomial em subregiões triangulares para investigar a torção de Saint-Venant, em seções transversais de vigas vazadas em 1943.

MOAVENI (2008) relata que nos anos 50, a empresa Boeing, seguida por outras, utilizou elementos de tensão triangular para modelar asas de aviões.

Com a publicação do trabalho de TURNER, CLOUGH, MARTIN e TOPP (1956) apud ASSAN (2003), o Método dos Elementos Finitos teve sua formulação estabelecida como é conhecida hoje.

Nos anos 60, pesquisadores começaram a aplicar o Método dos Elementos Finitos em análises de transferência de calor e escoamento de fluidos. ZIENKIEWICZ e CHEUNG (1967) escreveram o primeiro livro sobre Método dos Elementos Finitos.

Embora a formulação de CLOUGH (1980) fosse conhecida desde o início dos anos 50, o método dos elementos finitos somente passou a ser mais difundido e aplicado em diversas áreas, além da engenharia estrutural, com a evolução e expansão dos computadores de grande porte e posteriormente com os microcomputadores PCs (*Personal Computers*). O autor do nome deste método, em contraposição aos elementos infinitesimais do cálculo diferencial, descreve em seu artigo, o desenvolvimento do método dos elementos finitos.

Segundo MOAVENI (2008), há muitas questões na engenharia, para as quais não é possível obter soluções analíticas ou exatas, devido a situações, tais como:

- A natureza complexa das equações diferenciais que governam o comportamento da estrutura, equipamento, peça, processo ou outro objeto a ser analisado;
- Dificuldades em se definir as condições iniciais e de contorno ou de fixação do objeto a ser analisado.

Para resolver as questões citadas acima, foram desenvolvidos os métodos numéricos que fornecem soluções aproximadas em pontos discretos (nós) do objeto, o qual é discretizado, isto é, dividido em pequenas subregiões denominadas de elementos, que são definidos por pontos nodais.

Os métodos que originaram a análise matricial, embora considerem o meio contínuo discretizado por elementos com propriedades de rigidez e elasticidade conhecidas, não apresentam o aspecto conceitual implícito no Método dos Elementos Finitos.

Segundo ZIENKIEWICZ e CHEUNG (1967), há duas classes de métodos numéricos a serem utilizados nos programas de simulação computacional para análises estruturais e térmicas:

- Diferenças Finitas: a equação diferencial é escrita para cada nó e as derivadas são substituídas pelas equações de diferenças. Esta aproximação resulta em uma série de equações lineares. Embora de fácil entendimento, este método é difícil de ser aplicado em problemas com geometrias ou condições de contorno complexas e materiais não isotrópicos (com propriedades diferentes nas direções x, y e z);
- Elementos Finitos: usa formulações integrais para criar um sistema de equações algébricas. Uma função contínua é assumida para representar a solução aproximada para cada elemento. A solução completa é gerada conectando ou agrupando as soluções individuais, permitindo a continuidade nas fronteiras dos elementos.

Segundo ASSAN (2003), o Método dos Elementos Finitos consiste não apenas em transformar o sólido contínuo em um conjunto de elementos discretos e escrever equações de compatibilidade e equilíbrio entre eles. Deve-se também definir funções contínuas que representem, por exemplo, o campo de deslocamentos no domínio de um elemento. A partir daí, obtém-se o estado de deformações correspondente que, associado às relações constitutivas do material, permitem o cálculo do estado de tensões em todo o elemento, o qual é transformado em esforços internos que devem estar em equilíbrio com as ações externas.

Ainda de acordo com o autor, esta formulação é derivada do Método de Rayleigh-Ritz que se baseia na minimização da energia potencial total do sistema, que leva à equação de equilíbrio do mesmo. Esta equação é escrita em função de um campo predefinido de deslocamentos, denominado método dos deslocamentos.

ARGYRIS e KELSEY (1960) apud ASSAN (2003) publicaram uma série de trabalhos, nos quais a formulação matricial do Método de Rayleigh-Ritz ficou definitivamente determinada e foi aplicada para analisar principalmente fuselagens e asas de aviões, simulando-as como constituídas por barras e painéis.

Segundo ASSAN (2003), deve-se atentar para o fato de que os fundamentos nos quais o Método dos Elementos Finitos se sustenta, vêm das teorias e/ou teoremas desenvolvidas por pesquisadores, tais como, BERNOULLI, NAVIER, LAGRANGE, CAUCHY, MOHR, MAXWELL, CLAPEYRON e CASTIGLIANO entre outros.

Nos anos 60 começaram a ser desenvolvidos vários programas de simulação computacional baseados no Método dos Elementos Finitos. Entre estes programas, destacou-se o NASTRAN, utilizado nos projetos aeroespaciais da NASA, para dimensionar as naves e seus componentes mecânicos, com fatores de segurança adequados, visando evitar ou minimizar riscos de falhas devido a fadiga, altas temperaturas e sobrecargas a que as aeronaves estariam sujeitas, especialmente durante as operações de lançamento e retorno à Terra. No entanto, nesta época não se abordavam temas como danos e desempenho ambientais.

Em 1971, foi lançada a primeira versão do programa ANSYS, desenvolvido por John Swanson, que criou a empresa Swanson Analysis Systems. Inicialmente o programa era composto de rotinas escritas na linguagem FORTRAN, para executar análises estáticas lineares estruturais e térmicas, em computadores de grande porte.

Nos anos 80, o programa ANSYS, utilizado nas análises apresentadas neste trabalho, se expandiu com o desenvolvimento de novas rotinas de elementos para a execução de análises dinâmicas, transientes, não lineares, de mecânica da fratura e fadiga.

No início dos anos 90, foi lançada a versão 4.0 para microcomputadores PC 386, que era executada em sistema DOS. Novos elementos foram desenvolvidos, tais como elementos para materiais compósitos, de contato, de radiação, vigas com perfis variados e cascas para análises não lineares. Também foi incluída a análise de escoamento de fluidos, por meio do programa FLOTRAN, que pertencia à empresa COMPUFLO, a qual foi adquirida pela Swanson Analysis Systems. Novos desenvolvimentos foram realizados e o FLOTRAN passou a executar análises de interação fluido-estrutura, muito importantes para se avaliar o efeito do vento em estruturas e da velocidade de fluidos no interior de dutos e equipamentos.

No final da década de 90, a empresa Swanson Analysis Systems se tornou uma Sociedade Anônima com ações na Bolsa NASDAQ e passou a se chamar ANSYS, Inc. Novas versões do programa foram lançadas para sistemas WINDOWS, LINUX e HP entre outros, com interface amigável desenvolvida na linguagem BASIC. Foram desenvolvidos os módulos de otimização de projetos, novos contatos estruturais e térmicos, elementos acústicos e elementos de casca multicamadas entre outras capacidades, para competir com programas tal como o ABAQUS.

A partir de 2000 foi desenvolvida uma nova interface gráfica, mais parecida com o ambiente dos programas de CAD, com módulos de modelagem sólida, geração de malha, cálculo de fadiga e de mecanismos para concorrer com o programa NASTRAN.

Mais recentemente, a empresa ANSYS, Inc. adquiriu as empresas CFX e FLUENT, especialistas em programas de dinâmica de fluidos e a CADOE, especialista em programas de otimização de projetos e análises probabilísticas por meio do Método Variacional.

O programa ANSYS utiliza somente o Método de Elementos Finitos, que efetua e analisa modelos virtuais nos quais o volume permanece constante. Já o CFX e FLUENT pertencem a uma geração mais avançada de programas de simulação computacional, que utilizam o Método de Volume de Controle, o qual permite que o volume do modelo virtual varie.

Os programas CFX e FLUENT são apropriados para modelar escoamentos especiais e efetuar algumas análises, tais como:

- Escoamentos multifásicos: mistura de sólidos, areia ou lama com líquido e gás, muito comuns nas perfurações de poços da indústria de petróleo e gás;
- Combustão e reações químicas: mistura e escoamento de gases inflamáveis que variam de volume durante os processos de queima e reações de gases, muito comuns nos incêndios de equipamentos em indústrias químicas, petroquímicas e plataformas de petróleo.

Atualmente o programa ANSYS, com seus novos Módulos de análise dinâmica de fluidos e otimização é líder em seu segmento e realiza inúmeros tipos de análises multifísicas de engenharia, sendo capaz de importa arquivos com modelos sólidos de diversos programas de CAD (*Computer Aided Design*).

4. METODOLOGIA DO TRABALHO

Neste item são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para o alcance dos objetivos propostos nesta pesquisa. São definidos os itens que caracterizam a pesquisa realizada, as técnicas e métodos utilizados, o universo investigado, a coleta e a análise de dados e algumas considerações sobre o estudo de caso.

Para STRAUSS e CORBIN (2008), metodologia é uma forma de pensar sobre a realidade social e de estudá-la e método é um conjunto de procedimentos e técnicas para coletar e analisar dados.

COOPER e SCHINDLER (2003) apud CORRÊA (2009) citam que a metodologia não aparece no processo de investigação científica como solução geral, mas como uma forma de expediente de questionamento mais criativo e que permite a seleção de opções mais seguras. A metodologia de uma pesquisa depende fundamentalmente da sua natureza e de seu objetivo.

De acordo com LAKATOS e MARCONI (2007), a finalidade da atividade científica é a obtenção da verdade, por intermédio da comprovação de hipóteses, que, por sua vez, são pontes entre a observação da realidade e a teoria científica, que explica a realidade.

Segundo SEVERINO (2007), a percepção de uma situação problemática que envolve um objeto é o fator que desencadeia a indagação científica.

Segundo CRUZ e RIBEIRO (2004), pesquisar é buscar compreender a forma como se processam os fenômenos observáveis, descrevendo sua estrutura e funcionamento.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Em relação à sua natureza, a pesquisa realizada neste trabalho se classifica como aplicada. Segundo FACEB (2006), este tipo de pesquisa visa gerar conhecimentos para aplicação prática dirigida à solução de problemas específicos. Pode ser também denominada, de acordo com SEVERINO (2007) de pesquisa-ação, pois além de compreender a situação, visa intervir na mesma com o objetivo de modificá-la. O conhecimento que se busca, articula-se a uma finalidade intencional de alteração da situação pesquisada. Assim, ao mesmo tempo em que se realiza um diagnóstico e a análise de uma determinada situação, a pesquisa propõe mudanças que levem a um aprimoramento das práticas analisadas.

Nesta dissertação são apresentados os benefícios, as vantagens e as aplicações das análises de simulação computacional para a evolução dos Sistemas de Gestão Ambiental, como complemento e refinamento para se efetuar:

- A análise de risco ambiental: quando não é possível modelar o fenômeno físico por meio de experimentos, quando não há dados sobre frequências e probabilidades de ocorrências de acidentes, para verificar causas e conseqüências de acidentes e simular seqüências de acidentes (efeito dominó) por meio de análises em etapas;
- A avaliação de desempenho ambiental: quando se objetiva melhorar o desempenho de produtos e processos para melhorar os indicadores operacionais de desempenho ambiental;
- A implantação e melhoria do Sistema de Gestão Ambiental: quando se pretende adequar processos e produtos para atender os requisitos ambientais, tais como redução dos níveis de poluição, ruídos, vibrações e calor entre outras exigências.

Desta forma, com esta pesquisa espera-se contribuir para o aprimoramento das práticas analisadas.

Quanto à forma de abordagem, a pesquisa efetuada é qualitativa. De acordo com STRAUSS e COBIN (2008), nesta pesquisa os resultados produzidos não podem ser alcançados por meio de procedimentos estatísticos ou outros meios de quantificação. Os componentes principais deste tipo de pesquisa são:

- Dados: documentos, registros, entrevistas, observações, filmes entre outras fontes;
- Procedimentos: modos utilizados para interpretar e organizar dados tais como, conceituar e reduzir dados, elaborar categorias em termos de suas propriedades e dimensões e relacioná-los por meio de uma série de declarações preposicionais;
- Relatórios escritos e verbais: artigos em jornais científicos, palestras, conferências e livros entre outras fontes.

Segundo LAKATOS e MARCONI (2007), a pesquisa qualitativa se preocupa em analisar e interpretar aspectos mais profundos do tema e fornece uma análise mais detalhada sobre as investigações e tendências do estudo. Engloba a pesquisa ou coleta de dados e a análise e interpretação dos mesmos.

Nesta dissertação são pesquisados os procedimentos, as ferramentas e as normas utilizadas atualmente para se efetuar a análise de risco, a avaliação de desempenho e a implantação e melhoria do Sistema de Gestão Ambientais, com os objetivos de conhecer e entender melhor,

além de verificar o contexto e as etapas das análises, os dados necessários para a utilização das ferramentas disponíveis e os requisitos das normas ambientais, buscando identificar situações em que é possível aplicar a análise de simulação computacional como uma ferramenta que possa complementar e agregar valor aos recursos já utilizados.

De acordo com as fontes de informação, a pesquisa elaborada para esta dissertação é bibliográfica. Para CRUZ e RIBEIRO (2004), esta categoria de pesquisa visa a um levantamento dos trabalhos realizados anteriormente sobre o tema estudado no momento, identifica e seleciona os métodos e técnicas a serem utilizados e fornece subsídios para a redação da introdução e revisão da literatura do projeto ou trabalho, levando ao aprendizado sobre uma determinada área.

Segundo FACEB (2006), a revisão da literatura visa analisar os conhecimentos existentes (estado da arte) sobre a situação a ser estudado e destacar os elementos do projeto, com base em revisão de literatura atual, relevante e relacionada às questões técnico-científicas colocadas pelo projeto.

Quanto aos objetivos, a pesquisa efetuada neste trabalho é do tipo exploratória. Segundo FACEB (2006), esta pesquisa tem por fim proporcionar maior familiaridade com o problema, de modo a torná-lo explícito ou a construir hipóteses. Envolve o levantamento bibliográfico e a análise de exemplos, que estimulem a compreensão. Em geral assume as formas de pesquisa bibliográfica e estudo de caso.

Para SEVERINO (2007), a pesquisa exploratória busca levantar informações sobre um determinado objeto, delimitando assim um campo de trabalho e mapeando as condições de manifestação desse objeto.

Nesta dissertação efetua-se um levantamento bibliográfico, definem-se hipóteses e apresentam-se estudos de caso, com análises das aplicações da simulação computacional, as quais podem ser aplicadas em análise de risco, na avaliação de desempenho e na melhoria do Sistema de Gestão Ambientais.

As pesquisas realizadas para a elaboração desta dissertação foram efetuadas em livros, normas técnicas e manuais de instituições técnicas citados nas referências bibliográficas, artigos científicos indexados de revistas e jornais (*journals*) científicos encontrados em Bases de Dados

do Portal CAPES tais como SCOPUS Find out, Compendex on Engineering Village, SciFinder Scholar, ISI Web of KNOWLEDGE, Periódicos acesso livre, Bancos de Dissertações e Teses de Bibliotecas disponíveis na Internet, tais como: Universia, Domínio Público, de Universidades Nacionais e Internacionais, de Instituições de Ensino tais como FGV e IBMEC, do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), Manuais do Programa ANSYS, relatórios de consultorias realizadas com o Programa ANSYS, Conference Proceedings, materiais encontrados no Google Scholar ou Acadêmico, tais como artigos científicos, dissertações e teses, revistas de instituições científicas e jornais.

De acordo com SEVERINO (2007), na escolha de um caso a ser estudado, considera-se a sua importância em relação a um conjunto de casos análogos. O caso deve ser significativo e representativo, de modo a ser apto a fundamentar uma generalização para situações análogas, autorizando inferências (deduções).

Para ZOGBI (2007), o estudo de caso é uma estratégia que tem como forma de questão de pesquisa responder as questões “Como e Porque?”, focalizando em acontecimentos contemporâneos sem ter controle sobre estes eventos.

Ainda para a autora, as evidências para um estudo de caso podem vir de seis fontes distintas: documentos, registros em arquivos, entrevistas, observação direta, observação participante e artefatos físicos. Para a utilização destas informações é importante considerar que várias fontes de evidências devem convergir ao mesmo conjunto de fatos e dados e é necessário que as questões feitas, os dados coletados e as conclusões tenham uma ligação explícita.

Segundo LAKATOS e MARCONI (2007), a metodologia qualitativa tradicionalmente se identifica com o Estudo de Caso ou método monográfico e há alguns motivos para se efetuar este estudo, tais como:

- Intrínsecos: representação de traços particulares;
- Instrumentais: esclarecimentos de traços sobre algumas questões;
- Coletivos: abordagem de vários fenômenos conjuntamente.

Ainda para as autoras, o Estudo de Caso qualitativo deve reunir o maior número possível de informações detalhadas, valendo-se de diferentes técnicas de pesquisa, visando apreender uma determinada situação e descrever a complexidade de um fato.

4.2 MÉTODO DA PESQUISA

LAKATOS e MARCONI (2007), apresentam os seguintes conceitos para método:

- Conjunto das atividades sistemáticas e racionais que, com maior segurança e economia, permite alcançar o objetivo – conhecimentos válidos e verdadeiros –, traçando o caminho a ser seguido, detectando erros e auxiliando as decisões do cientista;
- Série de regras com a finalidade de resolver determinado problema ou explicar um fato por meio de hipóteses ou teorias que devem ser testadas experimentalmente e podem ser comprovadas ou refutadas. Se a hipótese for aprovada nos testes, será considerada uma justificativa adequada dos fatos e aceita ou adotada para fins práticos.

Segundo SEVERINO (2007), método científico é um conjunto de procedimentos lógicos e de técnicas operacionais que permitem o acesso às relações causais constantes entre os fenômenos.

De acordo com GIL (1999) apud FACEB (2006), método científico é o conjunto de processos ou operações que se deve empregar na investigação. É a linha de raciocínio adotada no processo de pesquisa. Os principais métodos científicos que fornecem as bases lógicas à investigação são: indutivo, dedutivo, hipotético-dedutivo, estatístico e fenomenológico entre outros.

Para CRUZ e RIBEIRO (2004), método científico é o conjunto de etapas e processos a serem ultrapassados ordenadamente na investigação dos fatos ou na procura da verdade. Propicia o controle da busca do conhecimento, ou seja, é o que permite, na ciência, delimitar o campo da pesquisa. Com o método é possível descobrir a regularidade que existe nos fatos e esta é a grande preocupação do pesquisador: a partir da observação da regularidade dos fenômenos, verificar, inferir, explicar e generalizar o fenômeno e, então, transformá-lo em lei.

Ainda de acordo com os autores, o método científico consiste em quatro práticas operacionais:

- Desenvolvimento do problema: definição e delimitação do problema por meio de uma pergunta;
- Formulação de uma hipótese: a possível resposta para a pergunta com base em informações anteriores;
- Tomada de dados: coleta de informações relevantes para responder a pergunta formulada;
- Análise e interpretação dos resultados: verificação da resposta. Caso seja satisfatória a pesquisa é dada como concluída. Caso contrário, passa-se à correção das hipóteses, teorias, procedimentos ou dados empregados na obtenção da solução incorreta, iniciando-se um novo ciclo de investigação.

Neste trabalho é utilizado o método indutivo, que de acordo com CRUZ e RIBEIRO (2004) é aquele em que se elaboram hipóteses, leis e teorias. A indução é uma forma de raciocínio ou de argumentação, ou seja, uma forma de reflexão. O argumento indutivo baseia-se na generalização de propriedades comuns a certo número de casos, até agora observados, a todas as ocorrências de fatos similares que se verificarão no futuro. Ex.: Os elementos A, B e C são metais e conduzem energia, logo todos os metais conduzem energia.

Para LAKATOS e MARCONI (2007), indução é um processo mental por intermédio do qual, partindo de dados particulares, suficientemente constatados, infere-se uma verdade geral ou universal, não contida nas partes examinadas. Portanto, o objetivo dos argumentos é levar a conclusões cujo conteúdo é muito mais amplo do que o das premissas nas quais se basearam.

De acordo com SEVERINO (2007), no raciocínio indutivo, ocorre o processo de generalização pelo qual o pesquisador passa do particular para o universal. De alguns fatos observados (fatos particulares), ele conclui que a relação identificada se aplica a todos os fatos da mesma espécie, mesmo àqueles não observados (princípio universal). O que se constatou de uma amostra é estendido a toda a população de casos da mesma espécie.

Ainda segundo o autor, a indução é um procedimento lógico pelo qual se passa de alguns fatos particulares a um princípio geral. Trata-se de um processo generalizado, fundado no pressuposto filosófico do determinismo universal. Pela indução, estabelece-se uma lei geral a partir da repetição constatada de regularidades em vários casos particulares. A partir da observação de

reiteradas incidências de uma determinada regularidade, conclui-se pela sua ocorrência em todos os casos possíveis.

Nesta dissertação, são apresentados os fundamentos, benefícios, vantagens e aplicações da simulação numérica a qual se propõe utilizar em análise de risco, na avaliação de desempenho e na melhoria do Sistema de Gestão Ambientais.

São efetuados também estudos de casos nos quais se utiliza a análise de simulação computacional, mostrando que a mesma pode ajudar a prevenir ou reduzir riscos ambientais e melhorar o desempenho ambiental de produtos e processos, além de colaborar na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental das organizações.

Neste caso, utiliza-se o raciocínio indutivo para se propor que a ferramenta de simulação seja utilizada nas análises e certificações ambientais, pela indução de que os inúmeros benefícios, aplicações e resultados obtidos nas análises de simulação, apresentadas nos estudos de casos, se aplicam às análises de risco, avaliação de desempenho e certificação ambientais.

4.3 TÉCNICA DA PESQUISA

Para CRUZ e RIBEIRO (2004), o método é um caminho racional para se chegar a determinado fim e será executado por meio de técnicas adequadas e convenientes, que são as formas utilizadas para percorrer este caminho. Consiste nos diversos procedimentos ou na utilização de vários recursos peculiares a cada objeto de pesquisa, dentro das diferentes etapas do método. Assim, um determinado método pode ser executado por diferentes técnicas.

De acordo com SEVERINO (2007), as técnicas são procedimentos operacionais que servem de mediação prática para a realização das pesquisas. Podem ser utilizadas em pesquisas conduzidas mediante diferentes metodologias e fundadas em diferentes teorias ou filosofias do conhecimento. Entre as principais técnicas de pesquisa tem-se: a documentação, observação sistemática, entrevistas estruturadas e não-diretivas e questionários entre outras.

Na pesquisa realizada nesta dissertação utilizam-se as técnicas de observação e documentação.

Segundo SEVERINO (2007), a observação é o procedimento que permite acesso aos fenômenos estudados. É uma etapa imprescindível em qualquer tipo ou modalidade de pesquisa.

De acordo com LAKATOS e MARCONI (2007), a observação é uma técnica de coleta de dados para conseguir informações utilizando os sentidos na obtenção de determinados aspectos da realidade. Não consiste apenas em ver e ouvir, mas também em examinar fatos ou fenômenos que se deseja estudar e possibilita um contato pessoal e estreito do investigador com o fenômeno pesquisado. Seu principal objetivo é registrar e acumular informações.

Nesta dissertação se utiliza a técnica de Observação não Estruturada ou Assistemática, definida pelas autoras e também denominada de Espontânea, Informal, Ordinária, Simples, Livre, Ocasional ou Acidental. Segundo as autoras, este tipo de técnica consiste em recolher e registrar fatos da realidade, não sendo necessário que o pesquisador utilize meios técnicos especiais ou precise fazer perguntas diretas. É mais empregada em estudos exploratórios e não tem planejamento e controle previamente elaborados.

Neste trabalho a observação é do tipo individual. Como o nome indica, segundo LAKATOS e MARCONI (2007), é a técnica realizada apenas por um investigador. Neste caso, a personalidade do mesmo pode projetar-se sobre o observado, fazendo algumas inferências ou distorções, pela limitada possibilidade de controle. Por outro lado, pode intensificar a objetividade de suas informações, anotando os eventos reais.

Quanto à documentação, SEVERINO (2007) relata que a mesma é toda forma de registro, sistematização de dados e informações, colocadas em condições de análise por parte do pesquisador. Pode ser tomada em três sentidos fundamentais:

- Como técnica de coleta, organização e conservação de documentos;
- Como ciência que elabora critérios para a coleta, organização, sistematização, conservação, difusão dos documentos;
- No contexto da realização de uma pesquisa, como a técnica de identificação, levantamento, exploração de documentos fontes do objeto pesquisado e registro das informações retiradas nessas fontes e que serão utilizadas no desenvolvimento do trabalho.

De acordo com SEVERINO (2007), em ciência, documento é todo objeto (livro, jornal, estátua, escultura, edifício, ferramenta, túmulo, monumento, foto, filme, vídeo, disco, CD, site etc.) que se torna suporte material (pedra, madeira, metal, papel, etc.) de uma informação (oral, escrita, gestual, visual, sonora, etc.) que nele é fixada mediante técnicas especiais (escritura, impressão, incrustação, pintura, escultura, construção, etc.). Nessa condição, transforma-se em fonte durável de informação sobre os fenômenos pesquisados.

Como já mencionado, as pesquisas realizadas para a elaboração desta dissertação foram efetuadas por meio de levantamento bibliográfico e revisão bibliográfica.

Inicialmente foram realizadas pesquisas nas Bases de Dados já citadas, em busca de artigos científicos, utilizando palavras e expressões em português e inglês, tais como: risco ambiental (*environmental risk*), análise de risco (*risk analysis*), avaliação de risco (*risk assessment*) certificação ambiental (*environmental certification*), desempenho ambiental (*environmental performance*), avaliação de desempenho (*performance evaluation*), confiabilidade (*reliability*), vulnerabilidade (*vulnerability*), análise de conseqüências (*consequence analysis*), sistema de gestão ambiental (*environmental management system*), Normas ABNT NBR ISO 14001 e 14031, simulação computacional (*computational simulation*), análise numérica (*numerical analysis*), simulação numérica (*numerical simulation*), entre outras. Estas palavras e expressões foram pesquisadas em título, palavras-chave (*keywords*), resumo, texto, etc.

Foram realizadas também pesquisas, sobre os assuntos citados acima, em livros, estudos de normas técnicas da área ambiental, tais como ABNT NBR ISO 14001 e 14031 e buscas nas Bases de Dados utilizando as expressões “simulação computacional ou numérica” e “risco, avaliação, sistema de gestão ou certificação ambientais”, variando-se as combinações.

Foram também pesquisadas dissertações e teses nas Bases de Dados citadas, em sites das bibliotecas virtuais Universia e Domínio Público, bibliotecas de universidades e de instituições de ensino e no Google Acadêmico, utilizando as mesmas palavras e expressões já citadas.

Foi efetuada também, no *Website*, uma busca de livros e artigos técnicos publicados em Anais de Congresso, Seminários, Fóruns, Anais de Congressos sobre simulação numérica ou computacional e revistas técnicas de instituições de ensino e pesquisa, manuais técnicos de companhias e instituições tais como CETESB, CEPAL, EPA, FIESP e FIERJ entre outras citadas nas referências bibliográficas.

5. METODOLOGIA DA ANÁLISE DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O programa de simulação computacional é uma ferramenta que pode ser utilizada para a previsão, avaliação, gerenciamento e controle do risco ambiental, avaliação de desempenho ambiental e melhoria do Sistema de Gestão Ambiental.

Neste programa pode-se efetuar a modelagem de estruturas e equipamentos diversos, dutos, peças estruturais, meios de transporte, processos de transferência de calor, incêndios e colapso de estruturas e equipamentos, quedas e impactos de objetos, fadiga e fraturas de estruturas, componentes mecânicos, terremotos, explosões com efeitos das ondas de choque, vazamentos, combustão e dispersão de gases, escoamento de fluidos com misturas de líquidos ou gases, combustão, reações químicas, interação entre fluido e estrutura tais como movimento do fluido pressurizado em um duto e efeito de ventos em estruturas ou equipamentos, entre outros.

Por meio da modelagem e análise do comportamento do objeto em estudo, o qual é submetido a condições diversas de operação, sobrecarga ou falha por fadiga ou acidente, pode-se prever danos e a partir dos resultados obtidos pode-se modificar ou alterar o objeto para reduzir os perigos que podem ocorrer na operação e para aumentar a confiabilidade do mesmo, utilizando-se para os cálculos o Método dos Elementos Finitos e a metodologia de análise, descritos a seguir.

5.1 DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos consiste em representar o objeto em estudo por meio de uma malha composta de elementos conectados por meio de pontos nodais.

Segundo BATHE (2007) é um método numérico que utiliza polinômios de interpolação para discretizar variáveis de equações diferenciais que representam os comportamentos de meios contínuos, fornecendo resultados nos pontos nodais da malha de elementos finitos.

As principais equações utilizadas no Programa ANSYS, de acordo com ANSYS (2009) e os principais resultados fornecidos são os seguintes:

- Equações da Elástica: representam o comportamento do objeto por meio de seus deslocamentos, tensões e deformações;
- Equações da Dinâmica de Estruturas: representam o comportamento do objeto por meio de seus modos de vibração (auto-vetores) e de suas frequências (auto-valores), deslocamentos e tensões x frequências, pontos de ressonâncias;
- Equações da Mecânica da Fratura: representam o comportamento de uma trinca por meio das tensões locais e da energia de propagação da mesma;
- Equações da Fadiga: representam o comportamento do objeto submetido a cargas cíclicas por meio de sua vida útil, fatores de segurança e tensões;
- Equações de Contatos: representam a transferência de esforços ou de calor entre objetos, por meio das pressões e das temperaturas entre contatos;
- Equações de Flambagem: representam o comportamento da instabilidade do objeto por meio de seus modos e respectivas cargas críticas que causam a flambagem;
- Equações/Algoritmos de Otimização: representam as mudanças da geometria e das variáveis de projeto por meio de opções de combinações de formas, deslocamentos, tensões e deformações otimizados, segundo os requisitos do projeto;
- Equações de Transferência de Calor: representam o processo de aquecimento e resfriamento do objeto ou fluido por meio de suas temperaturas e fluxos de calor;
- Equações do Eletromagnetismo, Eletrostática e Eletrodinâmica: representam um campo eletromagnético por meio das intensidades de forças de campo e do calor emitido, de correntes elétricas e de voltagens;
- Equações da Dinâmica de Fluidos: representam o escoamento do fluido por meio de suas velocidades, pressões exercidas pelo fluido na parede do objeto, percentuais de substâncias nas misturas, temperaturas, energia cinética e dissipação de energia;

- Equações da Combustão: representam a queima do fluido por meio da taxa de combustão e do volume de subprodutos gerados;
- Equações da Química: representam as reações químicas entre substâncias diversas por meio das quantidades das substâncias consumidas e das novas substâncias geradas;
- Equações da Acústica: representam o comportamento de um meio fluido por meio das pressões geradas por ondas choques oriundas de explosões e do objeto que recebe o efeito da onda por meio das pressões e deslocamentos na parede do mesmo.

Por meio da utilização do Método de Energia, a equação diferencial que representa um comportamento estrutural de um objeto ou o movimento de um processo é derivada e igualada a zero para se obter a condição de minimização de gasto de energia deste comportamento ou deste movimento. Desta forma se obtém a equação que representa a situação de menor gasto de energia do objeto ou processo, isto é, a condição de equilíbrio, que define a posição de repouso. Esta equação contém a variável primária, que é a incógnita do problema a ser calculada por meio do Método dos Elementos Finitos.

As variáveis primárias das equações de equilíbrio são substituídas por polinômios que representam o comportamento de um ponto nodal nas fronteiras dos elementos. Os resultados nodais são interpolados dentro do elemento entre os pontos nodais do objeto em estudo.

O objeto é discretizado, isto é, dividido em elementos, conectados por pontos nodais, os quais formam a malha de elementos finitos do corpo. As equações são aplicadas para cada elemento, com seus respectivos pontos nodais, os quais se comportam de acordo com a equação que representa o comportamento físico do elemento escolhido para compor a malha. Os resultados em todos os pontos nodais fornecem o comportamento global do objeto em estudo.

5.2 DEFINIÇÃO DO PROGRAMA ANSYS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Os programas que executam uma análise de engenharia por meio de simulação computacional, tal como o ANSYS, são compostos de rotinas matemáticas, em geral, desenvolvidas na linguagem de programação FORTRAN, com interfaces gráficas elaboradas em BASIC, JAVA ou outra ferramenta de programa, tendo como exemplo o Programa ANSYS, o qual é utilizado como referência neste trabalho.

Há diversos tipos de rotinas que compõem o Programa ANSYS:

a) Rotinas comuns aos programas existentes no mercado tais como: de elaboração de malha de elementos finitos, de aplicação de cargas e condições de contorno ou de fixação, de montagem e inversão de matrizes definidas com parâmetros geométricos e dos materiais do objeto, propriedades mecânicas e físicas dos materiais, de algoritmos de solução dos sistemas de equações denominados *Solvers*, de figuras, listagem de resultados e elaboração de relatórios entre outras.

b) Rotinas específicas com as equações que representam o comportamento dos diversos tipos de elementos, os quais fazem parte da biblioteca de elementos do programa, as quais criam diferenciais e valor científico para os programas, quanto às suas capacidade de:

- Modelar diferentes tipos de objetos tais como treliças, vigas cascas, sólidos, contatos pontuais e de superfície, sistemas massa/mola/amortecedor, campos magnéticos e escoamentos de fluidos;
- Representar comportamentos simples (lineares) ou mais complexas (não lineares) tais como: plasticidade, fluência (“*creep*”), processos térmicos tais como condução, convecção e radiação, escoamento de fluido, geração de um campo magnético, combustão e reações químicas entre outros fenômenos físicos e químicos;

c) Rotinas específicas para representar fenômenos tais como: trincas, fadiga, terremotos, escavações, rupturas/fraturas de materiais, delaminação (descolamento das camadas de um material compósito), vazamentos e explosões entre outros.

Em geral os programas de simulação são divididos em 3 módulos. No Programa ANSYS tem-se:

a) Pré-processador: módulo com funções para modelagem do objeto, definição dos atributos do modelo (tipo de elemento, material e propriedades geométricas, físicas e mecânicas), elaboração da malha de elementos finitos, definição e aplicação dos carregamentos e das condições de contorno ou de fixação;

b) Módulo de Solução: módulo onde são definidos os parâmetros de convergência da análise, o tipo de algoritmo de solução e os diversos tipos de carregamento, quando são aplicados em passos de carga (*load steps*);

c) Pós-processador: módulo de apresentação dos resultados obtidos, com funções de plotagem e listagem dos valores calculados pelo programa. Inclui um submódulo utilizado para gerar curvas dos resultados obtidos nas análises não lineares, em que se trabalha com iterações e incrementos de carga e nas análises transientes, onde os resultados variam ao longo do tempo.

5.3 TIPOS E CARACTERÍSTICAS DAS ANÁLISES E DOS ELEMENTOS FINITOS

As principais análises de simulação realizadas com o programa ANSYS são:

- Estrutural: estática, dinâmica (modal/frequências, superposição modal, transiente, sísmica), flambagem (análise de instabilidade de estrutura ou equipamentos), fadiga, mecânica da fratura. As análises podem utilizar elementos com formulação linear ou com equações que representem as não linearidades geométricas (grandes deslocamentos), de material (plasticidade) e de contatos;
- Térmica: regime permanente ou transiente com condução, convecção e radiação;
- Dinâmica de fluidos: regime permanente ou transiente, escoamento laminar ou turbulento, com misturas ou escoamentos multifásicos (líquido, sólido e gás), combustão e reações químicas;
- Eletromagnética: regime permanente ou transiente, com interação das forças ou de temperaturas oriundas de campos eletromagnéticos, as quais são transferidas a uma estrutura ou fluido.

Há diversos tipos de elementos finitos para modelos sólidos e elementos de volumes finitos para fluidos, os quais são utilizados na modelagem do problema. Estes elementos são definidos por pontos nodais os quais possuem graus-de-liberdade, isto é, variáveis primárias, que são as

incógnitas do problema, as quais definem os movimentos do objeto em estudo tais como deslocamentos, rotações e velocidades nas direções X, Y e Z (variáveis vetoriais: com valores diferentes em cada direção) e temperatura (variável escalar).

O programa calcula também as variáveis secundárias, tais como tensões, deformações, fluxos de calor, coeficientes de filme e pressões de contato que dependem dos valores das variáveis primárias e são utilizadas para diversas verificações e avaliações do comportamento do objeto, tais como deformações permanentes, colapso, ruptura e superaquecimento entre outras.

O número de nós de um elemento corresponde ao tipo do polinômio de interpolação utilizado para representar o comportamento das variáveis primárias e secundárias. Elementos com pontos nodais somente nos vértices utilizam polinômio linear e elementos com nós intermediários, no meio das arestas dos elementos utilizam polinômio quadrático.

Para cada tipo de análise deve-se utilizar o elemento com a formulação que atenda ao tipo de comportamento do objeto em estudo. Isto é importante, pois caso a reação do objeto durante o seu movimento seja não linear, os cálculos somente serão corretos se as equações incluírem os termos que modelam e calculam as não linearidades.

Em geral, os elementos possuem as mesmas geometrias, diferindo nos graus-de-liberdade e nas equações, as quais são específicas para o cálculo das variáveis da análise. Os principais tipos de elementos com os correspondentes números de nós são:

- Pontual: mola, massa e amortecedor com 1 ou 2 nós e contato ponto-a-ponto com 2 nós;
- Linha (unidimensional): treliça ou cabo (“link”), viga (“beam”), duto (“pipe”) com 2 ou 3 nós;
- Plano (bidimensionais: quadrado ou triângulo): sólido 2D (“plane”), casca (“shell”) e contato superfície-superfície com 4 e 8 nós;
- Sólido (tridimensionais: hexaedro ou tetraedro): sólido 3D com 8 a 20 nós e contato superfície-superfície com 8 nós.

As variáveis primárias (graus-de-liberdade ou DOFs - “*degree of freedom*”) e as variáveis secundárias calculadas pelo programa, de acordo com o tipo de análise realizada são as seguintes:

a) Estruturais:

- Variáveis primárias: deslocamentos nodais;
- Variáveis secundárias: tensões, deformações, pressões de contato, forças nodais, reações nos pontos de fixação entre outras;

b) Térmicas:

- Variáveis primárias: temperaturas;
- Variáveis secundárias: fluxos de calor, coeficientes de filme e gradiente de temperatura;

c) Dinâmica de Fluidos:

- Variáveis primárias: velocidades do escoamento nas direções X, Y e Z, pressões, energia cinética, dissipação de energia, temperatura;
- Variáveis secundárias: coeficientes de filme, linhas de corrente, tensões superficiais, percentual de uma substância em uma mistura ou de novas substâncias em reações químicas e taxa de combustão entre outras.

d) Eletromagnética:

- variáveis primárias: intensidade de corrente, voltagem, força de campo, temperatura;
- variáveis secundárias: forças do campo magnético, voltagens, linhas de fluxo entre outras;

Para diferentes tipos de análises, há diversos tipos de elementos, os quais são compostos por pontos nodais, com graus-de-liberdade, isto é, variáveis primárias que representam o comportamento da estrutura, processo, escoamento ou campo magnético em diferentes direções.

Os principais carregamentos impostos ao objeto, processo ou escoamento são os seguintes:

- Estruturais: forças nodais, pressão na linha ou na área, deslocamentos prescritos (impostos), pré-tensão, temperaturas prescritas, velocidade ou aceleração inicial;
- Térmicos: temperaturas iniciais, fluxo de calor;
- Escoamentos: temperaturas, velocidades, pressão, energia cinética e dissipação de energia.

As principais condições de fixação ou de contorno aplicadas ao objeto, processo ou escoamento são as seguintes:

- Estruturais: deslocamentos e rotações nulas, status de um contato (fechado ou aberto);
- Térmicos: coeficiente de filme, temperaturas inicial, externa e interna em torno do objeto;
- Escoamentos: temperaturas, velocidades, pressão, energia cinética e dissipação de energia.

As principais propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizadas nas análises são:

- Estruturais: Módulo de Elasticidade, Coeficiente de Poisson, densidade, curvas de tensão x deformação, no caso de análise com deformação permanente, coeficiente de dilatação térmica;
- Térmicas: condutividade térmica, calor específico, coeficiente de filme ou de convecção;
- Dinâmica de Fluidos: viscosidade, densidade.

As propriedades geométricas são as informações sobre a geometria do objeto, as quais devem ser definidas, quando o elemento utilizado não é um sólido (volume). As principais propriedades geométricas dos elementos, chamadas de *Real Constants* no programa ANSYS, são as seguintes:

- Treliça: área da seção transversal;
- Viga: área da seção transversal ou espessuras e dimensões da mesa e da alma do perfil;
- Mola: rigidez, comprimento;
- Massa: valor da massa;
- Contato: atrito entre as partes, rigidez;
- Casca: espessura total, número e espessuras das camadas dos materiais (para compósitos).

5.4 PROCEDIMENTO DA ANÁLISE DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Os principais passos para a execução de uma análise de simulação computacional são:

- Definição do objetivo da análise e dos resultados esperados;
- Definição do tipo de análise a ser realizado;
- Análise dos dados do objeto de estudo: desenhos com dimensões, fotos, arquivos do modelo sólido elaborado em um programa de CAD;
- Obtenção e definição das propriedades físicas e mecânicas dos materiais;
- Obtenção e definição das propriedades geométricas dos elementos que serão utilizados para representar o objeto, tais como treliça, viga, casca, mola e contato entre outros;
- Definição dos carregamentos e local de aplicação dos mesmos;

- Elaboração do modelo sólido bidimensional (plano) ou tridimensional (volume), utilizando as estratégias de modelagem para gerar planos ou volumes distintos de acordo com os tipos de materiais que compõem a peças, com as posições dos carregamentos e dos pontos de fixação;
- Escolha dos tipos de elementos a serem utilizado na discretização (nós e elementos) do modelo;
- Definição dos atributos do modelo para planos e/ou volumes tais como tipo de elemento, propriedades dos materiais e propriedades geométricas;
- Elaboração da malha de elementos finitos. Nas regiões onde há mudanças bruscas de geometria, regiões de furos e quinas, podem ocorrer concentrações de tensões (estrutura), os altos gradientes de temperatura (processo) ou as turbulências (fluido). Nestes locais deve-se preparar uma malha mais refinada, para que os resultados sejam calculados com maior precisão;
- Definição dos parâmetros de convergência da análise e do algoritmo de solução;
- Escolha dos métodos que aceleram a convergência das análises não lineares;
- Armazenamento do modelo e de todos os dados definidos;
- Execução da análise;
- Verificação da convergência da análise e dos resultados obtidos;
- Plotagem e listagem dos resultados;
- Elaboração de curvas com os resultados das análises não lineares (que variam com as iterações de convergência) e/ou transientes (que variam ao longo do tempo);
- Avaliação dos resultados: localização de regiões com altos gradientes de tensões, as quais podem necessitar de refinamento, verificação de valores admissíveis de acordo com as Normas técnicas, identificação de regiões críticas, com concentrações de tensões e deformações permanentes, que apresentam resultados acima dos valores admissíveis pelas Normas técnicas de projeto e operação e análise do comportamento global do objeto entre outros;
- Verificação dos erros do desvio padrão e de energia;
- Refinamento das regiões críticas do modelo onde aparecem os maiores erros;
- Modificação na geometria do objeto nos locais onde ocorrem altas concentrações de tensões;
- Nova execução da análise e verificação dos resultados e erros, para comprovação da eficiência ou não das alterações efetuadas.

6. RESULTADOS OBTIDOS NA ANÁLISE DE SIMULAÇÃO

Os resultados que podem ser obtidos na análise de simulação computacional dependem dos objetivos do estudo. Para que os mesmos sejam calculados é necessário escolher o tipo de análise, o tipo de modelo (uni, bi ou tridimensional), os tipos de elementos com os graus-de-liberdade que representam os movimentos do objeto e os carregamentos adequados, para que se possa obter a representação dos fenômenos que se pretende reproduzir por meio da simulação e dos seus efeitos no objeto de estudo.

Os resultados são calculados nos pontos nodais e nos elementos e plotados ao longo do objeto em diferentes cores que correspondem aos valores obtidos. As cores são identificadas em uma legenda, junto do objeto com faixas de valores da variável para cada cor. Pode-se também plotar curvas que representam o comportamento de uma variável ao longo do tempo ou das iterações de convergência, em um ponto nodal ou elemento específico.

O movimento do objeto durante a análise pode ser reproduzido em uma animação. Este recurso do programa permite a verificação do comportamento do objeto durante a aplicação das etapas (incrementos) de carregamento, do processo de aquecimento ou resfriamento e do escoamento onde pode ocorrer a formação de áreas de turbulência ou a mistura de fluidos.

6.1 TIPOS DE RESULTADOS OBTIDOS NAS ANÁLISES COM O PROGRAMA ANSYS

Os principais resultados que podem ser calculados, plotados e listados nos diversos tipos de análise de simulação computacional com o Programa ANSYS são os seguintes:

a) Estrutural:

- Estática: deformação global, deslocamentos, tensões, deformações e pressões de contato;
- Dinâmica: deformação global do objeto, deslocamentos, tensões e deformações ao longo do tempo e da frequência, modos e frequências de vibração;
- Fadiga: vida útil, tensão máxima e número de ciclos, fatores de segurança;
- Mecânica da Fratura: energia de deformação da trinca;
- Flambagem: modos de flambagem e cargas críticas.

b) Térmica: temperaturas, fluxos de calor, gradientes de temperatura e coeficientes de filme entre outras variáveis;

c) Dinâmica de Fluidos: velocidades, temperaturas, pressões, energia cinética e dissipação de energia, percentual de cada fluido na mistura.

Nestas análises pode-se simular situações de sobrecarga do objeto, por meio da aplicação de carregamentos e visualização dos resultados em etapas (*load steps*), o que permite efetuar a previsão de riscos e acidentes ambientais, com a identificação da carga limite ou da temperatura máxima de operação e com a verificação da alteração de um processo e da variação de um escoamento, tais como:

- Impactos entre plataformas, plataforma e navio ou outros obstáculos que possam ser modelados. Estes impactos ou choques podem afetar a integridade estrutural da plataforma e do navio, levando a rupturas e/ou colapsos, quedas de estruturas e equipamentos e/ou afundamento dos mesmos com, explosões, derramamentos de substâncias tóxicas na plataforma, navio e mar, incêndios e ferimentos ou mortes de pessoas;
- Explosões e efeitos de ondas de choque tais como deformações permanentes, rupturas, colapsos e incêndios que podem causar vazamentos em submarinos nucleares, equipamentos, dutos e navios que transportam óleo e substâncias tóxicas, poluindo o solo, água e ar, causando mortes de indivíduos que operam estes equipamentos, além de destruição da vida marinha;
- Rupturas de estruturas, componentes mecânicos ou equipamentos, com gases ou líquidos tóxicos, submetidos a cargas cíclicas, tais como, altas variações de pressões ou de temperatura, causando poluições ambientais diversas e mortes de indivíduos;
- Incêndio em equipamentos causados por vazamentos de gases inflamáveis, os quais se concentram na atmosfera e podem causar ignições e explosões. O aquecimento devido ao incêndio causa a perda de resistência do material dos equipamentos e das estruturas onde estão apoiados, levando a deformações permanentes, rupturas ou colapso dos mesmos, com danos irreversíveis, mortes de indivíduos e poluições diversas;
- Explosão ou queda de uma aeronave sobre um reator nuclear; causando rupturas e vazamentos de substâncias radioativas, ferimentos ou mortes de pessoas e desastres ambientais no ar, água e solo, muitas vezes irreversíveis;

- Quedas de barragem, encostas e estradas próximas a corpos d'água, com poluição dos mesmos, mortes de pessoas e da vida aquática.

6.2 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Como a simulação computacional é uma ferramenta de análise que utiliza um método numérico para o cálculo das variáveis do problema, os resultados são aproximados. O profissional responsável pela execução da análise deve efetuar algumas verificações e validações para se certificar da convergência e da precisão dos resultados calculados pelo programa.

Inicialmente, devem ser verificados os dados de entrada do modelo: dimensões do objeto, valores ou curvas das propriedades físicas e mecânicas dos materiais, carregamentos, condições de contorno e de fixação do objeto, tipos de elementos escolhidos com os graus-de-liberdade adequados e o tipo de análise. Caso um ou mais dados de entrada da análise estejam errados, ou seja, especificados inadequadamente, os resultados obtidos estarão errados, pois o programa apenas executa os cálculos com os valores e as formulações especificadas pelo usuário.

Caso apareçam regiões com altos gradientes de tensões, temperaturas ou velocidades, deve-se executar todas as verificações indicadas a seguir ou algumas delas, dependendo do grau de erro encontrado nos resultados ou da precisão obtida após os primeiros refinamentos da malha:

a) Estudo de sensibilidade de malha: consiste no refinamento da malha, isto é, redução do tamanho dos elementos do modelo nas regiões com valores elevados e execução de uma nova análise. Havendo alteração dos valores, deve-se efetuar novo refinamento até que se obtenha uma curva assintótica, isto é, uma curva na qual os resultados convergem para um determinado valor;

b) Verificação das tensões nos pontos nodais das regiões críticas, que sejam comuns a vários elementos. Esta avaliação é muito importante porque a formulação de elementos finitos não garante a continuidade das variáveis secundárias, tensões ou fluxos de calor nos pontos nodais dos elementos. Isto significa que estes valores, em um nó comum a dois elementos não são

iguais. Para que o cálculo das variáveis secundárias seja viabilizado, os matemáticos definiram posições dentro do elemento, onde estes valores podem ser calculados com precisão de engenharia. Estas posições são denominadas de Pontos de Gauss. Os valores obtidos podem ser extrapolados para os pontos nodais. Embora a princípio, esta situação possa parecer uma limitação do método, na verdade tornou-se uma medida da precisão dos resultados. Caso os valores encontrados para estas variáveis sejam muito diferentes (mais do que 5%) para um mesmo ponto nodal pertencente a vários elementos, a convergência e a precisão dos resultados devem ser reavaliadas. Neste caso, deve-se efetuar o refinamento da malha e realizar uma nova avaliação das diferenças dos valores das variáveis em um ponto nodal pertencente a vários elementos;

c) Caso um modelo seja elaborado com um elemento de casca de 4 nós, com polinômio linear e aproximação da equação da elástica, desconsiderando as tensões na espessura do objeto em análise, pode-se trocá-lo por um elemento de 8 nós, com polinômio quadrático, ou se elaborar outro modelo com elemento sólido, que utiliza a equação da elástica completa. Os resultados devem ser semelhantes, caso contrário, o elemento de casca não é correto para representar o comportamento do objeto em análise;

d) Caso uma análise seja linear e haja dúvida sobre a existência de alguma não linearidade, pode-se trocar o elemento com a formulação linear por outro com a não linear;

e) Em casos mais complexos, após o estudo de sensibilidade de malha, pode-se executar as análises com diferentes programas de simulação computacional, utilizando-se elementos com formulações simplificadas e completas. Os resultados devem ser similares. Este procedimento já é adotado para a certificação de produtos pela ISO 9001;

f) Em alguns casos, as certificadoras exigem testes de carga em laboratório para validação dos modelos computacionais. Neste caso, deve-se verificar se o objeto original ou o protótipo físico utilizado no teste possui o mesmo material, dimensões iguais ou proporcionais às do modelo virtual e se é submetido às mesmas condições de fixação ou contorno e localização dos

carregamentos, utilizadas na simulação computacional. Caso contrário, os resultados serão diferentes.

7. ESTUDOS DE CASOS DE ANÁLISES DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Neste Capítulo são apresentados alguns estudos de casos de análises de simulação computacional, executadas com o Programa ANSYS.

Estas análises são compostas de consultorias técnicas realizadas pela autora desta dissertação, a pedidos de empresas de engenharia, e de trabalhos executados por engenheiros de indústrias ou empresas de engenharia que possuem o Programa ANSYS. Alguns destes trabalhos foram apresentados em Conferências Nacionais e Internacionais, Congressos e Seminários de Engenharia, como referenciado em cada caso.

Analisando as razões pelas quais as empresas solicitam as análises de simulação computacional, a autora do presente trabalho verificou que há motivos diversos. Os principais objetivos identificados são:

- Solucionar questões complexas de engenharia para as quais não há normas técnicas;
- Realizar o dimensionamento de projetos de equipamentos, peças, estruturas e processos entre outros, antes da fabricação;
- Analisar a integridade estrutural de objetos para os quais é difícil, demorado e/ou dispendioso executar ensaios de protótipos físicos em bancas de testes ou laboratórios;
- Efetuar a Certificação de Garantia de Qualidade de seus produtos e processos;
- Verificar a confiabilidade de seus processos de fabricação e de seus produtos;
- Customizar e criar padrões de cálculos de equipamento e peças entre outros objetos, para reduzir custos e minimizar erros;
- Modificar equipamentos, peças e processos existentes na indústria visando melhorar o desempenho dos mesmos, por meio das reduções dos consumos de materiais, energia, vibrações, ruídos, custos e tempo de fabricação, buscando serem mais competitivos;

- Reproduzir acidentes para avaliar a integridade de peças, estruturas e equipamentos após os danos causados nos mesmos.

As análises destes casos visam servir de base para a proposta efetuada nesta dissertação, por meio da apresentação dos resultados fornecidos pelo programa, em diferentes tipos de análises, os quais podem ser utilizados na análise de risco ambiental, incluindo as análises de conseqüências, vulnerabilidade e confiabilidade, na análise de avaliação de desempenho e na melhoria do Sistema de Gestão Ambientais.

Em cada caso, procura-se identificar as situações que podem ter aplicações nas análises ambientais, relacionadas com itens das Normas ABNT NBR ISO 14001:2004 quanto à análise de risco e à melhoria do Sistema de Gestão Ambiental, e ABNT NBR ISO 14031:2004 quanto à avaliação de desempenho ambiental.

7.1 ANÁLISE TÉRMICA E DE TENSÕES PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO DE INCÊNDIO EM PLATAFORMA OFFSHORE

Esta análise foi realizada para a avaliação do efeito de incêndio em uma plataforma, visando manter a integridade estrutural da mesma para proteção de seus ocupantes, durante a evacuação dos mesmos e/ou o controle do incêndio (SOUZA, 2001).

a) Objetivo da Análise de Simulação

Calcular as temperaturas, tensões e deformações na estrutura da plataforma causadas por incêndio em equipamento, identificando as regiões que podem perder a integridade estrutural e causar o colapso de partes ou de toda a plataforma. Estas regiões devem receber proteções ativas e passivas que são materiais empregados para se obter o isolamento térmico das estruturas.

b) Informações Técnicas sobre a Avaliação do Incêndio:

A empresa decidiu solicitar as análises de simulação computacional para avaliar o efeito de incêndio e obter dados que possam auxiliar suas análises de riscos, após a ocorrência de alguns acidentes em suas plataformas *offshore* devido a explosões e incêndios.

Os vazamentos de gases inflamáveis de equipamentos e a ignição dos mesmos em uma plataforma, podem gerar explosões e incêndios em equipamentos, com superaquecimento, estruturas e equipamentos vizinhos que armazenam produtos perigosos ou transportam petróleo.

O aquecimento excessivo pode causar sobrepressões e/ou perda de resistência do material e gerar falhas ou o colapso de equipamentos e da estrutura. Estes danos podem causar a queda e/ou explosões de equipamentos, desnivelamento e/ou o afundamento da plataforma, destruições de equipamentos vizinhos, tubulações, suportes e desconexões de *risers* (dutos flexíveis que transportam petróleo do poço para os reservatórios na plataforma), levando a vazamentos e/ou ao derramamento de óleo e substâncias tóxicas no mar, que caracterizam alguns desastres ambientais como a destruição da vida marinha e a poluição da água.

No site da Ambiente Brasil (2010), estão apresentados os 29 principais acidentes que ocorreram em plataformas de petróleo no mundo, desde 1980, sendo alguns no Brasil, como destacados a seguir:

- Em 1984, o vazamento de um poço conectado à plataforma de Enchova (Bacia de Campos – RJ), causou explosões, incêndio prolongado e evacuação do convés. Durante a saída de uma embarcação de abandono, houve rompimento do cabo do truco, com a queda da baleeira e as mortes dos 37 ocupantes. Em 1988, um vazamento de gás causou duas explosões e um incêndio na plataforma, destruindo o convés e a torre, com prejuízos de 500 milhões de dólares;
- Em 20/03/2001, a maior plataforma do mundo, a P-36, naufragou, cinco dias depois que três explosões mataram 11 operários. O acidente levou para o fundo do oceano um patrimônio de US\$ 500 milhões e derramou 1,5 milhão de litros de óleo no mar. A P-36 pesava 40 mil toneladas, tinha 175 funcionários e produzia 80 mil barris de petróleo por dia. A plataforma afundou a 120 quilômetros da costa, no Campo do Roncador, Bacia de Campos, a 1.350 metros de profundidade, gerando uma mancha de óleo no mar de oito quilômetros de extensão.

c) Tipos de Análises a serem Realizadas

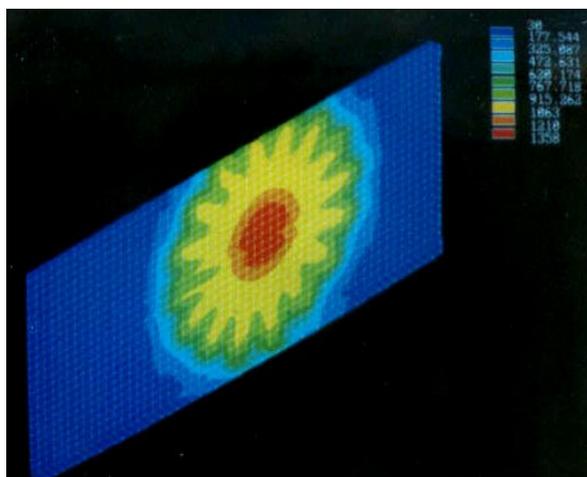
Análises não lineares térmica e estrutural (de tensões) elasto-plástica com variações das propriedades físicas e mecânicas dos materiais, devido à variação das mesmas no intervalo de

25°C a 1900°C e à perda de resistência (plastificação) do material da estrutura que sofre superaquecimento e dilatação térmica;

d) Procedimentos das Análises

1 - Análise Térmica:

- Modela-se o incêndio como um fluxo de calor, na forma de um equipamento, incluindo o efeito do vento e, se possível, os efeitos da combustão que acontece durante o incêndio. O equipamento gerador do incêndio é modelado com elementos sólidos com um fluxo de calor;
- Modela-se a plataforma com elementos térmicos (com grau-de-liberdade de temperatura) de casca (*shell*) no piso, como apresentado na Figura 7.1;
- Definem-se as propriedades físicas dos materiais (condutividade térmica e calor específico);
- Aplicam-se as condições de contorno de convecção, que representam o efeito do vento, com as temperaturas dos ambientes e as condições de radiação que representam o efeito das chamas;
- Executa-se a análise térmica transiente para cálculo das temperaturas em todos os pontos nodais dos elementos na estrutura (vigas) da plataforma, no piso e nas instalações vizinhas ao local do incêndio tais como equipamentos e paredes de alojamentos (caso sejam modelados);
- Obtém-se um arquivo com as temperaturas ao longo do tempo de análise;
- Verificam-se os resultados da distribuição de temperaturas ao longo da plataforma, por meio de plotagens, listagens e curvas de temperaturas x tempo fornecidas pelo programa. Na Figura 7.1 é apresentado o modelo de elementos finitos do piso superior da plataforma, com as temperaturas obtidas na análise térmica. Os valores calculados são resultantes dos efeitos de condução, convecção e radiação, causados pelo incêndio em um equipamento, instalado no piso inferior da plataforma. As diferentes cores que aparecem na figura são identificadas por faixas de temperaturas, apresentadas ao lado direito do modelo, com valores de 30^oC (azul) a 1358^oC (vermelho).
- Verificam-se os erros numéricos dos resultados dos fluxos de calor nos Pontos de Gauss;
- Em caso de erros significativos, deve-se refinar a malha, executar novamente a análise e comparar os resultados com os anteriores. Estas ações devem ser repetidas até que os resultados apresentem valores próximos, indicando a precisão e convergência da análise.



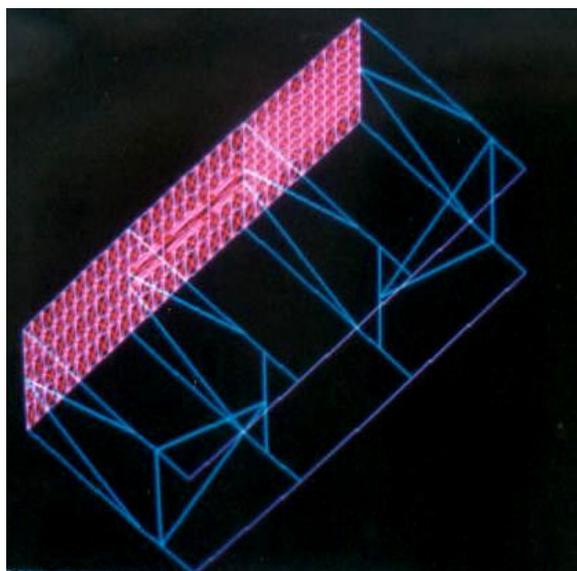
Fonte: Programa ANSYS (SOUZA, 2001)

Figura 7.1 – Distribuição de Temperaturas (30°C a 1358°C) no Modelo de Elementos Finitos do Piso da Plataforma devido ao Efeito do Incêndio de um Equipamento localizado no Piso da Inferior

2 - Análise Estrutural (de Tensões)

- No modelo estrutural de elementos finitos, trocam-se os elementos térmicos por elementos estruturais (com grau-de-liberdade de deslocamentos e de rotações, nas direções X, Y e Z) de viga (*beam*) e treliça (*truss*) no piso, e tubo (“pipe”) nas colunas de sustentação da plataforma, como mostrado na Figura 7.2;
- Definem-se as propriedades físicas e mecânicas dos materiais (densidade, Módulo de Elasticidade, Coeficiente de Poisson e Coeficiente de Dilatação Térmica);
- Aplicam-se os carregamentos estruturais de forças e momentos, referentes aos pesos e esforços dos equipamentos sobre a plataforma;
- O programa lê e aplica automaticamente os carregamentos térmicos, que são as temperaturas nodais, calculadas na análise térmica e armazenadas em um arquivo. Estas cargas térmicas são fundamentais na análise estrutural, pois as diferenças de temperatura causam as dilatações térmicas ao longo da estrutura da plataforma, as quais geram as tensões e deformações permanentes e podem levar a mesma ao colapso;
- Aplicam-se as condições de fixação da estrutura da plataforma;

- Executa-se a análise estrutural não linear para o cálculo dos deslocamentos, tensões e deformações permanentes, pois as temperaturas encontradas reduzem a tensão de escoamento do aço, isto é, seu limite de resistência elástica e ocorrem deformações plásticas que comprometem a integridade da estrutura;



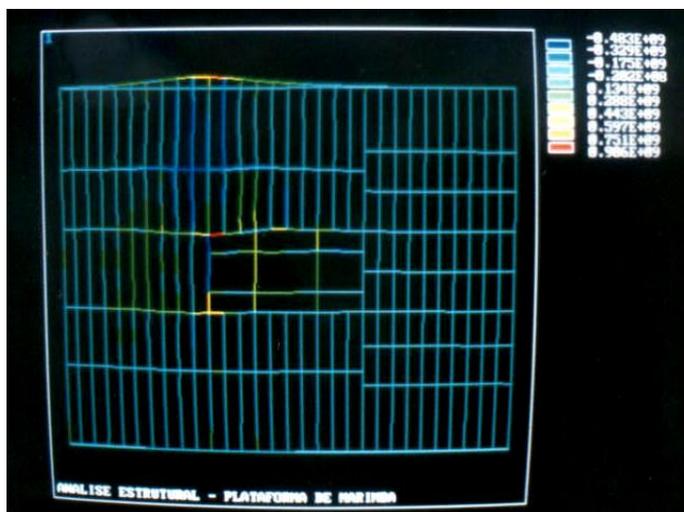
Fonte: Programa ANSYS (SOUZA, 2001)

Figura 7.2 - Modelo de Elementos Finitos da Plataforma utilizado na Análise Estrutural (de tensões) com os Elementos de Viga (rosa claro), de Treliza (rosa escuro) e de Tubo (azul)

- Analisam-se os resultados dos deslocamentos e tensões, por meio de plotagens do modelo e/ou listagem dos valores obtidos, para identificar as regiões com valores acima dos admissíveis pela Norma Técnicas. Na Figura 7.3 são apresentados os valores das tensões de tração e de compressão e as deformações nas vigas, que se localizam abaixo do piso da plataforma, obtidos na análise estrutural, resultantes do efeito e da dilatação térmica devido ao aquecimento da estrutura, na região onde ocorre o incêndio do equipamento. As diferentes cores que aparecem na figura são identificadas por faixas de tensões, plotadas ao lado direito do modelo, com valores de $0.986E9$ Pa (azul-tensões de tração) a $-0.483E9$ Pa (vermelho-tensões de compressão).

- Verificam-se também as deformações plásticas. As regiões que apresentam valores iguais o acima da deformação de ruptura do material, são os locais colapsados, embora a ruptura física

não apareça na plotagem dos resultados, pelo fato de que no método dos elementos finitos a malha não se fragmenta.



Fonte: Programa ANSYS (SOUZA, 2001)

Figura 7.3 – Distribuição de Tensões e a Deformação da Estrutura no Modelo de Elementos Finitos de Vigas do Piso da Plataforma, causadas pelo Aquecimento e Dilatação Térmica devido ao Efeito do Incêndio de um Equipamento

e) Resultados das Análises de Simulação aplicáveis às Análises Ambientais:

Os resultados obtidos nestas análises podem ser aplicados em análises de conseqüências, vulnerabilidade, risco e melhoria do Sistema de Gestão Ambiental da empresa, como proposto a seguir.

1 – Análise Térmica

Os resultados das variáveis primárias da análise térmica são as temperaturas nos pontos nodais da malha de elementos finitos, apresentados na Fig 7.1. Com a visualização e a listagem dos valores obtidos, pode-se verificar as regiões e o grau de severidade com o qual o piso e as vigas são afetados pelo incêndio e onde podem ocorrer danos ou colapso da estrutura ou de equipamentos,

gerenciamento de risco para prevenir e/ou mitigar estes riscos e conseqüentemente acidentes ambientais que podem ocorrer caso a plataforma perca a integridade, causando a queda de equipamentos, explosões, destruição de tubulações, morte de pessoas e o derramamento de óleo e/ou substâncias tóxicas no mar, como será detalhado a seguir.

f) Discussão dos Resultados da Análise de Simulação

Como descrito neste trabalho, as análises de simulação computacional fornecem dados e informações que podem ser utilizadas na análise de risco e avaliação de desempenho ambientais e melhoria do Sistema de Gestão Ambiental (SGA). Estes resultados são analisados por meio dos testes de falseamento discutidos neste item.

As análises térmica e de tensões (estrutural) apresentadas neste estudo de caso fornecem diversos resultados, os quais são analisados por meio dos testes de falseamento, que têm como objetivo verificar se as hipóteses são corroboradas ou refutadas.

Segundo MOURA (2004), para a implantação e/ou melhoria do SGA, a empresa deve demonstrar que está em conformidade com uma norma específica, que pode ser a Norma ABNT NBR ISO 14001:2004, a qual define no Item 4.3.1 que “a organização deve estabelecer e manter procedimentos para identificar os aspectos ambientais de suas atividades, produtos ou serviços que possam por ela ser controlados e aqueles que tenham ou possam ter impacto significativo sobre o meio ambiente. A organização deve, ainda, assegurar que os aspectos relacionados a estes impactos significativos, sejam considerados na definição de seus objetivos ambientais”.

Estas análises de simulação visam avaliar os efeitos de um do incêndio, que é um aspecto ambiental significativo potencial, e fornecer informações sobre seus impactos ambientais na plataforma *offshore*, as quais podem auxiliar a organização na elaboração da análise de risco ambiental e na definição de medidas de controle do aspecto ambiental e minimização dos impactos ambientais, como o uso das proteções ativa e passiva. Por meio destas ações, a organização estará em conformidade com alguns dos requisitos da norma e poderá obter a melhoria de seu Sistema de Gestão Ambiental.

Uma das etapas da Análise de Risco Ambiental é a Análise de Causas e Conseqüências na qual se verificam as causas e as conseqüências de acidentes ambientais. Neste estudo, simula-se um incêndio em um equipamento (aspecto ambiental potencial) devido a uma ignição causada por uma concentração de gases oriunda de um ou mais vazamentos. Os resultados apresentados são as conseqüências do incêndio que geram danos na plataforma, os quais podem causar diversos impactos ambientais.

Nestas análises modela-se o incêndio em um equipamento e avaliam-se alguns dos seus efeitos e conseqüências sobre a plataforma, tais como:

- O aquecimento por condução, convecção e radiação térmicas da estrutura e de equipamentos vizinhos, com apresentação dos valores temperaturas, as quais indicam se houve explosões, sobre pressão, falhas ou rupturas do material com o superaquecimento;
- As tensões e deformações plásticas (permanentes) que são as conseqüências da dilatação térmica do material. Os valores apresentados indicam as regiões onde ocorreram falha com potencial para colapso ou o colapso de partes ou de toda a estrutura e de equipamentos. Estes danos podem gerar acidentes ambientais potenciais tais como vazamentos e derramamento de produtos tóxicos, os quais podem causar mortes e ferimentos em pessoas e danos ao meio ambiente, como contaminação da água e mortes da vida marinha.

Uma outra etapa da Análise de Risco Ambiental é a Análise de Vulnerabilidade, na qual o analista de riscos pode utilizar os resultados mencionados acima, visualizar as áreas e os equipamentos que são afetados pelos efeitos do superaquecimento e das dilatações térmicas, e identificar as regiões vulneráveis, com valores críticos, onde podem ocorrer trincas, rupturas, deformações permanentes, perda de integridade ou o colapso das estruturas da plataforma e dos equipamentos que têm potencial para causar danos ambientais.

Com os argumentos apresentados nos dois parágrafos acima, as hipóteses H4, “A análise de simulação computacional permite a avaliação das causas e conseqüências dos danos em objetos, os quais podem gerar acidentes ambientais, fornecendo resultados úteis na análise de risco ambiental e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental” e H5, “A análise de simulação computacional permite a identificação das áreas de vulnerabilidade, fornecendo resultados úteis na análise de risco ambiental e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental” são corroboradas.

A análise de tensões (estrutural) apresentada neste caso pode ser considerada como parte das Análises de Integridade Estrutural e de Confiabilidade, as quais podem ser requeridas na análise quantitativa de riscos. Os valores das tensões e das deformações permanentes (plásticas) indicam os locais onde a integridade estrutural é mantida, com um determinado grau de confiabilidade e onde ocorrem rupturas ou o colapso total da mesma. Com estes dados, o Analista de Riscos pode identificar as regiões que apresentam situações de risco, as quais podem gerar danos ambientais, e utilizar as informações na análise de risco ambiental, para prevenir ou minimizar os riscos e impactos ambientais (reduzir conseqüências) e definir os planos de emergência.

Desta forma, a hipótese H1, “Os resultados da análise de simulação, que indicam as condições da integridade estrutural e da confiabilidade de estruturas, produtos ou processos, podem ser utilizados na análise de risco ambiental” é corroborada.

Com base nos valores fornecidos pelo programa e com a visualização das falhas e danos na plataforma durante o efeito e as conseqüências do incêndio na estrutura e nos equipamentos, o Analista de Riscos pode complementar a Análise Quantitativa de Risco e o Plano de Gerenciamento dos Riscos Ambientais, ao definir as ações a serem implementadas visando prevenir ou mitigar impactos ambientais, de acordo com a Norma ABNT NBR ISO 14001:2004 a qual define no Item 4.4.7, que a “organização deve estabelecer, implementar e manter procedimento(s) para identificar situações potenciais de emergência e acidentes que possam ter impacto(s) sobre o meio ambiente e sobre como a organização responderá a estes. A organização deve responder às situações reais de emergência e aos acidentes, e prevenir ou mitigar diversos impactos ambientais associados”. Estas ações podem auxiliar também na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental da organização.

Desta forma, a hipótese H3, “Os resultados da análise de simulação que indicam falhas ou danos em um objeto, com potencial para causar acidentes ambientais, podem ser úteis na análise de risco ambiental e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental” é corroborada.

A partir das informações e dados fornecidos pelas Análises Térmica e de Tensões, os Analistas de Riscos podem identificar as regiões da estrutura da plataforma, que devem receber as proteções passiva e ativa. Após a implementação do Plano de Gerenciamento de Riscos, deve-se

executar novamente uma análise térmica incluindo as proteções ativa e passiva para verificação da eficiência das mesmas.

Como o isolamento térmico deve proteger a estrutura por um determinado tempo, é realizada uma análise térmica transiente, com a aplicação do fluxo de calor gerado pelo equipamento em chamas, sobre a plataforma, para verificação da distribuição de temperaturas ao longo do material isolante e avaliação da variação das temperaturas ao longo da estrutura, equipamentos vizinhos e da proteção passiva, durante o tempo definido no plano de emergência para a evacuação das pessoas da plataforma e/ou controle do incêndio.

Com esta análise, é possível verificar a ação da proteção para prevenir riscos e/ou minimizar os impactos ambientais e verificar se a quantidade de material do isolamento utilizado é suficiente para a proteção da estrutura, de acordo com as normas de segurança e as diretrizes da análise de risco. Pode-se ainda testar a eficiência da proteção e otimizar o seu uso, reduzindo a quantidade de material.

Caso o consumo de material da proteção passiva seja considerado um aspecto ambiental significativo pela organização, o controle de seu uso pode atender a uma recomendação do Item A.3.1 do Anexo A.3 da Norma ABNT NBR ISO 14001:2004 e colaborar na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental. O consumo de proteção pode ser também um indicador de desempenho operacional na avaliação de desempenho ambiental, sugerido no Item A.4.3.2.1 do Anexo A.4 da Norma ABNT NBR ISO 14031:2004 como “quantidade de materiais usados por unidade de produto”. A redução de proteção passiva nas vigas e piso facilita as inspeções periódicas das estruturas, reduz o peso na plataforma e os custos com o material.

Desta forma, a hipótese H2, “Os resultados da análise de simulação de otimizações ou alterações efetuadas para a melhoria de desempenho em produtos ou processos, podem ser úteis na avaliação de desempenho ambiental e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental” é corroborada.

g) Considerações sobre as Análises:

Os danos causados por um incêndio em uma plataforma afetam as pessoas, mas também o meio ambiente, com efeitos prolongados dos danos.

Desta forma, uma empresa que pretende implantar e/ou efetuar a melhoria do seu Sistema de Gestão Ambiental, de um produto, tal como uma plataforma (considerada uma planta industrial), de um processo ou de um equipamento instalado na mesma, deve atender a alguns requisitos da Norma ABNT NBR ISO 14001:2004.

Segundo MOREIRA (2001), na auditoria inicial para a avaliação do Sistema de Gestão Ambiental, antes da certificação, deve-se verificar se o sistema está baseado na avaliação de seus aspectos e impactos ambientais e se é orientado para o controle e a melhoria do desempenho ambiental.

Segundo MOURA (2004), a empresa deve considerar a identificação dos aspectos que ocorrem nas condições normais de operação da planta e também nas situações anormais de operação e nas condições de emergência, avaliando os possíveis acidentes que podem acontecer.

Na análise apresentada, neste estudo de caso, a organização poderia definir como aspectos ambientais significativos, selecionados com base na Matriz de Risco, o incêndio, as explosões e o vazamento de substâncias tóxicas para o meio ambiente, com os respectivos impactos ambientais de danos materiais que podem causar o colapso de equipamentos e da estrutura da plataforma e danos ambientais como poluição do ar e contaminação da água do mar, com mortes de pessoas e da vida marinha.

Na análise de risco ambiental, efetuada pelos analistas de riscos, são utilizadas as probabilidades das ocorrências dos impactos no calculado dos riscos ambientais. No entanto, nem sempre são encontrados na literatura ou em bancos de dados, valores para as probabilidades, especialmente quando acontecem eventos e impactos simultâneos, que podem reduzir a exatidão destes valores e comprometer a precisão da análise de risco.

Baseando-se neste estudo de caso e nos argumentos apresentados acima, propõe-se a utilização dos resultados da análise de simulação, como complemento, nos refinamentos da análise, avaliação e gerenciamento de riscos e na avaliação de desempenho ambientais e na melhoria do SGA da empresa.

g) Ações a serem Realizadas baseadas nos Resultados das Análises:

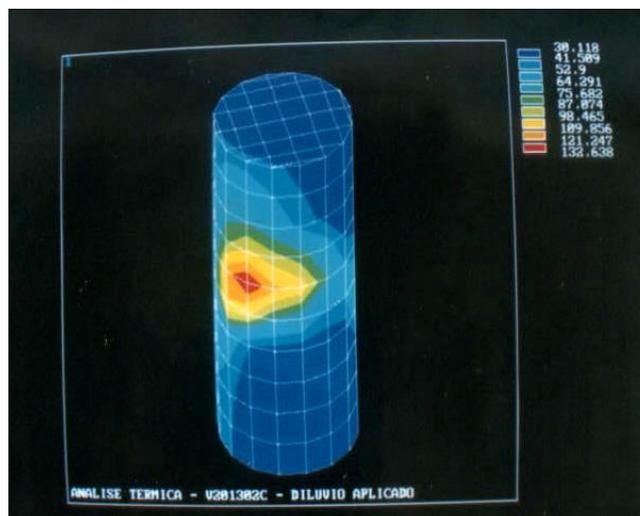
Uma das medidas adotadas pelo analista de risco, para prevenir e/ou mitigar riscos e impactos ambientais, identificados nestas análises, é a definição das regiões da estrutura e dos equipamentos que devem receber proteções passiva ou ativa.

Esta decisão pode ser tomada com base nos resultados fornecidos pelas análises de simulação que apresentam os locais da plataforma onde as temperaturas atingem valores próximos ao limite de escoamento (ponto onde se iniciam a perda de resistência e as deformações permanentes) do material da plataforma.

Os objetivos das proteções nas regiões críticas são:

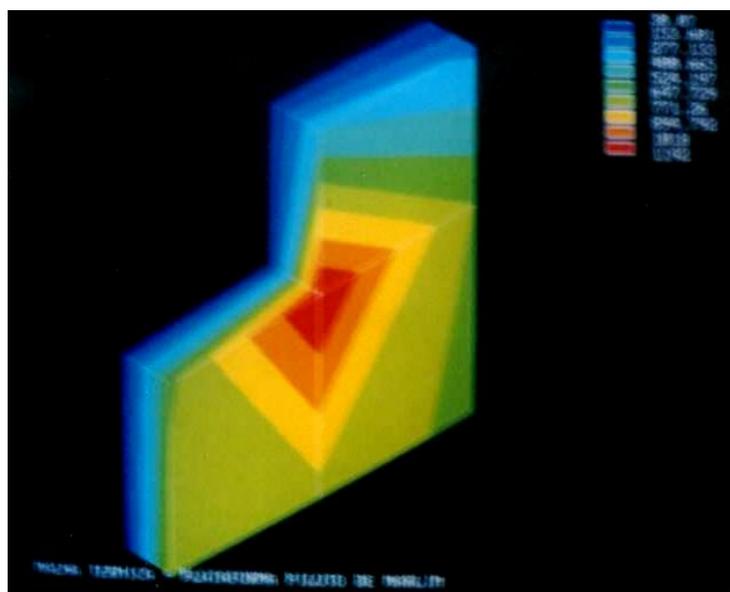
- Evitar que o material da estrutura se aqueça em excesso, durante um determinado tempo, necessário para evacuar pessoas e/ou controlar o incêndio;
- Reduzir as temperaturas e as dilatações térmicas da estrutura, e conseqüentemente as altas tensões e deformações permanentes, que levam a falhas ou ao colapso total da plataforma.

A Figura 7.5 apresenta a distribuição de temperatura em um equipamento que recebeu a proteção ativa, o dilúvio, uma medida mitigadora para redução do calor no mesmo, durante incêndio próximo, para reduzir o risco de explosão, perda de resistência ou colapso do equipamento. Os resultados obtidos na análise térmica, indicam a eficiência do resfriamento do equipamento, que apresenta temperatura máxima de 132.64°C, a qual não permite que o equipamento se deforme, colapse ou venha a explodir.



Fonte: Programa ANSYS (SOUZA, 2001)

Figura 7.5 – Distribuição de Temperaturas, 30.12°C a 132.64°C, Resultante do Efeito da Proteção Ativa (Dilúvio) no Modelo de Elementos Finitos de um Equipamento sob Efeito de Incêndio



Fonte: Programa ANSYS, 2001

Figura 7.6 - Distribuição de Temperaturas, 30°C a 1342°C, ao longo da Espessura do Modelo de Elementos Finitos de um Trecho do Material da Proteção Passiva sob Efeito de Incêndio

A Figura 7.6 apresenta a distribuição de temperatura em um trecho da proteção passiva, a qual é uma medida mitigadora para revestir a estrutura e mantê-la protegida do aquecimento devido ao incêndio, durante a evacuação das pessoas da plataforma ou o controle do incêndio. Os resultados obtidos na análise térmica, indicam a eficiência do isolamento térmico do material, pois na face externa do material a temperatura é 1342°C e na face interna, que fica em contato com a estrutura é 30°C, estando desta forma garantida a integridade da estrutural da plataforma, durante o tempo de atuação desta proteção ou do controle do incêndio, especificado pelos analistas de risco, para evacuação das pessoas, fechamento de válvulas e desligamento de sistemas entre outras medidas de segurança a serem implementadas na plataforma.

7.2 ANÁLISE DE TENSÕES E DE FADIGA DE UMA BOCA DE SINO

Esta análise foi realizada para avaliar a integridade estrutural e confiabilidade de um equipamento *offshore*, denominado Boca de Sino, submetida a esforços dinâmicos, causados por correntes marítimas, visando garantir a sua conexão ao *riser* para evitar danos ao mesmo e conseqüente vazamento de óleo no mar.

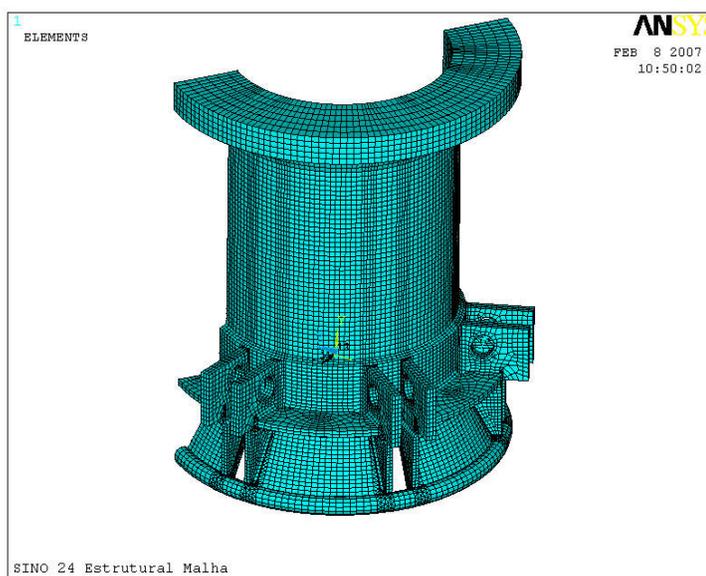
a) Objetivo da Análise de Simulação:

Calcular as tensões, deformações e vida útil da Boca de Sino submetida a carregamentos de tração, flexão e ciclos de carga para verificação da integridade estrutural e da resistência à fadiga do equipamento para que possa suportar e proteger o *riser* conectado ao mesmo.

b) Informações Técnicas sobre o Equipamento:

- Boca de Sino: equipamento utilizado em uma UEP (Unidade de Exploração de Petróleo), que possui o formato de sino e se conecta a um *riser* para limitar o movimento (deslocamento e a curvatura) da linha flexível na região de conexão com o mesmo. O modelo de elementos finitos a ser analisado é apresentado na Figura 7.7.

Durante a sua vida útil, a Boca de Sino é submetida a muitos ciclos de carga. Desta forma, deve ser projetada para resistir à fadiga e aos altos carregamentos de tração e flexão.



Fonte: Programa ANSYS (SOUZA, 2007)

Figura 7.7 – Modelo Simétrico de Elementos Finitos da Boca de Sino

c) Tipos de Análises Realizadas:

Análise não linear elástica estrutural, para verificação das tensões e análise de fadiga, para definição da vida útil do equipamento.

d) Procedimento das Análises:

1 – Análise Estrutural (Tensões)

- Modela-se o equipamento com elementos sólidos (com o grau-de-liberdade de deslocamento), para representar a parte externa da boca de sino e do capacete e elementos de contato, para transmitir esforços entre estas partes;
- Definem-se as propriedades físicas e mecânicas dos materiais e a curva de Tensões x Número de Ciclos do Material;
- Aplicam-se as condições de fixação do equipamento;
- Define-se a faixa de variação do carregamento e a posição de aplicação do mesmo, pois é a diferença das tensões que causa a fadiga;
- Executa-se a análise estrutural não linear para o cálculo dos deslocamentos e tensões;

- Analisam-se os resultados dos deslocamentos e das tensões por meio de plotagens do modelo e/ou listagem dos valores obtidos, para verificar se os mesmos estão abaixo da tensão admissível requerida pela norma técnica e o grau de confiabilidade dos resultados nas diferentes regiões do equipamento.

2 – Análise de Fadiga

- Com os valores das tensões resultantes da análise anterior, calcula-se a vida útil do equipamento, isto é, o número de ciclos de carregamento que o equipamento pode suportar, sem apresentar trincas. Para este cálculo, utiliza-se a curva de Tensões x Número de Ciclos do material e fórmulas da literatura;

- Verifica-se o fator de segurança para a região mais crítica, onde ocorre a maior concentração de tensões.

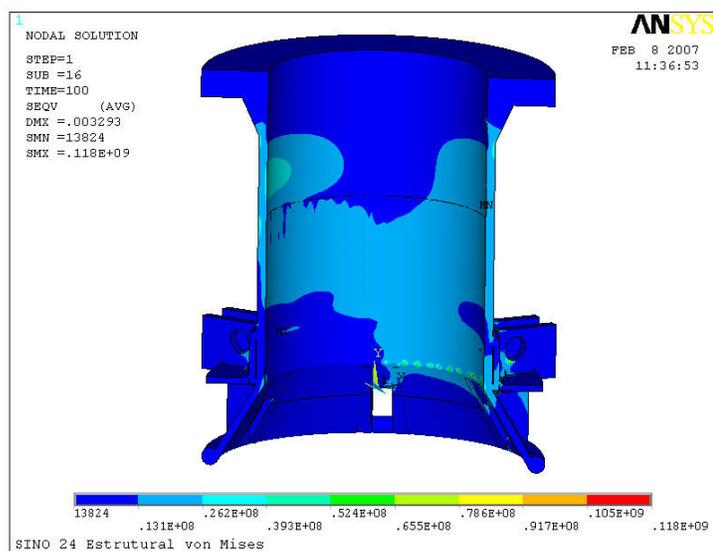
e) Resultados das Análises de Simulação aplicáveis às Análises Ambientais:

Os resultados obtidos nestas análises podem ser utilizados em análise quantitativa de risco, que em geral requer análises de integridade estrutural e confiabilidade de equipamentos, na avaliação de desempenho e na certificação ambientais, como proposto a seguir.

1 – Análise de Tensões

Os resultados das variáveis primárias da análise de tensões (estrutural) são os deslocamentos e as variáveis secundárias são as tensões, 13824 Pa a 0.118E9 Pa, e as deformações, apresentadas na Figura 7.8, nos pontos nodais da malha de elementos, ao longo de todo o modelo do equipamento. Com a visualização e a listagem destes valores, pode-se identificar as regiões com tensões iguais ou menores do que a tensão admissível do material.

Desta forma, é possível obter os fatores de segurança, definidos como a razão entre a tensão admissível do material e a tensão em cada ponto nodal da malha de elementos finitos e que indicam os graus de confiabilidade ao longo do equipamento.



Fonte: Programa ANSYS (SOUZA, 2007)

Figura 7.8 – Distribuição de Tensões (13824 Pa a 0.118E9 Pa) na Parte Interna do Modelo de Elementos Finitos da Boca de Sino

Para liberar este equipamento para operação, a certificadora exige a comprovação da empresa de que os valores das tensões atendem aos requisitos da norma técnica. Caso isto não ocorra o equipamento é reprovado e a empresa precisa redimensioná-lo e submetê-lo novamente à aprovação para operação.

A certificadora não menciona acidente ambiental, como consequência de um dano no equipamento, mas como o objetivo do equipamento é suportar e proteger um *riser*, em caso de falha no mesmo, pode ocorrer a desconexão do *riser* e derramamento de óleo no mar (aspecto ambiental potencial) com poluição e danos ambientais à vida marinha.

Os resultados obtidos na análise de simulação podem ser utilizados na análise de risco ambiental e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental, para a prevenção de risco ambiental e o controle de aspectos ambientais, com a verificação da integridade estrutural e da confiabilidade do equipamento e a redução dos impactos ambientais potenciais.

2 – Análise de Fadiga

Como o equipamento é submetido a cargas cíclicas, a certificadora exige também a análise de fadiga, para comprovação da vida útil do mesmo, ou seja o tempo no qual o equipamento pode operar com segurança.

Esta análise também fornece o grau de confiabilidade do equipamento em relação às falhas que possam ocorrer no mesmo, tais como, formação de trincas, rupturas e colapso do mesmo. Estes danos também podem ser utilizados na análise quantitativa de risco para a prevenção de riscos e danos da Boca de Sino, que podem danificar o *riser*, levando ao derramamento de óleo no mar e danos ambientais, como detalhado acima.

f) Discussão sobre os Resultados da Análise de Simulação:

As análises de tensões (estrutural) e de fadiga apresentadas neste estudo de caso fornecem diversos resultados, os quais são analisados por meio dos testes de falseamento, que têm como objetivo verificar se as hipóteses são corroboradas ou refutadas.

Estas análises de simulação visam avaliar a integridade e confiabilidade de um equipamento que, em caso de falha causa a desconexão do *riser*, gerando como consequência um derramamento de óleo no mar, o qual é um aspecto ambiental significativo potencial que deve ser considerado na análise de risco ambiental para reduzir prevenir ou minimizar os impactos ambientais.

Para implantar e/ou obter a melhoria do Sistema de Gestão Ambiental, a empresa deve controlar os aspectos ambientais que tenham ou possam ter impacto significativo sobre o meio ambiente.

Por meio da execução destas análises, a empresa estará reduzindo os riscos de falha do equipamento em operação e de um dano ambiental. Desta forma, a organização estará controlando e influenciando um aspecto ambiental, atendendo aos requisitos da Norma ABNT NBR ISO 14001:2004, definidos nos Itens 4.3.1 e 4.4.7, como apresentado no Item f do estudo de caso 7.1. Estas ações podem auxiliar também na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental da organização.

Com os argumentos apresentados acima, as hipóteses H1, “Os resultados da análise de simulação, que indicam as condições da integridade estrutural e da confiabilidade de estruturas, produtos ou processos, podem ser utilizados na análise de risco ambiental”, H3, “Os resultados da análise de simulação que indicam falhas ou danos em um objeto, com potencial para causar acidentes ambientais, podem ser úteis na análise de risco ambiental e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental” e H4, “A análise de simulação computacional permite a avaliação das causas e conseqüências dos danos em objetos, os quais podem gerar acidentes ambientais, fornecendo resultados úteis na análise de risco ambiental e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental” são corroboradas.

7.3 ANÁLISE TÉRMICA LINEAR TRANSIENTE DE UMA GUIA DE TUBOS

Esta análise foi realizada para a avaliação do efeito do processo de refrigeração de uma guia de tubos, visando melhorar o desempenho do mesmo, para reduzir a troca da guia, devido ao desgaste do material, durante o processo de laminação de tubos sem costura.

a) Objetivo da Análise de Simulação:

Calcular as temperaturas em duas guias (original e modificada) de tubos durante o ciclo de carregamento de aquecimento e resfriamento das mesmas, no processo de laminação de tubos, visando:

- Efetuar uma avaliação de desempenho do processo de refrigeração, para diferentes tempos dos ciclos de carregamento, com e sem refrigeração nos sulcos inferiores;
- Comparar os resultados destas análises com os valores obtidos na análise da guia original.

b) Informações Técnicas sobre o Processo:

A guia de tubos serve de apoio para o tubo que passa por uma ponteira à medida que vai se moldando e se alongando durante o processo de laminação.

A empresa percebeu que esta guia estava se desgastando em curto espaço de tempo, sendo necessário interromper o processo de laminação para a troca da mesma, o que estava causando a queda na produção de tubos.

Após o monitoramento das temperaturas no interior da guia, durante o processo de laminação, verificou-se que havia uma grande variação de temperaturas ao longo da mesma, provavelmente devido à deficiência do sistema de refrigeração, que não conseguia uniformizar as temperaturas ao longo da guia. Estas diferenças nas temperaturas poderiam causar dilatações diferenciais no material e gerar trincas, levando ao desgaste da guia.

Além de resolver a questão do desgaste da guia, a empresa precisava aumentar a produção e para isto, pensava em aumentar a velocidade do processo de laminação e conseqüentemente do processo de aquecimento e resfriamento da guia.

Diante destes fatos, a empresa resolveu solicitar a análise de simulação computacional para estudar algumas variáveis do processo de aquecimento e resfriamento da guia e testar algumas mudanças na geometria da peça, propostas por um pesquisador da área de laminação, para tentar melhorar o desempenho do processo de refrigeração, visando uma maior vida útil para a guia.

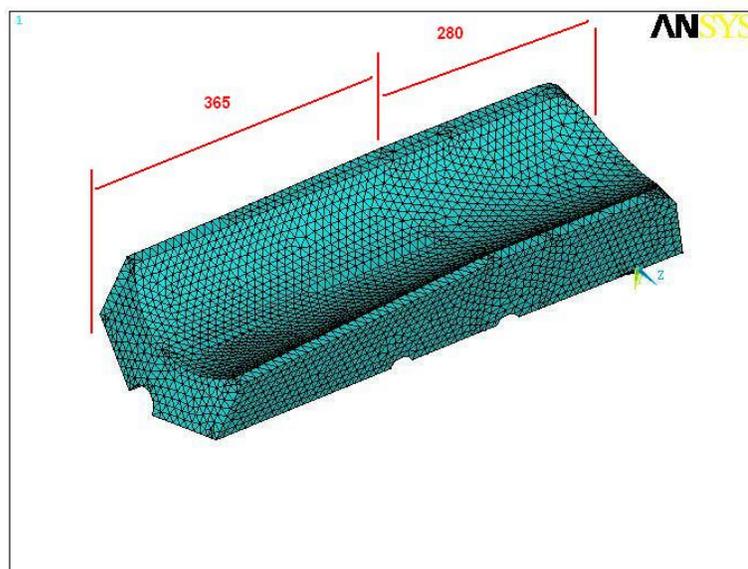
c) Tipo de Análise a ser Realizada:

Foram executadas 6 análises lineares térmicas transientes, com variações da velocidade dos ciclos de carregamento de aquecimento/resfriamento, utilizando as guias original e modificada (com sulcos na parte inferior), com e sem refrigeração, como apresentado a seguir:

- Guia original, tempo t1, sem refrigeração;
- Guia original, tempo t2, sem refrigeração;
- Guia modificada, t1, sem refrigeração;
- Guia modificada, t2, sem refrigeração;
- Guia modificada, t1, com refrigeração;
- Guia modificada, t2, com refrigeração.

d) Procedimento da Análise Térmica:

- Modelar-se a guia com elementos sólidos (com grau-de-liberdade de temperatura), como apresentado na Figura 7.9. As cotas definidas em vermelho são somente para indicar a posição de um termostato, utilizado para medir a temperatura da guia durante o processo;
- Definem-se as propriedades físicas dos materiais (condutividade térmica e calor específico);
- Aplicam-se as condições de contorno de convecção em torno da guia, com as temperaturas dos ambientes e a convecção que representa o efeito do resfriamento (na análise com refrigeração);
- Aplica-se no centro da superfície da guia, a temperatura resultante do contato com o tubo que passa sobre a guia;



Fonte: Programa ANSYS (SOUZA, 2005)

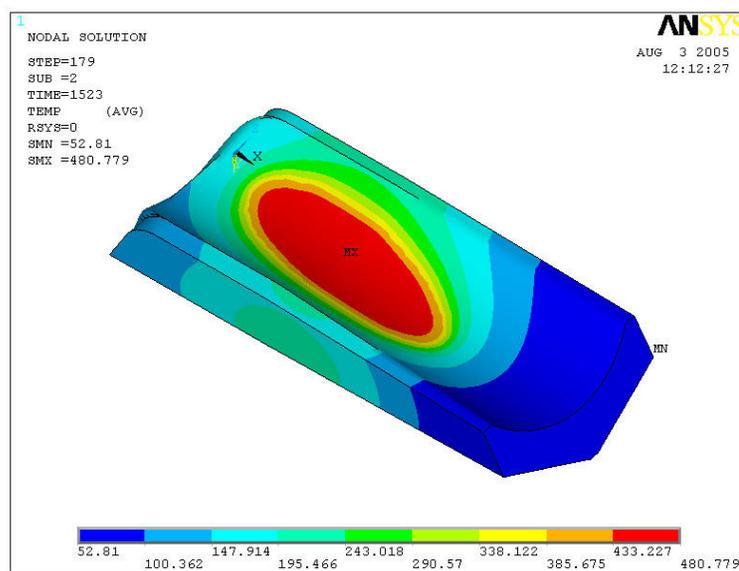
Figura 7.9 – Modelo de Elementos Finitos da Guia de Tubos

- Executa-se a análise térmica transiente, em etapas (*load steps*) para cálculo das temperaturas em todos os pontos nodais dos elementos da guia, ao longo dos tempos de aquecimento e resfriamento da guia até que se obtenha o regime permanente (estabilização do processo);
- Verificam-se os resultados da distribuição de temperaturas ao longo da guia, por meio de plotagens, listagens e curvas de temperaturas x tempo fornecidas pelo programa;

- Verificam-se os erros numéricos dos resultados dos fluxos de calor nos pontos de Gauss;
- Em caso de erros significativos, deve-se refinar a malha, executar novamente a análise e comparar os resultados com os anteriores. Estas ações devem ser repetidas até que os resultados apresentem valores próximos, indicando a convergência e uma precisão de engenharia aceitável para a análise.

e) Resultados das Análises de Simulação aplicáveis às Análises Ambientais:

Os resultados obtidos nestas análises podem ser utilizados na avaliação de desempenho e na certificação ambientais, como proposto a seguir.

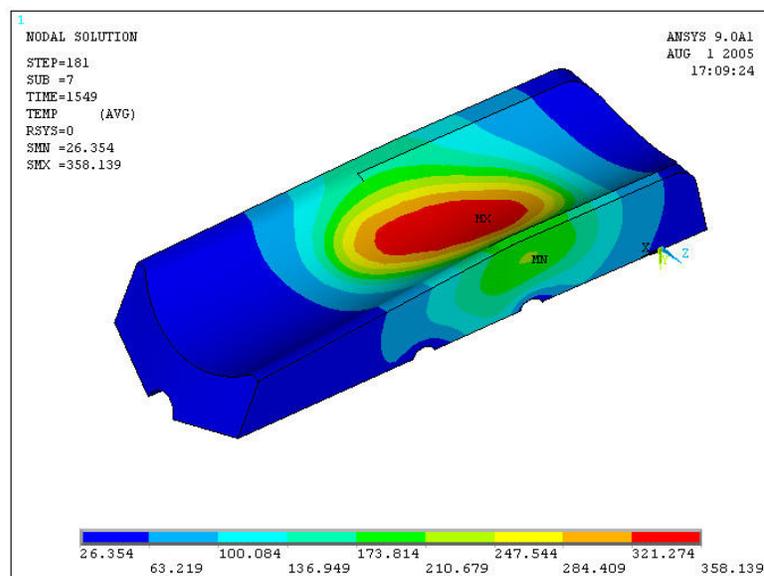


Fonte: Programa ANSYS (SOUZA, 2005)

Figura 7.10 – Modelo de Elementos Finitos com a Distribuição de Temperatura, 52,8°C a 480,78°C, na Guia Original após o ciclo de aquecimento, com refrigeração

As distribuições de temperatura nas guias de tubos original e modificada (com sulcos na face inferior) são apresentadas nas Figuras 7.10 e 7.11, respectivamente, após o ciclo de aquecimento. As diferentes cores ao longo da guia indicam as faixas de temperatura, conforme apresentado na legenda, embaixo da figura. Entre a guia original não refrigerada e a guia refrigerada nos sulcos a

diferença fica em torno de 60°C , comprovando a grande eficiência dos sulcos e da refrigeração nos mesmos.



Fonte: Programa ANSYS (SOUZA, 2005)

Figura 7.11 – Modelo de Elementos Finitos com a Distribuição de Temperatura, $26,35^{\circ}\text{C}$ e $358,14^{\circ}\text{C}$ na Guia Modificada (com sulcos na face inferior), com refrigeração

Nas análises com o ciclo de carregamento com velocidade mais baixa, verifica-se que entre a guia original sem refrigeração e a guia modificada sem refrigeração houve uma redução média de temperatura em torno de 30°C .

Nas análises com o ciclo de carregamento com velocidade mais alta, verifica-se que entre a guia original sem refrigeração e a guia modificada sem refrigeração houve uma redução média de temperatura em torno de 30°C . Ainda, entre a guia nova não refrigerada e refrigerada nos sulcos, a diferença fica em torno de 50°C , comprovando também a grande eficiência dos sulcos e da refrigeração nos mesmos.

Verifica-se que a velocidade de cada ciclo influencia na variação das temperaturas máximas e mínimas nas guias, mas as reduções de temperatura mais significativas acontecem nos casos em

que se utiliza a refrigeração por meio dos sulcos inferiores, comprovando a eficiência da modificação na geometria da guia e a melhoria de desempenho do processo.

f) Discussão sobre os Resultados da Análise de Simulação:

As análises térmicas apresentadas neste estudo de caso fornecem diversos resultados, os quais são analisados por meio dos testes de falseamento, que têm como objetivo verificar se as hipóteses são corroboradas ou refutadas.

Por meio da simulação computacional foi possível testar diferentes geometrias e processos de refrigeração da guia e obter as temperaturas ao longo da mesma, o que é difícil e complexo em um protótipo físico ou no local onde ocorre a laminação, pois seria necessário interromper o processo após o aquecimento e o resfriamento, para medir com mais precisão as temperaturas.

Esta análise permite simular vários ciclos de aquecimento e resfriamento e obter os resultados em etapas com a progressão do aumento e redução das temperaturas e dos efeitos da refrigeração. Desta forma, foi possível executar 6 processos diferentes e comparar os resultados obtidos para testar a melhoria de desempenho do processo de refrigeração com a nova geometria da guia.

Como apresentado no item anterior, as alterações efetuadas resultaram em reduções significativas das temperaturas ao longo da guia, com uma distribuição mais uniforme das mesmas, menor dilatação térmica, redução das trincas e do desgaste do material, diminuição do calor no processo e conseqüentemente aumento da vida útil da guia, com redução das paradas do processo de laminação e dos custos destas paradas e de guias.

De acordo com a Norma ABNT NBR ISO 14031:2004, Item 3.2.2.3, a organização pode utilizar indicadores de desempenho ambiental operacionais, tais como, de consumo de material e de energia, de emissão de calor, de instalações e equipamentos entre outros. Nesta análise, por meio da mudança da geometria da guia e do processo de refrigeração, verifica-se que houve melhorias, comprovadas por meio das medições efetuadas, entre o processo original e o modificado. Estas informações podem ser utilizadas “para comparar o desempenho ambiental passado e presente da organização”, conforme definido no Item 3.1.1 da Norma ABNT NBR ISO 14031:2004. Com as melhorias do processo de laminação, a empresa estaria também efetuando o controle de aspectos

ambientais sugerido pela Norma ABNT NBR ISO 14001:2004, no Item A.3.1 do Anexo A.3, tais como, usos de matéria prima e energia, energia emitida (calor). Estas melhorias poderiam auxiliar no aperfeiçoamento do Sistema de Gestão Ambiental.

Baseada nas argumentações descritas acima, a hipótese H2, “Os resultados da análise de simulação de otimizações ou alterações efetuadas para a melhoria de desempenho em produtos ou processos, podem ser úteis na avaliação de desempenho ambiental e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental”, é corroborada.

7.4 ANÁLISE DE TENSÕES EM DUTO DE ÓLEO ENTERRADO EM SOLO E SUBMETIDO À PRESSÃO INTERNA

Esta análise foi realizada para a avaliação do efeito de um amassamento (mossa) em um duto enterrado, visando verificar a integridade estrutural do mesmo, após a aplicação da pressão interna, para evitar rupturas e conseqüentemente o derramamento de óleo com a contaminação do solo, lençol freático e potenciais explosões (SOUZA e DONATO, 2002).

a) Objetivo da Análise de Simulação:

- Calcular as tensões e deformações causadas pelo amassamento na parede do duto;
- Verificar as tensões e deformações residuais após o impacto;
- Calcular as tensões e deformações no duto com amassamento submetido à pressão interna, identificando as regiões que podem perder a integridade estrutural devido à geração de fissuras ou ao colapso de todo o duto.

b) Informações Técnicas sobre a Operação do Duto:

Este duto conduz óleo sob pressão e encontra-se enterrado sob uma pista de um aeroporto internacional com intenso movimento. Durante uma manutenção programada, foi verificado o amassamento na parede do mesmo, causado por um impacto.

Como a troca do duto seria uma tarefa muito complexa e demorada, envolvendo a interrupção da pista, da passagem de óleo e do abastecimento, a empresa decidiu efetuar uma análise de simulação para avaliar as condições do duto de continuar operando sem riscos de fissuras que poderiam causar o vazamento do óleo e para saber qual a pressão máxima de operação admissível neste duto, de acordo com as normas técnicas.

Para reproduzir a mozza foi elaborado um modelo em fibra de vidro, em tamanho real, na região onde ocorreu o amassamento.

c) Tipo de análise a ser realizada:

Análise não linear estrutural elasto-plástica, para verificação das tensões e deformações na parede do duto.

d) Procedimento da Análise Estrutural:

- Modela-se um trecho do duto sem deformações com elementos de casca (com os graus-de-liberdade de deslocamentos e rotações), como o modelo de elementos finitos, apresentado na Figura 7.12;
- Definem-se as propriedades físicas e mecânicas dos materiais;
- Aplicam-se as condições de fixação do duto, indicadas na Figura 7.12 com símbolos amarelos;
- Como não se conhecem as forças que geraram o amassamento no duto, aplicam-se deslocamentos prescritos, símbolos azuis na Figura 7.12, com os valores das profundidades dos amassamentos dos pontos da parede do duto, medidos no modelo de fibra de vidro;
- Executa-se a análise estrutural para geração da mozza. Esta análise deve ser efetuada diversas vezes, pois ao se aplicar e retirar o deslocamento em um ponto da parede do duto, ocorre o retorno elástico, que é uma parte da deformação total;
- Executa-se novamente a análise acrescentando o valor do retorno elástico ao deslocamento aplicado, até se obter a configuração da mozza mais próxima da real. Esta etapa da análise é muito importante, pois permite a simulação do impacto que causou a mozza e a geração do histórico das tensões e deformações atuantes na parede do duto durante o impacto, e das tensões residuais e deformações permanentes (plástica), após a retirada da carga que causou o impacto;

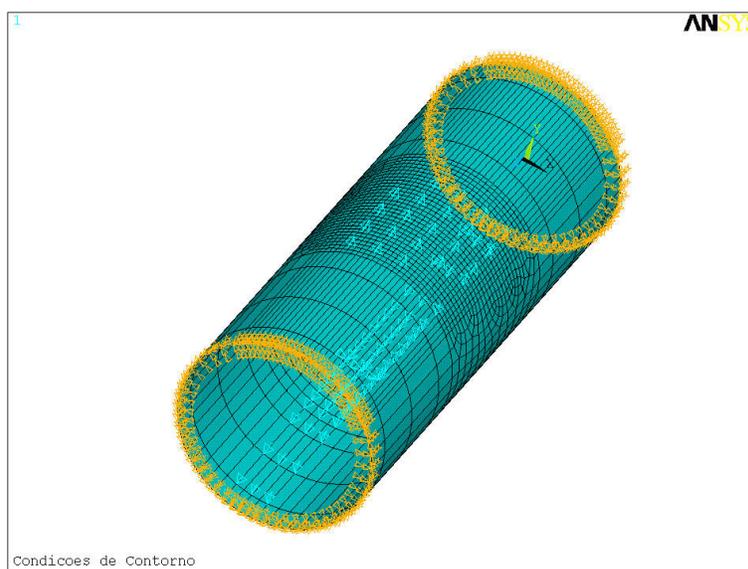


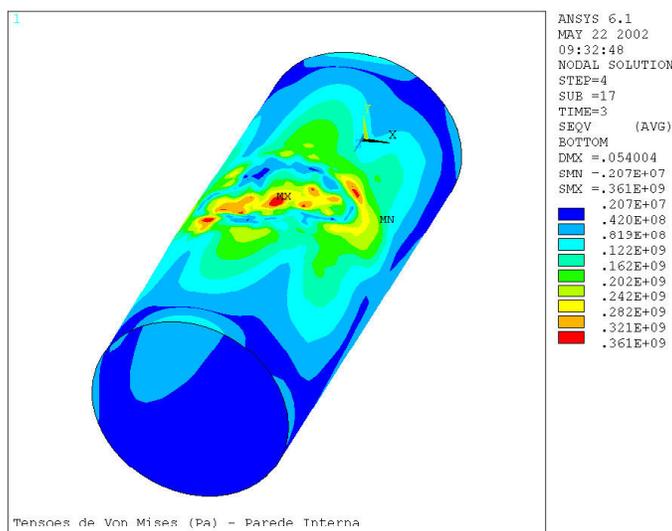
Figura 7.12 – Modelo de Elementos Finitos do Duto com Aplicação dos Deslocamentos (símbolos azuis) e das condições de fixação (símbolos amarelos) para a Simulação da Mossa

- Aplica-se a pressão interna com a qual o duto deve operar;
- Executa-se nova análise estrutural para cálculo dos deslocamentos, tensões e deformações causadas pela aplicação da pressão interna;
- Verificam-se os resultados da distribuição das tensões e deformações ao longo da parede do duto para avaliar a integridade estrutural do mesmo;
- Verificam-se os erros numéricos e caso se encontrem valores significativos, refina-se a malha e executam-se as análises novamente.

e) Resultados das Análises de Simulação aplicáveis às Análises Ambientais:

Os valores das tensões, $0.207E7$ a $0.361E9$ Pa e deformações, -0.109 a 0.14 obtidos nestas análises e apresentados em diferentes cores nas Figuras 7.13 e 7.14, respectivamente, com as faixas de valores e cores nas legendas, indicam o efeito do amassamento no duto devido ao impacto. Estes resultados podem ser utilizados em análise quantitativa de risco ambiental e na melhoria do SGA. A análise de integridade estrutural fornece os percentuais de deformação, que indicam os locais do duto onde podem ocorrer trincas ou o colapso do mesmo. A análise de confiabilidade pode ser efetuada com o cálculo dos fatores de segurança (tensão de escoamento

ou tensão admissível/tensão atuante nos pontos nodais do duto). Caso a empresa possua o SGA, os resultados obtidos podem ser utilizados para o controle do aspecto ambiental de colapso do duto e impacto ambiental de derramamento de óleo e contaminação do solo, como proposto a seguir.



Fonte: Programa ANSYS (SOUZA e DONATO, 2002)

Figura 7.13 – Modelo de Elementos Finitos do Duto Amassado com a Distribuição de Tensões Residuais (0.207E7 a 0.361E9 Pa), após a Retirada da Carga que Gerou o Amassamento

O duto inspecionado apresenta um amassamento decorrente de um acidente desconhecido, que pode comprometer a sua integridade estrutural. Por meio da análise de simulação é possível reproduzir o histórico do acidente, analisar a situação estrutural do duto e avaliar o risco de operação do mesmo, em uma determinada pressão, por meio da verificação da integridade e do grau de confiabilidade da estrutura.

Como a estrutura já possui deformações permanentes, deve-se verificar a variação das mesmas e o surgimento de novas deformações que podem gerar fissuras ou levar o duto à ruptura (colapso), com o vazamento do óleo no solo e/ou explosões devido à alta pressão.

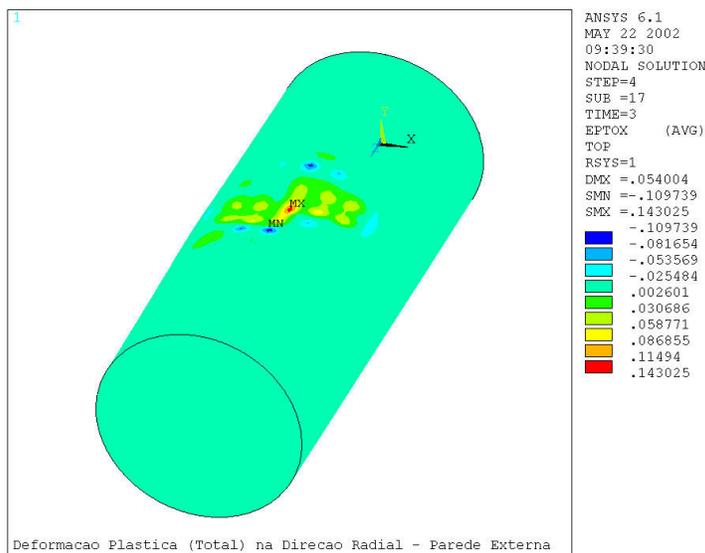


Figura 7.14 – Modelo de Elementos Finitos do Duto Amassado com a Distribuição das Deformações Residuais (-0.109 a 0.143), após a Retirada da Carga que Gerou a Mossa

Como já mencionado neste trabalho, não é possível ver a fissura na estrutura, mas pode-se identificar a sua localização por meio dos valores das deformações plásticas, nos diversos pontos nodais do modelo de elementos finitos. Caso as deformações sejam iguais ou maiores do que o valor da deformação de ruptura do material, ocorre a fissura. Dependendo da extensão da mesma, especialmente no sentido longitudinal do duto, pode ocorrer o colapso do mesmo.

Para liberar este duto para operação, a certificadora exige a comprovação da empresa de que a deformação máxima atende ao valor definido pela norma técnica. Caso isto não ocorra o duto é reprovado e a empresa precisa repará-lo ou trocá-lo e submeter novamente à aprovação para operação.

Como já mencionado, a certificadora não menciona acidente ambiental, como consequência de um dano em um duto, mas como o mesmo transporta óleo, caso ocorram fissuras ou o colapso do mesmo, haverá um derramamento de óleo (aspecto ambiental potencial) no solo, podendo chegar ao mar ou a um lençol freático com poluição, danos e impactos ambientais diversos.

Os resultados obtidos na análise de simulação podem ser utilizados na análise de risco e na melhoria do Sistema de Gestão Ambientais, para a prevenção de risco ambiental e o controle do aspecto ambiental, com a verificação da integridade estrutural e da confiabilidade do duto e a redução dos impactos ambientais.

f) Discussão sobre os Resultados da Análise de Simulação

A análise estrutural apresentada neste estudo de caso fornece diversos resultados, os quais são analisados por meio dos testes de falseamento, que têm como objetivo verificar se as hipóteses são corroboradas ou refutadas.

Por meio da simulação computacional foi possível simular o impacto que causou a mocha no duto. A reprodução desta situação em um protótipo físico demandaria muito tempo e seria muito complexo conseguir obter a forma precisa da mocha, devido às irregulares do amassamento, e efetuar as medições das tensões e deformações resultantes do impacto e as residuais, após a retirada da carga.

A análise de simulação em etapas permite a verificação dos locais onde ocorrem as tensões e deformações críticas, além de fornecer o valor da pressão máxima de operação, para que o duto mantenha sua integridade estrutural e as deformações admissíveis pelas normas técnicas, afim de que não ocorram fissuras ou o colapso do duto. Por meio destes resultados, a organização estará efetuando o controle de um aspecto ambiental, o vazamento de óleo para o solo ou lençol freático, e prevenindo ou mitigando um risco ambiental, como mencionado na Norma ABNT NBR ISO 14001:2004, nos Itens 4.3.1, 4.4.7, como apresentado nos estudos de caso 7.1 e 7.2. Estas ações podem auxiliar também na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental da organização.

Com os resultados apresentados neste estudo, pode-se dizer que as hipóteses H1, “Os resultados da análise de simulação, que indicam as condições da integridade estrutural e da confiabilidade de estruturas, produtos ou processos, podem ser úteis na análise de risco ambiental” e H3, “Os resultados da análise de simulação que indicam falhas ou danos em um objeto, com potencial para causar acidentes ambientais, podem ser úteis na análise de risco ambiental e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental” são corroboradas.

7.5 ANÁLISE DE TENSÕES NÃO LINEAR ESTÁTICA DA PEÇA PELIKELO

Esta análise foi realizada para a avaliação do comportamento de uma peça similar a um gancho, denominada Pelikelo, visando verificar a integridade estrutural da mesma e atender a requisitos de normas técnicas de uma certificadora, para a obtenção do certificado de qualidade da peça (SOUZA e COUTINHO, 2006).

a) Objetivo da Análise de Simulação:

- Calcular as tensões e deformações na estrutura do Pelikelo submetido a cargas de operação e de ruptura definidas pela Certificadora.

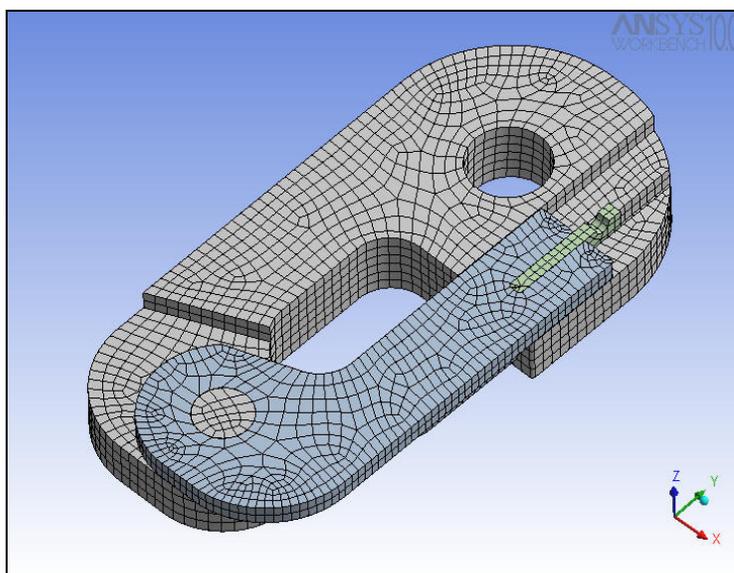
b) Informações Técnicas sobre a Operação do Pelikelo

O Pelikelo é uma peça, similar a um gancho utilizado com amarras (correntes) na indústria *offshore* para lançamentos de equipamentos no mar, tais como *manifolds* e estacas torpedado entre outros objetos. O modelo de elementos finitos desta peça é apresentado na Figura 7.15.

Esta peça facilita algumas operações *offshore* de lançamento de objetos ao mar e reduz o custo deste trabalho, pois permite a recuperação das amarras, economizando material para a empresa, com a execução de um processo limpo do ponto de vista ambiental, uma vez que evita que as amarras sejam deixadas no mar, criando um depósito de ferro velho no fundo do oceano, e conseqüentemente a poluição da água, como acontece no processo convencional de lançamento de objetos com outros tipos de gancho.

A peça Pelikelo possui uma trava que deve ser retirada por um ROV (*Remotely Operated Vehicle*) dentro do mar a uma certa profundidade do local onde o objeto deve ser lançado. Em seguida as amarras e o Pelikelo são recolhidos para serem utilizados em outra operação.

A integridade estrutural de toda a peça deve ser mantida durante a operação, mas a trava que segura o braço do Pelikelo, não pode sofrer nenhum tipo de deformação, pois caso contrário, o ROV não consegue tirá-la, para que o braço se abra e a peça seja lançada.



Fonte: Programa ANSYS (SOUZA e COUTINHO, 2006)

Figura 7.15 – Modelo Simétrico de Elementos Finitos da Peça PELIKELO: Corpo (cinza), Braço (azul) e Trava (verde)

Para utilizarem esta peça, muitas empresas exigem que a mesma seja certificada para garantir a resistência a uma determinada carga, pois caso o Pelikelo não suporte o equipamento, estrutura ou objeto, os mesmos podem ser danificados e/ou causarem danos diversos ao meio ambiente e/ou à embarcação de apoio, durante o lançamento.

A análise de simulação permite que a empresa dimensione a peça por meio do protótipo virtual, para que atenda aos requisitos da Certificadora. Desta forma, são realizados vários testes com diferentes materiais, geometrias e cargas, reduzindo os gastos com materiais e os custos com a construção do protótipo físico, o qual é construído somente para o teste final de carga em laboratório, para atender a uma exigência da Certificadora.

c) Tipo de análise a ser realizada:

Análise não linear estrutural elasto-plástica, para verificação das tensões e deformações na peça Pelikelo.

d) Procedimento da Análise Estrutural:

- Modela-se o corpo do Pelikelo com elementos sólidos (com o grau-de-liberdade de deslocamento), com o braço e a trava, como mostrado na Figura 7.15;
- Definem-se as propriedades físicas e mecânicas dos materiais e a curva de Tensões x Deformações;
- Aplicam-se as condições de fixação da peça;
- Definem-se os carregamentos de operação e de ruptura de acordo com os critérios da norma técnica da Certificadora;
- Executa-se a análise estrutural não linear para o cálculo dos deslocamentos, tensões e deformações;
- Analisam-se os resultados dos deslocamentos e das tensões por meio de plotagens do modelo e/ou listagem dos valores obtidos em todo o modelo, para se verificar a integridade estrutural e o grau de confiabilidade da peça, que deve atender os requisitos da norma técnica da Certificadora;
- Verificam-se os erros numéricos dos resultados das tensões nos Pontos de Gauss;
- Em caso de erros significativos, deve-se refinar a malha, executar novamente a análise e comparar os resultados com os anteriores. Estas ações devem ser repetidas até que os resultados apresentem valores próximos, indicando a precisão e convergência da análise;
- Caso os resultados das tensões e deformações não atendam aos requisitos da norma técnica, modifica-se a peça e executa-se novamente o procedimento da análise.

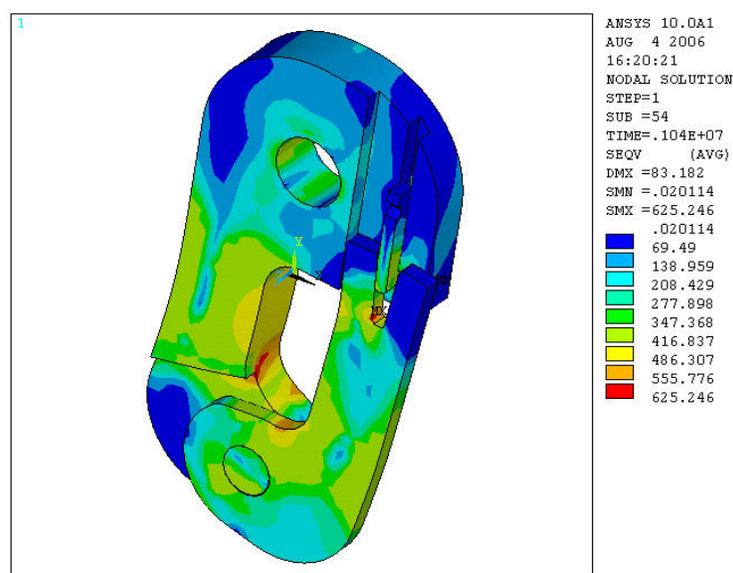
e) Resultados das Análises de Simulação aplicáveis às Análises Ambientais:

Os resultados obtidos nestas análises podem ser utilizados em uma análise quantitativa de risco, na qual sejam requeridas análises de integridade estrutural e confiabilidade de equipamentos, na avaliação de desempenho ambiental e na melhoria do SGA, como proposto a seguir.

Os resultados da análise de tensões (estrutural) são os deslocamentos, as tensões e deformações nos pontos nodais do modelo de elementos finitos, ao longo de toda a peça. Com a visualização e a listagem destes valores, pode-se verificar o comportamento da peça durante a operação e no momento da ruptura.

Quando submetida à carga de operação, a peça deve apresentar tensões abaixo do ponto de escoamento do material, sem deformações plásticas ou permanentes. Neste caso, a peça mantém a integridade estrutural e apresenta graus de confiabilidade.

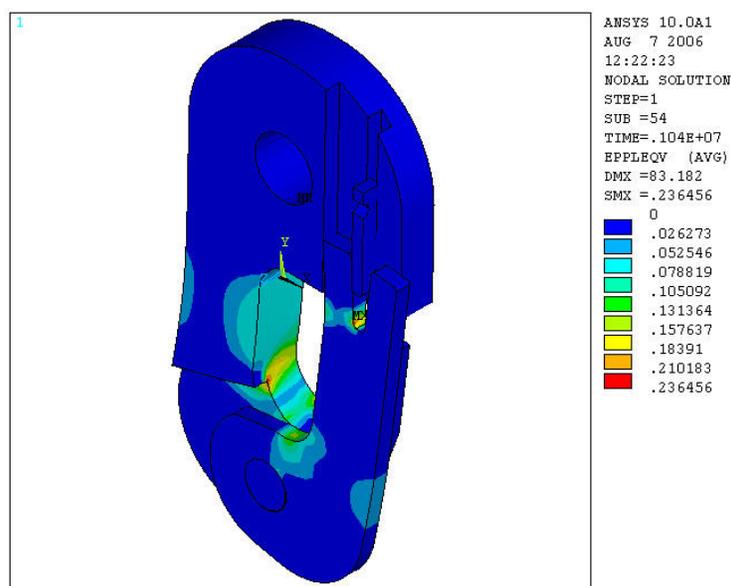
Na análise com a carga de ruptura, o Pelikelo deve apresentar tensões próximas à de escoamento e deformações plásticas ou permanentes nos pontos críticos. As Figuras 7.16 e 7.17 mostram os resultados da análise de tensões (estrutural) do Pelikelo submetido à carga de ruptura, para as tensões, 0.2 a 625.25 Pa e deformações permanentes, 0 a 0.24, respectivamente, e com as faixas de cores e valores na legenda que identificam os resultados apresentados nas figuras. A ruptura do material é identificada nos pontos nodais onde a deformação permanente atinge a deformação de ruptura do material, a qual é previamente conhecida.



Fonte: Programa ANSYS (SOUZA e COUTINHO, 2006)

Figura 7.16 – Distribuição das Tensões, 0.02 a 625,24 Pa, no Corpo do PELIKELO com a Carga de Ruptura

Foram executadas análises da peça com variações das dimensões, materiais e cargas até se obter o dimensionamento adequado da peça com a resistência estrutural requerida pela norma técnica. Com as análises de simulação foi possível reduzir o consumo de material, pois nos testes de carga em bancada as peças seriam destruídas após cada teste.



Fonte: Programa ANSYS, 2006 (SOUZA e COUTINHO, 2006)

Figura 7.17 – Deformações Plásticas ou Permanentes, 0 a 0,236, no Corpo do PELIKELO com a Carga de Ruptura

f) Discussão sobre os Resultados da Análise de Simulação

A análise de tensões (estrutural) apresentada neste estudo de caso fornece diversos resultados, os quais são analisados por meio dos testes de falseamento, que têm como objetivo verificar se as hipóteses são corroboradas ou refutadas.

Esta análise de simulação visa avaliar a integridade e confiabilidade de uma peça que, em caso de falha pode causar danos nos objetos lançados ao mar, na embarcação de apoio e em outros objetos próximos, localizados no mar e utilizados na indústria *offshore*.

Nas regiões onde os equipamentos ou estruturas são lançados no mar há dutos, *manifolds* e *risers* entre outros objetos. Caso os objetos lançados se choquem com dutos de óleo ou gás podem ocorrer derramamentos de óleo no mar e/ou explosões, os quais são aspectos ambientais significativos potenciais que deve ser considerados pela empresa na análise de risco ambiental para reduzir prevenir ou minimizar os impactos ambientais.

Como já citado por MOURA (2004) e descrito no primeiro estudo de caso, para obter a certificação ambiental, a empresa deve controlar os aspectos ambientais que tenham ou possam ter impacto significativo sobre o meio ambiente.

Por meio da utilização destas análises, a empresa está evitando que um equipamento com risco de falha entre em operação e cause um dano ambiental. Desta forma, está prevenindo ou reduzindo riscos ambientais, controlando e influenciando aspectos ambientais, conforme descrito na Norma ABNT NBR ISO 14001:2004, nos Itens 4.3.1 e 4.4.7, como apresentado nos estudos de casos 7.1, 7.2 e 7.4. Estas ações podem auxiliar também na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental da organização.

Também, como já mencionado, a análise de simulação efetuada para testar o protótipo virtual, reduz o consumo de materiais e os custos da empresa com a construção de protótipos físicos, que a cada teste seriam descartados.

Em relação ao consumo de material, pode-se considerar também a redução de consumo de amarras, as quais são reaproveitadas com o uso do Pelikelo, reduzindo os custos da empresa e a poluição no fundo do mar. Em processos de lançamento de objetos ao mar com outros tipos de ganchos, as amarras não são reaproveitadas e vão para o fundo do mar, causando uma grande poluição da água, destruindo a vida marinha no local onde são depositadas e nas proximidades.

Estes parâmetros poderiam ser utilizados como índices de desempenho ambiental operacionais de consumo de materiais, sugerido no Item 3.2.2.3 da Norma ABNT NBR ISO 14031:2004, como apresentado no estudo de caso 7.3. Com estas ações a empresa estaria também efetuando o controle do aspecto ambiental, uso de matéria prima, sugerido pela Norma ABNT NBR ISO 14001:2004, no Item A.3.1 do Anexo A.3 e obtendo melhorias em seu Sistema de Gestão Ambiental.

Com os argumentos apresentados acima, as hipóteses H1, “Os resultados da análise de simulação, que indicam as condições da integridade estrutural e da confiabilidade de estruturas, produtos ou processos, podem ser úteis na análise de risco ambiental”, H2, “ Os resultados da análise de simulação de otimizações ou alterações efetuadas para a melhoria de desempenho em produtos ou processos, podem ser úteis na avaliação de desempenho ambiental e na melhoria do Sistema de

Gestão Ambiental” e H3, “Os resultados da análise de simulação que indicam falhas ou danos em um objeto, com potencial para causar acidentes ambientais, podem ser úteis na análise de risco ambiental e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental” são corroboradas.

7.6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UMA BARRAGEM: AVALIAÇÃO E SOLUÇÕES PARA AS ESTRUTURAS DE CONCRETO SUJEITAS À REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA)

Esta análise foi realizada para a avaliação da integridade da estrutura concreto de uma barragem onde foi detectada a presença de Reação Álcali-Agredado (RAA), que gera tensões na estrutura devido à expansão do concreto (CAVALCANTI et al., 2007).

a) Objetivo da Análise de Simulação:

Simular os efeitos da expansão do concreto na estrutura e calcular os deslocamentos, tensões e deformações para avaliar o estado atual das estruturas da barragem, mostrada na Figura 7.18, com carregamento induzido pela Reação Álcali-Agredado (RAA).

b) Informações sobre o Processo da Reação Álcali-Agredado (RAA)

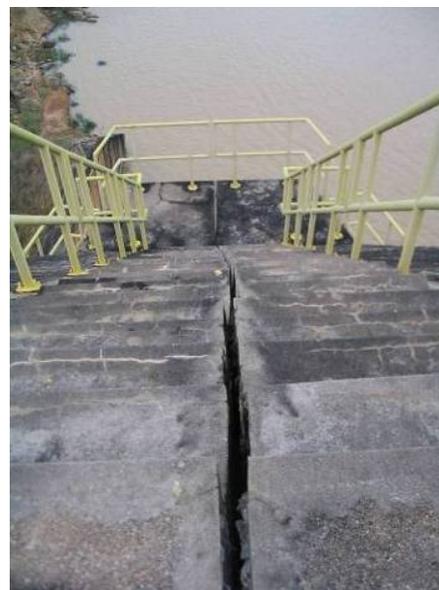
A Reação Álcali-Agredado (RAA) é um processo químico onde alguns constituintes mineralógicos do agregado reagem com hidróxidos alcalinos (provenientes do cimento, água de amassamento, agregados, pozolanas, agentes externos, etc.) que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto. Como produto da reação forma-se um gel higroscópico expansivo.

A expansão do concreto causou abertura e fechamento das juntas de contração entre blocos, como mostrado na Figura 7.19, fissuras em várias regiões e deslocamentos relativos horizontais em algumas juntas entre blocos que podem comprometer a integridade estrutural da barragem. Os blocos não-vertentes, adjacentes às seções vertentes, se deslocaram para dentro do vertedouro, resultando em problemas de operação da comporta do vertedouro da extremidade esquerda. Estes problemas podem levar à ruptura da barragem com inundações e danos ambientais, pois a capacidade de vazão do vertedouro é da ordem de 8,000 m³/s.



Fonte: CAVALCANTI et al., 2007

Figura 7.18 - Vista Geral da Barragem a Jusante



Fonte: CAVALCANTI et al., 2007

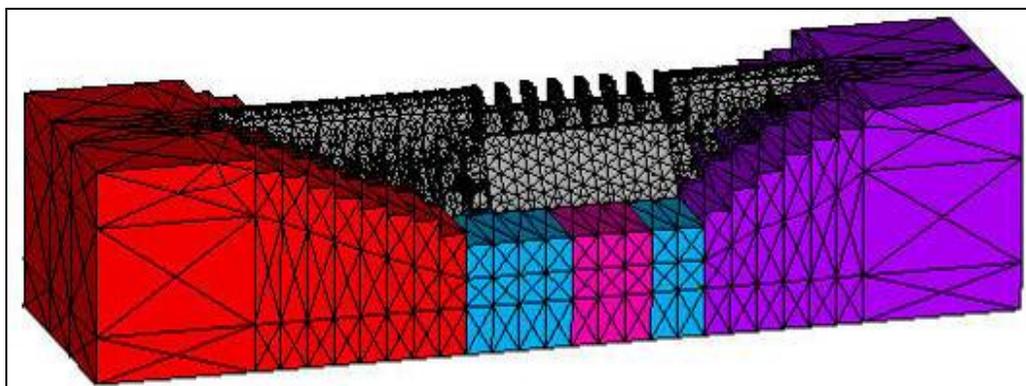
Figura 7.19 – Compressão das Juntas de Contração à Montante (Esquerda) e Abertura das Juntas de Contração à Jusante (Direita)

c) Tipo de análise a ser realizada:

Análise não linear estrutural visco-elástica, para verificação dos deslocamentos, tensões e deformações ao longo de toda a estrutura da barragem e fundações, devido aos esforços induzidos na estrutura com a expansão do concreto.

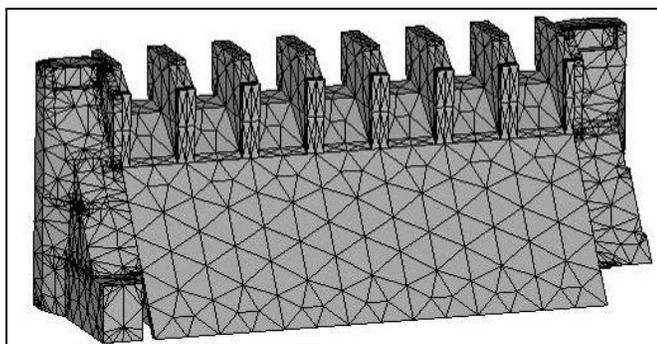
d) Procedimento da Análise Estrutural:

- Modelar-se a barragem e o maciço rochoso com elementos sólidos (com os graus-de-liberdade de deslocamentos) e as juntas de contração entre blocos com elementos de contato, para simular a transferência das tensões longitudinais devido às RAAs, como apresentado nas Figuras 7.20, maciço rochoso e a barragem e 7.21, blocos vertentes e adjacentes;
- Definem-se as propriedades físicas e mecânicas dos materiais da barragem e do maciço rochoso e a curva de fluência do concreto afetado pela expansão devido às RAAs;
- Aplicam-se as condições de fixação do modelo;
- Aplicam-se os carregamentos relativos às taxas de expansão do concreto e as cargas de peso próprio e hidrostática;
- Executa-se a análise estrutural não linear para o cálculo dos deslocamentos, tensões e deformações;



Fonte: Programa ANSYS (CAVALCANTI et al., 2007)

Figura 7.20 – Malha de Elementos Finitos do Modelo do Maciço Rochoso e da Barragem



Fonte: Programa ANSYS (CAVALCANTI et al., 2007)

Figura 7.21 – Malha de Elementos Finitos do Modelo dos Blocos Vertentes e Adjacentes

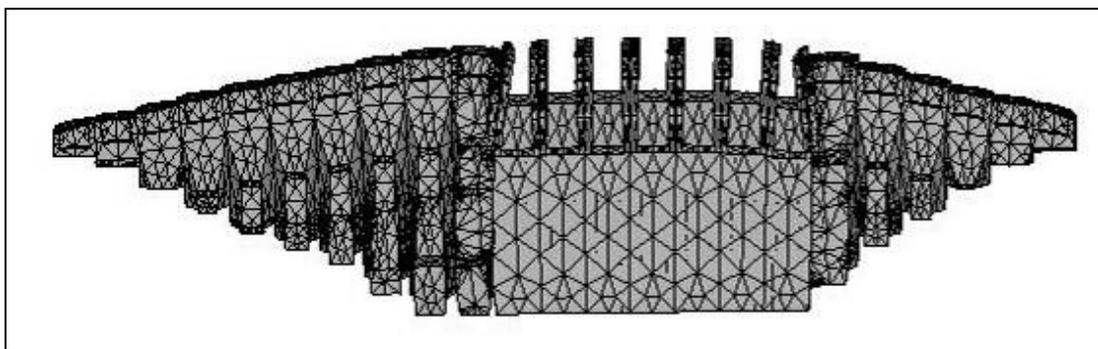
- Analisam-se os resultados por meio de plotagens do modelo e/ou listagem dos valores obtidos em todo o modelo, para verificar o comportamento da estrutura após a expansão do concreto e avaliar a integridade estrutural e o grau de confiabilidade nos diversos pontos do modelo da barragem, para identificar os pontos onde ocorrem as concentrações de tensões e fissuras;
- Verificam-se os erros numéricos dos resultados das tensões nos pontos de Gauss;
- Em caso de erros significativos, deve-se refinar a malha, executar novamente a análise e comparar os resultados com os anteriores. Estas ações devem ser repetidas até que os resultados apresentem valores próximos, indicando a precisão e convergência da análise;

Os resultados obtidos foram utilizados para efetuar medidas mitigadoras para conter os efeitos das RAAs.

e) Resultados das Análises de Simulação aplicáveis às Análises Ambientais:

Os resultados obtidos nestas análises podem ser utilizados em uma análise quantitativa de risco ambiental, na qual sejam requeridas análises de integridade estrutural e de confiabilidade da estrutura da barragem e melhoria do SGA da organização, como proposto a seguir.

Os resultados da análise de tensões (estrutural) são os deslocamentos, as tensões e deformações nos pontos nodais do modelo de elementos finitos, ao longo de todo o modelo da barragem. Com a visualização e a listagem destes valores, pode-se verificar o comportamento da barragem durante o processo de expansão do concreto e no momento de ocorrência de fissuras.



Fonte: Programa ANSYS (CAVALCANTI et al., 2007)

Figura 7.22 – Deformação da Barragem após a Expansão - Vista de Jusante

A Figura 7.22 mostra a deformação da barragem após alguns anos de expansão, onde pode ser observado o fechamento das juntas entre os blocos não vertentes, proporcionando a transmissão de esforços, deslocamentos, tensões e deformações para os blocos do vertedouro. Ocorreram também deslocamentos na crista da barragem (vertedouro) na direção vertical.

Os resultados obtidos permitiram aos engenheiros verificar o comportamento da estrutura da barragem afetada pela expansão do concreto, que propuseram algumas soluções para atenuar o problema, como o corte de juntas de contração na lateral do vertedouro, para evitar o aumento das tensões e a geração de fissuras que poderiam levar ao rompimento da estrutura da barragem com vazamentos, inundações e danos ambientais diversos.

f) Discussão sobre os Resultados da Análise de Simulação:

A análise estrutural apresentada neste estudo de caso fornece diversos resultados, os quais são analisados por meio dos testes de falseamento, que têm como objetivo verificar se as hipóteses são corroboradas ou refutadas.

A análise de simulação computacional foi importante neste caso, pois permitiu a modelagem do processo real do efeito das RAAs e da expansão da estrutura de concreto, com a geração do protótipo virtual, que incluiu a barragem e o maciço rochoso, elaborado com as dimensões reais.

Foram aplicados os carregamentos que geraram as expansões do concreto nos mesmos locais onde ocorreram as Reações Álcali-Agredado (RAAs).

Caso fosse utilizado um protótipo físico, construído em escala reduzida, seria muito complexo calcular e aplicar os carregamentos que representam as RAAs, pois os mesmos teriam que ser proporcionais às dimensões do modelo reduzido e a análise teria que ser realizada durante vários anos para simular a expansão atual do concreto e estudar os seus efeitos no comportamento da estrutura da barragem.

Por meio da análise de simulação foi possível reproduzir os efeitos das RAAs, efetuar uma projeção das expansões do concreto para os próximos anos, identificar as suas consequências e definir medidas para mitigar os seus efeitos, evitando-se desta forma o aumento de tensões no concreto, reduzindo-se as aberturas e fechamentos entre blocos e minimizando-se os riscos de geração de fissuras que poderiam causar a ruptura da estrutura, descontrole do fluxo de água, inundações e danos ambientais.

Este estudo poderia ser utilizado em análise de risco e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental relacionado à barragem, pois os resultados fornecidos, como apresentado acima, são úteis em uma análise quantitativa de riscos ambientais, incluindo análises de causas e consequências, integridade e confiabilidade estrutural, para prevenção e/ou mitigação de riscos e impactos ambientais, e podem contribuir para o controle de aspectos e impactos ambientais identificados pela empresa, como mencionado na Norma ABNT NBR ISO 14001:2004, Itens 4.4.7 e 4.3.1, apresentados nos estudos de casos 7.1, 7.2, 7.4 e 7.5. Estas ações podem auxiliar também na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental da organização.

Com os resultados apresentados neste estudo de caso, as hipóteses H1, “Os resultados da análise de simulação, que indicam as condições da integridade estrutural e da confiabilidade de estruturas, produtos ou processos, podem ser úteis na análise de risco ambiental”, H3, “Os resultados da análise de simulação que indicam falhas ou danos em um objeto, com potencial para causar acidentes ambientais, podem ser úteis na análise de risco ambiental e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental” e H4, “A análise de simulação computacional permite a avaliação das causas e consequências dos danos em objetos, os quais podem gerar acidentes ambientais,

fornecendo resultados úteis na análise de risco ambiental e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental” são corroboradas.

8. CONCLUSÕES

Nas últimas décadas houve um aumento significativo do número de acidentes ambientais, com mortes de seres humanos e enormes danos à fauna e flora do planeta Terra.

Como consequência do crescimento de desastres ambientais e devido a uma maior conscientização das autoridades e da população com relação às questões ambientais, as legislações ambientais estão se tornando mais rigorosas e a sociedade está exigindo das empresas o desenvolvimento de uma política ambiental e de sustentabilidade, visando a preservação do meio ambiente, por meio da redução do consumo de recursos não renováveis, da aplicação de medidas para eliminar e/ou mitigar as diversas formas de poluição e do projeto e operação de processos limpos e de produtos recicláveis que não causem danos ambientais e que possam ser re-manufaturados.

Diante das atuais exigências, muitas empresas estão incluindo em suas estratégias a Política Ambiental, a implantação de um Sistema de Gestão Ambiental além da Análise de Risco, Avaliação de Desempenho e Certificação Ambientais, para a melhoria de seus processos, produtos e serviços, visando se tornarem mais competitivas e/ou líderes de mercados nos setores nos quais atuam.

No entanto, para atrair mais consumidores, permanecer no mercado e se expandir, as empresas estão percebendo que necessitam gerar diferenciais, os quais são designados por KIM e MAUBORGNE (2005), professores do INSEAD (*Institut Européen d'Administration des Affaires*- Instituto Europeu de Administração de Negócios), como “Estratégia do Oceano Azul”.

Este diferencial pode ser alcançado por meio do uso de ferramentas de análise numérica, tal como um programa de simulação computacional, o qual pode trazer inúmeros benefícios para a empresa como mencionado no Item 2.1.2 desta dissertação.

A proposta apresentada nesta dissertação para utilização da simulação computacional na análise de risco e avaliação de desempenho ambientais e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental, visa apresentar as aplicações e benefícios que a análise de simulação pode trazer para a gestão ambiental das empresas. Os resultados obtidos podem auxiliar na solução das questões ambientais dessas empresas e colaborar para que elas alcancem um diferencial competitivo, o qual poderá se tornar o seu oceano azul.

Como apresentado nos estudos de casos, as análises de simulação computacional podem ser úteis na prevenção e/ou mitigação dos riscos e impactos ambientais, na avaliação do desempenho ambiental dos produtos, processos e serviços e na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental.

Para a análise de risco ambiental, verificou-se que os resultados da análise de simulação são importantes, pois, para o uso das ferramentas e métodos de análise de risco, em muitos casos são necessários dados de riscos e/ou acidentes anteriores, os quais não são encontrados em bancos de dados, uma vez que os riscos a serem analisados e os acidentes mais recentes decorrem do uso de novas tecnologias e, portanto, são riscos e acidentes sem histórico e sem dados precisos, especialmente quando é necessário realizar uma análise quantitativa de riscos.

Muitos destes acidentes ambientais são causadas por falhas em equipamentos ou estruturas que utilizam novas tecnologias complexas e são submetidos a altos carregamentos, como a boca de sino, ou sofrem danos por reações químicas, como a barragem, ambos apresentados nos estudos de casos. Como não há normas técnicas para o dimensionamento ou análise de tensões de alguns equipamentos e estruturas, a ferramenta mais adequada no momento para a verificação da integridade e confiabilidade estrutural de objetos e do comportamento de processos é o programa de simulação computacional, que utiliza métodos numéricos para calcular as variáveis de projeto e fornece resultados com precisão requerida na engenharia.

Por meio das análises de simulação, apresentadas nos estudos de casos, verifica-se o comportamento de um objeto que apresenta risco potencial de danos e as causas e conseqüências dos acidentes, as quais podem levar a diversos danos ambientais. Com o protótipo virtual, são reproduzidas situações complexas, que podem ocorrer simultaneamente ou em efeito cascata, tais

como o incêndio na plataforma *offshore* e as expansões do concreto na barragem, apresentados nos estudos de caso.

Pode-se também analisar comportamentos de equipamentos, estruturas e processos que em muitos casos não podem ser observados em laboratório, devido ao tamanho do objeto, à destruição do mesmo ou às próprias condições de riscos geradas durante os testes, não sendo possível acompanhar a seqüência dos eventos, fornecida na análise de simulação em etapas.

Na avaliação de desempenho ambiental, os estudos de casos, como da guia de tubos e do Pelikelo, mostraram que a análise de simulação pode trazer inúmeros benefícios para a empresa, tais como os testes com protótipos virtuais, sem gastos de materiais e redução do consumo de energia, para se obter a melhoria e a otimização de produtos e processos, com reduções dos custos de construção dos protótipos físicos e do tempo de análise.

Na análise de simulação, aplicável à avaliação de desempenho ambiental, pode-se estudar índices de desempenho ambiental operacionais relacionados a consumos de material e energia, tempo da peça em operação e emissões devido às operações, como o calor. No estudo de caso da guia de tubos houve a melhoria do processo de refrigeração, reduções do consumo de material da guia pelo aumento da vida útil, do calor, de energia e das paradas do processo de fabricação para manutenção. No caso do estudo de caso do Pelikelo houve a redução de consumo de material e melhoria do processo de lançamento de objetos no mar com redução de poluição ambiental.

Na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental (SGA), a análise de simulação pode trazer contribuições significativas para a empresa, auxiliando no controle dos aspectos e impactos ambientais e na prevenção e/ou mitigação de riscos ambientais, como mostrado nos estudos de casos. No mercado nacional e internacional, a valorização das ações das empresas que possuem SGA e especialmente a certificação ambiental tem sido significativa, enquanto as ações das empresas que têm sido responsáveis por desastres ambientais estão desvalorizando, como aconteceu recentemente com a empresa British Petroleum.

Nos estudos de casos apresentados verifica-se ainda que a análise de simulação fornece diversos resultados que podem ser utilizados em análises de integridade e confiabilidade. Estes dados podem ser úteis para complementar a análise de risco quantitativa, colaborando na melhoria do Sistema de Gestão Ambiental da organização.

Nos testes de falseamento efetuados, uma ou mais hipóteses definidas neste trabalho foram corroboradas, em cada um dos estudos de caso apresentados, como apresentado na discussão dos resultados de cada estudo. No primeiro caso as 5 hipóteses foram corroboradas. No segundo e quarto casos as hipóteses H1 e H3 foram corroboradas. No terceiro caso a hipótese H2 foi corroborada. No quinto caso as hipóteses H1 e H2 foram corroboradas. No sexto caso as hipóteses H1, H3 e H4 foram corroboradas.

Por meio das aplicações citadas e dos estudos de casos apresentados, verifica-se que a análise de simulação possui inúmeras aplicações e soluções para as questões ou desafios ambientais que ocorrem nas indústrias *offshore*, mecânica, siderúrgica, nuclear, química, de energia e da construção civil entre outras

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade a este trabalho sugerem-se as seguintes pesquisas:

- Identificar e contatar empresas que possuem Sistema de Gestão Ambiental e que utilizam a simulação computacional em análises de engenharia;
- Verificar se estas empresas utilizam a simulação computacional na solução de suas questões ambientais;
- Investigar os motivos da utilização ou não, se a empresa obteve benefícios ou não e de que forma a análise de simulação foi utilizada;
- Aplicar os resultados da metodologia proposta à análise de riscos.

10. REFERÊNCIAS

ABS – AMERICAN BUREAU OF SHIPPING, **Guidance Notes on Risk Assessment Applications for the Marine and Offshore Oil and Gas Industries**, 2000.

ABNT NBR ISO 14001:2004 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Sistemas de Gestão Ambiental - Requisitos**, RJ, 2004.

ABNT NBR ISO 14031:2004 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Gestão Ambiental - Avaliação de Desempenho Ambiental - Diretrizes**, RJ, 2004.

AGUIAR, L. A.; ALMEIDA, J. R.; ARAÚJO, G. S.; SOARES, P. M. ; POSSA, M. V. **Análise e Avaliação de Risco Ambiental como Instrumentos de Gestão em Instalações de Mineração**. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, Abril, 2008.

AGUIAR, L. A. **Análise de Risco Aplicada à Gestão de Rejeitos: Uma Revisão Aplicada aos Depósitos de Rejeitos Radioativos Próximos à Superfície**. Série Gestão e Planejamento Ambiental, SGPA – 09, Coleção Artigos Técnicos nº 6, CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 2007.

AIChE - AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS, **Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis**, 2 ed., Center for Chemical Process Safety (CCPS), New York, USA, 2000.

ALENCAR, G. K. **Auditorias Ambientais: Uma Visão Geral (Parte I)**, Espaço Jurídico, Súmula Ambiental, Sistema FIRJAN, no. 156, p. 5, Ano XIV, fev., 2010.

ALMEIDA, J. R. **Normalização, Certificação e Auditoria Ambiental**. Rio de Janeiro: THEX, Almeida Cabral, 2008.

ALMEIDA, J. R. **Gestão Ambiental para o Desenvolvimento Sustentável**, Rio de Janeiro: THEX, 2008.

ALMEIDA, J. R. **Gerenciamento Ambiental**, Rio de Janeiro: THEX, 2007.

ALMEIDA, J. R.; LINS, G. A.; QUEIROZ, C.; PINNA, F. **Análise de Nove Auditorias Ambientais**. Mundo & Vida, Vol. 5 (1), 29-36, 2004.

ALMEIDA, J. R.; LINS, G.A.; Aguiar, L. A.; AQUINO, A. R.; EGUTE, N. S. **Análise de Risco Ambiental em Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) utilizando a Análise Preliminar de Perigo (APP)**. Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento, Vol. 10, no. 2, Agosto, 2008.

ANN, G. E.; ZAILANI, S.; WAHID, N. A. **A Study on the Impact of Environmental Management System (EMS) Certification Towards Firms' Performance in Malaysia**. Management of Environmental Quality, v. 17, n.1, p.73, 2006.

ANSELL, J.; WHARTON, F. **Risk: Analysis, Assessment and Management**. England: John Wiley & Sons, Ltd., 1992.

ANSYS, Inc. **ANSYS Manuals: Analysis Procedures, Theory, Elements, Verification Manual**, Version 12, Pittsburgh, USA, 2009.

AS/NZS 4360:2004, **Australian/New Zealand Standard Risk Management**, Sidney e Wellington, 2004.

ASSAN, A. E. **Método dos Elementos Finitos**. 2 ed., Campinas: UNICAMP, São Paulo, 2003.

ÁVILA, G. J. **Processos e Resultados de Empresas Brasileiras após a Certificação Ambiental ISO 14001**. Dissertação (Mestrado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2006.

BARBIERI, J. C. **Políticas públicas indutoras de inovações tecnológicas ambientalmente saudáveis nas empresas**. Revista de Administração Pública, de Janeiro, v. 31, n. 2, p. 135-152, mar./abr. 1997.

BATHE, K. J. **FEA - Finite Element Procedures**. New Jersey: Prentice Hall, 2007.

BERGAMINI, S. J. **Contabilidade e Riscos Ambientais**. Revista do BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Rio de Janeiro: No.11, jun, 1999.

BERGER, I. S. **Determination of Risk for Uncontrolled Hazardous Waste Sites**. Proceedings of the National Conference on Management of Uncontrolled Hazardous Waste Sites, Hazardous Materials Control Research Institute, Silver, Spring, 1982.

BERNSTEIN, P. L. **Desafio aos Deuses: A Fascinante História do Risco**. 2 ed. Rio de Janeiro: Campus, 1997.

BOIRAL, O.; SALA, J. M. **Environmental Management: Should Industry Adopt ISO 14000**. Business Horizons, v. 41, n. 1, p. 57-64, Jan./Feb., 1998.

BORGES, I. L. **Processo de Adequação Ambiental na Indústria Carbonífera: Estudo de Caso sobre a Implantação de um Sistema de Gestão**. Dissertação (Mestrado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

BULHÕES, F. M. **A Certificação Ambiental de Produtos Agrícolas e Florestais: Diferentes Trajetórias da Relação entre Ambiente e Mercado**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2001.

CALASANS, E. B. **Avaliação do Desempenho Ambiental com aplicação da Manutenção Autônoma: Estudo de Caso sobre Ganhos Ambientais**. Monografia. UFBA, Salvador, BA, 2005.

CAMACHO, E. N. **Uma Proposta de Metodologia para Análise Quantitativa de Riscos Ambientais**. Dissertação (Mestrado). COPPE/UFRJ, RJ, 2004.

CAMPOS, L. M. S. **SGADA – Sistema de Gestão e Avaliação de Desempenho Ambiental: Uma Proposta de Implementação**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.

CAMPOS, L. M. S.; MELO, D. A. **Indicadores de Desempenho dos Sistemas de Gestão Ambiental (SGA): Uma Pesquisa Teórica**, Produção, v. 18, n. 3, p. 540-555, 2008.

CAMPOS, L. M. S.; MELO, D. A.; MEURE, S. A. **A Importância dos Indicadores de Desempenho Ambiental nos Sistemas de Gestão Ambiental (SGA)**, IX ENGEMA - Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, Curitiba, Nov., 2007.

CANVEY, **An Investigation of Potential Hazards from Operations in the Canvey Island/Thurrock Area**, Health and Safety Executive Report, UK, 1978.

CASTRO, J. C. **A Influência dos Sistemas de Gestão Ambiental baseados na ISO 14001 no Valor de Mercado das Empresas Brasileiras com Ações Negociadas na Bovespa**. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

CAVALCANTI, A. J. C. T.; JULIANI, M.; TRISTÃO, G.; SILVEIRA, J. F. **Simulação Numérica da Barragem da Pedra: Avaliação e Soluções para as Estruturas de Concreto Submetidas a Reação Álcali-Agregado**, 2º. Brazilian ANSYS Users Conference e 8º. Seminário Brasileiro de Simulação Computacional na Engenharia, Rio de Janeiro, 2007.

CEPAL-ONU - COMISSÃO ECONÔMICA PARA A AMÉRICA LATINA E O CARIBE, **Estudo sobre Riscos Ambientais Urbanos**. Seminário de Riscos Ambientais Urbanos, Brasília, Ago, 2003.

CETESB P4.261, **Manual de Orientação para a Elaboração de Estudos de Análise de Riscos**, SP, 2003.

CHAVAS, J. P. **Risk Analysis in Theory and Practices**. Elsevier Academic Press: USA, 2004.

CLARKSON, P. M.; LI, Y.; RICHARDSON, G. D.; VASVARI, F. P. **Revisiting the Relation Between Environmental Performance and Environmental Disclosure: An Empirical Analysis**. Accounting, Organizations and Society. Vol. 33, p. 303-327, 2008.

CLOUGH, R. W. **The Finite Element Method After Twenty-Five Years: A Personal View**, Computers & Structures, vol. 12, pp. 361-370, 1980.

CORBETT, C. J.; PAN, J. N. **Evaluating Environmental Performance using Statistical Process Control Techniques**, European Journal of Operational Research, 139, p. 68-83, 2002.

CORRÊA, M. D. **Relação entre o Nível de Divulgação Ambiental e o Desempenho Ambiental das Empresas Componentes do Índice BOVESPA**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2009.

CREA – CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA E ARQUITETURA, **Mudanças à Vista**, Seção de Indústria e Infraestrutura, Revista CREAMJ 83, Julho/Agosto/2010.

CROWL, D. A.; LOUVAR J. F. **Chemical Process Safety – Fundamentals with Applications**. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

CUNHA, I. A. **Gerenciamento de Riscos Ambientais e a Política de Proteção dos Mananciais em São Paulo**. INTERFACEHS – Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente, v.3, n.3, Artigo 4, Ago/Dez,2008.

DAGNINO , R. S.; JUNIOR, S. C. **Risco Ambiental: Conceitos e Aplicações**, Climatologia e Estudos da Paisagem, Vol. 2, No. 2, Julho/Dez, 2007.

DARNALL, N. **Why Firms Mandate ISO 14001 Certification**, Business & Society, Vol. 45, Sage Publications, No. 3, 354-381, September, 2006.

DAROIT, D. **Melhores Práticas Ambientais em Empresas do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

DEMAJOROVIC, J.; SANCHES, C. S. **Educação e Indicadores Ambientais: Perspectivas para as Organizações**. Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 5, 1999, São Paulo. **Anais...**, p. 99-113, 1999.

DEPARTMENT OF DEFENSE, **Standard Practice for System Safety**, USA, MIL-STD-882D, 2000.

DITZ, D.; RANGANATHAN J. **Measuring Up: Toward a Common Framework for Tracking Corporate Environmental Performance**. World Resources Institute: New York, 1997.

EBELING, C. E., An introduction to reliability and maintainability engineering, New York: McGraw-Hill, 1997.

ERICSON, C. A. **Hazard Analysis Techniques for System Safety**. New Jersey: Wiley-InterScience, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2005.

FEEMA - Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente, **Instrução Técnica DECON No. 06/2007**, Secretaria de Estado do Ambiente, Rio de Janeiro, 2007.

FENKER, E. A. **Risco Ambiental e Gestão dos Custos Ambientais: Um Estudo de sua Relação em Empresas Atuantes no Brasil**. Dissertação (Mestrado). UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2009.

FELICIANO, Wanderley F. **Análise de Risco Ambiental**. Apresentação no Conselho Regional de Química - 4^a. Região, Novembro, 2006.

FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER, **Manual de Análise de Riscos Industriais**, nº. 01/01, RS, março, 2001.

FERMA, Federation of European Risk Management Associations. **Norma de Gestão de Riscos**, 2003.

FERRON, R. T. **A Aplicação da NBR ISO 14001:2004 e Lucratividade: Uma Análise experimental**. Dissertação (Mestrado). Fundação Instituto Capixaba de Pesquisas em Contabilidade, Economia e Finanças – FUCAPE, Vitória, ES, 2009.

FILHO, J. S. **Instrumentos Políticos e Riscos Ambientais Urbanos**, Revista Eco 21, Ano XIII, Edição 81, Ago, 2003.

FLORIDA, R.; DAVISON, D. **Gaining from Green Management: Environmental Management Systems Inside and Outside the Factory**. California Management Review, v. 43, n. 3, p. 64-84, Spring, 2001.

FOSTER, K. P. **The Precautionary Principle: Sound Sense or Environmental Extremism?** Pensilvania: IEEE Technology and Society Magazine, 2002.

FRANK, B.; GROTHE-SENF, A. **Avaliação de Desempenho Ambiental Ampliado (ADAA): Um Modelo para Comparação de Empresas**, Revista Brasileira de Ciências Ambientais, No. 5, Dez, 2006.

GALVÃO, J. B. F.; NEWMAN, D. **Gestão e Gerenciamento de Risco Ambiental**, Revista Banas Ambiental, ano 2, nº 12, Junho, 2001.

GASPARINI, L. V. L. **Análise das Inter-relações de Indicadores Econômicos, Ambientais e Sociais para o Desenvolvimento Sustentável**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

GLASMAYER, S. P. **Acidentes Industriais Maiores: Uma Proposta de Gerenciamento de Riscos a partir de uma Revisão de Requisitos Legais**. Dissertação (Mestrado). Centro Universitário SENAC, Campus Santo Amaro, São Paulo, 2006.

GILBERT, M. J. **ISO 14001 / BS 7750: Sistema de Gerenciamento Ambiental**. São Paulo: IMAM, 1995.

GAVRONSKI, I. **Gestão Estratégica de Operações Sustentáveis: Levantamento das Empresas Brasileiras Certificadas na Norma NBR ISO 14001**. Dissertação (Mestrado), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2003.

GAVRONSKI, I. **O Desenvolvimento Sustentável e as Estratégias das Organizações na América Latina**. Assembléia do Conselho Latino-americano de Escolas de Administração (CLADEA), 37, Anais..., CD-ROM, Porto Alegre, 2002.

HADDAD, A. N.; MORGADO, C. V.; DE SOUZA, D. **Health, Safety and Environmental Management Risk Evaluation Strategy: Hazard Matrix Application Case Studies**, Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEM 2008, pp. 1314-1318, Singapore, Dec, 2008.

HADDAD, A. N.; MORGADO, C. V.; DE SOUZA A **Case Study on the Integration of Safety, Environmental and Quality Management Systems**, IIE Annual Conference and Expo 2007 - Industrial Engineering's Critical Role in a Flat World, Conference Proceedings, pp. 1190-1195, 2007.

HADDAD, A. N.; SÁ, T. S.; GALANTE, E. B. F. **Quantitative Risk Analysis Applied to the Gases Industry** IEEM 2009 - IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management , art. no. 5373116, pp. 2169-2173, 2009.

HARRINGTON, H. J.; KNIGHT, A. **A Implementação da ISO 14000: Como Atualizar o SGA com Eficácia**. São Paulo: Atlas, 2001.

HSE - HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, **Offshore Technology Report 2000/112**. Offshore Hydrocarbon Releases Statistics. Health & Safety Executive, UK, 2000. <http://www.hse.gov.uk>, acesso em: Out, 2010.

HENLEY, E. J.; Kumamoto, H. **Reliability Engineering and Risk Assessment**, New Jersey: Prentice Hall, USA, 1996.

HRONEC, S. M. **Sinais Vitais**. São Paulo: Makron Books, 1994.

ISO/FDIS 31000:2009 - **Risk Management - Principles and Guidelines**, ISO, Genebra, 2009.

JASCH, C. **Environmental Performance Evaluation and Indicators**, Journal of Cleaner Production, 8, 79–88, Elsevier, 2000.

JORNAL DO BRASIL, **Vazamento já é o Maior dos EUA**, Caderno A16, Vida, Saúde & Ciência, Rio de Janeiro, 28/05/2010(a).

JORNAL DO BRASIL, **Funil Consegue Parar Vazamento**, Caderno A24, Vida, Saúde & Ciência, Rio de Janeiro, 16/06/2010(b).

JUNG, E. J.; KIM, J.S.; RHEE, S. K. **The Measurement of Corporate Environmental Performance and its Application to the Analysis of Efficiency in Oil Industry**, Journal of Cleaner Production, **9**(6), 551–563, 2001.

KAPLAN, R. S.; NORTON, D. P. **Organização Orientada para a Estratégia**. Rio de Janeiro: Campus, 2000.

KHAN, F. I.; RANI, J. D.; ABBASI, S. A. **Accident Simulation as a Tool for Assessing and Controlling Environmental Risks in Chemical Process Industries: a Case Study**, Korean Journal Chem. Eng., **15**(2), 124-135, 1998.

KHATER, E. **Confiabilidade Aplicada à Manutenção**, Aperfeiçoamento Profissional em Engenharia de Manutenção, Pós-graduação *Lato Sensu*, Instituto Superior de Tecnologia – ICAP, São João Del Rei, MG, abril, 2009.

KECECIOGLU, D. **Reliability Engineering Handbook**, Vol. 1, New Jersey: Prentice-Hall, 1991.

KIM, W. C.; MAUBORGNE, R. **A Estratégia do Oceano Azul**. 13 ed. Rio de Janeiro: Campus, 2005.

KIRCHHOFF, D. **Avaliação de Risco Ambiental e o Processo de Licenciamento: O Caso do Gasoduto de Distribuição Gás Brasileiro Trecho São Carlos - Porto Ferreira**, Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2004.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Metodologia Científica**, 5 ed., São Paulo: Atlas, 2007.

LEES, F. P. **Loss Prevention in the Process Industries**, 2 ed., London and Boston: Butterworths, 1996.

MACHADO, J. F. G.; MOY, D. **The New Performance Evaluation Methodology and its Integration with Management Systems**, *The TQM Magazine*, Vol. 15, Number 1, pp. 25-29, MCB UP Limited, Emerald, 2003.

MARTINKOSKI, D. C. **Análise de Desempenho Ambiental e Avaliação dos Resultados Econômicos em uma Organização Certificada com a ISO 14001: Estudo de Caso realizado em Indústria do Pólo Petroquímico do Sul.** Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, 2007.

MELO, D. A. **Indicadores de Desempenho Ambiental: Um Estudo Sobre a Utilização dos Indicadores nos Sistemas de Gestão Ambiental (SGA) em Empresas Catarinenses Certificadas pela NBR ISO 14001.** Dissertação (Mestrado). Universidade do Vale do Itajaí, Biguaçu, SC, 2006.

MELNYK, S. A.; SROUFE, R. P.; CALANTONE, R. **Assessing the Impact of Environmental Management Systems on Corporate and Environmental Performance.** Journal of Operation Management, N. ° 21, p. 329-351, 2003a.

MELNYK, S. A.; SROUFE, R. P.; CALANTONE, R. **A Model of Site-specific Antecedents of ISO 14001 Certification, Production and Operations Management,** Vol. 12 N. ° 3, p. 369-385, 2003b.

MEYER, M. C. **Análise de Risco Qualitativa em Projeto Industrial de Unidade de Co-geração de Vapor,** Dissertação (Mestrado), Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, SC, 2005.

MILES, M. P.; COVIN, J. G. **Environmental Marketing: A Source of Reputational, Competitive, and Financial Advantage.** Journal of Business Ethics, 23, p. 299-311, 2000.

MOAVENI, S. **Finite Element Analysis – Theory and Application with ANSYS,** 3 ed, New Jersey: Person Prentice Hall, USA, 2008.

MONTEIRO, G. et al. **Metodologia para Análise de Risco/Confiabilidade da Interação entre os Sistemas de Potência Elétrica e de Automação em Plataformas de Produção,** 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Salvador, Out, 2005.

MOREIRA, M. S. **Estratégias e Implantação do Sistema de Gestão Ambiental (Modelo ISO 14000).** Belo Horizonte: Desenvolvimento Gerencial, 2001.

MORGADO, C. R. V.; MELO, C. H.; GUEIROS, J. M. S. J. **Avaliação de Riscos para Priorização do Plano de Segurança**. Congresso Nacional de Excelência em Gestão, Centro Tecnológico, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Nov, 2002.

MORIARTY, B.; ROLAND, H. E. **System Safety Engineering and Management**. New York: Wiley, 1983.

MORROW, D.; RONDINELLI, D. **Adopting Corporate Environmental Systems: Motivations and Results of ISO 14001 and EMAS Certification**, European Management Journal, Vol. 20, Nº 2, p. 159-171, April, 2002.

MOURA, L. A. A. **Qualidade e Gestão Ambiental**. 4 ed., São Paulo: Juarez de Oliveira, 2004.

NETO, L. M. **Identificação de Perigos e Avaliação de Riscos em uma Unidade Offshore na Fase de Operação: Estudo de Caso de um FPSO**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Fluminense, UFF, Niterói, RJ, 2007.

New Zeland Environmental Protection Agency (NZEPA), **Environmental Risk Assessment, Resource Management Act**, New Zeland, July, 1991.

O'CONNOR, P. D. T. **Reliability Engineering**, New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1988.

PACHECO, J. M. J. **A Inserção de Indicadores de Medição do Desempenho para o Sistema de Gestão Ambiental**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

PAULA, E. B. M. et al. **Manual para Elaboração e Normalização de Dissertações Teses**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Sistema de Bibliotecas e Informação, 3 ed. rev., atual. e ampl. - Rio de Janeiro, SiBI, 2008.

PETROBRAS – PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. ETEC III – III Encontro Técnico sobre Engenharia da Confiabilidade, Rio de Janeiro, 1991.

PORTER, M. E.; VAN DER LINDE, C. **Green and Competitive**. Harvard Business Review, p.120-134, Sept./Oct., 1995.

REIS, M. J. L. **ISO 14000 – Gerenciamento Ambiental: Um Novo Desafio para a sua Competitividade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1995.

RIJNMOND, **Risk Analysis of Six Potentially Hazardous Industrial Objects in the Rijnmond Area**, a Pilot Study. Rijnmond Public Authority, Netherlands, 1982.

RONDINELLI, D.; VASTAG, G. **Panacea, Common Sense, or just a Label? The Value of ISO 14001 Environmental Management Systems**, European Management Journal, Vol. 18, Nº. 5, p. 499-510, 2000.

RUSSO, M. V.; FOUTS, P. A. **A resource-based perspective on corporate environmental performance and profitability**. Academy of Management Journal, v. 40, n. 3, p. 534-559, 1997.

SALVADOR, A.; COSTA, N. **Seção Ambiente: As Lições do Abismo**, Revista VEJA, Abril, ed. 2167, ano 43, no. 22, p. 180-185, 2/06/2010.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do Trabalho Científico**, 23 ed., verificada e atualizada. São Paulo: Cortez Editora, 2007.

STRAUSS, A.; CORBIN, J. **Pesquisa Qualitativa – Técnicas e Procedimentos para o Desenvolvimento de Teoria Fundamentada**, 2 ed., Porto Alegre: Artmed Editora, 2008.

SOUZA, F. M. N. **Relatório Técnico: Análise de Tensões de Bocas de Sino**, SOFTEC, Rio de Janeiro, 2007.

SOUZA, F. M. N.; COUTINHO, M. J. **Análise de Tensões para Avaliação da Integridade Estrutural de um Gancho (Pelikelo) utilizado em Aplicações Offshore**, ANSYS International Conference, Pittsburgh, PA, USA, Maio, 2006.

SOUZA, F. M. N. **Relatório Técnico: Análise Térmica de uma Guia de Tubos**, SOFTEC, Rio de Janeiro, 2007.

SOUZA, F. M. N.; DONATO, G. “**Análise Elasto-plástica de uma Deformação Permanente (Mossa) em um Duto por meio de Simulação Computacional com o Programa ANSYS**”, 6^a. 6^a. Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos - COTEQ, Salvador, BA, 19-21/Ago, 2002.

SOUZA, F. M. N.; HANSEN, A.; JOÃO, L. V. **Sistema Customizado para Análise Estrutural de Lança de Guindaste com Danos nos Membros**, 6^a. Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos - COTEQ, Salvador, BA, 19-21/Ago, 2002.

SOUZA, F. M. N. **Relatório Técnico: Análise de Incêndio em Plataforma *Offshore***, SOFTEC, Rio de Janeiro, 2001.

TACHIZAWA, T. **Gestão Ambiental e Responsabilidade Social Corporativa**. São Paulo: Atlas, 2005.

TINOCO, J. E. P.; KRAEMER, M. E. P. **Contabilidade e Gestão ambiental**. São Paulo: Atlas, 2004.

TOCCHETTO, M. R. L **Implantação de Gestão Ambiental em Grandes Empresas com Atividade Galvânica no Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

USAEC, **An Assessment of Accidental Risk in US Commercial Nuclear Power Plants**. WASH 1400 Report, August, USA, 1975.

U.S. Department of Defense, **MIL-STD-882: System Safety Program Requirements**, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, USA, 1984.

USEPA, **Risk Assessment Guide for Superfund**, Vol. I e II, USA, 1989.

VERSCHOOR, A.; REIJENDERS, L. **The Use of Life Cycle Methods by Seven Major Companies**, Journal of Cleaner Production, 7, p. 375-382, 1999.

VINCOLI, J. W. **Basic Guide to System Safety**, 2 ed., Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2006.

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Eco-Efficiency Indicators: a Tool for Better Decision-Making, USA, 1999.

WESSBERG, N.; MOLARIUS, R.; SEPPA L. A. J. E; KOSKELA, S.; PENNANEN, J. **Environmental Risk Analysis for Accidental Emissions**, *Journal of Chemical Health & Safety*, January/February 2008.

WELLS, R. P.; HOCHMAN, M. N.; HOCHMAN, S. D.; O'CONNELL, P. A. **Measuring Environmental Success**, *Total Quality Environmental Management*, 1(4), 315–327, 1992.

WOLFE, A.; HOWES, H. A. **Measuring Environmental Performance: Theory and Practice at Ontario Hydro**, *Total Quality Environmental Management*, 2(4), 355–366, 1993.

XIE, S.; HAYASE, K. **Corporate Environmental Performance Evaluation: a Measurement Model and a New Concept**, *Business Strategy and the Environment*, 16, 148–168, DOI: 10.1002/bse.493, Wiley InterScience, 2007.

ZIENKIEWICZ, O. C.; CHEUNG, Y. K. **The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics**, London: McGraw-Hill Companies, 1967.

ZOBEL, T.; BURMAN, J. O. **Factors of Importance in Identification and Assessment of Environmental Aspects in an EMS Context: Experience in Swedish Organizations**, *Journal of Cleaner Production*, 11, p. 311-323, 2003.

ZOGBI, F. E. **Análise da Evolução do Sistema de Gestão Ambiental Implementado aos Processos de Manufatura de Pneumáticos da MICHELIN S/A – Unidade CGR/Brasil**. Dissertação (Mestrado), UFRJ, RJ, 2007.

Sites

portal.prefeitura.sp.gov.br/secretarias/meio_ambiente - acesso em 20/05/2010

www.cetesb.sp.gov.br - acesso em 27/09/2010

www.ABNTNBR.org.br/cb38 - acesso em 02/05/2010

www.environmental-performance.org - acesso em 12/08/2010

www.feam.br - acesso em 07/04/2010

www.globalreporting.org - acesso em 30/06/2010

www.igeduca.com.br - acesso em 25/09/2010

www.inctad.org - acesso em 28/11/2009

www.inmetro.gov.br - acesso em 15/07/2010

www.pilkington.com.br - acesso em 03/04/2010

www.unep.org - acesso em 05/08/2010

www.unido.org - acesso em 27/09/2010

www.univali.com.br - acesso em 24/09/2010

www.teses.usp.br - acesso em 29/10/2010

www.ambientebrasil.com.br, Principais Acidentes em Plataformas de Exploração no Mundo desde 1980 - acesso em 06/11/2010