



ANÁLISE DE RISCO NO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE AMÔNIA

Bruna Vasconcellos Eckhardt

Rodolpho Cardoso David Pereira

Projeto de Final de Curso

Orientador

Prof. Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

Agosto de 2014

ANÁLISE DE RISCO NO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE AMÔNIA

Bruna Vasconcellos Eckhardt

Rodolpho Cardoso David Pereira

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Lídia Yokoyama, D.Sc.

Karen Filippo Reiszal Pereira, Eng.

Natalia de Souza de Lacerda, M.Sc.

Orientado por:

Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Agosto de 2014

Eckhardt, Bruna Vasconcellos. Pereira, Rodolpho Cardoso David.

Análise de Risco no Transporte Ferroviário de Amônia / Bruna Vasconcellos Eckhardt.
Rodolpho Cardoso David Pereira. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2014.

vii, 81 p.; il.

(Projeto de Final de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, 2014. Orientador: Carlos André Vaz Junior.

Orientador: Carlos André Vaz Junior

1. Análise de Risco. 2. Transporte Ferroviário. 3. Amônia 4. Projeto de Final de Curso.
(Graduação- UFRJ/EQ). 5. Carlos André Vaz Junior.

Dedicatória

A todos os que de alguma maneira
contribuíram para que estejamos aqui hoje.

Ser normal é a meta dos fracassados.
(Carl Jung)

Eu me lembro que um dia acordei de manhã e havia uma sensação de possibilidade.
Sabe esse sentimento? E eu me lembro de ter pensado: Este é o início da felicidade.
É aqui que ela começa.
(Virginia Woolf)

Ao caráter não estacionário da vida, que desafia a nossa capacidade de controle.
(Ofélia de Queiroz Fernandes Araújo)

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, pela força conferida nesses últimos anos, e principalmente nos últimos meses.

Agradeço em seguida, e não menos, ao Futo (Rodolpho) que trabalhou comigo de forma bastante próxima nos últimos dois semestres. Se Deus me deu força, foi ele o responsável por assegurar que a força chegasse até mim, com suas palavras nem sempre tão doces, mas sempre cem por cento eficazes. Afinal, qualquer agradecimento seria pequeno diante da minha eterna gratidão por todas as broncas mais carregadas das verdades mais cruéis, e ao mesmo tempo do cuidado mais sincero. Obrigada pelos momentos de sobriedade insana.

Agradeço aos meus pais, os grandes heróis da história. Foram muitos choros e muito ranger de dentes. Agradeço a eles principalmente pela eterna paciência inabalável, pela compreensão durante as ausências sem fim, e pela base desde o mais longínquo passado, início de tudo. O caminho foi longo e tortuoso, e agora o sucesso é merecidamente de nós três.

Agradeço aos meus amigos Hívio, Camila, Mariana, Marselle, Rafael, Carina, Guilherme, Daniel, Felipe Nascimento, Gabriel, Sara, Felipe Terra, Evelyn, Vitor e todos os outros não menos importantes, por todos esses anos de convivência. Ora a presença de um se fazia mais evidente, ora de outro. Mas esse quebra-cabeça não pode perder nenhuma peça, afinal, senão perde-se o real sentido de ser.

Agradeço ao meu namorado, Erik. Sua chegada recente não permitiu o acompanhamento desde o início dessa etapa que termina agora, mas os próximos capítulos já possuem título e personagens principais. Obrigada por acreditar. Sempre. Em tudo de bom que está por vir.

Por fim agradeço a esta Instituição e a todos aqueles que estiveram envolvidos em cada pequeno passo dessa jornada. Um sincero obrigado ao nosso orientador Carlos André, pela atenção e fieis correções. E por nos acalmar e dizer que teríamos tempo suficiente.

Bruna Eckhardt

Não poderia iniciar nenhum agradecimento em minha vida sem começar por minha vó, Juracy, grande responsável por eu estar aqui e orgulhoso de quem me torno a cada dia.

Agradeço à Carolina, a maior companheira e que com todo seu amor sempre acalmou meu coração nos momentos mais difíceis.

À minha família e amigos, por compreenderem os momentos em que me ausentei para estudos e trabalhos. Em especial, Ingrid, Natália, Hebert, Thiago, Pedro, Manolo, Lucas, Leo, Felipe, Glauco, Victor, Nádia, Gustavo, Camila, Mariana, Vinicius, Karen, Louise, Mauricio e Jeferson por acreditarem e somarem tanto em minha vida. À Clarice por ter proporcionado o momento de maior emoção no decorrer deste projeto. Aos colaboradores do LNDC pela primeira experiência profissional.

Agradeço à Bruna, porque ela soube me impulsionar nos momentos que mais precisei de ajuda, e estimulou minha mente a desenvolver as melhores teorias sobre a vida.

Ao Carlos André por toda a ajuda nestes últimos momentos, e ao professor Luiz Fernando Lopes, por ter me mostrado o caminho da Engenharia Química. Agradeço também a todos os professores que contribuíram para minha formação.

Por último, aos amigos da White Martins, que estão me acolhendo para iniciar minha jornada profissional e que me fizeram almejar este momento cada dia mais intensamente.
Muito obrigado!

Rodolpho Pereira

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

ANÁLISE DE RISCO NO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE AMÔNIA

Bruna Vasconcellos Eckhardt
Rodolpho Cardoso David Pereira

Agosto, 2014

Orientador: Prof. Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

O transporte ferroviário vem apresentando crescimento e desenvolvimento no Brasil nos últimos anos. A partir da construção de novas ferrovias, é nítida a intenção de melhorar a interligação entre as regiões do país por este modal. Neste cenário, o transporte de amônia surge como uma atividade possível, pois a indústria de fertilizantes tem um papel fundamental no país em que uma das bases da economia é a atividade agropecuária. Devido às características e propriedades da amônia, seu transporte deve ser feito de forma cautelosa. A garantia de que todas as leis relativas ao transporte ferroviário de produtos perigosos sejam seguidas é essencial para a redução de riscos. Os tópicos principais da legislação vigente são apresentados, apontando onde é possível promover melhorias. Para justificar a necessidade de investimentos, bem como de um plano de gerenciamento adequado para este tipo de operação, estudos dos efeitos que podem ser causados por um acidente com vazamento de amônia foram conduzidos. Assim, consegue-se compreender o impacto deste acontecimento para então desenvolver os planos de ação adequados e estruturar um gerenciamento de transporte com foco em segurança.

Índice

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....	1
I.1 – MODAL FERROVIÁRIO.....	1
I.2 – MERCADO INTERNO DE AMÔNIA.....	2
I.3 – MOTIVAÇÃO	3
I.4 – OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	4
CAPÍTULO II – MODAL FERROVIÁRIO BRASILEIRO.....	5
II.1 – HISTÓRICO.....	5
II.2 – MALHA FERROVIÁRIA BRASILEIRA	7
II.3 – SEGURANÇA NOS MODAIS FERROVIÁRIO E RODOVIÁRIO.....	9
CAPÍTULO III – AMÔNIA	16
III.1 – APLICAÇÕES E MERCADO.....	16
III.2 – PROCESSO DE PRODUÇÃO.....	21
III.3 – CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS	25
III.4 – INFORMAÇÕES TOXICOLÓGICAS E PRIMEIROS SOCORROS	27
III.5 – INFORMAÇÕES ECOLÓGICAS.....	31
III.6 – IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS	32
CAPÍTULO IV – REGULAMENTAÇÃO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE PRODUTOS PERIGOSOS	34
IV.1 – INSTRUÇÕES COMPLEMENTARES AO REGULAMENTO DO TRANSPORTE TERRESTRE DE PRODUTOS PERIGOSOS.....	35
IV.2 – CONSIDERAÇÕES DE PROJETO DE VAGÕES-TANQUE	42
CAPÍTULO V – METODOLOGIA.....	47
V.1 – MODELO GAUSSIANO	49
V.2 – ALOHA	53
CAPÍTULO VI – ESTUDO DE CASO	56
VI.1 – PREMISSAS	56
VI.2 – RESULTADOS.....	59
VI.3 – COMPARAÇÃO ENTRE LOCALIDADES	71
CAPÍTULO VII – CONCLUSÃO	73

Capítulo I – Introdução

I.1 – Modal Ferroviário

A história da utilização comercial das primeiras redes ferroviárias no mundo se confunde com a história da Revolução Industrial, no século XIX. Nessa época, a criação de máquinas a vapor, cuja aplicação se estendia desde o setor de produção industrial até o transporte (locomotivas, tratores e navios), foi responsável pela reestruturação do sistema produtivo (Silveira, 2002). Diversas estradas de ferro começaram a ser construídas na Europa, com o intuito de interligar as manufaturas aos mercados consumidores. Além disso, as matérias-primas provenientes de países exportadores de *commodities* precisavam ser escoadas. Mais tarde, países como EUA e Canadá também começaram a adotar as ferrovias como meio de transporte, assim como Argentina, África do Sul e Brasil (CNT, 2013). Hoje em dia, China e Índia, por exemplo, escoam 60% de sua carga através de ferrovias, cujas malhas somam extensões de 120 mil km (Silveira, 2002).

No Brasil, durante o período de 1870 a 1920, houve intenso investimento na construção de novas linhas férreas (Araujo, 2013). A partir da década de 1930, porém, o setor ferroviário passou a enfrentar um período de estagnação, embora a produção industrial aumentasse. O aumento da produção passou a requerer um sistema de transporte mais eficiente, voltado para o abastecimento do mercado interno, que apresentava maior necessidade de consolidação. As consequências imediatas de tal cenário incluíram a opção pelo transporte rodoviário de cargas, como forma de contornar a incompatibilidade das malhas ferroviárias existentes com esse novo mercado consumidor mais difuso (IPEA, 2009).

Com o intuito de viabilizar a eficiência das ferrovias, tiveram início, em 1957, os processos de estatização, com a criação da Rede Ferroviária Federal S/A (RFFSA) (Silveira, 2002). A opção pela estatização foi adotada em diversos países, ao longo da história, devido aos altos custos de implantação e manutenção, principalmente após a disseminação das rodovias (CNT, 2013). No entanto, a partir da década de 1970, a interferência da administração pública no setor ferroviário passou a dar indícios de ineficiência, associada a altos custos. A partir desse momento, passou a se notar um crescente processo de privatizações e concessões primeiramente em diversos países pelo mundo, e, mais tarde (a partir da década de 1990) também no Brasil (CNT, 2013). Em 2006 já eram 29,3 mil km de ferrovias, operadas por 11 concessionárias, totalizando 389,1 milhões de toneladas úteis anuais movimentadas (IPEA, 2009).

Atualmente o modal ferroviário é responsável pelo transporte de cargas como minérios e grãos, principalmente minério de ferro (73%) e o complexo de soja e farelo (7,43%). Além desses, também produtos siderúrgicos, combustíveis derivados do petróleo, álcool, carvão, adubos e fertilizantes, e cimento são cargas comumente transportadas em estradas de ferro (CNT, 2013). Já o transporte ferroviário de produtos de alto valor agregado ainda é pouco expressivo. Algumas empresas, porém, tem investido nessa opção, através da construção de terminais intermodais, aquisição de locomotivas e vagões, e parcerias criadas com clientes (Buri *et al.*, 2006). Os estados que mais utilizam o modal ferroviário são Mato Grosso, Paraná e Minas Gerais (CNT, 2013).

I.2 – Mercado Interno de Amônia

As elevadas taxas de crescimento da população mundial, reveladas nos últimos anos, apontam para a necessidade de aumentos consideráveis na produção de alimentos. Segundo estimativas realizadas pela Organização das Nações Unidas (ONU), a população mundial será de 9,5 bilhões de habitantes, em 2050. Devido a limitações de terras agrícolas, revela-se a crescente demanda pelo uso de fertilizantes. Dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA, 2011) revelam que o consumo de fertilizantes deverá ultrapassar 200 Mt em 2015, com crescimento de 3% a.a. da demanda de fertilizantes, até 2019. Países em desenvolvimento, como o Brasil, apresentariam crescimento de 5% a.a. da demanda.

A elevada produção brasileira de grãos é resultado de uma economia baseada no agronegócio, cujo consumo de fertilizantes representa 6% do consumo mundial. O Brasil apresenta ainda o maior crescimento mundial do consumo de fertilizantes, a uma taxa de 6% a.a nas últimas décadas. O fato de se apresentar como um grande consumidor de fertilizantes revela, por outro lado, uma grande dependência com relação ao mercado externo. Entre os anos de 2006 e 2010 a produção nacional atendia apenas 27% do consumo de fertilizantes nitrogenados (ANDA, 2011).

A formulação dos fertilizantes conhecidos como mistura NPK é uma composição de três elementos básicos: nitrogênio, fósforo e potássio. O nitrogênio é primordial para o aumento da produtividade agrícola, sendo importante componente das proteínas e da clorofila. Os fertilizantes nitrogenados tem sua origem na fabricação de amônia anidra, matéria-prima para a produção de qualquer fertilizante nitrogenado sintético. No Brasil, os principais produtores nacionais de fertilizantes nitrogenados são a Vale Fertilizantes e a Petrobras. Segundo Lima (2007), o investimento no aumento da capacidade produtiva de fertilizantes nitrogenados é dificultado pela volatilidade dos preços, e pela baixa disponibilidade da

principal matéria-prima para a produção de amônia, o gás natural, cujo monopólio é detido pela Petrobras. De fato, a Petrobras é a empresa que mais vem investindo no aumento da produção de amônia e outros fertilizantes nitrogenados, através da aquisição da FAFEN – PR, construção de uma nova planta de ureia em Três Lagoas (MS) e construção de uma planta para produção de sulfato de amônio em Laranjeiras (SE) (Petrobras, 2013).

Devido à importância da amônia no contexto do mercado nacional de fertilizantes nitrogenados, trata-se o potencial transporte do produto por via ferroviária, uma vez que, para estimular o aumento da participação da produção interna no consumo nacional de fertilizantes são necessários investimentos em produção e na infraestrutura logística, incluindo transporte, armazenamento e portos (Fertilizantes Heringer, 2013).

I.3 – Motivação

Segundo informações da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2013), uma das vantagens de se optar por um modal ferroviário para o transporte de cargas diz respeito à capacidade de carregamento associada, tornando esse tipo de transporte interessante em se tratando de cargas de alta tonelage. Outro cenário em que se aconselha optar por esse meio de transporte diz respeito a trajetos de longas distâncias. Além disso, o modal ferroviário é responsável por menores emissões atmosféricas, tornando-o mais ambientalmente correto em comparação ao modal rodoviário, inclusive quando da construção da infraestrutura necessária.

A *Association of American Railroads* (AAR, 2014) destaca a segurança com que cargas perigosas são transportadas em linhas férreas nos EUA. Registros apontam que 99,998% dos carregamentos atingem o destino sem vazamentos ou derramamentos causados por acidentes. As taxas de acidentes envolvendo cargas perigosas apresentaram reduções equivalentes a 91% desde 1980, e 38% desde 2000. A segurança garantida nesse tipo de transporte é resultado de uma regulamentação rígida em vigor nos EUA, tornando o transporte de cargas perigosas em ferrovias uma opção bastante utilizada naquele país.

Apesar dos avanços alcançados por intermédio das concessões e privatizações realizadas no setor ferroviário nos últimos anos no Brasil, incluindo fim da retração da extensão da malha, aumento da tonelage da carga transportada, ganhos de eficiência, e aumento dos níveis de segurança (redução no índice de acidentes equivalente a 81% desde 1997 até 2011), alguns problemas ainda não foram superados (CNT, 2013). Dentre eles, a falta de integração do sistema férreo ainda representa um entrave à utilização das vias. Nesse sentido, a regulamentação do transporte ferroviário de cargas precisa ser avaliada, de modo a garantir a qualidade do serviço, e ao mesmo tempo aumentar o benefício social, garantindo

que não haja uma expansão desordenada do sistema ferroviário (CNT, 2013). A regulamentação do transporte de cargas perigosas também deve ser revisada, de modo a garantir a segurança do serviço e o correto gerenciamento dos riscos. Alguns desses aspectos foram discutidos nesse trabalho.

I.4 – Objetivos e Organização do Trabalho

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar os riscos associados ao transporte ferroviário de carga perigosa, a saber, amônia. Uma revisão do modal ferroviário brasileiro permite justificar a opção por esse tipo de transporte para o escoamento de cargas perigosas. Em seguida, a carga escolhida é apresentada utilizando-se uma abordagem do ponto de vista toxicológico. Informações relevantes são introduzidas de modo a permitir a avaliação proposta subsequentemente, no estudo de caso. Antes de propor o estudo, porém, é necessário que se faça uma revisão da legislação brasileira, em busca de informações que regulamentem esse tipo de transporte. O estudo de caso tem início com uma apresentação teórica das metodologias empregadas, seguida das premissas adotadas. O estudo é, em seguida, conduzido através da proposta de diferentes condições de liberação de amônia através de um rasgo. Os cálculos são realizados por meio de duas abordagens: cálculos efetuados em planilha eletrônica baseados em modelos da literatura, e cálculos empregando a ferramenta de simulação ALOHA (EPA). Por fim, os resultados são comparados e avaliados.

Capítulo II – Modal Ferroviário Brasileiro

II.1 – Histórico

O histórico do modal ferroviário brasileiro apresenta alguns fatos relevantes, descritos de forma bastante completa pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2014), conforme aqui resumido.

Durante a Revolução Industrial ocorrida na Inglaterra no século XIX, houve a centralização da produção nas fábricas. Um aumento da produção promoveu a necessidade do desenvolvimento de novos meios de transporte para movimentar a carga produzida para as regiões de consumo. Apoiado por empresários ingleses, George Stephenson, engenheiro inglês, apresentou sua primeira locomotiva a vapor em 1814, sendo o primeiro a obter sucesso com tal empreendimento. Stephenson também fundou a primeira fábrica de locomotivas, sendo considerado inventor destas e construtor da primeira estrada de ferro, por volta de 1825.

No Brasil, em 1828, o Governo Imperial autorizou a construção e exploração de estradas de todo tipo, como forma de promover a interligação das regiões do país. Em 1835, a legislação concedia privilégios de exploração para empresas que construíssem ferrovias interligando Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais, Bahia e Rio Grande do Sul. O resultado esperado não foi alcançado, pois o projeto não se mostrava economicamente interessante para as empresas.

Em 1852 a legislação passou a oferecer benefícios fiscais para empresas promotoras da construção e exploração de ferrovias em qualquer região do país. Neste ano, o empreendedor Irineu Evangelista de Souza, o Barão de Mauá, recebeu concessão para construir uma ferrovia ligando o Porto de Estrela, na Baía de Guanabara, à Raiz da Serra, em direção a Petrópolis.

Barão de Mauá é considerado o patrono do Ministério dos Transportes devido à sua imensa colaboração para o desenvolvimento dos meios de transporte no Brasil. Em 30 de abril de 1854 D. Pedro II inaugurava a primeira seção da primeira estrada de ferro brasileira, onde circulou a locomotiva conhecida como “Baronesa”. Em homenagem ao barão, atribui-se o nome de Barão de Mauá à estação de onde partiu a primeira composição locomotiva.

Nos anos seguintes algumas ferrovias foram concluídas e inauguradas: Recife-São Francisco, em fevereiro de 1858; Estrada de Ferro D. Pedro II, ligando a Estação da Corte a Queimados, no Rio de Janeiro, em março de 1858, um dos maiores empreendimentos no país até então; Bahia-São Francisco, em junho de 1860; Santos-Jundiáí, em fevereiro de 1867; Companhia Paulista, em agosto de 1872; Dona Tereza Cristina, em setembro de 1884, entre

outras de menor porte, em sua grande maioria nas regiões Sul e Sudeste. Em São Paulo, o desenvolvimento de ferrovias foi estimulado pela necessidade de escoar a produção do café para o Porto de Santos.

Um marco histórico no desenvolvimento de ferrovias no Brasil foi a interligação dos trilhos da Estrada de Ferro São Paulo com os da Estrada de Ferro D. Pedro II, em 1877. Mais tarde, em 1889, a Estrada de Ferro D. Pedro II transformou-se na importante Estrada de Ferro Central do Brasil. Outras construções de grande porte marcadas na história ferroviária brasileira foram a Estrada de Ferro Madeira-Mamoré, ligando o Brasil a Bolívia, com o objetivo de escoar o látex produzido no norte boliviano, e a Estrada de Ferro Noroeste do Brasil, ligando Bauru, São Paulo, a Corumbá, Mato Grosso do Sul (fronteira com a Bolívia).

No nordeste, a interligação das ferrovias Recife-São Francisco e Bahia-São Francisco permitia o escoamento da produção de cana e de produtos importados. No Rio Grande do Sul, em 1874, foi inaugurada a linha que ligava Porto Alegre a São Leopoldo.

Em 1884 existiam 6.116 km de extensão de linhas férreas sendo exploradas, e 1.650 km em construção. No final de 1888 já eram 9.200 km em exploração e 9.000 km em construção ou estudo, mostrando o grande crescimento deste tipo de empreendimento à época. Mas a forma adotada pelo Governo Imperial para estimular a construção das ferrovias também foi responsável pelo surgimento de problemas que se estendem até os dias de hoje. Dentre os problemas pode-se citar a diversidade de bitolas¹, que dificulta a integração entre diferentes ferrovias (uma locomotiva é projetada para circular em um tipo de bitola; se mudar a bitola, deve-se mudar a composição e transladar a carga, gerando atrasos no transporte); traçados extensos e sinuosos; estradas de ferro sem interligação, isoladas e dispersas para atender somente às necessidades de um local ou região.

Com o passar dos anos surgiram inovações tecnológicas que foram promovendo mudanças na estrutura do transporte ferroviário. Em 1930 a tração elétrica, e em 1939 a locomotiva diesel elétrica substituíram a tração a vapor.

A Estrada de Ferro Vitória-Minas foi incorporada, em 1942, pela recém-criada Companhia Vale do Rio Doce. Foi necessária a modernização da ferrovia com o intuito de suportar o escoamento da exploração do minério de ferro de Minas Gerais para o Porto de Vitória, no Espírito Santo.

No final da década de 1930 o Governo Vargas promoveu a encampação (retomada da exploração pelo Poder Concedente, durante o período da concessão) de diversas empresas,

¹ Bitola é definida como a distância entre os trilhos de uma ferrovia. No Brasil há 3 tipos de bitola: larga (1,60 m), métrica (1,00 m) e mista (mais de uma bitola por linha) (Ministério dos Transportes, 2014).

como parte de seu plano político, incorporando várias estradas de ferro ao patrimônio da União. A Inspeção Federal de Estradas tornou-se, a partir de então, o órgão responsável pela administração das estradas brasileiras. Posteriormente a IFE deu origem ao Departamento Nacional de Estrada de Rodagem (DNER) e ao Departamento Nacional de Estradas de Ferro (DNEF). Em 1974 o DNEF foi extinto e suas atividades foram repassadas à Secretaria Geral do Ministério dos Transportes e para a Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA).

A RFFSA foi criada em 1957, com o objetivo de “administrar, explorar, conservar, reequipar, ampliar e melhorar o tráfego” (DNIT, 2014) nos 37.000 km das 18 estradas de ferro pertencentes ao Governo Federal à época. As ferrovias federais estavam distribuídas por todo o Brasil, com exceção da região Norte. Em 1969, a RFFSA agrupou suas ferrovias em sistemas regionais com sedes em Recife, Rio de Janeiro, São Paulo e Porto Alegre, e em 1976 foram criadas as Superintendências Regionais, que respondiam administrativamente à sede localizada no Rio de Janeiro.

De 1980 a 1992, com a redução dos investimentos no setor, a RFFSA já não conseguia suportar as estruturas que administrava. A degradação da infra² e superestrutura³ ferroviária e a necessidade de postergação de manutenções essenciais foram responsáveis por desequilibrar a operação, promovendo a perda de mercado para o modal rodoviário. A RFFSA foi afastada da administração dos transportes urbanos e o Governo Federal iniciou um processo de concessão de serviços públicos de transporte à iniciativa privada. A RFFSA foi incluída no Programa Nacional de Desestatização (PND) e o processo ocorreu conforme especificado pela Lei 8.987/95 (Lei das Concessões), estabelecendo os direitos e obrigações de cada uma das partes envolvidas no processo, bem como medidas de caráter econômico e financeiro e direitos dos usuários. A Tabela 2.1 mostra a cronologia dos eventos. O leilão da Malha Paulista, antiga FEPASA, marca o encerramento do processo de desestatização.

A exploração da Estrada de Ferro Vitória-Minas e da Estrada de Ferro de Carajás foi outorgada à Companhia Vale do Rio Doce em 1997, durante seu processo de privatização. Em 1999, o Governo Federal “dissolve, liquida e extingue a RFFSA” (DNIT, 2014).

II.2 – Malha Ferroviária Brasileira

A apresentação da evolução do transporte ferroviário descrita a seguir tem como base um relatório elaborado em 2014 pela Agência Nacional dos Transportes Terrestres (ANTT), entidade ligada ao Ministério dos Transportes brasileiro. O relatório tem como objetivo

² Infraestrutura é a camada inferior de terraplanagem, e todas as obras realizadas abaixo do nível determinado por essa camada (Klincevicus, 2011).

³ Superestrutura é composta por trilhos, fixações, dormentes, lastro e sublastro (Klincevicus, 2011).

descrever “a evolução do desempenho operacional alcançado pelas empresas concessionárias de serviços públicos de transporte ferroviário”.

Tabela 2.1 – Cronologia dos processos de concessão das malhas da RFFSA.
Fonte: DNIT (2014)

Malhas Regionais	Data do Leilão	Concessionárias	Início da Operação	Extensão (km)
Oeste	05/03/1996	Ferrovias Novoeste S.A.	01/07/1996	1.621
Centro-Leste	14/06/1996	Ferrovias Centro-Atlântica S.A.	01/09/1996	7.080
Sudeste	20/09/1996	MRS Logística S.A.	01/12/1996	1.674
Tereza Cristina	22/11/1996	Ferrovias Tereza Cristina S.A.	01/02/1997	164
Sul	13/12/1996	Ferrovias Sul-Atlântico S.A (atualmente ALL-América Latina Logística S.A.)	01/03/1997	6.586
Nordeste	18/07/1997	Cia. Ferroviária do Nordeste	01/01/1998	4.534
Paulista	10/11/1998	Ferrovias Bandeirantes S.A.	01/01/1999	4.236
Total				25.895

Em 5 de junho de 2001 a Lei nº 10.233 estipula a criação da ANTT, implantada oficialmente pela edição do Decreto nº 4.130 em 13 de fevereiro de 2002. A ANTT passa então a ser responsável por regular e fiscalizar os transportes terrestres em território brasileiro. Em relação ao modal ferroviário a ANTT fiscaliza 12 concessões ferroviárias, sendo 7 oriundas da extinta RFFSA. Tem como finalidade administrar as concessões em termos econômicos e financeiros, zelar pelo patrimônio público arrendado e acompanhar a prestação do serviço público de transporte de cargas pelas concessionárias. Aponta ainda como objetivos o aumento da produção do transporte de cargas, a eliminação de restrições operacionais, aumento da segurança, integração entre malhas e demais modais, e ampliação do mercado de trabalho e da indústria ferroviária. Para alcançá-los a ANTT estabelece marcos regulatórios, normas e procedimentos de fiscalização e desempenho, e define metas de produção e segurança, além de outras ações institucionais.

Desde as concessões originais algumas concessionárias sofreram mudanças na denominação, explicitadas na Tabela 2.2, encontrada no relatório de Evolução do Transporte Ferroviário em 2013, emitido em 17 de fevereiro de 2014. Já a Tabela 2.3, também extraída do relatório, indica a extensão das malhas, diferenciando também pelo tipo de bitola.

Os principais produtos transportados atualmente são: minério de ferro; grãos; produtos siderúrgicos; cimento e cal; adubos e fertilizantes; derivados de petróleo; carvão mineral e clínquer; calcário; e contêineres.

É importante frisar que nem todas as concessionárias estão habituadas ao transporte de todos estes tipos de produto, portanto podem não contemplar, por exemplo, a infraestrutura necessária para transporte de cargas perigosas. A FTC, por exemplo, transporta essencialmente carvão mineral. Por outro lado, as concessionárias ALLMO, ALLMS, EFC, TLSA, ALLMP, ALLMN e FNS já contemplam transporte de algumas cargas que podem oferecer maior risco, tais como: óleo diesel, álcool e gasolina.

Como demonstrado na Figura 2.1, de 2006 até 2013 o crescimento da quantidade de carga transportada (medida em milhares de tonelada útil, TU) por ferrovias foi de 19%, tendo uma baixa em 2009, mas retomando o crescimento nos anos seguintes. A Figura 2.1 revela ainda dados sobre a “produção de transporte”, indicador que mede a quantidade em milhões de toneladas transportadas x quilômetro útil (TKU).

Em 2013 os investimentos no transporte ferroviário alcançaram a marca de aproximadamente 5 bilhões de reais, o maior desde 2006, enquanto que a mão de obra teve uma pequena redução de 2012 para 2013. A Figura 2.2 indica a concentração dos investimentos em determinadas áreas.

O mapa ferroviário brasileiro atual (Figura 2.3) contempla as ferrovias que já se encontram em operação, bem como alguns trechos ainda em construção.

II.3 – Segurança nos Modais Ferroviário e Rodoviário

Oggero *et al.* (2005) realizaram levantamento englobando informações de 1932 acidentes envolvendo o transporte de materiais perigosos em rodovias e ferrovias, desde o início do século 20 até julho de 2004, em diversas localidades do planeta. O levantamento permitiu observar que países mais industrializados foram responsáveis por um maior número de acidentes. Entretanto, mesmo quando se compara o número de acidentes registrados entre países industrializados, é possível perceber que alguns apresentam maior porcentagem de acidentes do que outros, podendo indicar falta de confiabilidade no registro e contabilização de acidentes desse tipo, por parte de alguns países. Além disso, alguns registros não contemplam aspectos relevantes do acidente, como causa ou número de vítimas, por exemplo, o que impossibilita que se considere o incidente para fins estatísticos. Quando se comparam os registros ao longo do tempo, pode-se observar um aumento no número de acidentes, o que pode ser explicado por um aumento da capacidade no transporte de cargas, bem como um

maior acesso a informações e melhor registro dos casos. Os autores constataram ainda, que 37% dos acidentes ocorreram em ferrovias e 63% em rodovias.

Tabela 2.2 – Concessionárias Administradas pela ANTT
Fonte: ANTT (2014)

Iniciais	Atuais
NOVOESTE - Ferrovia Novoeste S. A.	ALLMO - América Latina Logística Malha Oeste S.A
FCA - Ferrovia Centro - Atlântica S.A. MRS Logística S.A.	FCA - Ferrovia Centro - Atlântica S.A. MRS Logística S.A.
FTC - Ferrovia Tereza Cristina S.A.	FTC - Ferrovia Tereza Cristina S.A.
ALL - América Logística do Brasil S.A.	ALLMS - América Latina Logística Malha Sul S.A.
FERROESTE - Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A	FERROESTE - Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A
EFVM - Estrada de Ferro Vitória a Minas	EFVM - Estrada de Ferro Vitória a Minas
EFC - Estrada de Ferro Carajás	EFC - Estrada de Ferro Carajás
CFN - Companhia Ferroviária do Nordeste S.A	TLSA - Transnordestina Logística S.A.
FERROBAN - Ferrovia Bandeirantes S.A.	ALLMP - América Latina Logística Malha Paulista S.A.
FERRONORTE - Ferrovias Norte Brasil S.A	ALLMN - América Latina Logística Malha Norte S.A.
FNS - Ferrovia Norte Sul S.A.	FNS - Ferrovia Norte Sul S.A.

No Brasil, a Resolução nº 1.431, de 26 de abril de 2006, define alguns procedimentos para a comunicação de acidentes ferroviários à ANTT pelas concessionárias responsáveis pela administração de ferrovias em território nacional. Esta Resolução fornece ainda diretrizes acerca dos critérios que devem ser considerados e avaliados para o registro adequado de acidentes.

De acordo com o Art. 2º, considera-se acidente ferroviário “a ocorrência que, com a participação direta de veículo ferroviário, provocar danos a este, a pessoas, a outros veículos, a instalações, a obras-de-arte, à via permanente⁴, ao meio ambiente, e, desde que ocorra paralisação do tráfego, a animais”. Segundo definido, “não será considerado acidente ferroviário a ocorrência que envolva colisão de veículo ferroviário com cadáver exposto na via férrea”. Os acidentes ferroviários devem ser classificados de acordo com sua natureza e causa (Art. 3º), como segue: “quanto à natureza: atropelamento, colisão, abalroamento, explosão, incêndio e descarrilamento (sem tombamento ou com tombamento

⁴ Via permanente é o conjunto de camadas e elementos necessários à passagem de trens. Os elementos que compõem uma via permanente podem ser classificados em dois grupos: infra e superestrutura (Klincevicus, 2011).

total ou parcial); e quanto à causa: falha humana, via permanente, material rodante⁵, sistema de telecomunicação, sinalização e energia, atos de vandalismo e casos fortuitos ou de força maior”. Por fim, outra definição envolve o conceito de acidente ferroviário grave, de acordo com o Art. 4º da Resolução:

Tabela 2.3 – Extensão da Malha Ferroviária Brasileira, em km (2013)

Fonte: ANTT (2014)

Operadoras	Origem	Bitola			Total
		1,60	1,00	Mista	
ALLMN	-	754	-	-	754
ALLMO	RFFSA	-	1.945	-	1.945
ALLMP	RFFSA	1.463	243	283	1.989
ALLMS	RFFSA	-	7.254	11	7.265
EFC	-	892	-	-	892
FERROESTE	-	-	248	-	248
EFVM	-	-	905	-	905
FCA	RFFSA	-	7.271	156	7.427
FNS	-	720	-	-	720
FTC	RFFSA	-	164	-	164
MRS	RFFSA	1.632	-	42	1674
TLSA	RFFSA	-	4.189	18	4.207
Total	-	5.461	22.219	510	29.190

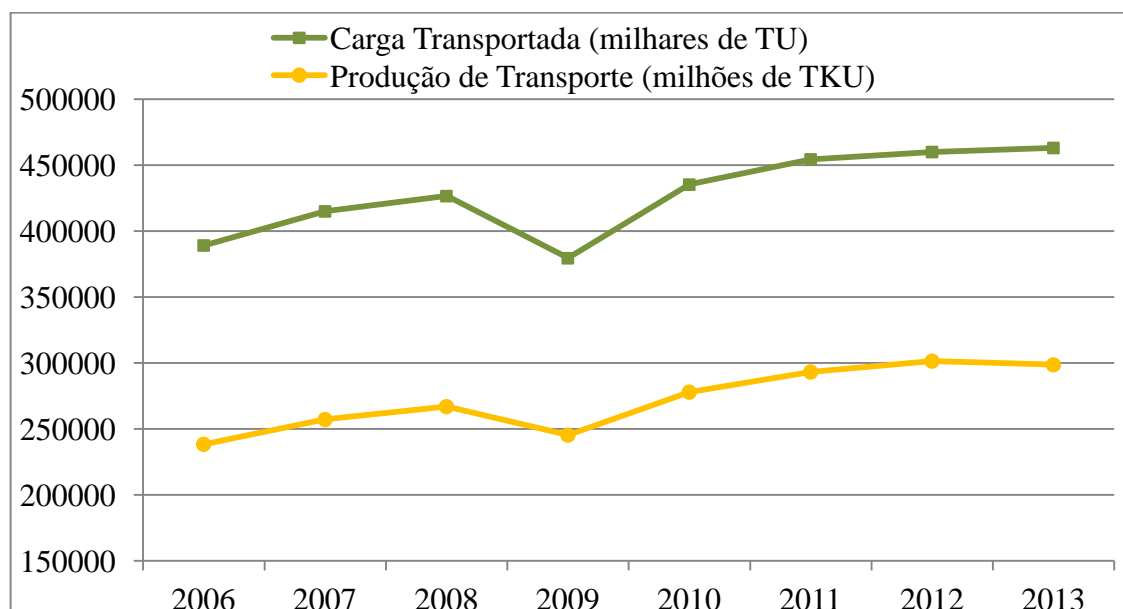


Figura 2.1 – Carga transportada e Produção de transporte de 2006 a 2013.

Fonte: Adaptado de ANTT

⁵ Material rodante é o conjunto de componentes ligados entre si, que se movimentam sobre uma linha ou trilho, para transportar pessoas ou cargas, segundo uma rota previamente planejada (Santos, 2007).

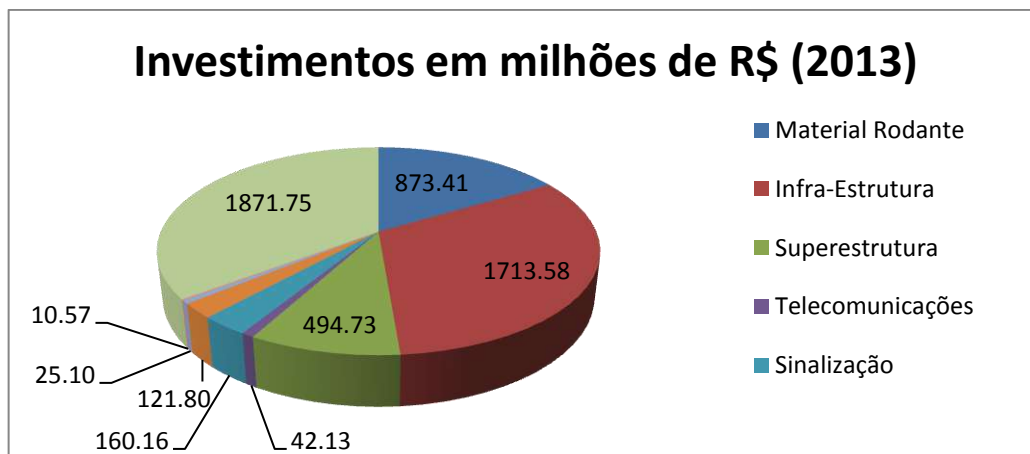


Figura 2.2 – Investimentos em 2013, divididos nas áreas de aplicação.
Fonte: Adaptado de ANTT

“Considera-se acidente ferroviário grave aquele que envolve o transporte ferroviário de passageiros, de produtos perigosos, conforme Decreto nº 98.973/90 e Resolução ANTT nº 420/04, ou acarrete uma das seguintes consequências:

I - morte ou lesão corporal grave que cause incapacidade temporária ou permanente à ocupação habitual de qualquer pessoa.

II - interrupção do tráfego ferroviário:

a) por mais de 2 (duas) horas em linhas compartilhadas com o serviço de transporte ferroviário urbano de passageiros;

b) por mais de 6 (seis) horas no serviço de transporte ferroviário de passageiros de longo percurso ou turístico;

c) por mais de 24 (vinte e quatro) horas em linhas exclusivas para o transporte de cargas;

III - prejuízo igual ou superior a R\$ 1.000.000,00 (um milhão de reais);

IV - dano ambiental; e

V - outros danos de impacto à população atingida.

§ 1º O valor de que trata o inciso III deste artigo sofrerá reajuste, a ser aprovado pela ANTT, pela variação do IGP-DI, da Fundação Getúlio Vargas e, no caso de sua extinção, pelo índice oficial que o Governo Federal vier a indicar.

§ 2º Para cálculo dos prejuízos causados por acidentes ferroviários, para efeito desta Resolução, deverão ser computados, apenas, os custos diretos resultantes do acidente, tais como os de pessoal de socorro, da recuperação ou substituição de material rodante acidentado, da recuperação da via permanente, mercadorias

avariadas ou perdidas, baldeação e remoção de passageiros e outros de caráter emergencial diretamente ligados à ocorrência.”

O Artigo 6º menciona a obrigatoriedade da atribuição de causa e responsabilidade, que devem ser apuradas detalhadamente, por parte da concessionária, não sendo permitida sua classificação como indefinida ou indeterminada.



Figura 2.3 – Mapa Ferroviário Brasileiro.
Fonte: ANTT

A Tabela 2.4 é uma compilação dos dados informados no relatório anual emitido pela ANTT. Os dados são referentes aos acidentes ocorridos no transporte de trens de carga entre os anos de 2004 e 2008. O dado “Vítimas por Acidente” é uma média, tendo sido obtido através da divisão do número de vítimas total pelo número de acidentes ocorridos no ano considerado, não constando no relatório original.

É provável que alguns dos acidentes que afetaram o meio ambiente e a comunidade envolvessem cargas perigosas.

Para fins de comparação, a Tabela 2.5 indica os dados de acidentes ocorridos entre 2004 e 2008 em relação ao transporte rodoviário, dados estes disponibilizados no mesmo relatório.

Tabela 2.4 – Acidentes com Trens de Carga (2004-2008).

Fonte: ANTT (2009)

Causa	2004	2005	2006	2007	2008
Falha Humana	178	205	131	144	123
Via Permanente	933	1,107	695	416	393
Material Rodante	424	407	264	212	186
Sinalização, Telecomunicação ou Eletrotécnica	2	1	19	74	2
Outras	674	508	404	227	329
Total	2,211	2,228	1,513	1,073	1,033
Gravidade	2004	2005	2006	2007	2008
Acidentes Graves	264	299	277	297	259
Acidentes com Vítimas	190	195	196	191	166
Com Danos ao Meio Ambiente	11	3	2	1	1
Com Danos à Comunidade	6	6	0	0	0
Vítimas	2004	2005	2006	2007	2008
Total Anual	228	286	228	191	165
Vítimas por Acidente	0,10	0,13	0,15	0,18	0,16

Apesar de não tratar especificamente do transporte de cargas, os dados de acidentes relativos ao transporte rodoviário como um todo mostram um valor total muito elevado. Este comportamento é esperado, pois no modal rodoviário existem mais variáveis que podem afetar a segurança. Apenas envolvendo veículos de cargas são registrados mais de 45 mil acidentes ao ano.

Os dados apontam o transporte ferroviário de cargas como uma opção segura, tornando-o interessante para transladar cargas que oferecem alto potencial de risco se liberadas no caso de um acidente. No que diz respeito à escala do material transportado, observa-se a imposição de restrições governamentais, técnicas e econômicas, do ponto de vista energético e de infraestrutura do modal escolhido. Quanto maior a quantidade transportada, maiores serão os desafios e limitações, uma vez que veículos rodoviários devem operar abaixo de um determinado limite de peso por motivos de segurança, e de preservação das boas condições das estradas. Logo, se a quantidade de carga perigosa transportada for grande e a distância for média ou grande, o transporte ferroviário pode ser priorizado, uma

vez que sua eficiência energética é elevada. Contudo esta opção esbarra na limitação da malha ferroviária brasileira, podendo servir como incentivo para promover o investimento na construção de novas ferrovias. Uma medida paliativa muitas vezes avaliada é reduzir as rotas rodoviárias, promovendo o transporte intermodal. O grande problema desta solução é a necessidade de carga e descarga duplicada, um fator que encarece a opção, pode provocar uma maior perda de produto e elevar o risco total da operação. Terminais de transferência de cargas perigosas apresentam-se como pontos críticos do sistema em termos de segurança de processos.

Tabela 2.5 – Acidentes em Rodovias Federais Policiadas (2004-2008).
Fonte: ANTT (2009)

Região	2004	2005	2006	2007	2008
Norte	4,632	4,964	5,841	7,054	7,415
Nordeste	21,381	21,945	23,817	26,851	28,737
Sudeste	44,564	43,880	44,501	49,867	53,995
Sul	30,925	29,916	28,562	32,832	35,501
Centro-Oeste	10,955	8,541	10,067	11,697	13,154
Total	112,457	109,246	112,788	128,301	138,802
Gravidade	2004	2005	2006	2007	2008
Mortos	6,119	6,392	6,168	7,070	6,858
Feridos	66,117	69,407	69,624	81,719	83,227
Ilesos	385,173	354,512	421,220	454,728	812,673
Total de Envolvidos	457,409	430,311	497,012	543,517	902,758
Veículos	2004	2005	2006	2007	2008
Passeio	120,080	111,393	120,671	146,334	166,367
Coletivo	8,005	7,960	7,968	8,852	9,678
Cargas	50,498	46,871	46,511	55,968	60,551
Outros	8,876	18,519	11,169	8,190	3,143
Total	187,459	184,743	186,319	219,344	239,739

Capítulo III – Amônia

III.1 – Aplicações e Mercado

Amônia é um produto de grande importância para a indústria química, representando a segunda *commodity* em quantidade produzida no mundo (100 milhões de toneladas transportadas por ano) (Cheddie, 2012), cuja aplicação principal se dá na indústria de fertilizantes. Cerca de 75% da amônia produzida industrialmente é empregada como fertilizante nitrogenado, seja diretamente, na forma de amônia anidra, ou processada para a obtenção de ureia, nitrato de amônio, fosfato de mono-amônio, fosfato de diamônio (EPA, 1995), sulfato de amônio, ou amônia em solução (Figura 3.1). A amônia pode ser empregada ainda em outros setores da indústria química, como para a produção de plásticos, fibras sintéticas, resinas, explosivos, e ácido nítrico (EPA, 2009). Encontra também aplicação na indústria farmacêutica e de cosméticos; indústria de mineração; no tratamento de resíduos industriais, para o controle de pH, e regeneração de resinas de troca aniônica; em sistemas de refrigeração industriais, como fluido refrigerante; na indústria de borracha; indústria de polpa e papel; alimentícia e de bebidas.

Outra importante aplicação diz respeito ao emprego da amônia como fonte de energia. A referida aplicação vem sendo considerada há mais de 70 anos (Elucidare, 2008), e inclui duas vertentes: emprego direto como combustível (em substituição à gasolina), ou como carreador de H₂, fazendo uso das propriedades químicas favoráveis do produto. O contexto do uso de amônia para armazenamento de hidrogênio surge a partir da chamada “economia do hidrogênio”, e da tecnologia de células a combustível.

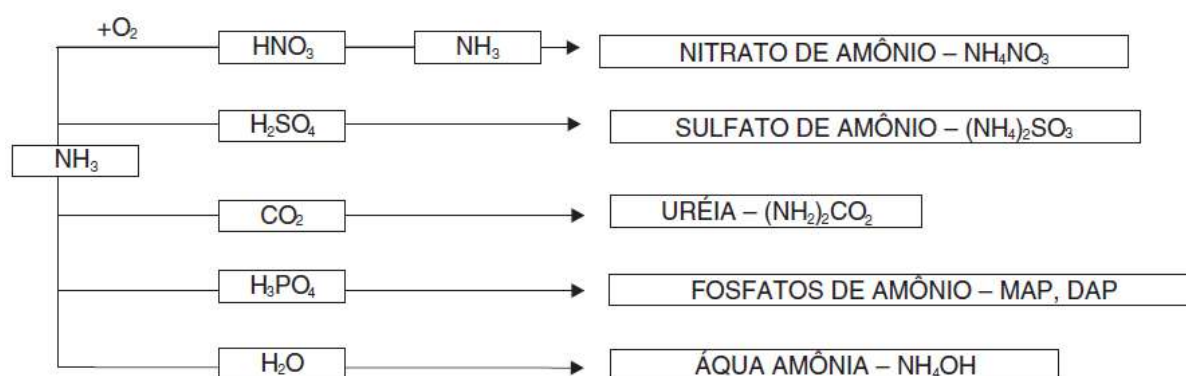


Figura 3.1. Rotas de produção de fertilizantes nitrogenados

Fonte: Dias e Fernandes (2006)

Segundo o levantamento realizado pela U.S. Geological Survey (2014), os Estados Unidos são um dos líderes mundiais na produção e consumo de amônia. Cerca de 60% da capacidade de produção americana está concentrada em Louisiana, Oklahoma e Texas, por conta da proximidade com as grandes reservas de gás natural, matéria-prima dominante naquele país. Cerca de 84% da produção americana encontra aplicação na indústria de fertilizantes. Devido à baixa dos preços de gás natural no país, é esperado um aumento da capacidade de produção anual de amônia da ordem de 3,1 milhões de toneladas ao longo dos próximos 4 anos.

O relatório da U.S. Geological Survey (2014) menciona ainda planos para a implantação de unidades de produção de amônia em países como: Azerbaijão, Bolívia, Indonésia, Nigéria, Rússia, e Arábia Saudita. A Tabela 3.1 revela dados de produção de amônia em diversos países nos anos de 2012 e 2013. Dados de produção no Brasil não são abordados nesse relatório.

Do mesmo modo que nos Estados Unidos, no Brasil a produção de amônia está diretamente relacionada à produção de fertilizantes, sendo ambas tratadas conjuntamente. A indústria de fertilizantes se baseia na produção de três principais tipos de fertilizantes: nitrogenados, fosfatados e potássicos, constituindo a chamada mistura NPK. O Brasil possui atualmente quatro unidades de produção de fertilizantes nitrogenados, além de alguns projetos para implantação de novas unidades (Tabela 3.2). De acordo com o CIESP (Centro das Indústrias do Estado de São Paulo), o consumo de fertilizantes no Brasil entre 2003 e 2012 passou de 22,8 milhões de toneladas para 29,6 milhões de toneladas, totalizando um crescimento de 30%. Estima-se que entre 2010 e 2020 a produção de alimentos crescerá 40%, reforçando a necessidade de ampliação da produção de fertilizantes. Atualmente o Brasil importa cerca de 70% do fertilizante consumido.

O país ocupa hoje o posto de maior importador mundial de fertilizantes. Com o aumento do investimento em novas unidades produtoras de insumos para a indústria de fertilizantes haverá uma conseqüente redução da dependência com relação à importação de nitrogênio, fósforo e potássio. David Roquetti Filho (diretor executivo da Associação Nacional para Difusão de Adubos - ANDA) cita o exemplo do nitrogênio, dizendo que, com a implantação das novas unidades de amônia e ureia previstas, haverá uma redução de 17% na demanda por importações. Segundo Roquetti Filho, porém, se as expansões não continuarem, a dependência voltará a crescer, resultado de um agronegócio em constante crescimento. Com

a perspectiva de crescimentos recordes de produção nas lavouras de soja e milho, a tendência é que a demanda continue alta.

Tabela 3.1. Produção Mundial de Amônia
Fonte: U.S. Geological Survey (2014)

País	2012 (10 ³ toneladas de nitrogênio)	2013 (10 ³ toneladas de nitrogênio)
Estados Unidos	8.730	8.700
Austrália	1.250	1.300
Bangladesh	1.300	1.300
Canadá	3.940	3.900
China	45.200	46.000
Egito	3.000	3.000
França	3.500	3.500
Alemanha	2.820	2.800
Índia	12.000	12.000
Indonésia	5.100	5.100
Irã	2.500	2.500
Japão	1.200	1.200
Holanda	1.800	1.800
Omã	1.700	1.700
Paquistão	2.500	2.500
Polônia	1.900	1.900
Qatar	2.100	2.100
Rússia	10.400	10.000
Arábia Saudita	2.600	2.600
Trindade e Tobago	5.250	5.300
Ucrânia	4.200	4.200
Reino Unido	1.100	1.100
Usbequistão	1.300	1.300
Venezuela	1.200	1.200
Outros Países	13.000	13.000
Total Mundial	140.000	140.000

O escoamento da produção de fertilizantes para regiões consumidoras (Tabela 3.3) leva em consideração os estados com maior representatividade na produção nacional das culturas responsáveis por elevado consumo de fertilizante, como soja, milho, café, algodão e cana-de-açúcar (INTL FCStone, 2013). Dentre os estados que apresentam maior

representatividade na produção dessas culturas encontram-se: Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Santa Catarina, Mato Grosso do Sul, Bahia, Goiás, Espírito Santo e Alagoas.

Tabela 3.2. Produção Nacional de Fertilizantes

Fonte: www.petrobras.com.br; www.valefertilizantes.com; www.ciesp.com.br; www.complastec.com.br

Em operação			
Localização	Matéria-prima	Produto	Capacidade (10 ³ t/ano)
Laranjeiras/SE (FAFEN/SE)	Gás natural	Ureia	657
		Amônia	456
Camaçari/BA (FAFEN/BA)	Gás natural	Ureia	474
		Amônia	474
		Amônia	209
Cubatão/SP (Fosfértil)	Resíduo asfáltico	Ácido Nítrico	299
		Nitrato de amônio (solução)	406,6
		Nitrato de amônio (perolado)	406,6
Araucária/PR (FAFEN/PR)	Gás de refinaria	Ureia	700
		Amônia	475
Projetos			
Localização	Produto	Capacidade (10 ³ t/ano)	Entrada em operação
Três Lagoas/MS	Ureia	1.200	Setembro/2014
	Amônia	760	
Laranjeiras/SE	Sulfato de amônio	303	2014
Uberaba/MG	Amônia	519	2017
Linhares/ES	-	-	Fase de estudo

Percebe-se, a partir do exposto, a real necessidade de escoamento da produção das principais regiões produtoras de fertilizantes para as diversas regiões consumidoras. As novas unidades industriais produtoras, que se encontram em fase de construção e que serão implantadas nos próximos anos, devem considerar o transporte de seus produtos para as áreas de consumo. Dias e Fernandes (2006) atentam ainda para a necessidade de se considerar não somente o escoamento do produto final, mas também dificuldades associadas ao transporte através de longas distâncias de matérias-primas (caso de rochas fosfáticas, por exemplo), além do transporte de produtos intermediários destinados a outras indústrias que atuam na ponta (caso da amônia, ácido sulfúrico e ácido nítrico). Nesse contexto, e dada a constante expansão do setor agrícola no Brasil, ressalta-se a importância da discussão acerca do transporte de produtos perigosos.

Tabela 3.3. Produção Nacional das Principais Culturas Consumidoras de Fertilizantes
 Fonte: www.cnpso.embrapa.br; Banco Pine (2014); Conab (Junho/2013); Conab (Setembro/2013);
 Conab (Dezembro/2013)

Soja		
Estado	Safra	Produção (10 ⁶ toneladas)
Mato Grosso	2012/2013	23,5
Paraná	2012/2013	15,9
Rio Grande do Sul	2012/2013	12,5
Milho de primeira geração ⁶		
Paraná	2012/2013	7,1
Minas Gerais	2012/2013	6,8
Rio Grande do Sul	2012/2013	5,3
São Paulo	2012/2013	3,4
Santa Catarina	2012/2013	3,4
Milho de segunda geração ⁷		
Mato Grosso	2012/2013	17,8
Paraná	2012/2013	10,8
Mato Grosso do Sul	2012/2013	6,4
Algodão em caroço		
Mato Grosso	2012/2013	1,8
Bahia	2012/2013	0,9
Cana-de-açúcar		
São Paulo	2013/2014	371,2
Goiás	2013/2014	62,6
Minas Gerais	2013/2014	60,3
Mato Grosso do Sul	2013/2014	42,7
Paraná	2013/2014	42,5
Alagoas	2013/2014	24,4
Café – beneficiado (arábica e robusta)		
Estado	Safra	Produção (10 ³ sacas beneficiadas)
Minas Gerais	2013	26,1
Espírito Santo	2013	11,7
São Paulo	2013	3,8

⁶ Modificação genética.

⁷ Modificação genética, que tem esse nome devido à presença de dois genes alterados, conferindo resistência ao herbicida glifosato de amônio e aos ataques da lagarta-do-cartucho (www.midianews.com.br).

III.2 – Processo de Produção

Em 1908, Fritz Haber depositou seu pedido de patente para “Síntese de Amônia a Partir de Seus Elementos”, sendo mais tarde, em 1918, laureado com o prêmio Nobel em química (Erisman *et al.*, 2008). O processo desenvolvido por Carl Bosch em decorrência da técnica elaborada por Haber, conhecido como processo Haber-Bosch, permitiu a produção de amônia em escala industrial pela primeira vez, sendo a BASF a responsável pela implantação da primeira unidade, na Alemanha.

O processo convencional (Figura 3.2) envolve as seguintes etapas principais (EFMA, 2000, e Ullmann, 2006): (i) produção de gás de síntese, englobando pré-tratamento da matéria-prima e geração do gás, conversão de monóxido de carbono, e purificação do gás; (ii) compressão; e (iii) síntese de amônia e gerenciamento do gás de purga.

Para a obtenção de amônia, deve ser preparada uma mistura pura de nitrogênio e hidrogênio na proporção estequiométrica de 1:3. As matérias-primas empregadas para tal são: água, ar, e um meio redutor contendo carbono (gás natural, nafta, carvão, ou outros produtos de petróleo).

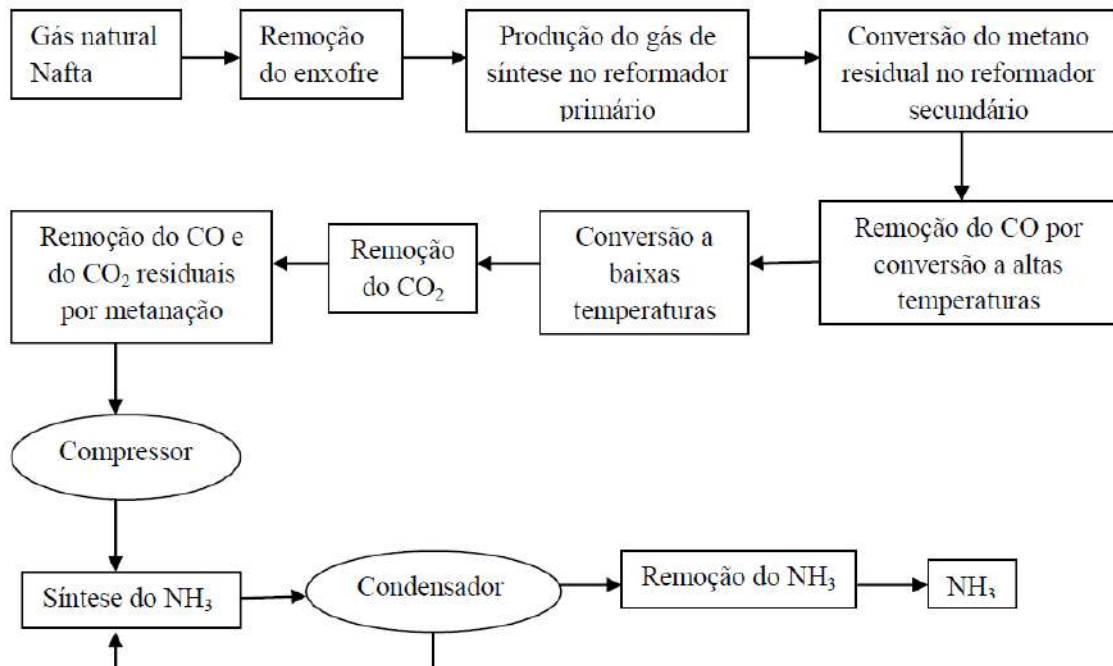


Figura 3.2. Diagrama de blocos para a síntese de amônia a partir de reforma a vapor

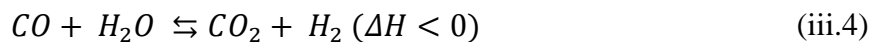
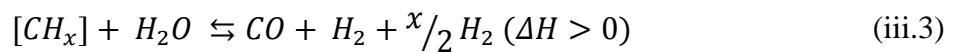
Fonte: Pereira (2009)

A maioria dos catalisadores empregados na etapa de reforma a vapor é sensível à presença de compostos de enxofre. Por isso, uma etapa de purificação da matéria-prima

envolve as reações iii.1 e iii.2, que geralmente ocorrem na seção de convecção do reformador primário, empregando catalisador a base de cobalto, molibdênio e óxido de zinco.



Quando o processo de produção de gás de síntese parte de gás natural (matéria-prima mais comum) ou nafta, tem-se as reações iii.3 e iii.4, em processo conhecido como reforma a vapor catalítica. $[CH_x]$ representa metano, caso a matéria-prima seja gás natural; ou hidrocarboneto até C_{11} , caso a matéria-prima seja nafta. As reações ocorrem no reformador primário, a uma temperatura de 780 a 830°C, empregando catalisador a base de níquel.



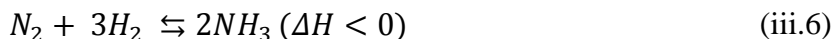
Após o reformador primário, emprega-se uma segunda etapa de reforma, no chamado reformador secundário, para garantir que conversões mais altas sejam alcançadas. Devido às condições empregadas no reformador primário, apenas cerca de 30 a 40% do hidrocarboneto é convertido a gás de síntese. Na segunda etapa de reforma, temperaturas de 1000°C são alcançadas, e cerca de 99% do hidrocarboneto não reagido, proveniente da reforma primária, é convertido.

Após saída do reformador secundário, todo o monóxido de carbono deve ser removido através da conversão de Shift (5), onde o gás produzido passa por reação envolvendo catalisador a base de óxido de ferro e óxido de cromo, a temperaturas de aproximadamente 400°C.



Após a conversão de Shift, o CO_2 deve ser removido, juntamente com os traços de CO não convertidos, e traços de compostos de enxofre, de forma a não envenenar o catalisador envolvido na produção de amônia. A remoção de CO_2 se dá através de processo de absorção química ou física, sendo soluções aquosas de amina (e.g. MEA) empregadas como solvente, em processo de absorção química. Para a remoção de traços remanescentes de CO e CO_2 , após a absorção química, emprega-se usualmente o processo de metanação, com a consequente produção de CH_4 .

Após purificação do gás de síntese, uma etapa de compressão deve ser implementada. Em seguida, o gás segue para a etapa de síntese de amônia, que ocorre em reator com catalisador à base de óxido de ferro, a pressões de 100 a 250 bar, e temperaturas entre 350 a 550°C, segundo a reação (6):



A conversão costuma ser de 20 a 30% por passe, e a amônia produzida é separada por resfriamento/condensação, sendo o gás reagido constantemente substituído por gás rico em H_2 , de forma a manter a pressão do *loop*. Diversos arranjos podem ser adotados para o *loop* de síntese de amônia, sendo tais variações resultado da injeção de gás rico em H_2 em diferentes posições do arranjo, bem como remoção de NH_3 e gás de purga a partir de diferentes posições. A necessidade de gerenciamento do gás de purga parte da existência de inertes, que não se dissolvem na amônia condensada. A concentração de inertes no *loop* deve ser de 10 a 15%, e isso é controlado através da purga de maior ou menor quantidade de gás (EFMA, 2000).

Novas tecnologias foram desenvolvidas com o passar do tempo, como resultado do aperfeiçoamento e otimização do processo convencional. Dentre os avanços ocorridos destacam-se:

- KBR Advanced Ammonia Process (KAAP): emprego de catalisador altamente ativo à base de rutênio sobre suporte de grafita, permitindo que o *loop* de síntese de amônia opere a pressões mais moderadas do que os *loops* convencionais, associados ao processo Haber-Bosch, levando a uma redução da complexidade do *design* e do custo de capital associados ao processo. Opera em conjunto com as tecnologias KRES (KBR Reforming Exchanger System) e *Purifier* (Cryogenic Syngas Purification) (KBR, 2014);
- Lurgi-Casale Mega Ammonia Process: tornou possível um aumento da capacidade de produção de amônia. Possui as seguintes características: (i) substituiu o uso de ar, na etapa de reforma a vapor de metano, por oxigênio; (ii) conversão de *shift* e síntese de amônia são processadas em reatores contendo cartuchos internos do tipo axial-radial (Casale); (iii) utilização de tecnologia *Liquid Nitrogen Wash*; (iv) planta de produção de amônia em sequência linear (single-train) de alta capacidade, operando a altas pressões (IHS, 2014).
- Haldor Topsøe: emprega conversor de amônia de dois leitos, de fluxo radial, com arrefecimento indireto (S-200), cujo uso do volume se apresenta bastante eficiente, uma vez que emprega partículas pequenas, na faixa de 1,5 a 3,0 mm. O arrefecimento indireto garante que as conversões se mantenham elevadas (Pereira, 2009). Esse processo garante uma redução no consumo energético, uma vez que o

gás liberado no segundo leito é reaproveitado para a produção de vapor de alta pressão (Haldor Topsøe A/S, 2014).

- Linde Ammonia Concept (LAC™ Process): compreende uma planta de produção de hidrogênio, em que o gás de síntese é purificado por sistema do tipo *Pressure Swing Adsorber* (PSA); uma planta padrão de nitrogênio; e um sistema de alta eficiência de síntese de amônia do tipo Casale (Linde, 2014).

Muito se discute hoje, mais de 100 anos após o desenvolvimento do processo Haber-Bosch, acerca das consequências decorrentes da invenção de Fritz Haber. Além de assegurar o desenvolvimento do setor agrícola, através da produção de fertilizantes, a produção industrial de amônia assegurou o suprimento de fonte de nitrogênio à indústria de explosivos alemã durante a Primeira Guerra Mundial (McKie, 2013). Impactos ambientais também podem ser relacionados ao desenvolvimento do processo, seja pelas emissões de CO₂ inerentes à matéria-prima mais amplamente utilizada (gás natural), ou pela contaminação de fontes de abastecimento de água por fertilizantes.

Atualmente a produção de amônia pode ser desvinculada da emissão de CO₂ através do emprego de matérias-primas renováveis ou tecnologias alternativas. As seguintes opções estão disponíveis (Elucidare, 2008):

- Hidrogênio produzido a partir de processos eletrolíticos, utilizando água ou soluções de salmoura, desde que a energia elétrica seja obtida a partir de energia eólica, solar ou hidrelétrica;
- Objeto de patente (Holbrook & Ganley, 2010), o processo eletroquímico de síntese de amônia em estado sólido emprega água e ar. Água é decomposta no anodo, produzindo hidrogênio na forma de H⁺, que é conduzido por um eletrólito cerâmico até o catodo, onde recupera os elétrons perdidos. No catodo, o hidrogênio reagirá ainda com átomos dissociados de nitrogênio, adsorvidos ao eletrodo, formando NH₃;
- Digestão anaeróbica, em que amônia é produzida diretamente, na forma de íon amônio e NH₃ gasoso dissolvido;
- Digestão ou pirólise de biomassa com geração de gás de síntese (CO + H₂), que será empregado no processo convencional de produção de amônia a partir de N₂ e H₂;
- Fixação biológica de nitrogênio, em que bactérias específicas são capazes de absorver N₂ e convertê-lo em NH₃.

III.3 – Características e Propriedades Físico-Químicas

A temperatura e pressão ambiente, amônia se apresenta na forma de um gás incolor e higroscópico (Vale, 2012), com odor característico e asfixiante, cuja solubilidade em água é bastante elevada (EFMA, 2007). Quando borbulhado em água, o gás amoníaco forma hidróxido de amônio (NH_4OH). O hidróxido correspondente é uma base fraca, que se dissocia parcialmente em seus íons, sob uma constante de dissociação de $1,77 \times 10^{-5}$ a 25°C . A constante de dissociação é resultado da temperatura e do pH da solução. Quando se aumenta a temperatura, observa-se um ligeiro aumento da porcentagem de amônia protonada. Já a relação entre o grau de dissociação do hidróxido e o pH da solução é inversamente proporcional: em pH de 8,25, 90% da amônia estará na forma protonada; em pH de 7,25, 99% da amônia estará protonada (EPA, 2013). Por se tratar de um gás alcalino, o pH de uma solução aquosa a 1% é aproximadamente 11,7. As propriedades físico-químicas da amônia estão listadas na Tabela 3.4.

Amônia gasosa pode reagir violentamente com óxidos de nitrogênio e ácidos fortes (EFMA, 2007), liberando grande quantidade de calor. Em contato com compostos como halogênios, boro, 1,2-dicloroetano, óxidos de etileno, platina, triclorato de nitrogênio e oxidantes fortes, pode causar reações potencialmente violentas ou explosivas (Usiquímica, 2009). O produto apresenta ainda outras incompatibilidades: em contato com metais pesados e seus compostos, pode formar produtos explosivos; em contato com cloro e seus compostos, pode liberar gás cloroamina; em contato com hidrocarbonetos, pode formar mistura explosiva. Por fim, incompatibilidade também foi relatada com aldeído acético, acroleína, hidrazina e ferrocianeto de potássio.

Amônia não é considerada um gás inflamável, pois apesar de ser combustível, é de difícil ignição. Em grandes quantidades, no entanto, e em presença de intensa fonte de energia, pode ser desencadeado processo de ignição quando em locais confinados. Esse risco pode ser negligenciado em ambientes externos. Misturas envolvendo amônia contaminada com óleo lubrificante (caso de sistemas de refrigeração), por outro lado, aumentam o risco de incêndio (EPA, 2001). Em caso de incêndio, as melhores formas de combate são água em neblina, CO_2 , ou pó-químico (Petrobras, 2013).

Amônia é muito corrosiva ao metal cobre. Desse modo, equipamentos em contato com o químico não devem conter o metal. A presença de uma combinação de amônia líquida e oxigênio pode causar fragilização de aço carbono por corrosão sob tensão (SCC) (EFMA, 2007). Para que esse tipo de corrosão ocorra, porém, condições de operação normal não são

Tabela 3.4. Propriedades Físico-Químicas da Amônia

Nome químico	Amônia	EPA (2013)
Sinônimos	AM-Fol; amônia anidra; gás amônia; Nitro-sil; R 717; Spirit of hartshorn	EPA (2013)
Estrutura	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}-\text{N}-\text{H} \end{array}$	EPA (2013)
Fórmula química	NH ₃	EPA (2013)
Nº de registro CAS	7664-41-7	EPA (2013)
Peso molecular	17,031	EPA (2013)
Forma	Gás incolor; líquido incolor sob alta pressão	Petrobras (2013)
pH	Não aplicável	Petrobras (2013)
Ponto de fusão	-77,73°C	EPA (2013)
Ponto de ebulição	-33,33°C	EPA (2013)
Temperatura crítica	132,4°C	EFMA (2007)
Pressão crítica	11,28 MPa	EFMA (2007)
Temperatura de auto-ignição	850°C (651°C quando na presença de ferro como catalisador)	Usiquímica (2009)
Limites de explosividade superior/inferior	28%/15%	Petrobras (2013)
Limiar de odor	53 ppm (37 mg/m ³) 2,6 ppm (2 mg/m ³)	EPA (2013)
Densidade	0,7714 g/L a 25°C	EPA (2013)
Densidade de vapor	0,5967 (ar = 1)	EPA (2013)
Viscosidade	1,18 cP a 20°C e 95%	Petrobras (2013)
pK _a (íon amônio)	9,25	EPA (2013)
Solubilidade:		
Água	4,82 × 10 ⁵ mg/L a 24°C	EPA (2013)
Solventes orgânicos	Solúvel em etanol, clorofórmio e éter	
Pressão de vapor	7,51 × 10 ³ mm Hg a 25°C	EPA (2013)
Constante de Henry	1,61 × 10 ⁻⁵ atm·m ³ /mol a 25°C	EPA (2013)
Fatores de Conversão		
ppm para mg/m ³	1 ppm = 0,707 mg/m ³	EPA (2013)
mg/m ³ para ppm	1 mg/m ³ = 1,414 ppm	

suficientes, devendo haver níveis de estresse elevados para que possa ser observada fragilização. A combinação de tensão residual de soldagem, tensão aplicada ao material, e quantidade suficiente de oxigênio pode desencadear o fenômeno de corrosão sob tensão. Tanques de armazenamento de amônia estão sujeitos a esse tipo de corrosão quando há

presença de oxigênio. Para evitar tal cenário, os tanques devem ser purgados com nitrogênio, eliminando o oxigênio, para que o transporte de amônia se dê de forma segura.

III.4 – Informações Toxicológicas e Primeiros Socorros

Amônia anidra é armazenada e transportada na forma de um gás liquefeito sob pressão. Trata-se de substância tóxica, de odor pungente, o que torna fácil sua detecção pelo olfato, ainda que em baixas concentrações. Suas propriedades corrosivas e irritantes podem causar queimaduras no trato respiratório, pele e olhos. Já o contato com o gás liquefeito pode causar “queimaduras pelo frio” (*frostbite*) (Petrobras, 2013). Sua elevada solubilidade em água leva à dissolução nas mucosas dos olhos e trato respiratório, acarretando em danos celulares como resultado de sua ação cáustica alcalina (Vale, 2012), que tem efeito de saponificação sobre os lipídios presentes na membrana celular, levando à ruptura da célula (U.S. Department of Health and Human Services, 2004). Quando em contato com os olhos, pode provocar lesões oculares graves, com lacrimejamento, ulceração da córnea e atrofia da íris, e até cegueira. Já os danos causados ao sistema respiratório envolvem sintomas alérgicos ou asmáticos, e dificuldades respiratórias (Petrobras, 2013).

Efeitos mutagênicos e carcinogênicos não foram observados, assim como não foram observados efeitos sobre a reprodução. Efeitos tóxicos sobre fetos puderam ser observados apenas em casos em que houve intoxicação da mãe após exposições elevadas (Health Protection Agency, 2007).

Algumas instituições e órgãos ao redor do mundo realizam estudos para determinação de limites de exposição em ambiente de trabalho. A *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) apresenta nível admissível de exposição no local de trabalho (PEL) de 50 ppm (35 mg/m³), para um período de 8 horas diárias (EPA, 2001). Já a *American Conference of Industrial Hygienists* (ACGIH) estabelece o limite de tolerância denominado TLV – TWA (*Time Weight Average*) de 25 ppm (17 mg/m³). O TLV – TWA é a média da concentração ponderada pelo tempo de exposição levando-se em conta uma jornada de 8 h/dia e 40 h/semana. A ACGIH define ainda o limite TLV – STEL (*Short Time Exposure Limit*), como sendo a concentração máxima na qual trabalhadores podem se expor pelo período de 15 minutos sem apresentar reações adversas. Esse limite pode ser atingido quatro vezes ao longo da jornada de trabalho, com intervalo mínimo de 60 minutos entre cada exposição. Para a amônia, o TLV – STEL assume o valor de 35 ppm (24 mg/m³).

O parâmetro IDLH (*Immediately Dangerous for Life and Health*) definido pelo *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) diz respeito à concentração

máxima para exposição pelo período de 30 minutos que permite escapar do ambiente. Essa concentração é de 300 ppm, e a exposição respiratória aguda por mais de 30 minutos pode levar à morte ou a consequências irreversíveis à saúde, ou exposição dos olhos que impede a fuga do local. Diferentemente dos índices da OSHA e da ACGIH, o índice do NIOSH não é ocupacional. Trata-se de um índice utilizado unicamente em situações de emergência.

No Brasil, a Norma Regulamentadora 15 (NR-15) definida pelo Ministério do Trabalho e Emprego é a responsável por definir os limites de exposição que caracterizam insalubridade ou risco grave e iminente no local de trabalho. A Norma considera atividades ou operações insalubres que se desenvolvem acima dos limites de tolerância, para uma jornada de trabalho de 48 horas por semana, cujo valor para amônia é de 20 ppm (14 mg/m³). Para detecção, devem ser realizadas dez amostragens com intervalo mínimo de 20 minutos. Nenhuma das amostragens deve ultrapassar o valor máximo, definido com base no limite de tolerância vezes o fator de desvio, cujo valor para amônia é de 30 ppm (21 mg/m³). Caso alguma das amostragens ultrapasse o valor máximo, considera-se situação de risco grave e iminente.

Em se tratando de situações de emergência, de acordo com o U.S. Department of Health and Human Services (2004), exposição a uma concentração de 250 ppm é suportável por um período de 30 a 60 minutos. Exposições agudas a níveis mais elevados (500 ppm) causam irritação na garganta; concentrações a partir de 2000 ppm são perigosas, mesmo em exposição de curto prazo. Acima de 5000 ppm pode ser fatal (Vale, 2012).

O U.S. Department of Health and Human Services (2004) reporta ainda sobre alguns valores de concentração e seus respectivos efeitos quando da exposição aos olhos. Concentrações de 100 ppm são levemente irritantes quando a exposição é breve; a 250 ppm, a exposição é suportável por 30 a 60 minutos; e a 698 ppm, amônia é imediatamente irritante.

Alguns dos efeitos observados após exposição aguda a diversas concentrações de amônia estão listados na Tabela 3.5. Efeitos provenientes de exposição crônica foram pouco estudados (Health Protection Agency, 2007).

Algumas métricas foram especialmente desenvolvidas para a determinação e avaliação de zonas urbanas afetadas por nuvens tóxicas em situações de emergência, de modo a possibilitar a elaboração de planos de ação. Tem-se o chamado ERPGL (*Emergency Response Planning Guidelines Levels*), métrica definida pela AIHA (*American Industrial Hygiene Association*), que utiliza três níveis de concentração como orientação (AIHA, 2006 e 2013):

- ERPG – 3 (750 ppm) é a máxima concentração abaixo da qual se acredita que quase todos os indivíduos possam se expor pelo período de até uma hora, sem que isso represente risco à vida.
- ERPG – 2 (150 ppm) é a máxima concentração abaixo da qual se acredita que quase todos os indivíduos possam se expor pelo período de até uma hora, sem que isso represente a possibilidade do desenvolvimento de efeitos irreversíveis ou outras consequências graves à saúde, ou ainda outros sintomas que impossibilitem a vítima de tomar atitudes de forma a se proteger.
- ERPG – 1 (25 ppm) é a máxima concentração abaixo da qual se acredita que quase todos os indivíduos possam se expor pelo período de uma hora, sem que se experimente efeitos adversos outros, que não moderados e transientes, ou sem que se perceba claramente um odor censurável.

Tabela 3.5. Efeitos Tóxicos Decorrentes de Exposição a Amônia por Inalação
 Fonte: Health Protection Agency (2007)

Dose		Sinais e Sintomas
mg/m ³	Ppm	
35	50	Irritação aos olhos, nariz e garganta (2h de exposição)
70	100	Irritação imediata aos olhos e trato respiratório
174	250	Tolerada pela maioria das pessoas (30 – 60 min de exposição)
488	700	Irritação imediata aos olhos e garganta
> 1045	> 1500	Edema pulmonar, tosse, espasmos na laringe
1740 – 3134	2500 – 4500	Fatal (30 minutos)
3480 – 6965	5000 – 10000	Rapidamente fatal por obstrução das vias respiratórias

Outra métrica conhecida é o AEGL (*Acute Emergency Guideline Levels*), especificada pela EPA (*U.S. Environmental Protection Agency*). O AEGL também é dividido em três níveis. Os valores foram definidos para período de exposição de uma hora (EPA, 2014).

- AEGL – 3 (1100 ppm) é a concentração acima da qual se acredita que a população em geral, incluindo indivíduos suscetíveis, poderia estar exposta a efeitos sobre a saúde que ameçassem sua vida.
- AEGL – 2 (160 ppm) é a concentração acima da qual se acredita que a população em geral, incluindo indivíduos suscetíveis, possa experimentar danos irreversíveis

ou sérios à saúde, de longa duração, ou que comprometam a habilidade de escapar.

- AEGL – 1 (30 ppm) é a concentração acima da qual se acredita que a população em geral, incluindo indivíduos suscetíveis, possa experimentar desconforto, irritação, ou alguns efeitos assintomáticos não sensoriais. No entanto, os efeitos não são incapacitantes ou irreversíveis.

Juntamente com o AEGL e ERPG, define-se ainda o TEEL (*Temporary Emergency Exposure Limits*), pela SCAPA (*Subcommittee on Consequence Assessment and Protective Action*). Criado antes do AEGL, tinha como objetivo definir limites de exposição para químicos que não possuíam valores de ERPG atribuídos. Hoje em dia utiliza-se valores de TEEL para compostos químicos que não possuem AEGL nem ERPG. Assim como as métricas definidas anteriormente, são atribuídos valores de TEEL – 1, TEEL – 2 e TEEL – 3. Além destes, define-se o TEEL – 0 como o valor abaixo do qual não se observam quaisquer efeitos adversos. As métricas diferem pelos métodos e fontes de dados usados para seu desenvolvimento (DOE, 2008).

Por fim, o DOE (*Department of Energy*) definiu o PAC (*Protective Action Criteria for Chemicals*), que engloba as três métricas, obedecendo a seguinte hierarquia: AEGL, ERPG e, por último, TEEL. Essa ordem é obedecida e, na ausência do AEGL definido para determinado químico, recorre-se ao seu ERPG e, por último, na ausência do ERPG, adota-se o TEEL. PAC – 1, PAC – 2 e PAC – 3 estão associados a um nível crescente de severidade dos efeitos observados.

Medidas de primeiros socorros, segundo informações da NIOSH, envolvem, primeiramente, a remoção da vítima do local de exposição ao produto químico. Se houve contato com os olhos, deve-se lavar a região com grande quantidade de água fria, durante pelo menos 15 minutos. Se houver ingestão, deve-se assegurar que a vítima não apresenta obstrução das vias aéreas; não se deve induzir o vômito, nem administrar nada pela boca; deve-se garantir ventilação, e oxigênio suplementar. Em caso de inalação, avaliar a função respiratória, e controlar a pulsação da vítima; assegurar que as vias respiratórias estejam desobstruídas; administrar oxigênio em caso de dificuldade respiratória; assegurar ventilação suficiente; prover respiração artificial em caso de apneia; recorrer à intubação em caso de comprometimento respiratório. Caso o contato seja com a pele, recorrer a procedimento de descontaminação, que inclui a remoção de toda a vestimenta, seguida de lavagem da região atingida com sabão e água (fria ou morna), sempre na direção da cabeça para os pés, até

remoção completa do contaminante; deve-se atentar para não comprometer a integridade da pele da vítima, cobrindo-se feridas abertas; em seguida, cobrir para prevenir perda de calor corporal. Em todos os casos, deve-se recorrer a atendimento médico de emergencial (CDC, 2014).

III.5 – Informações Ecológicas

No solo e na água a amônia participa de diversas transformações bioquímicas complexas, integrando o chamado “ciclo do nitrogênio” (Figura 3.4).

Amônia gasosa se deposita rapidamente no solo, sendo absorvida por ele e pelas plantas, o que confere baixa mobilidade ao químico. A presença de níveis mais elevados de nitrogênio no solo (eutrofização) pode acarretar em uma inibição do crescimento de plantas que se desenvolvem em locais com menor disponibilidade de nitrogênio, estimulando o crescimento de outras espécies, que são capazes de incorporar o nitrogênio com maior eficiência (DEFRA, 2002). Assim, algumas espécies de plantas podem predominar sobre outras. Além disso, se grande derramamento de amônia ocorre próximo a regiões com presença de vegetação, o vapor será responsável pela queima das folhas, especialmente das plantas localizadas na direção do vento (MDA, 2005).

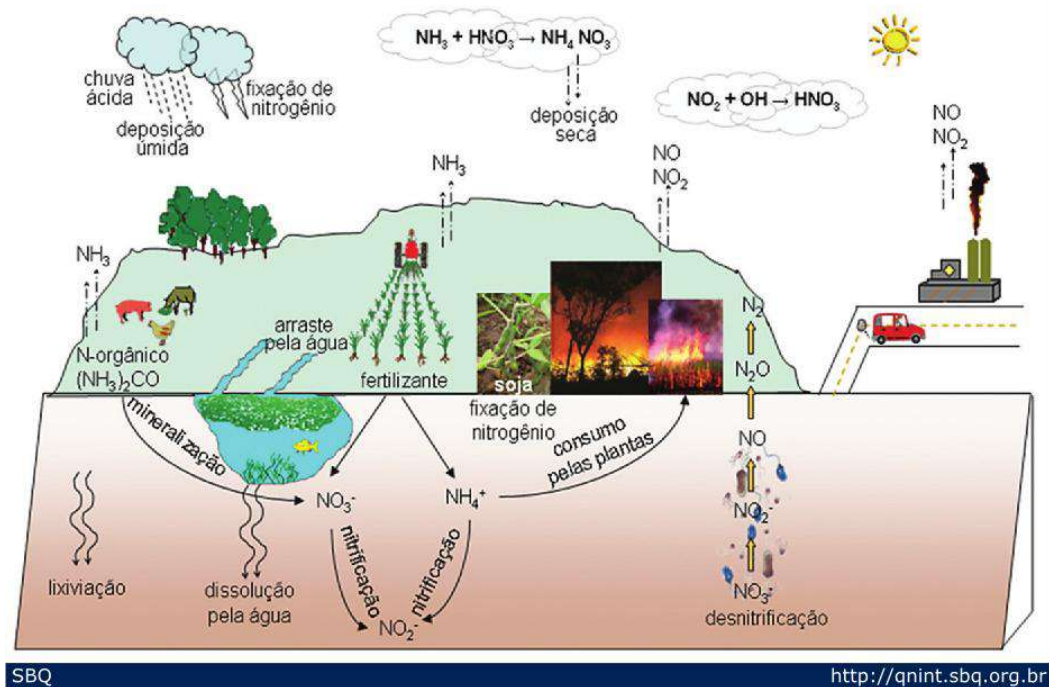


Figura 3.4. Ciclo do nitrogênio
Fonte: Cardoso *et al.* (2008)

Outro efeito da absorção de amônia pelo solo é a acidificação, decorrente da oxidação de amônia a nitrato. Com o aumento da acidez, alguns elementos presentes no solo se tornam mais ou menos disponíveis às plantas, podendo privilegiar a absorção de agentes tóxicos em detrimento de elementos essenciais. A presença de uma maior acidez pode ainda favorecer a lixiviação de componentes tóxicos, promovendo a contaminação de lençóis freáticos e prejudicando a vida aquática.

Amônia gasosa tende a reagir rapidamente, próxima da fonte de emissão. Porém, uma parcela pode atingir níveis mais elevados da atmosfera, podendo ser carregada pelo vento para outras regiões. Partículas contendo nitrogênio amoniacal são formadas a partir da reação de óxidos de nitrogênio e enxofre (presentes no ar) com amônia. Tais partículas podem ser levadas pelo vento para regiões mais distantes, e retornar ao solo através de chuvas.

A amônia é bastante solúvel em água, podendo ser, mesmo em concentrações baixas, prejudicial à vida aquática. A presença de altas concentrações de amônia diminui a quantidade de oxigênio dissolvido, sendo esta uma consequência do processo de eutrofização. Segundo dados do Minnesota Department of Agriculture, concentrações tão baixas quanto 0,02 mg/L podem ser letais a algumas espécies aquáticas mais sensíveis. Não é observada, no entanto, bioacumulação nos organismos aquáticos.

III.6 – Identificação de Perigos

Uma forma simples de identificar os riscos à saúde, inflamabilidade, e outros riscos associados a qualquer agente químico é o chamado “diagrama NFPA” (NFPA 704), também conhecido como Diagrama de Hommel. Trata-se de uma simbologia empregada pela NFPA (*National Fire Protection Association*), que utiliza numeração entre 0 e 4 para classificar cada um dos quatro riscos, de modo a fornecer a informação necessária para orientar acerca das medidas a serem tomadas em caso de emergência.

No diagrama, a cor azul simboliza o risco à saúde; a cor vermelha, a inflamabilidade; a cor amarela, a instabilidade/reactividade; e a cor branca, riscos específicos. O diagrama da Figura 3.5 representa o Diagrama de Hommel da amônia, em que a classificação é descrita como segue:

- Azul (3): exposição curta pode causar sérios danos temporários ou residuais à saúde;
- Vermelho (1): material precisa ser pré-aquecido para que ocorra ignição;
- Amarelo (0): material normalmente estável, mesmo sob condições de exposição ao fogo, não sendo reativo com água;

- Branco (-) : não apresenta risco específico.



Figura 3.5. Diagrama de Hommel
Fonte: www.cdc.gov (2013)

Capítulo IV – Regulamentação do Transporte Ferroviário de Produtos Perigosos

O Decreto nº 98.973, de 21 de fevereiro de 1990, aprova o regulamento do transporte ferroviário de cargas perigosas no Brasil. Embora aprovado há 24 anos, não se trata de um texto desatualizado pois conforme o Art. 2º deste decreto, “*O Ministro de Estado dos Transportes expedirá, por portaria, os atos complementares que se façam necessários para a permanente atualização do regulamento e obtenção de níveis adequados de segurança neste tipo de transporte de carga*”.

Conforme mencionado no Capítulo II, a Lei nº 10.233 de 5 de junho de 2001 determinou a criação da ANTT, instituição vinculada ao Ministério dos Transportes responsável por fiscalizar e regulamentar o transporte terrestre de cargas. O Art. 22, inciso VII da Lei nº 10.233 estabelece que “*constitui esfera de atuação da ANTT o transporte de cargas especiais e perigosas em rodovias e ferrovias*”, e o Art. 24, inciso XIV da mesma Lei, determina que “*cabe à ANTT, em sua esfera de atuação, como atribuição geral, estabelecer padrões e normas técnicas complementares relativas às operações de transporte terrestre de cargas especiais e perigosas*”. O Parecer/ANTT/PRG/FAB/nº 151-4.13/2003, de 15 de abril de 2003, “*conclui ser atribuição da ANTT expedir atos complementares e as modificações de caráter técnico que se façam necessários para a permanente atualização dos Regulamentos e obtenção de níveis adequados de segurança no transporte desse tipo de carga*”.

Para atender à legislação, em 12 de fevereiro de 2004 foi publicada a Resolução nº 420 da ANTT, a qual “*Aprova as Instruções Complementares ao Regulamento do Transporte Terrestre de Produtos Perigosos*”. Este documento substituiu as portarias do Ministério dos Transportes de nº 261 (1989), 204 (1997), 409 (1997), 101 (1998), 402 (1998), 490 (1998), 342 (2000), 170 (2001) e 254 (2001) que até então compunham a legislação deste tipo de transporte. Deste modo, a Resolução 420 centralizou e facilitou o acesso às requisições mandatórias. Assim sendo, para avaliar o transporte ferroviário de amônia, diversos tópicos desta resolução devem ser avaliados e considerados.

Como a resolução trata de inúmeras cargas perigosas, seu conteúdo é bastante extenso, além de mencionar também algumas ações aplicáveis somente ao transporte rodoviário. São aqui abordados os tópicos essenciais para o transporte ferroviário de amônia.

IV.1 – Instruções Complementares ao Regulamento do Transporte Terrestre de Produtos Perigosos

IV.1.1 - Introdução

A Resolução discrimina quais foram os documentos utilizados como referência para sua elaboração. As publicações ST/SG/Ac. 10/1/Ver. 11 e 12 do Comitê de Peritos das Nações Unidas sobre o Transporte de Produtos Perigosos (Orange Book), o Acordo Europeu sobre o Transporte de Produtos Perigosos por Rodovia (ADR) e os Regulamentos Internacionais sobre o Transporte de Produtos Perigosos por Ferrovia (RID) constituem a base conceitual da resolução.

Nestas referências podem ser encontradas informações para classificação dos produtos perigosos em classes e subclasses, bem como critérios para classificar produtos que ainda não constam na Relação de Produtos Perigosos. Trata também da denominação dos produtos transportados, uniformizando a documentação. Envolve ainda a definição dos produtos isentos do cumprimento de todas as ações regulamentares, indica as prescrições para o transporte com base na classe do produto e menciona os *“cuidados a serem observados e as disposições relativas a embalagens, Contentores Intermediários para Granéis (IBCs), embalagens grandes e tanques portáteis”*.

IV.1.2 – Disposições Gerais e Definições

Para procedência do transporte terrestre de produtos perigosos, estes devem estar *“adequadamente classificados, embalados, marcados, rotulados, sinalizados conforme declaração emitida pelo expedidor, constante na documentação de transporte e, além disso, nas condições de transporte exigidas”* pela Resolução 420.

Observa-se que as exigências da Organização Marítima Internacional (OMI) e da Organização Internacional de Aviação Civil (OACI) são suficientes para que produtos até determinado ponto transportados por via aérea ou marítima possam também ser transportados por meios terrestres.

A regulamentação para transporte terrestre de produtos perigosos não se aplica nos seguintes casos:

- a) Produtos perigosos que estejam sendo utilizados para a propulsão dos meios de transporte;*
- b) Produtos perigosos exigidos de acordo com regulamentos operacionais para os meios de transporte (p. ex., extintores de incêndio);*

- c) *Produtos perigosos que estejam sendo utilizados para a operação dos equipamentos especializados dos meios de transporte (p. ex., unidades de refrigeração);*
- d) *Produtos perigosos embalados para venda no varejo, portados por indivíduos para uso próprio; e*
- e) *Produtos perigosos para fins de cuidados pessoais e uso doméstico, destinados ao comércio de venda direta, quando transportados do centro de distribuição até a residência da pessoa física revendedora, em embalagens internas ou singelas de até 1,5 Kg ou 1,5 L e em volumes de até 15 kg.*

As normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT sobre o tema são:

- ABNT NBR 7500 - Identificação para o transporte terrestre, manuseio, movimentação e armazenamento de produtos.
- ABNT NBR 7503 - Transporte terrestre de produtos perigosos - Ficha de emergência e envelope - Características, dimensões e preenchimento.
- ABNT NBR 9735 - Conjunto de equipamentos para emergências no transporte terrestre de produtos perigosos.
- ABNT NBR 10271 - Conjunto de equipamentos para emergências no transporte rodoviário de ácido fluorídrico.
- ABNT NBR 14619 - Transporte terrestre de produtos perigosos - Incompatibilidade química.

Nem todos os termos técnicos abordados na Resolução 420 são utilizados neste estudo. Algumas definições consideradas mais importantes são apresentadas:

- *Autoridade competente – é qualquer organização ou autoridade nacional designada, ou reconhecida como tal, para decidir sobre questões relativas ao Regulamento.*
- *Capacidade máxima – é o volume interno máximo de recipientes ou embalagens, expresso em litros.*
- *Carcaça ou Corpo do tanque – é o continente da substância destinada ao transporte (tanque propriamente dito), incluindo aberturas e seus fechos, mas não incluindo o equipamento de serviço nem o equipamento estrutural externo.*
- *Destinatário – é qualquer pessoa, organização ou governo habilitado a receber uma expedição.*

- *Embalagens – são recipientes e quaisquer outros componentes ou materiais necessários para que o recipiente desempenhe sua função de contenção. Podem apresentar diversos tipos.*
- *Expedição – é qualquer volume, ou volumes, ou carregamento de produtos perigosos entregue para transporte por um expedidor.*
- *Expedidor – é qualquer pessoa, organização ou governo que prepara uma expedição para transporte.*
- *Líquidos – exceto se houver indicação explícita ou implícita em contrário, (...), são produtos perigosos com ponto de fusão ou ponto de fusão inicial igual ou inferior a 20 °C, à pressão de 101,3 kPa.*
- *Tanque portátil: tanque multimodal com capacidade superior a 450 litros, (utilizado no transporte de gases liquefeitos não-refrigerados da Classe 2). O tanque portátil inclui uma carcaça com o equipamento de serviço e o equipamento estrutural necessários ao transporte de (gases). O tanque portátil deve poder ser carregado e descarregado sem remoção de seu equipamento estrutural. Deve ter elementos estabilizadores externos à carcaça e poder ser içado quando carregado. Ele deve ser projetado, primariamente, para ser carregado em veículo ou embarcação de transporte e deve ser equipado com plataformas, suportes ou acessórios que facilitem a movimentação mecânica. Caminhões-tanques, vagões-tanques, tanques não metálicos, contentores intermediários de granéis (IBCs), cilindros de gás e grandes recipientes não se incluem na definição de tanques portáteis.*
- *Transportador – é qualquer pessoa, organização ou governo que efetua o transporte de produtos perigosos por qualquer modalidade de transporte. O termo inclui tanto os transportadores comerciais quanto os de carga própria.*
- *Veículo – vagão ferroviário. Cada vagão deve ser considerado como um veículo separado.*

IV.1.2 – Classificação

A classificação das substâncias nas classes existentes é de responsabilidade do fabricante ou do expedidor com orientação do fabricante. Substâncias que não se enquadram em nenhuma das classes devem apresentar um relatório de ensaio do produto à ANTT para avaliação junto ao Fórum do Comitê de Peritos sobre Transporte de Produtos Perigosos das Nações Unidas.

As substâncias podem ser alocadas em 9 classes diferentes, as quais também podem apresentar subclasses. A classificação é feita “*de acordo com o risco ou o mais sério dos riscos que apresenta*”. As classes e subclasses são apresentadas na Tabela 4.1.

O nível de risco também pode indicar a necessidade de alocação em um grupo de embalagem, sendo Grupo de Embalagem I para substâncias de alto risco, Grupo de Embalagem II para substâncias de risco médio e Grupo de Embalagem III para substâncias de baixo risco. Para produtos que já se encontram na Relação de Produtos Perigosos da Resolução 420, é possível se obter diretamente “*sua classe ou subclasse, seu(s) risco(s) subsidiário(s) e, quando aplicável, seu(s) grupo(s) de embalagem(ns)*”.

Produtos perigosos possuem “*números ONU e nomes apropriados para embarque de acordo com sua classificação de risco e sua composição*”. A amônia se enquadra na classe 2, subclasse 2.3, e é listada na Relação de Produtos Perigosos. A Tabela 4.2 contém as informações que podem ser encontradas nesta relação.

Os números 23 e 90 na tabela 4.2 são os indicadores das provisões especiais pertinentes ao transporte de amônia, e as definições apresentadas na última coluna podem ser encontradas na Resolução 420.

Um gás pode ser transportado de diferentes formas:

- *Gás comprimido: é um gás que, exceto se em solução, quando acondicionado sob pressão para transporte, é completamente gasoso à temperatura de 20°C;*
- *Gás liquefeito: gás que, quando acondicionado para transporte, é parcialmente líquido à temperatura de 20°C;*
- *Gás liquefeito refrigerado: gás que, quando acondicionado para transporte, torna-se parcialmente líquido por causa da baixa temperatura;*
- *Gás em solução: gás comprimido que, quando acondicionado para transporte, é dissolvido num solvente.*

Gases ocupam volumes muito maiores que líquidos. Por conta deste aspecto físico, quando é economicamente viável a liquefação de um gás para transporte, é costume optar por esta solução. Assim consegue-se transportar uma quantidade maior de massa em uma única viagem. Como a pressão de vapor da amônia a 20 °C é de 857.48 kPa (~8.6 bar), a condição de transporte como gás liquefeito é muitas vezes favorável, uma vez que esta elevação de pressão não costuma encarecer o processo e existem materiais resistentes para o projeto de tanques capazes de sustentar esta pressão. Não existe necessidade de transporte com temperatura reduzida.

Tabela 4.1 – Classes e subclasses para determinação de grau de risco de produtos perigosos
 Fonte: Resolução ANTT n° 420 (2004)

Classe	Descrição	Subclasse	Descrição
1	Explosivos	1.1	Substâncias e artigos com risco de explosão em massa
		1.2	Substâncias e artigos com risco de projeção, mas sem risco de explosão em massa
		1.3	Substâncias e artigos com risco de fogo e com pequeno risco de explosão ou de projeção, ou ambos, mas sem risco de explosão em massa
		1.4	Substâncias e artigos que não apresentam risco significativo
		1.5	Substâncias muito insensíveis, com risco de explosão em massa
		1.6	Artigos extremamente insensíveis, sem risco de explosão em massa
2	Gases	2.1	Gases inflamáveis
		2.2	Gases não-inflamáveis, não-tóxicos
		2.3	Gases tóxicos
3	Líquidos Inflamáveis	-	-
4	Sólidos Inflamáveis ⁽¹⁾	4.1	Sólidos inflamáveis, substâncias auto-reagentes e explosivos sólidos insensibilizados
		4.2	Substâncias sujeitas à combustão espontânea
		4.3	Substâncias que, em contato com água, emitem gases inflamáveis
5	Substâncias Oxidantes e Peróxidos Orgânicos	5.1	Substâncias oxidantes
		5.2	Peróxidos orgânicos
6	Substâncias Tóxicas e Substâncias Infectantes	6.1	Substâncias tóxicas
		6.2	Substâncias infectantes
7	Material Radioativo	-	-
8	Substâncias Corrosivas	-	-
9	Substâncias e Artigos Perigosos Diversos	-	-

⁽¹⁾ Substâncias sujeitas à combustão espontânea; substâncias que, em contato com água, emitem gases inflamáveis.

A classe e subclasse indicam o risco que a substância apresenta durante o transporte. A identificação 2.3 define como gases tóxicos aqueles “*que reconhecidamente sejam tão tóxicos ou corrosivos para pessoas que constituam risco à saúde; ou supostamente tóxicos ou corrosivos para pessoas, por apresentarem valor de CL₅₀⁸ (...) igual ou inferior a 5.000 ml/m³*”

⁸ “CL₅₀ para toxicidade aguda por inalação é a concentração de vapor, neblina ou pó que, ministrada por inalação contínua, durante uma hora, a ratos albinos adultos jovens, machos e fêmeas, tenha a maior

(ppm)”. Se o gás se enquadrar “*nesses critérios por sua corrosividade deve ser classificado como tóxico, com risco subsidiário corrosivo*”. O valor da CL₅₀ para a amônia é de 2,000 ppm (CETESB).

IV.1.3 – Procedimentos de Expedição

O Capítulo 5 da Resolução 420 dispõe as exigências em termos de informação acerca de produtos perigosos que serão transportados. A sinalização deve ser feita através de rótulos de risco, painéis de segurança e outras formas que forem julgadas adequadas. A identificação dos volumes é feita basicamente afixando-se o número ONU do produto com seu nome apropriado para embarque.

Em se tratando do transporte de amônia, a identificação é feita afixando-se um rótulo que denota o risco principal (2.3) e um rótulo para o risco subsidiário (8), na cor branca. O formato é mostrado na Figura 4.1a. Os painéis de segurança que devem ser afixados nos veículos de transporte, no caso nos vagões-tanque, devem seguir o padrão da Figura 4.1b.

O capítulo também trata de toda a documentação envolvida no processo de expedição. Como não há menção específica sobre produtos da classe 2 destaca-se somente a necessidade de estar com a documentação preenchida corretamente, para auxiliar na identificação do produto em caso de acidente e permitir que as devidas ações sejam tomadas.

IV.1.4 – Prescrições Relativas às Operações de Transporte

As recomendações da Resolução 420 sobre as operações de transporte de produtos perigosos visam estabelecer os cuidados necessários para prevenir acidentes e minimizar o impacto causado por acidentes e possíveis situações emergenciais.

São mencionados a necessidade de atenção nos processos de carga e descarga, no manuseio e na preparação para transporte, a importância da correta classificação, escolha de embalagem, marcação, rotulação, sinalização e documentação discriminando as características do produto transportado, além de condições específicas para transporte de diversos volumes juntos, de forma a diminuir o risco de liberação em caso de acidente.

É frisada a exigência de não reatividade entre o material constituinte dos equipamentos e/ou veículos de transporte (vagão-tanque para o presente estudo) e o produto perigoso, bem como a importância dos processos de limpeza após uma descarga e previamente a um carregamento, principalmente se houver mudança do produto transportado.

probabilidade de provocar, num prazo de quatorze dias, a morte de metade dos animais testados. (...) O resultado é expresso (...) em mililitros por metro cúbico de ar (partes por milhão) para vapores.” (Resolução ANTT nº 420, 2004).

Tabela 4.2 - Aspectos relevantes da classificação da amônia de acordo com as Recomendações para o Transporte de Produtos Perigosos das Nações Unidas
 Fonte: Resolução ANTT no 420 (2004)

Nº ONU	1005	-
Nome e descrição	AMÔNIA, ANIDRA	-
Classe de risco	2.3	Gás tóxico
Risco subsidiário	8	Substância corrosiva
Nº de risco	268	Gás tóxico, corrosivo
Provisões especiais	23	Embora a substância apresente risco de inflamabilidade, este só se manifesta em condições extremas de fogo em locais confinados.
	90	Produto sujeito a controle e fiscalização do Ministério da Justiça - Departamento de Polícia Federal – MJ/DPF, quando se tratar de importação, exportação e reexportação, sendo indispensável Autorização Prévia do DPF para realização destas operações.
Instruções relativas a embalagens	P200	Recipientes e cilindros para gás comprimido que atendam às exigências de construção, ensaio e enchimento, aprovados pela autoridade competente são autorizados. Cilindros e recipientes, com capacidade até 1 litro, devem ser acondicionados em embalagens externas construídas com material apropriado, com resistência e projeto adequados a sua capacidade e ao uso a que se destinam, e presas ou calçadas de forma a evitar movimento significativo dentro da embalagem externa em condições normais de transporte.



Figura 4.1 – Rótulo de identificação e painel de segurança para transporte de produtos perigosos da subclasse 2.3
Fonte: Resolução ANTT nº 420 (2004)

Exigências quanto às condições mecânicas de operação das composições ferroviárias que transportam produtos perigosos são apontadas, como obrigatoriedade de freio automático e manual e descrição dos equipamentos de segurança que devem ser encontrados na composição.

Algumas prescrições relativas ao transporte de produtos da classe 2 são apontadas, destacando-se aqui as mais importantes para o transporte ferroviário de amônia. Um dos itens citados é a necessidade da instalação de sistemas de *vent* adequados para vagões-tanque que transportam gases liquefeitos. Em termos de serviço, determina a necessidade de máscaras apropriadas para proteção individual do pessoal envolvido no transporte de produtos tóxicos.

Operações de carregamento e descarregamento não devem ser realizadas “*em locais públicos, dentro de aglomerados populacionais, sem permissão especial das autoridades competentes*”, e somente o poderão ser realizadas em casos relacionados à segurança, com notificação às autoridades competentes. Quaisquer paradas prolongadas devem ser programadas para ocorrer em regiões de baixo fluxo populacional e/ou pouco habitados.

IV.2 – Considerações de Projeto de Vagões-Tanque

A Resolução 420 não menciona dados técnicos sobre a construção de vagões-tanque para transporte de produtos perigosos. Porém, o *Guia para Transporte de Amônia por Ferrovia*, publicado em 2007 pela Associação Europeia de Fabricantes de Fertilizantes – EFMA faz um apanhado de todas as condições que devem ser seguidas para o transporte ferroviário de amônia de forma segura. Neste guia podem ser encontradas especificações de

projeto e construção de vagões-tanque, marcação e identificação dos veículos utilizados, equipamentos de proteção individual, operações de carga e descarga, observações e obrigações das partes envolvidas no transporte e planos de emergência.

Neste estudo o guia serviu de base para abordar os tópicos de projeto dos veículos de transporte e mencionar pontos importantes para planos de emergência. Não existe uma exigência legal nacional que contemple a necessidade de seguir as recomendações do guia, sendo somente uma fonte de informações adicionais para uma conformidade e confiabilidade da operação de acordo com padrões mundiais.

IV.2.1 – Informações Complementares

A Figura 4.2 exemplifica uma identificação completa de um vagão-tanque, conforme as recomendações da ONU, demonstrando dois símbolos além daquele mencionado na Resolução 420. As letras A, B, C e D mostram limites relativos à linha férrea onde ocorre o transporte. O limite de transporte para vagões-tanque deve ser, no máximo, 0,53 vezes o volume do tanque, mas se este valor for superior aos limites da linha férrea, o menor valor deve ser considerado; as letras E, F e G indicam, respectivamente, os rótulos de substância corrosiva, gás tóxico e necessidade de manobrar com cuidado; as letras H e J mostram o número de identificação de risco 268 (gás tóxico, corrosivo) e o número ONU (1005), respectivamente; a letra K mostra o peso de tara em quilogramas; a letra L indica o volume do tanque em litros; e a letra M indica o nome apropriado para o transporte, AMÔNIA, ANIDRA.

IV.2.2 – Vagões-Tanque

O projeto dos tanques para transporte de amônia (ou de qualquer produto perigoso) deve obedecer às regulamentações locais, bem como acordos internacionais que estudam o tema, de forma a proporcionar maior segurança nas operações. Assim, materiais adequados devem ser selecionados para cada tipo de produto transportado, de forma a minimizar o risco de corrosão sob tensão.

No RID existe um código de identificação do tipo de tanque que deve ser usado para o transporte de amônia: **PxBH**, onde cada letra tem um significado. **P** significa vagão-tanque para transportar gases liquefeitos ou gases dissolvidos sob pressão; **x** é a pressão mínima de teste em bar; **B** indica que o tanque deve ter o sistema de enchimento ou descarregamento

inferior com 3 fechos (mecanismos de proteção para evitar vazamentos); **H** significa vagão-tanque hermeticamente fechado⁹.

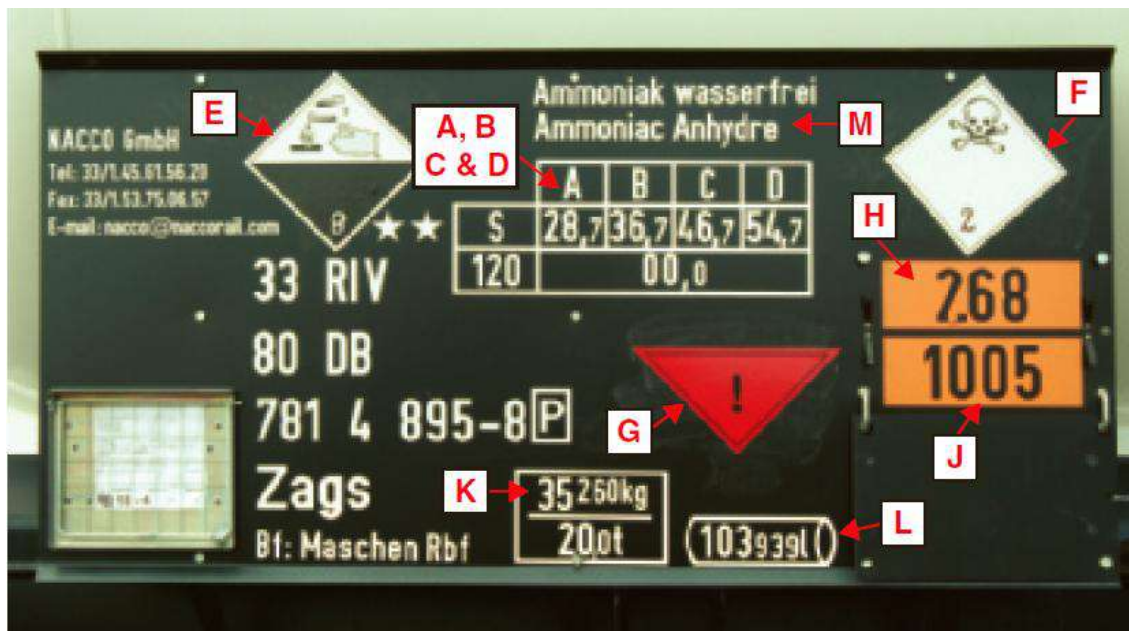


Figura 4.2 – Marcação e rotulagem de um vagão-tanque para transporte de amônia.
Fonte: EFMA (2007)

Algumas provisões especiais também são obtidas no RID e citadas no guia:

- TM6 – tanques para transporte de gases liquefeitos devem ter uma faixa laranja circulando-os na metade (pode ser visto na Figura 4.3).
- TT8 – determina inspeções específicas para tanques de transporte de amônia.
- TE25 – trata de recomendações necessárias para evitar sobrecarga dos amortecedores e descarrilamento.

O projeto de vagões-tanque costuma contemplar equipamentos com volumes variando entre 50 m³ e 110 m³. A carcaça dos tanques deve ser projetada e construída de forma a atender aos requisitos técnicos estipulados por autoridades competentes. Muitos tanques são produzidos de acordo com as recomendações da Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos – ASME, em sua publicação *Boiler & Pressure Vessel Code (BPVC)-Section VIII - Pressure Vessels*.

Uma estrutura de apoio do tanque sobre o “carro” deve ser utilizada, havendo uma recomendação da EFMA para que o próprio tanque não seja usado como próprio apoio no

⁹ Tanque cujas aberturas sejam hermeticamente fechadas e que não seja equipado com válvulas de segurança, discos de ruptura ou outros dispositivos de proteção. Tanques que contenham válvulas de segurança precedidas por um disco de ruptura devem ser considerados hermeticamente fechados (RID).

transporte de amônia. A EFMA se utiliza do RID como fonte de informações técnicas para projeto e construção do tanque.

A proteção contra irradiação solar dar-se-á por uma superfície refletora alocada na parte superior do tanque, através de um revestimento térmico de espessura adequada para proteção.

Em termos de sobrepessão, a prática recomendada é que não sejam instaladas válvulas de segurança em vagões-tanque, porém caso opte-se por esta configuração, a definição de hermeticamente fechado deve ser mantida.

Quanto ao material utilizado, não há menção específica aos tipos de materiais recomendados, mas há uma restrição quanto ao uso de cobre ou materiais que contenham cobre para a construção de tanques e equipamentos para uso com amônia. Os materiais metálicos utilizados na construção dos tanques devem ser resistentes a fraturas e corrosão sob tensão na faixa de temperaturas entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, de acordo com especificações do RID.

Válvulas e conexões devem seguir as recomendações do RID por se tratarem de pontos críticos que, em caso de falha ou ruptura, podem originar vazamentos. A Figura 4.3 ilustra um exemplo de vagão-tanque.



Figura 4.3 – Típico vagão-tanque para transporte de amônia.
Fonte: EFMA (2007)

IV.2.3 – Ações de Emergência

Planos de evacuação envolvendo a população vizinha à ferrovia podem ser complicados de executar em caso de acidente real com liberação de amônia. Existe a recomendação de avisar a população que ocupa a zona de risco o mais rápido possível, e orientar para que fechem portas, janelas e quaisquer entradas de ar, isolando frestas com

toalhas úmidas. As regiões de maior preocupação são as localizadas na direção do vento (EFMA, 2007).

A lista de itens aqui apresentada consta do guia da EFMA. Trata-se de um resumo das ações emergenciais para o caso de um acidente com vazamento de amônia.

- Aproximação do local do acidente deve ser feita pelo sentido a favor do vento.
- Utilização de equipamento individual de proteção completo, incluindo máscaras respiratórias em caso de liberação de grandes quantidades de amônia.
- Comunicar a população presente em regiões que possam ser afetadas pelo vazamento.
- Evacuar áreas na direção do vento, desde que esta ação possa ser realizada com segurança e as condições do vazamento exponham a população a risco de vida.
- Se possível, deve ser feito o isolamento da fonte do vazamento por pessoa treinada para tal ação.
- Remover qualquer possível fonte de ignição.
- Caso haja formação de piscina, cobrir com espuma para reduzir a evaporação.
- Usar *sprays* de água para contenção de nuvens de gás. Nunca derramar água diretamente sobre os vazamentos.
- Os devidos cuidados devem ser tomados para evitar a contaminação de rios e lençóis freáticos.
- Informar as autoridades competentes em caso de contaminação de alguma fonte de água.

Embora recomendações de ordem geral como estas sejam importantes, planos de emergência demandam também dados quantitativos. Índices toxicológicos de emergência (ERPG, TEEL, PAC) precisam ser empregados para estabelecer parâmetros para determinar ou não a necessidade de evacuação. Estes índices são usados em conjunto com modelos de dispersão atmosférica de gases, apresentados no próximo capítulo. Essa abordagem quantitativa para o estabelecimento de planos de ação é exemplificada no estudo de caso no final deste trabalho.

Capítulo V – Metodologia

A análise de risco no transporte ferroviário de substâncias perigosas deve prever situações não desejáveis que possam ocorrer em caso de acidente. Para o caso da amônia, modelos de dispersão devem ser adequadamente desenvolvidos e utilizados para avaliar o impacto causado pelo vazamento.

Dois metodologias são discutidas a seguir, uma de base teórica, envolvendo cálculos manuais, e a outra utilizando o software de modelagem de dispersão atmosférica ALOHA (EPA). Ambas empregam o Modelo de Dispersão Gaussiano, porém o ALOHA também permite a utilização do Modelo de Gás Denso.

Acidentes envolvendo dispersão de produtos perigosos requerem o entendimento de diferentes aspectos. Primeiramente deve-se prevenir a ocorrência da liberação, e, caso o vazamento ocorra, devem-se minimizar seus efeitos sobre as vizinhanças, de forma a reduzir os impactos gerados. As etapas a serem consideradas quando do vazamento de um produto são: identificação do risco presente em caso de vazamento; desenvolvimento de um modelo de fonte adequado, que irá descrever a taxa e a forma como ocorre a liberação; e estimativa das concentrações de material na direção do vento, a diversas distâncias da fonte, empregando modelos de dispersão (Crowl e Louvar, 2002).

Modelos de dispersão atmosférica são empregados para descrever a forma como materiais tóxicos são transportados no ar desde a fonte até a vizinhança. O ponto de maior concentração do material será na fonte de liberação, e a tendência é de que essa concentração diminua à medida que o material é disperso pela influência dos ventos e das condições atmosféricas locais. Diversos parâmetros serão responsáveis pelo modo como o produto dispersará, dentre eles: a velocidade do vento; a estabilidade atmosférica; as condições do solo; a altura da fonte de liberação com relação ao solo; a taxa de liberação; e o empuxo exercido pelo ar sobre o vazamento (Crowl e Louvar, 2002).

No presente estudo considera-se o transporte de amônia em fase líquida, em tanques pressurizados e à temperatura ambiente. Nessas condições, quando um vazamento ocorre através de um furo, será observada uma queda de pressão até que o interior do vaso atinja a pressão ambiente. Tal queda de pressão será acompanhada da vaporização (*flash*) de parte de ou toda a amônia líquida. Assim, esta será liberada na forma de gás, à temperatura de saturação na pressão atmosférica (-33,33°C). Dependendo da localização do furo, porém, o *flash* poderá resultar na liberação de uma corrente bifásica, formada por um líquido finamente disperso ou aerossol (Che Hassan *et al.*, 2009). A equação v.1 estima a fração de amônia que

será vaporizada por ocorrência de *flash*. Essa estimativa, no entanto, em alguns casos subestima a real quantidade de amônia que será liberada para o ambiente, uma vez que não considera a formação da dispersão de líquido, que irá vaporizar subsequentemente.

$$f_v = \frac{C_p(T_S - T_B)}{\Delta H_V} \quad (\text{v.1})$$

onde,

f_v é a fração de líquido vaporizada;

C_p é calor específico da amônia líquida à pressão constante ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

T_S é a temperatura de armazenamento de amônia, antes da despressurização (K)

T_B é a temperatura de ebulição da amônia na pressão obtida após despressurização (K)

ΔH_V é o calor de vaporização da amônia líquida (J/Kg).

Kaiser & Walker (1978) citam frações de vapor da ordem de 20%, à temperatura ambiente, na faixa de temperatura esperada para o Reino Unido. A amônia remanescente seria resfriada, permanecendo na fase líquida, à temperatura de ebulição ($-33 \text{ }^\circ\text{C}$). Os autores explicam a liberação de gotículas de líquido pela instantânea queda de pressão dentro do tanque, que leva à ebulição brusca do conteúdo, causando o carregamento dessas gotículas juntamente com a fase vapor. Além disso, não é observada a queda de tais gotas de líquido em direção ao solo. As gotículas permanecem, portanto, em suspensão no ar.

Os autores citam ainda frações de amônia na forma de gotículas de líquido, que variam de 0 a 80% do total de massa de material transportado pelo ar. Tal variação seria resultado de inúmeros fatores, como a taxa de liberação de material, a posição do orifício pelo qual ocorre o vazamento, e a pressão de armazenamento de amônia. Quanto mais brusca for a liberação de amônia para o ambiente, maior será a quantidade de aerossol no material liberado. No que diz respeito à posição do furo, quanto mais abaixo do nível do líquido ele estiver, maior será a fração de líquido liberada na forma de gotículas. Por outro lado, quando o orifício se encontrar acima do nível do líquido, a quantidade de amônia na forma de líquido liberada poderá ser considerada próxima de zero. Nesse caso, segundo Griffiths & Kaiser (1982), pode-se considerar que, em se tratando de um furo pequeno, vapor puro será liberado, na velocidade do som.

Segundo Griffiths & Kaiser (1982), quando amônia é liberada para a atmosfera após a ocorrência de um vazamento, será observada a formação de uma mistura composta de vapor de amônia, gotículas finamente dispersas de amônia líquida (pura ou aquosa), e ar (com ou

sem gotículas de água condensada). A presença de ar na mistura afeta a densidade assumida pela nuvem formada. São observadas as seguintes condições:

- Mistura de vapor de amônia e ar: a densidade assumida pela composição será menor do que a densidade do ar no entorno;
- Fração inicial de líquido (F) entre 4 e 8% da mistura: existirá uma fração crítica entre esses valores, tal que, se F menor do que ela, a mistura será menos densa do que o ar no entorno;
- Fração inicial de líquido (F) entre 16 e 20%: existirá uma segunda fração crítica entre esses valores, tal que, se F maior do que ela, a mistura será mais densa do que o ar no entorno;
- Entre os dois valores críticos de F mencionados, a densidade da mistura será determinada pela umidade do ar, de modo que, quanto menor a umidade do ar, mais densa será a mistura.

O comportamento de mistura mais densa do que o ar, assumido em algumas circunstâncias, não é intuitivo, uma vez que o peso molecular da amônia (17 g gmol^{-1}) é menor do que o peso molecular do ar (29 g gmol^{-1}). Além disso, a densidade do vapor de amônia a $-33,33^\circ\text{C}$ (temperatura de saturação à pressão ambiente) é $0,9 \text{ kg m}^{-3}$, enquanto que a densidade do ar, à temperatura e pressão ambientes, é de $1,2 \text{ kg m}^{-3}$. As evidências sugerem, porém, que misturas de amônia e ar podem, na prática, ser mais densas do que o ar ambiente (Griffiths & Kaiser, 1982).

V.1 – Modelo Gaussiano

O Modelo Gaussiano é um modelo de dispersão utilizado para calcular a concentração de uma substância emitida, que se mistura com o ar. Existem dois tipos principais de dispersão: *puff* e pluma. O primeiro remete a uma quantidade fixa emitida instantaneamente por uma fonte, gerando uma nuvem que será dispersada, enquanto o segundo considera uma emissão contínua, formando uma pluma na direção do vento. O equacionamento apresentado a seguir foi obtido em Crowl e Louvar, 2002.

Para desenvolvimento do modelo considera-se a emissão de uma quantidade fixa de uma substância, adotando-se o centro do sistema de coordenadas na fonte do vazamento. Assumindo-se que não esteja ocorrendo reação química, a concentração da substância é dada pela equação v.2:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(u_j C)}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{v.2})$$

onde u_j é a soma da velocidade do vento nas direções x , y e z . Esta velocidade deve considerar a influência da turbulência para que a equação preveja corretamente a concentração. Por conta disto, usa-se uma aproximação que contabiliza as variações causadas pela turbulência utilizando uma flutuação estocástica da velocidade do vento:

$$u_j = \langle u_j \rangle + u'_j \quad (\text{v.3})$$

onde,

$\langle u_j \rangle$ – velocidade média

u'_j – flutuação estocástica

Esta consideração sugere a mesma abordagem para a concentração, por conta de sua dependência em relação à velocidade do vento:

$$C = \langle C \rangle + C' \quad (\text{v.4})$$

onde,

$\langle C \rangle$ – concentração média

C – flutuação estocástica

Substituindo as equações v.3 e v.4 na equação v.2, fazendo uma média em relação ao tempo total e admitindo que a média das flutuações seja zero, o resultado é a equação v.5:

$$\frac{\partial \langle C \rangle}{\partial t} + \frac{\partial (\langle u_j \rangle \langle C \rangle)}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u'_j C' \rangle}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{v.5})$$

Para tratar o termo $\langle u'_j C' \rangle$, proveniente das aproximações adotadas para contabilizar efeitos de turbulência, é usual definir uma difusividade *eddy*, através da equação v.6:

$$\langle u'_j C' \rangle = -K_j \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial x_j} \quad (\text{v.6})$$

Assumindo a atmosfera como incompressível ($\partial \langle u_j \rangle / \partial x_j = 0$), o resultado obtido é:

$$\frac{\partial \langle C \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_j \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial x_j} \right) \quad (\text{v.7})$$

A Figura V.1 mostra o sistema de eixos considerado para desenvolvimento do modelo de pluma.

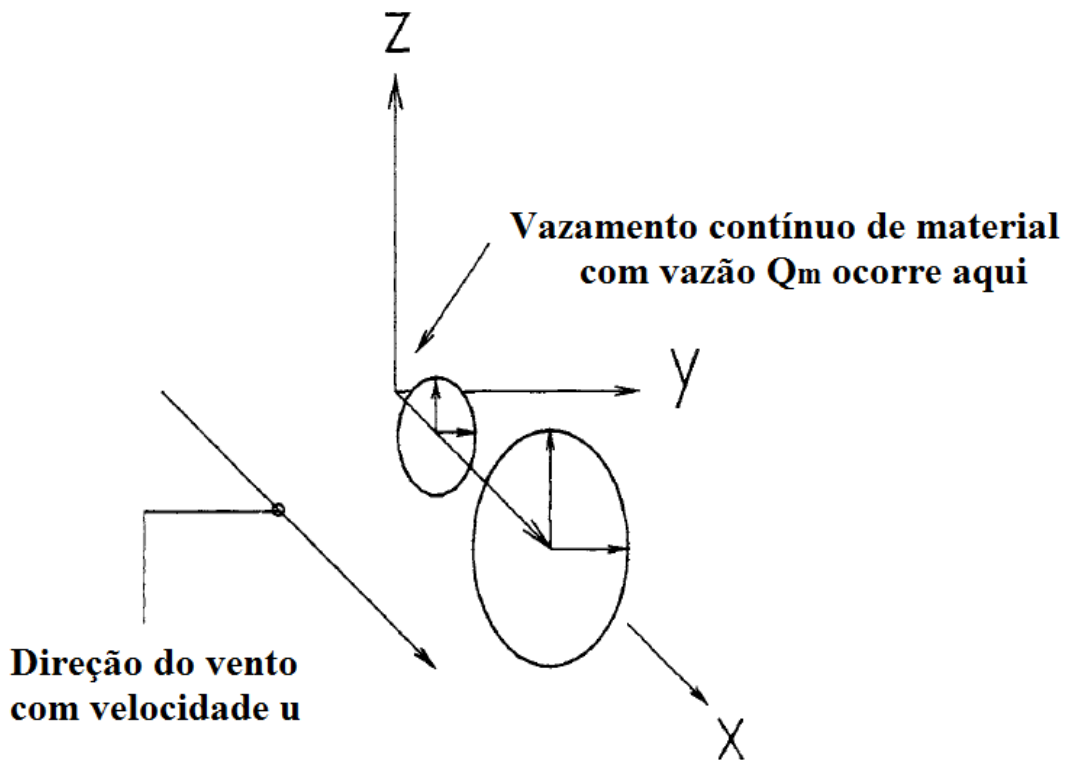


Figura 5.1 – Fonte contínua, estado estacionário, com vento. Eixo x é a direção do vento e eixo z é a direção vertical (alturas).

Adaptado de: Crowl e Louvar (2002)

A partir da equação v.7, vários cenários de dispersão podem ser avaliados, porém optou-se por demonstrar somente o caso de interesse. Este assume emissão contínua (taxa mássica Q_m , kg s^{-1} , constante); estado estacionário ($\partial\langle C \rangle / \partial t = 0$); vento na direção x ($\langle u_j \rangle = \langle u_x \rangle = u = \text{constante}$); difusividades *eddy* constantes mas diferentes para cada direção; pluma fina ($x^2 \gg y^2 + z^2$). Adotando estas considerações, a equação v.7 assume a forma:

$$u \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 \langle C \rangle}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \langle C \rangle}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 \langle C \rangle}{\partial z^2} \quad (\text{v.8})$$

e a solução desta equação diferencial sugerida é:

$$\langle C \rangle(x, y, z) = \frac{Q_m}{4\pi x \sqrt{K_x K_y}} \exp \left[-\frac{u}{4x} \left(\frac{y^2}{K_y} + \frac{z^2}{K_z} \right) \right] \quad (\text{v.9})$$

Considerando a posição da fonte junto ao solo, este representa uma superfície impenetrável, fazendo com que a concentração seja duas vezes maior do que a calculada pela equação v.9. Se a fonte estiver a uma altura H_f do solo, a solução da equação levaria à seguinte expressão:

$$\langle C \rangle(x, y, z) = \frac{Q_m}{4\pi x \sqrt{K_y K_z}} \exp\left(-\frac{uy^2}{4K_y x}\right) * \left\{ \exp\left[-\frac{u(z - H_r)^2}{4K_z x}\right] + \exp\left[-\frac{u(z + H_r)^2}{4K_z x}\right] \right\} \quad (\text{v.10})$$

A resolução fazendo-se uso das difusividades *eddy* é um artifício teórico interessante, porém em termos práticos este não é um valor fácil de obter, dificultando a utilização do modelo (Crowl e Louvar, 2002). Para resolver este problema foi proposta a definição de um coeficiente de dispersão, que contempla os desvios da concentração nas direções *x*, *y* e *z*, e que se mostra simples de se obter experimentalmente. Estes coeficientes são uma função das condições atmosféricas e da distância em relação à fonte. São utilizados no chamado Modelo de Dispersão de Pasquill-Gifford. As condições atmosféricas são divididas nas seis classes mostradas na Tabela 5.1, e dependem da velocidade do vento e exposição ao Sol. As equações para os coeficientes de dispersão são mostradas na Tabela 5.2.

Tabela 5.1 – Classes de Estabilidade Atmosférica para Uso com Modelo de Dispersão de Pasquill-Gifford.
Fonte: Crowl e Louvar (2002)

Velocidade Superficial do Vento (m/s)	Incidência Solar Diurna			Condições Noturnas	
	Forte	Moderada	Branda	Alta Nebulosidade	Baixa Nebulosidade
< 2	A	A – B	B	F	F
2 - 3	A – B	B	C	E	F
3 - 4	B	B – C	C	D	E
4 - 6	C	C – D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Classes de estabilidade:

- A: extremamente instável
- B: moderadamente instável
- C: levemente instável
- D: estabilidade neutra
- E: levemente estável
- F: moderadamente estável

O Modelo de Pasquill-Gifford desenvolvido por Pasquill utiliza o coeficiente de dispersão na forma:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{2} \langle C \rangle^2 (ut)^{2-n} \quad (\text{v.11})$$

Tabela 5.2 – Equações Recomendadas para Coeficiente de Dispersão Pasquill-Gifford para Dispersão do Tipo Pluma.

Fonte: Crowl e Louvar (2002)

Classes de Estabilidade de Paquill-Gifford	σ_y (m)	σ_z (m)
Ambiente Rural		
A	$0.22x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.20x$
B	$0.16x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1 + 0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.08x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1 + 0.0015x)^{-1/2}$
E	$0.06x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1 + 0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.016x(1 + 0.0003x)^{-1}$
Ambiente Urbano		
A – B	$0.32x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.24x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$
D	$0.22x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.20x$
D	$0.16x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.14x(1 + 0.0003x)^{-1/2}$
E – F	$0.11x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1 + 0.0015x)^{-1/2}$

A solução da equação diferencial utilizando o Modelo de Pasquill-Gifford com as mesmas condições utilizadas para se chegar à equação v.10 é mostrado na equação v.12.

$$\langle C \rangle(x, y, z) = \frac{Q_m}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] * \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z - H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z + H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (v.12)$$

Esta equação será a utilizada para calcular a distância em que será encontrada uma concentração pré-determinada de amônia. Assim, torna-se possível verificar o quanto um determinado cenário acidental envolvendo liberação desta substância para o meio ambiente afeta a população vizinha.

Nota-se que x será a variável independente, através da qual se calcula o valor de $\langle C \rangle$ (variável dependente). Para realização deste cálculo, é necessário conhecer Q_m , vazão mássica de vazamento de amônia ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$). Para este estudo foram consideradas as vazões médias fornecidas pelo software ALOHA, pois o desenvolvimento de modelos de fonte simplificados para explicar o vazamento provocaria um aumento do erro.

V.2 – ALOHA

O software ALOHA é uma ferramenta desenvolvida conjuntamente por duas entidades norte-americanas: a *Environmental Protection Agency* (EPA) e a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). A ferramenta emprega modelos para a avaliação da liberação de vapores químicos perigosos em cenários acidentais. Assim, pode ser usada no planejamento e avaliação de resposta a situações de emergência envolvendo produtos

químicos. Trata-se de uma ferramenta gratuita, que pode ser obtida no site da EPA. A ferramenta é composta ainda por uma base de dados com informações de mais de 6000 substâncias.

O ALOHA permite a modelagem da emissão de gases a partir de tanques pressurizados ou refrigerados. Algumas das limitações do programa conforme Reynolds (1992):

- Topografia: efeitos topográficos e meteorológicos não estão incluídos no modelo. Assume-se que a Terra é plana, e velocidade e direção do vento constantes em todas as posições;
- A máxima duração considerada pelo ALOHA para a emissão de gases é de uma hora;
- Não avalia os impactos causados para distâncias superiores a 10 km da fonte de emissão (truncamento de zonas de perigo que estejam a mais de 10 km de distância da fonte).

A utilização da ferramenta deve ser cautelosa, levando-se algumas limitações em consideração. Algumas circunstâncias podem produzir resultados duvidosos (Silva, 2007):

- Velocidades baixas de vento;
- Condições atmosféricas muito estáveis;
- Mudanças nas condições do vento, e efeitos resultantes de irregularidade do terreno;
- Concentração “em manchas”: não se apresenta como gradiente de concentração, principalmente próximo da fonte de emissão.

O modelo também não incorpora efeitos produzidos por reações químicas e pela presença de particulados.

Os seguintes *inputs* devem ser fornecidos para que o ALOHA possa proceder com a simulação de um acidente (Reynolds, 1992):

- Localização geográfica e tempo: a localização permite a obtenção da radiação solar que incide sobre o local da liberação, e a elevação permite o cálculo da pressão atmosférica;
- Definição do químico: determina todas as propriedades físico-químicas do material estudado;
- Informações atmosféricas: os parâmetros de interesse para a simulação de um caso são (i) classe de estabilidade, (ii) altura de inversão, (iii) velocidade do vento, (iv)

direção do vento, (v) temperatura do ar, (vi) rugosidade do solo, (vii) nebulosidade, e (viii) umidade;

- Definição da fonte: podem ser dos tipos (i) direta, (ii) piscina, (iv) tanque ou (v) tubulação. Para o caso estudado, os *inputs* que devem ser fornecidos são: forma do tanque (cilindro ou esfera), dimensões do tanque, tipo e dimensões do furo, localização do furo e nível de líquido;
- Modelo de dispersão atmosférica empregado: o programa dispõe de dois modelos para o desenvolvimento dos cálculos de concentração, sendo eles: Modelo de Gás Neutro (Gaussiano) e Modelo de Gás Denso. O ALOHA optará automaticamente pelo uso de um dos modelos, sendo possível que o usuário faça a escolha por um deles manualmente.

A apresentação dos resultados por parte do software pode se dar das seguintes formas:

(i) resumo em formato de texto com todos os *inputs* que foram dados, juntamente com os resultados obtidos para fonte e dispersão; (ii) diagramas das áreas afetadas pela dispersão, representando a divisão de regiões como função das concentrações tidas como preocupantes (*levels of concern*), previamente definidas; (iii) gráfico de concentração vs. tempo; e (iv) gráfico de dosagem vs. tempo. No diagrama que identifica as áreas vizinhas críticas, como função das concentrações, pode-se optar pela identificação dos erros associados às incertezas causadas por mudanças na direção do vento. Isso se revela pela presença de linhas tracejadas.

Capítulo VI – Estudo de Caso

Diante dos riscos presentes no transporte de amônia fica evidente a importância de simular os efeitos de um vazamento oriundo de acidente ferroviário. Este estudo tem por finalidade avaliar a dispersão do agente e consequente formação de nuvem tóxica, auxiliando na elaboração de planos de emergência para as localidades próximas às ferrovias que transportam o produto.

Objetivou-se simular acidentes em três diferentes localidades por onde passam ou futuramente passarão ferrovias interligando estados produtores de amônia e regiões agrícolas consumidoras.

VI.1 – Premissas

Para simular um cenário acidental algumas condições precisam ser definidas. São os valores necessários para que se possa proceder com os cálculos.

VI.1.1 – Localização

As regiões escolhidas para o estudo foram selecionadas por possuírem trechos ferroviários que interligam zonas produtoras de amônia com zonas consumidoras de fertilizantes nitrogenados. Nestes percursos, as ferrovias passam por cidades pequenas, médias e grandes, além de campos rurais abertos. Para esta avaliação, também é necessário considerar o período do dia, devido às diferenças provocadas pela incidência de raios solares. Assim, em dois casos optou-se pelo período noturno, enquanto no terceiro foi considerado período diurno.

Os dados climáticos foram retirados do site *weatherbase.com* para estimar velocidade e direção do vento, bem como elevação geográfica local, temperatura ambiente local e umidade relativa do ar. Para simulação no ALOHA, o ponto de medição da velocidade do vento foi adotado como próximo ao solo. Esta escolha influencia no perfil de velocidade observado em função da rugosidade do solo considerada. A opção selecionada é a mais conservadora, pois considera velocidades do vento maiores conforme o afastamento do solo.

A presença de nuvens tem mais influência quando considerado período diurno, pois afeta diretamente a intensidade da incidência de raios solares. A escolha foi baseada em dados de visibilidade locais.

As Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 mostram os mapas das localidades escolhidas para simular o acidente, em mesma escala.

VI.2.2 – Dimensões do Vagão-Tanque

As dimensões do vagão-tanque que transporta amônia determinam a quantidade do produto transportado. Para tanto, assume-se que o tanque estará respeitando todas as recomendações, sendo o equipamento adequado para o transporte.

O *Guidance for Transporting Ammonia by Rail* informa que os volumes usuais dos vagões-tanques para transporte de amônia variam entre 50 m^3 e 110 m^3 . Adota-se então o valor de 110 m^3 porque uma quantidade maior sendo transportada gera um cenário mais crítico em caso de acidente, com maior liberação de produto. A pressão no interior do tanque deve ser ligeiramente maior que a pressão de vapor da amônia na temperatura ambiente.

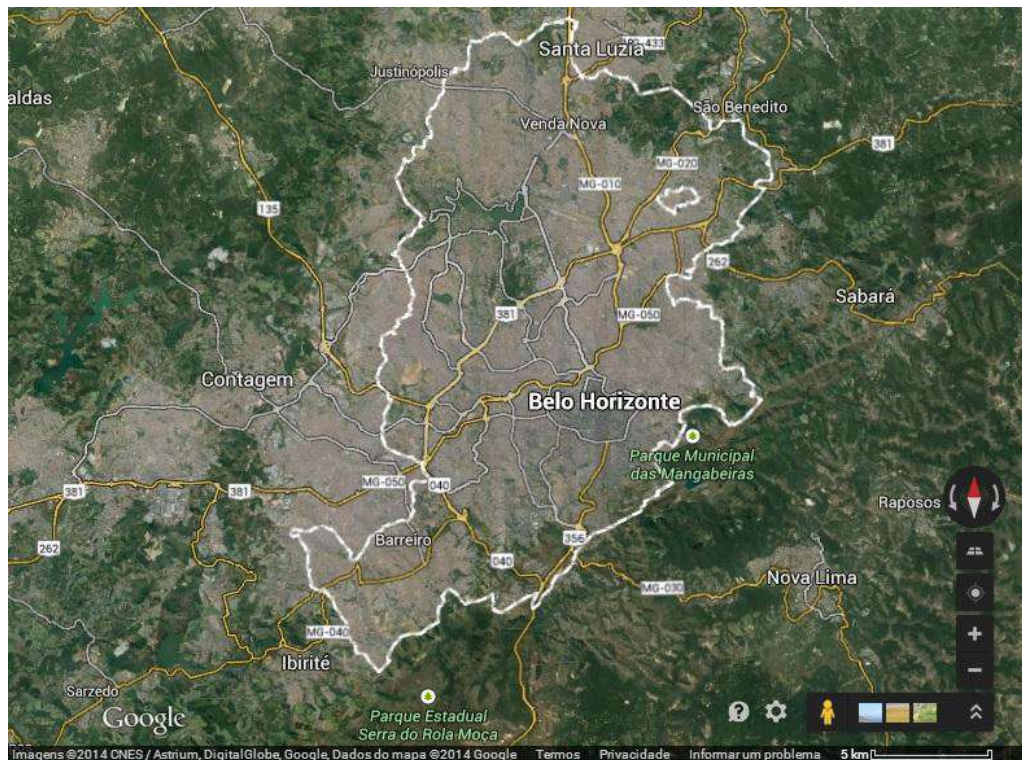


Figura 6.1 – Mapa da região de Belo Horizonte, MG.

Fonte: Google

A recomendação para carga máxima do vagão-tanque dependerá do seu tipo e da linha férrea por onde será transportado. O limite máximo de carregamento corresponde $0,53 \text{ kg/l}$ vezes o volume útil do tanque, mas também deve-se levar em conta o limite máximo de carga suportado pela linha férrea. O menor valor deve ser adotado como carga máxima. Como não foram encontradas informações de limitação de carga para vagões-tanque transportando gases liquefeitos, considerou-se a carga máxima permitida no carregamento (58.300 kg). As

dimensões do tanque foram estimadas a partir de dados de fabricantes de vagões-tanque para transporte de gases liquefeitos sob pressão (GATX).

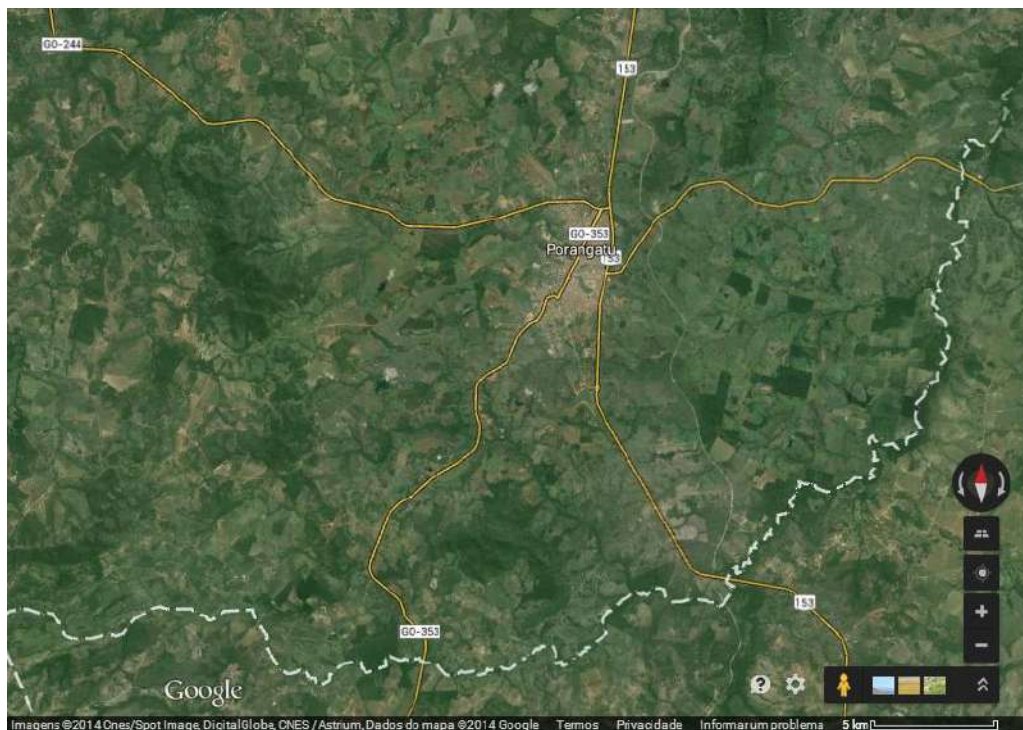


Figura 6.2 – Mapa da região de Porangatu, GO.
Fonte: Google

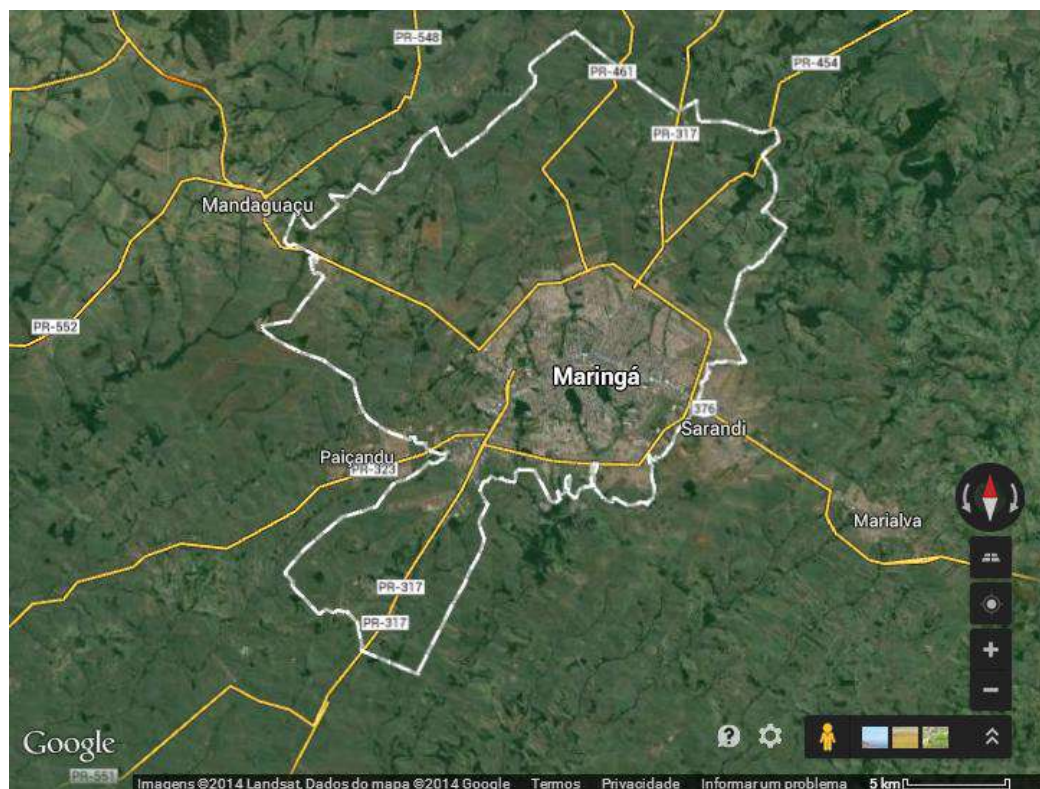


Figura 6.3 – Mapa da região de Maringá, PR.

VI.2.3 – Dimensões e Posições do Rasgo

As dimensões para cálculo da área do rasgo, ou furo, por onde ocorre o vazamento foram baseadas num acidente real ocorrido com uma composição que transportava GLP (Brambilla, 2010). O tipo de vagão-tanque para transporte de GLP e amônia são semelhantes, seguindo as mesmas regulamentações de construção.

Foram adotadas três posições onde poderia ocorrer o rasgo no caso de um acidente. Avaliando o descarrilamento e tombamento de um vagão-tanque, é razoável admitir que algum objeto presente próximo possa provocar o dano na estrutura do tanque. Isto provavelmente ocorreria na parte inferior, o que posicionaria o rasgo num ponto por onde haveria vazamento de líquido. Como a modelagem leva em conta esta posição, foram consideradas três possibilidades: (i) um rasgo na altura que equivalente a 15% de nível de líquido no interior do vagão-tanque; (ii) um rasgo na altura equivalente a 60% de nível de líquido; e (iii) um rasgo na altura equivalente a 95% de nível de líquido. A Figura 6.4 representa estas posições esquematicamente. Como a carga máxima permitida para o vagão-tanque corresponde ao nível máximo ocupado pelo líquido de 86.8% (dado obtido ao inserir a máxima quantidade de massa, 58.300 kg de amônia, nos *inputs* do ALOHA), tem-se que para o rasgo na Posição (iii) ocorrerá vazamento de gás.

Com base nas premissas supracitadas, a Tabela 5.3 sumariza os valores das variáveis consideradas para modelagem em cada uma das localidades escolhidas. A Tabela 5.4 trata das variáveis relativas ao vagão-tanque.

VI.2 – Resultados

Os resultados estão apresentados por localidade. Para simulação no ALOHA, os cálculos foram baseados na definição dos valores dos PACs 1, 2 e 3 para amônia, variando a altura do rasgo no tanque. Já para a realização dos cálculos em Mathcad assumindo Modelo Gaussiano de dispersão, optou-se por estimar as distâncias na direção do vento (x) para as quais seriam encontrados os valores dos PACs.

VI.2.1 – Maringá (PR)

A partir das informações e premissas adotadas, foram obtidos como resultados para a dispersão os diagramas das Figuras 6.5, 6.6 e 6.7. Estes definem as áreas afetadas como função de diferentes concentrações assumidas pela nuvem tóxica formada, à medida que ocorre a dispersão. Cada um dos três diagramas revela os resultados encontrados para as três

diferentes alturas do rasgo formado. As zonas afetadas são definidas pela influência das condições atmosféricas que se aplicam à cidade de Maringá (PR), e são divididas em:

- Vermelha: referente à concentração associada ao PAC – 3 (770 mg/m³);
- Laranja: referente à concentração associada ao PAC – 2 (110 mg/m³);
- Amarela: referente à concentração associada ao PAC – 1 (21 mg/m³).

As linhas tracejadas nos diagramas mostram a confiabilidade da direção do vento, para cada uma das zonas afetadas.

Tabela 5.3 – Variáveis para Modelagem de Dispersão

Variável	Belo Horizonte	Porangatu	Maringá
Elevação	916 m	396 m	542 m
Temperatura	20 °C	20 °C	24.5 °C
Umidade Relativa	68 %	78 %	75 %
Latitude	19 50 S	13 26 S	23 24 S
Longitude	43 56 W	49 9 W	51 55 W
Velocidade do Vento	2.22 m/s	1.11 m/s	1.38 m/s
Direção do Vento	ESSE	ESE	NNW
Tipo de Construção ⁽¹⁾	<i>Single Storied</i>	<i>Single Storied</i>	<i>Single Storied</i>
Arredor da Construção ⁽²⁾	<i>Unsheltered</i>	<i>Unsheltered</i>	<i>Unsheltered</i>
Rugosidade do Solo	Urbano/Floresta	Campo Aberto	Urbano/Floresta
Visibilidade/Insolação	Parcialmente Claro	Parcialmente Encoberto	Claro
Período do Dia	Noturno	Noturno	Diurno
Classe de Estabilidade	E	F	A

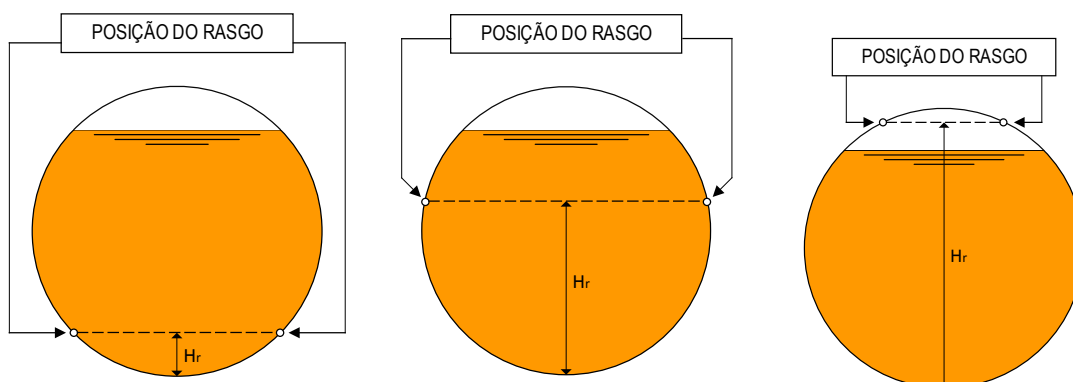
⁽¹⁾ O ALOHA necessita da determinação de um tipo de prédio, onde se estima a dispersão em seu interior. Prédios de mais de um andar apresentam maior dificuldade para uma boa dispersão.

⁽²⁾ Para considerar o pior caso, foi considerado que os arredores das construções mencionadas sejam abertos, sem edificações ou vegetação que dificultem a dispersão.

Tabela 5.4 – Dados Relativos ao Vagão-Tanque

Variável	Belo Horizonte	Porangatu	Maringá
Massa de Líquido	58,300 kg	58,300 kg	58,300 kg
Diâmetro do Tanque	3.00 m	3.00 m	3.00 m
Comprimento do Tanque	15.6 m	15.6 m	15.6 m
Volume do Tanque	110 m ³	110 m ³	110 m ³
Área do Rasgo	100 cm ²	100 cm ²	100 cm ²
Posição do Rasgo (Nível)	15 %, 60 %, 95 %	15 %, 60 %, 95 %	15 %, 60 %, 95 %
Altura do Rasgo	0.45 m	1.80 m	2.85 m

Os três diferentes casos abordados têm seus resultados indicados na Tabela 6.3. A partir das concentrações de amônia definidas pelos PACs 1, 2 e 3, calculam-se as distâncias para cada uma das zonas estabelecidas, sendo tais distâncias orientadas na direção do vento (direção “x”).



Posição (i) – $H_r = 0.45$ m Posição (ii) – $H_r = 1.80$ m Posição (iii) – $H_r = 2.85$ m

Figura 6.4 – Posições dos Rasgos no Vagão-Tanque

Por fim a Tabela 6.4 fornece informações acerca do modelo empregado pelo ALOHA para simular cada um dos casos, bem como o estado físico sob o qual a amônia liberada se encontra.

Por outro lado, os cálculos efetuados em Mathcad e empregando estritamente o Modelo Gaussiano de dispersão, estão detalhados a seguir. Nesse caso, os cálculos foram realizados para apenas uma das alturas do rasgo em relação ao fundo do tanque, equivalente à Posição (iii) citada anteriormente. Um resumo dos resultados encontrados para as distâncias referentes a cada uma das zonas afetadas, na direção do vento (direção “x”), está apresentado na Tabela 6.5. Destaca-se que a vazão Q_m considerada foi obtida a partir de dados fornecidos pelo ALOHA, tendo sido calculada através da divisão da quantidade total liberada, em kg, pela duração da liberação, em minutos.

As distâncias alcançadas pela nuvem, obtidas através dos cálculos efetuados em Mathcad foram aproximadamente equivalentes à metade daquelas obtidas através da simulação do vazamento no ALOHA. Ambas as metodologias empregadas consideraram Modelo Gaussiano, e deveriam, a princípio, revelar resultados semelhantes. Uma possível fonte de erro envolve vazão mássica de vazamento (Q_m) adotada. O valor de 185,45 kg/min foi obtido através da divisão da quantidade total liberada (*Total Amount Released*) pela duração da liberação (*Release Duration*), ambas fornecidas pelo ALOHA. A taxa de liberação

de amônia calculada desta forma pode ser interpretada como uma vazão média, constante ao longo de toda a duração do vazamento. Segundo informações do Manual do Usuário (2007) da ferramenta ALOHA, porém, a taxa de liberação é calculada com base em uma série de centenas de curtos intervalos de tempo, considerando a variação desse parâmetro ao longo do tempo. Cada um dos intervalos representa uma taxa de liberação, que é mantida ao longo de determinada quantidade de tempo. Quanto maior a variação do parâmetro mais curto será o intervalo considerado. A estratégia de cálculo empregada pelo ALOHA é de obter médias dessa série de diversas taxas de liberação, levando à geração de um a cinco valores, cada um dos quais calculados ao longo do período de pelo menos 1 minuto. A média mais alta será fornecida pela ferramenta, sendo a chamada taxa de liberação média sustentada máxima (*Maximum Average Sustained Release Rate*). Esse valor foi de 573 kg/min, para uma altura do rasgo na Posição (iii). O ALOHA utiliza apenas as médias calculadas para estimar as zonas afetadas. Segundo informações do manual, quando se tem a liberação de um produto químico armazenado sob pressão, a queda da taxa de liberação pode ocorrer muito rapidamente (no intervalo de segundos), à medida que a queda de pressão dentro do tanque ocorre. Nesses casos, a taxa de liberação inicial alcançada é muito maior que a taxa de liberação média sustentada máxima. Desse modo, observa-se que a ferramenta considera variações da taxa de liberação ao longo do tempo, variações essas que não foram consideradas para o cálculo da dispersão efetuados à mão. Poderia ser inferido, com isso, que a taxa de liberação considerada foi subestimada, e que a taxa de liberação Q_m deve ser, na verdade, um valor entre aquele que foi considerado, e a taxa de liberação média sustentada máxima. Tal consideração poderia compensar a diferença observada entre as distâncias obtidas nas duas abordagens empregadas, à medida que uma maior taxa vazada implicaria em maiores distâncias para que se alcançasse os PACs considerados em cada uma das zonas afetadas.

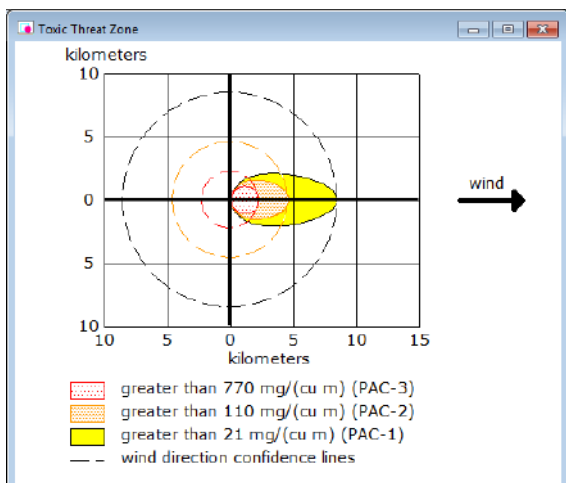


Figura 6.5 – ALOHA – Rasgo na Posição (i)

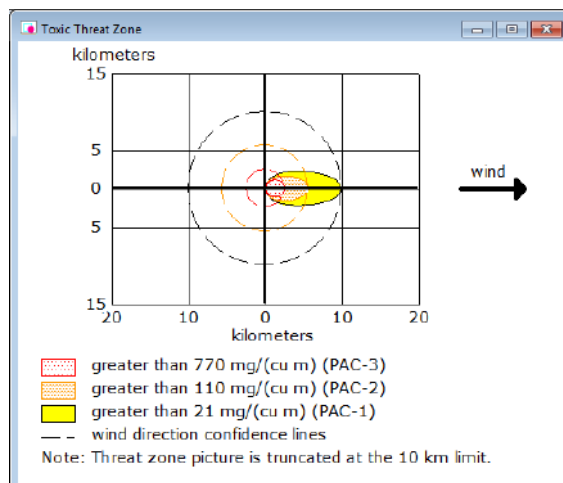


Figura 6.6 – ALOHA – Rasgo na Posição (ii)

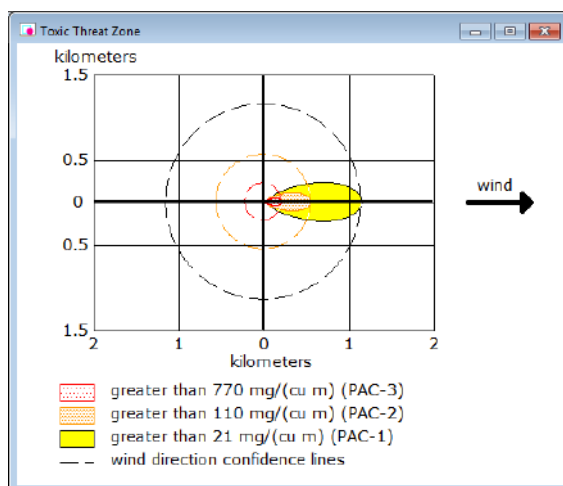


Figura 6.7 – ALOHA – Rasgo na Posição (iii)

Tabela 6.3. Distâncias das Áreas Impactadas

PAC / Altura do rasgo	Distância na direção do vento (km)		
	15% (0,45 m)	60% (1,80 m)	95% (2,85 m)
PAC – 1 (21 mg/m ³)	8,6	> 10	1,2
PAC – 2 (110 mg/m ³)	4,7	5,6	0,558
PAC – 3 (770 mg/m ³)	2,2	2,5	0,222

Tabela 6.4. Informações da Simulação

	15% (0,45 m)	60% (1,80 m)	95% (2,85 m)
Modelo	Gás Denso	Gás Denso	Gaussiano
Estado Físico de Liberação da Amônia	Mistura de gás e aerossol	Mistura de gás e aerossol	Gás

Cálculo para rasgo conforme Posição (iii), PAC 1

$$Q_m := 185.45 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \quad x := 695\text{m} \quad x_1 := 695 \quad y := 0\text{m} \quad z := 0\text{m} \quad u := 1.38 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad H_r := 2.85\text{m}$$

$$\sigma_y := 0.32 \cdot x \cdot (1 + 0.0004 \cdot x_1)^{-0.5} \quad \sigma_z := 0.24 \cdot x \cdot (1 + 0.0001 \cdot x_1)^{0.5}$$

$$C_{\text{PAC1}} := \frac{Q_m}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot e^{-0.5 \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \cdot \left[e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z-H_r}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z+H_r}{\sigma_z}\right)^2} \right]$$

$$C_{\text{PAC1}} = 2.101 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Cálculo para rasgo conforme Posição (iii), PAC 2

$$Q_m := 185.45 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \quad x := 296\text{m} \quad x_1 := 296 \quad y := 0\text{m} \quad z := 0\text{m} \quad u := 1.38 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad H_r := 2.85\text{m}$$

$$\sigma_y := 0.32 \cdot x \cdot (1 + 0.0004 \cdot x_1)^{-0.5} \quad \sigma_z := 0.24 \cdot x \cdot (1 + 0.0001 \cdot x_1)^{0.5}$$

$$C_{\text{PAC2}} := \frac{Q_m}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot e^{-0.5 \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \cdot \left[e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z-H_r}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z+H_r}{\sigma_z}\right)^2} \right]$$

$$C_{\text{PAC2}} = 1.103 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Cálculo para rasgo conforme Posição (iii), PAC 3

$$Q_m := 185.45 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \quad x := 110\text{m} \quad x_1 := 110 \quad y := 0\text{m} \quad z := 0\text{m} \quad u := 1.38 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad H_r := 2.85\text{m}$$

$$\sigma_y := 0.32 \cdot x \cdot (1 + 0.0004 \cdot x_1)^{-0.5} \quad \sigma_z := 0.24 \cdot x \cdot (1 + 0.0001 \cdot x_1)^{0.5}$$

$$C_{\text{PAC3}} := \frac{Q_m}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot e^{-0.5 \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \cdot \left[e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z-H_r}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z+H_r}{\sigma_z}\right)^2} \right]$$

$$C_{\text{PAC3}} = 7.751 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tabela 6.5. Distâncias das Áreas Impactadas

PAC Altura do rasgo	Distância na direção do vento (km)
	95% (2,85 m)
PAC – 1 (21 mg/m ³)	0,695
PAC – 2 (110 mg/m ³)	0,296
PAC – 3 (770 mg/m ³)	0,110

VI.2.2 – Belo Horizonte (MG)

Os mesmos cálculos foram realizados para as condições atmosféricas referentes à cidade de Belo Horizonte (MG), e os resultados são apresentados nas Figuras 6.8, 6.9 e 6.10, e nas Tabelas 6.6 e 6.7. Para a simulação em ALOHA foram consideradas, da mesma forma que em Maringá, três diferentes alturas do rasgo. As alturas adotadas são as mesmas que no caso anterior.

A sequência de cálculo em Mathcad adotada para a obtenção das distâncias de cada uma das zonas afetadas pela dispersão empregando o Modelo Gaussiano foi a mesma explicada para o caso de Maringá. Nesse caso, optou-se por avaliar as consequências da liberação de amônia quando o rasgo formado estava a uma altura referente à Posição (i). Os resultados encontrados estão listados na Tabela 6.8.

A comparação entre os resultados obtidos empregando-se as duas metodologias, no caso de Belo Horizonte, revelou resultados mais próximos, ainda que, neste caso, a avaliação considerasse dois modelos diferentes: o ALOHA empregou Modelo de Gás Denso, enquanto os cálculos em Mathcad foram realizados considerando-se Modelo Gaussiano. Os resultados apresentados demonstram que o modelo Gaussiano produziu distâncias menores do que aquelas obtidas pela simulação em ALOHA, assim como no caso de Maringá. Nesse caso, também poderia ser considerada a influência exercida pela taxa de liberação adotada, que não considera variações no tempo. Pode-se considerar, assim como no caso de Maringá, que essa taxa teria sido subestimada, mascarando as reais distâncias alcançadas para cada zona afetada, quando da dispersão da nuvem. A taxa de liberação média sustentada máxima (*Maximum Average Sustained Release Rate*) calculada pelo ALOHA, para o rasgo a uma altura de 15% acima do fundo do tanque, foi de 11.200 kg/min, contra uma taxa média adotada de 3.177,94 kg/min.

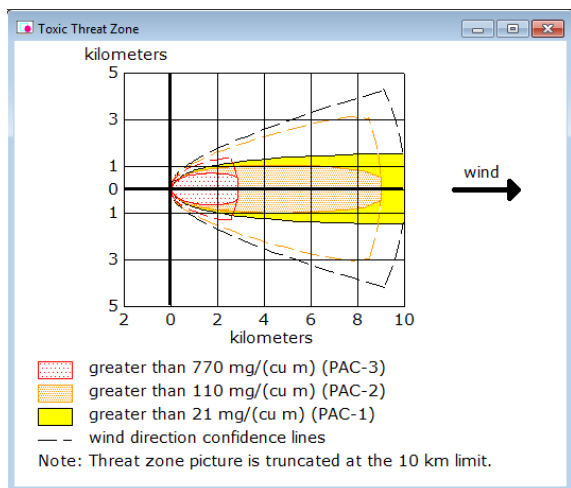


Figura 6.8 – ALOHA – Rasgo na Posição (i)

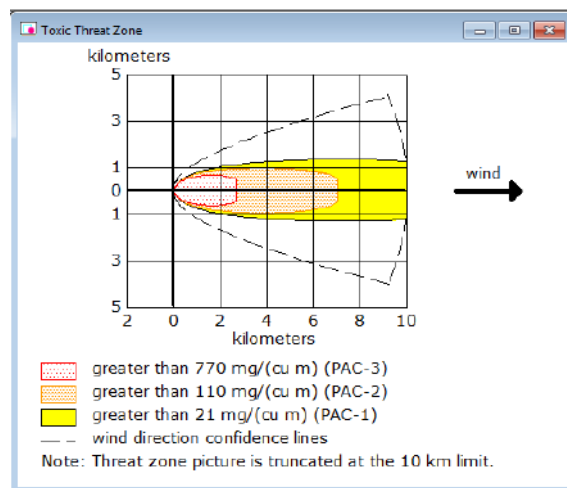


Figura 6.9 – ALOHA – Rasgo na Posição (ii)

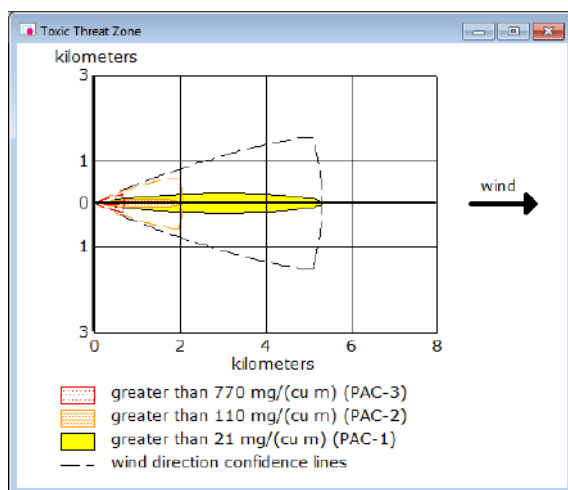


Figura 6.10 – ALOHA – Rasgo na Posição (iii)

Tabela 6.6. Distâncias das Áreas Impactadas

PAC / Altura do rasgo	Distância na direção do vento (km)		
	15% (0,45 m)	60% (1,80 m)	95% (2,85 m)
PAC – 1 (21 mg/m ³)	> 10	> 10	5,3
PAC – 2 (110 mg/m ³)	9,0	7,1	2,1
PAC – 3 (770 mg/m ³)	2,9	2,7	0,691

Tabela 6.7. Informações da Simulação

	15% (0,45 m)	60% (1,80 m)	95% (2,85 m)
Modelo	Gás Denso	Gás Denso	Gaussiano
Estado Físico de Liberação da Amônia	Mistura de gás e aerossol	Mistura de gás e aerossol	Gás

Cálculo para rasgo conforme Posição (i), PAC 1

$$Q_m := 3177.94 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \quad x := 33.3\text{km} \quad x_1 := 33300 \quad y := 0\text{m} \quad z := 0\text{m} \quad u := 2.22 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad H_r := 0.45\text{m}$$

$$\sigma_y := 0.11 \cdot x \cdot (1 + 0.0004 \cdot x_1)^{-0.5} \quad \sigma_z := 0.08 \cdot x \cdot (1 + 0.0015 \cdot x_1)^{-0.5}$$

$$C_{\text{PAC1}} := \frac{Q_m}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot e^{-0.5 \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \cdot \left[e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z-H_r}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z+H_r}{\sigma_z}\right)^2} \right]$$

$$C_{\text{PAC1}} = 2.102 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Cálculo para rasgo conforme Posição (i), PAC 1

$$Q_m := 3177.94 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \quad x := 7.3\text{km} \quad x_1 := 7300 \quad y := 0\text{m} \quad z := 0\text{m} \quad u := 2.22 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad H_r := 0.45\text{m}$$

$$\sigma_y := 0.11 \cdot x \cdot (1 + 0.0004 \cdot x_1)^{-0.5} \quad \sigma_z := 0.08 \cdot x \cdot (1 + 0.0015 \cdot x_1)^{-0.5}$$

$$C_{\text{PAC2}} := \frac{Q_m}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot e^{-0.5 \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \cdot \left[e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z-H_r}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z+H_r}{\sigma_z}\right)^2} \right]$$

$$C_{\text{PAC2}} = 1.108 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Cálculo para rasgo conforme Posição (i), PAC 3

$$Q_m := 3177.94 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \quad x := 1.64\text{km} \quad x_1 := 1640 \quad y := 0\text{m} \quad z := 0\text{m} \quad u := 2.22 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad H_r := 0.45\text{m}$$

$$\sigma_y := 0.11 \cdot x \cdot (1 + 0.0004 \cdot x_1)^{-0.5} \quad \sigma_z := 0.08 \cdot x \cdot (1 + 0.0015 \cdot x_1)^{-0.5}$$

$$C_{\text{PAC3}} := \frac{Q_m}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot e^{-0.5 \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \cdot \left[e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z-H_r}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z+H_r}{\sigma_z}\right)^2} \right]$$

$$C_{\text{PAC3}} = 7.68 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tabela 6.8. Distâncias das Áreas Impactadas

PAC	Altura do rasgo	Distância na direção do vento (km)
		15% (0,45 m)
PAC – 1 (21 mg/m ³)		33,30
PAC – 2 (110 mg/m ³)		7,30
PAC – 3 (770 mg/m ³)		1,64

VI.2.3 – Porangatu (GO)

Realizando os mesmos cálculos que nos casos anteriores para as condições atmosféricas referentes à cidade de Porangatu (GO), foram obtidos os resultados apresentados nas Figuras 6.11, 6.12 e 6.13, e nas Tabelas 6.9 e 6.10. Para a simulação em ALOHA foram consideradas, da mesma forma que em Belo Horizonte e Maringá, três diferentes alturas do rasgo.

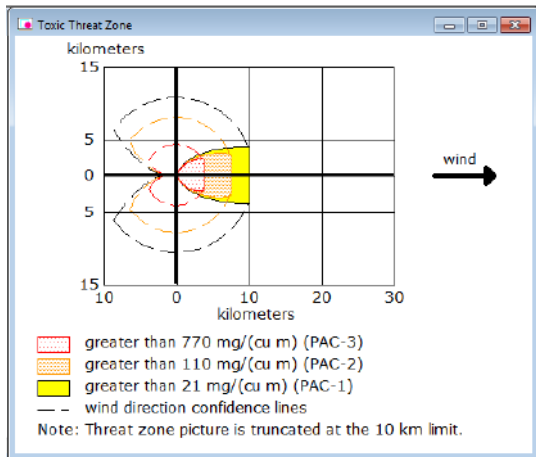


Figura 6.11 – ALOHA – Rasgo na Posição (i)

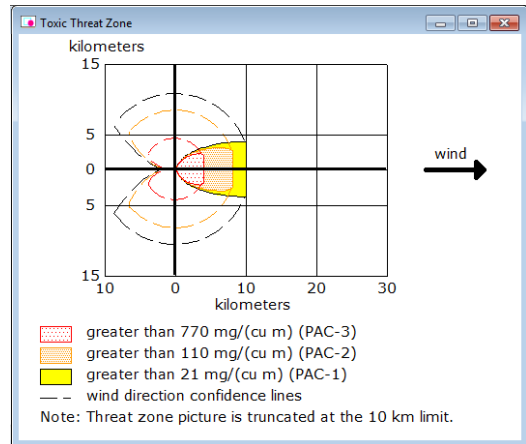


Figura 6.12 – ALOHA – Rasgo na Posição (ii)

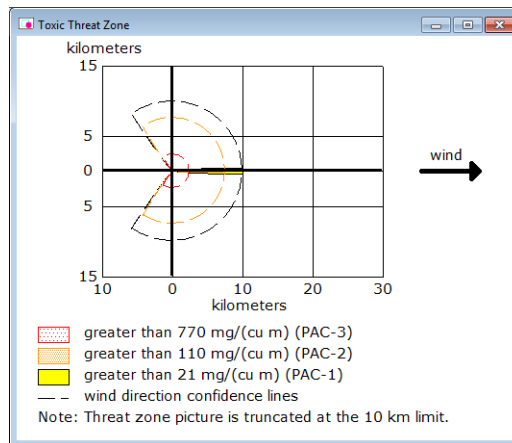


Figura 6.13 – ALOHA – Rasgo na Posição (iii)

Tabela 6.9. Distâncias das Áreas Impactadas

PAC Altura do rasgo	Distância na direção do vento (km)		
	15% (0,45 m)	60% (1,80 m)	95% (2,85 m)
PAC – 1 (21 mg/m ³)	> 10	> 10	> 10
PAC – 2 (110 mg/m ³)	7,6	8,1	7,6
PAC – 3 (770 mg/m ³)	3,8	4,0	2,5

Tabela 6.10. Informações da Simulação

	15% (0,45 m)	60% (1,80 m)	95% (2,85 m)
Modelo	Gás Denso	Gás Denso	Gaussiano
Estado Físico de Liberação da Amônia	Mistura de gás e aerossol	Mistura de gás e aerossol	Gás

Adotando-se a mesma sequência de cálculo empregada anteriormente, para a obtenção das distâncias de cada uma das zonas afetadas pela dispersão, nos cálculos realizados em Mathcad, e utilizando o Modelo Gaussiano, constrói-se a Tabela 6.11. Nesse caso, optou-se por avaliar as consequências da liberação de amônia quando o rasgo formado estava na posição equivalente à Posição (ii).

Observa-se nesse caso que as distâncias obtidas quando se considerou Modelo Gaussiano foram maiores do que aquelas encontradas quando se considerou Modelo de Gás Denso (ALOHA). Esse resultado foi diferente daquele encontrado nos casos anteriores, para os quais se justificou as menores distâncias obtidas pelo Modelo Gaussiano, pela taxa de liberação Q_m adotada. Neste caso, uma possível explicação para as menores distâncias observadas para cada uma das zonas de impacto utilizando o ALOHA pode ser resultado da forma como a dispersão ocorre nos casos em que o Modelo de Gás Denso é adotado. Segundo informações obtidas no Manual do ALOHA (2007), a dispersão inclui dois fenômenos: advecção, responsável pela movimentação horizontal da nuvem na direção do vento (*downwind*); e difusão, responsável pela propagação na direção perpendicular à direção do vento (*crosswind*), e direção vertical. No caso da dispersão que assume Modelo de Gás Denso, existe ainda outra influência: propagação na direção oposta à direção do vento (*upwind*). Essa influência pode ter sido mais crítica neste caso, à medida que a dispersão na direção oposta ao vento pode ter impedido que a nuvem se movimentasse horizontalmente na direção do vento, diminuindo as distâncias alcançadas para cada uma das zonas afetadas.

Cálculo para rasgo conforme Posição (ii), PAC 1

$$Q_m := 695.5 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \quad x := 566\text{km} \quad x_1 := 566000 \quad y := 0\text{m} \quad z := 0\text{m} \quad u := 1.11 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad H_r := 1.8\text{m}$$

$$\sigma_y := 0.04 \cdot x \cdot (1 + 0.0001 \cdot x_1)^{-0.5} \quad \sigma_z := 0.016 \cdot x \cdot (1 + 0.0003 \cdot x_1)^{-1}$$

$$C_{\text{PAC1}} := \frac{Q_m}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot e^{-0.5 \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \cdot \left[e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z-H_r}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z+H_r}{\sigma_z}\right)^2} \right]$$

$$C_{\text{PAC1}} = 2.1 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Cálculo para rasgo conforme Posição (ii), PAC 2

$$Q_m := 695.5 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \quad x := 32\text{km} \quad x_1 := 32000 \quad y := 0\text{m} \quad z := 0\text{m} \quad u := 1.11 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad H_r := 1.8\text{m}$$

$$\sigma_y := 0.04 \cdot x \cdot (1 + 0.0001 \cdot x_1)^{-0.5} \quad \sigma_z := 0.016 \cdot x \cdot (1 + 0.0003 \cdot x_1)^{-1}$$

$$C_{\text{PAC2}} := \frac{Q_m}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot e^{-0.5 \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \cdot \left[e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z-H_r}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z+H_r}{\sigma_z}\right)^2} \right]$$

$$C_{\text{PAC2}} = 1.101 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Cálculo para rasgo conforme Posição (ii), PAC 3

$$Q_m := 695.5 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \quad x := 4.29\text{km} \quad x_1 := 4290 \quad y := 0\text{m} \quad z := 0\text{m} \quad u := 1.11 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad H_r := 1.8\text{m}$$

$$\sigma_y := 0.04 \cdot x \cdot (1 + 0.0001 \cdot x_1)^{-0.5} \quad \sigma_z := 0.016 \cdot x \cdot (1 + 0.0003 \cdot x_1)^{-1}$$

$$C_{\text{PAC3}} := \frac{Q_m}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot e^{-0.5 \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \cdot \left[e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z-H_r}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z+H_r}{\sigma_z}\right)^2} \right]$$

$$C_{\text{PAC3}} = 7.702 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tabela 6.11. Distâncias das Áreas Impactadas

PAC / Altura do rasgo	Distância na direção do vento (km)	
	60% (1,8 m)	
PAC – 1 (21 mg/m ³)	566,0	
PAC – 2 (110 mg/m ³)	32,0	
PAC – 3 (770 mg/m ³)	4,29	

Outro fator que permite inferir sobre as distâncias alcançadas quando se considera Modelo Gaussiano ou Modelo de Gás Denso, é a estabilidade atmosférica. Segundo o Manual do ALOHA (2007), tipicamente, quando a atmosfera é mais estável (classes de estabilidade E e F), as distâncias encontradas para cada uma das zonas afetadas, obtidas a partir do Modelo Gaussiano, são maiores do que aquelas obtidas para Modelo de Gás Denso.

VI.3 – Comparação entre Localidades

Quando se compara os resultados obtidos a partir da simulação em ALOHA, para cada uma das três localidades, tem-se a Tabela 6.12.

Tabela 6.12. Distâncias das Áreas Impactadas

PAC / Altura do rasgo	Distância na direção do vento (km)								
	15% (0,45 m)			60% (1,80 m)			95% (2,85 m)		
	MA	BH	PO	MA	BH	PO	MA	BH	PO
PAC – 1 (21 mg/m ³)	8,6	> 10	> 10	> 10	> 10	> 10	1,2	5,3	> 10
PAC – 2 (110 mg/m ³)	4,7	9,0	7,6	5,6	7,1	8,1	0,558	2,1	7,6
PAC – 3 (770 mg/m ³)	2,2	2,9	3,8	2,5	2,7	4,0	0,222	0,691	2,5

Os resultados obtidos para as distâncias das zonas afetadas quando a posição do rasgo é definida pela Posição (iii) foram menores quando comparados com os resultados referentes às (i) e (ii) para cada uma das localidades. Isso pode ser explicado segundo dados fornecidos pelo Manual do ALOHA (2007), que explicam que, quando se tem a liberação de uma mistura de gás e aerossol, a vazão de liberação mássica observada é muito maior do que aquela para liberação de gás puro. Todas as simulações para o rasgo à altura de 95% empregaram Modelo Gaussiano com liberação de gás puro. Além disso, sabe-se que a taxa de liberação influencia diretamente nas zonas afetadas. No que diz respeito aos resultados obtidos para rasgos posições (i) e (ii), em que o ALOHA empregou Modelo de Dispersão de Gás Denso, pode ser

observado que, em geral, as distâncias aumentaram quando o rasgo passou da altura de 0,45 m para a altura de 1,8 m. Segundo Reynolds (1992), o ALOHA simplifica a vaporização (*flashing process*), assumindo que, quando exposto a uma queda de pressão, o líquido se transforma instantaneamente em uma espuma homogênea, com propriedades semelhantes as de um gás, e com densidade uniforme. A espuma deixa o tanque na forma de um aerossol. Nesse contexto, não se pode comparar os dois casos referidos (posições (i) e (ii)) com base na consideração de que a taxa de liberação do produto químico é função da coluna de líquido acima do furo. Não é instintivo, portanto, que se assuma que, quanto mais próximo do fundo do tanque estiver o furo, maior será a taxa de liberação envolvida, influenciando diretamente nas zonas impactadas. Segundo o Manual do ALOHA (2007), amônia e cloro são tratados de uma maneira um pouco diferente daquela que se trata gases liquefeitos sobre pressão em geral. Isso porque a ferramenta possui informações suficientes sobre esses dois produtos, permitindo cálculos mais refinados para a intensidade da fonte. Além disso, segundo Crowl e Louvar (2002) o Modelo de Gás Denso é um modelo desenvolvido através de análise dimensional, e correlações existentes a partir de dados empíricos sobre a dispersão de nuvens densas, não sendo tão imediata a correlação entre taxa de liberação e PACs, como no caso do Modelo Gaussiano.

De acordo com as premissas utilizadas, pode-se avaliar a influência da estabilidade atmosférica nas distâncias observadas para cada uma das zonas afetadas. *Inputs* como velocidade do vento, visibilidade, data e período do dia, ajudam a definir a estabilidade atmosférica. Observa-se que as menores distâncias para cada uma das zonas de impacto foram aquelas encontradas em Maringá, uma vez que essa cidade apresenta baixa estabilidade atmosférica (classe A), em comparação com as outras cidades estudadas, cuja estabilidade é alta (classes E e F). Sabe-se que quanto menor a estabilidade atmosférica, maior a turbulência do ar, o que leva à diluição mais rápida da nuvem de poluente, fazendo com que as distâncias para que se atinja determinada concentração (PAC) diminuam.

Capítulo VII – Conclusão

O desenvolvimento da infraestrutura e a construção de ferrovias sugere uma ação recente do governo em busca da ampliação do modal ferroviário no país. As estruturas das novas ferrovias que já estão sendo construídas visam à interligação com ferrovias já existentes, e buscam integrar pólos produtores de diversos artigos, sejam produtos químicos, alimentos, minérios, derivados de petróleo, etc. São obras dispendiosas e longas, mas que mostram uma futura integração necessária para o país. O território brasileiro é muito extenso, com áreas produtoras espalhadas por diversas regiões do país, o que sugere um modal ferroviário como melhor alternativa de transporte de cargas. Assim, consegue-se transportar grandes volumes a grandes distâncias em espaços reduzidos de tempo, se comparados com o modal rodoviário.

Em termos de segurança, os dados apresentados sugerem a menor quantidade de acidentes ferroviários em relação aos acidentes rodoviários, mesmo se considerar a proporção de uso relativa entre os modais. Este é um comportamento esperado, uma vez que nas rodovias estão presentes muito mais fatores externos que podem contribuir para a ocorrência de acidentes. O ponto negativo para o modal ferroviário está na intensidade dos efeitos causados por um acidente, afinal este modal permite o transporte de volumes muito elevados.

Para usufruir com segurança dos benefícios do transporte ferroviário, é necessária uma legislação efetiva, regulamentando os processos envolvidos neste tipo de transporte. Desta forma, determinam-se diretrizes que visam à redução do risco. Esta regulamentação deve ser ainda mais rigorosa quando o tema é o transporte de produtos perigosos.

Neste contexto, a amônia surge como produto de interesse para o transporte em território brasileiro, vista sua utilização na indústria de fertilizantes. Como a amônia é um gás, a forma mais econômica de transporte é através da liquefação por alta pressão, o que permite aumentar a capacidade de transporte. A toxicidade da amônia contribui para a elevação do risco potencial de liberação no caso de um acidente. Sua classificação de acordo com convenções internacionais como gás tóxico e corrosivo demanda uma extensa compreensão do seu comportamento quando liberada em grandes quantidades na atmosfera.

A identificação dos meios e equipamentos para o transporte ferroviário de amônia deve seguir a regulamentação existente (Resolução 420 da ANTT), de forma que visualmente já se crie a noção do cuidado necessário para este tipo de operação.

A elaboração de planos de emergência é de extrema importância para garantir a qualidade e confiabilidade do serviço de transporte. Observou-se que a legislação não

especifica como estes planos devem ser desenvolvidos, porém fontes externas, como o *Guidance for Transporting Ammonia by Rail* da EFMA, se mostram úteis.

Os estudos de caso apresentados, que contemplam modelagens da dispersão de amônia em caso de acidente, mostram o quanto as condições locais podem influenciar no impacto sofrido pela região. Assim, entende-se que um plano de emergência pode ser válido para uma localidade, porém não ser efetivo para outra. Além disso, deve-se compreender a que distância o vazamento pode causar efeitos nocivos, de forma a monitorar corretamente as regiões atingidas.

Os resultados, que se mostram diferentes para cada tipo de metodologia, sugerem que este tipo de estudo não é trivial. Muito cuidado deve ser tomado ao adotar as premissas que serão utilizadas para modelagem de acidentes. Dados ambientais estimados devem ser medidos nas regiões onde se deseja avaliar. A compreensão das condições de estabilidade da atmosfera, bem como do tipo de região em que se estudam os efeitos do acidente podem afetar de forma significativa os resultados.

Referências Bibliográficas

- AAR (Association of American Railroads). Hazardous Material Transportation. Disponível em: < <https://www.aar.org/safety/Pages/Hazardous-Materials-Transportation.aspx#.U9WRhJRdXmt>>. Acesso em: 12 Jul. 2014.
- AIHA (American Industrial Hygiene Association). Current ERPG Values. 2013 ERPG/WEEL Handbook. American Industrial Hygiene Association Guideline Foundation, Disponível em: <<https://www.aiha.org/get-involved/AIHAGuidelineFoundation/EmergencyResponsePlanningGuidelines/Documents/2013ERPGValues.pdf>>. Acessado em 24 Jun. 2014.
- AIHA (American Industrial Hygiene Association). Procedures and Responsibilities. AIHA ERP Committee, November 2006. Disponível em: <<https://www.aiha.org/get-involved/AIHAGuidelineFoundation/EmergencyResponsePlanningGuidelines/Documents/ERP-SOPs2006.pdf>>. Acesso em 24 Jun. 2014.
- ANDA (Associação Nacional para Difusão de Adubos). Investimentos no Brasil. Julho 2011. Disponível em: < www.anda.org.br/multimidia/investimentos.pdf>. Acesso em: 12 Jul. 2014.
- ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres). Anuário Estatístico dos Transportes Terrestres - AETT/2009. Disponível em: < http://appweb2.antt.gov.br/InformacoesTecnicas/aett/aett_2009/principal.asp>. Acesso em 29 Abr. 2014.
- ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres). Evolução do Transporte Ferroviário. Superintendência de Infraestrutura e Serviços de Transporte Ferroviário de Cargas – SUFER, Gerência de Regulação e Outorga de Infraestrutura e Serviços de Transporte Ferroviário de Carga – GEROF. Brasília, 2014.
- APPL, M.: Ammonia, Production. In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH & Co. KGaA. Dannstadt, 2006.
DOI: 10.1002/14356007.a02_143.pub2
- ARAÚJO, M. Um Histórico do Sistema Ferroviário Brasileiro. Disponível em: <<http://jornalggn.com.br/noticia/um-historico-do-sistema-ferroviario-brasileiro>>. Acesso em 10 Jul. 2014.
- BANCO PINE. Soja: Ex-Supersafra. Disponível em: <https://www.pine.com/pt/Downloads/Noticias/742_COM_26_02_2014.pdf>. Acesso em 24 Maio 2014.
- BARAT, J. Transporte Ferroviário de Carga no Brasil. IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada). 2009. Ano 7. Edição 55 – 17/11/2009. Disponível em:

<http://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&view=article&id=1066:catid=28&Itemid=23546>. Acesso em: 10 Jul. 2014.

BRAMBILLA, S., Manca, D. The Viareggio LPG railway accident: Event reconstruction and modeling. *Journal of Hazardous Materials* 182. Milão, Itália, 2010.

BRASIL. Decreto nº 98.973 de 21 de fevereiro de 1990. Aprova o Regulamento do Transporte Ferroviário de Produtos Perigosos, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 22 de fevereiro de 1990.

BRASIL. Lei nº 10.233 de 5 de junho de 2001. Dispõe sobre a reestruturação dos transportes aquaviário e terrestre, cria o Conselho Nacional de Integração de Políticas de Transporte, a Agência Nacional de Transportes Terrestres, a Agência Nacional de Transportes Aquaviários e o Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 06 de Junho de 2001.

BRASIL. Norma Regulamentadora NR-15 – Atividades e Operações Insalubres. Alteração/Atualização Portaria SIT n.º 291, de 08 de dezembro de 2011. *Diário Oficial da União*, 09 de Dezembro de 2011.

BRASIL. Agência Nacional de Transportes Terrestres. Resolução N° 420, de 12 de Fevereiro de 2004. Aprova as Instruções Complementares ao Regulamento do Transporte Terrestre de Produtos Perigosos. *Diário Oficial da União*, Brasília, 31 de Maio de 2004.

BRASIL. Agência Nacional de Transportes Terrestres. Resolução N° 1.431, de 26 de abril de 2006. Estabelece procedimentos para a comunicação de acidentes ferroviários a ANTT pelas concessionárias e autorizatárias de serviço público de transporte ferroviário. *Diário Oficial da União*, Brasília, p. 158. 28 de Abril de 2006. Seção 1.

BRAY, D.J., King, S. M., Jönsson, J.. A new industry benchmark for ammonia production. Nitrogen + Syngas International Conference and Exhibition 2014. Haldor Topsøe A/S, Copenhagen, 2014.

BURI, M.R., Fabreti, M.P., Oliveira, E.R., Silva, M.M. Transporte Ferroviário de Cargas no Brasil – Aproveitamento da Malha. XIII SIMPEP - Bauru, SP, Brasil, 6 a 8 de Novembro de 2006.

CARDOSO, A. A.; Machado, C. M. D.; Pereira, E. A.; Química Nova na Escola 2008, nº 28, 9.

CDC (Centers for Disease Control and Prevention). AMMONIA SOLUTION (UN 3318); AMMONIA, ANHYDROUS (UN 1005): Lung Damaging Agent. Disponível em: <http://www.cdc.gov/niosh/ershdb/EmergencyResponseCard_29750013.html>. Acesso em 07 Jun. 2014.

- CHEDDIE, D.. Ammonia as a Hydrogen Source for Fuel Cells: A Review. In: Minic D, ed. Hydrogen Energy – Challenges and Perspectives. Rijeka, Croatia: InTech, 2012.
- CHE HASSAN, C.R., Raman, A.A.A., Mahmood, N.Z., Sulaiman, N.M., Balasubramaniam, P.A/L., Hung, F.C. A Case Study of Consequences Analysis of Ammonia Transportation by Rail from Gurun to Port Klang in Malaysia Using Safti Computer Model. The American Society of Safety Engineers. Journal of SH&E Research Vol. 6, No. 1, 2009.
- CIESP. Disponível em: <<http://www.ciesp.com.br/cubatao/noticias/fertilizantes-petrobras-amplia-atuacao/>>. Acesso em: 21 Maio 2014.
- CNT (Confederação Nacional do Transporte). Transporte e Economia: O sistema ferroviário brasileiro. CDU 656.2.025.4(81). Brasília, 2013.
- COMPLASTEC. Disponível em: <<http://www.complastec.com.br/noticias/nova-fabrica-pretende-triplicar-a-producao-de-fertilizantes-nitrogenados>>. Acesso em 24 Maio 2014.
- CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: Grãos Safra 2012/2013. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 27 Maio 2014.
- CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: Café Safra 2013. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 27 Maio 2014.
- CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-açúcar Safra 2013/14. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 27 Maio 2014.
- CROWL, D.A., Louvar J. Chemical Process Safety - Fundamentals with Applications, Ed. 2, Prentice-Hall. 2002.
- DEFRA (Department for Environment, Food & Rural Affairs). Ammonia in the UK. DEFRA Publications Admail 6000, London SW1A 2XX, 2002.
- DIAS, V.P., Fernandes, E.. Fertilizantes: uma visão Global Sintética. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 24, p. 97-138, set. 2006.
- DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes). Histórico. Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/ferrovias/historico.asp>>. Acesso em: 27 Abr. 2014.
- DOE (U.S. Department of Energy). Temporary Emergency Exposure Limits for Chemicals: Methods and Practice. DOE Handbook. DOE-HDBK-1046-2008. Washington, D.C. August 2008.
- EUROPEAN FERTILIZER MANUFACTURERS' ASSOCIATION (EFMA), Guidance for Transporting Ammonia by Rail. 2 ed. Ave. E van Nieuwenhuysse 4, B-1160 Brussels, Belgium, 2007.

- EUROPEAN FERTILIZER MANUFACTURERS' ASSOCIATION (EFMA). Production of Ammonia. Booklet No. 1 of 8: Best Available Techniques for Pollution Control in the European Fertilizer Industry. Ave. E van Nieuwenhuysse 4, B-1160 Brussels, Belgium, 2000.
- ELUCIDARE. "Ammonia - New possibilities for hydrogen storage and transportation," Elucidare Ltd., 2008.
- EMBRAPA. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em 27 Maio 2014.
- EPA. Aloha User's Manual. The CAMEO® Software System. Washington, D.C., 2007.
- EPA. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP 42, Fifth Edition, Volume I: Stationary Point and Area Sources. Research Triangle Park, NC, U.S. Environmental Protection Agency, 1995.
- EPA Chemical Emergency Preparedness and Prevention Office, Hazards of Ammonia Releases at Ammonia Refrigeration Facilities (Update). EPA 550-F-01-009. Office of Solid Waste and Emergency Response, August 2001. Disponível em: <<http://www.epa.gov/oem/docs/chem/ammonia.pdf>>. Acesso em 03 Jun. 2014.
- EPA. Technical Support Document for the Ammonia Production Sector Proposed Rule for Mandatory Reporting of Greenhouse Gases. Office of Air and Radiation. Washington, D.C., 2009.
- EPA. Toxicological Review of Ammonia (CAS No. 7664-41-7), In Support of Summary Information on the Integrated Risk Information System (IRIS). Revised External Review Draft. EPA/635/R-13/139a. National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. August 2013.
- EPA. Acute Exposure Guideline Levels (AEGLs) Definitions. Disponível em: <<http://www.epa.gov/oppt/aegl/pubs/define.htm>>. Acesso em: 25 Jun. 2014.
- ERISMAN, J.W., Sutton, M.A., Galloway, J., Klimont, Z., Winiwarer, W.. How a century of ammonia synthesis changed the world. Nature Geoscience 1, 636-639, 2008.
- FERTILIZANTES HERINGER. Relações com Investidores: Mercado Brasileiro de Fertilizantes. Disponível em: <http://www.mzweb.com.br/heringer/web/conteudo_pt.asp?idioma=0&conta=28&tipo=2265>. Acesso em 12 Jul. 2014.
- GRIFFITHS, R.F., Kaiser, G.D. Production of Dense Gas Mixtures from Ammonia Releases - a Review. Journal of Hazardous Materials, 6 (1982) 197-212, 1982.
- IHS. Ammonia from Natural Gas by the Lurgi-Casale Megammonia Process. Disponível em: <<http://www.ihs.com/products/chemical/technology/pep/reviews/ammonia-from-natural-gas-lurgi-casale.aspx>>. Acesso em: 8 Jun. 2014.

- INTL FCStone. Commodity Insight. Disponível em:
<[http://www.intlfcstone.com.br/content/upload/arquivos/Consumo%20de%20Fertilizantes%20no%20Brasil\(1\).pdf](http://www.intlfcstone.com.br/content/upload/arquivos/Consumo%20de%20Fertilizantes%20no%20Brasil(1).pdf)>. Acesso em 21 Maio 2014.
- KAISER, G.D., Walker, B.C. Releases of Anhydrous Ammonia from Pressurized Containers - the Importance of Denser-than-air Mixtures. Atmospheric Environment Vol. 12. pp. 2289-230, 0004-6981/78/1201-2289, 1978.
- KBR. KBR Advanced Ammonia Process (KAAP™). Disponível em:
<<http://www.kbr.com/Technologies/Process-Technologies/KBR-Advanced-Ammonia-Process/>>. Acesso em 8 Jun. 2014.
- KLINCEVICIUS, M.G.Y. Estudo de Propriedades, de Tensões e do Comportamento Mecânico de Lastros Ferroviários. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2011.
- LIMA, P.C.R. Fábrica de Fertilizantes Nitrogenados e Produção de Etanol no Norte Fluminense. Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados, Centro de Documentação e Informação, Coordenação de Biblioteca, Abril 2007. Disponível em:
<<http://bd.camara.gov.br>>. Acesso em: 12 Jul. 2014.
- LINDE. LAC™ Process. Disponível em: <http://www.linde-engineering.com/en/process_plants/hydrogen_and_synthesis_gas_plants/gas_products/ammonia/index.html>. Acesso em 8 Jun. 2014.
- McKIE, R. From fertiliser to Zyklon B: 100 years of the scientific discovery that brought life and death. Disponível em:
<<http://www.theguardian.com/science/2013/nov/03/fritz-haber-fertiliser-ammonia-centenary>>. Acesso em 7 Jun. 2014.
- MDA (Minnesota Department of Agriculture). Ecological Effects of Ammonia. Disponível em
<<http://www.mda.state.mn.us/chemicals/spills/ammoniaspills/ecoeffects.aspx>>. Acesso em 1 Jun. 2014.
- MIDIA NEWS. Milho de segunda geração já está disponível. Disponível em:
<<http://www.midianews.com.br/conteudo.php?sid=2&cid=61571>>. Acesso em: 29 Jun. 2014.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. Transporte Ferroviário do Brasil. Disponível em: <<http://www2.transportes.gov.br/bit/03-ferro/ferro.html>>. Acesso em: 15 Jun. 2014.
- N H Three LLC (Richland, WA – US). John H. Holbrook, Jason C. Ganley. Method and apparatus for anhydrous ammonia production. US n. US 7,811,442, 12 Out. 2010.
- OGGERO, A., Darbra, R.M., Munos, M., Planas, E., Casal, J. A survey of accidents occurring during the transport of hazardous substances by road and rail. Journal of Hazardous Materials A133 (2006) 1–7.

- PEREIRA, E. D. B. Passado, presente e futuro da produção industrial do amoníaco: uma investigação documental. Dissertação (Mestrado em Química) – Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 2009.
- PETROBRAS. Ficha de informação de segurança de produto químico (FISPQ) Amônia Industrial. Rio de Janeiro, RJ, 2013. Disponível em: <<http://www.br.com.br/wps/wcm/connect/ae308d8041f5a0d98d58ffdc77f5b0c/fispq-prodquim-amonia-industrial.pdf?MOD=AJPERES>>. Acesso em: 28 Maio 2014.
- PETROBRAS. Disponível em: <<http://fatosedados.blogspot.com.br/2013/07/07/entenda-por-que-a-petrobras-investe-em-fertilizantes/>>. Acesso em 12 Jul. 2014.
- PETROBRAS. Disponível em: <<http://fatosedados.blogspot.com.br/2013/05/31/petrobras-compra-fabrica-de-fertilizantes-da-vale/>>. Acesso em 24 Maio 2014.
- PETROBRAS. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/entenda-por-que-investimos-em-fertilizantes.htm>>. Acesso em 24 Maio 2014.
- PETROBRAS. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/comercializamos-1-milhao-de-toneladas-de-ureia-em-2013.htm>>. Acesso em 24 Maio 2014.
- PRITCHARD, J.D. Ammonia – Toxicological Overview. Health Protection Agency, 2007.
- REYNOLDS, R.M. ALOHA™ (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.0 Theoretical Description. NOAA Technical Memorandum NOS ORCA-65. Washington, 1992.
- SANTOS, A.F. Gerenciamento da Confiabilidade em Projetos de Material Rodante Ferroviário. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Projeto e Fabricação) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2007.
- SILVA, F.N. Avaliação do Risco Associado a Atividades Industriais e de Transporte de Substâncias Perigosas. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, Aveiro, 2007.
- SILVEIRA, M. R. Transporte e Logística: as ferrovias no Brasil. Geosul, Florianópolis, v.17, n.34, p 63-86, jul./dez. 2002
- SNA. Disponível em: <<http://sna.agr.br/importacao-de-fertilizantes-segue-em-alta-mesmo-com-incremento-da-producao-local/>>. Acesso em 21 Maio 2014.
- THOMAS, G., Parks G.. Potential Roles of Ammonia in a Hydrogen Economy – A Study of Issues Related to the Use Ammonia for On-Board Vehicular Hydrogen Storage, Washington, DC, U.S. Department of Energy., 2006.
- TRAVEL WEATHER AVERAGES (Weatherbase). Disponível em: <<http://www.weatherbase.com/>>. Acesso em 19 Jun. 2014.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Mineral Commodity Summaries 2014. Washington: USGS, 2014. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>. Acesso em: 21 Maio 2014.

U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. Toxicological Profile for Ammonia. Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Toxicology/Toxicology Information Branch 1600 Clifton Road NE, Mailstop F-32 Atlanta, Georgia 30333, September 2004.

USIQUÍMICA. Ficha de informação e segurança de produto químico (FISPQ) Amônia Gás Anidra. Guarulhos, SP, 2009. Disponível em: <http://www.usiquimica.com.br/adm_img/fispq-11.pdf>. Acesso em: 28 Maio 2014.

VALE FERTILIZANTES. Disponível em: <<http://www.valefertilizantes.com/valefertilizantes/operacoes.asp>>. Acesso em 24 Maio 2014.

VALE FERTILIZANTES. Ficha de informações de segurança de produto químico (FISPQ) Amônia. Araucária, PR, 2012. Disponível em: <<http://www.valefertilizantes.com/mda/modulos/conteudo/reInvestidores/fispq/docs/Am%C3%83%C2%B4nia%20Anidra%20NH3.pdf>>. Acesso em: 28 Maio 2014.