

Quatro acidentes que impactaram a indústria nuclear

Three Miles island, Goiânia, Chernobyl e Fukushima

Cláudio Geraldo Schön

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

10 de maio de 2021

1 Acidentes e engenharia

2 Three Miles Island

3 Chernobil

4 Goiânia

5 Fukushima

6 Conclusões

Acidentes

Acidente (s.m.)

- Desastre; acontecimento trágico, infeliz que ocasione dano, perda, dor ou morte
- Ocorrência; situação inesperada

Dicionário Houaiss on line

Exemplo

Acidentes do Comet

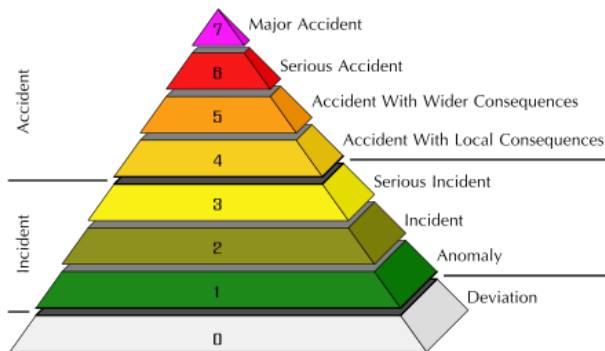
Queda de dois (quatro) aviões em 1954, coincidentemente ambos partindo da Itália.



Marco no entendimento da fadiga em aplicações aeronáuticas, tornou evidente a importância de concentradores de tensão, desenvolveu protocolos de teste e de análise de falha, que são usados até hoje.

Acidentes nucleares

International Nuclear and Radiological Event scale (INES)



Acidentes nucleares

International Nuclear and Radiological Event scale (INES)

Acidente maior (INES 7)

- Liberação ampla de material radioativo com amplas consequências para a saúde e para o ambiente, requerendo contramedidas extensas e planejadas.

Acidentes nucleares

International Nuclear and Radiological Event scale (INES)

Acidente sério (INES 6)

- Liberação significativa de material radioativo, requerendo contramedidas planejadas

Acidentes nucleares

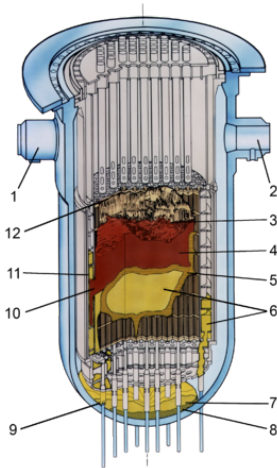
International Nuclear and Radiological Event scale (INES)

Acidente com consequências amplas (INES 5)

- Liberação limitada de material radiativo, requerendo algumas contramedidas planejadas
- Várias mortes por radiação

- 1 Acidentes e engenharia
- 2 Three Miles Island**
- 3 Chernobil
- 4 Goiânia
- 5 Fukushima
- 6 Conclusões

INES 5, 1979



Fusão parcial do núcleo do reator TMI-2 (PWR) no dia 28 de março de 1979

- O acidente foi causado por uma falha no sistema secundário (não radioativo) que levou ao bloqueio do circuito primário
- Às 4:00 o reator desligou, mas o gerador de vapor não estava mais funcionando e o núcleo continuou a aquecer
- Bombas secundárias foram ligadas, mas um conjunto de válvulas incorretamente fechadas impediu o bombeamento de água no circuito secundário
- A falta de líquido refrigerante provocou o acúmulo de vapor no circuito primário e levou a abertura de uma válvula de alívio de pressão, que por um defeito mecânico permaneceu aberta, no sistema de controle a válvula aparecia como fechada (erro de projeto)
- Os operadores não compreenderam a natureza conflitante dos sinais de controle, contribuindo para a severidade do acidente
- A despressurização do circuito primário levou à nucleação de bolhas de vapor, que bloquearam os canais, aumentando o nível de água no reator
- Os operadores não reconheceram o problema como perda de líquido refrigerante (*loss-of-coolant accident*, LOCA) e desligaram as bombas, pensando que o reator iria inundar (4:15 - 4:39)
- Às 5:20 o reator começou a cavar pelo vapor gerado e o núcleo foi exposto, gerando reação do zircaloy com o vapor e produzindo hidrogênio

Consequências do acidente

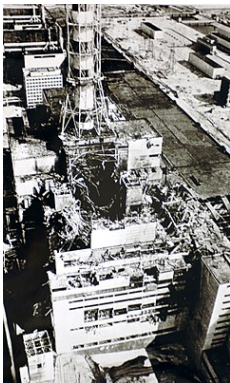
- Material radioativo (principalmente gases nobres, Kr e Xe) foram liberados para o ambiente, mas análises do USNRC estimam que a exposição da população foi menor que 10 mSv acima da natural.
- O reator foi permanentemente parado e 99% do combustível foi removido, os custos foram brutais, além do fato de que o reator deixou de operar
- O acidente aumentou a oposição de grupos ambientalistas à energia nuclear
- Curiosamente um filme (Síndrome da China, 1979) havia sido lançado 12 dias antes do acidente, descrevendo eventos muito parecidos, incluindo descrição de erros humanos nas aberturas de válvulas e tentativas de acobertamento ou minimização do desastre. O filme foi tratado pela indústria nuclear americana como alarmista.

- 1 Acidentes e engenharia
- 2 Three Miles Island
- 3 Chernobil**
- 4 Goiânia
- 5 Fukushima
- 6 Conclusões

O desastre de Chernobil

INES 7, 1986

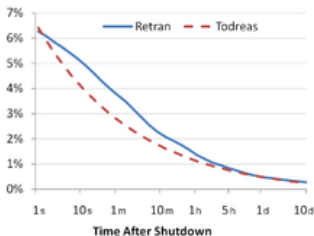
Explosão do reator 4 da Usina Nuclear de Chernobil, em Pripjat, Ucrânia, em 26 de abril de 1986, com exposição direta do núcleo ao ambiente.



- O desenho do reator moderado a grafite (RBMK, *high-power channel type reactor*), instável a baixas potências, contribuiu para o acidente
- O acidente se iniciou em um teste de segurança, cujo objetivo era verificar se o momento da turbina em operação no instante de um desligamento poderia ser usado para produzir energia elétrica para operar as bombas do circuito de emergência primário, num evento de falta de energia.

O teste de segurança

Cerca de 6% da potência de um núcleo é produzida pelo decaimento de produtos de fissão, que continua mesmo após um desligamento. Reatores, portanto, precisam que o fluxo do circuito primário continue após a parada. Reatores RBMK requerem um fluxo muito grande de água e havia o medo de que os geradores diesel de emergência não tivessem tempo suficiente para operar as bombas no caso de uma falta de energia.



O teste visava verificar se o momento de rotação da turbina, em operação no instante do desligamento, poderia fornecer a energia elétrica necessária para operar as bombas, dando tempo para os geradores ligarem. Os operadores não estavam cientes das propriedades não usuais do reator RBMK e o teste não era considerado crítico.

Resumo dos eventos que levaram ao desastre

- O teste era para ser iniciado pelo turno do dia, mas uma falha em outra usina fez atrasar o início do teste para o turno da noite, menos treinado
- O teste requeria desabilitar o sistema de emergência
- O teste requeria operar o reator a baixa potência (700 MWh, contra 3200 MWh a 100%), a potência entretanto diminuiu mais pelo envenenamento com ^{135}Xe , o que levou os operadores a remover as barras de controle manualmente, para manter o nível de potência prescrito
- O desenho do RBMK leva a uma instabilidade grande a baixas potências, pois forma-se vapor, que absorve nêutrons menos eficientemente que água

Linha de tempo do acidente

26 de abril de 1986

- 01:23:04 o teste se inicia
- 01:23:40 o desligamento de emergência (SCRAM) foi iniciado, aparentemente de forma errada, introduzindo as barras de controle
- Ao penetrar os canais as barras inicialmente deslocaram água (moderador), causando um aumento da potência, isso fez algumas barras de controle romperem antes de atingir a posição máxima, bloqueando o canal, a potência em poucos segundos foi a 530 MWh
- A última leitura de potência foi a 30000 MWh, acredita-se que no auge do acidente a potência foi 10 vezes maior, o que causou uma explosão de vapor, que danificou o prédio de contenção e os elementos combustíveis
- Poucos segundos depois houve uma segunda explosão (provavelmente de hidrogênio) que dispersou partes do moderador de grafite por todo o complexo, que superaquecidos, começaram a queimar, dispersando radiação

Efeitos de Chernobil

- Uma zona de exclusão de 30 km ao redor da usina existe até hoje (mesmo assim os outros reatores continuaram a ser operados no local)
- Estimativas de mortas diretas causadas por radiação variam de 4000 a 60000, 335000 pessoas tiveram que ser evacuadas, algumas permanentemente. Milhões de trabalhadores soviéticos, que limpavam o terreno após o acidente, foram expostos à radiação em níveis de moderados a altos. Boa parte da Europa foi exposta a níveis elevados de radiação pela nuvem gerada.
- Há evidências de uma incidência anormal de cancer de tireóide em crianças da região, que consumiram radioisótopos que entraram na cadeia alimentar
- O desenho do reator RBMK foi corrigido e algumas unidades continuam em operação na Rússia até hoje (não houveram outros relatos de problemas)
- O custo total do acidente é estimado em US\$ 235 bilhões

- 1 Acidentes e engenharia
- 2 Three Miles Island
- 3 Chernobil
- 4 Goiânia**
- 5 Fukushima
- 6 Conclusões

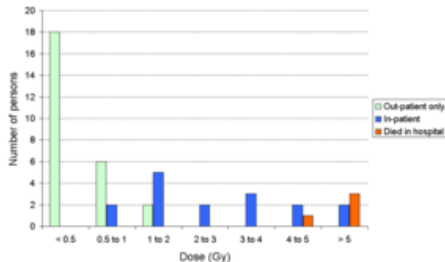
O acidente radiológico de Goiânia

INES 5, 1987

Iniciado em 13 de setembro de 1987.

- Fonte de ^{137}Cs usada em clínica particular de radioterapia é abandonada em um prédio
- Devair Alves Ferreira, dono de um ferro-velho, encontra o equipamento abandonado e o rouba, pensando ser sucata
- Ele e seus funcionários desmantelam a cápsula, expondo 19,26 g de CsCl radioativo. Os locais se admiram do belo brilho azulado que o composto emitia no escuro, uma das meninas que morreu inclusive usou como maquiagem
- Os adoentados, com sintomas de envenenamento radioativo severo, buscaram ajuda no sistema de saúde, que não identificaram o problema
- O acidente é o mais grave do Brasil, considerado também como o mais grave em toda a história não associado a um reator
- O acidente expôs o descaso de todas as autoridades ao problema do lidar com fontes radioativas (a CNEN não tinha registro da cápsula, que já operava desde 1971), desde então o controle melhorou muito.

Consequências do acidente de Goiânia



- Estima-se que no total 1600 pessoas tenham sido afetadas diretamente, 104 morreram pelos efeitos da radiação
- Quatro pessoas do entorno de Devair morreram (incluindo uma menina de seis anos) com sintomas severos de envenenamento radioativo pouco tempo depois da exposição
- O gráfico apresenta as doses estimadas dos 46 casos mais graves (1 Gray, Gy = 1 Sievert, Sv = 1 J /kg)

- 1 Acidentes e engenharia
- 2 Three Miles Island
- 3 Chernobil
- 4 Goiânia
- 5 Fukushima**
- 6 Conclusões

O acidente de Fukushima - Daichii

INES 7, 2011

Explosão de quatro dos seis reatores BWR no complexo de Fukushima - Daichii iniciada em 11 de março de 2011, por falha de refrigeração do circuito primário.

- A causa primária do acidente foi o terremoto de 9 graus na escala Richter e o Tsunami que se seguiu, mas erros de projeto foram fundamentais para tornar o acidente mais severo.
- O acidente inicialmente foi classificado como INES 5, depois sua severidade foi reconhecida.
- A falha, como em Chernobil, aconteceu por falha de refrigeração do calor de decaimento pelo circuito primário
- No momento do terremoto apenas os reatores 1 a 3 estavam em operação, reatores 4 a 6 estavam parados para troca de combustível e o reator 4 tinha seu combustível já armazenado no tanque de combustível usado.

Linha de tempo do acidente

- O terremoto foi registrado as 14:46 hora local do dia 11 de março de 2011, os reatores ainda em operação foram desligados por SCRAM e os geradores diesel de emergência foram ligados.
- Cerca de 50 minutos o Tsunami com 14 m de altura atingiu a estrutura, ultrapassando em 4 m o nível da usina, que está a 10 m acima do nível do mar. O Tsunami inundou a casa de bombas, que se situava fora do prédio de contenção.
- Aproximadamente as 15:41 os geradores diesel falharam, houve a tentativa de fornecer energia por baterias e por um gerador a vapor, mas eventualmente tudo falhou e levou à fusão (*meltdown*) dos núcleos dos reatores 1 a 3
- Explosões de hidrogênio ocorreram entre 12 e 15 de março nos reatores 1 a 4 danificando os edifícios de contenção. O Hidrogênio é produzido pela redução do vapor de água do líquido refrigerante pelo zircaloy do *cladding* dos elementos combustíveis.

Consequências do acidente

- Estima-se que 134000 pessoas foram evacuadas por conta do acidente, chegou-se a cogitar evacuação de Tóquio, que é a maior área urbana do planeta
- Apenas uma morte por câncer foi diretamente atribuída ao acidente, mas há programas de acompanhamento da população
- O acidente levou a uma redução na construção de novos reatores no mundo e alguns países (Alemanha e Japão) decidiram abandonar a geração nuclear totalmente em longo prazo.
- Há um movimento intenso de pesquisa na produção de projetos e combustíveis (*accident tolerant fuels*, ATF) mais confiáveis para evitar a repetição desse tipo de acidente

- 1 Acidentes e engenharia
- 2 Three Miles Island
- 3 Chernobil
- 4 Goiânia
- 5 Fukushima
- 6 Conclusões**

Síntese

- Os acidentes nucleares são infelizes e causam mortes (o desastre da Union Carbide em Bophal em 1984, Índia matou tanta gente quanto Chernobil), por isso mesmo eles tem que ser estudados e ações tem que ser propostas para evitar que se repitam
- Há um significativo movimento de pesquisa no mundo por conta desses acidentes