

FICHA DESCRITIVA

# Transporte do Ciclo de Combustível Nuclear

## Materiais Front End (da etapa inicial)

Dedicado ao transporte seguro, eficiente e confiável de materiais radioativos



# Transporte do Ciclo de Combustível Nuclear – Materiais Front End (da etapa inicial)



## Introdução

Atualmente a energia nuclear aprovisiona cerca de 14% da demanda mundial por eletricidade, disponibilizando energia limpa, livre de carbono e economicamente acessível para pessoas de todo o mundo. A maioria destes reatores são reatores de água pressurizada ou reatores de água fervente e em ambos os casos, o principal combustível é o oxido de urânio enriquecido. A essência do combustível para estes reatores de água leve contem muitos agrupamentos de combustíveis, consistindo de barras de combustível vedadas, cada uma repleta de pastilhas de dióxido de urânio.

Para manter esta importante fonte de energia é fundamental que os materiais do ciclo do combustível nuclear continuem sendo transportados internacionalmente com segurança e eficiência. O transporte de materiais nucleares é rigorosamente regulado e tem um excelente histórico de segurança que abrange diversas décadas.

Os transportes do ciclo de combustível nuclear são normalmente designados como materiais *front end* (da etapa inicial) ou *back end* (da etapa final). A etapa inicial abrange todas as operações, desde a mineração de urânio,

até a fabricação de novos agrupamentos de combustíveis para carregamento dentro dos reatores, ou seja, o transporte de concentrados de minério de urânio para instalações de conversão de hexafluoreto de urânio, de instalações de conversão, até usinas de enriquecimento, de usinas de enriquecimento, para fabricantes de combustível, e de fabricantes de combustível, para as várias usinas de energia nuclear. A etapa final abrange todas as operações relacionadas com o combustível queimado que sai dos reatores, ou seja, o encaminhamento dos elementos do combustível queimado, das usinas de energia nuclear, às instalações de reprocessamento para reciclagem, e o subsequente transporte da reciclagem dos produtos.

Alternativamente, se for escolhida a opção de uma única utilização, o combustível queimado é transportado para instalações de armazenamento interino, pendente de sua disposição final.

## Mineração para produzir minério de urânio concentrado

A matéria prima para fabricar o combustível nuclear é o minério de urânio, cujas principais fontes são encontradas na América do Norte, Austrália, África do Sul e Ásia Central. Tipicamente, o minério contém cerca de 1,5% de urânio, porém alguns depósitos apresentam percentuais mais elevados. Primeiramente, o minério é moído e purificado, utilizando processos químicos e físicos para chegarem a um pó seco de óxido de urânio natural, conhecido como concentrado de minério de urânio, ou UOC (siglas em inglês). O nome histórico para o UOC era “yellowcake” (bolo amarelo), pois os concentrados iniciais eram tipicamente da cor amarela.

O UOC é um material de baixa atividade específica e o risco radiológico é muito baixo. Normalmente ele é transportado em barris vedados de 210 litros (uma Embalagem Industrial) em contêineres de carga padronizados para transporte marítimo (ISO). Os mesmos podem ser transportados por via rodoviária, ferroviária ou marítima e em muitos casos usa-se uma combinação de modos de transporte. O UOC é transportado para usinas de conversão para ser convertido em hexafluoreto de urânio (Hex).

## Conversão do concentrado de minério de urânio em hexafluoreto de urânio

O UOC é transportado mundialmente, das áreas de mineração, para as usinas de conversão que estão localizadas na América do Norte, Europa e Rússia. Primeiramente, ele é purificado quimicamente e depois convertido, através de uma série de processos químicos, em Hex natural, que é a forma requerida para o próximo estágio de enriquecimento. O Hex natural produzido pela conversão do UOC é um intermediário muito importante na fabricação de um novo combustível para o reator. Há uma extensa comercialização dele que envolve transporte internacional.

No processo de produção, grandes cilindros rolíços de aço de transporte, alguns com diâmetro de 1,25m (48 polegadas), cada um transportando até 12,5 toneladas de materiais são preenchidos diretamente com hexafluoreto de urânio, o qual pode estar em forma líquida ou gasosa, dependendo do processo de fabricação. Em seguida, o Hex se solidifica dentro do cilindro ao esfriar e atingir uma temperatura ambiente. No armazenamento e durante o transporte o material de hexafluoreto de urânio dentro dos cilindros está em forma

sólida. O Hex natural é armazenado também nestes cilindros antes de ser transportado para uma usina de enriquecimento. O Hex é transportado rotineiramente por via rodoviária, ferroviária ou marítima, ou com mais frequência, usando uma combinação de modos.

Embora o Hex seja um material de baixa atividade específica, existiria um risco químico, no caso de um improvável evento de escape, pois ele produz subprodutos tóxicos por meio da reação com o ar úmido.

## Enriquecimento de hexafluoreto de urânio

O valioso isótopo de urânio que se divide (fissiona) num reator nuclear é o U-235, porém apenas cerca de 0,7% de urânio ocorrendo naturalmente é U-235. Isto é incrementado para o nível requerido, cerca de 3-5% para reatores de água leve, seja por um processo de difusão gasosa ou por meio de centrifugações de gás.

As usinas comerciais de enriquecimento estão em operações nos EUA, Europa Ocidental e Rússia, o que origina o transporte internacional do Hex entre as usinas de conversão e de enriquecimento.

O Hex enriquecido é transportado em cilindros universais menores. Estes cilindros medem cerca de 76 cm (30 polegadas) de diâmetro e são encaixados em embalagens sobrepostas para que a embalagem resista choques, fogo, imersão e evite reações em cadeia. As embalagens sobrepostas contendo os cilindros geralmente são transportadas utilizando contêineres de plataforma plana ISO para transporte às usinas de fabricação de combustível.

O hexafluoreto de urânio exaurido, o produto residual do processo de enriquecimento, tem as mesmas propriedades físicas e químicas do Hex natural e é transportado usando o mesmo tipo de cilindros.

## Fabricação de Combustível

O pó de dióxido de urânio, derivado do hexafluoreto de urânio de menos de 5% de enriquecimento, é também um material de baixa atividade específica. O Hex enriquecido é primeiramente convertido em pó de dióxido de urânio, que posteriormente é processado em pastilhas através de um processo de pressão e sinterização. As pastilhas são empilhadas em tubos de liga de zircônio que posteriormente compõem os agrupamentos de combustível







para transporte desde a usina de fabricação ao local do reator. As usinas de fabricação de combustível estão localizadas em muitos países por todo o mundo.



Tipicamente, os agrupamentos de combustíveis medem cerca de 4 m (12 pés) de comprimento. Eles são transportados em robustos recipientes de aço, que são especificamente projetados. O design e a configuração das embalagens durante o transporte são organizados de forma a evitar a ocorrência de uma reação nuclear em cadeia.



## Regulamentos para o transporte do ciclo de combustível nuclear

Os regulamentos da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, sigla em inglês) para o Transporte Seguro de Material Radioativo estabelece a base para o transporte de material do ciclo de combustível nuclear. O conceito básico é que a segurança depende principalmente da embalagem, a qual tem que oferecer um revestimento de proteção para resguardar o público, a propriedade e o meio-ambiente contra os efeitos da radiação, para evitar reações em cadeia, e também oferecer proteção contra a dispersão do conteúdo. Paralelamente, é importante reduzir as doses de

radiação para os funcionários e para o público, tanto quanto for razoavelmente possível, através da adoção das melhores práticas no nível operacional.

Os Regulamentos estipulam cinco principais tipos de embalagens diferentes; denominados como Excetuada, Industrial, Tipo A, Tipo B e Tipo C, como também critérios para o design, baseados na natureza dos materiais radioativos que eles conterão. Os Regulamentos prescrevem critérios adicionais para embalagens contendo material físsil, ou seja, material que possa suportar uma reação nuclear em cadeia. Os Regulamentos determinam também os procedimentos apropriados para testes. Esta abordagem gradual ao acondicionamento, onde a integridade da embalagem está relacionada com o possível risco – quanto mais perigoso seja o material, mais resistente terá que ser a embalagem – é importante para a segurança e eficiência em operações de transporte comercial do ciclo de combustível nuclear. Vias rodoviária, ferroviária e marítima são comumente utilizadas para os materiais do ciclo de combustível nuclear.

## Testes da IAEA para embalagens de materiais da etapa inicial

O UOC é um material benigno e o potencial de risco é baixo. As embalagens para o UOC são obrigadas a manter sua integridade durante condições normais de transporte e estão projetadas para resistirem uma série de testes simulando tais condições, por exemplo: uma pulverização de água, uma queda livre, um teste de empilhamento e um teste de perfuração, para reproduzir o tipo de tratamento a que as embalagens podem estar sujeitas durante condições normais de transporte.

O hexafluoreto de urânio é diferente no sentido de ser um material sólido que pode emitir vapores tóxicos. Os cilindros de aço utilizados como embalagens para o Hex natural e o exaurido são padronizados internacionalmente e estão sujeitos a um teste de pressão que eles devem resistir sem causar qualquer vazamento ou tensão indesejada. Paralelamente, eles devem ser avaliados de acordo com um requisito de teste térmico.

Os materiais enriquecidos da etapa inicial, ou seja, o Hex enriquecido, o pó de dióxido de urânio e os agrupamentos

novos de combustível são físséis. O potencial risco associado a estes materiais é uma indesejada reação em cadeia. Por esta razão, as embalagens estão sujeitas a testes para assegurar que não ocorram situações de gravidade em quaisquer condições de acidentes, as quais poderiam ser realisticamente antecipadas em transporte, incluindo: colisões, incêndios e submersão.

## Experiência no transporte de materiais nucleares

Os Regulamentos da IAEA para o Transporte Seguro de Material Radioativo têm disponibilizado uma base sólida para o design de equipamentos e procedimentos para o transporte seguro de material radioativo. Nenhum outro setor da indústria de transportes é tão regulado e nenhum setor da indústria de transportes tem um recorde mais seguro. Em mais de meio século, nunca houve um único acidente que tenha resultado em danos radiológicos significativos à humanidade ou ao meio ambiente. Isto se deve em parte ao rigoroso regime regulamentar; porém crédito também deve ser dado ao profissionalismo daquelas entidades que desempenham atividades relacionadas a embalagens e transporte.

---

## Fotografias

- 1 Minério de Urânio
- 2 Minério de urânio processado e convertido em pó – “bolo amarelo”
- 3 Barris de concentrado de minério de urânio
- 4 Cilindros de Hex de 48”
- 5 Cilindros de Hex de 30” com embalagem sobreposta
- 6 Agrupamento de combustível de urânio
- 7 Preparação dos barris de minério de urânio para transporte
- 8 Amarração para transporte de combustível novo
- 9 Transporte rodoviário de materiais da etapa inicial



The logo for WNTI, consisting of the letters 'WNTI' in a white serif font on a dark blue rectangular background with a white curved line underneath.

WORLD NUCLEAR TRANSPORT INSTITUTE

Remo House  
310-312 Regent Street  
London W1B 3AX  
United Kingdom  
Tel: +44 (0)20 7580 1144  
Fax: +44 (0)20 7580 5365  
Web: [www.wnti.co.uk](http://www.wnti.co.uk)  
Email: [wnti@wnti.co.uk](mailto:wnti@wnti.co.uk)

