

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – DEMEC**

DANIEL AZEVEDO COSTA

**ESPECIFICAÇÃO DE EMBALAGEM PARA LOGÍSTICA DE
RESÍDUOS TENORM**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**RIO DE JANEIRO
2019**

DANIEL AZEVEDO COSTA

**ESPECIFICAÇÃO DE EMBALAGEM PARA LOGÍSTICA DE
RESÍDUOS TENORM**

Trabalho de conclusão de curso em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior do
CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Orientador: Alexandre Silva de Lima

**RIO DE JANEIRO
2019**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

C837 Costa, Daniel Azevedo.

Especificação de embalagem para logística de resíduos
TENORM / Daniel Azevedo Costa – 2019.
39f. : il. color., grafs., tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2019.

Bibliografia: f. 38-39.

Orientador: Alexandre Silva de Lima.

1. Engenharia mecânica. 2. Resíduos radioativos – Eliminação – Aspectos ambientais. 3. Indústria petrolífera – Eliminação de resíduos – Aspectos ambientais – Brasil. I. Lima, Alexandre Silva de (Orient.). II. Título.

CDD 621

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes CRB-7/5281

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora que intercederam tantas vezes nessa caminhada.

Ao meu pai, exemplo e mentor.

À Petrobras e meus gestores, que acreditaram na importância desta formação.

À Rudolf Diesel, e todos os motoristas de ônibus responsáveis pelas enormes distâncias que foram percorridas.

RESUMO

Os materiais radioativos gerados naturalmente no processo de extração de petróleo tem sido alvo de preocupação da indústria de exploração e produção, que tem procurado soluções quanto ao seu armazenamento, movimentação e descarte. A falta de depósitos permanentes e soluções para redução do volume de contaminado promovem a acumulação crescente de resíduos em depósitos provisórios, que além de oferecer riscos, custam cada vez mais caro às empresas do setor de óleo e gás. O objetivo deste trabalho é apresentar soluções de embalagens e as especificações requeridas, de modo a reduzir os custos logísticos a aumentar a eficiência da armazenagem destes produtos, atendendo a todas as exigências normativas e regulatórias, e aos requisitos do processo logístico e a suas operações. Com a validação de novas embalagens disponíveis no mercado brasileiro, é possível substituir os tambores atualmente utilizados por embalagens que atendem às especificações propostas, trazendo maior aproveitamento volumétrico dos armazéns existentes e aumentando a durabilidade de cada embalagem, entre outros ganhos, sem diminuir a eficiência de nenhuma fase do processo logístico.

Palavras chave: Materiais Radioativos; Petróleo; TENORM; Armazenagem; Transporte

ABSTRACT

Radioactive material produced naturally during the oil and gas extraction process have been worrying the Oil & Gas Industry, who has been seeking solutions for its storage, transport and waste disposal. The lack of permanent deposits and solutions to reduce the volume of contaminated promote the increasing accumulation of waste in temporary deposits, which in addition to offering risks, are increasing the costs to the oil and gas companies. The objective of this work is to present packaging solutions and the specifications required, in order to reduce logistics costs to increase the efficiency of the storage of these products, meeting all regulatory and regulatory requirements, and requirements of the logistics process and its operations. With the validation of new packaging available in the Brazilian market, it is possible to replace the drums currently used by packaging that meet the proposed specifications, bringing greater volumetric use of existing warehouses and increasing the durability of each package, among other gains, without decreasing the efficiency of any phase of the logistics process.

Keywords: Radioactive Material; Oil&Gas; TENORM; Storage Transport

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma Básico de Gerência de Rejeitos Radioativos.....	9
Figura 2: Idade das Plataformas.....	10
Figura 3: Características de Penetração das Radiações Ionizantes.....	14
Figura 4: Spill Drum.....	16
Figura 5: Embalagem IBC.....	17
Figura 6: Tambores armazenados na plataforma.....	27
Figura 7: Tambores armazenados.....	28
Figura 8: Processo Logístico de embalagem para TENORM na Petrobras.....	29
Figura 9: Comparativo entre a solução atual e a solução proposta.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Altura de queda livre para ensaio com líquidos	22
Tabela 2: Altura de queda livre para ensaio com líquidos	22
Tabela 3: Requisitos para Integridade de Embalado Industriais	25
Tabela 4: Tipos de Rejeitos Armazenados	27

SUMÁRIO

1	Introdução	9
1.1	Objetivo	11
1.2	Metodologia Aplicada	11
1.3	Organização do Trabalho.....	11
2	Revisão Bibliográfica	13
2.1	Resíduos TENORM na produção de petróleo	13
	Caracterização do Fluido.....	14
2.2	Características de Embalagens	15
3	Análise de Regulamentos e Normas	19
3.1	Regulamentos relativos a transporte de produtos perigosos.....	19
	Regulamento de transporte terrestre.....	19
	Regulamento de transporte marítimo	22
3.2	Normas relativas à manipulação de material radioativos (CNEN).	23
3.3	Requisitos legais identificados	25
4	Desenvolvimento da Solução	27
4.1	Logística de TENORM na Petrobras.....	27
4.2	Estabelecimento dos requisitos técnicos mínimos	29
	Requisitos para o transporte offshore.....	29
	Requisitos para o armazenamento onshore.	31
4.3	Solução Proposta	32
	Processo Logístico da embalagem.	32
	Validação dos requisitos.....	33
	Ganhos identificados	34
5	Conclusão	37
6	Referências Bibliográficas.....	38

1 Introdução

A atividade de extração de petróleo gera por vezes um subproduto radioativo que, devido às suas características, requer cuidados específicos no seu transporte e armazenagem. Estes resíduos radioativos de ocorrência natural que são trazidos solúveis na água de produção, e devido aos processos de mudança de temperatura e pressão na elevação do fluido e na separação da água, depositam-se nas tubulações em forma de incrustação, ou nos equipamentos na forma de borra oleosa, sendo a partir de então conhecidos como TENORM (*Tecnologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*). Ao se substituir uma tubulação ou equipamento, esse material é removido através de jateamento, coletado e levado à terra para armazenamento temporário, aguardando sua classificação e destinação para tratamento e descarte, ou para armazenamento permanente pelo CNEN como outros resíduos radioativos, a depender das características radioativas do material. (Figura 1)

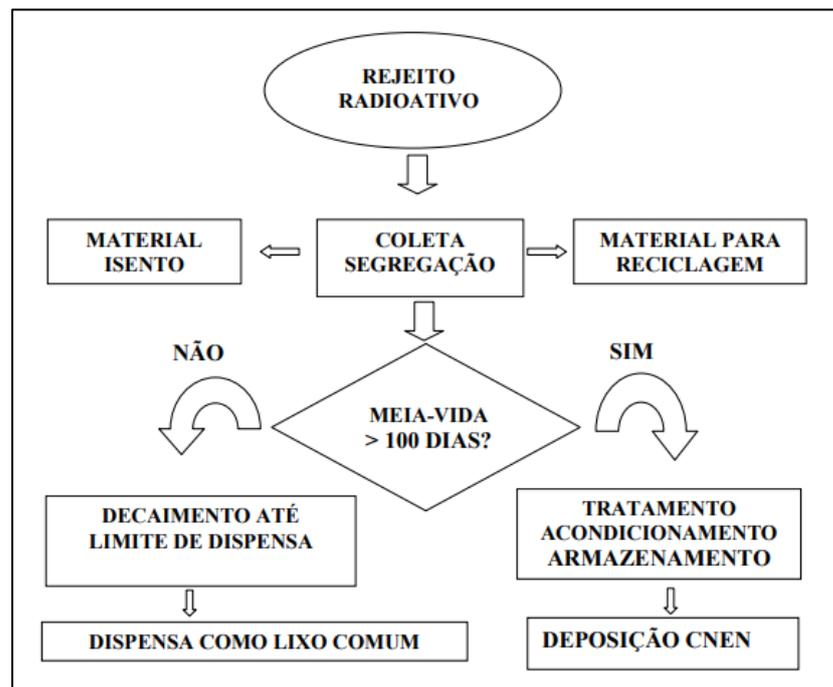


Figura 1: Fluxograma Básico de Gerência de Rejeitos Radioativos
 Fonte: XAVIER *et al.*, 2014

No Brasil, no entanto, o CNEN ainda não dispõe de depósito permanente para estes materiais, nem emitiu qualquer permissão para reinjeção deste produto em poços abandonados, restando às produtoras de petróleo o armazenamento temporário por tempo indeterminado, aumentando cada vez mais este estoque crescente e controlado, que em 2011 eram estimados

em 2200 m³ de resíduos na Petrobras (GÓES,2011). Com uma crescente produção de petróleo, e conseqüentemente, de resíduos radioativos, este cenário tende a se agravar ainda mais, uma vez que o Brasil possui hoje 66 plataformas com mais de 25 anos de idade (MACEDO, 2018) que necessitarão ser desativadas nos próximos anos (Figura 2), gerando ainda mais material radioativo

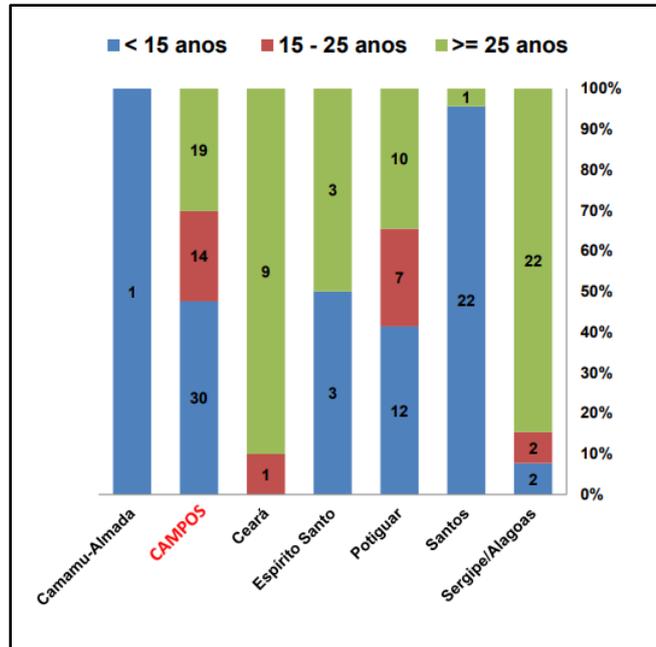


Figura 2: Idade das Plataformas
Fonte: MACEDO, 2018

Para a armazenagem destes produtos, as embalagens atualmente utilizadas são os tambores de aço, que não favorecem a armazenagem dos resíduos, tanto no que se refere a capacidade volumétrica do tambor, quanto a sua durabilidade reduzida devido à corrosão. Em algumas unidades são utilizadas para acondicionar esses tambores, embalagens *spill drums*¹ poliméricas, o que aumenta ainda mais o custo total de armazenagem.

Para solucionar os problemas relacionados ao crescente estoque de material TENORM, a PETROBRAS iniciou estudos e uma linha de pesquisa, onde podemos destacar as principais rotas: Reavaliação dos Rejeitos Armazenados, com o intuito de descartar os rejeitos indevidamente classificados; Redução dos Volumes, através de tecnologias de separação das partículas emissoras de radiação do restante do material; Homologação de Soluções para Destinação Final de Resíduos e Utilização de Novas Embalagens, para otimizar a capacidade dos armazéns existentes e reduzir os custos de armazenamento.

¹ Spill-drums: tambor polimérico de tampo roscado, resistente a deformação, formado em uma única peça sem emendas, utilizado para evitar derramamento.

1.1 Objetivo

Este trabalho propõe as especificações técnicas de novas embalagens para transporte e armazenamento temporário de longa duração de resíduos TENORM oriundos da extração de petróleo, reduzindo os custos de armazenamento através do aumento da cubagem de estocagem, aumento da durabilidade das embalagens e menor custo de aquisição e acondicionamento das mesmas. Estas embalagens devem conter o baixo nível de radioatividade, facilitar as operações de amostragem, inspeção e substituição da embalagem, além de promover a melhor eficiência no transporte, manuseio e armazenagem ao longo de todo o processo logístico, respeitando cada um dos requisitos já estabelecidos na operação atual.

1.2 Metodologia Aplicada

Para atingir os objetivos deste trabalho foi desenvolvido um estudo de caso do transporte e armazenagem do material TENORM na Petrobras, propondo a adoção de uma nova embalagem. Este estudo foi construído através da análise da legislação pertinente a esta operação, do levantamento de campo das necessidades da logística de material TENORM e da avaliação dos requisitos existentes no cenário estudado, tanto em relação aos aspectos regulatórios analisados quanto a operação observada, buscando a identificação das soluções disponíveis no mercado que atendam estes requisitos.

1.3 Organização do Trabalho

No próximo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica, onde são identificados os materiais radioativos oriundos da produção, sua composição e características físico-químicas, e os tipos de embalagem com as principais características esperadas de uma embalagem de armazenamento.

No terceiro capítulo, são analisadas as normas e outros requisitos legais que regem as embalagens de transporte deste tipo de produto radioativo, confrontando regulamentos convencionais de transporte terrestre com normas específicas relativas a materiais radiativos de baixa emissão, de modo a identificar os requisitos mais restritivos da legislação.

No quarto capítulo é apresentado como se dá a logística do material TENORM desde sua coleta nas plataformas de petróleo até sua armazenagem nos depósitos da Petrobras, passando pelo transporte marítimo e terrestre e pelas operações de movimentação dentro dos armazéns. Neste capítulo também são determinados os requisitos mínimos a serem considerados para a embalagem proposta e analisadas as demandas do processo logístico, confrontando os requisitos levantados com as possíveis soluções de mercado identificadas. Também neste capítulo são apurados os ganhos estimados com a adoção da solução proposta.

No último capítulo, são apresentadas as nossas conclusões sobre os ganhos obtidos nesta solução e os passos propostos para sua aplicação na Petrobras.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Resíduos TENORM na produção de petróleo

Durante a atividade de produção de petróleo e gás, material radioativo de ocorrência natural (NORM - *Naturally Occurring Radioactive Materials*), mais especificamente o rádio, é também carregado na água presente nos reservatórios, que misturada com água do mar, precipita parte do rádio com o sulfato de bário ($BaSO_4$) e de estrôncio ($SrSO_4$), além do carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Este material se acumula nos equipamentos da plataforma de produção de petróleo na forma de incrustação ou borra radioativa. O resíduo, agora concentrado pelo processo produtivo, é chamado TENORM (*Tecnollogically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*) e seu tratamento é controlado por recomendações regulatórias internacionais através de publicações da Agência Internacional de Energia Atômica - IAEA (TAUHATA *et al.*, 2014) e no Brasil por normas emitidas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN.

Nos processos de produção de petróleo e gás, os principais radionuclídeos associados ao NORM são “o rádio-226 e rádio-228, provenientes do decaimento dos isótopos de urânio-238 e tório-232, respectivamente, presentes nas formações do reservatório das quais o hidrocarboneto é produzido” (SCHENATO *et al.*, 2013, p.2). A borra radioativa formada nestes processos é uma mistura de petróleo, sedimentos e produtos de corrosão que acumulam dentro das tubulações, no fundo de tanques de armazenagem e outros equipamentos, e é formada principalmente de carbonatos e silicatos contendo rádio (JESUS *et al.*, 2005). Matta (2016) alerta que "quanto maior for a salinidade, maior a probabilidade de NORM ser mobilizado". Como a salinidade da água de produção do poço geralmente aumenta com o passar do tempo, é de se esperar que poços antigos apresentem níveis mais elevados de NORM do que poços mais novos.

No que se refere à gerência dos rejeitos de material radioativo gerados, alguns procedimentos operacionais se destacam (TAUHATA *et al.*, 2014) em relação ao transporte e armazenagem:

- A segregação de rejeitos deve ser feita no local em que foram produzidos;

- Os recipientes devem ser adequados às características físicas, químicas, biológicas e radiológicas dos rejeitos e condições asseguradas de integridade;
- Os recipientes destinados ao transporte interno devem atender aos limites máximos para contaminação externa;
- O transporte externo é regulado por norma da CNEN;
- O local de armazenamento deve dispor de barreiras físicas e radiológicas para conter com segurança os rejeitos, evitar sua dispersão para o ambiente e minimizar a exposição de trabalhadores;

Avaliando os principais radionuclídeos associados ao processo observa-se que os resíduos TENORM oriundos da produção de petróleo são rejeitos radioativos de baixa emissão, com decaimento em radiação Alfa e Beta. Estes tipos de radiação, apesar de também serem prejudiciais ao ser humano, são mais facilmente bloqueadas que as radiações X e Gama (Figura 3), que possuem comprimento de onda muito curto e, conseqüentemente, alta energia (ANDREUCCI, 2019).

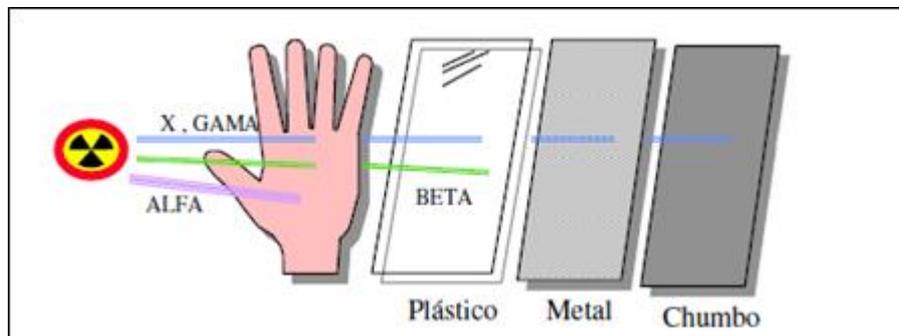


Figura 3: Características de Penetração das Radiações Ionizantes
 Fonte: ANDREUCCI, 2019

Outras características destes rejeitos são analisadas abaixo, para melhor enquadrar o material a ser transportado e armazenado.

Caracterização do Fluido

Verificando estudos anteriores que analisam as características da borra de petróleo, algumas características físico-químicas podem ser destacadas com o intuito de analisar se as regras relacionadas a outros tipos de fluidos podem ser aplicadas ao transporte de resíduos TENORM.

A análise feita por FRANCO et al (2013) aponta densidades da borra de petróleo: 0,882 g/cm³ a 20°C, 0,852 g/cm³ a 60°C e 0,839 g/cm³ a 90°C. Para o transporte deste fluido nas condições climáticas das regiões petrolíferas brasileiras, será considerada a densidade de 0,882 g/cm³, podendo este valor variar em caso de diluição em outros líquidos.

O ponto de fulgor do óleo ensaiado no estudo de GUIMARÃES et al (2016) foi aproximadamente 117°C. De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), este, para ser inflamável, deve ter PF<60°C. Desta forma o fluido não se enquadra na classe 3 da resolução 420 da ANTT (líquidos inflamáveis). O valor médio do pH na borra foi 6,80 (±0,0512), mostrando-se dentro do intervalo (2≤pH≤12,5) que o classifica como não corrosivo, segundo NBR 10004 (ABNT, 2004).

O mesmo estudo relata também as concentrações elevadas de metais pesados, especialmente o Pb (126000mg/kg), mas de acordo com tabela de precedência de riscos da Resolução da ANTT, as exigências para materiais radioativos são mais restritivas do que para os grupos de líquidos tóxicos.

2.2 Características de Embalagens

Para definir as características esperadas para a embalagem, é necessário identificar inicialmente os diversos tipos de embalagens e as funções a serem desempenhadas por estas.

Ballou (2006) destaca alguns objetivos a serem alcançados no uso de embalagens (p.83):

- Facilitar a armazenagem e manuseio;
- Promover melhor utilização dos equipamentos de transporte;
- Dar proteção ao produto;
- Promover a venda do produto;
- Facilitar o uso do produto;

Destes objetivos apresentados por Ballou, os três primeiros se destacam quando se trata de buscar uma embalagem que tem como foco o armazenamento de produtos radioativos por longo período. David e Steward (2010, p.345), ao tratar de embalagens de transporte marítimo, enumeram as três principais funções da embalagem de transporte:

- Garantir que os produtos embalados cheguem ao seu destino sem avarias;

- Facilitar a manipulação de produtos enquanto em trânsito;
- Fazer parte da estratégia de serviços ao cliente implementadas pela empresa.

Pode-se observar que a proteção do produto e a facilidade de manuseio (que pode incluir também a correta utilização de equipamentos) são preocupações recorrentes e efetivamente aplicáveis quando se trata de armazenamento de material radioativo. Já Pedelhes (2005), ao destacar as funções logísticas da embalagem, de contenção, proteção e comunicação, alerta que “o grau de eficiência da embalagem nesta função depende das características do produto”. Ela também lista os principais riscos aos quais as embalagens estão submetidas: choques, aceleração, temperatura, vibração, compressão, oxidação, perfuração, esmagamento, entre outros.

Quanto aos tipos de embalagens geralmente encontrados no mercado para o transporte e armazenamento de produtos líquidos, temos:

1) Tambor de aço carbono

Tambores de aço carbono são embalagens de 200 litros muito utilizados para armazenamento de graneis, que possuem grande resistência mecânica e resistência à altas temperaturas, porém são embalagens que possuem como desvantagem a impossibilidade de desmontagem para transporte, alto peso da embalagem vazia, baixo aproveitamento volumétrico na armazenagem, além de risco de tombamento. Os tambores de aço carbono podem ser colocados dentro de *spill drums* (Figura 4) que são dispositivos de proteção que evitam o vazamento de produtos perigosos.



Figura 4: Spill Drum

2) Tambor de plástico (polietileno)

Tambores de plástico, ou bombonas plásticas, são embalagens de 200 litros que possuem grande resistência à corrosão, facilidade de limpeza e baixo peso da embalagem, porém são embalagens que possuem como desvantagem a impossibilidade de desmontagem para transporte, baixo aproveitamento volumétrico na armazenagem, além de risco de tombamento.

3) IBC composto

Conforme definido na Resolução 420/2004 da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), contentores intermediários para grânéis ou IBC (*Intermediate Bulk Containers*) são embalagens portáteis rígidas ou flexíveis, de uso reutilizável, com as seguintes características:

a) capacidade igual ou inferior a:

- (i) 3,0 m³ para sólidos e líquidos dos grupos de embalagem II e III;
- (ii) 1,5 m³ para sólidos do grupo de embalagem I, se acondicionadas em contentores flexíveis de plástico rígido compostos de papelão e de madeira;
- (iii) 3,0 m³ para sólidos do grupo de embalagem I, quando acondicionados em contentores metálicos;
- (iv) 3,0 m³ para materiais radioativos da Classe 7;

b) projetado para movimentação mecânica;

c) resistente aos esforços provocados por movimentação e transporte

A mesma Resolução 420 da ANTT, no item 6.5.1.3, apresenta as seguintes categorias de IBCs: IBC Metálico, IBC Flexível, IBC de Plástico Rígido, IBC Composto, IBC de Papelão e IBC de Madeira.

A embalagem geralmente conhecida como embalagem IBC é a embalagem de IBC Composto que tem o núcleo de plástico rígido com armadura de metal (figura 5). Ela consiste de um núcleo de polietileno para contenção de fluidos, uma base com padrões dimensionais de paletes e uma armadura metálica para proteção do núcleo e tem como vantagem a resistência à corrosão, o baixo peso da embalagem e a boa capacidade volumétrica, porém, como as demais, não pode ser desmontada.



Figura 5: Embalagem IBC

Em comparação com o tambor, a embalagem IBC ocupa o mesmo espaço que quatro tambores, porém tem a capacidade volumétrica de cinco tambores (1000 litros). No aspecto

econômico MAIA (2013) estima em 42% o ganho na utilização do IBC além de ter maior facilidade na descarga do produto e menor risco de acidente químico.

MAIA (2013) identifica dois motivos para, mesmo com todas estas vantagens, o tambor continuar seguindo como embalagem mais utilizada na indústria química: os equipamentos já instalados nas plantas industriais serem adaptados para o manuseio de tambores e o volume padrão do IBC ser cinco vezes maior do que o do tambor favorecendo este último quando são utilizadas quantidades menores de insumos químicos.

Devido à baixa radioatividade do material TENORM e levando-se em conta o volume de resíduos gerados e o tempo esperado de armazenagem, a embalagem de proteção deve oferecer uma adequada proteção radioativa, bom aproveitamento volumétrico na armazenagem, boa resistência à corrosão e boa relação custo x durabilidade. Devido ao risco de impacto ambiental, devem ser buscados meios para prover também proteção mecânica e contra vazamentos durante o transporte do produto. Apesar de desejável, a questão do custo de transporte da embalagem vazia, antes do uso, é um aspecto pouco relevante, uma vez que se torna uma questão menor em relação ao tempo que a mesma permanecerá estocando o resíduo radioativo.

As embalagens IBC têm o potencial de atender às principais necessidades do transporte e armazenagem de produtos radioativos devido à alta eficiência volumétrica, a possibilidade de contenção da radioatividade do fluido e aos acessórios para carga e descarga tanto do fluido quanto da própria embalagem, que aumentam a segurança nos procedimentos de manuseio e possibilidade de dimensionamento da armadura para garantir sua resistência a diferentes solicitações mecânica acidentais.

É necessário determinar as especificações técnicas mínimas para a utilização deste tipo de embalagem para resíduos TENORM de forma a favorecer as operações envolvidas no processo bem como atender os requisitos de projeto estabelecidos nas normas pertinentes.

3 Análise de Regulamentos e Normas

3.1 Regulamentos relativos a transporte de produtos perigosos

Como as operações de transporte de material TENORM envolvem transporte marítimo e terrestre, verifica-se que devem ser examinados regulamentos relativos ao transporte terrestre e marítimo.

Regulamento de transporte terrestre

No transporte terrestre, o principal regulamento a ser analisado é a Resolução 420/2004 da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) que apresenta as Instruções Complementares ao Regulamento do Transporte Terrestre de Produtos Perigosos. Importante dizer que, para os produtos Classe 7 (materiais radioativos), as disposições gerais, exigências e demais controles relativos ao transporte terrestre de materiais radioativos estão estabelecidos nas normas da CNEN, porém quanto as exigências sobre as embalagens, algumas são colocadas nesta resolução, tais como:

- Os tanques portáteis utilizados no transporte de materiais radioativos só devem ser usados para transportar outros produtos após descontaminação, de tal forma que a contaminação remanescente e o nível de radiação sejam inferiores aos respectivos limites estabelecidos nas normas da CNEN
- Tanques e contentores intermediários para granéis, utilizados no transporte de material radioativo, não devem ser usados para armazenagem ou transporte de outros produtos, exceto se descontaminados até o nível de 0,4Bq/cm², no caso de emissores beta e gama e emissores alfa de baixa toxicidade, e 0,04Bq/cm², no caso de todos os outros emissores alfa.
- A marcação de materiais radioativos deve atender os requisitos específicos estabelecidos nas normas da CNEN.

Quanto às exigências para fabricação e ensaio de embalagens (capítulo 6 do anexo da resolução), elas não se aplicam aos produtos radioativos exceto:

- (i) material radioativo com outras propriedades perigosas (riscos subsidiários) deve atender, também, ao disposto na Provisão Especial nº 172;
- (ii) material de baixa atividade específica (BAE) e objetos contaminados na superfície (OCS) podem ser transportados em certas embalagens definidas neste Regulamento, desde que sejam atendidas também as disposições suplementares estabelecidas nas normas da CNEN.

Como os materiais TENORM são de baixa atividade específica, estes podem ser transportados em algumas embalagens apresentadas na Resolução 420 da ANTT “*desde que sejam atendidas também as disposições suplementares estabelecidas nas normas da CNEN*” (item 6.1.1.1).

Quanto às exigências específicas para fabricação e ensaio de contentores intermediários para granéis (IBC) a resolução, além de estabelecer regras específicas para codificação, apresenta algumas exigências para sua fabricação, entre elas:

- 6.5.1.5.2 Os IBCs devem ser construídos e fechados de forma que nenhuma parte do seu conteúdo possa escapar, em condições normais de transporte, incluindo os efeitos da vibração, ou alterações de temperatura, umidade ou pressão.
- 6.5.1.5.3 Os IBCs e seus fechos devem ser fabricados com materiais compatíveis com o conteúdo, ou ser internamente protegidos, de modo que não sejam passíveis de:
 - a) Sofrer ataque do conteúdo, tornando seu uso perigoso;
 - b) Provocar reação ou decomposição do conteúdo, ou formação de compostos nocivos ou perigosos com o IBC.
- 6.5.1.5.6 Os IBCs, suas fixações e seus equipamentos de serviço e estrutural devem ser projetados para suportar, sem perda de conteúdo, a pressão interna da carga e os esforços decorrentes de manuseio e transporte normais. Os IBCs que possam ser empilhados devem ser projetados para suportar o empilhamento..

Quanto às exigências específicas para os IBCs compostos com recipientes internos de plástico, observa-se inicialmente no item 6.5.3.4.1 que o tipo de IBC a ser adotado para os resíduos TENORM são os IBCs do tipo 31HZ1 (IBC compostos, com recipiente interno de plástico rígido destinados a líquidos), onde a letra Z deve ser substituída por outra letra maiúscula correspondente à natureza do material empregado na fabricação da armação externa, conforme 6.5.1.4.1 (b), sendo A = Aço (todos os tipos e revestimentos) e B = Alumínio, entre outros. Devem ser destacadas também as seguintes exigências:

- 6.5.3.4.6 O recipiente interno deve ser fabricado de material plástico adequado, com especificações conhecidas, e ter resistência apropriada a sua capacidade e ao uso a que se destina. O material deve apresentar resistência adequada ao envelhecimento e à

degradação provocada pelas substâncias contidas e, quando couber, pelas radiações ultravioletas. Seu desempenho a baixas temperaturas deve ser levado em conta, se for o caso. A impregnação pelo conteúdo não deve constituir um risco em condições normais de transporte.

- 6.5.3.4.7 Quando houver necessidade de proteção contra radiação ultravioleta, esta deve ser proporcionada pela adição de negro-de-fumo, outros pigmentos ou inibidores adequados. Esses aditivos devem ser compatíveis com o conteúdo e permanecer efetivos durante a vida útil do recipiente interno. No caso de serem empregados negro-de-fumo, pigmentos ou inibidores diferentes dos adotados no projeto-tipo ensaiado, são dispensados novos ensaios se o teor desses aditivos não afetar negativamente as propriedades físicas do material de fabricação.
- 6.5.3.4.12 A resistência do material e a fabricação da armação externa devem ser apropriadas à capacidade do IBC composto e ao uso a que este se destina.

No caso em questão, requisitos como resistência contra radiação ultravioleta e resistência adequada ao envelhecimento e à degradação provocada pelas substâncias contidas são relevantes na especificação do IBC proposto.

Quanto aos ensaios exigidos, estes devem ser feitos com o IBC pronto para transporte e, sempre que possível, com a substância a ser transportada (item 6.5.4.1.2). Caso não seja recomendável, esta substância pode ser substituída por outra com as mesmas características físicas. Os principais ensaios estabelecidos para IBCs compostos são:

- Ensaio de empilhamento: A carga a ser aplicada ao IBC deve ser equivalente a 1,8 vez a massa bruta máxima admissível de todos os IBCs similares que possam ser empilhados sobre ele.
- Ensaio de Queda: No caso de IBCs compostos, este deve ser enchido, até no mínimo, 95% de sua capacidade, se for destinado a sólidos, ou até 98%, se destinado a líquidos, de acordo com o projeto-tipo. O IBC deve ser deixado cair sobre uma superfície horizontal, rígida, plana, lisa e não resiliente, de modo que o ponto de impacto ocorra na parte da base considerada mais vulnerável.

Para os ensaios de queda-livre, a altura estabelecida no 6.1.5.3.5 para o caso de líquidos em embalagens simples e embalagens internas de embalagens combinadas, como os IBCs compostos, se o ensaio for feito com água:

- a) Quando a substância a ser transportada tiver densidade relativa não superior a 1,2:

Tabela 1: Altura de queda livre para ensaio com líquidos
Fonte: Item 6.1.5.3.5 (a), ANTT, 2004

Grupo de Embalagem I	Grupo de Embalagem II	Grupo de Embalagem III
1,8 m	1,2 m	0,8 m

- b) Quando a substância a ser transportada tiver densidade relativa superior a 1,2, a altura de queda deve ser calculada com base em sua densidade relativa (d) arredondada para a primeira casa decimal, como segue:

Tabela 2: Altura de queda livre para ensaio com líquidos
Fonte: Item 6.1.5.3.5 (a), ANTT, 2004

Grupo de Embalagem I	Grupo de Embalagem II	Grupo de Embalagem III
$d \times 1,5(m)$	$d \times 1,0(m)$	$d \times 0,67(m)$

Regulamento de transporte marítimo

No transporte marítimo de cargas, a Norma de Autoridade Marítima 29 (NORMAM 29) é que tem o objetivo de “*estabelecer requisitos para o transporte e armazenamento, em mar aberto, de cargas perigosas em embalagens, cargas sólidas perigosas a granel, substâncias líquidas nocivas a granel e gases liquefeitos a granel, visando à segurança das pessoas, à integridade da embarcação e minimizar os riscos ao meio ambiente*” (MARINHA DO BRASIL, 2013, p. 5). Para cargas perigosas embaladas, a NORMAM 29, no item 0106, estabelece alguns requisitos semelhantes aos da Resolução 420 da ANTT, no que se refere ao acondicionamento, a rotulagem, a nomenclatura e a homologação de embalagens, mas também acrescenta requisito adicional que “*a altura de empilhamento de embalagens não deverá ser superior a 3 m, salvo no caso de serem empregados dispositivos que permitam alcançar uma altura superior, sem sobrecarregar as embalagens e que evitem o comprometimento da segurança*” (MARINHA DO BRASIL, 2013, p. 12).

Especificamente quanto aos produtos radioativos, estabelece que seu transporte deverá estar de acordo com as normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e trata, no item 0104 (c) de procedimentos exigidos quando a embarcação transporta cargas radioativas

embaladas. Estes procedimentos estão relacionados à documentação a ser preenchida, forma de segregação da mercadoria e autorizações a serem apresentadas.

Quanto aos requisitos específicos para os IBCs, no item 0102 (b) informa que estas embalagens devem ser manuseadas mecanicamente e resistirem aos esforços provocados pelo manuseio e pelo transporte, requisito este comprovado por meio de ensaios específicos durante a homologação. A homologação deve ser realizada pela autoridade marítima do país de origem, no caso de embalagens estrangeiras e pela Diretoria de Portos e Costa (DPC) no caso de embalagens brasileiras.

3.2 Normas relativas à manipulação de material radioativos (CNEN).

As principais normas brasileiras publicadas pela CNEN relacionadas a TENORM são:

- CNEN-NE-5.01/1988 – Transporte de Materiais Radioativos (Resolução CNEN N° 13/88 D.O.U. 01/08/1988);
- CNEN NN 8.01/2014 - Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação (Resolução CNEN 167/14);

Os rejeitos TENORM são classificados conforme Capítulo II da Norma CNEN 8.01/2014 como Classe 2.2 - Rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Radiação contendo Radionuclídeos Naturais (RBMN-RN), porém somente devem ser gerenciados pela Resolução “Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação” quando acondicionados de forma segregada em embalagens. Como os rejeitos TENORM são transportados e armazenados embalados, esta norma se aplica a operação em questão.

Na seção III desta norma, que trata de embalagens e volumes, alguns pontos merecem destaque:

- Art. 15 As embalagens para armazenamento de rejeitos radioativos em depósitos inicial, intermediário ou provisório devem ter suas condições de integridade asseguradas e, quando necessário, devem ser substituídas.
- Art. 16 As embalagens destinadas ao transporte de rejeitos radioativos não devem apresentar contaminação superficial externa em níveis superiores aos especificados no Anexo V.

- Art. 17 Os volumes de rejeitos radioativos devem possuir vedação adequada para evitar perda do seu conteúdo.

Já a Norma CNEN 5.01/1988 estabelece, no item 6.1.1, os requisitos gerais de projeto para embalados para transporte em qualquer via, entre os quais se destacam, que as embalagens devem ser projetadas de modo que:

- a) sejam fácil e seguramente manuseáveis e transportáveis, levando-se em consideração a massa, o volume e a forma dos mesmos;
- e) tanto quanto praticável, tenham suas superfícies externas livres de saliências, de forma a poderem ser facilmente descontaminadas;
- g) sejam capazes de suportar os efeitos de qualquer aceleração, vibração ou ressonância de vibração possíveis durante transporte de rotina, sem qualquer prejuízo para a eficácia dos dispositivos de fechamento dos recipientes ou para a integridade do embalado como um todo.
- i) tenham os materiais da embalagem e de quaisquer componentes ou estruturas, física e quimicamente compatíveis entre si e com o conteúdo radioativo, levando-se, também, em conta, o comportamento desses materiais sob o efeito de radiação;
- j) todas as válvulas, através das quais possa haver vazamento de material radioativo, tenham proteção contra operações não autorizadas;

Para o transporte de embalados industriais, quando o embalado industrial é utilizado para transporte de matéria de baixa atividade específica (BAE), deve atender aos requisitos de projeto estabelecidos para os casos de tanque e de contêiner qualificados como embalado tipo EI-2 com base no demonstrado na tabela V da CNEN 5.01/1988 (tabela 3).

Tabela 3: Requisitos para Integridade de Embalado Industriais
Fonte: Tabela V - CNEN 5.01,1988

Conteúdo		Tipo de Embalado Industrial	
		Sob Uso Exclusivo	Não Sob Uso Exclusivo
BAE-I	Sólido	EI-1	EI-1
	Líquido e Gasoso	EI-1	EI-2
BAE-II	Sólido	EI-2	EI-2
	Líquido e Gasoso	EI-2	EI-3
BAE-III		EI-2	EI-2

Conforme estabelecido no item 6.3.2 (b), estes tipos de embalados devem evitar o vazamento ou dispersão do conteúdo radioativo quando submetidos aos ensaios de queda livre e de empilhamento referidos nos itens A4.2.3 e A4.2.4 do anexo A, apresentados abaixo:

- Ensaio de Queda: A amostra deve cair, em queda livre, sobre um alvo de modo a sofrer o máximo de dano com relação aos aspectos de segurança a serem ensaiados, sendo que a altura da queda, do ponto mais inferior da amostra até a superfície superior do alvo, deve ser, no mínimo, igual àquela estabelecida na Tabela XIV que, para transporte com massa de embalado menor que 5.000 kg, corresponde à altura de 1,2 metros.
- Ensaio de Empilhamento: A amostra deve ser submetida a uma carga de compressão igual a maior dessas cargas: a equivalente a 5 vezes a massa do embalado real; a equivalente a 13 kPa (0,13 kgf.cm⁻²) multiplicada pela área da projeção vertical do embalado (em cm²).

3.3 Requisitos legais identificados

Buscando sempre os aspectos regulatórios mais restritivos nos regulamentos e normas apresentados acima, foram identificados os principais requisitos legais a serem aplicados na solução proposta:

- Os IBCs devem ser fechados para que nenhuma parte do seu conteúdo possa escapar, tanto em condições normais de transporte (Resolução ANTT), quanto durante a armazenagem do material (CNEN 8.01)
- Durante o transporte marítimo, os IBCs não poderão ser empilhados em altura superior a 3 metros de altura (NORMAM 29)
- Todas as válvulas do IBC tenham proteção contra operações não autorizadas (CNEN 8.01);

- Analisando os ensaios de queda livre da Resolução ANTT e da norma CNEN 5.01, verificou-se que os IBCs devem ser homologados como embalagens do grupo I ou como embalagem do grupo II, uma vez que os ensaios do grupo III não atendem aos requisitos da Norma CNEN para transporte de materiais TENORM
- Analisando os ensaios de empilhamento da Resolução ANTT e da norma CNEN 5.01, temos, considerando N o número máximo de volumes empilhados, M a massa do embalado, A a área da projeção vertical do embalado (em cm²), d a massa específica do fluido (em g/cm³) e h a altura útil da embalagem:

Ensaio para homologação ANTT

1,8 vezes a massa bruta dos volumes empilhados sobre ele – $(N-1) \times 1,8 \times M$

Ensaio esperado para homologação no CNEN

Critério 1: 5 x a massa do volume embalado – $5 \times M$

Critério 2: 0,13 x área da projeção vertical do embalado (em cm²) – $0,13 \times A$

Confrontando os requisitos

ANTT e Critério 1: $(N-1) \times 1,8 \times M > 5 \times M$

$N > 3,7$, sendo N um número inteiro:

O Empilhamento máximo deve ser de pelo menos 4 unidades.

ANTT e Critério 2: $(N-1) \times 1,8 \times M > 0,13 \times A$

$(N - 1) \times 1,8 \times d \times A \times h > 0,13 \times A$

$3 \times 1 \times h > 0,722$

$h > 24 \text{ cm}$

Portanto os IBCs devem ser homologados para um empilhamento máximo N de no mínimo 4 unidades, e sua altura deve ser maior que 24cm para que a homologação ANTT seja sempre o suficiente para atender os critérios da norma CNEN.

4 Desenvolvimento da Solução

4.1 Logística de TENORM na Petrobras

O TENORM é coletado nas plataformas na forma de borra oleosa ou incrustações durante as manutenções dos equipamentos. Este material é recolhido em tambores de aço (Figura 6) que são colocados sobre paletes de 1200 mm x 1000 mm x 150mm, ocupando uma área de 1200 mm x 1200 mm devido ao diâmetro dos tambores, e transportados para os barcos de apoio em containers fechados ou em cestas de transporte. Ao contrário de outras empresas petrolíferas, a Petrobras não permite o uso de bombonas plásticas para este tipo de armazenamento devido aos riscos de tombamento.



Figura 6: Tambores armazenados na plataforma

Os tipos de rejeitos radioativos atualmente armazenados pela Petrobras são:

Tabela 4: Tipos de Rejeitos Armazenados

Tipo de Resíduo	Característica
Borra oleosa CAT I	$\geq 0,4 \mu\text{Sv/h}$ e $\leq 5,0 \mu\text{Sv/h}$
Borra oleosa CAT II	$\geq 5,0 \mu\text{Sv/h}$
Incrustações CAT II	$\geq 5,0 \mu\text{Sv/h}$

Este material é transportado para os portos de apoio e de lá é transportado por caminhão para os depósitos temporários de rejeitos radioativos da Petrobras sem perspectiva de armazenagem final pelo CNEN. Nos depósitos o tambor é por vezes colocado em *spill drums* e colocado em prateleiras de até seis metros e empilhamento máximo de dois *spill drums* ou três paletes (Figura 7). Toda a movimentação do material unitizado em paletes é realizado através de empilhadeiras.

Quando estão sobre paletes, os tambores têm menor risco de tombamento e podem permanecer somente nos tambores de aço. Quando não estão agrupados sobre paletes, os tambores são colocados dentro dos *spill drums* para reduzir o risco de vazamento. Os tambores de aço são substituídos a cada três anos devido a fatores de corrosão, que se intensifica com a exposição ao ambiente salino. Em 2017 o volume armazenado representava mais de 2500 m³ de área ocupada, com um crescimento previsto de 10% ao ano.



Figura 7: Tambores armazenados

Desta forma, o processo logístico dos resíduos TENORM na Petrobras é o inverso dos transportes críticos comumente controlados e executados na logística offshore. Na logística do TENORM, contentores vazios devem ser disponibilizados para consolidação da carga na unidade de produção, e a carga trazida com melhor aproveitamento para as instalações terrestres, conforme diagrama da figura 8. A importância de destacar este processo se dá na diferença de limitadores. No processo de retirada dos resíduos, o peso total transportado já não é limitado pela capacidade da unidade de produção em recebe-lo, uma vez que já está

embarcado, passando a valer o limitador geométrico na capacidade dos navios de transportar estes contentores.

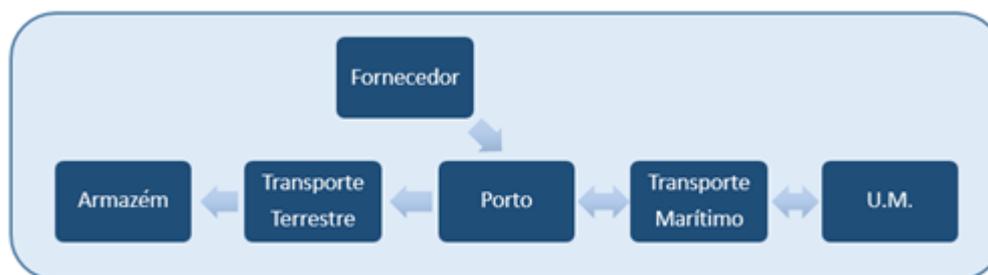


Figura 8: Processo Logístico de embalagem para TENORM na Petrobras

Apesar dos altos custos do transporte marítimo geralmente serem preponderantes na determinação das soluções logísticas, dado o extenso período de armazenamento destes resíduos, as reduções de custos relativos à armazenagem onshore também se tornam outro fator relevante a ser considerado durante a análise das soluções.

4.2 Estabelecimento dos requisitos técnicos mínimos

Observando o processo logístico dos resíduos TENORM, este pode ser separado em dois grupos distintos de necessidade, cada um com requisitos específicos a serem avaliados: operação offshore e operação onshore, além de atender os requisitos legais identificados no capítulo anterior.

Na operação offshore, o uso da embalagem nas plataformas e o custo do transporte marítimos são os pontos críticos. Na operação onshore o transporte é de baixo custo, porém a eficiência no aproveitamento dos armazéns e a durabilidade das embalagens se torna ponto crítico para as companhias de petróleo, devido às particularidades e autorizações exigidas para resíduos radioativos. A partir destes pontos é que serão determinados os requisitos mínimos de aceitação para estas embalagens.

Requisitos para o transporte offshore.

Após analisar as operações logísticas tanto na plataforma como nos modais de transporte e na transferência entre eles, foram identificados os seguintes requisitos:

- Dimensões: Como os tambores hoje são utilizados sobre paletes e, toda a logística da plataforma já prevê movimentação de materiais nestas dimensões, identifica-se que a

embalagem não deve exceder 1200 mm x 1200 mm, sempre buscando o melhor aproveitamento volumétrico em cestos e containers de 10 ou 20 pés.

- Peso: Como o peso é um dos limitadores críticos no embarque de material em plataformas, as embalagens propostas na solução não devem pesar mais que o conjunto atual para transporte do mesmo volume. O peso a ser considerado nesta comparação é a soma do total de tambores e paletes vazios em um container de 10 pés em sua capacidade máxima de 40 tambores. Considerando-se o peso de cada tambor 16 kg e o peso de cada paleta necessários 30 kg, temos:

Peso do conjunto de 4 tambores e 1 paleta - $(4 \times 16) + 30 = 94$ kg

N máximo de paletes no container - 2 (larg) x $2,5$ (compr) x 2 (alt) = 10 paletes

Peso total máximo de embalagens vazias por container - $10 \times 94 = 940$ kg

- Volume de resíduo transportado: Devido ao alto custo de transporte offshore, o volume de material transportado na solução proposta não deve ser menor do que volume atualmente transportado na solução atualmente adotada. Como a capacidade máxima de cada tambor é 200 litros, tem-se:

N máximo de tambores no container - 4 (l) x 5 (c) x 2 (a) = 40 tambores

Volume mínimo a ser transportado por container - $40 \times 200 = 8.000$ litros

- Empilhamento sob cargas dinâmicas: Conforme levantado no segundo capítulo, a densidade da borra oleosa é de $0,882$ g/cm³, porém, tanto em processos de jateamento ou com o objetivo de diluir o material radioativo, pode ser utilizado água, ou mais comumente, água salina (com farta oferta nas unidades marítimas), o que pode aumentar a densidade do produto final a ser transportado.

Densidade varia de $0,882$ g/cm³ (100% borra) a $1,021$ g/cm³ (100% água salina)

Considerando o pior caso - densidade de até $1,021$ g/cm³ (100% água salina)

Portanto, dentre as especificações requeridas, a embalagem deve garantir a integridade durante o transporte (submetido a cargas dinâmicas), com o empilhamento planejado, para fluidos com densidade de até $1,021$ g/cm³.

Requisitos para o armazenamento onshore.

Os requisitos para as embalagens no âmbito do armazenamento onshore focam no melhor aproveitamento volumétrico por conta da crescente necessidade de armazenamento deste produto e nas necessidades operacionais exigidas considerando um armazenamento de longo prazo.

- Altura em Empilhamento Máximo Estático: Com o objetivo do melhor aproveitamento vertical dos armazéns atuais, a altura do empilhamento máximo da solução proposta deve ser igual ou superior à altura do empilhamento atual de tambores sobre paletes. Considerando o empilhamento máximo de 3 volumes de tambores sobre paletes atualmente realizado temos:

Altura de tambor sobre palete - $850 \text{ (alt tambor)} + 140 \text{ (alt palete)} = 990 \text{ mm}$

Altura de 3 conjuntos empilhados - $3 \times 990 = 2.970 \text{ mm}$

Altura mínima a ser alcançada pela solução no empilhamento máximo - 2.970 mm

- Equipamentos de movimentação: Deve possuir acessórios compatíveis com os equipamentos de carga utilizados atualmente na movimentação de materiais no armazém
- Válvula de descarga: Tratando-se de um produto contaminante, as válvulas borboletas devem ser evitadas a fim de se ter a garantia contra vazamentos, bem como necessária a utilização de tampão roscado para configurar duplo bloqueio e garantir a completa vedação durante o transporte e armazenamento. O material da válvula não deve ser suscetível à corrosão em ambiente salino, recomendando-se válvulas poliméricas ou inox. Considerando o item 6.1.1 da CNEN 5.01, a válvula deverá ter ou permitir a instalação de proteção contra operações não autorizadas.
- Válvula de Respiro: Devido à decomposição do isótopo do Ra em Rn ao longo do seu decaimento, sendo o radônio apresentado na forma gasosa, a embalagem não deve conter válvula de respiro, conforme requisito legal identificado tanto na Resolução 420 da ANTT quanto na Norma CNEN 8.01.

4.3 Solução Proposta

Após identificados os requisitos legais nas Resoluções e Normas e os requisitos técnicos oriundos do processo logístico específico para este tipo de resíduo, foram pesquisadas fichas técnicas correspondentes a variações de embalagens IBC disponíveis no mercado brasileiro para confrontação com estes requisitos. Serão analisados os limitadores divididos em cada fase do processo logístico. Todos os requisitos considerados serão avaliados conforme o pior caso individualmente.

Processo Logístico da embalagem.

A embalagem é entregue no porto e carregada em containers de 10 ou 20 pés ou cestas de 10 pés. Dada que a solução para containers de 10 pés é escalável para os de 20 pés, considerando a possível limitação de guindastes em algumas plataformas, e visto que a possibilidade de empilhamento coloca mais complexidade nas solicitações mecânicas, será validada a solução aplicada em conjunto com o container de 10 pés.

O container carregado com embalagens vazias é transportado em barcos de apoio e levado até a unidade marítima, onde é içado por guindaste e colocado a bordo. Após o carregamento das embalagens com os resíduos TENORM, o container é levado ao barco de apoio de capacidade equivalente e levado ao porto. No porto as embalagens são descarregadas, armazenadas e depois levadas por caminhão até o armazém temporário, unitizadas ou não. Por fim as embalagens são movimentadas utilizando-se empilhadeiras e armazenadas nas estantes, onde permanecerão armazenadas durante seu ciclo de vida, quando serão substituídas por outra com as mesmas características.

Das opções de IBC disponíveis no mercado levantadas, selecionamos para validação nos requisitos uma embalagem de 1200 mm de largura por 1000 mm de comprimento e 1160 mm de altura (com capacidade de 1000 L), sendo a que tem melhor aproveitamento da área do container, que possuem 2400 mm de largura e 3000 mm de comprimento e 2.500 mm de altura.

Em um container de 10 pés:

$$\text{Número de IBCs por fila (comprimento)} - \frac{3.000}{1.000} = 3 \text{ IBCs}$$

$$\text{Número de IBCs por coluna (largura)} - \frac{2.400}{1.200} = 2 \text{ IBCs}$$

$$\text{Número de IBCs por pilha (altura)} - \frac{2500}{1.160} = 2,155 \text{ IBCs} \rightarrow 2 \text{ IBCs}$$

O número total de embalagens no container de 10 pés será – $3 \times 2 \times 2 = 12$ IBCs

Validação dos requisitos

Abaixo serão confrontados os requisitos estabelecidos no tópico 4.2 com a solução proposta de forma a avaliarmos a validade da solução:

- Dimensões: O IBC selecionado está dentro da faixa estabelecido para altura, largura e comprimento máximos para não impactar na operação na plataforma.
- Peso: O peso do IBC comercial utilizado como referência é de 59 kg por unidade. O requisito é que o peso das embalagens vazias para embarque na plataforma, em um container de 10 pés, seja menor do que o peso da solução atual de tambores metálicos.

Peso dos IBCs vazios no container - $(12 \times 59) = 708$ kg

Peso total das embalagens vazias é menor do que a solução atual (940 kg)

- Volume de resíduo transportado: Considerando a capacidade de 1000 L em cada uma embalagem, o volume total transportado deve ser maior do que na solução atual, para o mesmo volume ocupado na embarcação de transporte.

Capacidade de resíduo no container - $(12 \times 1.000) = 12.000$ litros

Volume transportado é maior do que na solução atual (8.000 litros)

- Empilhamento sob cargas dinâmicas: Conforme ficha técnica fornecida pelo fabricante, as embalagens são dimensionadas para dois níveis de empilhamento para fluidos até $1,5 \text{ g/cm}^3$ e em nível único para fluidos com densidade superior. Estas especificações validam o empilhamento previsto de 2 unidades em containers, carregados com o TENORM com densidade máxima esperada de $1,021 \text{ g/cm}^3$.
- Altura em Empilhamento Máximo Estático: Sendo a capacidade máxima de empilhamento estático do IBC comercial de referência o empilhamento em 4 níveis, temos:

Altura no empilhamento máximo - $(4 \times 1.160) = 4.640$ mm

O que permitirá um melhor aproveitamento vertical do armazém, principalmente onde não há estruturas de sustentação.

- Atendimento ao ensaio de empilhamento: Para que o ensaio de empilhamento homologado na ANTT atenda aos requisitos de empilhamento máximos do CNEN, temos N (número de volumes no empilhamento máximo) = 4. Como o empilhamento máximo homologado é de pelo menos 4 e a altura útil da embalagem é de 1020 mm, as embalagens atendem também aos critérios de empilhamento exigidos no ensaio do CNEN
- Equipamentos de movimentação: O palete da embalagem selecionada possui 4 entradas para empilhadeira de 100 mm cada, atendendo às máquinas de carga utilizadas nas plataformas e no porto para carregamento de containers e caminhões, assim como as utilizadas nos armazéns da empresa para empilhamento nas prateleiras.
- Válvula de descarga: O modelo de embalagem possui opções com válvulas borboleta integradas e rosqueáveis nos diâmetros 50, 80 e 150, e válvula esfera rosqueável DN 50 em PEAD. Apenas a opção com válvula esfera atende aos requisitos, garantindo menor risco de vazamentos de produtos perigosos. Deve ser adicionado um kit para bloqueio da válvula à operações não autorizadas.
- Válvula de Respiro: Dentre as opções de abertura de envase deste modelo de embalagem, estão as tampas rosqueáveis DN 150 e DN 225, ambas em versões com ou sem válvula de respiro. Para uso dentro dos requisitos para produtos TENORM, apenas as opções sem válvula de respiro devem ser utilizadas.

Conforme verificado acima a solução proposta da utilização de um IBC comercial com capacidade de 1000 L, possuindo 1200 mm de largura por 1000 mm de comprimento e 1160 mm de altura, com válvula de descarga de esfera roscável em PEAD e kit de bloqueio, com abertura de envase roscável sem respiro e dimensionamento de cargas conforme ficha técnica fornecida pelo fabricante, homologado para o grupo de embalagem II, atende aos requisitos observados nas normas analisadas e às condições limitantes do processo logístico de onshore e offshore de resíduos TENORM da Petrobras.

Ganhos identificados

O ganho mais evidente com a adoção da nova embalagem é o aumento da eficiência nos armazéns temporários de TENORM, que pode chegar a ganhos de até 28% de aproveitamento volumétrico, como vemos abaixo:

Volume ocupado por 4 tambores sobre palete, que comportam 800 litros

$$1200 \times 1200 \times 990 = 1.425,6 \times 10^6 \text{ mm}^3 = 1,4256 \text{ m}^3$$

$$\text{O aproveitamento volumétrico é: } \frac{800}{1,4256} = 561,17 \text{ litros por m}^3$$

Volume ocupado por 1 IBC que comporta 1000 litros

$$1200 \times 1000 \times 1160 = 1.392 \times 10^6 \text{ mm}^3 = 1,392 \text{ m}^3$$

$$\text{O aproveitamento volumétrico é: } \frac{1000}{1,392} = 718,39 \text{ litros por m}^3$$

$$\text{Portanto o ganho volumétrico é: } \frac{718,39}{561,17} - 1 = 28\%$$

Especificamente na gestão destes resíduos, este ganho é ainda mais relevante considerando o longo tempo de armazenagem, indefinido até que demais pesquisas relativas à alternativas de destinação final sejam concluídas com sucesso. O aumento da capacidade de empilhamento, também trará benefícios em locais onde não há estrutura de sustentação para armazenamento vertical instalada. O mesmo ganho observado no armazenamento onshore também é observado no armazenamento do resíduo nas unidades marítimas, contudo a capacidade volumétrica de transporte de resíduos em containers aumenta em 50%, passando de 8 mil litros para 12 mil litros para containers de 10 pés, devido ao melhor aproveitamento da altura do container no caso apresentado (figura 9), reduzindo a demanda efetiva de transporte marítimo de cargas.

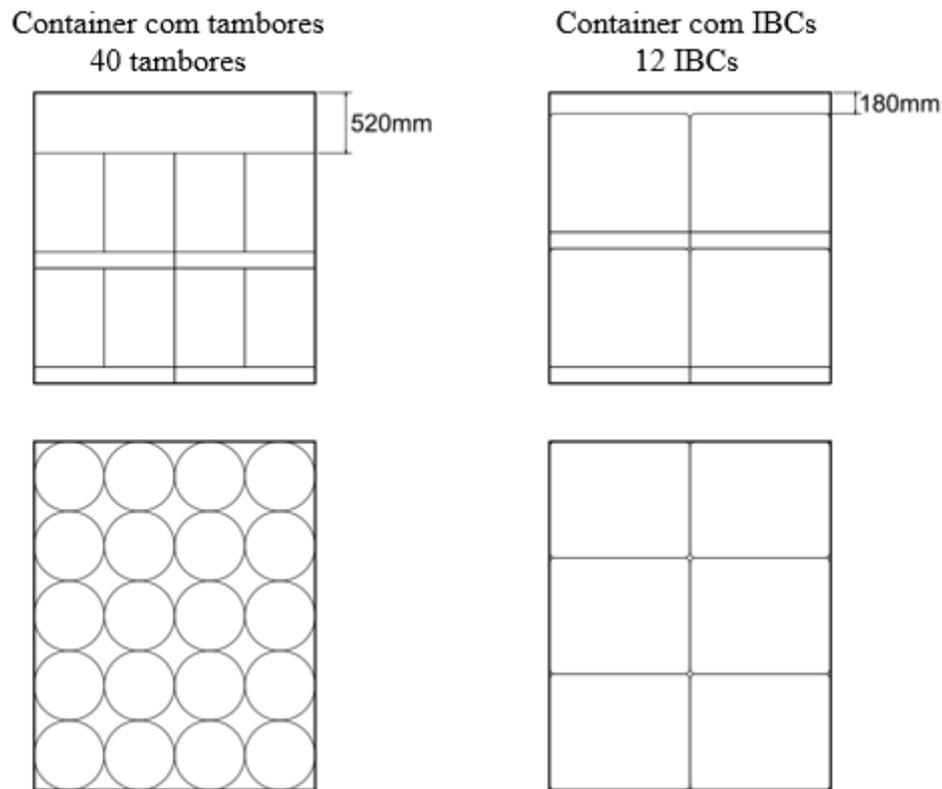


Figura 9: Comparativo entre a solução atual e a solução proposta

Podemos citar também a redução de 24,7% do peso das embalagens embarcadas nas unidades marítimas (de 940 kg para 708 kg), onde o peso é fator crítico, mesmo com o aumento na capacidade de transporte dos fluidos.

Outro ponto a ser considerado é que, como as embalagens IBC são homologadas para uso durante 5 anos no primeiro envase, haverá uma redução no custo de manuseio, uma vez que a necessidade de troca de embalagens poderá ser feita em intervalos maiores, desde que sejam utilizadas embalagens novas.

Esta maior durabilidade das embalagens traz um maior equilíbrio financeiro nos custos das embalagens, uma vez que o custo de aquisição de tambores homologados para armazenar 1000 L de resíduos por 3 anos é da ordem de R\$ 1.150,00 enquanto o custo de uma embalagem IBC para armazenar os mesmos 1000 L por 5 anos custa por volta de R\$ 1.300,00 resultando em uma redução de 32% no custo anualizado da embalagem. Quando comparado a solução do tambor com *spill-drum*, o custo da nova embalagem se torna ainda mais vantajoso.

5 Conclusão

Devido a especificidade do container IBC adotado, não foi possível alcançar o benefício econômico de 42% de redução de custo logístico identificado por MAIA (2013), ainda que não avaliados os impactos nos custos operacionais de armazenagem, porém outros benefícios foram identificados na substituição de tambores por embalagem IBC para o armazenamento de resíduos radioativos. O mais relevante a ser destacado é o ganho volumétrico de 28% na armazenagem, que no caso em questão é ponto central, pois não há perspectiva de saída do produto do depósito intermediário da Petrobras para depósito definitivo da CNEN. Também no transporte, ganhos ainda maiores são observados, especialmente no transporte offshore, onde os custos de transporte são mais elevados.

Na armazenagem, tanto a menor necessidade de troca periódica de embalagem quanto a facilidade de realizar esta operação tendem a trazer uma redução do custo operacional ainda não efetivamente quantificada.

Com os significativos ganhos na armazenagem, recomenda-se a substituição das embalagens utilizadas, não só as que são utilizadas na coleta em campo, mais também nas trocas dos tambores quando terminar a sua vida útil, com o objetivo de reduzir o crescimento da área de estoque utilizada para o armazenamento destes produtos.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se a avaliação em campo dos ganhos operacionais efetivamente obtidos com a adoção desta solução.

Para a implantação deste tipo de embalagem na Petrobras, será necessário adaptar-se os procedimentos da empresa, tanto de transporte quanto de armazenagem relativos aos materiais radioativos e realizar um projeto-piloto para se identificar possíveis dificuldades ou ajustes necessários na solução proposta.

6 Referências Bibliográficas

ANDREUCCI, R. **Proteção Radiológica: Aspectos Industriais**. Ed. Jun/2019. São Paulo: ABENDI, 2019.

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Resolução 420, de 12 de fevereiro de 2004**. Brasília, 2004.

BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento da cadeia de suprimento: planejamento, organização e controle da cadeia de suprimento**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Norma CNEN NE 5.01 – Transporte de Materiais Radioativos (Resolução CNEN N° 13/88)**. Rio de Janeiro, 1988

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Norma CNEN NN 8.01 - Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação (Resolução CNEN 167/14)**. Rio de Janeiro, 2014

DAVID, Pierre; STEWART, Richard. **Logística Internacional**. São Paulo: Cengage Learning, 2010

FRANCO, Evelin Daiane; VIANNA, Anderson; LIMA, Ícaro; DOS ANJOS, José Ângelo. **Avaliação Físico-Química das borras de Petróleo, oriundas de antigos poços, existentes na região de São Francisco do Conde, Bahia**. X Seminário estudantil de produção acadêmica - UNIFACS 2013. Salvador, 2013.

GUIMARÃES, Adriana; CHIAVONE-FILHO, Osvaldo; NASCIMENTO, Claudio Augusto; TEIXEIRA, Antonio Carlos; MELO, Henio. **Estudo da caracterização da borra de petróleo e processo de extração do óleo**. Revista – Engenharia Sanitária e Ambiental, Vol 21, número 2. Rio de Janeiro, 2016

GÓES, Alexandre G. **Gestão de Resíduos Radioativos**. Workshop – Supporting the Introduction of Nuclear Energy (ARCAL XCV) da Conferência Nuclear Internacional do Atlântico - INAC 2011. Belo Horizonte, 2011.

JESUS, Selma P., VITORELLI, José C. e SILVA, Ademir. X. **Aspectos Normativos sobre Ocorrência Natural de Material Radioativo em Rejeitos de Petróleo**. Conferência Nuclear Internacional do Atlântico - INAC 2005, Santos, 2005.

MACEDO, Marcelo M. B. **Descomissionamento de Instalações Marítimas: Perspectivas para o Brasil**. Seminário “Descomissionamento: Os desafios do Setor de Óleo e Gás”, Macaé, 12 de julho de 2018

MAIA, Ana Valéria F. **Utilização do Intermediate Bulk Container em Indústrias do Segmento Químico**. Monografia – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, 2013

MARINHA DO BRASIL – Diretoria de Portos e Costas. **Normas da Autoridade Marítima para Transporte de Cargas Perigosas – NORMAM 29**. Brasília, 2013

MATTA, Luiz Ernesto. **NORM na Indústria de Óleo e Gás** in REIS, Rócio. **NORM: Guia Prático**. Rio de Janeiro: Polo Books. 2016

PEDELHES, Gabriela. **Embalagem: Funções e Valores na Logística**. UFSC - Grupo de Estudos Logísticos. Disponível em: <<https://logisunip.wordpress.com/2011/10/>>. Data de acesso: 10 de maio de 2018.

SCHENATO, Flávia; AGUIAR, Laís A.; LEAL, Marco A.; RUPERTI Jr, Nerbe. **Deposição de NORM Gerado pelas Indústrias de Petróleo e Gás no Brasil**. IX Latin American IRPA Regional Congress on Radiation Protection and Safety - IRPA 2013, Rio de Janeiro, 2013.

TAUHATA, Luiz, SALATI, Ivan, DI PRINZIO, Renato, DI PRINZIO, Maria Antonieta. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. Rio de Janeiro, 2014.

XAVIER, Ana Maria, GAIDANO, Elena, MORO, José Túlio, HEILBRON, Paulo Fernando. **Princípios Básicos de Segurança e Proteção Radiológica**. UFRGS/CNEN, 4ª Edição, 2014.