



CETESB

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL

---

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL  
BIBLIOTECA Prof. Dr. Luiz Inácio Lula da Silva Garcez  
Av. Prof. Frederico Hermann Junior, 345 - Pinheiros  
06469-000 - SÃO PAULO - BRASIL

RELATÓRIO PRELIMINAR  
ENCAPSULAMENTO DE RESÍDUOS PERIGOSOS

AGOSTO/1984

	32694
1.2.83	

6705  
C279e (RCET)  
032694

---

**DIRETORIA**

---

**Werner Eugênio Zulauf**  
*Diretor-Presidente*

**Antônio Alves de Almeida**  
*Diretor Administrativo*

**Fredmar Corrêa**  
*Diretor de Planejamento Ambiental*

**Nelson Mansour Nabhan**  
*Diretor de Engenharia*

**Nelson Vieira de Vasconcelos**  
*Diretor de Controle*

**Paulo Bezerril Júnior**  
*Diretor Financeiro*

**Samuel Murgel Branco**  
*Diretor de Pesquisa*

DIRETORIA DE ENGENHARIA

Eng<sup>o</sup> Nelson Mansour Nabhan

SUPERINTENDÊNCIA DE ASSISTÊNCIA AOS MUNICÍPIOS

Eng<sup>o</sup> Mário de Lavigne Filho

GERÊNCIA DE ASSISTÊNCIA EM RESÍDUOS SÓLIDOS

Eng<sup>a</sup> Maria Helena de Andrade Orth

DIVISÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS

Eng<sup>o</sup> Pedro Penteado de Castro Neto

Este relatório foi desenvolvido em atendimento ao:

Programa: Estudo e Desenvolvimento de Processos e Equipamentos de Tratamento de Águas, Efluentes Líquidos e de Resíduos Sólidos

Coordenador: Eng<sup>o</sup> José Roberto Costa

Projeto : Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Industriais (Perigosos)

Coordenador: Eng<sup>o</sup> Pedro Penteado de Castro Neto

EQUIPE TÉCNICA

Eng<sup>o</sup> Pedro Penteado de Castro Neto

Eng<sup>a</sup> Maria Lais Guzzo Leão

Eng<sup>a</sup> Luzia Mitiko Saito

Eng<sup>o</sup> José Pedro de Oliveira Souza

Eng<sup>o</sup> Rediciere Zaniolo Jr.

Quím. Helga Bernhard de Souza

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO
2. TECNOLOGIAS DESENVOLVIDAS E APLICADAS
3. CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS PROCESSADOS E ENSAIOS REALIZADOS
4. PROCESSOS ESPECÍFICOS
5. TECNOLOGIA DO CIMENTO
6. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

## ÍNDICE

	pág.
1. INTRODUÇÃO .....	8
2. TECNOLOGIAS DESENVOLVIDAS E APLICADAS .....	11
2.1. Técnicas baseadas em cimento.....	13
2.2. Técnicas baseadas em materiais pozolânicos..	17
2.3. Técnicas baseadas em termoplásticos.....	18
2.4. Técnicas de polímeros orgânicos.....	21
2.5. Técnicas de encapsulamento.....	23
2.6. Técnicas de auto-solidificação.....	25
2.7. Técnica de transformação em vidro e produção de minerais sintéticos ou cerâmica.....	26
3. CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS PROCESSADOS E OS EN SAIOS REALIZADOS .....	28
3.1. Exigências para uma solidificação/estabiliza ção ideal .....	29
3.2. Compatibilidade dos resíduos e aditivos.....	31
3.3. Ensaio de propriedades físicas dos resíduos estabilizados .....	38
3.3.1. Peso unitário aparente e em base seca.....	38
3.3.2. Resistência à compressão não confinada....	39
3.3.3. Permeabilidade.....	39
3.3.4. Resistência ao umedecimento/secagem .....	40
3.3.5. Resistência ao congelamento/descongelamen- to.....	40
3.3.6. Outros ensaios de propriedades físicas....	44
3.4. Ensaio de lixiviação dos resíduos estabili zados .....	46
3.4.1. Natureza da solução de lixiviação.....	47
3.4.2. Relação resíduos para solução de lixivia ção.....	48
3.4.3. Número de eluições das soluções de lixi viação usadas .....	48

	pag.
3.4.4. Área superficial do resíduo .....	49
3.4.5. Agitação empregada.....	50
3.5. Efeitos de ataque biológico nos resíduos tra- tados .....	51
3.6. Efeitos dos processos de cura e envelhecimen- to do material tratado .....	52
4. PROCESSOS ESPECÍFICOS .....	53
4.1. Processo Desenvolvido por Chemifix Inc Chemifix .....	54
4.2. Processo Desenvolvido por Stalex Corporation Sealosafe .....	55
4.3. Processo Desenvolvido por Actor Washington Inc .....	57
4.4. Processo Desenvolvido por Dravo Lime Company Calcilofix .....	58
4.5. Processo Desenvolvido por Environmental Technology Corporation ETC Solidification System .....	59
4.6. Processo Desenvolvido por Envirotech Corporation .....	61
4.7. Processo Desenvolvido por I.U. Conversion Systems, Inc - Poz-O-Tec .....	61
4.8. Processo Desenvolvido por Industrial Waste Management Inc - Enviroclean .....	62
4.9. Processo Desenvolvido por New-port News Industrial Corp.....	64
4.10. Processo Desenvolvido por Canadian Waste Technology Inc.....	64
4.11. Processo Desenvolvido por Polymeric Materials Section de Washington State University.....	66
4.12. Processo Desenvolvido por Protective Packaging Inc.....	67

	pag.
4.13. Processo Desenvolvido por Sandia Laboratories	67
4.14. Processo Desenvolvido por Sludge Fixation Technology Inc - Terra Crete .....	68
4.15. Processo Desenvolvido por Southwest Research Institute .....	69
4.16. Processo Desenvolvido por Stabatrol Corporation Terra Tite .....	71
4.17. Processo Desenvolvido por TJK, Inc - TST - Takenaka Sludge Treatment System .....	71
4.18. Processo Desenvolvido por Todd Shipyards Corporation - Safe-T-Set .....	73
4.19. Processo Desenvolvido por TRW Systems Group .....	74
4.20. Processo Desenvolvido por Werner and Pfleiderer Corp. ....	75
5. TECNOLOGIA DO CIMENTO .....	77
5.1. Produção e composição de cimentos .....	78
5.1.1. Cimento Portland .....	78
5.1.2. Cimento Pozolâmico .....	80
5.1.3. Cimento de alto-forno .....	80
5.1.4. Cimento aluminoso .....	80
5.1.5. Composição química dos cimentos .....	80
5.2. Ação dos agentes exteriores sobre as argamas- sas e concreto .....	81
5.2.1. Ação das águas puras .....	84
5.2.2. Águas sulfatadas e sulfatos em geral .....	86
5.2.3. Ação do açúcar .....	89
5.2.4. Ação dos óleos e graxas .....	90
5.2.5. Adubos orgânicos .....	92
5.2.6. Ácidos .....	92
5.2.7. Compostos alcalinos .....	93
5.2.8. Cloretos .....	93

	pág.
5.2.9. Ação da cal graxa .....	93
5.2.10. Água do mar .....	94
5.3 Proposição para determinar condições ideais para o encapsulamento de resíduos .....	99
6. BIBLIOGRAFIA .....	103
ANEXOS .....	105
(Norma ABNT - Confeção e cura de corpos de pro va de concreto cilíndricos ou prismáticos)	

1 - INTRODUÇÃO

## 1. INTRODUÇÃO

Inerente a diversas atividades e processos que acompanham o desenvolvimento industrial, a quantidade de resíduos ali gerados vem aumentando consideravelmente.

Entre os resíduos, independentemente de suas origens, aqueles que apresentam maiores problemas em termos de poluição ambiental, tanto pela quantidade como pela qualidade, são justamente os gerados em sistemas de tratamento de águas residuárias, de gases e de resíduos sólidos, onde os poluentes são concentrados.

A disposição inadequada destes resíduos poderá gerar uma nova fonte de poluição e ocasionar a destruição do meio ambiente por um longo período, sendo que a sua recuperação é extremamente difícil.

O encapsulamento, processo muitas vezes dito como solidificação, estabilização ou fixação, consiste em estabilizar os resíduos perigosos e transformá-los em materiais menos poluentes, através da adição de aglomerantes e produtos químicos. Este método envolve reações químicas e processos físicos e propõe a atingir os seguintes objetivos:

- melhorar as características físicas e de manuseio destes resíduos;
- diminuir a área superficial através da qual possa ocorrer a transferência ou perda de constituintes poluentes;
- limitar a solubilidade de qualquer constituinte no resíduo, e
- destoxificar os constituintes poluentes.

Estes objetivos poderão ser atingidos de várias maneiras, e para isto é necessário um conhecimento detalhado das características dos resíduos a serem processados.

O presente trabalho reúne informações sobre as técnicas de encapsulamento atualmente existentes, a caracterização dos resíduos processados, os ensaios realizados, assim como dados sobre o cimento e sua eficiência.



## 2 - TECNOLOGIAS DESENVOLVIDAS E APLICADAS

As diversas técnicas de encapsulamento de resíduos desenvolvidas, ou em desenvolvimento, visam propiciar uma disposição final segura destes resíduos, além dos objetivos mencionados no ítem anterior. Para que estes objetivos sejam atingidos é inevitável a adição de materiais de liga, com ou sem aditivos auxiliares, pois a fixação - estabilização somente com o próprio resíduo é impossível, exceto nos casos em que o resíduo é confinado e selado em um invólucro inerte, ou lodos que contêm grandes quantidades de sulfato ou sulfeto de cálcio.

O material de liga é aquele que possui, principalmente, a capacidade de solidificar; geralmente são utilizados cimento, asfalto, resinas e outros. Por outro lado, os aditivos auxiliares tem como função a fixação de componentes perigosos contidos no resíduo, seja por processo físico tal como a adsorção, ou por processo químico, como por exemplo, a formação de compostos. Desta maneira, a maioria das técnicas existentes é baseada no emprego destes materiais, mas nem todas as técnicas disponíveis atendem a todos os objetivos, podendo um determinado método de tratamento solucionar um conjunto específico de problemas, mas ser completamente insatisfatório para outro. Assim, decorre a importância da escolha do método, de acordo com o tipo de resíduo.

As principais técnicas de encapsulamento de resíduos atualmente encontradas são basicamente as seguintes:

- técnicas baseadas na adição de cimento;
- técnicas baseadas na adição da cal ou outros materiais pozolânicos (excluindo cimento);
- técnicas que envolvem a inserção do resíduo em materiais termo plásticos ou termofixos;
- encapsulamento propriamente dito em invólucro inerte;
- tratamento de resíduos para obtenção de materiais que possam auto-solidificar sem maiores adições de outros constituintes;
- vitrificação de resíduos com sílica.

A seguir, serão apresentadas as características de cada uma das técnicas acima mencionadas.

### 2.1. TÉCNICAS BASEADAS EM CIMENTO

A solidificação através da adição de cimento Portland ou outros produtos inorgânicos semelhantes é particularmente eficiente para resíduos com elevados teores de metais tóxicos pois, devido ao pH obtido na mistura com cimento, diversos cátions multivalentes são convertidos em carbonatos e hidróxidos insolúveis. Íons metálicos também podem ser retidos na estrutura cristalina que os minerais de cimento formam.

Muitos lodos perigosos podem ser misturados diretamente com cimento e os sólidos suspensos se incorporarão na matriz de cimento endurecido.

A presença de sulfetos, asbestos, latex e plásticos sólidos nos resíduos a serem solidificados aumentam, geralmente, a resistência e a estabilidade dos produtos finais. Entretanto, certos compostos inorgânicos presentes, tanto nos resíduos quanto na água utilizada na mistura, podem ser prejudiciais para o endurecimento e cura da mistura resíduo-cimento.

Impurezas tais como matéria orgânica, siltes, argilas, carvão ou lignita podem retardar, por muitos dias, o endurecimento e a cura dos cimentos Portland comuns. Todo material insolúvel que passa através de uma peneira nº 200 (tamanho de partícula  $\leq 0,074$  mm) é também indesejável na mistura pois, se presente na forma de pó, pode cobrir as partículas maiores diminuindo a resistência da ligação entre as partículas e o cimento.

Sais solúveis de manganês, estanho, zinco, cobre e chumbo podem causar grandes variações no tempo de endurecimento da mistura e reduções significativas na resistência física, sendo que os três últimos sais são os mais prejudiciais. Outros compostos que são particularmente ativos como retardadores do endurecimento do cimento Portland são os sais de sódio, como arseniato, borato, fosfato, iodato, sulfito, mesmo em concentrações tão baixas quanto uns poucos décimos de 1% de peso do cimento usado.

Produtos contendo grandes quantidades de sulfato, como os lodos provenientes da lavagem de gás de exaustão ou combustão, não somente retardam o endurecimento do concreto, mas também reagem formando sulfo-aluminato de cálcio hidratado causando fragmentação ou aumento de volume do material solidificado. Para prevenir esta reação, foi desenvolvido um cimento especial com baixo teor de alumina para ser utilizado na solidificação de resíduos com altas concentrações de sulfato.

Para melhorar as características físicas da mistura e diminuir as perdas por lixiviação em lodos fixados, muitos aditivos têm sido desenvolvidos para serem usados com o cimento, mas como são patenteados, não permitem discussão e estudos comparativos.

Para ligar os contaminantes no processo de fixação por cimento tem sido usado como aditivo silicato de sódio, mas este causa um aumento de volume durante o endurecimento da mistura cimento-resíduo.

Em trabalhos experimentais realizados com resíduos reativos observou-se uma certa melhoria na fixação e retenção de resíduos nucleares pela adição de vermiculita ou argila como absorvente.

Uma adaptação recentemente proposta da técnica de cimentação envolve a dissolução de resíduos contendo metais com sílica de granulação fina em pH baixo e a seguir a polimerização da mistura pela elevação do pH até 7. O gel resultante é misturado com cimento e endurece num espaço de três dias.

Testes efetuados no "Brookhaven National Laboratory" indicam que uma mistura de silicato de sódio e cimento Portland produz um rápido endurecimento sem impedir a formação de íons metálicos. O silicato de sódio precipita os íons mais interferentes numa massa gelatinosa eliminando essas interferências e acelerando o endurecimento dos resíduos testados. Observou-se que somente o ácido bórico inibe o endurecimento da mistura de cimento. A formação de um gel é importante no endurecimento das misturas de resíduos com cimento e silicato. Mexer excessivamente depois de formado o gel parece causar uma demora no endurecimento e diminuir a resistência final do produto.

A mesma instituição (Brookhaven National Laboratory) também desenvolveu um processo de impregnação de polímero que pode ser usado para diminuir a permeabilidade das misturas de resíduos com cimento. Os poros do produto final são preenchidos através da imersão em monômero de estireno. A seguir o material de imersão é aquecido para ocasionar a polimerização. Este processo causa um aumento significativo na resistência e durabilidade da mistura resíduo-cimento.

O revestimento da mistura resíduo-cimento tem sido exaustivamente pesquisado e os principais problemas encontrados foram a dificuldade de aderência do revestimento no resíduo e a perda de resistência da mistura contendo os resíduos. Os materiais de revestimento superficial investigados incluíram asfalto, emulsão asfáltica e vinil. Entretanto, nenhum sistema de revestimento superficial para material solidificado com cimento tem sido atualmente publicado.

As vantagens dos sistemas de fixação baseados em cimento são:

- a) a matéria prima é abundante e barata;
- b) a tecnologia do manuseio e mistura do cimento é bem conhecida e os equipamentos utilizados são comuns, não se necessitando de pessoal especializado para tal;
- c) Não é necessário se proceder a secagem ou a desidratação do resíduo porque as misturas de cimento necessitam de água e pode-se dosar a quantidade de cimento a ser adicionado em função do teor de água do resíduo;
- d) os sistemas são muito tolerantes a variações químicas e os resíduos somente necessitam de pré tratamento se contêm componentes que retardam as reações do cimento.

O cimento não é afetado por oxidantes fortes, tais como nitratos e cloratos, e sua alcalinidade natural pode neutralizar ácidos.

- e) as características de lixiviação do produto final, se necessário, podem ser melhoradas através de revestimento com selante.
- f) Pode-se variar a quantidade de cimento usado para se produzir produtos com alta capacidade de suporte, bons materiais de fundação ou de sub-base, e de baixa permeabilidade.

As desvantagens deste sistema são:

- a) para a maior parte dos processos de fixação são necessárias quantidades de cimento relativamente grandes, mas isto pode, em parte, ser compensado pelo baixo custo do material. O peso e volume do produto final são, normalmente, o dobro dos de outros processos de fixação;
- b) os produtos finais não revestidos podem requerer, para sua disposição final, de um projeto de aterro específico. Experiências com disposição de resíduos radioativos indicam que alguns resíduos são lixiviados especialmente por soluções levemente ácidas;
- c) resíduos contendo grandes quantidades de impurezas que

afetam o endurecimento e a cura da mistura resíduo-cimento (tais como boratos e sulfatos) podem necessitar de um pré-tratamento ou da utilização de cimentos especiais de custo mais elevado, ou de aditivos;

- d) a alcalinidade do cimento transforma o íon amônio em gás amônia.

## 2.2. TÉCNICAS BASEADAS EM MATERIAIS POZOLÂNICOS (não incluindo cimento)

As técnicas de fixação de resíduos baseadas nos produtos a base de cal normalmente dependem da reação da cal com as partículas silicosas finas do material pozolânico e água para produzir um material como concreto (algumas vezes denominado concreto pozolânico).

Os materiais tipo pozolânico mais comumente usados no tratamento de resíduos são cinzas, poeiras de forno de cimento ou escória de alto forno, que são produtos residuais com pequeno ou nenhum valor comercial. O uso desses materiais para consolidar um outro resíduo é vantajoso para o processador, que pode tratar duas correntes de resíduos ao mesmo tempo. Por exemplo, a produção de uma reação pozolânica com cinzas de usinas elétricas permite que a lama da limpeza de gás de combustão seja combinada com cinza normal produzida e cal, junto com outros aditivos, para produzir um sólido de fácil manuseio.

Praticamente todos os comentários associados às técnicas de cimento aplicam-se aos sistemas baseados em materiais pozolânicos, incluindo as vantagens e desvantagens apresentadas a seguir:

- a) os materiais empregados são baratos e disponíveis em larga escala;
- b) os equipamentos necessários ao processamento não são especializados, pois a cal é um aditivo comumente utilizada em outros sistemas (para neutralizar resíduos);

- c) a química das reações cal-materiais pozolânicos é, relativamente, bem conhecida; o sulfato não causa fragmentação ou rachadura;
- d) não se faz necessário proceder a secagem ou remoção de água do resíduo porque ela é obrigatória no conjunto de reações.

Desvantagens:

- a) a cal e outros aditivos empregados aumentam o peso e o volume a ser transportado e/ou aterrado;
- b) materiais fixados com cal e não revestidos podem requerer, para sua disposição, de aterros especialmente projetados para se garantir que não haja perda de poluentes potenciais por lixiviação.

### 2.3. TÉCNICAS BASEADAS EM TERMOPLÁSTICOS

(incluindo betume, parafina e polietileno)

O uso de sistemas de fixação com termoplásticos para resíduos radioativos conduziu ao desenvolvimento de um sistema de encapsulamento que pode ser adaptado a resíduos industriais. No processamento de resíduos radioativos com betume ou outro material termoplástico, os resíduos são secos, aquecidos e dispersos através de uma matriz plástica aquecida. A seguir, a mistura é esfriada para solidificar a massa que, usualmente, é disposta em uma contenção secundária, como por ex., barris de aço. Em variações desse sistema podem ser usados outros materiais termoplásticos orgânicos, tais como parafina ou polietileno.

Para aquecer e misturar os resíduos e a matriz plástica são necessários equipamentos especializados. A razão da matriz para o resíduo é geralmente 1:1 a 1:2 de material fixador para o resíduo (em base seca). A matriz e os resí

duos secos precisam ser misturados em temperaturas dentro de uma faixa de 130°C a 230°C, dependendo das características de amolecimento do material e do tipo de equipamento usado.

Uma variação desse processo usa produto betuminoso emulsificado que é miscível com o lodo úmido. Neste processo, a mistura pode ser feita a qualquer temperatura adequada, abaixo do ponto de ebulição da mistura. A massa total precisa ainda ser aquecida e seca antes de ser encaminhada para disposição final. Para uma adequada incorporação são necessárias taxas de emulsão para resíduos de 1:1 a 1:1,5.

Em muitos casos, os tipos de resíduos dispostos descartam o uso de qualquer técnica de fixação baseada em orgânicos. Produtos químicos orgânicos que são solventes da matriz, obviamente não podem ser usados diretamente neste sistema. Sais fortemente oxidantes, tais como nitratos, cloratos ou percloratos, reagirão com os materiais orgânicos da matriz e causarão uma lenta deterioração. Nas elevadas temperaturas necessárias para o processamento, a mistura matriz - oxidantes é extremamente inflamável.

Testes de lixiviação feitos sobre sais anidros embebidos em betume como matriz indicaram que a reidratação dos compostos impregnados pode ocorrer quando a amostra é embebida em água e pode causar um rompimento do asfalto ou betume, aumentando bastante a área superficial e a taxa de perda do resíduo.

Alguns sais, como por exemplo sulfato de sódio, serão naturalmente desidratados na temperatura requerida para tornar o betume plástico, por isso, compostos facilmente desidratáveis devem ser evitados na estabilização termoplástica.

As principais vantagens dos sistemas baseados em termoplásticos são:

- a) as taxas de perda por lixiviação são significativamente menores que as observadas nos sistemas baseados em cimento ou outros materiais pozolânicos;
- b) como os resíduos são adicionados secos, o volume do produto final é bastante reduzido;
- c) a maior parte dos materiais termoplásticos é resistente ao ataque de soluções aquosas e a degradação microbiana é mínima;
- d) os materiais termoplásticos aderem-se bem aos materiais incorporados;
- e) os materiais envolvidos em matrizes termoplásticas podem ser recuperados, se necessário.

As principais desvantagens dos sistemas de disposição baseados em termoplásticos são:

- a) para o processamento são requeridos equipamentos caros e complicados e técnicos altamente especializados;
- b) estes sistemas não podem ser processados com materiais que se decompõem a altas temperaturas, especialmente citratos e certos tipos de plásticos;
- c) devido às temperaturas elevadas, há risco de fogo no trabalho com materiais orgânicos, tais como betume;
- d) durante o aquecimento, algumas misturas podem liberar óleos e odores desagradáveis, causando uma poluição secundária;
- e) o material (resíduo) a ser incorporado deve ser seco, o que requer grande quantidade de energia. A incorporação de resíduos úmidos aumenta muito as perdas por lixiviação;
- f) a incorporação de tetraboratos ou sais de ferro e alumínio no betume causa um endurecimento prematuro e pode bloquear e causar danos aos equipamentos de mistura;
- g) oxidantes fortes normalmente não podem ser incorporados a materiais orgânicos sem que ocorram reações oxidantes.

Altas concentrações de oxidantes fortes nas elevadas temperaturas do processo podem causar fogo;

- h) a plasticidade da mistura matriz-resíduo pode necessitar, para seu transporte e disposição, da utilização de containers, o que aumentará significativamente o custo;
- i) sais desidratados incorporados à matriz termoplástica reidratar-se-ão lentamente se a mistura for embebida em água. O sal reidratado expandirá a mistura provocando uma fragmentação do bloco de resíduos, aumentando significativamente sua área superficial.

#### 2.4. TÉCNICAS DE POLÍMEROS ORGÂNICOS

A técnica de solidificação com polímeros orgânicos mais testada é o sistema uréia-formaldeído (UF). O polímero é geralmente formado num processo de batelada onde os resíduos, secos ou úmidos, são misturados com um pré-polímero num recipiente de lixo (tambor de aço) ou em um misturador especialmente projetado para tal. Quando esses dois componentes estão totalmente misturados, adiciona-se um catalisador, continuando-se a misturar até que este catalisador esteja totalmente disperso. A mistura é completada antes que o polímero seja formado, e transferida para um container, se necessário. O material polimerizado não se combina quimicamente com o resíduo e sim forma uma massa esponjosa que captura as partículas sólidas. Qualquer líquido associado ao resíduo permanecerá após a polimerização e, portanto, a massa polimerizada deve ser seca antes da disposição.

Diversos sistemas de polímeros orgânicos disponíveis não são baseados em resinas de uréia-formaldeído. A Dow Industrial Division desenvolveu um sistema de éster vinílico-estireno (Binder 101) para ser usado nos resíduos radioativos, o qual está em fase de testes.

A Seção de Materiais Poliméricos da Universidade do Estado de Washington desenvolveu um sistema de resinas de poliéster que está sendo usado na solidificação de resíduos, mas ainda em escala piloto.

As principais vantagens dos sistemas de polímeros orgânicos (particularmente o sistema de resina UF) são:

- a) comparativamente com as técnicas baseadas em cimento, para a solidificação de uma mesma quantidade de resíduos é necessário menos fixador, tendo em vista que a relação resíduo/fixador é, usualmente, cerca de 30% maior para o sistema UF de polímero orgânico que para os sistemas de cimento ;
- b) o resíduo tratado é geralmente separado da água, mas não necessariamente seco. O polímero acabado e solidificado, entretanto, deve ser secado antes da disposição final;
- c) a resina orgânica é consideravelmente menos densa (densidade específica = 1,3) que o cimento. A baixa densidade reduz os custos de transporte relativos ao fixador e ao produto fixado;
- d) a resina solidificada não é inflamável e para sua formação não são necessárias altas temperaturas.

As maiores desvantagens da técnica de resinas orgânicas, especificadamente do sistema uréia-formaldeído (UF) são:

- a) no sistema de solidificação não ocorrem reações químicas que liguem quimicamente os poluentes potenciais. As partículas de resíduo são retidas na matriz da resina orgânica por captura física e a ocorrência de uma ruptura ou lixiviação liberará muitos dos materiais;
- b) os catalisadores usados no sistema UF são ácidos fortes e a mistura resina-UF deve ser mantida a um  $\text{pH} = 1,5 \pm 0,5$  para a solidificação ocorrer de uma maneira rápida. Um pH baixo pode colocar muitos poluentes em solução mas, se este não for menor que 1,5, a polimerização será lenta

- não ocorrendo uma retenção efetiva de sólidos no material fixado;
- c) a água não combinada está freqüentemente associada com o resíduo polimerizado e deve ser evaporada para se produzir um polímero completamente curado. Essa água, em geral, é fortemente ácida e pode conter elevados teores de poluentes. As misturas de resíduos-UF retraem-se no período de cura podendo liberar água;
  - d) os catalisadores usados na polimerização são altamente corrosivos e requerem equipamentos especiais de mistura e containers impermeáveis;
  - e) as reações que produzem a resina liberam fumos que podem ser perigosos ou desagradáveis, mesmo em pequenas concentrações;
  - f) algumas resinas curadas são biodegradáveis, especialmente as dos sistemas baseados em UF;
  - g) uma prática comum na fixação de resíduos com resinas orgânicas é a contenção secundária em tambores de aço, o que eleva os custos de processamento e transporte;

## 2.5. TÉCNICAS DE ENCAPSULAMENTO

Os sistemas de fixação dependem da ligação das partículas de resíduo entre si.

Os sistemas denominados de encapsulamento são aqueles nos quais os resíduos são primeiramente aglomerados e, a seguir, envoltos por uma camisa ou jaqueta de material inerte.

Alguns processos para revestir resíduos industriais solidificados foram testados pelo TRW Corporation. Em muitos casos, o que se constatou foi a falta de adesão entre o revestimento e os resíduos aglomerados e a falta de integridade dos materiais de revestimento, a longo prazo. Após a pesquisa de diversos processos alternativos de encapsulamento, a TRW desenvolveu alguns sistemas que têm sido amplamente testados, e cujos dados são disponíveis.

O sistema de encapsulamento da TRW requer que o resíduo seja totalmente seco, antes de ser misturado com uma solução de acetona e 1,2-polibutadieno modificado, durante 5 minutos. A seguir, deixa-se a mistura endurecer por 2 horas. A quantidade ótima do ligante é de 3 a 4% do material fixado, em base seca. O material de revestimento é colocado num molde, submetido a uma leve pressão mecânica, e aquecido entre 120° e 200°C para ocasionar fusão. O material aglomerado é um bloco rijo e resistente sobre o qual é fundida uma jaqueta de polietileno, de 3,5 mm de espessura, que adere ao ligante de polibutadieno. Para um bloco de 360 a 450 kg, a quantidade de polietileno é cerca de 4% do resíduo fundido, em base seca.

As maiores vantagens do sistema de encapsulamento são:

- a) o resíduo nunca entra em contato com a água e, por esta razão, materiais muito solúveis, como cloreto de sódio, podem ser encapsulados com sucesso;
- b) a jaqueta impermeável elimina toda lixiviação, enquanto permanecer intacta.

As maiores desvantagens desse sistema são:

- a) a resina necessária para fixação é cara;
- b) o processo requer grandes dispêndios de energia em secagem, fusão do ligante e formação da jaqueta;
- c) o polietileno é combustível, com um ponto de fulgor de 250°C, apresentando risco de fogo;
- d) o sistema requer grandes investimentos de capital em equipamentos;
- f) para operar os equipamentos de moldagem e fusão é necessária mão-de-obra especializada.

## 2.6. TÉCNICAS DE AUTO-SOLIDIFICAÇÃO

Alguns resíduos industriais, tais como os lodos de limpeza de gases de exaustão ou dessulfurização, contêm grandes quantidades de sulfato ou sulfito de cálcio. Esta tecnologia foi desenvolvida para tratar esses tipos de resíduos, a fim de torná-los auto-solidificáveis.

Normalmente, uma pequena porção (8-10% em peso) de lodo de sulfito/sulfato seco é calcinado, sob condições cuidadosamente controladas, para produzir um material semelhante ao cimento, de sulfato ou sulfito de cálcio, parcialmente desidratado. Este resíduo calcinado é reintroduzido no lodo, juntamente com aditivos patenteados. Frequentemente, são adicionadas cinzas para ajustar a umidade. O produto acabado é um material duro como argamassa, com boas características de manuseio e baixa permeabilidade.

As maiores vantagens do sistema de auto-solidificação são:

- a) não necessita de aditivos que sejam manufaturados e enviados ao local de processamento ;
- b) o tempo de endurecimento e a cura são mais rápidos quando comparados com os dos sistemas baseados em cal;
- c) o material produzido é estável e não é inflamável ou biodegradável;
- d) existem relatos de retenção efetiva de metais pesados, relacionada, talvez, com ligação química de poluentes potenciais;
- e) o sistema não requer resíduo completamente seco, pois as reações de hidratação usam água;

As maiores desvantagens do sistema de auto-solidificação são:

- a) é aplicável apenas para lodos com sulfatos ou sulfitos;

- b) os lodos auto-solidificados apresentam as mesmas características de lixiviação dos processos baseados em cimento e cal;
- c) para produzir o material calcinado é necessária uma energia adicional;
- d) para calcinar os resíduos e misturá-los com aditivos são necessários maquinários caros e mão-de-obra especializada.

#### 2.7. TÉCNICA DE TRANSFORMAÇÃO EM VIDRO E PRODUÇÃO DE MINERAIS SINTÉTICOS OU CERÂMICA

Quando o material é extremamente perigoso ou radioativo, é possível combiná-lo com sílica e fundir a mistura em vidro ou formar um mineral de silicato sintético.

Esses vidros ou silicatos cristalinos são lixiviados muito lentamente pela água de ocorrência natural, o que faz com que este processo seja geralmente proposto para se produzir um material seguro quanto à disposição final, e que não requer uma contenção secundária.

As principais vantagens do processo são:

- a) considera-se que através deste processo se obtêm um alto grau de contenção dos resíduos;
- b) os aditivos usados são relativamente baratos (sienito e cal).

As principais desvantagens são:

- a) se o processo se desenvolve a altas temperaturas, alguns constituintes, especialmente os metais, podem ser evaporados e dispersos antes de serem ligados à sílica derretida;
- b) o processo é de energia intensiva. A mistura resíduo-silicato precisa ser aquecida, freqüentemente acima de  $1350^{\circ}\text{C}$ , para ser derretida e
- c) requer equipamento especial e pessoal treinado para este tipo de operação.

3 - CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS PROCESSADOS E ENSAIOS REALIZADOS

### 3. CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS PROCESSADOS E OS ENSAIOS REALIZADOS

A seleção de um sistema de tratamento requer o conhecimento detalhado dos resíduos a serem processados. Deve-se proceder a uma caracterização dos mesmos, através de um inventário completo de todos os constituintes de cada resíduo, dos processos ou operações de produção de cada resíduo, das formas de transporte, armazenamento e, das quantidades produzidas.

Estas informações detalhadas devem incluir os tipos de materiais e concentrações, constituintes orgânicos, solventes, etc. Onde se constatar a presença de materiais orgânicos, é essencial se conhecer detalhes sobre estabilidade química, ponto de fulgor e poder calorífico. Os componentes inorgânicos e suas concentrações relativas devem também ser determinados, bem como a porcentagem de metais pesados tóxicos, que, mesmo em pequenas concentrações, são de grande interesse. Para muitos sistemas de tratamento, é de importância fundamental o conhecimento do pH, efeito tampão e teor de umidade do resíduo.

#### 3.1. EXIGÊNCIAS PARA UMA SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO IDEAL

Um processo de fixação ideal torna os constituintes nocivos quimicamente não reativos e/ou estáveis, de tal forma que, para uma disposição final segura, não seja necessária nenhuma contenção secundária. Por exemplo, a incorporação em uma rede cristalina estável isola, efetivamente, os materiais nocivos de quaisquer interações com o meio ambiente, e a manutenção do pH numa faixa de 9 a 11<sup>1</sup> imobiliza mu

tos cations multivalentes como os hidróxidos insolúveis e outros compostos. Lodos com altas concentrações de determinados cations podem ser tratados com aditivos escolhidos especificamente para fixar estes contaminantes. Os ânions, embora normalmente muito menos tóxicos, são muito mais difíceis de serem presos a um produto não passível de lixiviação. Cloretos e sulfatos, os componentes aniônicos mais comuns dos lodos, produzem somente poucos sais insolúveis. Para conter estes tipos de ânions, o resíduo precisa ser fisicamente isolado de qualquer meio de lixiviação através de uma contenção secundária ou de uma cobertura especial do aterro.

Para ser completamente eficaz, o processo de tratamento deve gerar um produto final com propriedades físicas tais que sua disposição no solo não o torne permanentemente inadequado para usos alternativos, tais como construção ou agricultura. Entretanto, a produção de resíduos tratados com características semelhantes àquelas do solo, que podem ser adequados para uso agrícola, parece ser indesejável quando os principais contaminantes são metais tóxicos, certos orgânicos e/ou elevado teor de sal. A ação, a longo prazo, dos ácidos orgânicos normalmente produzidos pelas atividades biológicas nos solos agrícolas pode mobilizar mesmo os contaminantes mais fortemente ligados, que seriam, então, capturados pela cadeia alimentar ou carreados para as águas subterrâneas.

A forma final de resíduos tratados mais segura parece ser uma massa monolítica que apresente boa estabilidade dimensional, resistência às intempéries, baixa permeabilidade, capacidade de suporte elevada e resistência ao ataque de agentes biológicos. Um produto final com estas características pode ser usado como fundação de edificação e rodovias, ou simplesmente pode ser disposto em aterro.

Um processo ideal de fixação não requer tratamentos térmicos extensivos ou grandes quantidades de reagentes de energia intensiva e permite que o resíduo possa ser recuperado por alguma técnica razoável, visto que prevê-se, para o futuro, dificuldades no fornecimento de determinados elementos, como por exemplo o manganês e o cloro, que são contaminantes usualmente constantes dos lodos.

Todas estas exigências são um pouco severas para qualquer processo de tratamento de resíduos. Uma série de estudos está em desenvolvimento visando a obtenção de melhores processos de tratamento. Entretanto, com a atual tecnologia disponível, com o conhecimento total do resíduo a ser tratado e dos processos de tratamento que se dispõem, é possível a produção de um produto final que se aproximará às condições ideais preconizadas para um material estabiliza-do.

### 3.2. COMPATIBILIDADE DOS RESÍDUOS E ADITIVOS

Como em qualquer operação de manuseio de resíduos perigosos, devem ser tomados cuidados durante os processos de estabilização/solidificação para se evitar a mistura de materiais que possam reagir entre si de forma danosa. Esta exigência de não-reatividade deve também ser estendida aos reagentes ou materiais usados no tratamento.

As possíveis consequências da mistura indevida de resíduos são:

- a) geração de calor;
- b) liberação de materiais tóxicos ou gases inflamáveis;
- c) fogo ou explosão,

A tabela 3.2.1., apresentada a seguir, sumaria algumas reações típicas que podem ocorrer durante o manuseio e tratamento de resíduos perigosos.

Tabela 3.2.1. Reações que ocorrem entre os resíduos incompatíveis

RESÍDUO	RESÍDUO INCOMPATÍVEL	CONSEQUÊNCIA POTENCIAL
<p><u>BASES:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Lama de acetileno</li> <li>- Líquidos fortemente alcalinos</li> <li>- Líquidos de limpeza alcalinos</li> <li>- Líquidos alcalinos corrosivos</li> <li>- Líquido alcalino de bateria</li> <li>- Águas residuárias alcalinas</li> <li>- Lama de cal e outros álcalis corrosivos</li> <li>- Soluções de cal</li> <li>- Soluções cáusticas gastas</li> </ul>	<p><u>ÁCIDOS:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Lamas ácidas</li> <li>- Soluções ácidas</li> <li>- Ácidos de bateria</li> <li>- Líquidos de limpeza</li> <li>- Eletrólitos ácidos</li> <li>- Líquidos utilizados para desenho em metais</li> <li>- Componentes de líquidos de limpeza</li> <li>- Banho de depilação e outros ácidos corrosivos</li> <li>- Ácidos gastos</li> <li>- Mistura de ácidos esgotada</li> <li>- Ácido sulfúrico gasto</li> </ul>	<p>Geração de calor, reação violenta.</p>
<p><u>MATERIAIS TÓXICOS:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Resíduos de asbestos e outras substâncias tóxicas</li> <li>- Resíduos de berílio</li> <li>- Embalagens vazias de pesticidas não lavadas</li> <li>- Resíduos de pesticidas</li> </ul>	<p><u>MATERIAIS INFLAMÁVEIS:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Solventes de limpeza</li> <li>- Explosivos absolutos</li> <li>- Resíduos de petróleo</li> <li>- Resíduos de refinaria</li> <li>- Solventes em geral</li> <li>- Resíduos de óleo e outros resíduos inflamáveis e explosivos</li> </ul>	<p>Liberação de substâncias tóxicas em caso de fogo ou explosão</p>

continua ...

Tabela 3.2.1. Reações que ocorrem entre os resíduos incompatíveis

RESÍDUO	RESÍDUO INCOMPATÍVEL	CONSEQUÊNCIA POTENCIAL
<p><u>METAIS REATIVOS:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Alumínio</li> <li>- Berílio</li> <li>- Cálcio</li> <li>- Lítio</li> <li>- Magnésio</li> <li>- Potássio</li> <li>- Sódio</li> <li>- Zinco em pó e outros metais reativos e hidretos metálicos</li> </ul>	<p><u>ÁCIDOS OU BASES FORTES:</u></p> <p>Resíduos ácidos ou básicos anteriormente relacionadas</p>	<p>Fogo ou explosão, geração de hidrogênio gasoso inflamável</p>
<p><u>MATERIAIS AQUOSOS:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Álcoois</li> <li>- Soluções aquosas</li> </ul>	<p><u>MATERIAIS ANIDROS DE REACÇÃO VIOLENTA:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cálcio</li> <li>- Lítio</li> <li>- Hidretos metálicos</li> <li>- Potássio</li> <li>- Sódio</li> <li>- <math>SO_2, Cl_2, SOCl_2, PCl_3, CH_3SiCl_3</math> e outros resíduos reativos com água</li> </ul>	<p>Fogo, explosão ou geração de calor, geração de gases inflamáveis ou tóxicos</p>
<p><u>CIANETOS E SULFETOS:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Soluções gastas e cianetos e sulfetos</li> </ul>	<p><u>ÁCIDOS:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Resíduos ácidos anteriormente relacionados</li> </ul>	<p>Geração de gás cianídrico ou gás sulfídrico</p>

continua ...

Tabela 3.2.1.1. Reações que ocorrem entre os resíduos incompatíveis

RESÍDUO	RESÍDUO INCOMPATÍVEL	CONSEQUÊNCIA POTENCIAL
<p><u>MATERIAIS ORGÂNICOS REATIVOS:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Álcoois</li> <li>- Aldeídos</li> <li>- Hidrocarbonetos halogenados</li> <li>- Hidrocarbonetos nitrados e outros compostos orgânicos reativos, e solventes</li> <li>- Hidrocarbonetos insaturados</li> </ul>	<p><u>Ácidos ou Bases Fortes e Metais Reativos anteriormente relacionados</u></p>	<p>Fogo, explosão ou reação violenta</p>
<p><u>OXIDANTES FORTES:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cloratos e outros oxidantes fortes</li> <li>- Cloro</li> <li>- Cloretos</li> <li>- Ácido crômico</li> <li>- Hipocloritos</li> <li>- Nitratos</li> <li>- Ácido nítrico fumegante</li> <li>- Percloretos</li> <li>- Permanganatos</li> <li>- Peróxidos</li> </ul>	<p><u>Materiais Inflamáveis, Metais Reativos, Materiais Orgânicos reativos, Ácidos Orgânicos</u></p>	<p>Fogo, explosão ou reação violenta</p>

FONTE: U.S. Environmental Protection Agency, Federal Register Vol. 43 nº 243 pág. 59018, U.S.A. monday, december 18, 1978.

Muitos sistemas de tratamento requerem a mistura de resí-  
duos reativos e/ou reagentes para formar produtos não reati-  
vos ou mais estáveis, e exigem, portanto, uma grande expe-  
riência e um conhecimento preciso da composição e natureza  
do resíduo e dos reagentes. Geralmente, tais misturas são  
executadas nos sistemas de tratamento que recebem diferen-  
tes tipos de resíduos provenientes de diversas fontes.

Além da incompatibilidade dos resíduos entre si deve-se tam-  
bém observar a dos resíduos com os materiais de estabiliza-  
ção/solidificação, tanto a curto como a longo prazo. Apesar  
de muitas reações entre resíduos e reagentes utilizados no  
tratamento ocorrerem muito lentamente, o efeito pode acele-  
rar a deterioração do resíduo tratado e a perda das proprie-  
dades de contenção. A tabela 3.2.2. indica os principais  
problemas de incompatibilidade que podem ser encontrados com  
as várias técnicas de estabilização/solidificação existen-  
tes. A maior parte das dificuldades são similares às encon-  
tradas em qualquer operação de manuseio de resíduos perigo-  
sos. Por exemplo, sem cuidados extremos e grandes conhecimen-  
tos, oxidantes e materiais facilmente oxidáveis não devem  
ser misturados, ácidos fortes e bases não devem ser combina-  
dos, cianetos e sulfitos não devem ser acidificados e sol-  
ventes orgânicos devem ser isolados de materiais solúveis  
que possam ser atacados ou dissolvidos por eles.

Alguns reagentes solidificantes podem nunca endurecer se os  
resíduos contêm materiais inibidores. As reações poliméri-  
cas de silicato podem ser retardadas por orgânicos ou con-  
centrações elevadas de certos metais. Polímeros orgânicos po-  
dem ser atacados por solventes, oxidantes fortes ou ácidos  
fortes, conforme é indicado na tabela 3.2.3., e são também,  
degradados por radiação ultravioleta (exposição à luz so-  
lar).

Em geral, os sistemas de contenção baseados em silicatos (ci-  
mento ou pozolana) são mais tolerantes a uma ampla varieda-  
de de resíduos, tanto inorgânicos como orgânicos.

Tabela 3.2.2. Compatibilidade de determinadas categorias de resíduos com diferentes técnicas de solidificação/estabilização de resíduos

COMPONENTE DO RESÍDUO	TIPO DE TRATAMENTO						
	BASEADO EM CIMENTO	BASEADO EM CAL	SOLIDIFICAÇÃO POR TERMOPLÁSTICO	BASEADO EM POLÍMERO ORGÂNICO (UF)	ENCAPSULAMENTO	AUTO-CIMENTAÇÃO	FORMAÇÃO DE VIDRO E DE MINERAIS SINTÉTICOS
ORGÂNICOS	Muitos impedem o endurecimento	Muitos impedem o endurecimento	Orgânicos podem evaporar por aquecimento	Podem retardar o endurecimento dos polímeros	Necessitam, primeiramente, ser absorvidos pela matriz sólida	Risco de fogo por aquecimento	Os resíduos decompoem-se a altas temperaturas
		Boa-freqüentemente aumenta a durabilidade	Possibilidade de uso como agentes ligantes	Podem retardar o endurecimento dos polímeros	Compatível-muitos materiais de encapsulamento são plásticos	Risco de fogo por aquecimento	Os resíduos decompoem-se a altas temperaturas
INORGÂNICOS	O cimento neutralizará os ácidos	Compatível	Podem ser neutralizados antes da incorporação	Compatível	Podem ser encapsulados antes da incorporação	Podem ser neutralizados formando sais de sulfato	Podem ser neutralizados e incorporados
		Compatível	Compatível	Podem causar a ruptura da matriz e fissuramento	Podem causar a deterioração dos materiais de encapsulamento	Compatível se houver a presença de sulfatos	Altas temperaturas podem causar reações indesejáveis
3 - Sulfatos	Podem retardar o endurecimento e causar a não ser que se use cimento especial	Compatível	Podem desidratar e reidratar causando fissuramento	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível em muitos casos
		Compatível	Podem retardar o endurecimento. A maior parte é facilmente lixiviada	Compatível	Compatível	Compatível se houver a presença de sulfatos	Compatível em muitos casos
4 - Haletos	Facilmente lixiviados do material cimentado. Podem retardar o endurecimento	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível se houver a presença de sulfatos	Compatível em muitos casos
		Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível se houver a presença de sulfatos	Compatível em muitos casos
5 - Metais Pesados	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível se houver a presença de sulfatos	Compatível em muitos casos
		Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível se houver a presença de sulfatos	Compatível em muitos casos
6 - Materiais Radioativos	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível se houver a presença de sulfatos	Compatível
		Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível se houver a presença de sulfatos	Compatível

Tabela 3.2.3. - Resistência química ao longo do tempo de polímeros orgânicos (resinas) usados em solidificação (1)

PRODUTO QUÍMICO	RESISTÊNCIA DAS RESINAS		
	POLIETILENO CONVENCIONAL	FOLIETILENO LINEAR DE ALTA DENSIDADE	CLORETO DE POLIVINILA
Ácido acético 50%	Excelente	Excelente	Excelente
Ácido crômico	Excelente	Excelente	Excelente
Ácido sulfúrico (conc.)	Moderada	Moderada	Não resistente
Benzeno	Fraca	Moderada	Não resistente
Butadieno	Não resistente	Não resistente	Não resistente
Clorofórmio	Fraca	Moderada	Não resistente
Cresal	Fraca	Fraca	Fraca
Diclorobenzeno	Fraca	Fraca	Não resistente
Dietyl éter	Não resistente	Não resistente	Não resistente
Gasolina	Fraca	Moderada	Fraca
Sol. de sais metálicos	Excelente	Excelente	Excelente
Tetracloreto de carbono	Fraca	Moderada	Moderada
Tricloroetano	Não resistente	Não resistente	Não resistente

(1) Adaptado de informações fornecidas por "Nalge Chemical Company"

### 3.3. ENSAIOS DE PROPRIEDADES FÍSICAS DOS RESÍDUOS ESTABILIZADOS

As propriedades físicas dos resíduos são modificadas pelos processos de estabilização/solidificação. O produto final de muitos processos de tratamento é um bloco sólido, semelhante a concreto de baixa resistência, que pode ser submetido a ensaios padronizados de propriedades físicas a fim de se avaliar a sua durabilidade sob condições de campo. Alguns processos produzem um produto friável ou semelhante a solo, que deve ser submetido a testes mais comumente usados para solo-cimento.

Os diversos testes de propriedades físicas existentes são aplicáveis a resíduos tratados e não tratados e têm como principais objetivos:

- a) determinar a distribuição granulométrica, porosidade, permeabilidade, densidade aparente e peso específico em base seca;
- b) avaliar as propriedades gerais;
- c) prever a reação do material a tensões aplicadas em aterros ;
- d) avaliar a durabilidade.

Cinco ensaios padronizados, para os quais alguns dados são disponíveis, têm sido utilizados e são apresentados a seguir, de forma resumida.

#### 3.3.1. Peso unitário aparente e em base seca

O peso unitário aparente é o peso (sólidos mais água) por unidade de volume total do material, independente da quantidade de água. O peso unitário em base seca é a relação entre o peso seco em estufa e o volume total. O volume da amostra testada é usualmente calculado através da medição do molde, de forma regular, produzido. A temperatura de seca-

gem empregada para se obter o peso seco do material deve ser especificada. Os pesos unitários fornecem informações sobre as relações entre peso e volume e são a medida da densidade e, indiretamente, do volume de vazios.

### 3.3.2. Resistência à compressão não confinada

A resistência à compressão não confinada é definida como a máxima tensão de compressão axial unitária à ruptura ou à 15% de deformação, o que primeiro ocorrer. Este ensaio é aplicável somente a materiais cimentados ou coesivos. Para se determinar a resistência à compressão, um modelo cilíndrico é preparado e carregado axialmente. Os resultados são usualmente apresentados através de um gráfico de resistência à compressão suportada "versus" deformação. A resistência ao cisalhamento de um material coesivo é obtida multiplicando-se a resistência à compressão não confinada por 0,5 e é um fator importante para a determinação da capacidade máxima de suporte do resíduo tratado, de estabilidade dos aterros constituídos de resíduos solidificados e da pressão aplicado contra as paredes de contenção dos resíduos.

### 3.3.3. Permeabilidade

A permeabilidade pode ser definida como a capacidade de um material de conduzir ou libertar água quando submetido a um gradiente hidráulico e depende de vários parâmetros, tais como densidade, grau de saturação e distribuição granulométrica.

Trabalhos efetuados indicam que dois tipos de ensaios são necessários para a determinação da permeabilidade de lodos tratados e não tratados. Para lodos no estado natural pode ser utilizado o ensaio de permeabilidade a carga variável e os lodos fixados podem ser testados utilizando-se do ensaio a carga constante modificado em uma câmara de compressão triaxial com uma contrapressão, usada para garantir uma saturação completa.

A permeabilidade de um material indica sua capacidade de permitir ou proibir a passagem de água e é um fator importante a ser considerado quando da disposição de resíduos por que influencia a taxa de liberação dos contaminantes dos resíduos no meio ambiente.

#### 3.3.4. Resistência ao umedecimento/secagem

O ensaio de durabilidade por via úmida e em base seca é usado para avaliar a resistência das misturas do solo-cimento ao desgaste por intempéries, com relação a umedecimento e secagem. Corpos de prova curados são submetidos a 12 ciclos de testes, cada um consistindo de 5 horas de imersão em água e 42 horas de secagem em estufa a baixa temperatura. Cada ciclo é seguido por dois golpes fortes em toda a área superficial com uma escova de arame de aço. Os resultados do teste são geralmente expressos pela perda de peso depois de 12 ciclos de umedecimento/secagem ou o número de ciclos que causa uma desintegração da amostra, o que ocorrer primeiro.

Quanto aos corpos de prova reprovados neste ensaio, não se pode esperar que apresentem boas propriedades de contenção ao longo do tempo, para aqueles processos que necessitam do isolamento do resíduo.

#### 3.3.5. Resistência ao congelamento/descongelamento

O ensaio de resistência ao congelamento/descongelamento é empregado para se avaliar a resistência das misturas de solo-cimento ao desgaste por intempéries, no tocante a congelamento e descongelamento. Os corpos de prova curados são submetidos a 12 ciclos de testes, cada um consistindo de congelamento por 24 horas, descongelamento por 23 horas e dois golpes fortes com uma escova de arame de aço em toda a área superficial.

O desempenho dos corpos de prova é avaliado pela determinação da perda de peso depois dos 12 ciclos ou pelo número de ciclos que causa desintegração, o que ocorrer primeiro.

Os corpos de prova com falta de resistência ao congelamento/descongelamento devem ser protegidos de geadas para se conseguir uma boa contenção, no caso dos processos que necessitam do isolamento do resíduo ou da redução de sua área superficial.

Alguns resultados de ensaios físicos de resíduos industriais estabilizados e não tratados são listados na tabela 3.5.1.

Os dados apresentados mostram que os processos de estabilização geralmente aumentam a densidade e a resistência dos resíduos e diminuem a permeabilidade dos mesmos. Nota-se que muitas das amostras tratadas não apresentam dados referentes a durabilidade. O mais surpreendente destes resultados é o fato de que os processos de tratamento não geram produtos com propriedades físicas similares.

Os produtos processados pelas técnicas baseadas em cal são similares a concreto de baixa resistência, com elevados pesos aparentes e mesmo em base seca, resistências à compressão relativamente altas e baixa permeabilidade. O produto semelhante a concreto, baseado em cimento, tem também essas mesmas propriedades, apresentando uma elevada resistência à compressão. Por outro lado, os produtos semelhantes a solo apresentaram um aumento de permeabilidade e uma resistência comparável a dos solos naturais.

Se o objetivo dos processos de tratamento for o isolamento dos constituintes do resíduo em um bloco monolítico sólido, a resistência e a impermeabilidade são fatores importantes. Um produto impermeável e denso aparentemente perderá poucos poluentes para o meio ambiente devido à reduzida área superficial do resíduo que é exposta ao processo de lixiviação. Os flocos solidificados precisam ser praticamen-

te impermeáveis para apresentar uma contenção efetiva porque, mesmo pequenos volumes de água movendo-se através do resíduo carreará quantidades apreciáveis de contaminantes. Uma diferença grande entre o peso unitário aparente e o peso unitário em base seca é indicativa de uma grande quantidade de poros (vazios), o que permite uma alta permeabilidade e/ou difusão relativamente rápida dos materiais no interior dos resíduos solidificados. Um escapulamento plástico (ver resíduo de eletro galvanização na tabela 3.3.5.1) apresenta um ótimo resultado produzindo um material impermeável. O revestimento plástico sobre o resíduo obstrui a passagem de água através do mesmo de maneira que os pesos unitários aparente e em base seca são idênticos e a permeabilidade é imensuravelmente baixa (isto é, o bloco é impermeável).

Processos que utilizam aditivos patenteados para produzir um material semelhante ao solo procuram estabilizar os constituintes dos resíduos através de diferentes métodos. Basicamente, ajusta-se o pH a uma variação pré-selecionada e acrescenta-se um ingrediente (silicato de sódio) que solidifica os constituintes inorgânicos do resíduo de maneira que fiquem seguros na matriz de resíduos tratados. O produto final é uma mistura semelhante a solo, com uma grande diferença entre os pesos unitários aparente e em base seca (grande quantidade de poros), baixa resistência e permeabilidade relativamente alta. Para apresentar uma contenção segura, os fenômenos de adsorção e precipitação devem ocorrer nestes sistemas.

Resultados preliminares indicam que qualquer sistema de tratamento, isolamento físico ou imobilização química, pode ser eficaz para contaminantes específicos. As propriedades físicas isoladas não são suficientes para se prever a capacidade de qualquer processo de tratamento de conter um determinado tipo de resíduo. Antes que as propriedades físicas sejam de alguma valia, torna-se necessário um conhecimento detalhado do método de imobilização empregado por um processo de tratamento específico e do resíduo a ser tratado.

Tabela 3.3.5.1.1. Resultados característicos de ensaios físicos de resíduos não tratados e estabilizados

TIPO DE RESÍDUO E TRATAMENTO	PESO UNITÁRIO		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA (kgf/cm <sup>2</sup> )	PERMEABILIDADE (cm/seg)	DURABILIDADE/CÍCLOS DE TESTES À RUPTURA)	CONGELAMENTO/DESCONGELAMENTO
	APARENTE (kg/m <sup>3</sup> )	EM BASE SECA (kg/m <sup>3</sup> )				
Resíduo de bateria de cádmio e níquel: • Não tratado • Produto pozolânico baseado em cal • Material semelhante a solo, c/ aditivos patenteados	-	703,2	-	5,7 x 10 <sup>-6</sup>	-	-
	1.665,9	1.380,8	11,9	1,9 x 10 <sup>-6</sup>	9	-
	1.492,9	757,7	0,5	1,9 x 10 <sup>-4</sup>	1	1
Resíduo de produção de cloro: • Não tratado • Produto pozolânico baseado em cal • Material semelhante a solo c/ aditivos patenteados	-	1.025,2	-	1,0 x 10 <sup>-4</sup>	-	-
	1.649,9	1.419,2	9,3	8,5 x 10 <sup>-7</sup>	-	-
	1.697,9	1.302,3	1,5	3,6 x 10 <sup>-5</sup>	2	1
Resíduo de fluoreto de cálcio • Não tratado • Produto pozolânico baseado em cal • Material semelhante a solo c/ aditivos patenteados	-	749,6	-	3,5 x 10 <sup>-5</sup>	-	-
	1.376,0	1.066,8	1,8	3,8 x 10 <sup>-5</sup>	1	1
	1.380,8	845,8	1,8	8,7 x 10 <sup>-6</sup>	1	2
Resíduo e Eletro galvanização • Não tratado • Produto pozolânico baseado em cal • Material semelhante a solo c/ aditivos patenteados • Material semelhante a borracha, c/ resina orgânica • Encapsulamento plástico	-	450,1	-	3,1 x 10 <sup>-5</sup>	-	-
	1.601,8	1.239,8	5,4	4,0 x 10 <sup>-7</sup>	5	-
	1.395,2	759,3	2,3	1,1 x 10 <sup>-5</sup>	2	-
	1.207,8	844,2	52,5	1,1 x 10 <sup>-4</sup>	1	12
	1.178,9	1.178,9	108,3	Impermeável	NR (0,00) (2)	NR (0,00) (2)
Resíduo de limpeza de gás de exaustão • Não tratado • Produto pozolânico baseado em cal • Material semelhante a solo, c/ aditivos patenteados • Produto semelhante a concreto, baseado em cimento	-	941,9	-	3,6 x 10 <sup>-5</sup>	-	-
	1.601,8	1.295,9	7,0	2,0 x 10 <sup>-6</sup>	3	2
	1.233,4	695,2	1,7	1,6 x 10 <sup>-4</sup>	1	1
	1.617,8	1.520,1	180,7	7,9 x 10 <sup>-4</sup>	NR(15,80) (2)	10

OBS: - Não testado.

(1) Valor questionável porque a restrição de fluxo causada pelo suporte da amostra pode ter influenciado o fluxo através da amostra.

(2) NR indica que não houve ruptura em 12 ciclos; os números em parênteses representam a porcentagem de perda de peso depois de 12 ciclos.

### 3.3.6. Outros ensaios de propriedades físicas

Outros ensaios físicos podem ser viáveis para a determinação da adequabilidade dos processos de tratamento aos resíduos com propriedades diferentes ou incomuns ou aqueles que se pretenda uma aplicação especial.

#### 3.3.6.1. Ensaio de solo

Entre as análises adicionais de solo que podem mostrar-se úteis para resíduos tratados, sob circunstâncias especiais, incluem-se os ensaios de: compactação, limite de Atterberg, compressão triaxial e capacidade de suporte.

Os ensaios de compactação são utilizados para determinação de peso unitário máximo ou do mínimo índice de vazios que pode ser obtido para um material semelhante a solo, e são geralmente empregados para se determinar a adequabilidade da disposição de resíduos tratados em aterros onde está prevista a execução de construções.

Os testes de limites de Atterberg são usados para determinar o teor de umidade no qual o solo atinge o seu limite de liquidez ou o seu limite de plasticidade. Estes ensaios são aplicáveis somente a materiais coesivos de granulação fina. O teor de umidade é empregado para estimar propriedades tais como compressibilidade, características de dilatação e de resistência, que fornecem uma indicação de como o material reagirá quando solicitado.

Os ensaios de compressão triaxial são usados para determinar a resistência ao cisalhamento dos materiais semelhantes a solo, sob condições de drenagem controladas. A resistência ao cisalhamento fornece uma indicação da capacidade de suporte do material e da estabilidade de aterros construídos deste material.

Os testes de capacidade de suporte fornecem dados de endurecimento da estrutura com relação à aplicação de cargas no material que está sendo testado.

Tendo em vista que algumas amostras de resíduos que aparentam ser sólidas e estáveis podem se liquefazer se forem vibradas, as determinações de resistências devem incluir uma série de corpos de prova vibradas.

Uma área de ensaios de solo que geralmente tem sido ignorada, mas que tem aplicação para aterro de resíduos ou lodos tratados é o teste de traficabilidade. A disposição de grandes quantidades de resíduos estabilizados requer o uso de veículos providos de rodas para movimentar e dispor o material. É importante saber que tipo de veículo pode ser usado na disposição do material e qual o período de cura necessário para permitir a passagem de veículos sobre o mesmo. Estas informações podem ser obtidas através da execução de ensaios de penetração cônica, juntamente com os outros testes de solo já comentados, e para completar as avaliações, deve-se obter, junto aos fabricantes de equipamentos de terraplenagem, informações a respeito de seus equipamentos específicos.

#### 3.3.6.2. Ensaio de Concreto

Dos testes de concreto que são aplicáveis a misturas de solo-cimento, um, em particular, que pode ser útil na avaliação de resíduos estabilizados para uso comercial é o ensaio de resistência versus tempo de cura. Neste ensaio, uma determinação similar a do teste de resistência à compressão não confinada é feita para se determinar a resistência à compressão da mistura resíduo-cimento curada. Os testes de resistência são normalmente conduzidos a cada dia até que a resistência máxima seja alcançada.

Os ensaios de resistência versus tempo de cura são úteis para a determinação do tempo de cura necessário a que um material, depois de disposto, possa receber, de forma segura, aplicação de carga.

Os problemas observados com relação a reações de sulfatos em lodos estabilizados indicam que um ensaio de dilatação, do tipo usado para concreto deve também ser adequado. Os ensaios de dilatação padronizados pelo ASTM empregam uma solução de sulfato e podem ser adaptados, substituindo-se esta solução por água destilada. Alterações significativas e/ou perda de resistência e aumento de volume indicam um insucesso da mistura.

Os ensaios adicionais acima descritos são úteis na avaliação de lodos estabilizados que serão empregados em aplicações especiais, mas o custo adicional dos mesmos não se justifica quando da disposição dos resíduos em aterro.

#### 3.4. ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO DOS RESÍDUOS ESTABILIZADOS

Os ensaios de lixiviação são empregados para se determinar ou avaliar a estabilidade química dos resíduos tratados, quando em contato com soluções aquosas que podem ser encontradas em um aterro, e demonstram o grau de imobilização dos contaminantes produzidos pelos sistemas de tratamento. Um grande número de técnicas de ensaios de lixiviação é disponível, mas nenhum sistema de teste isolado pode reproduzir as condições variáveis encontradas nos aterros.

Os testes, em sua maioria, são conduzidos a temperaturas (20° a 25°C) e pressões normalmente encontradas em laboratório e as principais variáveis estudadas nos diferentes ensaios propostos são:

- . natureza da solução de lixiviação;
- . relação do resíduo para solução de lixiviação;
- . número de eluições da solução de lixiviação usada;
- . tempo de contato do resíduo com a solução de lixiviação;
- . área superficial do resíduo;
- . técnica de agitação empregada.

### 3.4.1. Natureza da solução de lixiviação

A solução de lixiviação empregada em qualquer ensaio deve assemelhar-se ao fluido real que estará em contato com os resíduos no meio ambiente do aterro. Entretanto, não há um método para se desenvolver uma solução de lixiviação única, representativa de todas as variáveis que podem estar presentes em um aterro, com relação ao pH, potencial de oxidação-redução, presença de agentes quelatantes ou complexos e outros. A tendência geral na maior parte das experiências efetuadas é usar uma solução de lixiviação agressiva, com baixo pH e baixo potencial de oxidação-redução, para simular a pior situação do meio do aterro. Em geral, adotam-se soluções fracamente ácidas, tais como ácido carbônico ( $\text{CO}_2$ -água saturada) ou ácido acético, com base no fato de que as precipitações naturais e as águas do solo (que contêm  $\text{CO}_2$ ) são levemente ácidas.

Sistemas tampão a base de acetato vêm sendo usados para avaliação da eficácia de traços de metais em solos agrícolas, como por exemplo a solução de Morgan, uma substância tampão de ácido acético - acetato de sódio, que é usada rotineiramente para este fim.

A medida que estes sistemas levemente ácidos refletem um aumento de solubilidade nas águas de chuva ou do solo, eles representam a melhor conciliação como meio de lixiviação. O lençol freático num aterro (especialmente em aterros contendo somente resíduos industriais solidificados) não deve nunca alcançar o baixo pH das soluções baseadas em ácido acético, mas o crescimento de raízes para o interior do aterro pode reduzir o pH nas proximidades das mesmas, a níveis similares aos observados nas soluções de ácido acético e soluções tampão de acetato.

### 3.4.2. Relação resíduo para solução de lixiviação

Um fator importante é a determinação da taxa de resíduos para a quantidade de solução de lixiviação. O resíduo depois de sua disposição, pode estar em contato com uma grande quantidade de solução de lixiviação (água de chuva, lençol freático, etc.). Onde a relação resíduo/solução de lixiviação é muito grande (1:1 ou 1:2), os efeitos de íons comuns podem reduzir a solubilidade de certos constituintes químicos. As relações resíduo/solução de lixiviação menores (1:5 a 1:40) são consideradas adequadas.

Na maior parte dos casos, as restrições práticas dos ensaios exigem que um volume suficientemente grande de solução de lixiviação seja usado para permitir que as análises sejam desenvolvidas nos níveis mínimos necessários para assegurar a segurança e a saúde das pessoas envolvidas. Assim, se o teor de um composto orgânico tóxico necessitar ser determinado a níveis de ppb (partes por bilhão), vários litros de lixiviado devem estar disponíveis para a realização do ensaio.

### 3.4.3. Número de eluições das soluções de lixiviação usadas

Na maior parte dos ensaios de lixiviação considera-se que as amostras iniciais do lixiviado produzido contêm as máximas concentrações dos contaminantes potenciais que serão observadas nas etapas do ensaio. A razão disto é que estas amostras iniciais são expostas ao resíduo quando as concentrações mais elevadas dos contaminantes solúveis estão presentes nas superfícies do resíduo "fresco". Também, a quantidade máxima de material sólido de granulação fina (que teria uma solubilidade inerente maior devido ao tamanho de suas partículas) é disponível no resíduo durante a primeira eluição.

#### 3.4.4. Área superficial do resíduo

Um sistema ideal de ensaio deixaria exposta à solução de lixiviação a mesma área superficial à qual estaria exposta num aterro. No caso de um material denso impermeável, esta área superficial pode igualar-se apenas à superfície de contorno de um resíduo monolítico. Em compensação, para os materiais pulverulentos ou lamas, a área superficial pode ser cem ou mil vezes maior que a superfície de contorno da massa de resíduo.

Um dos objetivos de muitos sistemas de estabilização/solidificação de resíduos é produzir uma massa monolítica com uma área superficial mínima através da qual a perda de poluentes possa ocorrer. Técnicas de ensaios que requerem que o resíduo seja triturado até transformar-se em pó destroem muitas das vantagens criadas pela solidificação efetuada por esses processos. Entretanto, alguns processos são planejados para conter o resíduo, mesmo depois do mesmo ter sido pulverizado.

Um aspecto importante é testar a aderência de um resíduo solidificado através de ensaios de impacto e usar como corpo de prova o monolito ou o monolito fragmentado. Esta abordagem oferece a vantagem de permitir a um material, que normalmente não seria aterrado em fragmentos, ser testado na configuração na qual tem uma área mínima para perda de contaminantes. As principais desvantagens de tal sistema de ensaio físico e químico são:

- a) a tensão exata, que deveria ser aplicada para romper o corpo de prova do resíduo fixado como ele poderia ser rompido durante o aterramento ou compactação, não pode ser determinada com precisão para todos os casos.

- b) a área superficial do corpo de prova não pode ser definida com exatidão depois que o mesmo tenha sido fragmentado. Isto é importante se a taxa de transferência do contaminante por unidade de superfície de área for considerada.
- c) os ensaios físicos de materiais solidificados/estabilizados indicam que os ciclos de umedecimento/secagem e congelamento/descongelamento podem produzir uma rápida desintegração de muitos resíduos tratados. Em muitos casos, esta fragmentação pode ser mais completa que uma simples fissura do corpo de prova no aparelho de ensaio de impacto.
- d) a variação na fratura dos moldes entre corpos de prova de um mesmo resíduo introduz outro nível de variáveis nos testes e reduz a repetibilidade dos mesmos.

#### 3.4.5. Agitação Empregada

A agitação das amostras de teste durante a lixiviação ou a agitação da solução de lixiviação tem sido defendida para permitir que um equilíbrio mais rápido ocorra entre a amostra e a solução de lixiviação. Entretanto, não há na natureza, uma analogia para explicar esse fato. Na maioria dos casos onde os resíduos são aterrados, a água ou lixiviado em contato com o resíduo está estacionária ou com um fluxo muito lento, de forma que as características de difusibilidade efetivas são de importância primordial.

A principal objeção à agitação ou mistura do lixiviado e dos resíduos solidificados é que a mistura ou agitação pode triturar os corpos de prova em pequenos pedaços, aumentando, em consequência disso, a área superficial exposta à solução de lixiviação e invalidando o teste.

### 3.5. EFEITOS DE ATAQUE BIOLÓGICO NOS RESÍDUOS TRATADOS

O ataque biológico de resíduos perigosos e tóxicos tratados pode ocorrer pela utilização direta de algum material de solidificação (tal como a resina uréia-formaldeído) como um substrato para o crescimento de bactéria, ou pela produção biológica de materiais ácidos que possam atacar e solubilizar os resíduos fixados.

Columbo e Neilson abordaram o problema de uma possível biodegradação direta de matrizes de materiais solidificados através da medição da quantidade total de carbono orgânico liberada nas águas de lixiviação. Nos quatro materiais solidificados estudados (cimento portland, resina de uréia-formaldeído-UF, asfalto e éster vinílico-estireno), a resina UF apresentou maior liberação de carbono. Num programa de lixiviação de 18 dias, uma amostra de 211,7 g liberou 4,48 g de carbono. Nenhum outro material solidificado testado aproximou-se deste valor. A resina UF é sabidamente biodegradável.

Outras reações biológicas podem afetar resíduos solidificados indiretamente. Por exemplo, se resíduos contendo sulfetos metálicos são incorporados numa matriz de cimento, os sulfetos podem se oxidar a sulfatos e produzir ácido sulfúrico, que pode atacar e dissolver o concreto. Este tipo de reação ocorre durante a oxidação de pirita e sulfetos de ferro amorfos e necessita da presença de oxigênio atmosférico e, por esta razão, ocorre normalmente no topo da zona saturada de aterros ricos em sulfetos ou em amontoados de resíduos.

As raízes de plantas se constituem em outra fonte de ácidos que pode ressolubilizar os resíduos. Normalmente, elas descarregam dióxido de carbono nas águas circunvizinhas e geram um ácido fraco (ácido carbônico) que é capaz de colocar muitos metais tóxicos em solução. Os ácidos orgânicos liberados pelo apodrecimento de raízes podem, também, causar

'corrosão de alguns materiais, particularmente aqueles solidificados por processos baseados em cimento ou cal.

### 3.6. EFEITOS DOS PROCESSOS DE CURA E ENVELHECIMENTO DE MATERIAL TRATADO

Os processos de cura e envelhecimento afetam vários resíduos tratados (solidificados) de maneiras diversas. Alguns materiais poliméricos aumentam sua ligação durante a cura e tornam-se mais resistentes e menos propensos à lixiviação. Em outros polímeros, onde o resíduo não é parte integrante de estrutura, pode ocorrer a separação das fases aquosas e sólidas.

Exemplos destes diferentes efeitos podem ser observados nos contrastes existentes entre os sistemas de solidificação cimentosos (silicato) e sistemas UF. Moore e outros demonstraram que para sistemas cimentosos, constatou-se menos lixiviação quando as amostras foram curadas por mais de 100 dias. As condições de cura são também importantes: corpos de prova curados sob condições de umidade (onde a polimerização seria acelerada) são menos lixiviáveis que amostras que foram deixadas a secar durante a cura. Por outro lado, a solidificação com uréia-formaldeído resulta na formação de água que não é ligada à estrutura do polímero. O envelhecimento deste material produz retração e um excesso de água adicional. A capacidade de contenção do resíduo decresce com o envelhecimento.

Outros sistemas de tratamento que envolvem betume podem também apresentar efeitos decorrentes da cura e envelhecimento dos materiais, mas não há disponibilidade de dados para se avaliar se esses efeitos serão prejudiciais às propriedades de contenção do resíduo.

Obviamente, para os sistemas de encapsulamento que se utilizam de um revestimento superficial de polímero, os efeitos de envelhecimento são especialmente críticos. Se o isolamento depender da integridade de uma jaqueta de polímero orgânico ou polietileno, qualquer falha ou fissura comprometerá seriamente a contenção dos resíduos.

4 - PROCESSOS ESPECÍFICOS

#### 4. PROCESSOS ESPECÍFICOS

Dentro do contexto de solidificação/estabilização apresentado no item 2, foram desenvolvidas internacionalmente diversas técnicas, algumas patenteadas.

A seguir serão apresentados os principais métodos desenvolvidos em diferentes países, incluindo-se informações sobre o tipo de resíduos tratados, tipo de resíduos não adequados ao tratamento e os testes de lixiviação e de resistência.

##### 4.1. CHEMIFIX - PROCESSO DESENVOLVIDO POR CHEMIFIX INC.

###### a) Descrição do processo:

São misturados no resíduo aditivos (cimento e silicato solúveis) para produzir reação gelatinizante que é seguida de endurecimento. Esta companhia dispõe de unidades de tratamento móveis com capacidade de manusear 1.000.000 litros/turno de 10 horas. Este processo também pode ser aplicado em instalações fixas. A quantidade de aditivos consiste em 5% a 10% do volume do resíduo, variando de acordo com a natureza do resíduo e a porcentagem de sólidos. Em geral, quando esta porcentagem é elevada, a quantidade de aditivo a ser introduzida é menor. Chemif é marca registrada.

b) Tipo de resíduos tratados:

A maioria dos resíduos pode ser tratada por este processo. O aditivo reage com íons metálicos polivalentes produzindo compostos inorgânicos insolúveis e estáveis. Os materiais não reativos, tais como certos compostos orgânicos e asbestos, são capturados fisicamente na estrutura da matriz resultante do processo de reação. Em geral, esta técnica é traçada sob encomenda para cada tipo de resíduo.

c) Tipo de resíduos incompatíveis:

Alguns tipos de resíduos contendo determinados compostos orgânicos e/ou ânions tóxicos não são normalmente tratados, todavia, em certos casos a solidificação/fixação é possível com pré-tratamento específico destes resíduos.

d) Dados sobre testes de lixiviação e resistência:

Foram efetuados testes de lixiviação, de uma maneira ampla, com uma variedade de materiais processados, cujos resultados são disponíveis na companhia Chemifix Inc. Estes incluem testes de lixiviação cíclicos, testes de extração-saturação e sistemas de extração de não-equilíbrio. Foram obtidos resultados de lixiviação aceitáveis de uma variedade de resíduos industriais e municipais. A resistência do material fixado varia com a quantidade de aditivo empregado e com a natureza do lodo. O aspecto do material fixado pode variar de uma massa semelhante ao solo para um sólido monolítico como o concreto com elevada capacidade de sustentação.

#### 4.2. SEALOSAFE - PROCESSO DESENVOLVIDO POR STABLEX CORPORATION

a) Descrição do processo:

> Este processo envolve a adição de dois tipos de pós, basea-

dos em silicatos no resíduo, os quais são dissolvidos ou dispersos na água, produzindo desta forma uma mistura lodosa dentro de uma matriz semelhante à rocha rígida. Devido à sua forma física e química, esta massa é referida como rocha sintética.

As interações físicas e químicas que ocorrem simultaneamente são atribuídas ao mecanismo de captura do cristal. São utilizados, também, mais de 10 ingredientes adicionais dependendo-se do tipo de resíduo a ser tratado, para possibilitar este mecanismo de captura do cristal e operar sob condições ótimas.

b) Tipo de resíduos tratados:

O processo Sealosafe é adequado para os seguintes resíduos:

- todos os resíduos inorgânicos.
- resíduos orgânicos que possam ser incorporados homogênea-mente numa fase aquosa tanto pela dissolução, suspensão ou absorção.
- o processo é excepcionalmente eficaz no tratamento de todos os metais pesados inclusive mercúrio, arsênio e asbestos. Os resíduos aniônicos, tais como fluoretos, cloretos também são compatíveis.

c) Tipo de resíduos incompatíveis

Este processo não é adequado para resíduos de óleos, solventes e graxas, os quais não são miscíveis com a fase aquosa. O tratamento é inadequado, também, para grandes quantidades de água com teores mínimos de componentes tóxicos.

d) Testes de lixiviação e resistência

A Companhia Stablex possui ampla experiência e informações. O produto Stablex é 10 vezes menos permeável que o concreto. O teste de lixiviação ao qual a amostra fixada é submetida baseia-se no seguinte: o material na forma de pó

fino é introduzido na água destilada, cujo volume é 10 vezes superior ao seu peso, durante uma hora. Verificou-se que muito pouco material é perdido na água.

Uma outra amostra de um resíduo sólido contendo 39.000 ppm de cobre, 46 000 ppm de zinco e 42.000 ppm de cromo, após a fixação e cura de 3 dias, indicou perdas menores à 1 ppm destes componentes tóxicos. O produto Stablex apresenta uma resistência à compressão limitada, aproximadamente equivalente à do rebôco usado para preenchimento de vazios e esta bilização do solo mas, muito menor que a do concreto e arga massa.

#### 4.3. ATCOR RADWASTE SOLIDIFICATION SYSTEM - PROCESSO DESENVOLVIDO POR ATCOR WASHINGTON INC.

##### a) Categoria do processo de fixação:

Este processo é classificado como um sistema de solidificação com base em alvenaria (usando cimento).

##### b) Tipo de resíduos tratados:

O sistema foi projetado, fundamentalmente, para solidificar resíduos típicos provenientes tanto do reator de água fervente como do reator de água pressurizada da usina de energia nuclear, os quais são constituídos de 25%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , 12%  $\text{H}_2\text{BO}_3$ , resina trocadora de íons tipo roliço e vários meios filtrantes tais como solka-floc, terra diatomácea e auxiliar de filtração. Este sistema dispõe de um misturador/alimentador em linha que preenche qualquer tamanho de container e permite a inclusão de itens volumosos. Todos os procedimentos de operação são efetuados através de controle remoto e/ou automático.

##### c) Tipo de resíduos incompatíveis:

Lamas que não combinam com o cimento não podem ser trata-

das, todavia, em lodos específicos, é necessário efetuar testes para assegurar a adequabilidade da aplicação deste sistema.

d) Testes de lixiviação e resistência

Os estudos referentes à lixiviação e resistência indicaram que é numerosa a aceitabilidade do produto proveniente do sistema radwaste baseado em cimento. Este produto possui uma estrutura de cimento monolítico, não apresentando nenhum traço de água livre e o valor de lixiviação é aceitável para o aterramento em solos baixos.

4.4. CALCILOFIX: PROCESSO DESENVOLVIDO POR DRAVO LIME COMPANY

a) Categoria do processo de fixação:

Calcilofix é um pó seco, cinzento claro, de origem inorgânica que flui livremente. É hidraulicamente ativo e quando adicionado ao lodo melhora suas características para manuseio e disposição final no aterro, proporcionando ao lodo fixado uma integridade estrutural. Este processo seria melhor classificado como pozolânico ou baseado em cimento. Calcilofix é marca registrada.

b) Tipo de resíduos tratados:

O Calcilofix é aplicável a todos os resíduos baseados em cálcio provenientes da lavagem de gás  $SO_x$ , tipicamente produzido em purificador de gás utilizado em queima de coque. É, também, aplicado em resíduos de processamento de minerais inorgânicos que contêm grandes porcentagens de sílica e alumina. A aplicação típica é sobre resíduos de preparo do carvão fino e resíduos provenientes da fábrica de urânio.

c) Tipo de resíduos incompatíveis

Os lodos contendo resíduos orgânicos e lamas de esgoto não poderão ser tratados.

d) Dados sobre testes de lixiviação e resistência

São disponíveis dados de testes efetuados em campo sobre resíduos provenientes da lavagem de gás de combustão, os quais indicam valores reduzidos de lixiviação, quando comparados com os de lodo cru. Estes valores são reduzidos, especificamente, para uma a duas ordens de grandeza abaixo do valor de resíduo não tratado. A resistência do produto é controlada pela dosagem da mistura, mas o produto apresenta uma consistência seca como a da argila, semelhante àquela do solo argiloso compactado.

4.5. ETC SOLIDIFICATION SYSTEM - PROCESSO DESENVOLVIDO PELA ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY CORPORATION

a) Categoria do Processo de fixação:

Em geral, este processo requer reagentes adequados além da cal que é frequentemente usada em processo de tratamento da água. O resíduo perigoso é neutralizado e solidificado originando um lodo; os metais pesados quimicamente ligados e outros produtos químicos são totalmente fixados neste lodo.

A cal é necessária para neutralizar a acidez do resíduo perigoso e para formar compostos de cátions de metais pesados tais como hidróxidos insolúveis. A química dos reagentes é bem conhecida, mas até então não têm sido utilizados em sistemas simples. Um dos reagentes age como um meio de troca iônica para completar a remoção de metais pesados e retém o excesso de água no sistema. Os outros reagentes agem como ligantes que cobrem as partículas do lodo e aumentam a resistência física e a capacidade de suporte da carga do produto

final. Este lodo final produzido tem o aspecto da terra.

b) Tipo de resíduos tratados:

A maioria dos resíduos envolvidos no processo do sistema ETC é constituída de ácidos gastos de decapagem provenientes das fábricas de aço. O ácido sulfúrico compõe grande parte do resíduo, em volume. Outros tipos de resíduos tratados incluem o ácido clorídrico, outros ácidos de decapagem, soluções gastas de galvanização, lodos provenientes do sistema de tratamento de resíduo industrial, lodos provenientes do lavador de gás e lodos orgânicos.

c) Tipo de resíduos incompatíveis

Não há informações.

d) Dados sobre testes de lixiviação e resistência

Os testes de lixiviação foram efetuados em trincheiras abertas, revestidas e com o formato de U, providas com tubulações de plástico perfuradas que direcionam todo o líquido lixiviado em baldes plásticos de coleta. Após cerca de um mês, os lixiviados de 10 diferentes lodos apresentavam os valores de 1.000 ~ 5.000 mg/l de sólidos dissolvidos, 500 ~ 800 mg/l de  $SO_4$ , 150 ~ 600 mg/l de Cl. As análises de metais pesados indicaram menos de 0,01 mg/l de níquel, zinco, ferro, cromo e manganês. Somente o cobre apresentou teores de 0,03 ~ 0,04 mg/l.

A dureza, isto é, a resistência física é em função da quantidade total de sólidos presentes e da quantidade de reagentes adicionada.

#### 4.6. PROCESSO PATENTEADO DA ENVIROTECH CORPORATION

##### a) Categoria do processo

O processo é baseado em cimento e silicato de sódio. A licença foi concedida exclusivamente à Envirotech, no setor de unidades de tratamento de fixação, por National Environmental Control Inc. (companhia que tem ligações com a Chemifix Corporation).

Observação: Não foi possível obter, em bibliografias, informações de outros itens (resíduos tratados, incompatíveis e testes de lixiviação e de resistência).

#### 4.7. POZ-O-TEC - PROCESSO DE I.U. CONVERSION SYSTEMS, INC.

##### a) Descrição do Processo:

O processo I.U.C.S. Poz-O-Tec se utiliza de cinzas finas e outros aditivos. A química do Poz-O-Tec é a combinação de duas reações simultâneas: uma reação rápida que ocorre entre os sais solúveis presentes nas cinzas finas e a cal e alumina, e a reação lenta pozolâmica que ocorre entre a sílica da cinza fina e a cal. A última reação ocorre em um período superior a um mês. Poz-O-Tec é marca registrada.

##### b) Tipo de resíduos tratados:

Este sistema de solidificação foi desenvolvido, inicialmente, para a estabilização do lodo proveniente do lavador de gás  $SO_2$  das instalações geradoras termo elétricas. São tratadas por este processo 4 milhões de toneladas de lodo proveniente da lavagem de gases de combustão, por ano.

O Conversion Systems, também, estabilizou e testou, com sucesso, resíduos de galvanoplastia, de fábricas de aço e de

processos químicos. Baseado nestes resultados, este método permite a estabilização ou encapsulamento de resíduos com potenciais de lixiviar sais ou metais pesados no meio ambiente.

c) Tipo de resíduos incompatíveis

O processo não é adequado para alguns resíduos orgânicos.

d) Testes de lixiviação e de resistência:

As propriedades físicas e ambientais do material solidificado por Poz-O-Tec melhoram com o tempo, à medida que as reações pozolânicas prosseguem. A reação de cimentação produz uma massa monolítica de baixa permeabilidade que está sujeita somente à lixiviação na superfície. Os dados apresentados a seguir são referentes às propriedades do material estabilizado por Poz-O-Tec:

- peso específico aparente (base úmida)	1.360 ~1.600 kg/m <sup>3</sup>
- peso específico aparente (base seca)	1.040 ~1.360 kg/m <sup>3</sup>
- teor de umidade	2.550% de umidade
- coesão	> 95,7 x 10 <sup>3</sup> N/m <sup>2</sup>
- resistência à compressão não confinada	> 1,2 x 10 <sup>3</sup> N/m <sup>2</sup>
- coeficiente de permeabilidade	10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-8</sup> cm/seg.
- capacidade de suporte permíssível	2,87 x 10 <sup>5</sup> N/m <sup>2</sup>
- inclinação ao recalque estável	2 horizontal para 1 vertical
- saturação	incompleta

4.8. ENVIROCLEAN - PROCESSO DESENVOLVIDO POR INDUSTRIAL WASTE MANAGEMENT INC.

a) Descrição do processo

O processo Enviroclean pode utilizar cimento Portland, ou a cal e pozolânicos, ou cimento e cal, e pozolânicos dependendo-se do resultado desejado e da disponibilidade local em algumas circunstâncias. A patente americana do processo está pendente. A companhia dá um destaque especial para aplicação deste produto sobre rodovias, estacionamento e calçadas.

b) Tipo de resíduos tratados:

Resíduos industriais, de utilidades e certos resíduos municipais.

c) Tipo de resíduos incompatíveis

A maioria de resíduos orgânicos e resíduos com menos de 15% de sólido, por motivos econômicos não são adequados para o tratamento.

d) Testes de lixiviação e resistência

Tanto os resultados dos testes de lixiviação como o aumento de resistência, e também, a permeabilidade poderão variar conforme a quantidade de aditivo químico e o tipo de lodo. A resistência inicial que varia de 15 a 40 lbs/ft<sup>2</sup> aumentou para 75 a 400 lbs/ft<sup>2</sup> em 3 a 6 meses e 300 a 700 lbs/ft<sup>2</sup> em dois anos. A permeabilidade inicial que varia de 10<sup>-5</sup> a 10<sup>-6</sup> cm/seg, se reduzirá para 10<sup>-7</sup> a 10<sup>-8</sup> cm/seg. dentro de um mês. O teste de lixiviação efetuado durante 48 horas com água destilada em lama contendo hidróxidos de metais tóxicos provenientes de operação de gravação por água forte indica as concentrações de íons abaixo de 0,5 ppm para o cobre, ferro, chumbo, zinco, cromo total, PO<sub>4</sub>, níquel e cádmio.

O aumento de volume devido à adição de materiais para a estabilização química variará de 1,1 para 1,6 vezes do volume anterior ao tratamento.

#### 4.9. PROCESSO EM DESENVOLVIMENTO POR NEW PORT NEWS INDUSTRIAL CORP.

New port News Industrial Corporation se envolveu inicialmente com a redução do volume e técnicas de manuseio de materiais radiativos. Eles têm uma ampla experiência em produzir resíduos compactos os quais são compatíveis com agentes de solidificação tais como uréia-formaldeído, poliéster a base d'água e betume. Esta companhia está pesquisando atualmente um novo método de solidificação aplicável em resíduos químicos perigosos incluindo-se resíduos radiativos.

Como é um processo ainda em desenvolvimento os dados ainda não são disponíveis.

#### 4.10. PROCESSO DESENVOLVIDO POR CANADIAN WASTE TECHNOLOGY INC.

##### a) Descrição do processo

A técnica de solidificação utilizada é baseada na produção de compostos de silicatos estáveis análogos aos materiais geológicos naturais.

##### b) Tipo de resíduos tratados:

Poderão ser tratados por este processo todos os resíduos industriais inorgânicos tais como solução residual de decapagem, resíduo de galvanoplastia etc. contendo ácidos, cromo, cobre, ferro, magnésio, manganês, níquel, zinco, cádmio, chumbo, mercúrio, vanádio, cloretos, sulfatos, fósforo e virtualmente quaisquer produtos químicos inorgânicos ou suas combi

nações. Foram também projetadas aplicações específicas para tratar resíduos finais de minas e lodos de esgotos das instalações de tratamento primário e secundário.

c) Tipo de Resíduos incompatíveis

O processo é ineficaz para alguns resíduos orgânicos, mas aqueles com um volume superior a 20% de resíduos inorgânicos na sua composição têm sido tratados com êxito, fundamentados caso por caso.

d) Testes de lixiviação e resistência

A companhia efetuou amplos testes de lixiviação e de resistência, cujas conclusões estão abaixo relacionadas:

- Os teores de metais pesados no lixiviado (laboratório e campo) são normalmente abaixo de 1 mg/l.
- Os lixiviados provenientes dos testes de material processado apresentaram elevadas concentrações de sólido dissolvido.
- Durante o período prolongado de lixiviação efetuada com água destilada observou-se que grande parte de metais pesados comumente presentes nos resíduos foi retida no material processado, quando considerado em termos de massa sendo que a perda de metais pesados foi relativamente pequena.
- É possível obter um material com resistência à compressão não confinada superior a  $20,7 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  (3.000 psi), mas em geral, por motivos que envolvem o custo, o produto final é de baixa resistência.

4.11. PROCESSO DESENVOLVIDO POR POLYMERIC MATERIALS SECTION  
DA UNIVERSIDADE DE WASHINGTON (WASHINGTON STATE  
UNIVERSITY)

a) Descrição do processo:

É utilizado um polímero orgânico (resina poliéster) para so-  
lidificar o resíduo.

b) Tipo de resíduos tratados:

Embora amplamente eficaz, este processo apresenta maior efi-  
ciência aos resíduos radioativos de baixo grau, resíduos de  
íons metálicos, cianetos, resíduo de arsênio e alguns resi-  
duos orgânicos específicos tais como kepone\* e PCB, e al-  
guns produtos farmacêuticos.

c) Tipo de resíduos incompatíveis:

O processo não é eficaz em lamas altamente ácidas (especial-  
mente com pH < 1,0).

d) Dados sobre testes de lixiviação e resistência:

Os testes efetuados em um produto fixado utilizando-se de 60%  
em peso de solução de sulfato de sódio 24% indicou uma re-  
sistência à compressão de  $15,0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  (2.180 psi).

A resistência do produto depende do tipo, da proporção e for-  
ma do resíduo incorporado.

\* marca registrada de inseticida à base de cetona deca-clo-  
ro octahidro-clorada.

Os valores de lixiviação de Co-58, Sr-85 e Cs-134 de um resíduo de sulfato de sódio encapsulado similarmente foram, respectivamente, de  $3,2 \times 10^{-3}$ ,  $3,5 \times 10^{-3}$  e  $5,9 \times 10^{-3}$  cm, através de um período de 120 dias. A curva de lixiviação se nivelou a este valor após uma elevação inicial, nos primeiros 20 dias. Assim, o lixiviado após a dissolução inicial do material da superfície foi praticamente desprezível.

#### 4.12. PROCESSO DESENVOLVIDO POR PROTECTIVE PACKAGING INC

##### a) Descrição do processo:

Esta Companhia vende sistemas de solidificação por polímeros orgânicos.

##### b) Tipo de resíduos tratados:

A Protective Packging Inc tem ampla experiência com resíduos nucleares, tanto para solidificação como para disposição final.

As informações quanto a outros itens não foram disponíveis em bibliografias.

#### 4.13. PROCESSO DESENVOLVIDO POR SANDIA LABORATORIES

##### a) Descrição do processo:

O projeto do processo de Solidificação Sandia consiste em estudos de viabilidade de solidificação de resíduos sólidos. Os laboratórios da Sandia estão desenvolvendo um método no qual os actinídeos e cátions de produtos formados por fissão são submetidos a troca iônica ou trocadores de íons inorgânicos .

Estes trocadores de íons são hidróxidos de titânio, zircônio, Nióbio e tálio.

b) Tipo de resíduos tratados

O processo é destinado aos resíduos radiativos de alto grau, tal como fluxo residual (teor elevado) proveniente do reprocessamento de combustível nuclear comercial, bem como fluxo de resíduo de defensivo cáustico com elevado teor de sais ( $\text{NaNO}_3$ ).

c) Tipo de resíduos incompatíveis

Devido ao alto custo do processo evita-se resíduos de baixo teor e que apresentem pouca periculosidade.

d) Testes de lixiviação e resistência

O produto final subsequente da troca iônica poderá ser queimado para produzir produtos cerâmicos tendo valores de lixiviação tão baixos quanto daqueles de resíduo estabilizado por vidro de borossilicato.

4.14. TERRA CRETE - PROCESSO DE SLUDGE FIXATION TECHNOLOGY  
INC

a) Descrição do processo

A técnica de Terra Crete é baseada em processo de auto-cimentação, e consiste em produzir material cimentoso de semi-hidrato de sulfato de cálcio ou sulfato de cálcio. Uma porção do fluxo de lodo de sulfato/sulfato é seca e calcinada para produzir um agente cimentoso. Este material e outros aditivos (necessários) são introduzidos no fluxo de resíduo e reagem formando uma massa de baixa permeabilidade.

b) Tipo de resíduos tratados

O sistema foi primariamente projetado para operar com lodos baseados em sulfito/sulfeto produzido nas operações de lavagem de chaminés, mas é adaptável a outras situações onde possam ser obtidos lodos de sulfito de cálcio/sulfato.

c) Tipo de resíduos incompatíveis

Nenhuma especificação.

d) Testes de lixiviação e resistência

Os dados de lixiviação do lodo proveniente da lavagem de gás de combustão rico em chumbo e antimônio indicaram 0,01 ppm de chumbo neste lixiviado. A resistência à compressão não confinada do material Terra Crete depende da quantidade do aditivo usado, porém foram obtidos valores da ordem de  $9,57 \times 10^4 \text{ N/m}^2$  a  $5,74 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ . A permeabilidade é da ordem de  $10^{-6}$  a  $10^{-7} \text{ cm/seg}$ .

#### 4.15. PROCESSOS DESENVOLVIDOS POR SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE

a) Descrição do processo

Foram desenvolvidos dois tipos de processo:

- . Sistema baseado em epoxi-termoplástico que combina as melhores características do sistema epoxi-termofixo e dos sistemas termoplásticos. As resinas epoxi e endurecedores representam baixo custo e apresentam-se na forma sólida a temperaturas ambientes e quando aquecidas ( $240^\circ\text{C}$ ) se tornam um líquido de baixa viscosidade. Assim, estes são combinados e misturados com as cargas ou agregados e descarregados. A mistura endurece instantaneamente como materiais termoplásticos e então é curada como um material termofixo para fornecer características físicas tí-

picas de recipiente de epoxi. Este material de epoxi pode ser usado como revestimento para outros processos de fixação.

- . Foram desenvolvidos, para a estabilização do lodo industrial, 3 sistemas diferentes usando-se enxôfre. Estes sistemas são:

- processo de enxôfre modificado onde o enxôfre é usado como aglomerante para lodos tóxicos a fim de produzir um material semelhante ao concreto.
- sistema de enxôfre líquido plastificado, onde o enxôfre é modificado a um ponto que possa ser utilizado como um substituto de asfalto.
- impregnação do enxôfre: o enxôfre tem sido usado previamente como um agente de impregnação para concreto, gesso, tijolo poroso, azulejos e bloco de lama.

Além disso, o preenchimento dos vazios a fim de reduzir a absorção d'água resultou na melhora considerável da resistência.

Este sistema é usado para aumentar a resistência à compressão e à lixiviação do lodo fixado pelos outros métodos tal como adição de cimento.

A maioria das técnicas acima mencionadas ainda estão em estudos.

b) Tipo de resíduos tratados

Não está completamente determinado.

c) Tipo de resíduos incompatíveis

Não está completamente determinado.

d) Testes de lixiviação e resistência

Os dados sobre os testes ainda não são disponíveis.

#### 4.16. TERRA TITE - PROCESSO DE STABATROL CORPORATION

##### a) Descrição do processo

O método Terra Tite envolve a adição de materiais cimentosos no lodo residual sendo seu produto final um material se melhante ao concreto.

##### b) Tipo de resíduos tratados

A maioria dos resíduos industriais pode ser tratada por este método. O Processo Terra Tite possui grande flexibilidade técnica.

##### c) Tipo de resíduos incompatíveis

Nenhum especificado.

##### d) Testes de lixiviação e resistência

São obtidas permeabilidades da ordem de  $10^{-7}$  cm/seg. A lixiviação é baixa atingindo níveis insignificantes. Quanto à resistência, o produto final de Terra Tite tem apresentado valores superiores a  $4,78 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup> ( 5 ton/ft<sup>2</sup>).

#### 4.17. TST TAKENAKA SLUDGE TREATMENT SYSTEM DE TJK, INC

##### a) Descrição do processo

Os aceleradores de solidificação usados são principalmente da família de cimento ou materiais baseados em cimento. Além disso, são empregados aditivos especiais para estabilizar substâncias perigosas. Os tipos de aceleradores dependem das características do lodo a ser tratado.

b) Tipo de resíduos tratados

O sistema TST é um método destinado para solidificar lamas com teores de água relativamente elevadas provenientes das fábricas ou instalações, transformando-as em material de fácil manuseio para a disposição no solo. No caso de lodos contendo substâncias tóxicas tais como o mercúrio, cromo e cádmio, estas são estabilizadas e quimicamente fixadas.

c) Tipo de resíduos incompatíveis

Dentre os resíduos tratados e testados, constatou-se que o método é inadequado para dois tipos de lodo; um proveniente da instalação de lavagem da lã (gorduras e óleos superior a 20%) e outro lodo contendo grandes quantidades de resíduo de pintura.

d) Testes de lixiviação e resistência

A companhia tem realizado amplos testes de lixiviação. Em seu teste padrão, o resíduo tratado é moído para a granulometria de 0,5 mm a 5 mm. Este pó é então misturado com a água destilada e o pH é ajustado para 5,8 a 6,3 mediante HCl ou CO<sub>2</sub>. A mistura final (100 ml) é de 10% (peso/volume) do material tratado para água. Esta mistura é agitada por 6 horas à temperatura ambiente e 1 atmosfera, então filtrada ou centrifugada antes da análise.

Os resultados de testes efetuados em mais variados tipos de lodos contendo, também, uma variedade de íons de metais tóxicos mostraram que somente pequenos teores de poluentes são liberados, mesmo neste teste de lixiviação relativamente se vero. Os íons mencionados e suas concentrações máximas permitidas são:

- mercúrio e alquil mercuriais - não deve ser detectado
- cianeto ..... 1 mg/l
- cádmio ..... 0,3 mg/l

- chumbo ..... 3 mg/l
- organo-fosforado ..... 1 mg/l
- cromo hexavalente .... 1,5 mg/l
- arsênio ..... 1,5 mg/l

A resistência varia amplamente com o tipo do lodo, de aditivo, e quantidade usada, mas valores de  $5 \sim 10 \times 10^5 \text{N/m}^2$  são comuns com 20% (peso/volume) de aditivos.

#### 4.18. "SAFE-T-SET" DE TODD SHIPYARDS CORPORATION

##### a) Descrição do processo

Safe-T-Set é um produto de polímero orgânico, não tóxico, não perigoso, pulverizado, sendo eficaz para os resíduos concentrados bem como aos líquidos. Safe-T-Set se solidifica numa mistura homogênea sem nenhum deslocamento de água. Este material não é formulado como uréia-formaldeído.

##### b) Tipo de resíduos tratados

Este produto é destinado especialmente aos lodos residuais radiativos de indústrias. Até o presente não foi testado em outros resíduos industriais.

##### c) Tipo de resíduos incompatíveis

Não há dados pelo mesmo motivo acima mencionado.

##### d) Testes de lixiviação e resistência

Os testes foram realizados com resíduos radiativos simulados com o intuito de provar que o Safe-T-Set, quando misturado com resíduo líquido radiativo minimiza a sua liberação, caso a integridade do container que o contém seja perdida durante o transporte ou após a disposição.

Foram executados 9 testes: escape do material radiativo através do Safe-T-Set e solo, teste de congelamento-descongelamento, estudo de imersão - dependência de pH, pH de fixação, estudo de imersão a pH 7,0, estudo de gás livre, estabilidade quando inoculado com bactéria, irradiação e toxicidade.

#### 4.19. PROCESSO DE TRW SYSTEMS GROUP

##### a) Descrição do processo

Foram selecionados 2 tipos de aditivos de fixação, com melhores potenciais gerais, os quais foram pesquisados e testados.

- . Cimentos inorgânicos: cimento Portland tipo 2, gesso (semi-hidrato de sulfato de cálcio) e cal (óxido de cálcio puro).
- . Resinas polibutadieno de configurações estereo específicos (1,2 polibutadieno atático).

Todas as técnicas de fixação foram testadas com ou sem revestimentos, tanto por resinas termoplásticas, assim como termofixas e asfalto.

##### b) Tipo de resíduos tratados

Aparentemente, todos os tipos de resíduos sólidos e lodos parecem ser passíveis de tratamento, mas os resíduos específicos tratados neste estudo foram resíduos sólidos simulados e lodos contendo compostos de 6 elementos tóxicos: arsênio, mercúrio, selênio, cromo, cádmio e chumbo.

c) Resíduos incompatíveis

Não estipulados

d) Testes de lixiviação e resistência

Estes testes incluem teste mecânico, determinação da densidade aparente, resistência superficial e resistência à compressão; exame microscópico da interface entre a amostra fixada e o revestimento, e ensaios de lixiviação usando-se 3 soluções de lixiviação (água destilada, ácido carbônico saturado de pH 3,8 a 4,0 e solução de sesquicarbonato de sódio 0,1 M).

A lixiviação foi realizada a temperatura ambiental em 750 ml de solução de lixiviação, a qual foi agitada moderadamente três vezes por dia.

## 4.20. PROCESSO DE WERNER AND PFLEIDERER CORP.

a) Descrição do processo

A técnica usada é o encapsulamento com betume ou a incorporação utilizando-se da extrusora em rosca.

b) Tipo de resíduo tratado

Nenhum resíduo industrial está sendo comumente estabilizado pelo encapsulamento com asfalto mas, foram testados por este método resíduos contendo arsênio sob delegação EPA, U.S. Environmental Protection Agency.

c) Tipo de resíduo incompatível

Os lodos contendo oxidantes fortes tais como nitratos, clor

tos, percloratos e persulfatos não devem ser encapsulados com o asfalto. Os lodos contendo boratos poderão exigir um manuseio especial, pois estes tendem a causar endurecimento rápido do material asfáltico. Os sais que aumentam excessivamente de volume quando re-hidratados poderão precisar de um processamento especial.

d) Testes de lixiviação e resistência

De acordo com a informação fornecida pela companhia, poder-se-á encontrar um valor de lixiviação 100 vezes menor que o observado na mistura de cimento. Para a mistura sal/asfalto microdisperso coberta com uma pequena camada de 5 mm de asfalto puro, o valor do lixiviado com água destilada foi nulo, durante o período de 1,5 a 2 anos.

Os dados sobre testes de resistência não foram obtidos, por serem sólidos plásticos que são normalmente colocados em containers de aço.



## 5. TECNOLOGIA DO CIMENTO

Dentre os métodos de encapsulamento anteriormente apresentados, a técnica baseada em cimento, é sem dúvida, o método mais econômico devido ao baixo custo da própria matéria prima, bem como do investimento inicial, que basicamente requer equipamentos comuns de mistura. Como o processo ocorre à temperatura ambiente, também, não há necessidade de energia auxiliar. Estas vantagens aliadas à tecnologia de manuseio e mistura, assim como à característica do cimento, que são bem conhecidas, tornam este processo um método econômica e tecnicamente viável, compatível a nossas realidades, apesar de algumas desvantagens apresentadas no item 2.

A seguir serão apresentados os principais tipos de cimento, sua composição e características de seu comportamento.

### 5.1. PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO DOS CIMENTOS

#### 5.1.1. Cimento Portland

O cimento portland comum é fabricado tendo como matérias primas principais o calcário ( $\text{CaCO}_3$ ) e argila (basicamente óxidos de silício, ferro, alumínio e manganês) as quais são finamente moídas por via seca ou via úmida. Pode ser necessário a adição de uma pequena quantidade de gesso e óxido de ferro para controle da composição. Esse material apresenta uma composição em óxido geralmente como se segue:  $\text{CaO}$  (63%);  $\text{SiO}_2$  (22%);  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (7%);  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (3%);  $\text{Mg}$  (2%) e  $\text{SO}_3$  (2%).

A seguir esse material é calcinado a uma temperatura de  $1.500^\circ$  a  $1.600^\circ\text{C}$  e os óxidos se combinam gerando basicamente:

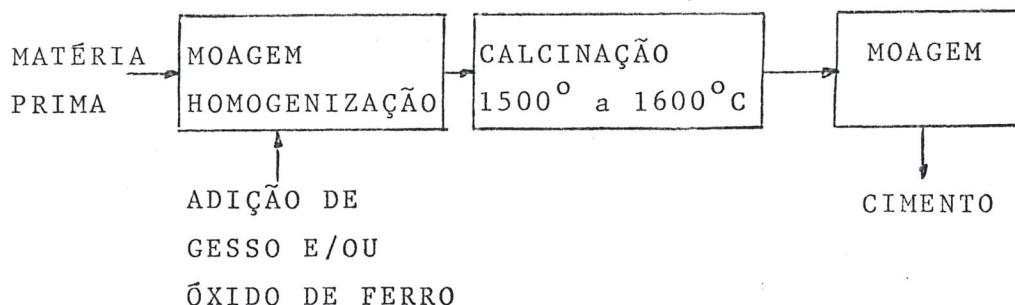
- silicato tricalcico ( $3\text{CaOSiO}_2$ ), também denominado  $\text{C}_3\text{S}$ ;
- silicato dicalcico ( $2\text{CaOSiO}_2$ ), também denominado  $\text{C}_2\text{S}$ ;
- aluminato tricalcico ( $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ ), também denominado  $\text{C}_3\text{A}$ ;

- . ferro-aluminato tetracalcico ( $4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$ ), também denomiminado  $C_4AF$ , e
- . sulfato de cálcio ( $CaSO_4$ ).

Esse material apresentará então uma composição básica de cal livre e complexos, óxido de magnésio e gesso. Uma análise quantitativa apresentaria:

- . Silicato tricalcico -  $C_3S$  ..... 60%
- . Silicato dicalcico -  $C_2S$  ..... 10%
- . Aluminato tricalcico-  $C_3A$  ..... 10%
- . Ferro-Aluminato tetracalcico -  $C_4AF$  ..... 10%
- . Sulfato de cálcio -  $CaSO_4$  ..... 3-4%

O produto formado no forno, denominado clinquer, é então moido dando origem ao cimento propriamente dito. O fluxograma a baixo mostra a seqüência de operações.



O cimento portland assim formado é uma mistura de silicatos, aluminatos e ferro aluminatos de cálcio que, quando hidratada dos formarão uma massa compacta rígida e de alta resistência. Dentre os elementos formadores do cimento o mais susceptível a ataques em meios agressivos é o silicato tricalcico ( $3CaOSiO_2$ ) pois, como se suspeita que este complexo seja uma solução sólida de óxido de cálcio em silicatos dicalcicos, muitas substâncias podem reagir com a molécula de óxido de cálcio aparentemente livre.

### 5.1.2. Cimento Pozolânico

O cimento pozolânico é obtido pela moagem conjunta de clínquer, pozolana e gesso numa proporção de 16:3:1, respectivamente.

As pozolanas são materiais que, por si sô não tem propriedades aglomerantes mas, quando da liberação de cal durante a hidratação do cimento, fixam essa cal livre dotando a massa de propriedades hidráulicas.

Comparando com o cimento portland comum, o cimento pozolânico adquire resistência de maneira relativamente lenta e são necessários períodos longos de cura úmida para que a pozolana reaja com a cal na presença de umidade e origine assim o silicato de cálcio, material mais estável e resistente. A massa assim formada pode apresentar uma resistência superior àquela do portland comum.

### 5.1.3. Cimento de alto forno

O processo de fabricação do cimento de alto forno é semelhante aquele do pozolânico, onde se substitui a pozolana por escória de alto forno. Os teores da mistura podem variar atingindo 30 a 70% de clínquer, 25-65% de escória e 5% de gesso.

### 5.1.4. Cimento aluminoso

O processo de fabricação do cimento aluminoso é semelhante àquele portland comum, onde se substitui a argila pela bauxita de forma a conseguir maiores teores de alumina ( $\approx 30\%$ ). Os cimentos aluminosos obtidos por fusão são também denominados cimentos fundidos.

Após a hidratação desse cimento, o endurecimento se dará pela hidratação do aluminato de cálcio.

### 5.1.5. Composição química dos cimentos

A composição potencial média dos complexos presentes nos cimentos, segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), são mostrados na tabela nº 5.1.5.1. abaixo apresentada.

Tabela nº 5.1.5.1. Composição Potencial Média dos Cimentos segundo A.B.C.P.  
valores em porcentagem

COMPLEXO	TIPO DE CIMENTO		
	PORTLAND 320*	POZOLANICO 320*	ALTO FORNO 320*
Silicato tricalcico $C_3S$	58	47	23
Silicato dicalcico $C_2S$	12	09	05
Aluminato tricalcico $C_3A$	09	07	04
Ferro-Aluminato tetracalcico $C_4AF$	10	08	04
Sulfato de cálcio $CaSO_4$	03	03	01

(\*) : O valor 320 refere-se à classe do cimento o qual esta relacionado com a resistência à compressão esperada após 28 dias de cura.

Os resultados de análises químicas efetuadas também pela mesma Associação sobre amostras de cimento produzido no país durante o ano de 1982, estão mostrados na tabela 5.1.5.2.

## 5.2. AÇÃO DOS AGENTES EXTERIORES SOBRE AS ARGAMASSAS E CONCRETO

Além da compatibilidade de resíduos e aditivos anteriormente descrita no item 3.2. é fundamental o conhecimento das influências que os possíveis agentes externos poderão causar sobre o material solidificado, isto é, argamassas e concreto.

Entende-se como argamassas os materiais de construção constituídos por uma mistura íntima de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo e água.

Tabela nº 5.1.5.2. Resultados das análises químicas efetuadas em amostras de cimento durante o ano de 1982.  
Média dos valores máximos e mínimos expressos em porcentagem.

PARÂMETRO	TIPO DE CIMENTO							
	PORTLAND 320		POZOLÂNICO 320		ALTO FORNO 320			
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
Perda ao fogo	1,38	3,30	1,64	3,38	1,30	3,01		
Dióxido de silício total - SiO <sub>2</sub>	20,44	22,31	25,97	30,07	25,45	28,26		
Óxido de alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,67	5,49	7,49	9,45	7,98	9,70		
Óxido de ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,94	3,86	3,35	4,35	2,02	2,89		
Óxido de cálcio total - CaO	60,90	63,34	47,44	53,50	50,86	54,79		
Óxido de magnésio - MgO	1,96	3,14	2,53	3,89	2,87	4,58		
Anidrido sulfúrico - SO <sub>3</sub>	1,93	2,89	1,53	2,46	1,59	2,43		
Óxido de sódio - Na <sub>2</sub> O	0,08	0,16	0,15	0,26	0,12	0,19		
Óxido de potássio - K <sub>2</sub> O	0,56	0,86	0,51	0,71	0,67	0,88		
Resíduo insolúvel	0,39	1,00	13,22	24,55	0,50	1,46		
Óxido de cálcio livre	1,10	2,40	1,10	2,59	1,02	2,12		
Enxofre - S	-	-	-	-	0,37	0,60		

Para a obtenção de um produto de boa qualidade, é necessário que todos os grãos do material inerte, desde os menores até os mais graúdos, sejam completamente envolvidos pela pasta de cimento como também a ela estejam perfeitamente aderidos, além disso, os vazios entre os grãos do agregado devem ser inteiramente preenchidos pela pasta.

O envolvimento dos grãos do agregado pela pasta, bem como o preenchimento dos vazios entre os grãos pelo aglomerante ficam resolvidos com uma dosagem adequada.

A quantidade de água que deverá ser adicionada a argamassa é de cerca de 25% do peso de cimento. Porém esta quantidade não é suficiente para dar uma massa plástica capaz de misturar-se intimamente com a areia. Para formar a argamassa necessita-se portanto, de um certo excesso variável, difícil de fixar devendo o seu cálculo ser objeto de experiências de caráter prático.

No item 5.3 é apresentada uma tabela de traços de argamassa com as respectivas tensões máximas de tração e compressão.

O concreto é um material de construção constituído de pedra, areia, cimento e água.

Da mesma forma que as argamassas, para obtenção de um produto de boa qualidade, é necessário que todos os grãos do material inerte, desde os menores até os mais graúdos, sejam completamente envolvidos pela pasta como também a ela estejam perfeitamente aderidos, além disso, os vazios entre os grãos do agregado devem ser inteiramente preenchidos pela pasta.

No caso do concreto, para se garantir uma boa qualidade deve-se dar preferência a agregados de forma arredonda, uma vez que as formas angulosas, as placas e as partículas pontiagudas são mais difíceis de misturar e de adensar.

A primeira operação para o uso de concreto consiste em se determinar uma dosagem correta para cada um dos seus constituintes, com a finalidade de se evitar a segregação dos materiais durante o adensamento bem como garantir os níveis de resistência esperados. Em seguida deve-se misturar os materiais primários destinados a fazer uma matéria homogênea. A melhor forma de se executar uma boa mistura é utilizar uma betoneira. Após o lançamento do concreto para se obter um adensamento adequado deve-se vibrar o mesmo.

A seguir serão descritos com detalhes as ações de cada um dos principais agentes exteriores sobre as argamassas e concreto. Cabe ressaltar que as mesmas referem-se aos ataques sobre as peças já curadas.

#### 5.2.1. Ação das águas puras

As águas muito puras atacam os aglomerantes, segundo se tem indicado ultimamente ao tratar das águas de amassamento.

Considera-se águas puras as que não contenham mais que uma pequena proporção de cal e sais dissolvidos; segundo sua proporção relativa de cal e ácido carbônico, estas águas serão ácidas, neutras ou alcalinas.

A ação de uma água pode ser mais ou menos agressiva, dependendo por um lado da sua composição, e de outro do aglomerante empregado no concreto.

Certas águas agem sobre o aglomerante e, por carbonatação da cal livre do mesmo, contribui para colmatar os poros existentes na argamassa. Esta carbonatação será mais ou menos eficaz dependendo do teor de cal. Em um meio rico em cal, forma somente uma película pouco consistente e sobre uma argamassa pobre em cal produz um carbonato resistente.

A determinação do pH não bastará para classificar as águas de efeitos agressivos, pois o fato de apresentar a mesma acidez nem sempre implica em mesmo comportamento; suas ações poderão ser diferentes conforme o tipo de ácido.

O processo da ação das águas puras, pode resumir-se como segue: A água começa por dissolver a cal livre, que em alguns aglomerantes representa uma quantidade significativa, logo hidroliza os compostos calcários, começando pelo aluminato cálcico, do qual dissolve primeiramente a cal, e logo o silicato mono-cálcico. Além deste efeito principal se desenvolverão ações secundárias que aceleram ou retardam a ação mencionada.

Pode-se afirmar que toda água com menos de 40 hidrotimétricos (quantidade de sais calcários que a água contém) é perigosa, assim como as que tenham o pH inferior a 7, sem que seja possível precisar o grau de agressividade.

Contra estas ações, é conveniente o emprego de aglomerantes que tenham a menor quantidade possível de cal livre, com índice de hidraulicidade superior a 1, como os cimentos pozolânicos, rápidos e aluminosos. Além disso, é do maior interesse o estudo da granulometria dos grãos e a dosagem correspondente a fim de assegurar o máximo de compacidade ao concreto, sendo esta a forma de proteção mais adequada para o mesmo.

Existem duas classificações para os aglomerantes por ordem de resistência às águas puras. A 1.<sup>a</sup> indica a seguinte ordem: cimentos rápidos, de escória, fundidos, portland e cal hidráulica; enquanto que a 2.<sup>a</sup> indica: cimento fundido, cimento de escória, portland, rápido e cal hidráulica.

Nos casos de ataques pode-se empregar proteções superficiais com reboques de produtos betuminosos, a carbonatação e silicificação das superfícies.

Deve-se tomar extremo cuidado na confecção do concreto e na cura do mesmo antes de se colocar as peças em contato com a água agressiva.

#### 5.2.2. Águas sulfatadas e sulfatos em geral

Os sulfatos são agentes de destruição dos concretos e em especial o sulfato cálcico, que existe em grande quantidade na natureza. A ação das águas sulfatadas ou águas selenitosas é também bastante prejudicial ao concreto. O sulfato cálcico dá origem ao sulfo-aluminato cálcico, ao qual se denomina baciolo do cimento talvez por sua característica de destruição do concreto. Essa substância converte o concreto em uma papa, cujo o aspecto se assemelha a um objeto que sofreu um ataque microbiano.

Principalmente os concretos empregados em trabalhos de cloacas, túneis, pontes sobre ferrovias, etc., sofrem grandemente esta ação, uns por ataque direto, e outros por transformações que, em definitivo, dão origem a formação do sulfoaluminato cálcico tão prejudicial.

Um bom exemplo dessa ação diz respeito a um caso de desagregação de tubos de cimento amianto (fibro cimento) utilizados como condutos para a exaustão dos produtos da combustão de uma instalação de calefação por gás de um banheiro. Este conduto apresentava em seu interior uma superfície rugosa, como desfiado, de cor amarelada que podia levantar-se muito facilmente com uma espátula. Debaixo dela reaparecia o material em seu estado normal.

As análises da parte atacada indicaram a presença de 17% de anidrido sulfúrico, enquanto que a parte não afetada só continha uns 2%. Deve-se indicar, com a finalidade de se evitar uma generalização e descrédito desta classe de material, que a instalação deste conduto era muito rudimentar e que não se havia previsto nenhum dispositivo destinado a recolher os produtos da condensação.

Onde existe compostos de enxofre e umidade em presença de cal são sempre temidos estes efeitos destrutivos. Por isso mesmo, são perigosas as piritas e os ataques que se originam dos escapamentos dos veículos pois, os vapores de água mesclados com o material sulfuroso procedente do carvão de pedra contendo pirita, dão lugar a um processo parecido ao antes mencionado. Estas destruições são clássicas também nas chaminés de concreto em suas partes submetidas à chuva.

A decomposição do concreto provém da ação do sulfato cálcico e é devida à transformação do aluminato tetra-cálcico hidratado em sulfo-aluminato tricálcico hidratado. Esta substância causa a destruição pelo aumento de volume que origina. Os demais aluminatos e os silicatos não são atacados.

A ação desagregadora do sulfato cálcico não se dá somente por efeito químico, mas pode ser também por efeito físico.

A solução de sulfato cálcico penetra nos poros do concreto e se concentra por evaporação depositando pequenos cristais deste sal. Se o concreto se acha sujeito as alternativas de imersão e secagem os cristais vão aumentando e caso esta ação se prolongue, ocorre a destruição da argamassa ou concreto. Este efeito é notado fortemente nos canos de despejo, pois, o gás sulfídrico contido nas águas carregadas de materiais orgânicos, oxidando-se ao ar úmido, dá origem na argamassa ao sulfato cálcico que produz a destruição.

Por efeito químico, sabe-se que o sulfato cálcico reage sobre a alumina contida no cimento formando o sal de candlot, ou seja, o sulfoaluminato de cal cuja formula é  $Al_2O_3 \cdot 3CaO \cdot SO_4Ca$ .

Este sal cristaliza em forma de agulhas finas (fixando 30 moléculas de água) com um grande aumento de volume o que causa a desagregação de argamassas e concretos. Este efeito é semelhante ao de uma explosão de pouca intensidade, que se origina de uma carga de polvora.

As duas causas físicas e químicas, podem trabalhar conjuntamente dando lugar a desastrosos efeitos.

O ataque ao concreto é tanto mais enérgico quanto maior é a quantidade de sulfato cálcico hidratado (gesso).

Os sulfatos de potássio e de magnésio são também muito prejudiciais. Sua ação depende da quantidade de  $SO_3$ , do tempo de contato e da compacidade da argamassa ou concreto. Essa ação se dá de forma parecida como o indicado para o sulfato cálcico.

Contra a ação dos sulfatos recomenda-se em geral, o empre-

go de cimentos especiais. O aluminoso em primeiro lugar pois, ao ser ligado, não forma o aluminato tetracálcico hidratado. Também o cimento metalúrgico, o pozolânico, o super sulfatado (saturado de sulfoaluminato) são indicados. De uma maneira geral pode-se utilizar todos os que contêm baixos teores de cal livre.

Alguns cimentos portland do tipo kuhl, com altos teores de ferro e baixos teores de cal e sílica, são especialmente resistentes a estas ações como se tem tido ocasião de comprovar repetidamente.

Estes cimentos combinados devidamente com pozolanas dão também bons resultados. Em todo caso, é aconselhável uma experimentação a longo prazo.

Uma vez mais se insiste na importância da preparação de argamassas e concretos, seja qual for o cimento adotado, pois disso resultam esperanças maiores de bom resultado.

Como regra geral, não se deve preocupar somente com a qualidade das águas, mas também com o conhecimento dos grãos empregados, recusando os que tenham sulfatos solúveis ou piritas e comprovando-se também a natureza do terreno, onde se localizará a obra (muitas vezes causa da destruição por contato).

### 5.2.3. Ação do Açúcar

Sobre este assunto tem-se originado algumas confusões, uma vez que a ação do açúcar sobre a cal não é de todo prejudicial, sendo que em certas proporções aumenta sua resistência. Porém, não cabe dúvida alguma de que sobre o cimento essa ação é altamente prejudicial inclusive sobre concretos curados a muito tempo. Por exemplo: em pavimentos de concreto de fábricas onde se manejam açúcares e xaropes é fácil a comprovação.

A formação de sacarato de cal, solúvel e expansivo e que impede em absoluto o endurecimento do cimento, é a causa da destruição. Até o limite de 0,5% de açúcar, obtem-se uma aceleração da pega não prejudicando visivelmente as resistências do cimento, porém de 1% em diante, os fenômenos destrutivos se manifestam com grande rapidez uma vez que, os corpos de prova não chegam a se romper nos prazos normais pois, se decompõem totalmente antes dos 28 dias de cura.

Na presença de açúcar recomenda-se lavar e limpar cuidadosamente todas as ferramentas e materiais que possam estar em contato com o concreto e proteger, durante o período de pega as obras, do pó de açúcar, do derrame de melaço e do xarope já que, também nestes casos, a pega não ocorre podendo apresentar efeitos de decomposição mais ou menos determinados.

Como exemplo cita-se um caso de decomposição em uma fábrica de chocolate onde se ampliava uma seção de moenda de açúcar e cacau através de execução de um pátio que foi pavimentado com cimento portland. Durante os trabalhos de pavimentação os moinhos de açúcar continuaram funcionando normalmente e o pó desprendido se depositou sobre o pavimento em construção. Os efeitos do pó de açúcar foram fatais para a obra uma vez que esta não se endureceu mudando de aspecto e consistência como no caso de uma argamassa que durante a pega tenha sofrido os efeitos de congelamento. Neste caso se pode observar que partes do pavimento que estavam protegidos por tábuas ou sacos não sofreram decomposição e se endureceram normalmente.

#### 5.2.4. Ação dos óleos e graxas

Os óleos de origem vegetal ou animal (oliva, ricino, linhaga, etc.), ao decomporem-se por oxidação em contato com o ar, formam ácidos graxos que reagem com a cal da argamassa,

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL  
BIBLIOTECA

originando a formação de sabões com a conseqüente ação destrutiva sobre a mesma.

Esta ação é muito mais enérgica sobre argamassas e concretos pobres ou porosos visto que, no caso de argamassas ricas, a ação é dificultada devido a proteção da capa superficial de carbonato cálcico.

Os óleos comestíveis com pouca acidez, são também pouco prejudiciais, o mesmo acontece com as gorduras animais sólidas sendo, porém, bem mais agressivas no estado líquido.

Na prática os óleos e graxas em geral ocasionam deterioração relativamente rápida nos recipientes e pavimentos de concreto, como é possível observar nos armazéns dedicados a estes produtos industriais.

O mesmo ocorre com os óleos e graxas minerais, embora em muitos estudos se afirme o contrário.

Por isso, é conveniente tomar as devidas precauções sobre tudo, preparando concretos muito compactos e evitando tanto quanto for possível o contato direto das graxas e óleos por meio de proteções adequadas. Por exemplo, não é aconselhável o emprego de depósitos de concreto para o armazenamento de gasolina e petróleo sem prepará-los devidamente.

Como meio de proteção se empregam soluções de silicato de sódio, aplicadas na superfície dos depósitos. Também algumas resinas artificiais dão bons resultados neste sentido, evitando a ação de graxas e óleos sobre o concreto.

Foram desenvolvidos outros revestimentos a base de sais metálicos do ácido hidrofúosilícico; estes revestimentos aplicados, em forma de pintura sobre argamassa e concretos, reagem sobre a cal, para dar fluoretos duplos e ácido silícico, aumentando consideravelmente a dureza das superfícies e sua impermeabilidade.

### 5.2.5. Adubos orgânicos

Os adubos orgânicos atacam as argamassas e concretos quando estes ainda estão frescos, mas uma vez devidamente curados e durante o período da pega, estes já não sofrem qualquer ataque.

### 5.2.6. Ácidos

Em geral os cimentos tem uma reação alcalina e são atacados pelos ácidos em maior ou menor proporção. Neste ataque liberta-se a sílica coloidal solúvel e produz os sais metálicos correspondentes. Quanto mais concentrado for o ácido mais enérgica e rápida é a ação.

Os ácidos clorídrico e nítrico são mais ativos sobre o cimento que o sulfúrico devido ao fato que o sulfato cálcico é muito menos solúvel em água do que os cloretos e nitratos cálcicos.

Também os ácidos que se produzem na decomposição das matérias orgânicas (lático, acético, úrico, tânico, etc.) são ativos sobre o cimento e portanto, sobre as argamassas e concretos.

Sobre a ação do ácido tânico é suficiente 0,01% em relação ao peso do concreto, para reduzir sua resistência à metade. É necessário frisar o fato acima uma vez que normalmente se indica este produto como conveniente para proteger o concreto contra os ataques do sulfato cálcico sendo, portanto, improcedente a aplicação do mesmo neste sentido sem as devidas precauções.

Além dos ácidos propriamente ditos, existem certos sais ácidos (como os bissulfatos de sódio, potássio e magnésio) que exercem uma ação parecida com a dos ácidos. As águas minerais contendo bicarbonatos ou ácidos livres podem também produzir uma ação destrutiva sobre as argamassas e concre-

tos ainda que, as vezes, seja de efeito muito lento.

#### 5.2.7. Compostos alcalinos

Os álcalis atuam em geral sobre o tempo de pega dos cimentos. Uma solução de soda, por exemplo, começa por diminuir o tempo de pega porém, aumentando a sua proporção, chega-se a um ponto a partir do qual volta a aumentar o tempo de pega do cimento. A causa da ação aceleradora da pega provem da coagulação da sílica e do aluminato hidratado coloidais. A mesma ação exercem os carbonatos e cloretos alcalinos.

#### 5.2.8. Cloretos

No caso de cloretos cálcico pode-se observar duas situações distintas ou seja:

Uma solução diluída retarda a pega; já se a solução for muito concentrada o fenômeno se acelera. Por exemplo, em concentrações de 20 a 60 g por litro na água da argamassa, se retarda bastante a pega, porém a resistência final aumenta.

#### 5.2.9. Ação da cal gorda

A cal gorda atua sobre a hidratação de aluminatos de cal. No caso do aluminato tricálcico, o hidrato de cal age como retardador pois, os grossos cristais de hidrato de cal impedem a formação do aluminato tricálcico hidratado retardando a pega.

No caso dos demais aluminatos, o efeito é contrário, pequenas quantidades de hidrato de cal aceleram a pega, e maiores quantidades a retarda, sendo necessário maior quantidade quanto mais aluminoso for o cimento.

### 5.2.10. Água do mar

O efeito da água do mar sobre as argamassas e concretos é muito complexo. Tem-se comprovado que algumas argamassas de cimento fundido que se decompunham em poucos meses em águas sulfatadas terrestres. Resistiam, perfeitamente, por vários anos à ação da água do mar. Isto demonstra que o efeito dos sais contidos na água de mar podem ser de dois tipos: de ataque e proteção combinados.

Logo a composição da água do mar é bastante variável, porém para estudos pode-se admitir em média a seguinte composição:

- Cloreto de sódio $\text{NaCl}$	30 g/l
- Sulfato de magnésio $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	5 g/l
- Cloreto de magnésio $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	6 g/l
- Sulfato de cálcio $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1,5 g/l
- Bicarbonato de potássio $\text{KHCO}_3$	0,2 g/l

O ataque às argamassas e concretos devido a ação da água do mar, é de três origens: mecânico, químico e físico.

As ações mecânicas são em primeiro lugar produzidas pelas ondas e pelos golpes das pedras que são arrastadas, não se esquecendo do efeito de imersão repetida originada pelas marés.

A ação química é consequência da cristalização e dissolução sucessiva dos sais, como também da dissolução e difusão de determinados componentes do cimento, tal como se tem indicado ao tratar da ação das águas sulfatadas, porém a cal dissolvida é difundida para o exterior, se combina com o  $\text{SO}_4$  do sulfato de magnésio da água precipitando o magnésio, que forma uma crosta superficial misturada a outras substâncias (sulfo aluminato de cal, carbonato de magnésio, carbonato de cal, etc.) igualmente insolúveis. Em geral esta espécie de crosta se destroi e regenera de modo contínuo.

Quanto mais cal livre o cimento possuir, mais facilmente e rapidamente se dará a difusão pois, sua solubilidade é relativamente grande. Se, pelo contrário, somente existir silicatos e aluminatos a decomposição se efetua pelo mesmo mecanismo, visto que estas substâncias se dissociam em água porém, a quantidade de cal posta em liberdade é muito pequena e sua eliminação por difusão será extremamente lenta chegando em alguns casos a ser praticamente imperceptível.

Por outro lado a difusão da cal aumenta a porosidade da argamassa facilitando, por efeito físico, o ataque do mesmo por sais marinhos. Essa difusão não ocorre sempre com a mesma rapidez pois, fora as causas antes citadas relativas ao aglomerante empregado, quanto mais afastada estiver a região de onde se produz o ataque da superfície de acesso da água, mais lenta será a difusão.

Tendo-se em vista que entre as superfícies de acesso se encontram fissuras porosidades ou aberturas produzidas pelo sulfato cálcico, a difusão pode ser modificada pela maior ou menor permeabilidade da crosta superficial cuja própria estrutura pode ser alterada pelas vegetações que nela se incrustem.

Considerando-se os fenomenos intervenientes se deduz que não é fácil fazer um prognóstico quanto a duração de uma argamassa e concreto submetidos as ações da água do mar. Todavia, apesar dos cimentos especiais destinados a estas aplicações (fundido, pozolânico, de escória, super sulfatados, etc.) se segue utilizando o cimento portland cuidando, especialmente, dos aspectos de preparação do concreto e sua colocação na obra.

A tabela 5.2.1 representa os principais tratamentos destinados para proteger o concreto dos ataques químicos.

Tab. 5.2.1. Tratamento aconselhável para proteger o concreto dos ataques químicos

SUBSTÂNCIAS	EFEITO SOBRE O CONCRETO	TRATAMENTO PROTETOR
Óleos Derivados de Petróleo		
Óleos combustíveis leves	Nenhuma - alguma perda por penetração	Fluosilicato, verniz de silicato de sódio, óleo de linhaça.
Óleos voláteis. Querosene. Benzina. Nafta e Gasolina.	Nenhuma - considerável perda por penetração.	Fluosilicato, verniz de silicato de sódio, verniz de baquelita.
Óleos pesados	Nenhuma - penetração rapidíssima	Nenhum
Produtos de Destilação		
Fenol, cresol, lisol e carbolineum	atacam debilmente	Fluosilicato, sílica, verniz, verniz de baquelita.
Benzol, xilol, toluol	Nenhuma - alguma perda por penetração	Fluosilicato, silicato óleo de linhaça, verniz de baquelita.
Breu, piche, antracina, parafina	Nenhuma	Nenhum
Sulfúrico e Nítrico	Ácidos Inorgânicos Desintegrantes	Vidros, ladrilhos vidrados ou recoberto com litargírio. Chumbo é boa proteção abaixo de 65°C e para concentrações menores que 50%.
Fluorídrico	Desintegrante	Chumbo somente para temperaturas abaixo de 65°C e concentrações menores que 50%.
Sulfuroso	Desintegrante	Vidros, ladrilhos vidrados ou cobertos com litargírio e chumbo para todas as concentrações.

continua ...

Tab. 5.2.1. Tratamento aconselhável para proteger o concreto dos ataques químicos

SUBSTÂNCIAS	EFEITOS SOBRE O CONCRETO	TRATAMENTO PROTETOR
Ácido acético	Matérias Orgânicas Lentamente desintegramente	Esmalte betuminoso, verniz de baquelita.
Ácido carbônico em água	Ataca lentamente	Asfalto, verniz betuminoso, fluossilicato, silicato sódico, verniz de baquelita, resina.
Ácido láctico ou tânico	Ataca lentamente	Como o anterior e ainda óleo de linhaça e parafina.
Óleo de peixe	Ataca debilmente	Fluossilicato, silicato de sódio, óleo de linhaça.
Manteiga ou óleo de manteiga	Ataca debilmente	Como o anterior
Óleo de linhaça	Ataque débil	Nenhum
Resina	Ataque débil	Nenhum
Noz de coco	Ataque débil	Fluossilicato, silicato, óleo de linhaça.
Óleo de oliva	Ataque débil	Idem e mais verniz de baquelita.
Óleo de colza	Ataque débil	Idem
Óleo de algodão	Ataque débil	Nenhum
Óleo de amendoa	Ataque débil	Fluossilicato, silicato, óleo de linhaça, verniz.
Óleo de nozes	Debilíssimo	Idem
Ácido oxálico	Debilíssimo	Nenhum
Ácido carbônico anidro	Debilíssimo	Nenhum

continua ...

Tab. 5.2.1. Tratamento aconselhável para proteger o concreto dos ataques químicos

SUBSTÂNCIA	EFEITO SOBRE O CONCRETO	TRATAMENTO PROTETOR
Sais		
Sulfatos de cálcio, potássio, sódio, magnésio, cobre, zinco, alumínio, manganês, ferro, níquel e cobalto.	Ataque muito ativo	Fluosilicato, silicato de sódio, óleo de linhaça, aplicações betuminosas, vidros, ladrilhos vitrificados ou recobertos de litargírio.
Sulfato de amônia	Efeito desintegrante	Idem, idem
Cloreto de magnésio, ferro, mercúrio, cobre e antimônio.	Ataca debilmente	Idem, idem
Nitrato de amônio	Ação desintegrante	Idem. idem
Minerais de enxofre e pirritas	Ataque débil	Idem, idem
Sulfato ácido	Ataca fortemente	Idem, idem
Cloreto de sódio, potássio, cálcio e estrôncio.	Nenhum efeito	Nenhum
Nitrato de cálcio, potássio e sódio	Nenhum efeito	Nenhum
Sulfetos solúveis exceto o de amônio	Nenhum efeito	Nenhum
Carbonatos	Nenhum efeito	Nenhum
Fluoretos	Nenhum efeito	Nenhum
Silicatos	Nenhum efeito	Nenhum
Matérias Diversas		
Melaços	Ataca debilmente	O mesmo que nos grupos anteriores.
Leite	Ataca debilmente	Idem, idem
Xaropes e glucoses de grãos	Ataca debilmente	Idem, idem
Polpa de madeira tanino e álcool	Não ataca	Nenhum

Obs. Os sais solúveis inorgânicos atacam o concreto mais ou menos intensamente, pela seguinte ordem: sulfatos, sulfetos, nitratos, cloretos e carbonos.

### 5.3. PROPOSIÇÕES PARA DETERMINAR CONDIÇÕES IDEAIS PARA O ENCAPSULAMENTO DE RESÍDUOS

O método proposto consiste em se executar uma massa de concreto ou argamassa e adicionar uma porcentagem a ser determinada de resíduo, em seguida moldar corpos de prova e após 3, 7 e 28 dias executar ensaios de compressão e lixiviação procurando, desta forma, garantir um mínimo de resistência física ao material encapsulado bem como o atendimento aos padrões adotados pela CETESB para o teste de lixiviação.

As técnicas citadas para a obtenção de argamassa e concreto bem como as tabelas apresentadas dizem respeito ao material comumente usado na construção civil. Portanto, no caso de se executar a argamassa ou o concreto com o objetivo de se encapsular um determinado resíduo, deve-se levar em conta as alterações que possam ocorrer no material devido a reações entre o resíduo a ser encapsulado e o cimento a ser utilizado, por exemplo: menor ou maior resistência a compressão, fragmentação do material, impossibilidade de se homogeneizar o material, o não enriquecimento do material, etc.

Como essas alterações são função da quantidade, propriedades físicas e químicas do resíduo, deverão ser elaborados corpos de prova com diferentes traços e tipos de cimento para se avaliar a melhor técnica de encapsulamento para cada resíduo.

Para o presente trabalho sugere-se que seja utilizado tanto para a confecção da argamassa como para o concreto o cimento portland comum tipo 320, cimento este ~~é~~ utilizado em trabalhos comuns de concreto armado. Quanto ao resíduo a ser encapsulado recomenda-se a utilização de uma borra contendendo metais pesados, devendo ser elaborados corpos de propo

va e ensaios de compressão de acordo com a MB-2 e MB-3 respectivamente.

Quanto aos traços a serem adotados para a confecção dos corpos de prova indicamos.

Argamassa - 1:1	Concreto - 1:3:6
1:3	1:2 1/2:5
1:5	1:2:3

Com o objetivo de melhorar as características de retenção dos poluentes na massa, sugere-se o ensaio de alguns corpos de prova, utilizando-se além dos materiais já especificados, dois tipos de aditivos denominados comercialmente por Sika 1 e Vedacit, possuindo ambas características impermeabilizantes de concretos e argamassas.

No decorrer dos ensaios um novo resíduo poderá ser proposto bem como o tipo de cimento, traços e aditivos a serem usados, em função dos resultados que forem sendo obtidos.

As tabelas 5.3.1. e 5.3.2 a seguir representam traços de concreto e de argamassa, com as respectivas tensões máximas de tração e compressão.

Tabela 5.3.1.1. - Resistência a Compressão de Concretos em Função dos Traços Utilizados

TRAÇOS EM VOLUME	FATORES		CIMENTO		RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO				TRAÇOS EM PESO CORRESPONDENTES 1:	Nº DE ORDEM
	ÁGUA CIMENTO	kg	kg	ℓ	3 D	7 D	28 D	kg/cm <sup>2</sup>		
1: 1 : 2	ℓ/kg	0,44	2,27	22,0	228	300	400	1,08 : 1,96	Traço nº 1	
1: 1 1/2 : 3	ℓ/kg	0,49	2,04	24,5	188	254	350	1,63 : 2,94	Traço nº 2	
1: 2 : 2 1/2	ℓ/kg	0,55	1,82	27,5	148	208	298	2,17 : 2,44	Traço nº 3	
1: 2 : 3	ℓ/kg	0,61	1,64	30,5	117	172	254	2,17 : 2,94	Traço nº 4	
1: 2 1/2 : 3	ℓ/kg	0,65	1,54	32,5	100	150	228	2,71 : 2,94	Traço nº 5	
1: 2 : 4	ℓ/kg	0,68	1,47	34,0	90	137	210	2,17 : 3,92	Traço nº 6	
1: 2 1/2 : 3 1/2	ℓ/kg	0,71	1,41	35,5	80	123	195	2,71 : 3,42	Traço nº 7	
1: 2 1/2 : 4	ℓ/kg	0,73	1,37	36,5	74	114	185	2,71 : 3,92	Traço nº 8	
1: 2 1/2 : 5	ℓ/kg	0,79	1,27	39,5	58	94	157	2,71 : 4,89	Traço nº 9	
1: 3 : 5	ℓ/kg	0,88	1,14	44,0	40	70	124	3,25 : 4,89	Traço nº 10	
1: 3 : 5,6	ℓ/kg	0,95	1,05	47,5	30	54	100	3,25 : 5,87	Traço nº 11	
1: 4 : 8	ℓ/kg	1,20	0,83	60,0	-	-	-	4,34 : 7,83	Traço nº 12	

Tabela 5.3.2. Resistência a tração e compressão de argamassas em função do traço utilizado

TRAÇOS EM PÊSO	MEIO DE CONSERVAÇÃO	ENSAIO DE TRAÇÃO kg/cm <sup>2</sup>			ENSAIO DE COMPRESSÃO kg/cm <sup>2</sup>		
		7 D	28 D	1 ano	7 D	28 D	1 ano
1 : 1	ÁGUA	43,2	47,1	56,1	445	259	702
	AR	-	47,0	75,1	-	521	796
1 : 2	ÁGUA	35,4	40,3	49,4	407	451	629
	AR	-	42,3	71,1	-	489	712
1 : 3	ÁGUA	31,8	34,9	44,3	321	397	514
	AR	-	38,9	66,9	-	399	608
1 : 4	ÁGUA	24,3	28,3	37,7	271	305	428
	AR	-	29,7	60,9	-	307	509
1 : 5	ÁGUA	18,4	23,4	30,7	178	222	349
	AR	-	24,5	54,4	-	232	369

6 - BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

- 1- ARIMA, Y. Considerações básicas para encapsulamento de lodos perigosos, Original em japonês, Revista PPM nº 4, 1977.
- 2 - ELÁDIO G. R. PETRUCCI. Materiais de Construção, 1975.
- 3 - LUBOWITZ, H. R., et al. Development of a Polymeric Cementing and Encapsulating Process for Managing Hazardous Wastes. TRW Systems Group, Redondo Beach, Calif.
- 4 - MALONE, P. et al. Guide to the Disposal of Chemically <sup>stabilized</sup> Stalized and Solidified Waste. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- 5 - MATTHEWS, P.J. and Bentley, J. Characterization, Collection, Treatment and Final Disposal of Toxic Sludges. S.Paulo Lecture Course, Nov. 1983.
- 6 - PATRICIO PALOMAR COLLADO. Aglomerados de Hormigón Hidráulico - Barcelona.
- 7 - ROBERT L'HERMITE. Ao pé do Muro. Paris Eyrolles.



CONFEÇÃO E CURA DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO  
CILINDRICOS OU PRISMATICOS

MB-2

Projeto de revisão da norma aprovada em 1957

1. OBJETIVO

Este Método fixa o modo pelo qual devem ser moldados e curados corpos de prova, cilíndricos ou prismáticos, destinados à avaliação de qualidades intrínsecas do concreto.

2. APARELHAGEM

2.1 *Moldes* — O material dos moldes para corpos de prova deve ser rígido e não absorvente. As superfícies internas dos moldes devem ser lisas e sem defeitos. O ângulo formado pela base com as geratrizes, do cilindro e o ângulo formado pelas faces adjacentes do molde prismático devem ser iguais a  $(90 \pm 0,5)^\circ$ .

Os moldes cilíndricos e os prismáticos devem possuir dispositivos de fixação às respectivas placas de base. Para evitar vazamentos, na montagem dos moldes a vedação deve ser feita com mistura de cera virgem e óleo mineral, plastica a frio.

Após a montagem, os moldes devem ser revestidos internamente de fina camada de óleo mineral.

2.1.1 *Moldes cilíndricos* — A espessura da chapa da parede do molde deve ser no mínimo de 3 mm e a da placa de base deve ser no mínimo de 6 mm. As dimensões reais do molde (diâmetro e altura) não devem diferir de  $\pm 2\%$  das dimensões nominais. Dois diâmetros ortogonais, um deles passando pela geratriz cortada, não devem diferir de  $\pm 1\%$  do diâmetro nominal. A placa de base não deve apresentar afastamento maior que 0,05 mm em 150 mm, em relação a um plano.

2.1.2 *Moldes prismáticos* — A espessura da chapa das paredes do molde e da base deve ser no mínimo de 6 mm. As dimensões reais do molde (comprimento, largura e altura) não devem diferir de  $\pm 2\%$  das dimensões nominais.

2.2 *Haste de socamento* — A haste de socamento deve ser uma barra de aço reta, com 600 mm de comprimento e aproximadamente 16 mm de diâmetro, com superfície lisa, seção transversal circular e extremidades planas. É facultada a colocação de punho em uma das extremidades da barra, para facilitar o seu manuseio pelo operador (ver Figura 1 e Figura 2).

2.3 *Gola* — Dispositivos de chapa metálica para conter o concreto que transborda do molde.

3. AMOSTRAGEM

3.1 A amostra destinada à moldagem de corpos de prova deve ser retirada de acordo com o método de amostragem de concreto fresco, correspondente ao processo de produção de concreto utilizado. O local de aplicação do concreto, do qual foi retirada a amostra será anotado para referência posterior. O volume da amostra a ser reti-

rada deve ser suficiente para a moldagem de, pelo menos, dois corpos de prova para cada idade.

4. CORPOS DE PROVA

4.1 *Local de moldagem* — Os corpos de prova devem ser moldados em local próximo daquele em que devem ser armazenados nas primeiras 24 h. A moldagem dos corpos de prova, uma vez iniciada, não deve sofrer interrupção. Os moldes devem ser levados cuidadosamente para o local de armazenamento imediatamente após a moldagem.

4.2 *Processo de adensamento* — O processo de adensamento a ser adotado na moldagem dos corpos de prova deve ser compatível com a consistência do concreto, para que se tenha no corpo de prova um concreto homogêneo e compacto.

A consistência do concreto será medida pelo abatimento do tronco de cone, de acordo com o método MB-256. Os processos de adensamento considerados neste Método são adensamento manual, adensamento manual enérgico e adensamento mecânico.

Nos concretos que apresentem abatimento inferior a 2,0 cm o processo de adensamento deve ser o mecânico ou o manual enérgico. Nos concretos de 2,0 cm a 6,0 cm de abatimento, pode ser adotado qualquer um dos processos de adensamento considerados. Nos concretos de abatimento maior que 6,0 cm o processo de adensamento adotado deve ser o manual.

5. CORPOS DE PROVA CILINDRICOS

(Destinado aos ensaios de compressão axial e diametral)

5.1 *Dimensões* — Os corpos de prova devem ter comprimento igual a duas vezes o seu diâmetro. Quando o diâmetro máximo do agregado for menor ou igual a 50 mm, deve ser utilizado o corpo de prova de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura.

NOTA 1: O corpo de prova de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura pode ser usado no caso em que o diâmetro máximo do agregado é superior a 50 mm, desde que a amostra de concreto fresco seja passada previamente na peneira ABNT 38 mm.

NOTA 2: Para correlacionar os resultados dos corpos de prova moldados com o concreto penetrado e os corpos de prova moldados com o concreto integral correspondente, pode ser usado o corpo de prova de diâmetro igual a pelo menos três vezes o diâmetro máximo do agregado, e de altura igual a duas vezes o diâmetro.

5.2 *Moldagem* — Os moldes devem ser colocados com as geratrizes na posição vertical. O modo de adensar o concreto nos moldes é definido no processo de adensamento a ser adotado. Durante a moldagem dos corpos de



CETESB

ANEXOS

prova devem ser retirados grãos de agregado de tamanho superior ao normal (tamanho que não é normalmente encontrado na granulometria média do agregado), ocasionalmente encontrados no concreto. Após o adensamento do concreto, qualquer que seja o processo adotado, a superfície do topo dos corpos de prova deve ser alisada com a colher de pedreiro e, em seguida, coberta com uma placa de vidro ou de metal que deve permanecer até o momento da desmoldagem.

**5.3 Adensamento manual** — O concreto deve ser colocado no molde de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes da haste de socamento, uniformemente distribuídos em toda a seção transversal do molde.

No adensamento de cada camada, a haste de socamento não deve penetrar na camada já adensada. Se a haste de socamento criar vazios na massa do concreto, deve-se bater levemente na face externa do molde até o fechamento dos vazios.

**5.4 Adensamento manual energético** — O concreto deve ser colocado no molde de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura em seis camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 60 golpes da haste de socamento, uniformemente distribuídos em toda a seção transversal do molde.

No adensamento de cada camada, a haste de socamento não deve penetrar na camada já adensada. Após o socamento de cada camada deve-se bater com a haste na face externa do molde até refluir a nata.

**5.5 Adensamento mecânico** — O concreto deve ser colocado no molde de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura em duas camadas de alturas aproximadamente iguais. A vibração deve ser aplicada em cada camada apenas o tempo necessário para permitir o adensamento conveniente do concreto no molde. Este tempo é considerado suficiente no instante em que o concreto apresenta superfície relativamente plana e brilhante. A frequência e a amplitude da vibração devem ser tanto quanto possível idênticas às do equipamento utilizado no adensamento do concreto na obra. No caso de vibrador de imersão, o diâmetro da agulha deve ser menor ou igual a 1/4 do diâmetro do corpo de prova.

**NOTA 3:** Quando for usado corpo de prova de dimensões superiores a 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura (Nota 2), o processo de adensamento deverá assegurar a obtenção de corpo de prova homogêneo e compacto.

### 5.6 Capejamento

**5.6.1** As faces dos corpos de prova que ficam em contato com os pratos da máquina de ensaio, e que apresentarem afastamento maior que 0,05 mm em 150 mm em relação a um plano, devem ser capeadas ou polidas, de modo a obter-se uma superfície plana, e que seja normal ao eixo do cilindro com erro inferior ou no máximo igual a 0,5°. Este capeamento deve ter a menor espessura possível, devendo ser menor que 5 mm.

**5.6.2** Os corpos de prova podem ser capeados com uma fina camada de pasta de cimento, consistente, depois que o concreto tiver cessado de recalcar no interior do molde, o que geralmente ocorre 2 h a 6 h após a moldagem. A pasta de cimento deve ser preparada 2 h a 4 h antes do seu emprego. O capeamento é feito com o auxílio de uma placa de vidro plana, com pelo menos 6 mm de espessura ou com uma placa metálica plana e lisa, com pelo menos 12 mm de espessura. A face de trabalho de

ambas não deve apresentar afastamento de um plano maior que 0,05 mm em 150 mm. A dimensão dessas placas deve ser pelo menos 25 mm superior à dimensão transversal do molde. A pasta de cimento colocada sobre o topo do corpo de prova deve ser trabalhada com a placa até que a face inferior desta fique em contato firme com a borda superior do molde em todos os pontos. A aderência da pasta à placa de capeamento deve ser evitada lubrificando-se esta com uma fina película de óleo mineral. A placa deve permanecer sobre o topo do corpo de prova até a desmoldagem.

**5.6.3** Os corpos de prova que não satisfazem às condições impostas no item 5.6.1 e que não foram capeados com pasta de cimento sobre o concreto fresco como foi descrito no item 5.6.2, devem ser capeados ou polidos antes do ensaio, podendo ser utilizadas para este capeamento, misturas de enxofre e materiais granulados ou quaisquer outros materiais que desenvolvam, na ocasião do ensaio, resistência à compressão superior à resistência prevista para o corpo de prova a ser ensaiado.

### 5.7 Cura

**5.7.1** Após a moldagem dos corpos de prova, os moldes devem ser colocados sobre uma superfície horizontal, não sujeita a vibrações ou choques, recobertos com panos molhados, devendo os corpos de prova permanecer nos moldes durante pelo menos 12 h, em condições que não permitam a perda de água. Após a desmoldagem, os corpos de prova destinados a um laboratório devem ser transportados em caixas rígidas, contendo serragem molhada ou areia molhada.

No laboratório devem ser conservados em água de cal ou câmara úmida com neblina artificial que apresente no mínimo 95% de umidade relativa e que atinja toda a sua superfície livre, ou em areia completamente saturada. Em qualquer dos casos a temperatura deve ser de  $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$  até o momento do ensaio. Os corpos de prova não devem ser conservados em água corrente.

**5.7.2** Em casos especiais, e somente após o decurso de sete dias de cura nas condições impostas no item 5.7.1, pode esta ser completada ao ar com pelo menos 60% de umidade relativa.

**NOTA 4:** Os corpos de prova que se destinam ao controle nas condições de cura análogas às da estrutura, devem ser conservados na obra tão próximo quanto possível do local de onde foi retirada a amostra e submetidos a tratamento tanto quanto possível semelhante ao dado à parte da estrutura que representam.

## 6. CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS (Destinados ao ensaio de flexão)

**6.1 Dimensões** — A seção transversal dos corpos de prova prismáticos deve ser quadrada, de 150 mm de lado, para concretos com agregados de diâmetro máximo menor ou igual a 50 mm. O comprimento do prisma deve ser no mínimo igual a três vezes o lado da seção transversal, mais 50 mm.

**NOTA 5:** O corpo de prova de 150 mm de lado pode ser usado no caso em que o diâmetro máximo do agregado é superior a 50 mm, desde que a amostra de concreto fresco seja passada previamente na peneira ABNT 38 mm.

**NOTA 6:** Para correlacionar os resultados dos corpos de prova moldados com o concreto penetrado e os corpos de prova moldados com o concreto integral correspondente, pode ser usado o corpo de prova que apresenta lado da seção quadrada igual a pelo menos três vezes o diâmetro máximo do agregado.

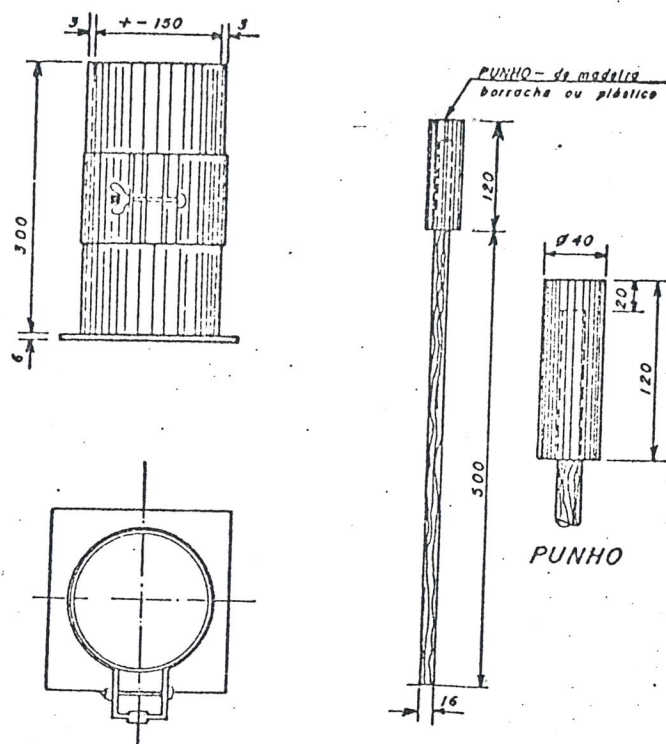


FIG. 1 — Moldes Cilíndricos e Haste de Socoamento (Cotas em milímetros)

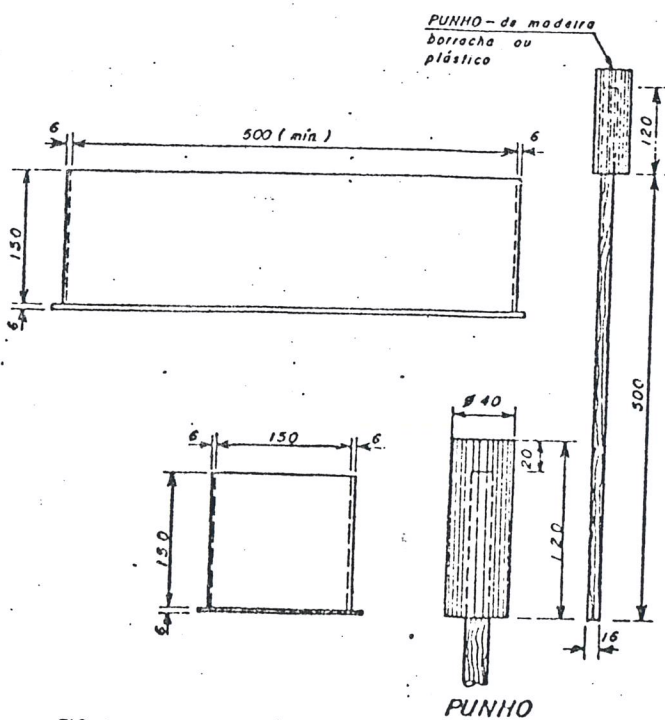


FIG. 2 — Moldes Prismáticos e Haste de Socoamento (Cotas em milímetros)

**6.2 Moldagem** Os moldes devem ser colocados com a base (retangular) na posição horizontal. O modo de colocar o concreto nos moldes é definido no processo de adensamento a ser adotado. Durante a moldagem dos corpos de prova devem ser retirados grãos de agregados de tamanho superior ao normal (tamanho que não é normalmente encontrado na granulometria média do agregado), ocasionalmente encontrados no concreto.

Após o adensamento do concreto, qualquer que seja o processo adotado, a superfície superior dos corpos de prova deve ser respaldada com o auxílio de uma régua e, em seguida, coberta com uma placa de vidro ou de metal que deve permanecer até o momento da desmoldagem.

**6.3 Adensamento manual** — O concreto deve ser colocado no molde de 150 mm de lado, em duas camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada cerca de oito golpes de haste de socamento para cada 100 cm<sup>2</sup> de área, uniformemente distribuídos em toda a área do molde.

No adensamento de cada camada, a haste de socamento não deve penetrar na camada já adensada. Antes do adensamento de cada camada, a superfície do concreto deve ser nivelada com o auxílio de uma colher de pedreiro. A última camada deve sobrepassar ligeiramente o topo do molde para facilitar o respaldo.

Se a haste de socamento criar vazios na massa do concreto, deve-se bater levemente na face externa do molde, até o fechamento dos vazios.

**6.4 Adensamento manual enérgico** — O concreto deve ser colocado no molde de 150 mm de lado em três camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada cerca de 16 golpes da haste de socamento para cada 100 cm<sup>2</sup> de área, uniformemente distribuídos em toda a área do molde.

No adensamento de cada camada, a haste de socamento não deve penetrar na camada já adensada. Antes do adensamento de cada camada, a superfície do concreto deve ser nivelada com o auxílio de uma colher de pedreiro. A última camada deve sobrepassar ligeiramente o topo do molde para facilitar o respaldo. Após o adensamento de cada camada deve-se bater com a haste na face externa do molde até refluir a nata.

**6.5 Adensamento mecânico** — O concreto deve ser colocado no molde de 150 mm de lado até atingir os bordos da gola metálica colocada sobre o molde e então vibrado. A vibração deve ser aplicada apenas o tempo necessário para permitir o adensamento conveniente do concreto no molde. Este tempo é considerado suficiente no instante em que o concreto apresenta superfície relativamente plana e brilhante.

A frequência e amplitude da vibração devem ser tanto quanto possível idênticas às do equipamento utilizado no adensamento no concreto na obra. No caso de emprego de vibrador de imersão, o diâmetro da agulha deve ser menor ou igual a 1/3 da largura do corpo de prova.

**NOTA 7** Quando for usado o corpo de prova de lado superior a 150 mm, o processo de adensamento deverá assegurar a obtenção de corpo de prova homogêneo e compacto.

**6.6 Cura** — Após a moldagem dos corpos de prova, os moldes devem ser colocados sobre uma superfície horizontal, não sujeita a vibrações ou choques, recobertos com panos molhados, devendo os corpos de prova permanecer nos moldes de 20 h a 48 h após sua moldagem em condições que não permitam a perda d'água. Após a desmoldagem devem ser conservados em água de cal à temperatura de  $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$  durante sete dias. Os corpos de prova não devem ser conservados em água corrente.

O restante da cura será feita em câmara úmida com neblina artificial que apresente no mínimo 95% de umidade relativa e que atinja toda a sua superfície livre, a uma temperatura de  $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Após retirados da câmara úmida até o instante do ensaio, os corpos de prova devem ser recobertos com panos molhados.

#### APENDICE

Normas a consultar:

- EB-4 — Agregados para concreto.
- EB-22 — Peneiras para ensaio.
- MB-3 — Ensaio à compressão de corpos de prova de concreto.
- MB-256 — Consistência do concreto pelo abatimento de tronco de cone.
- MB-833 — Amostragem do concreto fresco produzido por betoneiras estacionárias.



**ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILINDRICOS DE CONCRETO**

**MB-3**

Projeto de revisão da norma aprovada em 1937

**1. OBJETIVO**

1.1 Este Método fixa o modo pelo qual devem ser ensaiados à compressão corpos de prova cilíndricos de concreto MB-2

**2. APARELHAGEM**

2.1 A máquina de ensaio pode ser de qualquer tipo, de capacidade suficiente e que possibilite a aplicação de carga continuamente e sem choques, de acordo com as prescrições do item 4. A porcentagem de erro para cargas de 10% até 100% da carga máxima, dentro das escalas em que a máquina pode ser utilizada, não deve ser maior do que 1%. A máquina deve ser aferida pelo menos uma vez por ano.

2.1.1 "Erro" é o valor obtido subtraindo-se, do valor indicado pela máquina, o valor indicado pelo aparelho de calibração. "Porcentagem de erro" é a relação, expressa em porcentagem (%), entre o erro e o valor correto da carga medida.

2.1.2 Nos laboratórios instalados em obra a cujo controle se destinem especificamente, será permitida a utilização de máquinas de ensaio que apresentem porcentagem de erro até 3%.

2.2 A máquina de ensaio deve ser equipada com dois pratos de aço com espessura suficiente para evitar deformações durante o ensaio. Um dos pratos deve assentar-se em rótula esférica (no caso das prensas verticais, o prato superior) e o outro deve ser um bloco rígido e plano. A face de um dos pratos deve apresentar referências para facilitar a centralização dos corpos de prova. Quando novas, as superfícies desses pratos não devem apresentar afastamento em relação a uma superfície plana, de contato, tomada como referência, de mais de 0,02 mm, em distância de 15 cm. Os pratos devem ser conservados de modo que esse afastamento não venha a ultrapassar limite de 0,05 mm. O prato de carga assente em rótula esférica deve poder rodar livremente e girar de pequenos ângulos, pelo menos de cinco graus (5°) em todas as direções.

**3. CORPOS DE PROVA**

3.1 Os corpos de prova que receberem cura úmida ou cura saturada devem ser ensaiados ainda úmidos. (item 3.2).

O ensaio nesses casos, deve ser realizado, tanto quanto possível, imediatamente após a remoção do corpo de prova do seu local de cura. Se necessário, os corpos de prova devem ser conservados sob panos molhados ou convenientemente recobertos, a fim de evitar evaporação. As faces de aplicação de carga dos corpos de prova deverão ser capeadas, de maneira que se tornem planas e paralelas. As dimensões do corpo de prova devem ser determinadas com precisão de  $\pm 1$  mm, pela média de duas leituras para cada medida.

3.2 A cura é dita úmida quando a superfície do corpo de prova é mantida permanentemente úmida. Cura saturada, quando o corpo de prova é mantido permanentemente imerso em água saturada de cal.

3.3 A cura dos corpos de prova poderá também ser feita em condições especiais, de acordo com as características da obra.

**4. ENSAIO**

4.1 As faces dos pratos de carga e do corpo de prova devem ser limpos antes do corpo de prova ser colocado em posição de ensaio. O corpo de prova deve ser cuidadosamente centralizado no prato que contém referência. Ao colocar o prato rotulado em contato com o corpo de prova, deve-se ajustar a rótula suavemente de modo que se obtenha ajuste uniforme.

4.2 A carga deve ser aplicada continuamente, com uma velocidade de 3 kgf/cm<sup>2</sup> a 8 kgf/cm<sup>2</sup> por segundo. Nenhum reajuste deve ser feito nos controles da máquina de ensaio, quando o corpo de prova estiver se deformando rapidamente ao se aproximar de sua ruptura. O carregamento deve cessar tão somente quando o recuo do ponteiro de carga for em torno de dez por cento (10%) do valor da carga máxima alcançada, que será anotada como carga de ruptura do corpo de prova.

**5. RESULTADOS**

5.1 A tensão de ruptura à compressão é obtida dividindo a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo de prova determinada de acordo com o item 3.1, devendo o resultado ser expresso com a aproximação de 1 kgf/cm<sup>2</sup>.

5.2 O certificado de resultados do ensaio deverá conter as seguintes informações:

1. Procedência do corpo de prova.
2. Número de identificação do corpo de prova no laboratório.
3. Número de identificação do corpo de prova na obra.
4. Data da moldagem.
5. Idade do corpo de prova.
6. Data do ensaio.
7. Área da seção transversal em centímetros quadrados.
8. Tensão de ruptura à compressão expressa com a aproximação de 1 kgf/cm<sup>2</sup>.
9. Informações adicionais (marca do cimento, origem dos agregados, defeitos eventuais do corpo de prova, etc.).

Normas a serem consultadas:

- MB-2 — Confeção e cura dos corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto na obra.

Data quis :
Indo
Tempo :
Tempo :
Data lomba. 16/10/96

11070.