

# **AVALIAÇÃO DO EMPREGO DO SOLO CONTAMINADO POR DERIVADOS DE PETRÓLEO PARA APLICAÇÃO EM BASES E SUB-BASES DE PAVIMENTOS**

**Francisco das Chagas Isael Teixeira Cavalcante** <sup>(1)</sup>

**Suely Helena de Araújo Barroso** <sup>(2)</sup>

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes - PETRAN  
Universidade Federal do Ceará – UFC

## **RESUMO**

Durante o processo de refino e transporte dos produtos petrolíferos pode ocorrer derramamento de derivados que contaminam o solo, gerando o solo contaminado por derivados de petróleo (SCDP) que acaba sendo estocado, necessitando de alternativas para uma disposição final correta. Tendo em vista esta problemática, resolveu-se estudar a incorporação do SCDP nas camadas granulares dos pavimentos. O programa experimental desenvolvido para esta finalidade consistiu na execução dos ensaios de caracterização, compactação, CBR e resistência à compressão simples, bem como na realização dos ensaios de solubilização e lixiviação. Os materiais utilizados foram o SCDP, um solo proveniente de Aquiraz/CE e cimento (para possibilitar o encapsulamento do contaminante). Foram compostas cinco misturas desses materiais, fixando-se o teor de cimento em 5% e o teor do solo contaminado em 5% e 10%. Os resultados experimentais obtidos mostraram que o uso do SCDP nas camadas granulares dos pavimentos é tecnicamente viável.

## **ABSTRACT**

During the process of refining and transportation of petroleum products can occur spill of oil that contaminant the soil, rising soil contaminated by petroleum products (SCDP) which ends up being stored, requiring an alternative to correct disposal. Given this problem, decided to study the incorporation of SCDP in granular layers of pavements. The experimental program developed for this purpose was the execution of characterization tests, compaction, CBR and compressive strength, as well as testing of solubility and leaching for the contaminated soil. The materials used were the SCDP, a soil from Aquiraz/CE and cement (to enable the encapsulation of the contaminant). Five mixtures were composed of these materials, setting up the cement content of 5% and the content of the soil contaminated by 5% and 10%. The experimental results showed that the use of the SCDP in granular layers of pavements is technically feasible.

## **1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

O crescimento das atividades industriais, no mundo e especialmente no Brasil, foi acompanhado pelo aumento dos problemas de ordem ambiental, principalmente relacionados à disposição no meio ambiente dos resíduos gerados. Ao longo do tempo, a disposição inadequada dos resíduos provocou o surgimento de áreas contaminadas e degradadas ambientalmente.

Dentre os resíduos industriais, os gerados pela indústria petroquímica merecem atenção especialmente no tocante à sua destinação final. Segundo Pires *et al.* (2003), os resíduos provenientes dessa indústria, constituem-se em um dos grandes desafios das pesquisas em planejamento e operação do sistema de gestão de resíduos sólidos. Tal preocupação está relacionada com o fato de que a maioria dos rejeitos da indústria petroquímica se trata de produtos químicos nocivos à saúde e ao meio ambiente.

De acordo com Casagrande *et al.* (2006), em praticamente todas as operações, desde a perfuração até a distribuição dos derivados, passando pelas etapas de produção, armazenamento, transporte e refino, a indústria petrolífera gera resíduos oleosos de diversos tipos. Ainda, segundo esses autores, as refinarias respondem pela maior parte dos resíduos gerados na indústria do petróleo, dos quais se destacam os produtos acumulados no fundo dos tanques de óleo cru, lodos oleosos, lodos das torres de resfriamento, catalisadores gastos,

resíduos das torres de troca de calor, finos de coque e águas residuárias. Juntam-se a esses, ainda, os solos contaminados por derramamento de material oleoso ou derivados.

Alguns autores relatam a importância da reincorporação dos rejeitos gerados ao meio ambiente. Fonseca (2003) destaca que é imprescindível reutilizar o resíduo e não simplesmente estocá-lo de forma temporária por razões econômicas, ambientais e por disponibilidade de área. Há necessidade do desenvolvimento de técnicas que permitam a utilização desse tipo de material sem que ocorram impactos negativos ao meio ambiente. Assim, a disposição do resíduo oleoso deve ser feita obedecendo aos limites estabelecidos pelos órgãos reguladores.

O estado do Ceará possui uma única refinaria de petróleo e durante o processo de refino e transporte desse material ocorre geração de vários resíduos, dentre eles o Solo Contaminado por Derivados de Petróleo (SCDP) que é proveniente das dutovias da empresa. Acredita-se que os resíduos petrolíferos possam ser utilizados na construção de rodovias, tanto no revestimento como nas camadas granulares, desde que sejam desenvolvidas pesquisas que comprovem a viabilidade técnica, ambiental e econômica, se possível, quando do emprego do mesmo na área de pavimentação.

Atualmente, o SCDP é estocado e o destino final tem sido a indústria cimenteira, sendo este utilizado no processo de fabricação de cimento. No entanto, esse destino nem sempre é desejável pela empresa geradora do resíduo devido aos altos custos com transporte ou pela não disposição de fábricas de cimento em regiões mais próximas. Conforme informações levantadas pelos autores do presente trabalho, as cimenteiras têm cobrado, no ano de 2011, em torno de R\$380,00 por tonelada de resíduo a ser incinerado, sem contabilizar nesse valor os custos com transporte do material.

Por se tratar de um resíduo perigoso, a destinação incorreta do SCDP pode gerar graves problemas ao meio ambiente. Diante deste contexto, o desenvolvimento de técnicas viáveis, visando à destinação correta desse tipo de material, se faz necessária e a pavimentação, por movimentar grandes volumes de materiais, se mostra como uma alternativa para a reincorporação desse resíduo na natureza.

## **2. OBJETIVO**

O presente trabalho tem o objetivo de investigar, pela primeira vez, o emprego do solo contaminado por derivados de petróleo (SCDP) na construção de camadas granulares dos pavimentos do estado do Ceará, utilizando para esse fim a técnica de encapsulamento.

## **3. BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1. Resíduos Petrolíferos**

A constante busca pela ampliação da indústria petroquímica, no tocante ao aumento da produção do petróleo, depara-se com alguns problemas, principalmente os de âmbito ambiental. Em decorrência do modo intenso de como a sua exploração tem se apresentado, o setor petrolífero tem causado danos ao meio ambiente, muitas vezes irreparáveis. Tais danos causam o surgimento, por todo o país, de locais que servem como depósito de resíduos industriais.

Os transtornos causados pelo surgimento de áreas contaminadas por rejeitos industriais vão desde a desocupação das regiões próximas a essas áreas, por conta da presença dos contaminantes, perda do valor imobiliário desses locais e vizinhança, até danos a saúde e ao ecossistema (ROJAS *et al.*, 2006).

A geração dos resíduos líquidos e sólidos ocorre em todas as etapas do processo de obtenção do petróleo, desde a exploração, passando pelo refino, armazenamento e transporte. Vários são os resíduos gerados, dentre eles podem-se citar: a borra oleosa, catalisadores gastos, solos contaminados por petróleo, etc. A Tabela 1 apresenta alguns resíduos sólidos e líquidos gerados e as etapas nas quais são produzidos.

**Tabela 1:** Resíduos Gerados na Produção e Exploração do Petróleo (EPA, 2000)

PROCESSO	RESÍDUOS LÍQUIDOS	RESÍDUOS SÓLIDOS
Desenvolvimento de poço	Lamas provenientes de perfurações, álcalis, fluidos de estimulação ácida	Lamas de perfuração sólida, cascalhos, inibidores de corrosão, agentes floculantes, concreto
Produção	Água contendo metais pesados, sólidos dissolvidos, compostos orgânicos, sais, aditivos, lubrificantes	Areia, enxofre, catalisadores gastos, filtros gastos, resíduos sanitários, lodo de separador
Manutenção	Águas residuárias com presença de solventes usados para limpeza, fluido de completação	Cimento, solos contaminados, parafinas, sucatas metálicas
Abandono	Salmoura e óleos	Solos contaminados, metais absorventes

Segundo Bicalho *et al.* (2009), o uso de solos estabilizados com areia oleosa na construção rodoviária ou para outras aplicações de engenharia pode ser uma opção atrativa, em termos técnico, econômico e ambiental. Entretanto, para a utilização desse material, existe a necessidade de uma ampla avaliação ambiental, incluindo a contaminação do solo e da água e os efeitos desse resíduo no homem e das propriedades geotécnicas dos solos estabilizados com óleo.

### 3.2. Encapsulamento (Estabilização/Solidificação)

Em decorrência do aumento da exploração e produção de derivados de petróleo, há a necessidade do desenvolvimento ou aprimoramento de técnicas que possibilitem a disposição final dos resíduos gerados nas atividades industriais desse setor. Assim, a técnica de encapsulamento ou solidificação/estabilização surge como alternativa que pode permitir a reincorporação dos rejeitos gerados na natureza, sem prejudicá-la.

O encapsulamento, segundo Passos (2001), é um estágio de pré-tratamento pelo qual os constituintes perigosos de um resíduo são transformados e mantidos em suas formas menos solúveis ou tóxicas confinados em cápsulas, partículas ou blocos. Ou seja, há uma diminuição da mobilidade do contaminante, evitando que este possa vir a causar danos à natureza, como por exemplo, contaminação dos lençóis freáticos por penetração no solo.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 1995) define solidificação como sendo uma técnica usada para encapsular os resíduos em um sólido monolítico de alta integridade estrutural. A solidificação minimiza a área superficial dos resíduos, limitando a migração do contaminante

dentro do material contaminado, formando uma espécie de cápsula estanque. Já a estabilização é definida como sendo a técnica que reduz o potencial de risco de um determinado resíduo, transformando-o em uma forma menos solúvel ou tóxica, sem obrigatoriamente, mudar as características físicas destes.

De forma simples, o processo de encapsulamento consiste em conferir aos contaminantes, através da adição de um agente cimentante (cal, cimento ou outro estabilizante), uma forma menos agressiva ao meio ambiente, por meio de reações químicas e físicas, tornando-os menos solúveis e danosos à natureza. De acordo com Cruz (2004), esses reagentes possuem componentes ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que atuam ativamente no processo reativo da solidificação/estabilização.

O emprego dessa técnica, ou seja, do processo de solubilização/estabilização tem sido adotado em vários países como forma de tratamento para resíduos perigosos. O resultado da aplicação dessa técnica é um sólido com grande durabilidade e que apresenta redução quanto ao potencial de lixiviação dos materiais perigosos sobre diversas formas de disposição. Esse processo tem como vantagem a possibilidade de ser usado para vários tipos de resíduos danosos (POON *et al.*, 2003).

Assim, a principal vantagem do encapsulamento de contaminantes é o fato de transformar um solo contaminado em uma estrutura mais resistente e menos permeável, sendo tais propriedades de grande importância para o emprego em obras rodoviárias. Outras vantagens também podem ser citadas, tais como: aplicabilidade a grande quantidade de contaminantes, permitindo-lhes uma destinação adequada; baixo custo por possuir variabilidade de agentes estabilizadores quando comparado com outras técnicas de remediação; aplicável a diferentes tipos de solo, etc.

### **3.3. Estabilização Solo-Cimento**

Por utilizar o cimento como agente estabilizante, este trabalho dará ênfase a técnica do solo-cimento. Essa técnica será investigada como forma de estabilizar solos do tipo arenoso a fim de promover o encapsulamento de contaminantes, visando proporcionar condições técnicas e ambientais para o emprego do solo contaminado na pavimentação.

A NBR 12023 define a técnica de solo-cimento como uma mistura compactada entre solo, cimento e água. Com a hidratação do cimento, a mistura será estabilizada, resultando em um material de maior resistência e menos susceptível à água (INGLES e METCALF, 1972).

É importante citar que a quantidade de cimento utilizado no processo é variável de acordo com o solo utilizado. Yoder e Witczak (1975) mencionam que o teor comumente utilizado de cimento varia entre 5% e 15% em relação à massa de solo a ser estabilizada, sendo que a quantidade de cimento tende a aumentar para solos mais plásticos. Para índices de plasticidade acima de 15%, o teor de cimento necessário pode ser de até 20% para que seja proporcionada a rigidez que se deseja alcançar.

Segundo Senço (2001), no Brasil, o teor padrão de cimento utilizado é em torno de 8%. Para Castro (2008) o teor de cimento varia de 5 a 10% do peso do solo, o suficiente para estabilizar o solo e conferir as propriedades de resistência desejadas para o composto. O autor ainda destaca que praticamente qualquer tipo de solo pode ser utilizado no processo de estabilização

com cimento, excetuando-se os solos orgânicos, sendo os mais apropriados aqueles que possuem teor de areia entre 45% e 50%.

Assim, observa-se, na literatura consultada, que para o caso da técnica do solo-cimento, diferentemente da técnica de solo melhorado com cimento, o teor de cimento utilizado pode variar entre 5% e 15%, podendo chegar a 20%, sendo que a quantidade de cimento a ser utilizada é variável conforme o tipo de solo e é mais recomendada para solos arenosos. Verifica-se que a adição de cimento ao solo proporciona, geralmente, ganhos de resistência, redução de permeabilidade, maior durabilidade, etc, podendo ser utilizado como alternativa para a reincorporação de resíduos provenientes da indústria petrolífera, como borra oleosa e solos contaminados por petróleo. O cimento age diminuindo a mobilidade do contaminante, fazendo com que este não venha a poluir o meio ambiente.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Materiais

No estado do Ceará, o processamento do petróleo é feito por uma única refinaria localizada no bairro do Mucuripe, na cidade de Fortaleza, sendo esta uma das maiores produtoras de asfalto do país e a única que produz lubrificantes naftênicos. A atual planta da refinaria possui cerca de 218 mil metros quadrados de área e sua produção gira em torno de 315 mil toneladas de asfalto/ano e 205m<sup>3</sup> de lubrificantes naftênicos por dia. Em menor escala também são produzidos óleo combustíveis para geração de energia e amaciantes para fibras (DIÁRIO DO NORDESTE, 2008).

A refinaria gera durante o processo de processamento do petróleo resíduos como: catalisadores usados, borra oleosa, solo contaminado por derivados de petróleo (SCDP), etc. Este último proveniente de vazamentos nos 3000 metros de dutovias por onde passam os produtos finais, como pode ser visto na Figura 1. As dutovias são providas de solo arenoso na parte inferior para que este possa absorver os materiais de possíveis vazamentos originando, assim, o que se chama de SCDP.



**Figura 1:** Dutovias utilizadas para transporte dos produtos derivados de petróleo

Pode-se observar, na Figura 1, uma grande variedade de dutos, dispostos um ao lado do outro, por onde passam vários produtos derivados de petróleo. Essas tubulações são pintadas de acordo com o material transportado e ainda recebem isolamento térmico quando transportam materiais em altas temperaturas.

O SCDP é retirado através de raspagens periódicas nas áreas dos dutos da refinaria e é colocado em recipientes metálicos, lacrados e armazenados numa área destinada a esse fim, nas dependências da refinaria, até que se tenha uma destinação adequada para o resíduo. A Figura 2 mostra a forma de estocagem e armazenamento na central de resíduos da empresa.



**Figura 2:** Estoque do SCDP na central de resíduos da empresa

Diante da necessidade de se destinar de forma correta esse tipo de rejeito, será estudado o emprego da técnica de encapsulamento, utilizando como agente cimentante o Cimento Portland tipo V de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfatos (CPV – ARI RS) da marca Mizu. Selecionou-se o cimento CPV por esse atingir grande resistência nos primeiros 7 dias, bem como pelo fato de outros autores também terem utilizado esse tipo de cimento em seus estudos, como Rojas *et al.* (2006), Cruz *et al.* (2005) e Cruz (2004).

O solo utilizado na presente pesquisa foi denominado de AQZ, sendo coletado na cidade de Aquiraz/CE, município pertencente à Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Esse solo serviu como base para a composição das misturas (solo + cimento e solo + cimento + SCDP) fabricadas em laboratório.

O procedimento, para elaboração das misturas, consistiu em fixar o teor de cimento e variar o teor de SCDP para analisar como a sua variação iria influenciar no comportamento mecânico das misturas. As cinco misturas compostas estão apresentadas na Tabela 2, bem como a nomenclatura adotada para cada uma delas.

**Tabela 2:** Misturas elaboradas para o estudo

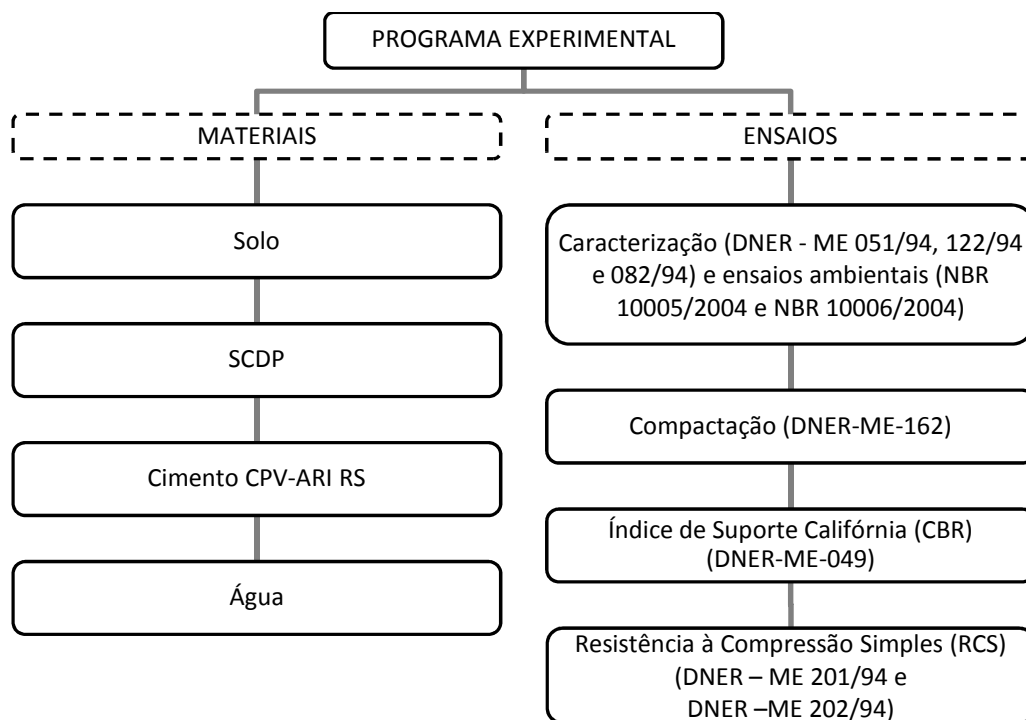
MISTURA (M)	Teor de solo AQZ	Teor de Cimento	Teor de SCDP
M1	100%	0%	0%
M2	95%	0%	5%
M3	90%	0%	10%
M4	90%	5%	5%
M5	85%	5%	10%

#### 4.2. Métodos

Após a elaboração das cinco misturas, elas foram avaliadas através da realização de alguns ensaios para determinação de suas propriedades físicas e mecânicas. Os ensaios mecânicos realizados foram o de CBR (Índice de Suporte Califórnia) e o da RCS (Resistência à Compressão Simples). A Figura 3 apresenta os materiais utilizados na elaboração das misturas e os ensaios realizados com seus respectivos métodos. É importante ressaltar que a energia de compactação adotada para a realização dos ensaios de resistência foi a

intermediária e que dois cenários foram considerados, sendo estes: sem cura e com cura de 7 dias. No caso do CBR, a cura foi realizada no cilindro, sendo este envolvido por papel filme como forma de evitar a perda de umidade da mistura.

No caso das misturas estabilizadas com cimento (M4 e M5), esclarece-se que o CBR não deve ser o parâmetro escolhido para a análise, sendo a RCS um parâmetro empírico sugerido para fins de pavimentação na literatura. Ressalte-se que o CBR, para o caso das misturas solo-cimento, foi investigado somente para se verificar o ganho de resistência e realizar comparações com as misturas estabilizadas granulometricamente (M1, M2 e M3).



**Figura 3:** Materiais utilizados na elaboração das misturas e ensaios realizados

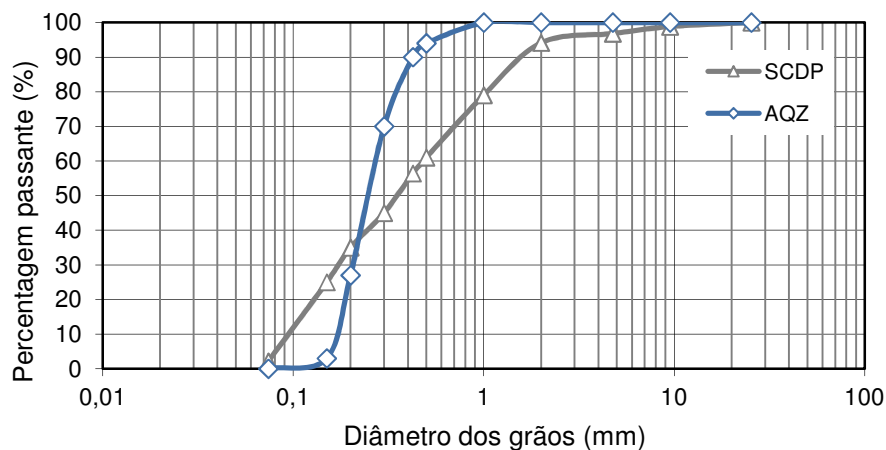
Para realização dos ensaios de caracterização no solo contaminado, foi necessária a retirada do contaminante com o uso do equipamento ROTAREX para a determinação do teor de material oleoso contido no rejeito. O teor de contaminante no SCDP encontrado foi de 3,34%.

## 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Tabela 3 mostra os resultados encontrados para os limites de liquidez e plasticidade, bem como a classificação TRB (*Transportation Research Board*) para o solo AQZ e o SCDP. Já as granulometrias do solo AQZ e do SCDP são mostradas na Figura 4. Percebe-se que os materiais investigados são do tipo arenoso, justificando-se, assim, o emprego da técnica do solo-cimento.

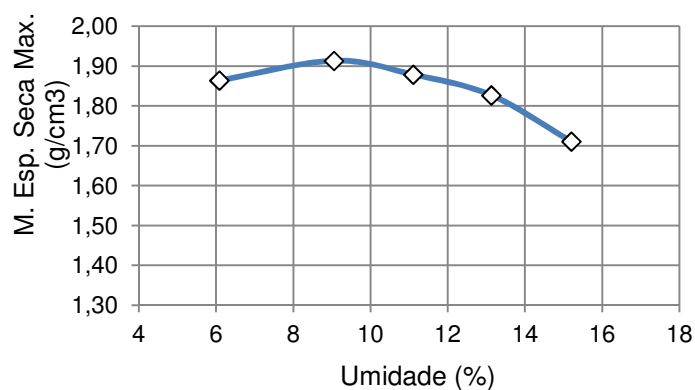
**Tabela 3:** Limites de consistência e classificação TRB para o solo AQZ e SCDP.

Limite de Liquidez	NL
Limite de Plasticidade	-
Índice de Plasticidade	NP
Classificação TRB (AQZ)	A-2-4
Classificação TRB (SCDP)	A-3



**Figura 4:** Granulometria do solo natural (AQZ) e do SCDP

A curva de compactação obtida com o emprego da energia intermediária para o solo natural de AQZ está apresentada na Figura 5. A umidade ótima encontrada foi de 9,1% e a massa específica seca foi de 1,910 g/cm<sup>3</sup>. No tocante ao CBR do material, o valor obtido foi de 7,8 %, sendo que esse baixo valor não permite o uso do solo para camadas granulares mais nobres do pavimento, pois os limites mínimos exigidos pelas especificações não foram atendidos.



**Figura 5:** Curva de compactação do solo do solo AQZ

Os resultados obtidos para os ensaios ambientais realizados para o SCDP são apresentados, resumidamente, nas Tabelas 4 e 5. Os valores apresentados nessas tabelas são apenas os limites que não foram atendidos. Pode-se verificar que alguns limites estabelecidos pelas normas ambientais, NBR 10005/2004 e NBR 10006/2004, ficaram acima do permitido.

**Tabela 4:** Resultados dos ensaios de solubilização

ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO - NBR-10.006:2.004 (ANEXO 'G')					
Parâmetros	Unid.	VMP <sup>1</sup>	Resultados	Interpretação	L.D <sup>2</sup>
INORGÂNICOS					
Alumínio (Al)	mg/L	0,2	1,0	acima do V.M.P.	0,1
Manganês (Mn)	mg/L	0,1	0,4	acima do V.M.P.	0,02
Ensaio Realizado em 21/05/10					
Parâmetros	Unid.	VMP <sup>2</sup>	Resultados	Interpretação	L.D <sup>3</sup>
Bário (Ba)	mg/L	0,7	1,3	acima do V.M.P.	0,1

(1) V.M.P. - Valor Máximo Permitido (2) L.D. - Limite de Detecção



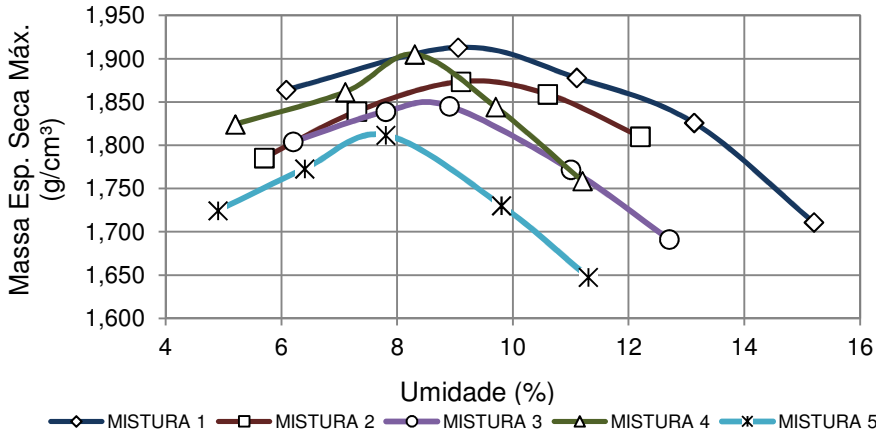
Os resultados dos ensaios de solubilização, apresentados na Tabela 4, mostraram que o Alumínio, o Manganês e o Bário apresentaram níveis de solubilidade acima do nível máximo estabelecido. Com relação aos ensaios de lixiviação, mostrados na Tabela 5, percebe-se que o Chumbo apresentou resultados acima do recomendado. Portanto, o SCDP trata-se de um resíduo perigoso, sendo necessária a adoção de medidas que permitam a disposição ou reincorporação desse resíduo na natureza, como forma de evitar possíveis impactos ao meio ambiente e danos à saúde pública.

**Tabela 5:** Resultados dos ensaios de lixiviação

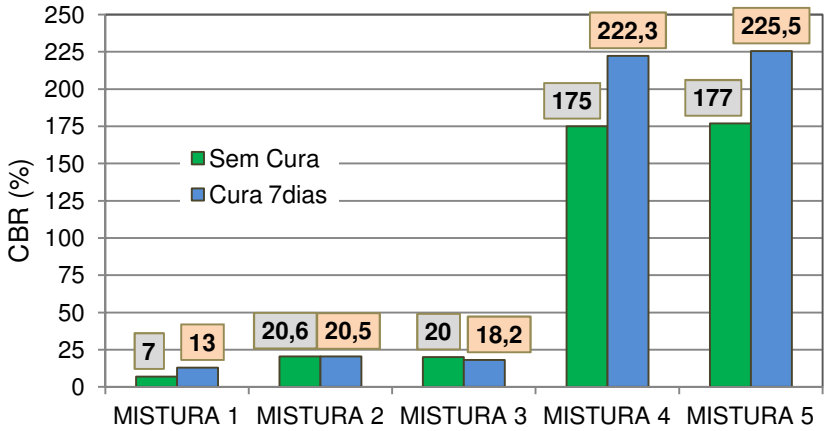
ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO - NBR-10.005:2.004 (ANEXO 'F')						
Parâmetros	Unid.	Cód. De Identif. <sup>1</sup>	VMP <sup>2</sup>	Resultados	Interpretação	L.D <sup>3</sup>
INORGÂNICOS						
Chumbo (Pb)	mg/L	D0008	1	1,538	Acima do V.M.P.	0,001

(1) Código de Identificação conforme NBR-10004 (2) V.M.P. - Valor Máximo Permitido  
(3) L.D. - Limite de Detecção

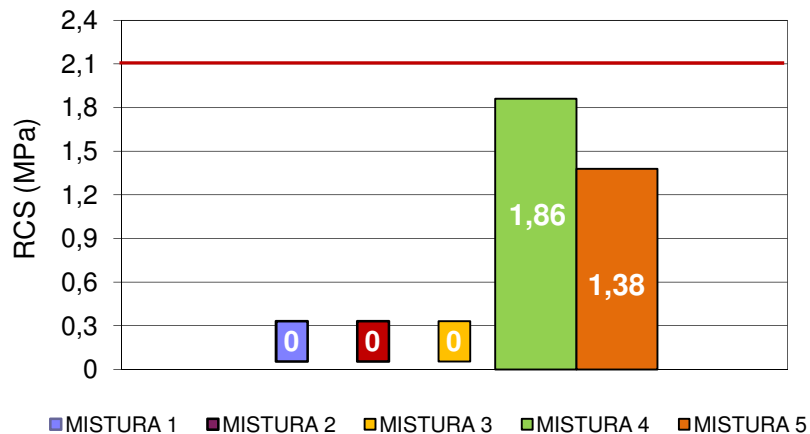
Na presente pesquisa, os ensaios de compactação, CBR e RCS foram feitos para as misturas propostas e foram comparados com os obtidos para o solo natural de AQZ. Esses resultados são apresentados nas Figuras 7, 8 e 9, respectivamente.



**Figura 7:** Resultado das curvas de compactação do solo e das misturas



**Figura 8:** Resultado dos valores de CBR do solo e das misturas



**Figura 9:** Valores de RCS obtidos para as misturas após cura de 7 dias.

Uma breve análise das curvas de compactação, apresentadas na Figura 7, mostra que a adição do SCDP ao solo promoveu uma pequena redução da massa específica e umidade ótima. Com a adição do cimento ocorreu uma redução da umidade ótima de compactação, porém a massa específica sofreu leve decréscimo quando comparada com a obtida para as misturas sem cimento.

O comparativo dos valores de CBR, apresentado na Figura 8, mostrou que a mistura do solo AQZ com o SCDP permite um incremento do valor de CBR, passando de 7% para aproximadamente 20%, no caso das misturas M2 e M3. Esses resultados mostram, à luz do método empírico de dimensionamento de pavimentos, que uma simples estabilização granulométrica originada da mistura desses materiais, já possibilitaria o uso do SCDP em camadas de sub-base de rodovias.

A Figura 8 também mostra o grande aumento do CBR com a adição de cimento, porém por se tratar de uma estabilização química, esse parâmetro não serve para avaliação. Ressalte-se que o parâmetro foi usado somente para uma avaliação qualitativa de incremento de resistência. O ideal seria que as misturas tivessem sido avaliadas pelo Módulo de Resiliência (MR). Entretanto, na época dessa observação, o equipamento encontrava-se em manutenção. O ensaio de MR tem sido muito usado para avaliar o comportamento dos solos do estado do Ceará e as pesquisas mostram que o modelo composto é o mais adequado para representar os solos locais.

Na Figura 9, pode-se verificar que os resultados da RCS só estão apresentados para o cenário com cura. Isso se deve ao fato de que em nenhuma das misturas, nem mesmo para as cimentadas, foi possível a realização do ensaio no cenário sem cura. Quando imersos, todos os Corpos de Prova (CP) se desfizeram. Já com a cura, as misturas 4 e 5, apresentaram incrementos de resistência, chegando a atingir os valores de 1,86 MPa e 1,38 MPa, respectivamente.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados dos ensaios ambientais, verificou-se que o SCDP trata-se de um resíduo perigoso, sendo necessária a adoção de medidas que permitam a sua disposição adequada ou reincorporação ambientalmente correta na natureza, como forma de evitar possíveis impactos ao meio ambiente e danos à saúde pública.

Ao fim do programa experimental apresentado, pode-se concluir, primeiramente, que o solo AQZ ou mistura 1, não pode ser empregado “*in natura*”, pois de acordo com o estabelecido pelo DNIT ele possui baixo valor de CBR. Verifica-se que uma simples estabilização granulométrica, com a adição de 5% ou 10% de SCDP, já permite tecnicamente o emprego das misturas AQZ + SCDP em camadas de sub-bases de rodovias, se utilizado o método empírico de dimensionamento do DNIT. Entretanto, reconhece-se a importância da avaliação do módulo de resiliência para se introduzir o dimensionamento à luz da mecânica dos pavimentos nos projetos das rodovias do estado do Ceará.

Quanto aos valores de resistência à compressão simples, os resultados encontrados, para as misturas estabilizadas com cimento, estão abaixo do limite mínimo de 2,1 MPa recomendado pela NBR 12253/1992. Contudo, esse limite mínimo pode ser questionado quando se trata do emprego do solo-cimento em Rodovias de Baixo Volume de Tráfego (RBVT's), pois a norma não faz nenhuma referência ao volume de tráfego. Conforme citado por Loiola e Barroso (2007), no estado do Ceará, há relatos de sucesso para o caso de misturas de solo-cal com RCS mínima de 0,7 MPa usadas em bases de RBVTs.

Por fim, acredita-se ter comprovado a viabilidade técnica para o emprego do SCDP em camadas de base e sub-base de rodovias, proporcionando assim, uma destinação mais nobre e correta para o resíduo. No entanto, é necessária a realização de ensaios ambientais nas misturas para verificar a eficácia da técnica de encapsulamento e investigar melhor se o uso do resíduo em pavimentação é ambientalmente correto.

Reconhece-se que os estudos aqui apresentados precisam ser continuados, através das seguintes investigações: (i) adoção de outros tempos de cura para melhor avaliar o ganho de resistência das misturas solo-cimento; (ii) utilização de outros tipos de cimento, como o Cimento Portland tipo II (CP II), comumente encontrado no comércio, visando baratear o emprego da técnica investigada; (iii) realização de ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração; (iv) emprego de outros estabilizantes, como por exemplo a cal; (v) avaliação ambiental não somente do SCDP, mas também das misturas e (vi) construção de trechos experimentais para avaliação ambiental do fluido percolado nas camadas granulares.

#### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de iniciação científica concedida ao primeiro autor, bem como à FINEP/CTPETRO e à Petrobras pelo apoio financeiro aportado na REDE ASFALTO N/NE, Projeto Cooperativo PC02 – Uso de Resíduos da Indústria Petrolífera ou Resíduos Industriais Regionais na Pavimentação Asfáltica.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (1992) NBR 12253: Solo-Cimento – Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento. Rio de Janeiro, RJ.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2004). NBR 10005 - Lixiviação de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, RJ.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2004). NBR 10006 - Solubilização de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, RJ.
- Bicalho, V. K.; C. O. L. Raposo e Silva, R. A. (2009) Avaliação Técnica da Aplicação da areia Oleosa em Estradas Vicinais. *Anais do XXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Vitória/ES.
- Casagrande, M. D. T.; Nascimento, D. R.; Lima, C. S; Soares, J. B. (2006) Estudo da Aplicabilidade de Borra Asfáltica como Material para Pavimentos de Baixo Volume de Tráfego. *Anais do XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Brasília, DF.

- Castro, S. F. (2008) Incorporação de Resíduos de Caulim em Solo-Cimento para Construções Cíveis. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.
- Cruz, R. C. (2004) Condutividade Hidráulica em Solos Contaminados Encapsulados. Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, RS.
- Cruz, R. C.; Heineck, K. S.; Consoli, N. S. (2005) Adição de Cal de Carbureto em um Solo Contaminado Encapsulado com Cimento Portland. Anais do III Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, GEORS. Porto Alegre, RS.
- Diário do Nordeste, (2008) Lubnor Petrobras: Decisiva para o crescimento do CE. Disponível em: <http://diariodonordeste.globo.com/materia.asp?codigo=523127>. Acessado em: 13 de junho de 2010.
- DNIT (1994) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNER-ME-051 - Solos – Análise Granulométrica.
- DNIT (1994) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, DNER-ME-162 - Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas”.
- DNIT (1994) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, DNER-ME-049 “Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia para não amostras trabalhadas.
- DNIT (1994) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNER-ME-122 - Solos – Determinação do limite de liquidez.
- DNIT (1994) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNER-ME-082 - Solos – Determinação do limite de plasticidade.
- EPA (2000) Environmental Protection Agency. Profile of the oil and gas extraction industry. Notebook project oil and gas extraction, Sector Notebook Project, EPA/310-R-99-006. Outubro.
- Fonseca, M.H.G.P. (2003) Estudo do Resíduo Oleoso das Atividades de Exploração e Produção de Petróleo na Manutenção de Estradas de Terra – Enfoque Ambiental. Dissertação de Mestrado, UFES, Vitória, ES.
- Ingles, O.G; Metcalf, J.B. (1972) Soil Stabilization Principles and Practice. Butterworths, Sydney, Australia, 374p.
- Loiola, P. R. R; Barroso, S. H. A. (2007) Aplicação da Técnica de Solo Cal na Construção da Rodovia do Melão no Estado do Ceará. In: 38ª RAPv/12ª ENACOR, 2007, Manaus. Anais da 38ª RAPv/12ª ENACOR.
- Passos, J. A. L. (2001) Cetrel Encapsula Resíduos com Argila Modificada. Revista Química e Derivados. São Paulo. Ed. 391. Março de 2001.
- Pires, J. C. A.; Ferreira, J. A. E; Ritter, J.; Campos, C; Mannarino, C. F. (2003) Projeto Experimental de Tratamento de Chorume Produzido no Aterro Metropolitano de Gramacho através de Wetland. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Joinville, Santa Catarina.
- Poon, C.S.; Chen, Z.Q; Wai, O.W.H. (2001) The Effect of Flow-through Leaching on the Diffusivity of Heavy Metals in Stabilized/Solidified Wastes. Elsevier, Journal of Hazardous Materials, Amsterdam, v.B81, p.179-192.
- Rojas, J. W. J. (2007) Estudo de Remediação de Solo Contaminado por Borra Oleosa Ácida Utilizando a Técnica de Encapsulamento. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- Ruver, C. A.; Cruz, R. C.; Knop, A.; Consoli, N. C.; Heineck, K. S. (2003) Uso do Equipamento de Lixiviação em Coluna para Análise da Eficiência do Método de Solidificação e Estabilização de Solos Contaminados. In: XVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia (CRICTE2003). Anais do XVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia. Itajaí/SC.
- Senço, W. (2001) *Manual de Técnicas de Pavimentação*. 1ª Edição, Vol. II, Pini, São Paulo, SP.
- Yoder, E. e M. Witczak (1975) *Principles of Pavement Design*. 2ª Edição: John Willey & Sons, New York.
- USACE (1995) *U.S Army Corps of Engineers*. Tractability Studies for Solidification Stabilization of Contaminated Material. *Technical Letter N° 1110-1-158*. Washington.

<sup>(1)</sup> Eng. Civil, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Eng. de Transportes. E-mail: isaelsjj@hotmail.com

<sup>(2)</sup> Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. E-mail: suelly@det.ufc.br