



PIBIC/CNPq/UFPG-2010

## **ESTABILIZAÇÃO/SOLIDIFICAÇÃO DE UM RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO PARA USO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

**Yvys Jardim de M. Silva<sup>1</sup>, Cláudio Batista dos Santos<sup>2</sup>, Adriano Elísio de F. L. Lucena<sup>3\*</sup>**

### **RESUMO**

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma alternativa de reaproveitamento dos resíduos da indústria petrolífera, através da estabilização/solidificação de solos juntamente com o resíduo oleoso para aplicação em camadas de base e/ou sub-base de pavimentos, utilizando como agentes estabilizantes a cal e o cimento. O procedimento experimental foi dividido em duas partes: caracterização física e química dos materiais utilizados na pesquisa e caracterização mecânica das misturas solo-resíduo-cal e solo-resíduo-cimento. Após experimento piloto, adotou-se um percentual de incorporação de 17,5% de resíduo oleoso nas misturas e a cal e o cimento foram adicionados nos teores de 4,0%, 5,5%, 7,0%, 8,5% e 10%. A adição de cal e cimento nas misturas ocasionou um aumento significativo nos valores de CBR comparados aos valores encontrados para o solo em seu estado natural. Os valores obtidos no ensaio de expansão ficaram dentro dos limites pré-estabelecidos pelo DNIT para as misturas com adição de cal e fora dos limites para as misturas com adição de cimento. Todos os valores de CBR encontrados para os dois tipos de misturas estudadas estavam dentro dos padrões do DNIT para uso em sub-base de pavimentos rodoviários. Quanto à caracterização ambiental, a mistura ideal solo-resíduo-cal foi classificada como não perigosa e não inerte.

**Palavras-chave:** Resíduo oleoso, estabilização/solidificação, pavimentos rodoviários.

<sup>1</sup> Aluno do Curso de Engenharia Civil, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: yvys\_jardim@hotmail.com

<sup>2</sup> Aluno do Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: claudiobatista\_esp@hotmail.com

<sup>3</sup> Engenharia Civil, Professor Doutor, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: lucenafb@uol.com.br.

# USE OF RESIDUE THE PETROLEUM INDUSTRY FOR IMPLEMENTATION IN STABILIZED LAYERS OF BASE/SUB-BASES OF ROAD PAVEMENTS

## ABSTRACT

This study to present an alternative reuse of the residue oil industry by stabilizing / solidification of soils along with the oily residue for use in roads, using as a stabilizing agent lime and cement. The experimental procedure was divided into two parts: physical and chemical characterization of materials used in research and mechanical characterization of the soil-residue-lime and soil-residue-cement mixture. After an initial experiment, we adopted a percentage of incorporation of 17.5% of oily residue in the mixture and lime and cement were added in concentrations of 4.0%, 5.5%, 7.0%, 8.5% and 10%. The addition of lime and cement in the mixture caused a significant increase in CBR values when compared to the values found for the soil in its natural state. The values obtained in the test were to expand within the preset limits for DNIT for mixtures with the addition of lime and out of range for the mixtures with addition of cement. All CBR values found for the two types of mixtures were studied within the standards of DNIT for use in sub-base of road pavements. As for environmental characterization, the ideal mixture soil-lime-waste was not classified as dangerous and not inert.

**Keywords:** Oily Residue, Stabilization / solidification, Road pavements

## INTRODUÇÃO

Atualmente existe uma grande preocupação mundial com o meio ambiente e os impactos causados pelas atividades do homem, principalmente as que se referem a processos industriais que geram uma grande quantidade de resíduos, que em sua maioria não possuem um destino final ambientalmente adequado. Dessa forma, tem-se buscado avanços em técnicas de reaproveitamento e/ou reciclagem desses resíduos como forma de minimizar os impactos ambientais gerados pelos mesmos. O estudo e aperfeiçoamento destas técnicas podem resultar no desenvolvimento de novos produtos.

No Brasil a disposição de resíduos sólidos industriais no solo foi praticada de forma descontrolada e sem nenhuma restrição durante muitos anos, devido à falta de uma política ambiental efetiva (OLIVEIRA, 2003). As atividades de Exploração e Produção (E & P) de petróleo geram um resíduo oleoso que é obtido de diversos setores da cadeia produtiva de petróleo como: limpeza de filtros, derrames de óleo, fundo de tanques, limpezas em geral, transportes, etc. A disposição final desse resíduo sobre o ambiente vem causando grande preocupação apesar de a indústria petrolífera ter procurado adotar diretrizes que melhorem o desempenho das suas atividades. No entanto, ainda não encontrou soluções viáveis referentes à disposição dos resíduos oleosos.

Segundo Cordeiro (2007), a pavimentação, pela sua extensão e grandes volumes de solo mobilizado, constitui-se uma alternativa ao reaproveitamento de resíduos, principalmente aqueles com certo potencial de estabilização. Os resíduos industriais ou subprodutos, quando disponível próximo as áreas em que são produzidos, resultam, geralmente, em soluções de baixo custo. A estabilização de solos em conjunto com o reaproveitamento de resíduos industriais tem permitido aplicações proveitosas na execução de bases e sub-bases de estradas.

Portanto, a mistura do resíduo oleoso com material argiloso para a estabilização em pavimentos rodoviários, tem-se apresentado como alternativa para a utilização dos resíduos gerados pela indústria do petróleo.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Coleta das amostras

Os materiais utilizados na pesquisa constituíram de cimento, cal, solo argiloso e resíduo oleoso de petróleo.

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP II – Z – 32 da marca Nassau, escolhido para ser utilizado como estabilizante químico.

A cal utilizada na pesquisa foi do tipo hidratada da marca Megaó, com massa específica igual a 2,30 g/cm<sup>3</sup>. Optou-se pela utilização da cal também como estabilizante químico devido aos excelentes resultados obtidos por diversos autores na estabilização de solos argilosos.

Foi utilizado um solo do tipo argiloso proveniente da cidade de Campina Grande, estado da Paraíba, distando 121 km da capital João Pessoa. As amostras de solo foram coletadas à profundidade de 1,0 m, como forma de evitar a camada superficial, geralmente com presença de matéria orgânica e alteração da quantidade de partículas finas por lixiviação. Procurou-se trabalhar com um tipo de solo que atendesse às condições para uma boa estabilização química com o uso da cal e do cimento e que fosse predominantemente argiloso.

O resíduo oleoso utilizado na pesquisa trata-se de um cascalho de perfuração oriundo das atividades de Exploração & Produção de petróleo do município de São Sebastião do Passé, unidade de Taquipe da Petrobrás no estado da Bahia, Nordeste do Brasil.

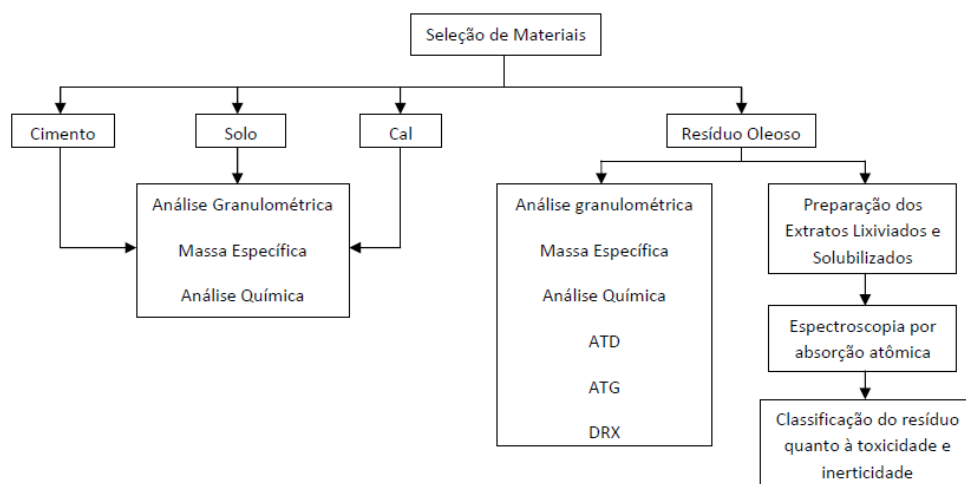
### Local de execução

Os ensaios para caracterização física e química foram realizados nos seguintes laboratórios: Laboratório de Caracterização e Laboratório de Reciclagem e Resíduos Sólidos, ambos da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais; Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES) da Unidade Acadêmica de Engenharia Química; e no Laboratório de Asfalto, do bloco CW da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil. Ambos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Todos os ensaios que compreendem a caracterização mecânica dos materiais foram conduzidos no Laboratório de Asfalto do Bloco CW da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande.

### Caracterização Física e Química

A seguir serão relatados os ensaios realizados em laboratório e que serviram para a caracterização das propriedades física e química dos materiais utilizados na pesquisa. O Fluxograma 1 apresenta os ensaios a serem realizados para a caracterização física e química dos materiais convencionais e dos resíduos oleosos.



Fluxograma 1: Caracterização Física e Química

Nesta etapa, as amostras do solo foram secas ao ar, destorroadas e acondicionadas em sacos plásticos até o momento de serem utilizadas. A preparação das amostras de solo para os ensaios de caracterização física foi realizada de acordo a NBR 6457 (ABNT, 1986).

Na Tabela 1 estão inseridas as normas adotadas para os ensaios de caracterização física das amostras de solo que foram realizadas.

Tabela 1: Normas utilizadas para caracterização física das amostras de solo

Ensaio	Método
Análise granulométrica por peneiramento	ANBT-NBR 7181/84
Determinação da massa específica dos sólidos do solo	ANBT-NBR 6508/84

O resíduo oleoso utilizado foi acondicionado em tambor apropriado até o momento de sua utilização. Na Tabela 2 estão inseridas as normas adotadas para os ensaios de caracterização física das amostras do resíduo oleoso que foram realizadas.

Tabela 2: Normas utilizadas para caracterização física das amostras de resíduo oleoso

Ensaio	Método
Determinação da massa específica dos sólidos do solo	ANBT-NBR 6508/84
Misturas betuminosas – porcentagem de betume	DNER-ME 053/94

A massa específica da cal e do cimento foram determinadas pela norma NBR 6474 - Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica.

### **Análise Granulométrica**

A distribuição dos tamanhos de grãos do solo, cal, cimento e resíduo oleoso foram determinados a partir da realização do ensaio de análise granulométrica por difração de laser, através do equipamento CILAS 1064, em função da confiabilidade de resultados que esse método proporciona. A análise granulométrica por difração de laser utiliza o método de dispersão de partículas em fase líquida associado com um processo de medida óptica através de difração de laser. Neste método, é combinada a relação proporcional entre a difração do laser e a concentração e tamanho de partículas.

### **Determinação da Massa Específica**

A massa específica aparente foi determinada utilizando-se a norma NBR 6508 (ABNT, 1984).

### **Composição química por fluorescência de raios x (EDX)**

As amostras foram passadas em peneira ABNT N° 200 (abertura de 0,074mm) e submetidas à análise química por fluorescência de raios X em equipamento EDX 720 da Shimadzu. A geração de raios X é feita por meio de um tubo com alvo de Rh.

### **Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica**

As análises termogravimétrica (ATG) e termodiferencial (ATD) são úteis para indicar as faixas de temperaturas onde ocorrem as perdas de massas e as temperaturas em que ocorrem transformações endo e exotérmicas. As curvas térmicas foram obtidas através de um sistema de Análises Térmicas Modelo RB-3020 da BP Engenharia, com razão de aquecimento 12,5°C/min. A temperatura máxima para ambos os ensaios foi de 1000°C e o padrão utilizado na ATD foi óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) calcinado.

### **Difração de Raios-X**

As análises de DRX foram conduzidas em aparelho XRD 6000 da Shimadzu utilizando radiação K $\alpha$  do cobre, tensão de 40 KV, corrente de 30 mA, varredura entre 2 $\theta$  de 2 a 30° e velocidade de varredura de 2°/min.

### **Caracterização Ambiental**

Para que um resíduo seja disposto adequadamente é necessário que sua composição química seja determinada segundo os procedimentos sugeridos pela NBR 10004 (ABNT, 2004). Essa norma estabelece os critérios adotados para a classificação dos resíduos quanto aos seus riscos potenciais para o meio ambiente e à saúde pública. Portanto, com o objetivo de classificar ambientalmente os resíduos oleosos foram utilizados os seguintes procedimentos: determinação do teor de óleo e graxas, preparação dos extratos lixiviados e solubilizados, e realização da espectroscopia por absorção atômica.

### a) Determinação do teor de óleo e graxas

Foi realizada a separação das frações orgânica e inorgânica, e determinação do teor de óleo e graxas de acordo com a norma DNIT – ME 053/94 utilizando como solvente o éter de petróleo. O equipamento utilizado foi o Rotarex – I - 2009- B.

### b) Preparação dos extratos lixiviados e solubilizados

Foram preparados os extratos lixiviados e solubilizados de acordo com as normas NBR 10005 e NBR 10006 (ABNT, 2004), visando à caracterização e classificação dos resíduos segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004).

### c) espectroscopia por absorção atômica

Os constituintes químicos contidos nos extratos lixiviado e solubilizado dos resíduos oleosos, foram obtidos através do equipamento de Espectroscopia por Absorção Atômica

## Caracterização Mecânica

#### - Experimento Piloto

Com o intuito de verificar a influência do resíduo oleoso (RO) sobre o comportamento mecânico do solo, inicialmente foram feitas adições de resíduo ao solo nas proporções de 2,5%, 7,5%, 12,5%, 17,5% e 22,5% (em relação ao peso total da amostra) e também foi feita amostra testemunha sem adição de resíduo oleoso, para comparação dos resultados. Para estes teores foram realizados ensaios de compactação e em seguida, o ensaio de CBR. A partir dos resultados obtidos foi fixado o teor de resíduo oleoso de 17,5% a ser utilizado no decorrer da pesquisa para as misturas de SOLO+RO+CAL e SOLO+RO+CIMENTO.

#### - Critério de escolha dos aglomerantes

Os aglomerantes escolhidos foram a cal e o cimento, devido à eficácia de ambos na estabilização de solos argilosos. Com a adoção do percentual de 17,5% para a incorporação do resíduo oleoso na mistura, baseado em resultados obtidos no Experimento Piloto, optou-se em adicionar estes aglomerantes às misturas, nos teores de 4%, 5,5%, 7,0%, 8,5% e 10%. O critério adotado para esta incorporação foi baseado em sugestões de estudos realizados por Cordeiro (2007).

Os ensaios realizados para a caracterização mecânica das misturas serão: Ensaio de CBR e Compactação. Ver Fluxograma 2.



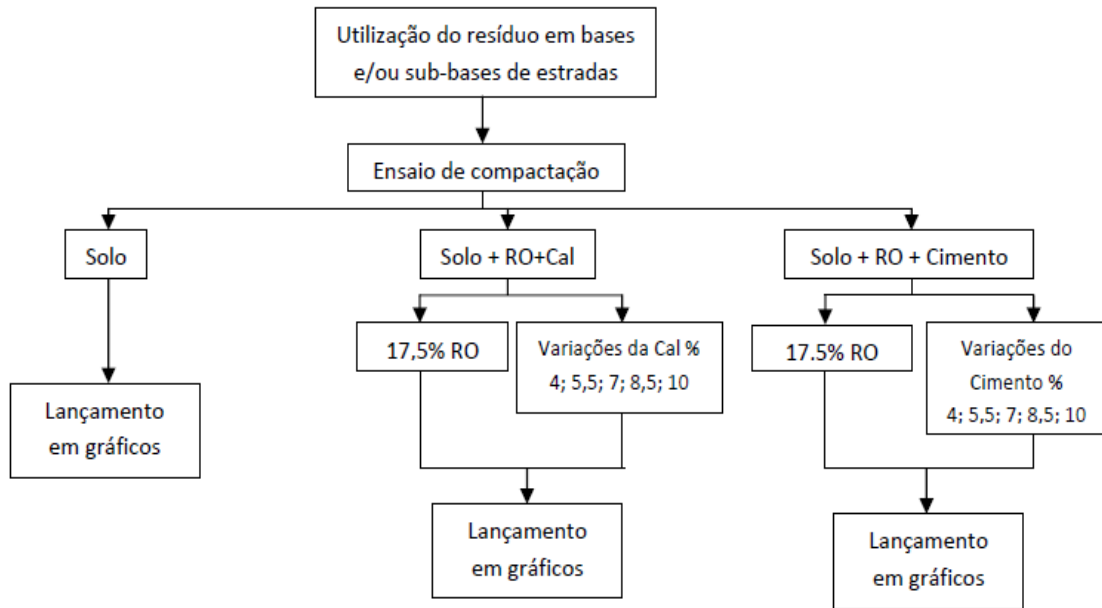
Fluxograma 2: Caracterização Mecânica

## Ensaios de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados, segundo Método de Ensaio (ME 162/94) normalizado pelo Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT).

Primeiramente o ensaio de compactação foi realizado apenas para amostras de solo puro. Em seguida, foram realizados ensaios de compactação para as misturas de SOLO+RO+CAL e SOLO+RO+CIMENTO com as porcentagens que são mostradas no Fluxograma 3. O ensaio foi realizado na Energia do Proctor Intermediário e com uma réplica para cada teor de variação dos aglomerantes.

No Fluxograma 3 está inserida a seqüência de atividades adotada para a realização dos ensaios de compactação. Após a realização dessas atividades os resultados foram processados (lançados em gráficos) para sua posterior análise.



Fluxograma 3: Seqüência adotada para realização do ensaio de compactação.

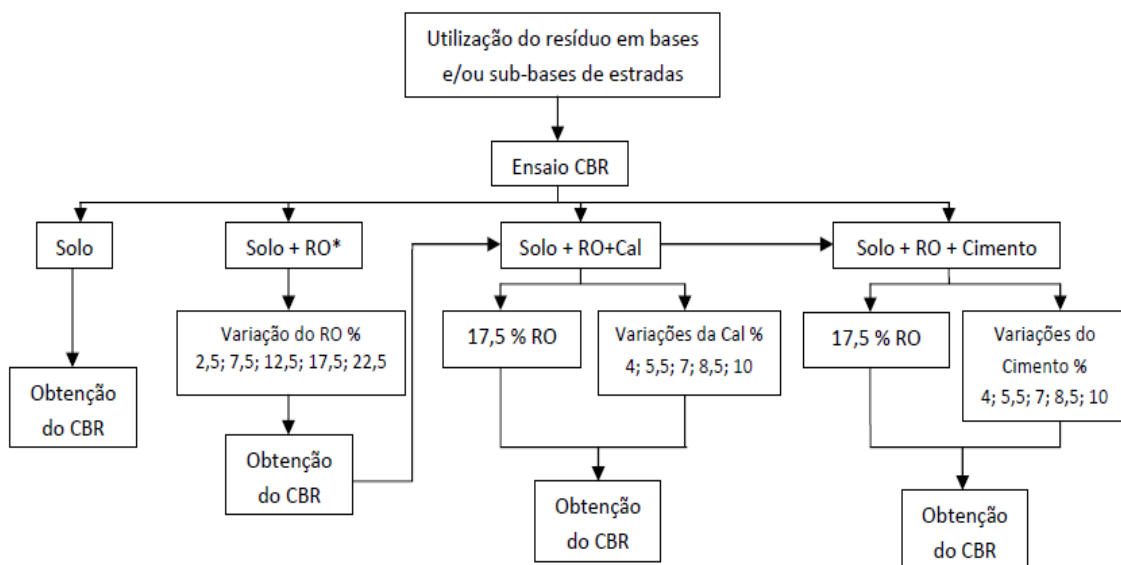
### Ensaio de CBR (Índice de Suporte Califórnia)

O CBR é um ensaio empírico utilizado para a estimativa da resistência à penetração de um pistão sobre um corpo-de-prova de uma amostra de solo confinada em um cilindro metálico, a qual se relaciona, em termos percentuais, a resistência de uma composição de brita graduada (brita padrão) expressa em porcentagem, e que correspondem às penetrações de 2,5 mm e 5,0 mm. O valor adotado para o CBR é escolhido entre a maior das duas relações (CORDEIRO, 2007).

O ensaio de CBR foi realizado segundo o Método de Ensaio (ME 049/94) normatizado pelo Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT) com uma réplica para cada teor de variação dos aglomerantes. Primeiramente o ensaio de CBR foi realizado apenas para amostras de solo. Em seguida, o ensaio foi realizado para as misturas de SOLO+RO (Ensaio Piloto), SOLO+RO+CAL e SOLO+RO+CIMENTO com as porcentagens que são mostradas no Fluxograma 4.

Os corpos-de-prova foram confeccionados e colocados em imersão, sendo acompanhados durante quatro dias para análise do comportamento do nível de expansão de todas as amostras ensaiadas.

O Fluxograma 4 mostra a seqüência adotada para a realização do ensaio CBR.



Fluxograma 4: Seqüência adotada para a realização do ensaio de CBR.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Distribuição dos tamanhos dos grãos

A distribuição dos tamanhos das partículas do cimento, da cal, do solo e do resíduo oleoso, foram obtidos através do aparelho analisador de partículas por difração a laser e estão apresentados nas figuras 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

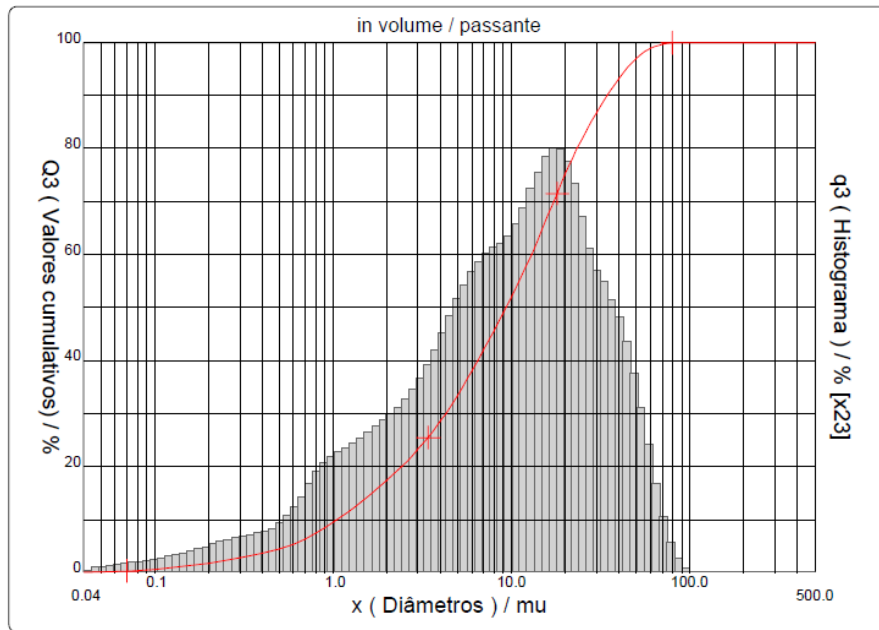


Figura 1: Gráfico da distribuição granulométrica do cimento.

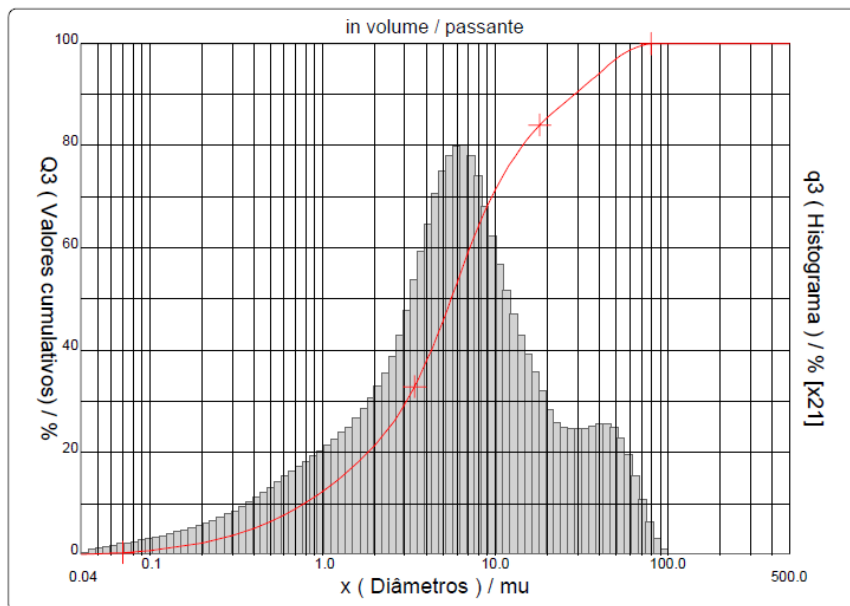


Figura 2: Gráfico da distribuição granulométrica da cal.

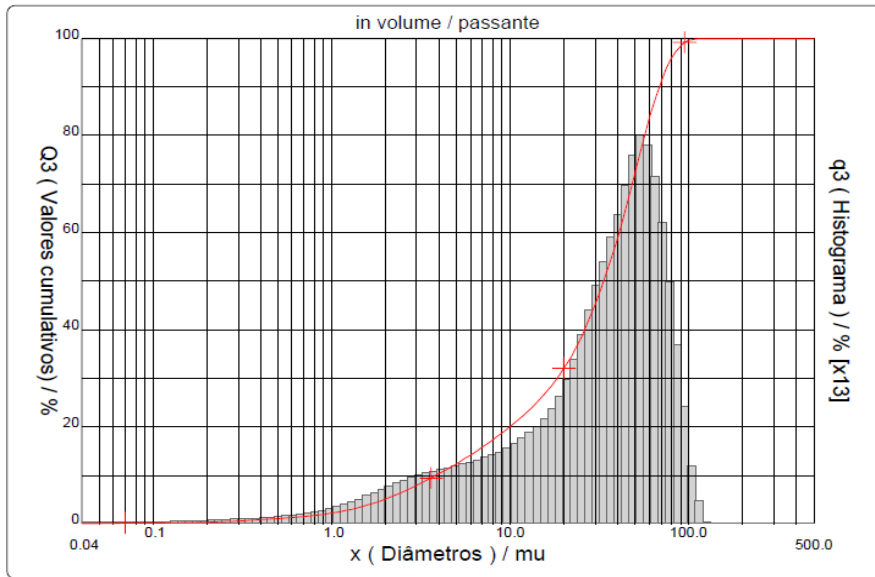


Figura 3: Distribuição dos tamanhos das partículas do solo.

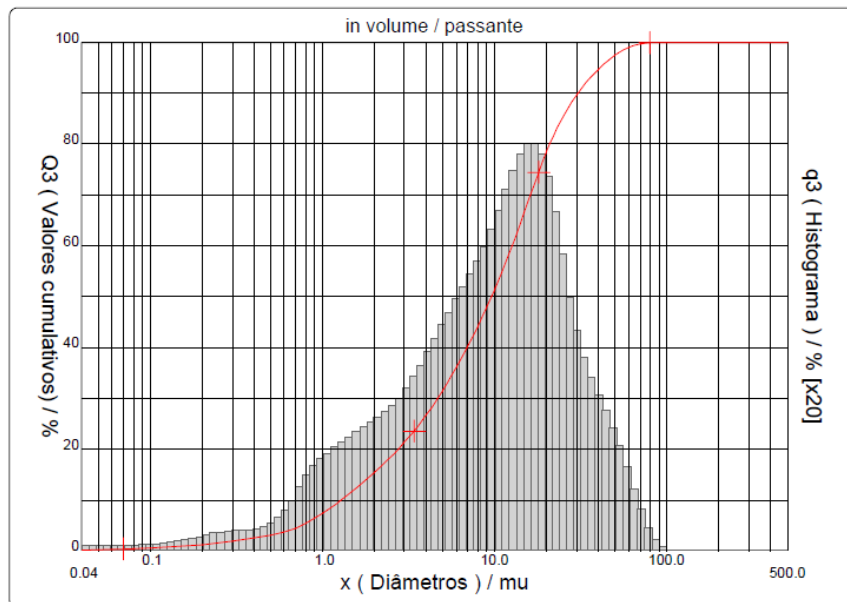


Figura 4: Gráfico da distribuição granulométrica do resíduo oleoso.

### Massa específica real

Na Tabela 3 estão inseridos os resultados obtidos no ensaio da massa específica real dos grãos para os materiais utilizados na pesquisa: cimento, cal, solo e resíduo oleoso.



Tabela 3: Massa específica real dos materiais utilizados na pesquisa.

Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	
Cimento	2,70
Cal	2,30
Solo	2,51
Resíduo oleoso	2,34

### Análise química do solo argiloso e do resíduo oleoso

A análise química do solo argiloso e do resíduo oleoso estão apresentados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Os resultados obtidos na Tabela 4, evidenciam a presença de um teor de 51,39% de óxido de silício, teor de 27,53% de óxido de alumínio e teor de 10,29% de óxido de ferro. Os resultados evidenciam a presença de um complexo sílico aluminoso.

Já os resultados obtidos na Tabela 5, evidenciam a presença de um teor de 58,43% de óxido de silício e teor de 17,06% de óxido de alumínio. Percebe-se que a composição química obtida para o resíduo oleoso é semelhante à mesma obtida para o solo, isso ocorre pelo fato desses materiais possuírem a mesma origem e formação. A composição química obtida do resíduo oleoso classifica-o como sendo um complexo sílico aluminoso, como já havia sido verificado por Lucena (2008) nas suas análises em duas amostras de resíduos oleosos.

Tabela 4: Composição química do solo argiloso.

Componente	Porcentagem (%)
SiO <sub>2</sub> (óxido de silício)	51,398
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido de alumínio)	27,534
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido de ferro)	10,295
SO <sub>3</sub> (trióxido de enxofre)	4,410
MgO (óxido de magnésio)	1,818
K <sub>2</sub> O (óxido de potássio)	1,541
CaO (óxido de cálcio)	1,458
TiO <sub>2</sub> (óxido de titânio)	1,286
ZrO <sub>2</sub> (óxido de zircônio)	0,121
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (óxido de vanádio)	0,055
MnO (óxido de manganês II)	0,039
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido do cromo)	0,023
ZnO (óxido de zinco)	0,011
SrO (óxido de estrôncio)	0,010
C (carbono)	0,000

Tabela 5: Composição química do resíduo oleoso.

Componente	Porcentagem (%)
SiO <sub>2</sub> (óxido de silício)	58,438
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido de alumínio)	17,063
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido de ferro)	7,016
CaO (óxido de cálcio)	5,733
BaO (óxido de bário)	3,260
SO <sub>3</sub> (trióxido de enxofre)	2,525
MgO (óxido de magnésio)	2,239
K <sub>2</sub> O (óxido de potássio)	1,824
TiO <sub>2</sub> (óxido de titânio)	1,609
SrO (óxido de estrôncio)	0,119
MnO (óxido de manganês II)	0,107
ZrO <sub>2</sub> (óxido de zircônio)	0,035
ZnO (óxido de zinco)	0,026
Rb <sub>2</sub> O (óxido de rubídio)	0,007
C (carbono)	0,000

## Análise Térmica Diferencial (ATD) e Termogravimétrica (ATG) do resíduo oleoso

A Figura 5 apresenta os resultados da ATD e da ATG para o resíduo oleoso. Na ATG ocorreu uma perda de massa de 3,75% entre 25°C e 225°C, e de 8,25% entre 300°C e 850°C, totalizando uma perda de massa de 12%. Já a partir da análise da curva de ATD, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- 1) entre 30 e 200°C perda de água livre – pico endotérmico;
- 2) entre 200°C e 400°C combustão de matéria orgânica - exotérmico;
- 3) em 573°C transformação do quartzo alfa para o quartzo beta – pico endotérmico.

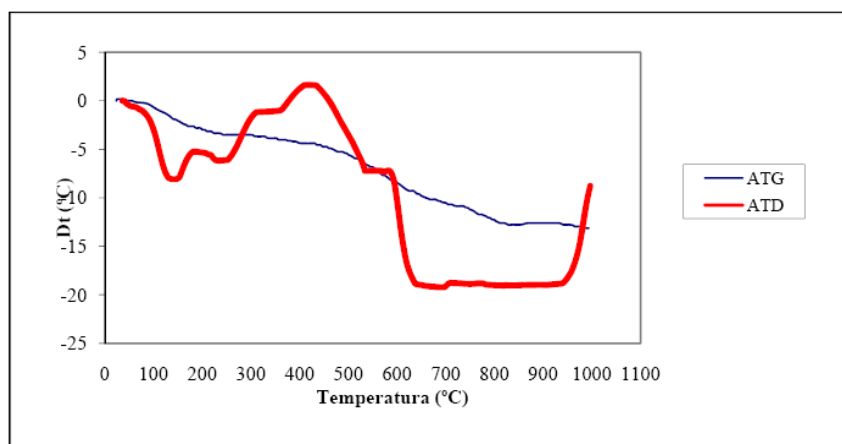


Figura 5: Curvas de ATD e ATG do resíduo oleoso.

## Difração de raio-x do resíduo oleoso

A figura 6 apresenta os resultados obtidos com o ensaio de difração de raio x para o resíduo oleoso. Através de sua análise pôde-se concluir que se trata de substância composta essencialmente por quartzo, com pequenas quantidades de calcita, mica e caulinita.

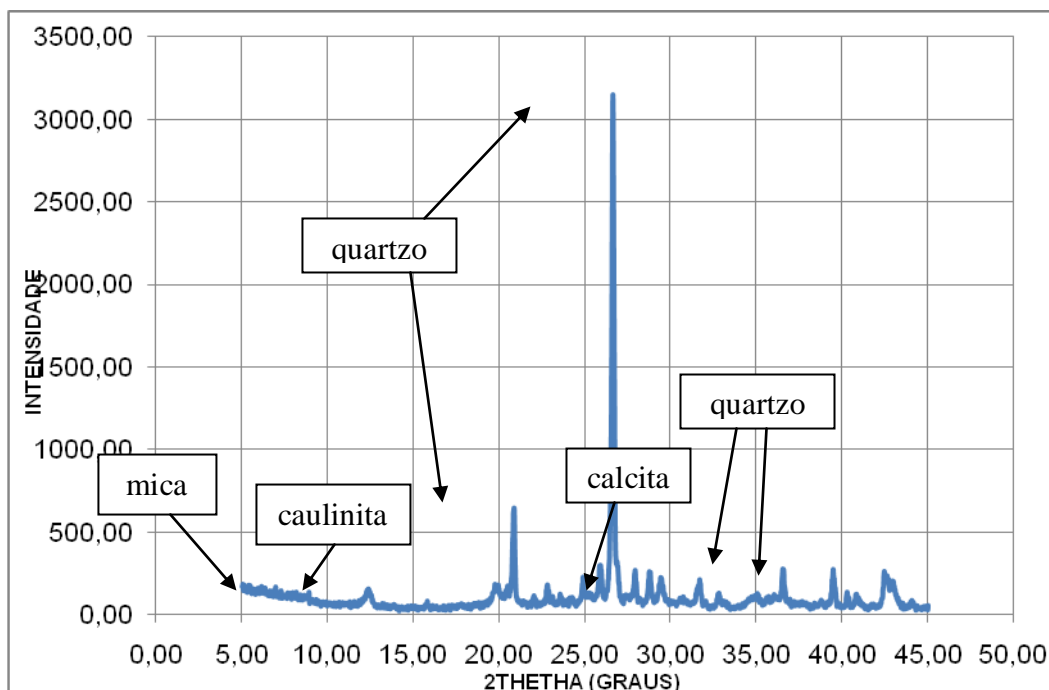


Figura 6: Difração de raio-x do resíduo oleoso.

## Caracterização ambiental do resíduo oleoso

O teor de óleos e graxas obtido para o resíduo oleoso foi de 5,4%. Esse resultado foi superior a 5%, limite máximo estabelecido pela norma NBR 10004 (2004); logo o resíduo oleoso é classificado como Resíduo Classe I, ou seja, tóxico e perigoso.

## Ensaio de Compactação para as misturas

Na Figura 7 e na Tabela 6 são apresentados os resultados dos ensaios de compactação para as diferentes misturas de solo-resíduo-cal.

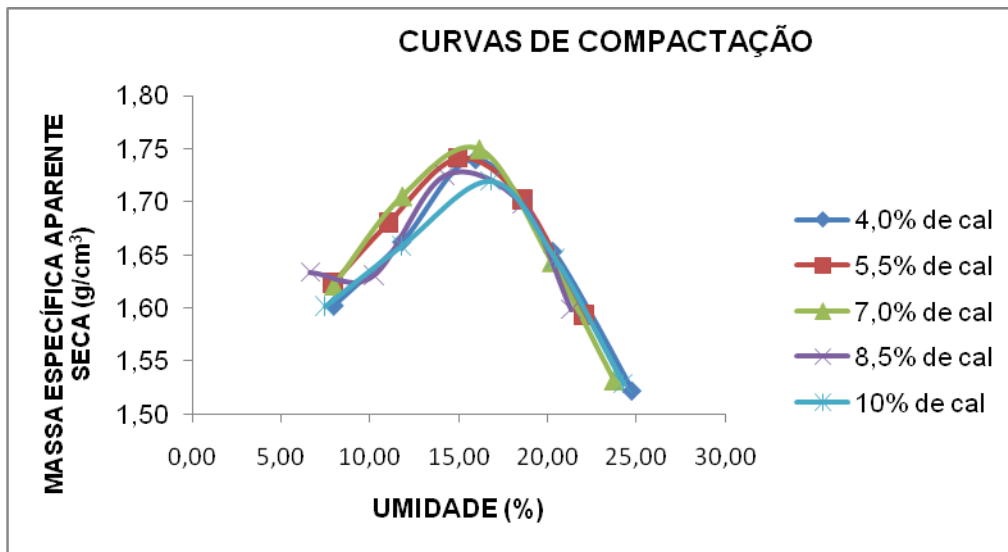


Figura 7: Curvas de compactação para as misturas solo-resíduo-cal.

Tabela 6: Resultados obtidos no ensaio de compactação para a mistura solo-resíduo-cal.

Mistura	Massa específica aparente seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade Ótima (%)
solo – resíduo – 4,0% cal	1,750	15,40
solo – resíduo - 5,5 %cal	1,740	14,95
solo – resíduo – 7,0% cal	1,750	16,00
solo – resíduo -8,5% cal	1,740	14,40
solo – resíduo – 10% cal	1,730	15,60

Na Figura 8 e na Tabela 7 são apresentados os resultados dos ensaios de compactação para as diferentes misturas de solo-resíduo-cimento.

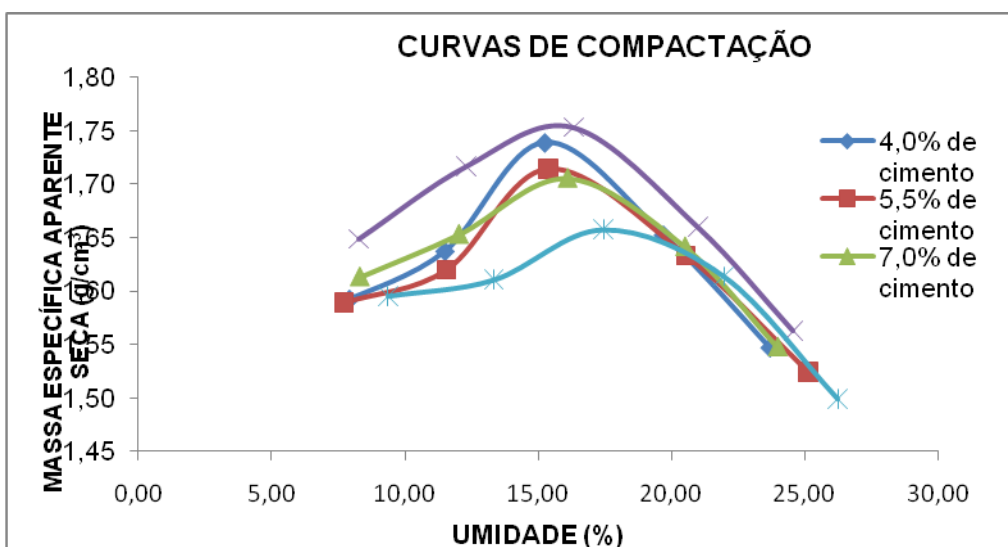


Figura 8: Curvas de compactação para as misturas solo-resíduo-cimento.

Tabela 7: Resultados obtidos no ensaio de compactação para a mistura solo-resíduo-cimento.

Mistura	Massa específica aparente seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade Ótima (%)
solo – resíduo – 4,0% cimento	1,740	15,20
solo – resíduo - 5,5 % cimento	1,720	15,40
solo – resíduo – 7,0% cimento	1,720	15,60
solo – resíduo - 8,5% cimento	1,760	15,20
solo – resíduo – 10% cimento	1,670	16,60

Ao analisar os resultados da massa específica aparente seca máxima e umidade ótima para as amostras com adição de cal e cimento apresentados nas Tabelas 6 e 7, percebe-se que os valores obtidos são semelhantes aos encontrados para o solo puro.

### Ensaio de CBR para as misturas

As Figuras 9 e 10 apresentam os resultados obtidos para o ensaio de CBR em relação aos diferentes teores de cal e de cimento adicionados à mistura com um teor de 17,5% de resíduo oleoso.

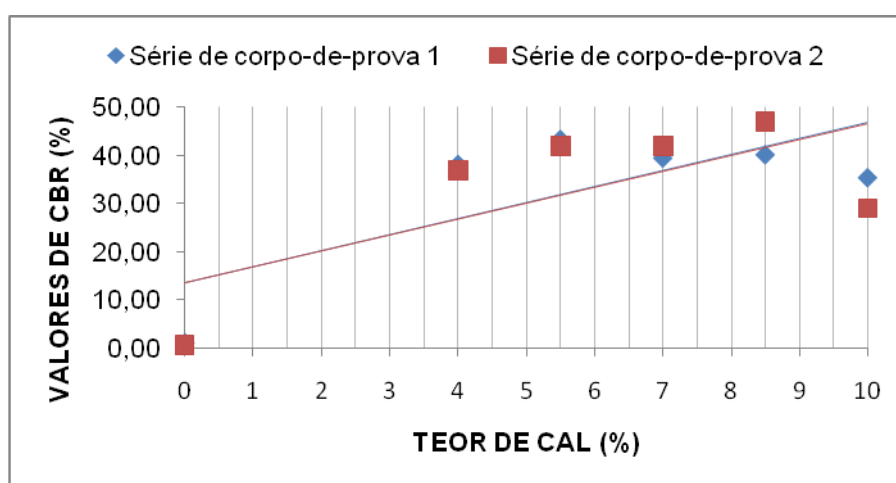


Figura 9: Efeito do incremento do teor de cal na mistura nos valores de CBR.

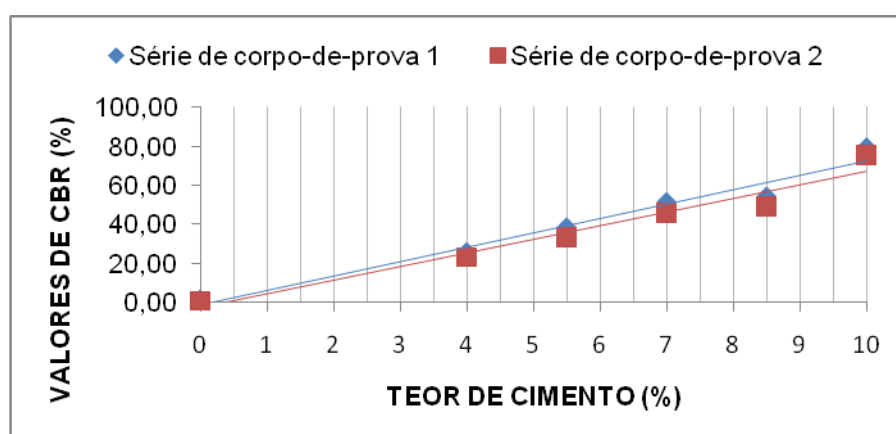


Figura 10: Efeito do incremento do teor de cimento na mistura nos valores de CBR.

Analisando os resultados das Figuras 9 e 10, observa-se que o aumento do teor de cal e de cimento implicou em um aumento significativo no valor do CBR quando comparado aos valores obtidos para o solo puro. Provavelmente a proximidade dos grãos, devido ao aumento da compactidade, facilite as reações químicas no interior da amostra.

Na Tabela 8 foram inseridos os valores de referência para os valores de CBR e de Expansão (ambos na energia Proctor Intermediário) para solos estabilizados ou melhorados com cimento, segundo o

Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT). Ressalta-se que estes valores de referência fazem parte das especificações de serviços para uso em estradas de tráfego pesado.

Tabela 8: Valores de referência para solos melhorados com cimento Portland.

	CBR	Expansão
Sub-base (ES-302/97)	≥ 30%	Máxima de 1%
Base (ES-304/97)	≥ 80%	Máxima de 0,5%

Fonte: DNIT.

Nas Tabelas 9 e 10 estão os resultados detalhados dos ensaios de CBR (%), bem como os valores obtidos para umidade (%), massa específica aparente seca ( $\text{g/cm}^3$ ) e expansão (%) obtidos para as misturas de solo-resíduo-cal e solo-resíduo-cimento.

Tabela 9: Resultados dos ensaios de CBR variando o teor de cal.

Teores de cal (%)	Umidade (%)	Massa específica aparente seca corpo-de-prova ( $\text{g/cm}^3$ )	CBR(%)	Expansão(%)
4,0	26,14	1,570	38,28	0,35
	12,62	1,770	36,98	0,25
5,5	36,11	1,440	43,50	0,26
	21,22	1,660	42,05	0,19
7,0	17,69	1,600	39,59	0,38
	12,74	1,720	42,05	0,33
8,5	16,65	1,630	40,31	0,22
	13,32	1,680	47,13	0,33
10	15,94	1,610	35,53	0,18
	16,13	1,610	29,00	0,42

Os valores de CBR obtidos na pesquisa para as misturas contendo 4,0%, 5,5%, 7,0%, 8,5% e 10% de cal, são superiores aos recomendados para uso em sub-bases. Quanto à expansão todos os valores obtidos estão em conformidade com as especificações de serviços citadas na Tabela 8.

Tabela 10: Resultados dos ensaios de CBR variando o teor de cimento.

Teores de cimento (%)	Umidade (%)	Massa específica aparente seca corpo-de-prova ( $\text{g/cm}^3$ )	CBR(%)	Expansão(%)
4,0	12,55	1,770	25,67	1,29
	14,94	1,740	23,20	1,54
5,5	13,19	1,940	38,43	1,32
	15,73	1,920	33,35	1,62
7,0	13,62	1,760	51,48	1,37
	15,26	1,720	45,68	1,67
8,5	14,24	1,740	54,38	1,79
	14,81	1,690	49,30	2,06
10	15,12	1,750	79,75	1,49
	15,41	1,680	75,40	1,22

Analisando os valores de CBR obtidos na pesquisa para as misturas contendo cimento, observa-se que para os teores de 5,5%, 7%, 8,5% e 10%, os resultados obtidos são superiores aos recomendados para uso em sub-bases de pavimentos rodoviários. Para o teor de 4% de cimento, o resultado encontrado ficou abaixo do limite estabelecido. Quanto à expansão, todos os valores obtidos estão acima do estabelecido nas especificações de serviços citadas na Tabela 8, recomendada pelo DNIT.

Portanto, entre todas as misturas analisadas, a mistura composta por solo, 17,5% de resíduo oleoso e 8,5% de cal apresentou o maior incremento dentre os valores de CBR encontrados e o valor da expansão dentro do limite estabelecido nos critérios do DNIT para utilização em sub-bases de estradas.

### Classificação da mistura solo-resíduo-cal quanto à inerticidade e toxicidade

Nas Tabelas 11 e 12 são apresentadas as concentrações dos constituintes químicos da mistura composta por solo, 17,5% de resíduo e 8,5% de cal, obtidas a partir dos extratos solubilizado e lixiviado, respectivamente. A escolha desta mistura com este teor de substituição, se deu pelo fato da mesma ter apresentado melhores resultados em conformidade com as especificações do DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, como visto nos valores apresentados no item anterior (caracterização mecânica).

Tabela 11: Resultados do teste de solubilização para a mistura solo-17,5%resíduo-8,5%cal.

Parâmetros	LMP (mg/l)		Caracterização
	Anexo G NBR 10004/2004	Mistura (mg/l)	
Cádmio	0,005	0,00	I
Chumbo	0,01	0,18	NI
Cobre	2,00	0,137	I
Manganês	0,10	0,00	I
Ferro	0,30	0,02	I
Cobalto	Sem padrão	0,047	I

**LMP – Limite Máximo Permitido; NI - Não Inerte e I – Inerte**

Tabela 12: Resultados do teste de lixiviação para a mistura solo-17,5%resíduo-8,5%cal.

Parâmetros	LMP (mg/l)		Caracterização
	Anexo F NBR 10004/2004	Mistura (mg/l)	
Cádmio	0,50	0,058	NT
Chumbo	1,00	0,51	NT
Manganês	Sem padrão	0,038	NT
Cobre	Sem padrão	0,092	NT
Cobalto	Sem padrão	0,129	NT

**LMP – Limite Máximo Permitido; NT – Não Tóxico**

Os resultados obtidos evidenciam que para a mistura solo-resíduo-8,5%cal, os constituintes químicos, com exceção do chumbo, apresentaram concentrações inferiores aos limites do anexo G, estabelecidos pela NBR 10004/2004 para análise de extratos solubilizados (Tabela 11). Para as concentrações dos constituintes químicos obtidos com o extrato lixiviado (Tabela 12), observou-se que todos apresentam concentrações inferiores aos limites do anexo F, estabelecido pela NBR 10004/2004. Assim, pode-se concluir que, a mistura solo-resíduo-8,5%cal pode ser classificada como “resíduo” não tóxico para os metais analisados. De acordo com os padrões da referida norma, a mistura solo-17,5%resíduo-8,5%cal classifica-se como não perigosa e não inerte, ou seja, “Resíduo Classe II A”.

## CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentou-se os resultados de uma pesquisa que visa uma nova alternativa de reaproveitamento dos resíduos oleosos através da estabilização/solidificação de solos juntamente com o resíduo oleoso para aplicação em estradas.

As análises dos dados obtidos permitiram extrair as seguintes conclusões:

Em relação às misturas de solo+resíduo (experimento piloto), percebeu-se que não houve incrementos significativos no valor do CBR para os teores de resíduo oleoso adicionados (2,5%, 5,0%, 7,5%, 12,5%, 17,5% e 22,5%) a esta mistura quando comparados aos valores obtidos para o solo puro. Nos valores de umidade ótima (%), massa específica aparente seca (g/cm<sup>3</sup>) e expansão (%) observaram-se pequenas variações.

Nos resultados obtidos nos ensaios de CBR para as misturas com adição de cal (4,0%, 5,5%, 7,0% 8,5% e 10%), observou-se um aumento significativo nos valores encontrados e todos estes valores são superiores ao estabelecido ( $\geq 30\%$  para uso em sub-base) pela especificação de serviço DNIT – ES 302/97. Em relação à expansão, os valores encontrados para esta mistura nos teores acima mencionados apresentam-se dentro dos limites pré-estabelecido pelo DNIT (máxima de 1% para uso em sub-base, DNIT – ES 302/97 e máxima de 0,5% para uso em base de pavimentos, DNIT – ES 304/97).

Nas misturas com adição de cimento (5,5%, 7,0% 8,5% e 10%), os valores obtidos do ensaio de CBR também foram superiores aos estabelecidos pelo DNIT para uso em sub-bases de pavimentos rodoviários, porém, os valores de expansão apresentaram-se superiores aos limites pré-estabelecidos nas especificações de serviço.

Ao se analisar de maneira conjunta os resultados das misturas solo-resíduo-cal e solo-resíduo-cimento, a mistura que melhor atendeu aos requisitos das Normas do DNIT para os ensaios de CBR e para os valores de expansão foi a mistura composta por solo, 17,5% de resíduo oleoso e 8,5% de cal.

Em relação à classificação quanto à toxicidade e inerticidade segundo a ABNT NBR-10004, a mistura ideal solo-resíduo-cal (74% de solo, 17,5% de resíduo oleoso e 8,5% de cal) foi classificada como “Resíduo Classe II A” para os parâmetros analisados.

### **AGRADECIMENTOS**

- CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico)
- PIBIC (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica)
- UFCG (Universidade Federal de Campina Grande)

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR-6457. Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR-6474. Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR-6508. Determinação da massa específica dos sólidos do solo. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7181. Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR-10004. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR-10005. Procedimento para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR-10006. Procedimento para obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

CORDEIRO, J. F. S. **Estabilização química e Solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E & P de petróleo, com solo para o uso em camadas de bases e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB 2007.133f.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, ME- 049/94. Solos - Determinação do Índice de Suporte Califórnia, 1994.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, ME- 053/94. Misturas Betuminosas – Porcentagem de Betume, 1994.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, ME- 162/94. Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas, 1994.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, ES- 302/97. Pavimentação – Sub-base de solo melhorada com cimento, 1997.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, ES- 304/97. Pavimentação – Base de solo melhorada com cimento, 1997.

LUCENA, A. E. de F. L.. **Utilização de cascalhos de perfuração oriundos das atividades de exploração de petróleo em revestimentos asfálticos de estradas.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2008.142f.

OLIVEIRA, D. M. **Aplicação da técnica de solidificação/estabilização para resíduos oleosos da indústria petrolífera, utilizando solo argiloso e bentonita.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2003.