



Copyright 2011, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação no *XVI CILA – Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto*, realizada no período de 20 a 25 de novembro de 2011, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais do *XVI CILA – Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto*.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo apresentar as etapas de construção de um trecho experimental monitorado, no qual em dois segmentos de 120 metros de extensão foi utilizado o resíduo industrial denominado cascalho de perfuração. Esse resíduo é proveniente da indústria de produção e exploração de petróleo, o qual é gerado durante a fase de perfuração dos poços. O cascalho de perfuração é produzido em grande quantidade, de forma que considerando apenas o ano de 2009, somente na Unidade de Negócios de Exploração e Produção da Bahia (UN-BA) – Petrobras, localizada no município de São Sebastião do Passé, foi gerada uma quantidade de cascalho de perfuração superior a 83.000 toneladas. Como ainda não existe uma destinação desse tipo de resíduo, tecnicamente aplicada à Engenharia Civil, foi proposta a utilização em camadas granulares de pavimentos. Com isso, foi construído um trecho experimental monitorado em uma estrada de acesso a um dos poços de petróleo, localizado nas proximidades da própria Unidade produtora (UN-BA). O resíduo cascalho de perfuração foi misturado com solo de uma jazida próxima, sendo a mistura utilizada como revestimento primário. O uso de revestimento primário em estradas de acesso a poços de petróleo é bastante comum naquela Unidade. Em um dos segmentos do trecho monitorado utilizou-se uma porcentagem cerca de 3% de Cimento Portland, na intenção de se obter um solo-resíduo melhorado com cimento. Nos trechos monitorados também foram construídos poços de monitoramento ambiental para a coleta periódica de água, visando diagnosticar se a presença do resíduo na camada do pavimento desenvolve algum potencial de contaminação do lençol freático local.

Abstract

This paper aims to present the steps of building a trial test monitored section, in which two segments of 120 meters long was used an industrial waste drill cuttings. This waste is from industry exploration and production of petroleum, which is generated during the drilling of wells. The drill cuttings are produced in large quantities, so considering only the year 2009, only Business Unit in the Exploration and Production of Bahia (BA-UN) - Petrobras, located in São Sebastião do Passé, was generated a quantity over 83,000 tons. As yet there is no disposal of such waste, technically applied to Civil Engineering, has been proposed for use in granular layers of pavements. Thus, a trial test monitored section was built in an access road to one of the oil wells, located near the production unit itself (UN-BA). The waste drill cuttings were mixed with soil from a nearby quarry, the mixture being used as a primary coating. The use of primary coating on access roads to oil wells is quite common in that unit. In one segment of the monitored section used a percentage of about 3% Portland cement, with the intention of obtaining an improved soil-cement-residue. In the place were also installed three environmental monitoring wells constructed for the periodic collection of water in order to diagnose if the presence of residue on the pavement layer develops some potential contamination for groundwater.

¹ Doutor, Professor em Engenharia Civil – UFS

² Doutora, Professora em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ

³ Mestre, Engenharia Civil – COPPE/UFRJ

⁴ Doutorando, Engenheiro Civil – CENPES/ Petrobras

⁵ Mestranda, Engenharia Civil – PROEC/UFS

⁶ Mestre, Professor em Engenharia Civil – UFS

1. Introdução

Na indústria petrolífera, em praticamente todas as etapas produtivas, desde a perfuração até a distribuição do transporte de derivados, é promovida a geração de resíduos oleosos de diversos tipos, ficando por conta das refinarias a maior parte destes. Dentre os vários resíduos produzidos nessa cadeia produtiva, os de maior destaque são o solo contaminado por óleo e outras substâncias (originados na perfuração) e a borra oleosa gerada nas atividades de refino, como a que se origina no fundo do tanque de óleo cru, lodos oleosos, resíduos das torres de resfriamento e das torres de troca de calor. São todos materiais contaminantes que exigem de uma destinação adequada.

Esta pesquisa caminha na busca por soluções técnicas, econômicas e ambientalmente adequadas para o aproveitamento de resíduos de petróleo, especificamente o cascalho de perfuração, como materiais alternativos usados na construção de pavimentos rodoviários. O aproveitamento tem por base a análise das alternativas de uso deste material incorporado a solos tipicamente encontrados em jazidas com potencial de exploração da região Nordeste, especialmente aqueles situados nas proximidades dos acessos de bases de perfuração de poços para extração de petróleo. Dessa forma, almeja-se aplicar as misturas de solo-resíduo desenvolvidas em laboratório na construção de estruturas de pavimentos, especialmente camadas de base e sub-base para rodovias de baixo volume de tráfego. A partir dos resultados obtidos em laboratório, a meta é se executar pistas experimentais visando-se avaliar o desempenho dos materiais *in situ*. Os trechos experimentais foram acompanhados tecnicamente durante a execução, e estão sendo monitorados através de ensaios específicos após a construção.

Este trabalho faz parte de um projeto de pesquisa maior onde estão envolvidos, além do resíduo cascalho de perfuração, outros resíduos da unidade de exploração e produção de petróleo. Este projeto conta com uma parceria entre a Universidade Federal de Sergipe (UFS) e a COPPE/UFRJ, juntamente com o Centro de Pesquisa da Petrobras – CENPES, que coordenada a pesquisa. A equipe da COPPE/UFRJ é responsável pelos ensaios de laboratório (ensaios geotécnicos nos solos e resíduos) para a escolha das melhores misturas de solo-resíduo para serem aplicados em campo, além do acompanhamento dos ensaios ambientais. A equipe da UFS fica responsável, principalmente, pelas atividades de campo, incluindo o acompanhamento da construção dos trechos experimentais e o monitoramento periódico dos mesmos após a construção.

Como a escolha da jazida de solo a ser utilizada na construção do trecho experimental monitorado foi escolhida com muito pouca antecedência à construção da obra, para o solo utilizado na construção do trecho foram realizados apenas os ensaios geotécnicos tradicionais de laboratório (granulometria, Limites de Atterberg, compactação e CBR), tanto puro quanto misturado ao resíduo cascalho de perfuração. Devido à maior proximidade com o local da coleta de solo, os ensaios laboratoriais foram realizados apenas no laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFS – GeoPav.

2. Referencial Teórico

O aproveitamento de resíduos oriundos de processos industriais surge como uma alternativa atraente para a cadeia produtiva da construção civil, uma vez que essa atividade pode resultar em dois importantes aspectos: i) a preservação dos recursos naturais, como a reutilização ou reciclagem de materiais anteriormente extraídos; e ii) a preservação do meio ambiente, evitando que os resíduos sejam inadequadamente dispostos na natureza. Além destes, desde que encontrada a solução adequada para o aproveitamento, o material poderá ter um valor agregado, invertendo a situação de custo de descarte.

Apesar de toda a preocupação ambiental existente no campo da indústria petrolífera, esta ainda não implantou efetivamente soluções técnicas e economicamente viáveis para o reaproveitamento dos seus resíduos, mesmo sabendo-se que as companhias de petróleo estão cada vez mais empenhadas em atingir e demonstrar resultados ambientais ótimos, que atendam aos requisitos legais, da própria empresa e também das partes interessadas. Entretanto, o atendimento aos requisitos das normas de sistemas de gestão ambiental, não garante, por si só, resultados ambientais ótimos. Para tanto, a organização deve considerar a colocação em prática da melhor tecnologia disponível sempre que apropriado e economicamente viável (MARTINS et al. 2008).

Apesar de ainda ser pouca a experiência brasileira acerca de estudos envolvendo resíduos petrolíferos com a finalidade de aplicações na Engenharia Civil, convém ressaltar que o aproveitamento de rejeitos industriais deve ser encarado como uma prática preservacionista e ao mesmo tempo restauradora, de elevado impacto ambiental e ecológico (COSTA, 1998 apud ALVES, 2003; Cordeiro, 2007). É importante frisar que a Engenharia Civil ainda não dispõe de um processo pré-estabelecido para o reaproveitamento de resíduos petrolíferos. Dessa forma, é fundamental a realização de pesquisas com essa finalidade, desenvolvendo-se processos que sejam técnica e economicamente viáveis, ecologicamente aceitáveis e socialmente corretos, preceitos básicos para o desenvolvimento de uma política de gestão sustentável de tais resíduos.

Silva (2000) mostra um exemplo interessante de aproveitamento de resíduos de borra oleosa de petróleo na indústria cerâmica. O aproveitamento se deu com a incorporação do resíduo petrolífero à massa argilosa, convencionalmente utilizada na confecção de cerâmicas vermelhas estruturais. Para ser utilizada, a borra oleosa foi

previamente tratada para efeitos de encapsulamento (evitar fuga do material para o meio ambiente), através da adição de 20% de argila ativada.

Santos et al. (2002) e Souza e Holanda (2003) caracterizaram e avaliaram comportamento de massas argilosas contendo borra de petróleo nas proporções de 5%, 10%, 15% e 20% em massa, visando sua aplicação em cerâmica estrutural. Os autores concluíram que a adição do resíduo altera as características físico-química-mineralógicas e propriedades da massa argilosa pura. Além disso, como o resíduo é rico em quartzo e barita, cujos minerais diminuem a retração linear, causando trincas e porosidade no corpo cerâmico, o que resulta em perda de resistência mecânica.

Nessa mesma linha de pesquisa, Guimarães (2007) desenvolveu um programa experimental visando aproveitar o óleo presente na borra oleosa para utilização como material combustível ou para retornar em alguma corrente do processo de refino de petróleo. Na pesquisa, a autora constatou que a borra oleosa é composta de 36,2% de óleo, 16,8% de cinzas, 40% de água e 7% de compostos voláteis. A eficiência de extração do óleo presente na borra foi da ordem de 70%.

Meegoda et al. (1993) investigaram três misturas asfálticas constituídas com solo contaminado com petróleo, os quais revelaram que os percentuais de contaminação de petróleo em solo situa-se entre 0,20 e 0,32%.

Na área de aproveitamento de resíduos oriundos da cadeia produtiva do petróleo ainda são muito incipientes as pesquisas e as experiências brasileira, como material alternativo para a construção de estradas. Entretanto, as poucas pesquisas até então realizadas apresentam resultados que indicam a possibilidade de uso dos resíduos de petróleo na pavimentação, a partir da técnica mais adequada a cada situação e a cada tipo de resíduo petrolífero (Casagrande et al. 2006, Cordeiro, 2007).

Cordeiro (2007), por exemplo, realizou uma pesquisa visando incorporar o resíduo oleoso de petróleo a solos do estado da Paraíba, aplicando a técnica de estabilização química/solidificação, usando a cal como agente cimentício, em percentuais variando de 3% a 9%. A cal foi usada com o propósito de encapsular o resíduo, considerado perigoso. Após a adoção de 25% do teor de resíduo oleoso na mistura com solos e cal, os resultados demonstraram que parâmetros como teor de umidade, massa específica aparente, CBR e expansão sofreram alterações significativas. As conseqüências foram: aumento no teor de umidade e diminuição da massa específica aparente com o aumento no teor de cal, quando comparados os valores do solo natural, sendo que os valores de CBR tenderam a aumentar com o aumento do percentual de cal, em comparação com o solo em seu estado natural e com a mistura solo-resíduo sem cal.

Na mesma linha de pesquisa de Cordeiro (2007), Rojas (2007) e Rojas et al. (2007) aplicaram a técnica de encapsulamento, conhecida também como solidificação/estabilização, em um solo contaminado do Rio Grande do Sul com crescentes quantidades do resíduo industrial borra oleosa ácida, utilizando como agente encapsulante o cimento Portland CP-V ARI. O programa experimental consistiu na realização de estudos pré e pós-tratamento, analisando-se fisicamente o solo através de ensaios de caracterização geotécnica, compactação, resistência à compressão simples, durabilidade e condutividade hidráulica. Os resultados apontam que quanto maior a quantidade de borra oleosa ácida presente no solo tratado, maior é a temperatura de hidratação do cimento e mais rápido atinge o pico máximo, resultando em menor resistência à compressão simples e maior perda de massa.

O trabalho de Rojas (2007) mostrou ainda que em amostras sem cimento, a condutividade hidráulica diminuiu com o aumento de borra oleosa ácida. Ou seja, quando foi adicionado cimento, a condutividade hidráulica inicialmente diminuiu com o acréscimo de borra oleosa ácida, mas voltando a aumentar com quantidades maiores de contaminante. A técnica de encapsulamento mostrou-se eficiente quanto à redução dos metais pesados, devido, principalmente, ao aumento do pH e à precipitação de tais elementos. Porém não se mostrou eficiente quanto ao sulfato, condutividade elétrica e demanda química de oxigênio.

Onofre et al. (2009) utilizaram a metodologia de dosagem SUPERPAVE para desenvolver uma mistura asfáltica contendo o resíduo solo contaminado por petróleo (SCP). Para o desenvolvimento da pesquisa, os autores fizeram uma caracterização de misturas contendo 10, 20 e 30 % de SCP, em massa, e analisaram os resultados à luz da comparação de ensaios mecânicos com misturas asfálticas do tipo areia asfalto usinada à quente (AAUQ). Concluiu-se que o comportamento mecânico das misturas foi alterado com a presença do resíduo, verificando-se que para maiores teores de SCP, foram obtidos menores valores de Módulo de Resiliência, resistência à tração e vida de fadiga. Entretanto, aqueles autores consideraram os resultados satisfatórios, visto que o método possibilita uma destinação mais nobre para o solo contaminado com petróleo do ponto de vista ambiental e econômico.

Por mais que sejam desenvolvidas pesquisas em escala de laboratório, os autores deste trabalho consideram a aplicação *in situ* dos resultados dos ensaios laboratoriais se constitui numa etapa fundamental para se avaliar o desempenho do material na prática. É neste contexto que se insere o presente trabalho.

3. Local da Construção dos Trechos Monitorados

Para aplicação dos resultados obtidos em laboratório, foi escolhida a obra de construção da estrada de acesso à base do Poço 4-GNB-3, pertencente ao Campo de Produção Guanambi, situado no município de São Sebastião do Passé, um trecho com aproximadamente 400 metros de extensão. A obra foi contratada pela PETROBRÁS, UN-BA, em Taquipe, e o serviço foi executado por uma empresa de pavimentação que rotineiramente presta serviços ao Órgão. A equipe do Laboratório de Geotecnia da UFS teve a incumbência de acompanhar a execução do trecho, seguindo os procedimentos de

monitoramento previamente estabelecidos, o que foi feito na medida do possível, adequando-se às peculiaridades da obra e da empresa executora. O trecho foi subdividido em três (03) segmentos, sendo o primeiro de solo puro (para servir de referência), o segundo com solo (80%) – cascalho (20%), e o terceiro com (80%) – cascalho (20%) – cimento (3%), todos com 120 metros de extensão. A espessura da camada de revestimento primário prevista foi 15 cm.

4. Materiais

4.1 – Solo da jazida São Sebastião

A coleta de solo foi efetuada numa jazida denominada São Sebastião, utilizada na construção dos trechos monitorados, foi realizada em 21 de outubro de 2010, localizada nas proximidades da Unidade Operacional da Petrobrás, em Taquipe, situada no município de São Sebastião do Passé, estado da Bahia. Dessa jazida foram coletadas duas amostras de solos para caracterização geotécnica, que foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFS. Fotos do local da jazida durante a retirada do material para execução do trecho estão mostradas nas Figuras 1 (a; b).



Figura 1. Feições geotécnicas dos solos coletados na jazida São Sebastião, em São Sebastião do Passé – BA.

Observando-se as Figuras 1a e 1b, percebe-se que se trata de solos residuais maduros, com textura areno-argilosa, de cores variando entre avermelhadas e amareladas. Além das duas amostras coletadas na própria jazida, também foram coletadas amostras desse material no trecho já pronto, visando aferir possíveis alterações no material entre a jazida e a execução. Essa coleta se deu em 25 de novembro de 2010, e já faz parte do monitoramento do trecho executado. Um resumo da granulometria do solo coletado nessa jazida está apresentado na Figura 2. A análise da distribuição das partículas mostrada na Figura 2 revela que as duas amostras dessa jazida são muito semelhantes, predominando a fração areia, com quase 80% em massa.

É importante destacar que antes da construção do trecho foi realizada uma exaustiva bateria de ensaios em laboratório, com diversas composições de solo-cascalho de perfuração, usando-se diferentes solos da região (de outras jazidas), o que permitiu um melhor entendimento do uso desse resíduo com a finalidade que se pretende neste trabalho. Como a jazida São Sebastião foi a mais conveniente para uso na aplicação da mistura in loco, e devido à limitação de páginas, neste trabalho os autores apresentam apenas os dados de ensaios referentes a essa jazida.

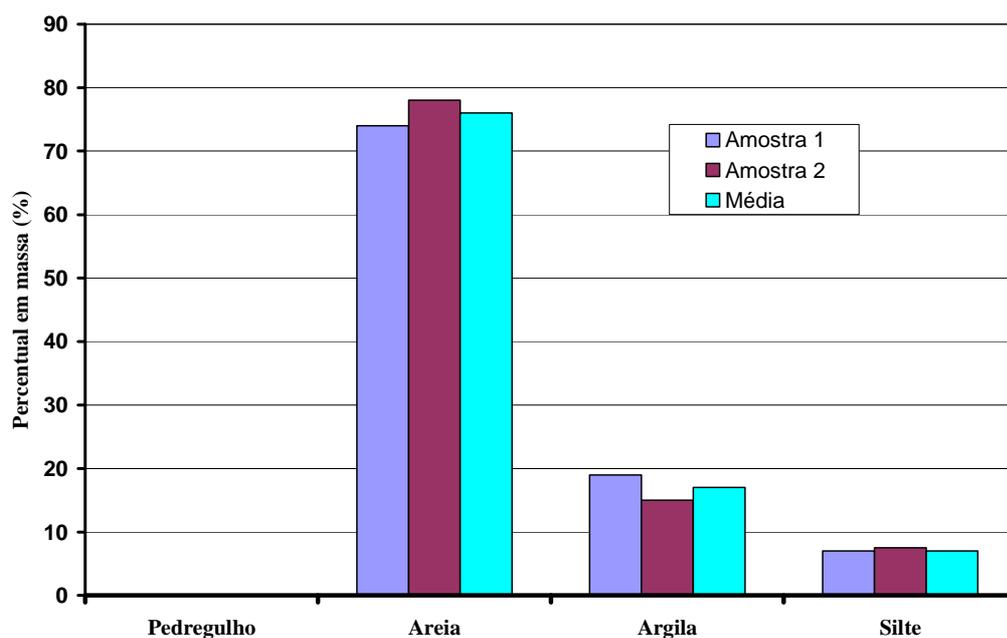


Figura 2. Resumo das frações granulométricas das misturas de solo da jazida São Sebastião.

Os valores dos limites de liquidez e de plasticidade, índice de grupo e massa específica real dos solos estão apresentados na Tabela 1, em que na quarta coluna são apresentados os valores médios obtidos dos dois ensaios com as duas amostras misturadas. Observa-se da Tabela 1 que os parâmetros dos ensaios de limite de Atterberg são praticamente de mesmo valor nos dois ensaios, o que permite classificar o solo dessa jazida, de acordo com a classificação HRB, como solo A-2-4 (areia argilosa).

Tabela 1. Limites de Atterberg, índice de grupo e massa específica real do solo da jazida São Sebastião.

Parâmetro	ENSAIO 01	ENSAIO 02	MÉDIA
WL (%)	NL	NL	NL
WP (%)	NP	NP	NP
IP (%)	NP	NP	NP
IG	0	0	0
γ_g (g/cm ³)	2,653	2,653	2,653
Tipo	A-2-4	A-2-4	A-2-4

Como as duas amostras de solos coletadas na jazida São Sebastião são muito semelhantes e se previa misturar o material para uso na construção do trecho experimental, deu-se preferência ensaiar a partir dos ensaios de compactação as duas amostras em laboratório devidamente misturadas. Foram realizados 02 (dois) ensaios de compactação com as amostras colhidas na jazida, empregando-se a energia do Proctor Intermediário, de cujos dados foram moldadas amostras para a realização dos ensaios de CBR e expansão. Os valores dos pesos aparentes específicos secos máximos médios e os respectivos teores de umidade ótima estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de compactação e CBR das amostras da jazida São Sebastião.

Ensaio	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	$W_{\acute{o}t}$ (%)	CBR (%)	Expansão (%)
01	20,00	9,4	54,0	0,01
02	19,84	9,6	53,0	0,00
Média	19,92	9,5	53,5	0,01

Da Tabela 2 se percebe que o peso específico aparente seco máximo do solo dessa jazida situa-se em torno de 20 kN/m³, enquanto o teor de umidade ótima está em torno de 9,5%. O valor médio do CBR está em torno de 54%, com

expansão muito baixa, 0,01%, o que habilitaria o solo dessa jazida para uso em camadas de sub-base de pavimentos nessas condições. Entretanto, como se tem o interesse em aproveitar o resíduo cascalho de perfuração no local, esse solo será mistura com resíduos para se verificar o comportamento das misturas.

4.2 – Cascalho de perfuração

A denominação cascalho de perfuração tem sido atribuída pela empresa geradora ao material resultante da desagregação das rochas pela perfuratriz, objetivando-se a abertura de poços para exploração do petróleo. De fato, trata-se de um material granular oriundo de rocha desintegrada, com aparência de areia siltosa, com presença de óleo, baixa umidade e resíduos de parafina. Cabe ressaltar que do ponto de vista geotécnico, esse material não poderia ser denominado cascalho.

Normalmente um poço exploratório de petróleo gera entre 500m³ e 800m³ de cascalho de perfuração, resultante da trituração das rochas pela broca. Esse material pode causar desequilíbrios ambientais, ao cobrir a lama do fundo ou ao provocar avalanches em áreas de declive, comprometendo a segurança da vizinhança. A lama química usada na perfuração e na lubrificação da broca carrega para o bordo da unidade de perfuração o cascalho retirado do poço. Depois de separado da lama química, esse material precisa receber uma destinação final (NICOLLI e SOARES, 2007). Em meados de 2008, a Unidade de Taquipe acumulava aproximadamente 5000 m³ de cascalho em estoque (Oda, 2008), com custo de descarte da ordem de R\$350,00/ton/mês (Almeida, 2009).

A caracterização geotécnica básica do resíduo cascalho de perfuração também foi realizada. Na Tabela 3 são mostradas as frações granulométricas do material. Da tabela 3 se observa que a frações predominantes no cascalho de perfuração são de silte, com aproximadamente 58%, e a de argila, com 33%. Com base nestes dados granulométricos, prevê-se que este material seja classificado como areia-argilosa, o que será confirmado quando forem apresentados os resultados dos ensaios de limites de Atterberg.

Os valores dos limites de liquidez e de plasticidade, índice de grupo e massa específica real cascalho de perfuração e da escória de cobre estão apresentados na Tabela 4. Com base nas frações granulométricas e nos parâmetros dos ensaios de limites de Atterberg, o cascalho de perfuração permite ser classificado como CL (argila de baixa compressibilidade), de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos, ou A-7-5, de acordo com o sistema da HRB.

Tabela 3. Composição granulométrica dos resíduos cascalho de perfuração (conforme NBR 6502, 1995).

Fração	Cascalho de perfuração
	(%)
Pedregulho	1,61
Areia	7,86
Argila	32,91
Silte	57,64

Tabela 4. Limites de Atterberg, índice de grupo e massa específica real do cascalho de perfuração.

Parâmetro	Cascalho de perfuração
WL (%)	44
WP (%)	29
IP (%)	15
IG	25
γ (g/cm ³)	2,652

4.3 – Misturas de solo e cascalho de perfuração

Com a mistura de cascalho ao solo da jazida São Sebastião se procurou avaliar a influência do resíduo na matriz do solo. Para isso foram analisadas duas misturas: i) a primeira, com 80% de solo + 20% de cascalho de perfuração; e ii) a segunda, com 80% de solo + 20% de cascalho de perfuração + 3% de cimento Portland CP 32. Com estas duas misturas

foram realizados novos ensaios de caracterização, compactação, CBR e expansão, cujos resultados médios de duas repetições para cada parâmetro estão apresentados na Tabela 5. Analisando-se os dados contidos na Tabela 5 se observa que a presença do resíduo cascalho de perfuração diminuiu a fração areia e aumentou a fração silte, em comparação ao solo puro. A presença do cimento elevou em cerca de 3% a fração argila.

Tabela 5. Composição granulométrica das misturas de solo-resíduo.

Fração	MISTURA 01	MISTURA 02	SOLO PURO
	(%)	(%)	(%)
Pedregulho	1,5	1,0	0,0
Areia	68,9	67,0	76,0
Argila	16,2	19,0	17,0
Silte	13,4	14,0	7,0
Mistura 01: 80% de solo + 20% de cascalho de perfuração			
Mistura 02: 80% de solo + 20% de cascalho de perfuração + 3% de cimento Portland			

Os valores dos limites de liquidez e de plasticidade, índice de grupo e massa específica real dos das misturas estão apresentados na Tabela 6, em que na terceira coluna são apresentados os valores obtidos para os solos puros, para efeitos comparativos.

Tabela 6. Limites de Atterberg, índice de grupo e massa específica real das misturas de solo-resíduo.

Parâmetro	MISTURA 01	MISTURA 02	SOLO PURO
WL (%)	NL	NL	NL
WP (%)	NP	NP	NP
IP (%)	NP	NP	NP
IG	0	0	0
γ_g (g/cm ³)	2,667	2,676	2,653
Tipo	A-2-4	A-2-4	A-2-4
Mistura 01: 80% de solo + 20% de cascalho de perfuração			
Mistura 02: 80% de solo + 20% de cascalho de perfuração + 3% de cimento Portland			

Observa-se da Tabela 6 que os parâmetros dos ensaios de limite de Atterberg praticamente não se alteram, quando são comparados os dados das misturas de solo-cascalho de perfuração com os do solo puro, permanecendo, inclusive, a mesma classificação HRB, solo A-2-4.

Foram realizados 02 (dois) ensaios de compactação para cada mistura, empregando-se a energia do Proctor Intermediário. Com os dados de compactação foram moldadas amostras para realização dos ensaios de CBR e expansão. Um resumo contendo os valores dos pesos aparentes específicos secos máximos e dos teores de umidade ótima está apresentado na Tabela 7. Dessa tabela se percebe que os valores do peso específico aparente seco máximo de todas as misturas se elevaram em relação aos do solo puro, sendo que as misturas de solo-cascalho apresentaram aproximadamente os mesmos valores de umidade ótima. Os valores de CBR aumentaram para as misturas que contém cimento, sendo que o valor sofreu expressiva redução para a mistura sem cimento. Os valores de expansão não se alteraram expressivamente.

Tabela 7. Parâmetros de compactação e CBR das misturas de solo-resíduo com amostras da jazida São Sebastião.

MISTURA	$\gamma_{dm\acute{a}x}$	$w_{\acute{o}t}$	CBR	Expansão
	(kN/m ³)	(%)	(%)	(%)
MISTURA 01	20,40	9,50	21	0,00
MISTURA 02	20,44	9,35	61	0,05
SOLO PURO	19,92	9,50	53,5	0,01
Mistura 01: 80% de solo + 20% de cascalho de perfuração				
Mistura 02: 80% de solo + 20% de cascalho de perfuração + 3% de cimento Portland				

5. Execução dos Trechos Monitorados

Com as misturas desenvolvidas em laboratório, procedeu-se a construção do trecho experimental. Para se reavaliar em laboratório o controle tecnológico dos materiais em campo, além dos ensaios de densidade *in situ*, umidade e da verificação da geometria final do pavimento (declividade longitudinal), foram previstas coletas de 3 amostras da camada final (apenas do revestimento primário), previamente à compactação, em cada segmento experimental, a cada 30 metros, para ensaios posteriores em laboratório. No caso da mistura com cimento foi previsto se fazer a coleta antes da adição do aglutinante. Amostras do material presente no subleito deveriam ser coletadas a cada 100 metros (3 amostras ao todo), para ensaios de caracterização em laboratório.

Das Figuras 3 a 6 são mostradas fotos tiradas antes, durante e depois da execução do trecho experimental. As Figuras 6(a; b) revelam que os segmentos resistiram bem às chuvas que ocorreram na área do trecho experimental entre os meses de dezembro de 2010 e maio de 2011. Cabe destacar que os segmentos executados com solo-cascalho e solo-cascalho-cimento se apresentaram nas melhores condições, em termos de erosão superficial, mesmo sem estes possuírem revestimento asfáltico e sistema de drenagem eficiente. O que se percebe das imagens, comprovado pelas equipes da UFS e da COPPE/UFRJ, que lá estavam nessa data, é que o comportamento do revestimento primário nos segmentos executados com as misturas solo-cascalho e solo-cascalho-cimento era bem melhor do que o do segmento executado com solo-puro, em termos de desgaste e erosão superficial.



Figura 3. Condições do trecho antes da preparação do subleito.



(a): espalhamento do material



(b): solo-cascalho-cimento sendo compactado

Figura 4. Equipe do GeoPav monitorando a execução da camada de revestimento primário.



(a): Trecho concluído



(b): Coleta de amostras

Figura 5. Aspectos da camada de revestimento primário executado e coleta de material para ensaios em laboratório.



(a): solo-cascalho



(b): solo-cascalho-cimento

Figura 6. Aspectos da camada de revestimento primário após intensas chuvas.

6. Avaliação dos Trechos Monitorados após Construção

Os dados apresentados na Tabela 8 mostram que em termos de densidade *in situ*, os resultados podem ser considerados satisfatórios quando são comparados os valores de peso específico máximo seco com a densidade de campo, ficando ambos num patamar entre 19 e 20 kN/m³, razão pela qual os graus de compactação determinados nos segmentos ficaram próximos de 100%, conforme se pode observar graficamente na Figura 7. Entretanto, em termos de teor de umidade, o cenário de campo sofreu alterações significativas (para menos) em relação aos dados de laboratório: enquanto os teores de umidade ótima são 9,3%, 11% e 13%, para os segmentos SP, SC e SCC, respectivamente, os dados medidos em campo durante a execução revelam valores bem abaixo destes, ou seja, uma média de 7% em todos os segmentos, o que resultou em variações de -2,2%, -4,3% e -5,7% na umidade de compactação em campo dos segmentos SP, SC e SCC, respectivamente. Isso pode ser visualizado graficamente na Figura 8. Como se sabe, compactar camadas de solos com teor de umidade abaixo do teor ótimo pode resultar em vulnerabilidade da resistência e deformabilidade da camada do pavimento, ficando bastante susceptível às variações no teor de umidade do meio. De qualquer forma, para a surpresa da equipe que tem acompanhado o desempenho pós-construção do trecho, mesmo com as chuvas torrenciais que têm acontecido na região onde foi construída a pista experimental, o revestimento primário tem se comportado satisfatoriamente. A textura superficial foi pouco desgastada pelos processos erosivos superficiais e pelo tráfego local, conforme se pode constatar das imagens mostradas nas Figuras 6a e 6b.

Tabela 8. Monitoramento de campo – ensaios de densidade in situ realizados no revestimento primário (base).

Estaca	Segmento	γ_{campo}	γ_{campo} (média)	W_{campo}	W_{campo} (média)	GC
		(kN/m^3)	(kN/m^3)	(%)	(%)	
E-01	SP	19,40	19,10	6,4	7,1	97
E-03		19,74		5,8		97
E-05		18,15		9,0		91
E-07	SC	19,08	19,31	6,6	6,7	97
E-09		18,65		6,9		94
E-11		20,19		6,6		102
E-13	SCC	19,38	19,57	7,5	7,3	102
E-15		19,94		6,6		103
E-17		19,39		7,8		102

Legenda: SP – Solo puro; SC – Solo-cascalho; SCC – Solo-cascalho-cimento;

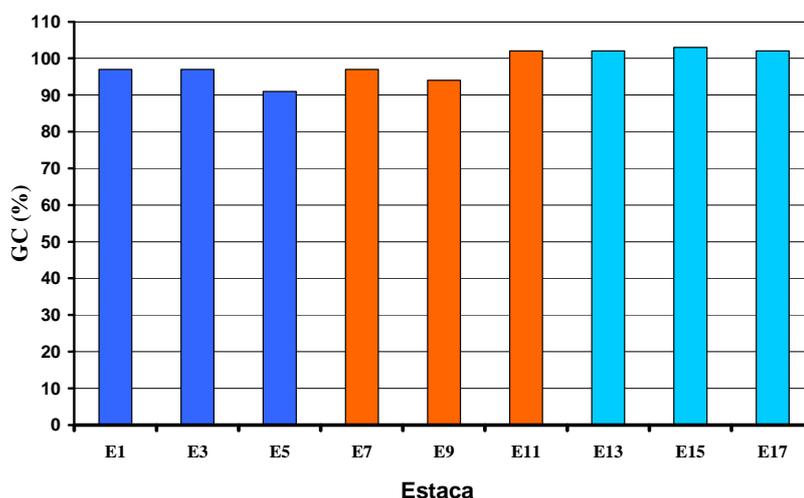


Figura 7. Valores dos Graus de Compactação das camadas do trecho experimental obtidos dos ensaios de densidade *in situ*.

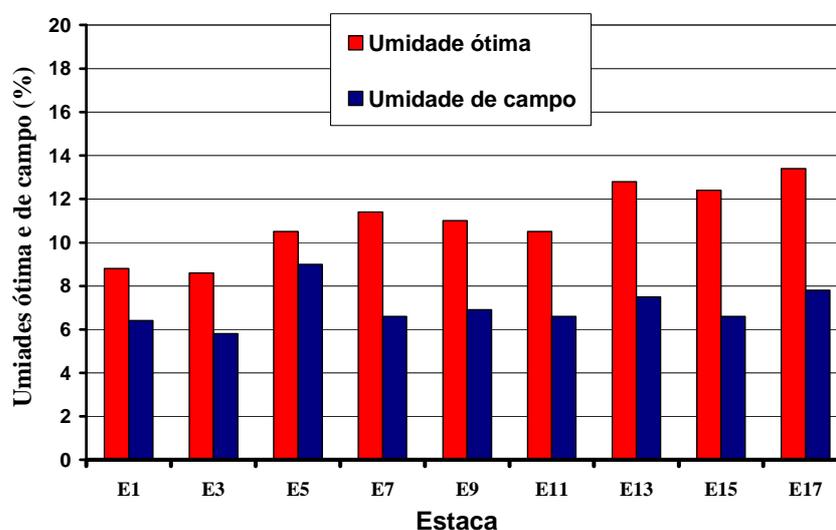


Figura 8. Valores do teor de umidade de campo em comparação com as umidades ótimas do material usado nas camadas do trecho experimental obtidas dos ensaios de laboratório.

Para complementar a base de dados atualmente disponível para esta pesquisa, que faz parte do monitoramento de campo a longo prazo, almeja-se a realização de ensaios *in situ* complementares, incluindo viga Benkelmann, uma campanha de DCP (Penetrômetro Sul-Africano) e, possivelmente, CBR *in situ*. Nessas etapas se tentará a coleta adicional de amostras nos três segmentos, para a realização de ensaios de Módulo de Resiliência, de forma que se possa avaliar melhor o comportamento tensão-deformação das misturas sob condições controladas de tensão e, principalmente, sob carregamento repetido.

7. Considerações Finais

Neste trabalho foi aplicado resíduo cascalho de perfuração misturado a solo na construção camada de revestimento primário em construção de trecho experimental monitorado.

Os solos presentes nas jazidas da região onde se realizou essa pesquisa se apresentaram de baixa plasticidade, sendo a maioria deles classificados como areia argilosa (A-2-4). As pequenas frações de material fino (silte e argila) presentes na granulometria dos solos da região, conferiram, em alguns casos, baixos valores de W_L e W_P .

Os ensaios de compactação realizados com o emprego energia do Proctor Intermediário revelaram para ossolos usados nesta pesquisa valores de peso específico aparente seco máximo do solo na faixa de 18 a 20 kN/m³, com teores de umidade ótima entre está em torno de 8,0% e 11%, atingindo o patamares próximos de 14% quando foram incluídos o cascalho de perfuração (20% em massa) e cimento (3% em massa) na matriz do solo.

Com base em ensaios de laboratório, foram elaboradas duas misturas de solos com resíduos para aplicação em campo, na construção de uma pista experimental: uma com 80% de solo e 20% de cascalho de perfuração, e outra com 80% de solo + 20% de cascalho de perfuração + 3% de cimento Portland.

Foi escolhido um trecho experimental que serve de estrada de acesso ao Poço 4-GNB-3, do Campo de Exploração Guanambi, situado no município de São Sebastião do Passé - BA. Para o monitoramento do trecho, este foi dividido em três segmentos de 120 metros cada, sendo o primeiro construído com solo puro, para servir de referência nas análises dos dados.

O monitoramento de campo revelou que, embora os graus de compactação da camada de revestimento primário estejam em torno de 100%, os teores de umidade de campo medidos foram significativamente inferiores aos teores de umidade ótima previstos em laboratório. Dessa forma, enquanto os teores de umidade ótima foram 9,3%, 11% e 13%, para os segmentos SP, SC e SCC, respectivamente, os dados medidos em campo durante a execução revelaram valores bem abaixo destes, ou seja, uma média de 7% em todos os segmentos, o que resultou em variações de -2,2%, -4,3% e -5,7% na umidade de compactação em campo dos segmentos SP, SC e SCC, respectivamente.

Em termos de CBR, observou-se uma queda bastante acentuada ($\approx 257\%$) nos valores quando se incluiu o resíduo cascalho de perfuração na matriz do solo, aumentando a sua expansão para próximo de 0,5%. Todavia, quando se incluiu o cimento na mistura, no percentual de 3% em massa, o material recuperou quase que totalmente sua rigidez, ficando o CBR em torno de 53%, na média. Ensaios de Módulo de Resiliência serão ser realizados, preferencialmente com amostras indeformadas coletadas do revestimento primário pronto, para possibilitar uma avaliação mais racional do comportamento tensão-deformação das misturas e a influência do cascalho na mistura com solo.

Embora tenha sido registrada uma leve queda no valor do parâmetro empírico CBR com a inclusão do cascalho de perfuração na matriz de solo, o fato de abrir-se uma alternativa concreta de aproveitamento desse resíduo na pavimentação, por si só justifica qualquer esforço no aperfeiçoamento dessa técnica alternativa. Dessa forma, a realização de novos ensaios que permitam interpretações mais racionais ajudará na obtenção de resultados que possam subsidiar conclusões mais seguras acerca do real comportamento das misturas.

O monitoramento complementar ambiental de campo, a partir da instalação de poços de monitoramento para coleta de água do lençol freático nas proximidades do trecho experimental possibilitará uma avaliação técnica fundamental acerca da viabilidade do uso do resíduo em estudo em relação a este aspecto.

Finalmente, cabe destacar que a construção desse primeiro trecho experimental utilizando o resíduo cascalho de perfuração está sendo uma excelente oportunidade de aprendizado para todos os envolvidos, que fornecerá um ótimo *feedback* para a construção dos próximos.

8. Agradecimentos

Agradecimentos ao CENPES / Petrobras que financia a presente pesquisa, e à equipe de E & P da Unidade Taquipe da Petrobrás, base São Sebastião do Passe – BA.

9. Referências

- ALMEIDA, A. (2009). Comunicação Pessoal durante visita à Unidade Taquipe da Petrobrás. São Sebastião do Passé-BA.
- ALVES, M. R. F. V. Reciclagem de borra oleosa: uma contribuição para a gestão sustentável dos resíduos da indústria de petróleo em Sergipe. Aracaju, SE: Universidade Federal de Sergipe, 2003. Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente. 191 p.
- CASAGRANDE, M.D.T., NASCIMENTO, D.R., LIMA, C.S., SOARES, J.B. (2006). Estudo da Aplicabilidade de Borra Oleosa Asfáltica Pura como Material para Pavimentos de Baixo Volume de Tráfego. XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, v.2. p.1100 – 1109, Brasília, DF.
- CORDEIRO, J. F. S. (2007). Estabilização química e solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E & P de petróleo, como solo para uso em camadas de base e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários. Dissertação de mestrado. PPGECA/UFCEG.
- COSTA, C. E. S. Desenvolvimento e avaliação de um produto cerâmico para construção civil aproveitando o rejeito proveniente de zinco primário. Rio de Janeiro, RJ: COPPE/UFRJ, 1998. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção. 241 p.
- GUIMARÃES, A. K. V. Extração do óleo e caracterização dos resíduos da borra de petróleo para fins de reuso. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFRN. Natal – RN. 2007. 154 p.
- NICOLLI, D.; SOARES, C. B. P. (2007). Avaliação da dispersão do cascalho de perfuração lançado em águas profundas. Disponível em <http://www.dep.fem.unicamp.br/boletim/BE09/artigo1.htm>>
- ODA, S. Análise da viabilidade técnica do uso de solo contaminado com óleo e de resíduos da produção de petróleo como material para pavimentação asfáltica. Projeto Taquipe submetido à Petrobras, 2008.
- MARTINS, A. A. B., RABELO, S. K. L. e FREIRE, M. G. M. (2008). Estudo de caso aplicado ao gerenciamento de resíduos sólidos em instalações marítimas de produção de petróleo da Bacia de Campos. *Perspectivas Online*, vol 5. Nº 2, pp. 117-134.
- MEEGODA, N. J., DUBOSE, B. MUELLER, R. T. & CHEN, Y. (1993). Petroleum Contaminated Soils in Hot Mix Asphalt Concrete – An Overview, *Waste Materials in Hot-Mix Asphalt*. pp 183-194.
- MEEGODA, N. J., HUANG, D. R., DUBOSE, B. & MUELLER, R. T. (1992). Use of Petroleum Contaminated Soils in Asphalt Concrete, *Lewis Publisher*, Chapter 31, pp 529-536.
- ONOFRE, F. C., LOPES, M. M., CASTELO BRANCO, V. T. F. e SOARES, J. B. (2009). Aplicação de Solo Contaminado por Petróleo em Misturas Asfálticas. XVI Reunião de Pavimentação Urbana, Belo Horizonte/MG. CD-Room.
- ROJAS, J. W. J. Estudo de Remediação de Solo Contaminado por Borra Oleosa Ácida Utilizando a Técnica de Encapsulamento. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- ROJAS, J. W. J., CONSOLI, N. C. e HEINECK, K. S. (2007). Aplicação da Técnica de Encapsulamento em um Solo Contaminado com Borra Oleosa Ácida. *Revista de Estudos Ambientais – REA*. Vol. 9, Nº 02, pp. 6-15.
- SILVA, F. A. N. Microestrutural e Avaliação Ambiental de Cerâmicas Argilosas com Incorporação do Resíduo Borra de Petróleo Encapsulada. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. 2000.
- SANTOS, R. S., SOUZA, G. P. e HOLANDA, J. N. F. (2002). Caracterização de massas argilosas contendo resíduo proveniente do setor petrolífero e sua utilização em cerâmica estrutural. *Revista Cerâmica*, vol. 48, Nº 307, pp. 115-120.
- SOUZA, G. P. e HOLANDA, J. N. F. (2003). Comportamento de sinterização de massas argilosas contendo resíduo proveniente do setor petrolífero. *Revista Cerâmica*, vol. 49, Nº 307, pp. 128-132.