

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Patrício José Moreira Pires**

**Utilização de Cascalho de Perfuração de Poços de  
Petróleo para a Produção de Cerâmica Vermelha**

**TESE DE DOUTORADO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação  
em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito  
parcial para a obtenção do título de Doutor em  
Engenharia Civil.

Orientador: José Tavares Araruna Júnior

Rio de Janeiro, Julho de 2009



**Patrício José Moreira Pires**

## **Utilização de Cascalho de Perfuração de Poços de Petróleo para a Produção de Cerâmica Vermelha**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. José Tavares Araruna Júnior**

Presidente/Orientador  
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Gustavo Ferreira Simões**

Departamento de Engenharia Civil - UFMG

**Prof. Jonas Alexandre**

Departamento de Engenharia Civil - UENF

**Prof. Paulo César de Almeida Maia**

Departamento de Engenharia Civil - UENF

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de julho de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Patrício José Moreira Pires

Engenheiro Civil formado pela UFPB. Concluiu o mestrado em Engenharia Civil em 2004, com o Desenvolvimento de um sistema de Dessorção Térmica *In Situ* para Remediação de Materiais Contaminados por Hidrocarbonetos de Petróleo pela PUC-Rio. Atua na área de Geotecnia Ambiental como engenheiro de pesquisas da PUC-Rio.

#### Ficha Catalográfica

Pires, Patrício José Moreira

Utilização de cascalho de perfuração de poços de petróleo para a produção de cerâmica vermelha / Patrício José Moreira Pires ; orientador: José Tavares Araruna Júnior. – 2009.

173 f. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Civil)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

CDD: 624

## Agradecimentos

Ao Professor Araruna pela valiosa orientação deste trabalho. Meu muito obrigado por sua amizade, confiança e pela agradável convivência ao longo dos últimos sete anos.

Ao incentivo financeiro da PUC-Rio, Petrobrás e a Agência Nacional do Petróleo.

Aos professores Franklin Antunes e Cláudio Amaral por estarem sempre presentes e dispostos a ajudar.

Agradeço ao professor Tácio por poder utilizar da estrutura do laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente no desenvolvimento deste trabalho e por sua amizade.

Aos professores da UENF, Jonas Alexandre e Paulo Maia pela fundamental ajuda na condução deste trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente: Amaury, Josué, Willian, David e “Seu José”.

Aos amigos das repúblicas: Aelington, Laerte, Júlio Holtz, Diego Orlando, Pecin, Zé Silvestre, Magnus, Anderson Rezende e Erblai. A esses meu respeito e agradecimento pela tão fundamental companhia.

Aos amigos de pós-graduação Rafael Gerard, Hugo Marcato, Saliba, Joabson, Guilherme Slongo, Mônica, Taíse, Tonho, Hugo Portocarrero, Saré, Ataliba, Ciro,

Leonardo Bello, Michelle, Álvaro, Gisele, Débora, Patrícia Carla e Leandro. Impossível citar todos que igualmente tiveram sua importância no desenvolver deste trabalho.

Aos amigos da minha terrinha. Leonardo Andrade, Uraíto, Wibergson, Airton, Aroldo, Jairo Pontes, Paulo Márcio, Reno, Luis, Junior, Messias, Jussara Sibeles e Renata. Mesmo distantes tiveram sua contribuição.

A Camilla, Gabriella, Tito Lívio e Ciro José, por existirem e me motivarem a ir em frente.

A Ranieri, meu irmão e meu grande amigo e a Leda, minha doce cunhada, grandes incentivadores deste trabalho. A vocês minha admiração e um muitíssimo obrigado.

A minha querida irmã Lisieux, e Tito Lívio, meu cunhado e grande amigo, pelo acolhimento, por acreditarem e pela força. Sem vocês não teria chegado aqui.

A Romero, meu irmão do coração e a sua esposa Tecla. Pela torcida e pelas grandes risadas e momentos de descontração.

Meu muitíssimo obrigado a Dé (Neta). A sua contribuição em minha formação faz com que você também seja responsável por mais esse degrau em minha vida.

A minha doce mãe Dona Terezinha. A mulher mais linda do mundo. O maior amor da minha vida. Dizer obrigado é muito pouco por tudo que a senhora e meu pai me deram. Meu eterno agradecimento e respeito.

A Juliana, meu amor. Não resta dúvida que você foi à melhor parte desta pesquisa. Obrigado pela paciência, ajuda e companhia. A nossa história está apenas começando.

A Deus por ter colocado toda essa gente em minha vida e por iluminar o meu caminho.

## Resumo

Pires, Patrício José Moreira Pires; Araruna Jr., Jose Tavares. **Utilização de Cascalho de Perfuração de Poços de Petróleo para a Produção de Cerâmica Vermelha**. Rio de Janeiro, 2009. 173p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho sugere uma alternativa inovadora para o tratamento e disposição do cascalho de perfuração, um dos mais complexos resíduos da indústria de petróleo contendo, em geral, altas taxas de sais solúveis e hidrocarbonetos. Estas características o tornam um resíduo nocivo ao meio ambiente. Neste trabalho é avaliada a incorporação de cascalho de perfuração na massa argilosa para produção de cerâmica vermelha. O método consiste no processamento industrial, realizado a elevadas temperaturas, a fim de se obter um material sólido, resistente e inerte. A incorporação de cascalho de perfuração na produção de cerâmica vermelha apresentou-se como uma alternativa economicamente viável e tecnicamente segura para o tratamento e destinação final deste resíduo. Uma vez que o processo de queima, inerente a produção de peças cerâmicas, encapsula e reduz a baixos teores os constituintes perigosos do cascalho de perfuração. Os resultados obtidos neste trabalho serviram de subsídios para a concessão de licença ambiental para utilização da técnica desenvolvida na remediação de cascalho de perfuração no Estado da Bahia.

## Palavras-chave

Cascalho de perfuração; encapsulamento; cerâmica vermelha.

## Abstract

Pires, Patrício José Moreira Pires; Araruna Jr., Jose Tavares (advisor). **The use of Drilling cutting for Red Ceramics Production** . Rio de Janeiro, 2009. 173p. Doctorate Thesis – Departamento de engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis presents an innovative treatment technique for drilling cuttings, one of the most complex wastes of the oil industry. This waste is considered hazardous due to its high salt and hydrocarbons content and poses serious threats to the environment. The treatment process involves the incorporation of drilling cuttings to the clayey soil mass used for making bricks. It consists on applying high temperatures, over 800<sup>0</sup>C, to the clayey soil mass in order to obtain a solid, resistant and inert material. The results of the experimental programme have shown that this innovative process is technical safe and economical viable. As a result, Petrobras obtained an environmental license in the city of Mata de São João , State of Bahia, to produce in a large scale red bricks using drilling cuttings incorporated to the clayey soil mass.

## Keywords

Drilling cutting; solidification/stabilization; red ceramic.

## Sumário

1.Introdução	19
1.1. Organização da tese	21
2 Revisão Bibliográfica	23
2.1. A perfuração de poços de petróleo	23
2.1.1. Um sistema de força	24
2.1.2. Sistema de suspensão	25
2.1.3. Sistema rotativo	26
2.1.4. Sistema de circulação	26
2.2. Fluido de perfuração	27
2.2.1. Os fluidos de perfuração à base de água	28
2.2.2. Os fluidos de perfuração à base de óleo	29
2.2.3. Os fluidos de perfuração sintéticos	30
2.3. Cascalho de perfuração	30
2.3.1. Propriedades físicas e mineralógicas	31
2.3.2. Propriedades químicas	33
2.3.3. Técnicas utilizadas na disposição e tratamento do cascalho de perfuração	36
2.4. Incorporação de resíduos na produção de cerâmica vermelha	43
3 Programa Experimental - Coleta e Caracterização dos Materiais	50
3.1. Trabalho de campo – coleta de materiais	51
3.1.1. Primeira Etapa - Materiais provenientes do Recôncavo Baiano para produção de peças cerâmicas	51
3.1.2. Segunda Etapa - Materiais provenientes de Alagoas e Sergipe para produção de peças cerâmicas	54
3.1.3. Terceira Etapa – Material do Recôncavo Baiano para teste de degradação acelerada	58
3.1.4. Quarta Etapa – Material do Recôncavo Baiano para incorporação em pavimentos.	59
3.1.5. Resumo dos materiais estudados	60

3.2. Caracterização dos materiais destinados a produção de peças cerâmicas	61
3.2.1. Caracterização física	62
3.2.2. Caracterização Química	66
3.2.3. Caracterização mineralógica	73
4 Programa Experimental – Produção de Cerâmica Vermelha	74
4.1. Metodologia para modelagem das peças cerâmicas	74
4.2. Propriedades tecnológicas	76
4.2.1. Absorção de água	76
4.2.2. Porosidade aparente	77
4.2.3. Retração linear	77
4.2.4. Massa específica aparente	78
4.2.5. Tensão de ruptura à flexão	78
4.3. Modelagem das peças cerâmicas	79
4.3.1. Peças confeccionadas com materiais do Recôncavo Baiano	79
4.3.2. Peças confeccionadas com materiais de Alagoas e Sergipe	81
4.3.3. Propriedades tecnológicas das peças confeccionadas	82
4.3.4. Comparativo dos resultados obtidos com dados da Indústria Cerâmica	88
4.3.5. Classificação de resíduos NBR-10.004.	90
4.3.6. Degradação acelerada das peças cerâmicas para avaliação de sua durabilidade	93
4.3.7. Teste de Queima	102
5 Conclusões e Sugestões	107
5.1. Conclusões	107
5.2. Sugestões	109
Referências Bibliográficas	110
I Anexo	116
I.I. Resultados das análises do extrato lixiviado e solubilizado para os cascalhos de perfuração utilizados.	116

I.II. Resultados das análises do extrato lixiviado e solubilizado para os solo utilizados.	130
I.III. Resultados das análises do extrato lixiviado e solubilizado para as peças cerâmicas incorporadas com cascalho de perfuração	137
II Anexo	164
II.I. Difratomogramas	164
III Anexo	172
Licença de operação para produção de cerâmica vermelha com incorporação de cascalho de perfuração a massa argilosa.	172

## Lista de Figuras

Figura 1 1 – Dique de armazenamento temporário no Campo de Carmópolis (SE)	20
Figura 2 1 – Sonda 108 da Petrobras em operação no Recôncavo Baiano.	24
Figura 2 2 – Desenho esquemático de uma sonda rotativa, (Thomas, 2001).	25
Figura 2 3 – Cascalho de perfuração estocado após processo de perfuração do poço MG-112, Campo de Miranga, Pojuca-Ba.	32
Figura 2 4 – Composição mineralógica do Cascalho do Mar Vermelho (Al-Ansary et al. 2007).	32
Figura 2 5 – Central de Resíduos do Alto Jericó - Sergipe.	37
Figura 2 6 – Sistema de controle de sólidos da MI-Swaco.	38
Figura 2 7 - Cascalho de perfuração produzido após o processo de recuperação do fluido de perfuração.	39
Figura 2 8 – Fase líquida destilada do cascalho de perfuração.	39
Figura 2 9 – Aterro controlado de Mabruk, Líbia (Morillon, 2002).	40
Figura 2 10 – Gráfico de percentagem de substituição da areia por cascalho de perfuração versus resistência a compressão uniaxial simples e perda de resistência de peças cerâmicas. Chen (2007).	41
Figura 2 11 - Peças cerâmicas produzidas por Chen (2007).	42
Figura 2 12 – Resultados de degradação de peças cerâmicas incorporadas com resíduo de granito (Xavier, 2005).	45
Figura 2 13 – Tensão de ruptura a flexão para peças cerâmicas incorporadas com resíduo galvânicas. Balaton et al.(2002).	48
Figura 3 1 – Dique de disposição do cascalho de perfuração do poço FGA 2.	51
Figura 3 2 - Detalhe da exploração na Cerâmica FEDERBA.	52
Figura 3 3 - Matéria-prima da cerâmica FEDERBA.	53

Figura 3 4 - Talude de corte onde foram coletadas as amostras de solos argilosos.	54
Figura 3 5 - Dique de armazenamento de cascalho de perfuração no Campo de Carmópolis - SE.	55
Figura 3 6 - Depósito de matéria prima na Cerâmica INCELT.	56
Figura 3 7 - Coleta de amostra na Cerâmica INCELT.	57
Figura 3 8 - Vista do Poço ANB-03.	57
Figura 3 9 - Depósito de material argiloso.	58
Figura 3 10 – Jazida no Município de Candeias – Formação Barreiras.	59
Figura 3 11 – Escória de Aciaria (CST,2009).	60
Figura 3 12 - Organograma das fases de caracterização dos materiais	62
Figura 3 13 – Curvas de distribuição granulométrica dos materiais provenientes do Recôncavo Baiano.	63
Figura 3 14 – Curvas de distribuição granulométrica dos materiais provenientes de Alagoas e Sergipe.	64
Figura 4 1 - Preparação, moldagem e queima de peças cerâmicas.	75
Figura 4 2 – Peças após processo de secagem, Materiais Santo Amaro Verde e Vermelho.	80
Figura 4 3– Peças após processo de queima, Materiais Santo Amaro Verde e Vermelho.	80
Figura 4 4– Peças após processo de secagem e queima, Material FEDERBA.	81
Figura 4 5 – Peças após a queima confeccionadas com materiais de INCELT e Bandeira.	82
Figura 4 6 - Prensa servo-controlada INSTRON modelo 5500R.	85
Figura 4 7 – Ensaio de tensão de ruptura a flexão das peças cerâmicas.	85
Figura 4 8 – Gráfico de Tensão de ruptura a flexão versus deslocamento – Material FEDERBA.	87
Figura 4 9 – Gráfico de Tensão de ruptura a flexão versus deslocamento – Material Bandeira.	87
Figura 4 10 – Gráfico de Tensão de ruptura a flexão versus deslocamento – Material INCELT.	88

Figura 4 11 – Equipamento de Degradação da UENF. Laboratório de engenharia Civil – LECIV.	94
Figura 4 12 – Amostras dentro da câmara de degradação.	95
Figura 4 13 – Distribuição das propriedades tecnológicas das peças cerâmicas produzidas com o material FEDERBA após processo de degradação.	97
Figura 4 14 – Histogramas de tensão de ruptura a flexão das peças cerâmicas.	98
Figura 4 15 – Histogramas da porosidade das peças cerâmicas.	99
Figura 4 16 – Histogramas da absorção de água das peças cerâmicas.	100
Figura 4 17 – Histograma da massa específica aparente das peças cerâmicas.	101
Figura 4 18 - Estrutura do 2,3,7,8 tetraclorodibenzodioxina e furano	103
Figura 4 19 – Sistema instalado para teste de queima.	103
Figura 4 20 – Resina XAD-2 para amostragem de Dioxina e Furanos.	104

## Lista de Tabelas

Tabela 2 1 – Composição Química do Cascalho de Perfuração produzido no Mar do Norte (Page et al., 2003).	34
Tabela 2 2 – Comparação entre o cascalho produzido no Mar do norte e no Mar Vermelho Al-Ansary et al. ( 2007).	35
Tabela 2 3 – Valores determinados no extrato solubilizado por Alves et al. (2005).	46
Tabela 3 1 – Materiais coletados no Recôncavo Baiano e nos estados de Alagoas e Sergipe	60
Tabela 3 2– Densidade dos Grãos dos Materiais Estudados	63
Tabela 3 3 - Quadro de distribuição granulométrica dos materiais estudados.	64
Tabela 3 4 - Limites de Consistência	65
Tabela 3 5 – Classificação dos solos estudados	66
Tabela 3 6 - Valores de pH	67
Tabela 3 7 – Composição química dos materiais provenientes do Recôncavo Baiano.	67
Tabela 3 8 - Composição química dos materiais provenientes de Alagoas e Sergipe.	68
Tabela 3 9 – Compostos extraídos no Extrato Sulfúrico (g/kg)	69
Tabela 3 10 - Resultado dos ensaios de complexo sortivo.	70
Tabela 3 11 - Dados de percentagem de saturação de bases e percentagem de saturação com alumínio para os materiais estudados	70
Tabela 3 12 - Resultado do ensaio de Sais solúveis.	71
Tabela 3 13 – Resumos dos parâmetros com valores acima do valor máximo permitido.	72
Tabela 3 14 – Resumos dos parâmetros com valores acima do valor máximo permitido.	73
Tabela 3 15 - Caracterização mineralógica	73

Tabela 4 1 – Peças cerâmicas confeccionadas.	79
Tabela 4 2 – Valores Obtidos nas Determinações dos Parâmetros Físicos das Peças Cerâmicas.	83
Tabela 4 3 – Desvios Padrões das Determinações dos Parâmetros Físicos das Peças Cerâmicas.	84
Tabela 4 4 - Valores de Tensão de Ruptura a Flexão das Peças Cerâmicas.	86
Tabela 4 5 – Comparativo dos resultados obtidos com as principais propriedades tecnológicas do processamento cerâmico Industrial – Peças confeccionadas com o material FEDERBA.	89
Tabela 4 6 – Comparativo dos resultados obtidos com as principais propriedades tecnológicas do processamento cerâmico Industrial – Peças confeccionadas com o material Bandeira.	89
Tabela 4 7 – Comparativo dos resultados obtidos com as principais propriedades tecnológicas do processamento cerâmico Industrial – Peças confeccionadas com o Material INCELT.	90
Tabela 4 8 - Valores obtidos no extrato solubilizado que suplantaram o valor máximo permitido.	91
Tabela 4 9 – Comparativo entre os valores determinados para o material FEDERBA, cascalho de perfuração e peças cerâmicas produzidas.	92
Tabela 4 10 - Comparativo entre os valores determinados para o material INCELT, cascalho de perfuração e peças cerâmicas produzidas.	92
Tabela 4 11 - Comparativo entre os valores determinados para o material Bandeira, cascalho de perfuração e peças cerâmicas produzidas.	93
Tabela 4 12 – Propriedades Tecnológicas das Peças Cerâmicas produzidas com o material FEDERBA	96
Tabela 4 13 - Propriedades Tecnológicas das Peças Cerâmicas produzidas com o material FEDERBA puro após processo de degradação	96
Tabela 4 14 - Tensão de ruptura a flexão antes e após processo de degradação	98

Tabela 4 15 - Porosidade antes e após processo de degradação	99
Tabela 4 16 - Absorção antes e após processo de degradação	100
Tabela 4 17 - Massa específica aparente antes e após processo de degradação	101
Tabela 4 18 – Valores da concentração de dioxinas e furanos determinados no teste de queima	105
Tabela I 1 – Análise de lixiviação do Cascalho de perfuração 129.	116
Tabela I 2 - Análise de solubilização do Cascalho de perfuração 129.	118
Tabela I 3 – Análise de lixiviação do Cascalho de perfuração 1459.	119
Tabela I 4 - Análise de solubilização do Cascalho de perfuração 1459.	121
Tabela I 5 - Análise de lixiviação do Cascalho de perfuração 223D.	122
Tabela I 6 - Análise de solubilização do Cascalho de perfuração 223D.	124
Tabela I 7 - Análise de lixiviação do Cascalho de perfuração ANB 03.	125
Tabela I 8 - Análise de solubilização do Cascalho de perfuração ANB 03.	127
Tabela I 9 - Análise de solubilização do Cascalho de perfuração CP 01	129
Tabela I 10 - Análise de lixiviação do Solo INCELT.	130
Tabela I 11 – Análise de solubilização do Solo INCELT	132
Tabela I 12 - Análise de lixiviação do Solo Bandeira.	133
Tabela I 13– Análise de solubilização do Solo INCELT	135
Tabela I 14- Análise de solubilização do Solo FEDERBA.	136
Tabela I 15 - – Análise de lixiviação das peças cerâmicas produzidas com 30% de CP01 e solo FEDERBA.	137
Tabela I 16 – Análise de solubilização das peças cerâmicas produzidas com 30% de CP01 e solo FEDERBA.	138
Tabela I 17 – Análise de lixiviação das peças cerâmicas produzidas com 05% de CP 129 e solo INCELT.	139
Tabela I 18 – Análise de solubilização das peças cerâmicas produzidas produzidas com 05% de CP 129 e solo INCELT.	141
Tabela I 19 – Análise de lixiviação das peças cerâmicas produzidas com 10% de CP 129 e solo INCELT.	142

Tabela I 20 – Análise de solubilização das peças cerâmicas produzidas produzidas com 10% de CP 129 e solo INCELT.	144
Tabela I 21 – Análise de lixiviação das peças cerâmicas produzidas com 05% de CP 1549 e solo INCELT.	145
Tabela I 22 – Análise de solubilização das peças cerâmicas produzidas com 05% de CP 1549 e solo INCELT.	147
Tabela I 23 – Análise de lixiviação das peças cerâmicas produzidas com 10% de CP 1549 e solo INCELT.	148
Tabela I 24 – Análise de solubilização das peças cerâmicas produzidas com 10% de CP 1549 e solo INCELT.	150
Tabela I 25 – Análise de lixiviação das peças cerâmicas produzidas com 05% de CP ANB e solo Bandeira.	151
Tabela I 26 – Análise de solubilização das peças cerâmicas produzidas com 05% de CP ANB e solo Bandeira.	153
Tabela I 27 – Análise de lixiviação das peças cerâmicas produzidas com 10% de CP ANB e solo Bandeira.	154
Tabela I 28 – Análise de solubilização das peças cerâmicas produzidas com 10% de CP ANB e solo Bandeira.	156
Tabela I 29 – Análise de lixiviação das peças cerâmicas produzidas com 05% de CP 223D e solo Bandeira.	157
Tabela I 30 – Análise de solubilização das peças cerâmicas produzidas com 05% de CP 223D e solo Bandeira.	159
Tabela I 31 – Análise de lixiviação das peças cerâmicas produzidas com 10% de CP 223D e solo Bandeira.	160
Tabela I 32 – Análise de solubilização das peças cerâmicas produzidas com 10% de CP 223D e solo Bandeira.	162
Tabela I 33 Análise de dioxinas e furanos realizado na resina XAD – Teste de queima realizado para as peças produzidas com o solo FEDERBA incorporado de cascalho de perfuração CP 01-.	163

