

O APROVEITAMENTO DA CINZA DE CALDEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Cláudia Barroso Vasconcellos*
Cláudio Luiz Dias Leal**
Marcelo Pereira França***
Protasio Ferreira e Castro****

Esse trabalho apresenta um estudo do potencial de aproveitamento de cinza de caldeira. No Brasil, o volume desse resíduo industrial tem aumentado significativamente devido à implementação da política de fontes geradoras de energia elétrica, que enfatiza o uso de usinas termelétricas e mais especificamente a aplicação do gás natural. O programa experimental foi desenvolvido por meio da aplicação de cinza em misturas asfálticas e em argamassas de cimento Portland. A análise estatística dos resultados dos ensaios permite afirmar que a cinza de caldeira possui potencial para ser aplicada em misturas de cimento asfáltico de petróleo e de cimento Portland.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduo industrial. Cinza de caldeira. Cimento *Portland*. Concreto asfáltico.

* Engenheira civil – CEFET Campos. E-mail: claudia@cmp.viacabocom.com.br.

** Professor - CEFET Campos. E-mail: cleal@cefetcampos.br.

*** Professor – CEFET Campos. E-mail: mfranca@cefetcampos.br.

**** Líder do grupo de Materiais Alternativos (CNPq). E-mail: pcastro@iis.com.br

1. INTRODUÇÃO

A modificação do meio ambiente por meio da atividade humana, causa impactos nem sempre previsíveis. O homem, como integrante do ecossistema, tem a qualidade de vida afetada pela própria ação. Portanto, uma política de desenvolvimento sustentável se faz necessária, não só para melhoria da qualidade de vida como também para a própria sobrevivência da raça humana.

A revolução industrial, a evolução tecnológica e a concentração urbana fizeram crescer significativamente a geração de rejeitos no século XX. Por esta razão, houve necessidade de regulamentar e determinar áreas de disposição dos rejeitos gerados. Entretanto, os problemas ambientais originados pela criação dessas áreas fizeram surgir, na população, a consciência da necessidade de preservação do meio ambiente. Em consequência, governos e sociedade impuseram medidas no sentido de compatibilizar o crescimento industrial com preservação ambiental. Nesse caso, incluíram o tratamento e aproveitamento de rejeito de uma indústria como insumo de outra, a criação de legislações ambientais mais rigorosas, a criação de organizações especializadas em preservação ambiental etc. O crescimento industrial interfere no meio ambiente, por meio da extração de matéria-prima, que após passar pelo processamento nas empresas gera rejeitos, que são dispostos em aterros sanitários criando um impacto ambiental indesejável.

Segundo Oliveira (2002), as restrições impostas pelas legislações ambientais e a conscientização cada vez maior das populações fazem com que as indústrias sejam obrigadas a administrar os rejeitos por elas gerados, o que representa uma fonte a mais de despesas.

Assim, as empresas que implantam um programa de gerenciamento de rejeitos tendem a obter vantagens com respeito à legislação, como:

redução dos impactos ambientais, redução de despesas com incineração ou deposição de rejeitos em aterros industriais, melhoria da própria imagem junto à população e até obtenção de lucro adicional, com a venda de resíduos para outras indústrias.

No entanto, é preciso ter alguns cuidados durante a utilização dos rejeitos industriais. Para Ribeiro (2002), o aproveitamento de rejeitos requer uma avaliação não só dos aspectos econômicos e tecnológicos, mas também dos aspectos legais, incluindo-se, neste caso, os aspectos de saúde pública e individual do manuseio. Assim, é necessária uma completa investigação das características dos materiais por meio de ensaios físicos, químicos e ambientais.

A NBR 10.004 - Classificação dos Resíduos Sólidos -, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), padroniza procedimentos para caracterização e classificação dos resíduos sólidos.

A Indústria da Construção Civil é uma das que mais consomem diretamente os recursos naturais. Os processos construtivos absorvem grande quantidade de pedras britadas ou ornamentais, areias, argilas e grande movimentação de vários tipos de solos no caso de construção pesada. A extração destes materiais gera impactos ambientais quase sempre irreversíveis.

O aumento da demanda por agregados para uso na construção civil traz a preocupação com a possibilidade do esgotamento dos recursos naturais e com os efeitos que a extração de agregados pode causar ao meio ambiente. Portanto, há necessidade de buscar alternativas para os materiais naturais empregados na construção civil.

A Indústria da Construção Civil apresenta um dos maiores potenciais para aproveitamento de rejeitos, não só os gerados pelos próprios processos, como também os de outras indústrias. O reaproveitamento de

resíduos industriais pela indústria da construção não é algo recente. Subprodutos do carvão, como as cinzas volantes, têm sido usados extensivamente no concreto de cimento Portland, há aproximadamente 50 anos.

No Brasil, a quantidade gerada de Resíduo de Construção e Demolição (RCD) é da ordem de 0,5 ton/hab/ano. A grande quantidade de RCD, justifica os estudos para reaproveitamento do rejeito, principalmente pelo custo elevado da deposição do mesmo em aterros apropriados. Devido a esse custo, muitas cidades brasileiras, por iniciativa das prefeituras, implantaram usinas de reciclagem de entulho, com o material aproveitado principalmente para pavimentação, construção de sub-bases, bases e revestimento primário.

Atualmente vários estudos estão sendo feitos visando o reaproveitamento do RCD em outras áreas da construção civil como argamassas, concretos, blocos etc.

Para a geração de energia elétrica em usinas termelétricas, são usados vários tipos de combustíveis. No Sul do Brasil, predomina a queima de carvão mineral e, nas outras regiões, combustíveis derivados do petróleo, gás de biodigestores, bagaço de cana e outros.

A maior parte do carvão consumido atualmente em usinas termelétricas é queimada em caldeiras de carvão pulverizado. Neste tipo de caldeira, mais de três quartos da cinza produzida é leve o bastante para ser arrastada com os gases de combustão (cinza leve ou volante), sendo a maior parte coletada por equipamentos de retenção, como precipitadores eletrostáticos. As cinzas remanescentes são densas o suficiente para não serem emitidas para a atmosfera e caem, no fundo da caldeira, fundidas em partículas maiores (cinza pesada ou residual).

Com a grande oferta de gás natural da bacia de Campos, as usinas termelétricas implantadas ultimamente no Estado do Rio de Janeiro e demais estados do Brasil, estão utilizando o combustível natural. Mesmo as centrais

mais antigas, que usavam outro tipo de combustível, foram convertidas para gás natural.

Um dos principais problemas ambientais causados por usinas termelétricas é derivado da produção de toneladas de cinzas no processo de geração de energia elétrica. Como sub-produto da queima de combustíveis naturais, as cinzas de caldeiras tornaram-se um problema para as empresas geradoras. A necessidade de retirar, a baixo custo, as cinzas da usina fez com que se adotassem práticas de disposição em áreas inadequadas e sem as medidas de proteção necessárias. A lixiviação de áreas de disposição de cinzas traz a possibilidade de que elementos como metais pesados e íons sulfato tenham acesso ao lençol freático, contaminando fontes de abastecimento atuais e potenciais.

O acúmulo de rejeitos nas centrais termelétricas gera graves problemas ambientais, além de gastos adicionais com a deposição ou incineração dos mesmos. O principal objetivo desse trabalho foi investigar a potencialidade do aproveitamento da cinza de caldeira a gás na construção civil, contribuindo para a redução do impacto ambiental e redução dos custos com o manejo do rejeito.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi desenvolvido com ensaios em misturas asfálticas e argamassas de cimento Portland. A cinza de caldeira foi utilizada em substituição ao fíler calcáreo nas misturas asfálticas. Nas argamassas de cimento Portland a cinza de caldeira substituiu o cimento Portland. O fluxograma do programa experimental é apresentado na Figura 1.

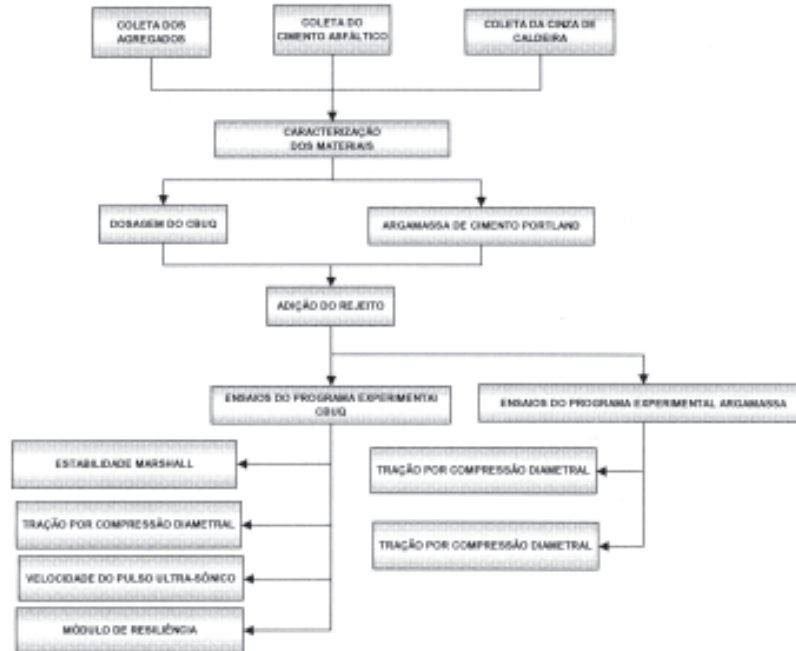


Figura 1: Fluxograma do programa experimental

No estudo das misturas asfálticas, a cinza de caldeira foi adicionada em proporções crescentes, até a completa substituição do filer calcáreo. Os percentuais usados no programa experimental foram 35, 50, 70 e 100% relativamente ao peso do filer presente na mistura de referência. Entretanto, devido à diferença de massa específica do calcáreo e da cinza, foram realizadas correções, para assegurar que as misturas possuissem o mesmo volume de filer.

O comportamento das diversas misturas de concreto asfáltico, com diferentes percentuais de cinza, foi observado por meio da realização de ensaios Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e velocidade do pulso ultrassônico (UPV).

O programa experimental também realizou ensaios em argamassas de cimento Portland, com diferentes teores de cinza. Nesse caso, após a fixação do traço de referência, foram preparadas argamassas com a cinza substituindo parte do cimento Portland. O programa experimental estabeleceu uma argamassa de controle, com 0% de cinza. Portanto, a substituição, em volume, de parte do cimento caracterizou argamassas com os percentuais 2%, 4%, 6%, 8%, 10% e 12%.

Para se avaliar o comportamento das argamassas com adição do resíduo, foram realizados ensaios de resistência à compressão aos 28 dias e ensaios de tração por compressão diametral, ambos obedecendo aos procedimentos da NBR 7215.

2.1. ENSAIO DE ESTABILIDADE MARSHALL

Para o ensaio, os corpos de prova de concreto asfáltico são colocados em um banho-maria a 60° C por 30 minutos. Após esse período, eles são transferidos para o molde de ruptura, já aquecido, e levados à prensa Marshall onde são submetidos a um carregamento com velocidade de 5 cm por minuto, até o rompimento. O valor da leitura, no instante do rompimento, é anotado para o cálculo da estabilidade. O resultado final é a média dos resultados de pelo menos 3 corpos de prova, expresso em N (kgf). A descrição detalhada do método de ensaio encontra-se no DNER ME 043/95.

2.2. ENSAIO DE TRAÇÃO INDIRETA

Nesse método, a carga vertical é aplicada ao longo da geratriz do cilindro, fazendo com que ele fique sujeito a uma tensão de tração horizontal.

Para o ensaio com misturas asfálticas é usada a prensa Marshall. Os corpos de prova devem ser mantidos em estufa na temperatura adotada para o ensaio: 25°, 30°, 45° ou 60°C. Na pesquisa a temperatura de ensaio foi 30° C.

São necessários dois frisos metálicos curvos, interpostos entre o corpo de prova e os pratos da prensa, com objetivo de garantir a distribuição do carregamento ao longo das duas geratrizes opostas do corpo de prova.

O corpo de prova é submetido a um carregamento com velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até a ruptura.

A resistência à tração é determinada pela expressão:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DH}$$

onde:

- σ_t - resistência à tração;
- F - carga de ruptura;
- D - diâmetro do corpo de prova;
- H - altura do corpo de prova.

O método de ensaio usado para determinação da resistência à tração do concreto asfáltico foi o DNER ME 138/94.

2.3. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O módulo de resiliência de um concreto asfáltico, é definido como a relação entre a tensão de tração normal ao plano vertical e a deformação específica resiliente neste mesmo plano, numa determinada temperatura (DNER ME 133/ 94).

$$MR = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}, \text{ onde:}$$

MR – módulo de resiliência;

σ_i – tensão de tração;

ε_i – deformação específica recuperável.

O equipamento mostrado na Figura 2 pertence ao Laboratório de Materiais do CEFET Campos.



Figura 2: Equipamento triaxial dinâmico

Para a realização do ensaio, o corpo de prova é colocado num gabarito apropriado, onde são montados os dois transdutores eletromecânicos do tipo *Linear Variable Differential Transducer* (LVDT). Depois, o corpo de prova é colocado no pórtico e o conjunto levado para câmara termostática, onde permanece na temperatura de ensaio por duas horas (Figura 3). Na pesquisa a temperatura de ensaio foi 30° C.



Figura 3: Câmara termostática

Na primeira etapa do ensaio, para se determinar a menor carga capaz de fornecer um registro no oscilógrafo, aplica-se uma carga vertical repetida por 200 vezes. Essa fase é a de condicionamento do corpo de prova. Em seguida são feitas 300, 400 e 500 aplicações da carga vertical.

O módulo de resiliência é a média dos valores correspondentes às aplicações dessas cargas.

2.4. VELOCIDADE DO PULSO ULTRA-SÔNICO

O ensaio de velocidade do pulso ultra-sônico baseia-se na variação da velocidade de propagação da onda sonora por meio de um meio sólido. Trata-se de um ensaio não destrutivo, que determina homogeneidade, vazios, fissuras, o módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de Poisson.

O aparelho é constituído por um gerador e um receptor de pulso, dois transdutores (transmissor e receptor), um circuito medidor de tempo e um mostrador para leitura do tempo de propagação da onda (Figura 4).



Figura 4: Ensaio de velocidade do pulso ultra-sônico

A primeira fase do ensaio é a calibração do aparelho com uma barra metálica, já aferida. A superfície do corpo de prova deve ser plana e isenta de poeira, uma camada de vaselina ou graxa deve ser aplicada aos transdutores, para funcionar como acoplante. Depois os transdutores são arranjados, numa das três formas: transmissão direta, transmissão indireta e transmissão semi-direta. Na pesquisa, o tipo de arranjo usado foi o de transmissão direta. Para cada corpo de prova foram feitas duas leituras, sendo a velocidade final a média das duas determinações.

Para o cálculo da velocidade do pulso ultra-sônico, utiliza-se a expressão:

$$V = \frac{L}{t}, \text{ onde:}$$

V = velocidade do pulso ultra-sônico (km/s);

L = distância entre os dois pontos de acoplamento (mm);

t = tempo de propagação do pulso (μ s).

O procedimento detalhado do ensaio de velocidade de propagação da onda ultra-sônica encontra-se na norma ABNT – NBR 8802/1994.

2.5. ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND: ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS

Os ensaios de resistência à compressão aos 28 dias foram feitos segundo os procedimentos da NBR 7215/96: Determinação da Resistência à Compressão do Cimento Portland. Para tanto, foram moldados corpos de prova cilíndricos, 50 X 100mm de argamassa, traço 1:3 em peso, fator água/cimento igual a 0,5, com areia padrão do Rio Tietê.

O equipamento utilizado para o ensaio foi uma Prensa Versa Tester (Figura 5), com uma velocidade de aplicação de carga igual $0,25 \pm 0,05$ MPa/s. O valor da resistência é determinado pela fórmula:

$$f_c = \frac{\text{carga (kgf)}}{\text{área do CP (cm}^2\text{)}} \times 10^{-1} \text{ (MPa)}$$

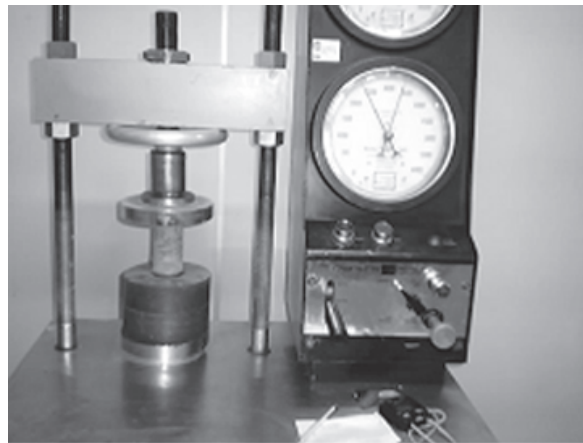


Figura 5: Ensaio de resistência à compressão

3. RESULTADOS E ANÁLISES

A seguir são apresentadas as planilhas com os resultados dos ensaios para adição da cinza de caldeira ao concreto asfáltico (Tabela 1) e a argamassa de cimento Portland (Tabela 2).

Tabela 1: Resultados de ensaios de adição de cinza de caldeira ao concreto asfáltico

Resultados (média de 3 corpos de prova)					
Tipos de mistura	Rejeito (%)	UPV (km/s)	Estabilidade (kgf)	Tração indireta (kPa)	Módulo resiliência (MPa)
Mistura de referência	0	3,78	1066	790,6	2144
Mistura com cinza de caldeira	35	3,68	1061	847,2	3423
	50	3,66	936	840,0	3658
	70	3,65	842	827,9	3184
	100	3,54	582	851,4	2978

Tabela 2: Resultados de ensaios de adição de cinza de caldeira na argamassa de cimento Portland

% de resíduos	Fc 28 DIAS (MPa)				Ft 28 DIAS (MPa)				amassadura
	I	II	III	MÉDIA	I	II	III	MÉDIA	
0	26,35	26,29	27,16	26,60	2,71	2,70	2,74	2,72	I
2	25,78	24,92	24,5	25,07	2,99	3,10	2,88	2,99	II
4	25,43	25,50	25,21	25,38	3,02	3,00	3,10	3,04	III
6	26,44	28,09	27,70	27,41	3,35	3,77	3,27	3,46	IV
8	32,28	32,76	32,35	32,46	3,87	3,78	3,19	3,61	V

Para verificar a influência da adição de cinza de caldeira a gás nas propriedades do concreto asfáltico, foram feitos testes estatísticos aplicados aos resultados dos ensaios.

Como exemplo pode-se citar o teste ANOVA fator único aplicado aos resultados da velocidade do pulso ultrasônico que forneceu os seguintes valores:

- $F_{\text{calculado}} = 19,27439$
- $F_{\text{crítico}} = 2,5396858$

$F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$, portanto a adição da cinza de caldeira a gás causa alteração significativa na velocidade do pulso ultra-sônico.

A representação gráfica da relação entre o percentual de cinza de caldeira a gás e a velocidade do pulso ultra-sônico é mostrada na figura 5.

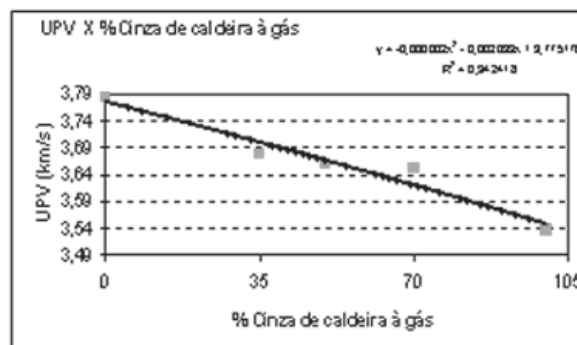


Figura 5: Relação entre UPV e % cinza de caldeira

A análise da Figura 5 mostra que a adição de cinza de caldeira a gás provoca a redução da velocidade do pulso ultra-sônico, provavelmente pelo número de vazios.

Para testar a correlação entre o módulo de resiliência e a velocidade do pulso ultra-sônico foram utilizados os seguintes modelos estatísticos:

$$MR = ae^{bv} \text{ e } MR = ae^{bv} e^{cr}, \text{ onde:}$$

MR – módulo de resiliência;

v – velocidade do pulso ultra-sônico;

a, b e c – coeficientes;

r – porcentagem de rejeito.

Para o modelo $MR = ae^{bv}$, a tabela ANOVA, da ferramenta análises de dados - regressão do Excel, forneceu os seguintes resultados:

$F_{calculado} = 1,154$ e $F_{critico} = 0,361$. Como $F_{calculado} > F_{critico}$, existe correlação entre os ensaios.

Desta forma, o modelo obtido foi:

$$MR = 328782e^{-1,28v}$$

Os resultados dos ensaios representativos com argamassa padrão ABNT demonstram, por meio da análise estatística, que existe a possibilidade da adição desse rejeito com influência significativa no que se refere à resistência da argamassa, como comprovado nos ensaios de tração diametral e resistência à compressão.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1. A análise estatística aplicada aos resultados de ensaios em corpos de prova de misturas asfálticas com adição de cinza de caldeira a gás revelou que:

- a adição da cinza de caldeira a gás altera a velocidade do pulso ultra-sônico, com o valor do pulso diminuindo à medida que se aumenta o percentual de rejeito. É provável que essa adição cause aumento do percentual de vazios do concreto asfáltico;

- a estabilidade diminui com o aumento do percentual de cinza de caldeira a gás, com os valores chegando próximo ao mínimo estabelecido pela ES 313/97 do DNER;

a resistência à tração aumenta com o aumento do percentual de cinza de caldeira a gás;

- a adição da cinza de caldeira a gás altera o módulo de resiliência. Os valores do módulo aumentam quando adiciona-se até aproximadamente

50% de cinza de caldeira a gás. A partir deste ponto, o valor do módulo diminui com o aumento do percentual de cinza de caldeira a gás, o que pode ser ocasionado pelo excesso de vazios e perda de aderência entre os materiais.

Após a análise de regressão aplicada aos modelos testados observa-se que existem correlações entre a densidade aparente e a velocidade do pulso ultra-sônico, módulo de resiliência e velocidade do pulso ultra-sônico, módulo de resiliência e tração indireta. A correlação entre o módulo de resiliência e estabilidade Marshall só existe quando acrescenta-se a variável porcentagem de rejeito.

4.2. A análise estatística aplicada aos resultados de ensaios em corpos de prova de argamassa de cimento Portland com adição de cinza de caldeira a gás revelou que:

- a adição de cinza de caldeira a gás às argamassas de cimento Portland numa proporção de até 8% do volume do cimento provoca um aumento significativo na resistência à tração por compressão diametral;

- a adição de cinza de caldeira a gás às argamassas de cimento Portland numa proporção de até 8% do volume do cimento provoca um aumento significativo na resistência à compressão axial.

Por esta análise conclui-se que a cinza de caldeira a gás deve ser estudada como agregado em argamassa de revestimento e na produção de pisos de baixo custo. Nesse caso, sugere-se usar aditivo nas misturas para obter-se uma trabalhabilidade adequada.

Applying gas furnace ash in civil construction

Cláudia Barroso Vasconcellos
Cláudio Luiz Dias Leal
Marcelo Pereira França
Protasio Ferreira e Castro

The present work shows a study on the potential use of gas furnace ash. In Brazil, the volume of that industrial residue has been increasing significantly in the last decade. The implementation of government facilities for generating electric power, mainly on the use of natural gas reserves sources, is considered as responsible for that increasing volume. An experimental program was developed by adding gas furnace ash to Portland cement mixtures and applying that as filler in asphalt mixtures. Portland cement mortars behavior was assessed by absorption, splitting and compression tests. Indirect traction, resilience modulus, Marshall and ultrasonic pulse velocity tests were carried out on asphalt mixtures. Statistical analysis applied to the test results shows that gas furnace ash presents a significant potential to be used in Portland cement and asphalt mixtures.

KEYWORDS: *Industrial residue. Gas furnace ash. Portland cement. Asphalt mixtures.*

REFERÊNCIAS

OLIVEIRA, T. M. **Rejeito em Plástico:** Um Estudo do Potencial de Aplicação na Construção. Niterói, 2002. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2002.

RIBEIRO, C. S. C. **A Potencialidade do Uso do Carvão Vegetal em Artefatos de Concreto.** Niterói, 2002. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**:
Determinação da resistência à compressão do cimento Portland. Rio de
Janeiro: ABNT, 1996.

_____. **NBR 8802**. Concreto Endurecido – Determinação da Velocidade
de Propagação de Onda Ultra-Sônica. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

_____. **NBR 10004**. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro:
ABNT, 1987.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM –
Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall – Método de
Ensaio, DNER ME 043/95. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **Misturas Betuminosas** – Determinação da Resistência à
Tração por Compressão Diametral – Método de Ensaio, DNER ME 138/
94, Rio de Janeiro, 1994.

_____. **Misturas Betuminosas** – Determinação do Módulo de
Resiliência – Método de Ensaio, DNER ME 133/94, Rio de Janeiro, 1994.