

Aproveitamento da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como filer em concreto asfáltico

Applying sugar cane pulp ashes as filler to asphalt concrete

Cláudio Luiz Dias Leal*
Protasio Ferreira e Castro**

A geração, o manuseio e o armazenamento seguro de resíduos sólidos têm se tornado uma grande preocupação no Brasil. O principal objetivo desse estudo foi investigar a potencialidade do uso da cinza do bagaço de cana de açúcar como filer em misturas asfálticas. O comportamento das misturas foi caracterizado por meio de um programa experimental utilizando diferentes teores de resíduo e os ensaios de estabilidade Marshall, tração indireta, módulo de resiliência e velocidade do pulso ultra-sônico. A análise estatística aplicada aos resultados dos ensaios mostrou que a cinza do bagaço de cana pode ser usada como filer em misturas betuminosas.

The generation, handling and safe disposal of solid wastes has become a major concern in Brazil. The primary objective of this study was to investigate the feasibility of using sugar cane pulp ashes as filler to asphalt mixtures. The mixture's behavior was characterized through an experimental program consisting of different industrial waste content and several test methods: Marshall stability, diametral indirect tensile test, resilient modulus and ultrasonic pulse velocity. Statistical analyses applied to the test results showed that sugar cane pulp ashes can be used as filler in bituminous mixes.

Palavras chave: Cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Módulo de resiliência. Concreto asfáltico. Filer.

Key words: Sugar cane pulp ashes. Resilient modulus. Asphalt concrete. Filler.

1 Introdução

O mau estado das rodovias brasileiras aumenta significativamente o custo de produtos nacionais, fazendo com que o país perca competitividade no mercado internacional. A busca por novos materiais, técnicas de projeto e construção é fundamental para melhorar o desempenho das rodovias, em resposta ao aumento do número de solicitações impostas pelo volume crescente de tráfego e maior peso dos veículos.

O concreto asfáltico pode ser o material de maior custo, em um pavimento flexível, portanto, a substituição de um de seus componentes, ou parte deles, por resíduos

* Mestre em Engenharia Civil. Professor e Pesquisador do Núcleo de Pesquisa Aplicada à Arquitetura e Construção Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos – RJ. E-mail: cleal@cefetcampos.br.

** Doutor. Centro Universitário de Volta Redonda UNIFOA. E-mail: pcastro@iis.com.br.

industriais pode contribuir para redução de custo sem alterar significativamente as suas propriedades, além de diminuir o impacto ambiental causado pela necessidade de áreas específicas para deposição dos resíduos.

Este trabalho mostra o uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como filer no concreto asfáltico. Para verificar a possibilidade do uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como filer, um programa experimental foi desenvolvido.

Nos últimos anos, o conceito de desenvolvimento sustentável tem sido cada vez mais aplicado pelos setores produtivos. A consciência de que o gerenciamento dos resíduos é uma questão estratégica para as empresas tem levado muitos pesquisadores a buscar alternativas para o aproveitamento dos resíduos industriais.

A Indústria da Construção Civil apresenta um dos maiores potenciais para aproveitamento de resíduos não só os de seus próprios processos, como também os de outras indústrias. Na pavimentação, alguns resíduos já são usados com sucesso como o resíduo de construção e demolição (RCD), cinza volante, material fresado de revestimentos, grânulos de pneus, escória de aciaria, etc.

A cana-de-açúcar é uma gramínea originária da Ásia, cultivada em países tropicais e subtropicais, usada para produção de açúcar e álcool (MACHADO, 2000). Os principais produtores mundiais são o Brasil, Cuba, Índia, México e China (FAUCONNIER; BASSEREAU, 1975; ALVAREZ, 1975; STAEL, 1997). Hoje o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma área plantada de aproximadamente 5 milhões de hectares, além de possuir o maior programa de energia renovável do mundo.

Durante o processamento da cana-de-açúcar para fabricação de açúcar e álcool, são produzidas grandes quantidades de bagaço de cana. A maior parte do bagaço é usada para geração de energia térmica e elétrica, tornando a indústria sucroalcooleira uma das únicas a ser produtor e consumidor de energia renovável. O bagaço de cana queimado nas caldeiras das usinas de açúcar dá origem à cinza que fica em suspensão e é recuperada por arraste hidráulico.

O reaproveitamento da cinza do bagaço de cana não só poderá contribuir para redução de impactos ambientais causados pela deposição do resíduo, como também para diminuir a necessidade de exploração de novas jazidas.

2 Materiais e métodos

Inicialmente foram coletados os materiais necessários à produção do concreto asfáltico e executados os ensaios de caracterização. Depois foi feita a dosagem do concreto asfáltico, usando-se o método Marshall, para obtenção de uma mistura de referência. Por fim, foi adicionada a cinza, nos vários teores, e realizados os ensaios previstos no programa experimental, isto é, velocidade do pulso ultra-sônico, estabilidade, tração indireta e módulo de resiliência.

2.1 Caracterização dos materiais

Os agregados, cimento asfáltico e a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, utilizados nessa pesquisa, foram coletados, respectivamente, na usina de asfalto da Empresa Imbé Construções e Comércio Ltda e Usina de Açúcar São José. A Figura 1 apresenta detalhes da coleta dos materiais. Em seguida, os materiais foram submetidos a ensaios de caracterização, realizados nos laboratórios do CEFET Campos, cujos resultados encontram-se nas Tabelas 1, 2 e 3.

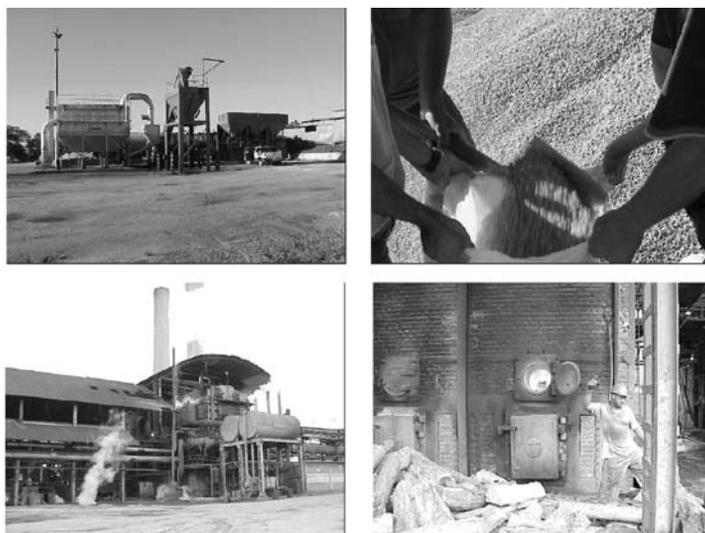


Figura 1: Coleta dos materiais

Tabela 1
Características dos agregados e resíduo

Abertura (mm)	Porcentagem passando (%)				
	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra	Filer calcário	Cinza do bagaço de cana
19	97,9	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	54,2	100,0	100,0	100,0	100,0
9,5	18,0	98,6	99,6	100,0	100,0
4,8	0,5	17,3	97,3	100,0	100,0
2,0	0,4	1,5	84,4	100,0	100,0
0,42	0,4	1,3	43,7	100,0	98,7
0,18	0,3	1,1	23,0	97,5	92,3
0,074	0,2	0,7	8,3	80,3	77,1
Índice de forma	2,0	2,0	-	-	-
Massa específica real (kg/m ³)	2736	2716	2682	2791	1951
Abrasão Los Angeles (%)	40	40	-	-	-
Equivalente de areia (%)	-	-	72,1	-	-

Tabela 2
Características do CAP 20

Ensaio	Resultado
Viscosidade absoluta (p)*	2420
Viscosidade Saybolt-Furoll a 135 °C (s)	190,9
Dutilidade a 25 °C (cm)*	>150
Penetração (0,1 mm)	54
Ponto de amolecimento (°C)	55,5
Índice de suscetibilidade Térmica	0,3
Ponto de Fulgor (°C)*	348
Densidade relativa a 25/25 °C	1,049

* Ensaio feito pelo fabricante

Tabela 3
Composição química da cinza de bagaço de cana

Composto	% no material seco
C orgânico (C)	28,1
Fósforo (P ₂ O ₅)	0,7
Potássio (K ₂ O)	2,1
Cálcio (Ca)	0,74
Magnésio (Mg)	0,35
Sílica (SiO ₂)	49,5

Fonte: GLÓRIA; MATTIAZZO; MORAES (1993).

2.2 Dosagem do concreto asfáltico e adição do resíduo

Na dosagem do concreto asfáltico, foi usado o Método Marshall, com granulometria da mistura de acordo com a faixa “C” do DNER. As características da mistura obedeceram a limites estabelecidos pela especificação DNER-ES 313/97. Assim, o traço encontrado foi: 11,4% de brita 1; 32,9% de brita 0; 51,7% de pó de pedra e 5,7% de CAP.

Após a fixação do traço de referência, foram moldados 3 corpos de prova para cada ensaio do programa experimental: estabilidade Marshall, tração indireta (compressão diametral), módulo de resiliência e velocidade do pulso ultra-sônico. O resíduo foi adicionado ao concreto asfáltico, em quantidades crescentes, até a completa substituição do filer calcário. Dessa maneira, os percentuais de resíduo foram 35, 50, 70 e 100% em relação ao filer do traço de referência. Após as adições os corpos de prova, foram submetidos aos ensaios do programa experimental.

2.3 Ensaios do programa experimental

2.3.1 Velocidade do pulso ultra-sônico

O ensaio de velocidade do pulso ultra-sônico baseia-se na variação da velocidade de propagação da onda sonora através de um meio sólido. É um ensaio não destrutivo, que determina homogeneidade, vazios, fissuras, 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.

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.

2.3.2 Estabilidade Marshall

A estabilidade Marshall, apesar de contestada por alguns autores pela dispersão dos seus resultados e confinamento do corpo de prova, ainda é um dos parâmetros mais usados, no Brasil, para dosagem e controle de qualidade de misturas asfálticas. O equipamento para realização do ensaio é relativamente simples e barato, permitindo a instalação em qualquer laboratório de campo. De acordo com o método de ensaio DNER ME 043/95, os corpos de prova 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.

2.3.3 Tração por compressão diametral

A resistência à tração do concreto pode ser determinada pelo denominado método brasileiro, proposto por Lobo Carneiro e adotado por várias instituições normalizadoras internacionais (SOBRAL, 1984). 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. No 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,

por duas horas. Nesta 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.

2.3.4 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. Para a realização do ensaio, o corpo de prova é colocado num gabarito apropriado, onde são montados os dois transdutores eletromecânicos do tipo LVDT (Linear Variable Differential Transducer). 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. Nessa pesquisa, a temperatura de ensaio foi 30 °C. A primeira etapa do ensaio, condicionamento do corpo de prova, é constituída pela aplicação de uma carga vertical repetida por 200 vezes, para determinar a menor carga capaz de fornecer um registro no oscilógrafo. A frequência de aplicação da carga é de 60 ciclos por minuto com duração de 0,10 segundo. Em seguida, são feitas 300, 400 e 500 aplicações de carga, o resultado do ensaio é dado pela média dos valores de módulo correspondentes às aplicações dessas cargas.

A Figura 2 mostra aspectos dos métodos empregados.



Figura 2: Métodos usados

3 Resultados e análises

Para testar a hipótese da pesquisa: o efeito da adição da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como filer ao concreto asfáltico, foi analisada a influência do fator controlável, adição do resíduo, nas variáveis de resposta: estabilidade Marshall, tração indireta, módulo de resiliência e velocidade do pulso ultra-sônico. Na análise, foram empregadas ferramentas estatísticas, para facilitar a compreensão do efeito das adições nas propriedades do concreto asfáltico. A tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios do programa experimental, média de três corpos de prova.

Tabela 4
Resultados dos ensaios do programa experimental

Misturas	Resíduo (%)	UPV (m/s)	Estabilidade (kN)	Tração indireta (kPa)	Módulo de resiliência (MPa)
Referência	0	3780	10,66	790,6	2144
	35	3830	8,28	903,7	2586
Cinza do bagaço de cana	50	3740	8,04	883,0	3150
	70	3720	8,39	845,5	3307
	100	3700	8,48	838,9	2816

Para verificar as possíveis alterações na estabilidade, resistência à tração e módulo de resiliência causadas pela adição da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, foi elaborado o seguinte teste de hipóteses para média:

H_0 : A adição da cinza do bagaço de cana *não altera* a característica do concreto asfáltico.

H_1 : A adição da cinza do bagaço de cana *altera* a característica do concreto asfáltico.

Nesse caso, $\alpha : 5\%$, $gl: 3$ e $t_{crítico} = 3,182$.

3.1 Velocidade do pulso ultra-sônico

A velocidade do pulso ultra-sônico, por ser um ensaio não destrutivo, permitiu a análise de uma maior quantidade de resultados. A ferramenta estatística empregada foi o teste análise de variância um fator. A hipótese testada foi:

H_0 : A adição da cinza do bagaço de cana *não causa* alteração na velocidade do pulso ultra-sônico;

H_1 : A adição da cinza do bagaço de cana *causa* alteração na velocidade do pulso ultra-sônico.

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos.

Tabela 5
ANOVA – Adição de cinza do bagaço de cana – Velocidade do pulso ultra-sônico

RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Coluna 1	12	45,81	3,8175	0,00627		
Coluna 2	12	45,93	3,8275	0,00756		
Coluna 3	12	44,84	3,736666	0,00473		
Coluna 4	12	44,55	3,7125	0,00147		
Coluna 5	12	44,43	3,7025	0,00309		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F_{calculado}</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,1676067	4	0,041901	9,05299	1,083E-05	2,53968
Dentro dos grupos	0,2545667	55	0,004628			
Total	0,4221733	59				

De acordo com a ANOVA, $F_{\text{calculado}} = 9,052$ e $F_{\text{crítico}} = 2,540$. Como $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$, a hipótese nula deve ser rejeitada, portanto a adição da cinza do bagaço de cana causa alteração significativa na velocidade do pulso ultra-sônico. Observou-se que a velocidade do pulso ultra-sônico diminui com o aumento do percentual da cinza do bagaço de cana, o que pode estar relacionado ao aumento do percentual de vazios.

3.2 Estabilidade Marshall

Nos resultados da estabilidade Marshall, $t_{\text{calculado}} = 7,618$. Já que $|t_{\text{calculado}}| > t_{\text{crítico}}$, verifica-se que a hipótese nula deve ser rejeitada, portanto, a adição da cinza do bagaço de cana causa alteração significativa na estabilidade Marshall.

3.3 Tração por compressão diametral

Para os resultados da resistência à tração, $t_{\text{calculado}} = 4,973$. Como $|t_{\text{calculado}}| > t_{\text{crítico}}$, verifica-se que a hipótese nula deve ser rejeitada, assim, a adição da cinza do bagaço de cana causa alteração significativa na resistência à tração.

3.4 Módulo de resiliência

Os resultados de módulo de resiliência mostraram que $t_{\text{calculado}} = 3,775$. Como $|t_{\text{calculado}}| > t_{\text{crítico}}$, verifica-se que a hipótese nula deve ser rejeitada, então, a adição da cinza do bagaço de cana causa alteração significativa no módulo de resiliência.

As figuras 3 e 4 apresentam as relações entre o percentual de resíduo e os ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência.

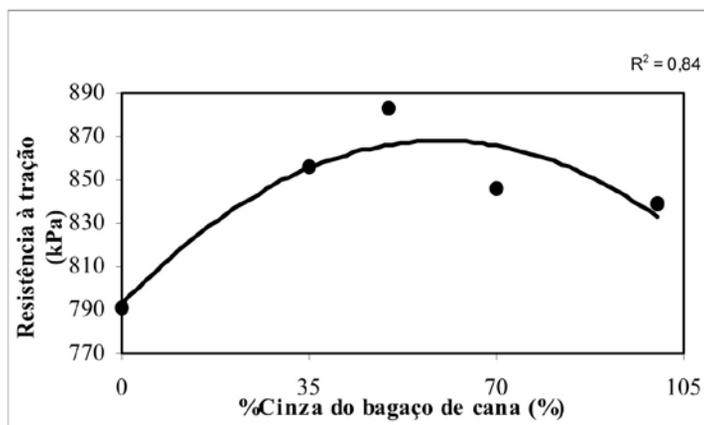


Figura 3: Resistência à tração X % Cinza do bagaço de cana

Verifica-se, após análise da figura 3, que a adição da cinza do bagaço de cana causa o aumento da resistência à tração do concreto asfáltico.

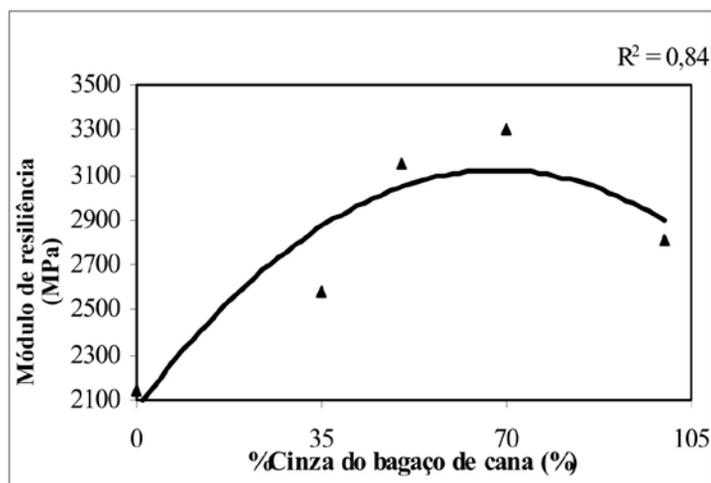


Figura 4: Módulo de resiliência X % Cinza do bagaço de cana

A análise feita a partir da figura 4, permite concluir que a adição de cinza do bagaço de cana provoca o aumento do módulo de resiliência do concreto asfáltico.

3.5 Correlações

São apresentadas, a seguir, as correlações entre os ensaios do programa experimental e os percentuais de resíduo. Foram testados dois modelos. No primeiro, fizeram-se correlações entre os ensaios do programa experimental e, no segundo modelo, acrescentou-se o percentual de resíduo.

A análise das correlações foi feita com emprego da ANOVA do Microsoft Excel. A tabela 6 mostra os resultados obtidos, onde:

- v – Porcentagem de vazios;
- u – Velocidade do pulso ultra-sônico;
- MR – Módulo de resiliência;
- t – Resistência à tração;
- m – Estabilidade Marshall;
- r – Porcentagem de resíduo;
- a, b e c – Coeficientes.

Tabela 6
Correlações para adição da cinza do bagaço de cana

Correlação	Modelo	Resultado	R ²
Módulo de Resiliência X UPV	$MR = ae^{bu}$	$MR = 3757480e^{-1,92u}$	0,33
	$MR = ae^{bu}e^{cv}$	$MR = 9628,97e^{-0,371u}e^{0,003v}$	0,50
Módulo de Resiliência X Tração Indireta	$MR = ae^{bt}$	$MR = 528,8te^{0,002t}$	0,24
	$MR = ae^{bt}e^{cr}$	$MR = 741,51e^{0,001t}e^{0,003r}$	0,61
	$MR = ae^{bt}e^{cv}$	$MR = 1007,91e^{-0,0101t}e^{0,00037v}$	0,39
Módulo de Resiliência X Estabilidade Marshall	$MR = ae^{bm}$	$MR = 9027,24e^{-0,001m}$	0,70
	$MR = ae^{bm}e^{cr}$	$MR = 6677,98e^{-0,001m}e^{0,001r}$	0,73

4 Considerações finais

As considerações apresentadas, a seguir, estão limitadas à utilização dos materiais em laboratório e quantidade de ensaios realizados. Dessa forma, a análise estatística permite afirmar que:

- a adição do cinza do bagaço de cana-de-açúcar melhora, até aproximadamente 70 %, algumas propriedades do concreto asfáltico;
- a resistência à tração aumenta com o aumento do percentual da cinza do bagaço de cana;

- o módulo de resiliência aumenta com o aumento do percentual da cinza do bagaço de cana;

Conclui-se, finalmente, que o objetivo principal dessa pesquisa, o aproveitamento da cinza do bagaço de cana como fíler no concreto asfáltico foi alcançado. Verificou-se que o aproveitamento do resíduo é tecnicamente viável, em laboratório. Como benefícios, podem-se citar: menor necessidade de exploração dos recursos naturais e a redução da necessidade de criação de novas áreas de deposição de resíduos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CEFET Campos e ao CNPq pelo apoio a essa pesquisa.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8802*: Concreto Endurecido Determinação da Velocidade de Propagação de Onda Ultra-Sônica. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. *DNER ES 313/97*: Pavimentação – Concreto Betuminoso – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 1997.

_____. *DNER ME 043/95*: Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

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

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

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. *Módulos Resilientes de Concretos Asfálticos*. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1980.

GLÓRIA, N. A. da; MATTIAZZO, M. E.; MORAES, C. J. Avaliação da Fuligem como Fonte de Potássio e Fósforo para Vegetais. CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 5, 1993. *Anais...* Águas de São Pedro, SP: STAB, 1993.

MACHADO, G. O. *Preparação e Caracterização de CMC e CMC Graftizada*. São Carlos, SP: 2000. 101p. Dissertação de Mestrado, Universidade São Paulo, Instituto de Química de São Carlos.

SOBRAL, H. S. *Propriedades do Concreto Endurecido*. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1984.

STAEL, G. C. *Preparação de Materiais Compósitos de Bagaço de Cana de Açúcar e Caraterização por Propriedades Mecânicas e RMN no Estado Sólido*. Campos dos Goytacazes, 1997. 160p. Tese (Doutorado) em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense.