

# Rendering the loss of strength in dry concretes with addition of milled asphalt through microscopic analysis

## *Interpretação da perda de resistência em concretos secos com incorporação de fresados asfálticos com apoio de análise microscópica*



T. SACHET <sup>a</sup>  
tais.sachet@lenc.com.br

J.T. BALBO <sup>b</sup>  
jotbalbo@usp.br

F.T. BONSEMBIANTE <sup>c</sup>  
francieli.tiecher@ufrgs.br

### Abstract

Milled asphalt removed from old pavement carpets requires tenable handling easily reachable through its incorporation within other paving materials. This work deals with the effects of such incorporation to dry compacted concretes. Fine, intermediate, coarse and whole portions of milled asphalts were blended to a reference concrete. Mechanical tests disclosed remarkable losses on its strengths and modulus of elasticity; for the stereoscope and scanning microscopy pointed out impaired transition zones between the cement paste and the milled aggregates involved by thin asphalt films. Nevertheless, the mechanical results shown that the concretes with incorporated milled asphalt aggregates are suitable for use in pavement layers as bases and sub-bases even with reduced mechanical parameters.

**Keywords:** dry concrete, milled asphalt, strength, modulus of elasticity, microscopy, aggregate-paste interface.

### Resumo

Os fresados asfálticos são resultantes da fresagem de revestimentos asfálticos, sendo desejável seu manejo sustentável, o que pode ser alcançado incorporando-os em outros materiais de pavimentação. Neste trabalho foram estudados os efeitos de sua incorporação em concretos secos (compactados). Frações de fresados nas faixas de miúdos, pedriscos, britas e sua fração total foram incorporadas ao concreto de referência. Ensaios mecânicos mostraram relevantes perdas de resistência e de módulo de elasticidade desses concretos incorporando fresados. Análises com lupa estereoscópica e microscópio eletrônico de varredura mostraram que a interface entre o agregado fresado e a pasta de cimento foi prejudicada pela presença do filme asfáltico envolvendo os fresados. Muito embora a incorporação dos fresados ao concreto seco reduza a sua resistência bem como outros parâmetros mecânicos, o concreto resultante pode ainda assim ser utilizado como base e sub-base de pavimentos.

**Palavras-chave:** concreto seco, fresados asfálticos, resistência, módulo de elasticidade, microscopia, interface pasta-agregado.

<sup>a</sup> LENC Engenharia Ltda., São Paulo, SP, Brasil

<sup>b</sup> Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, SP, Brasil

<sup>c</sup> Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Departamento de Materiais de Construção Civil, Porto Alegre, RS, Brasil

## 1. Introdução

A produção de materiais fresados asfálticos (*milled asphalt*, também designados por *reclaimed asphalt pavement*) provenientes de restauração de vias e rodovias é bastante relevante [1], exigindo políticas específicas quanto à destinação final desses materiais. Os fresados são resultantes do desmonte de revestimentos asfálticos com fresadoras de cilindros com pinos. Suas características típicas são a presença de filme asfáltico envolvendo as frações dos agregados bem como grumos resultantes da aglomeração de partículas de diferentes diâmetros por ligante asfáltico que não foram fracionadas durante sua remoção por fresadora.

Embora nos países tecnologicamente mais desenvolvidos os fresados asfálticos sejam material básico para reciclagem de misturas asfálticas envelhecidas, há inúmeros relatos de pesquisas

anteriores que procuravam avaliar as consequências de sua presença como agregado alternativo em concretos plásticos [2, 3, 4, 5], verificando seus efeitos na mistura tendo em vista sua incorporação em concretos para pavimentação. De natureza essencialmente laboratorial, essas pesquisas ensejaram estudar concretos com incorporação dos fresados asfálticos, avaliando parâmetros mecânicos. Em todos esses estudos anteriores foi constatado que qualquer quantidade de fresados adicionada ao concreto causa redução em sua resistência e em seu módulo de elasticidade.

Em estudo previamente publicado, com resultados parciais, foram apresentados os efeitos de incorporação de fresados asfálticos em concretos secos para pavimentação, geralmente designados por concreto compactado com rolo [6]. De acordo com o *American Concrete Institute* [7] o concreto compactado com rolo (CCR) é um concreto de consistência bastante seca de tal sorte que seu aden-

Figura 1 – Faixas granulométricas de Pittman & Ragan (1998) e do CCR padrão

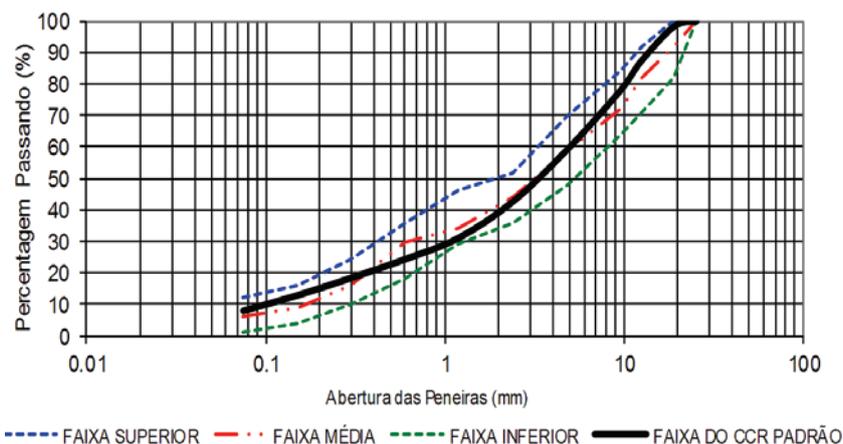


Figura 2 – Distribuições granulométricas do fresado asfáltico antes e após a extração de ligante

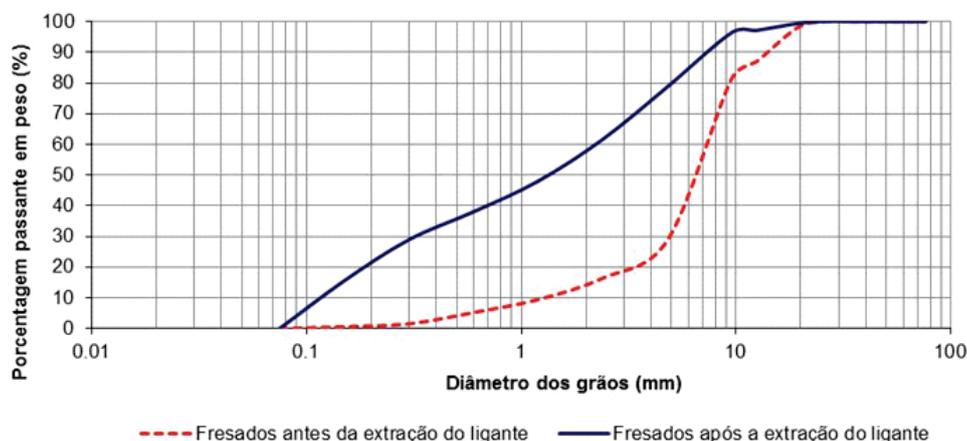


Figura 3 – Fresado peneirado nas frações fina, média e grossa (da esquerda para direita)



samento pode ser facilmente realizado por rolos compressores metálicos; outra particularidade é que em CCR o consumo de cimento é geralmente inferior àquele dos concretos plásticos empregados em pavimentação de concreto. O CCR tem ampla aplicação em pavimentos asfálticos e de concreto, como base de pavimentos, possuindo vantagens importantes em relação a outros materiais como a brita graduada tratada com cimento e o solo-cimento.

As misturas de CCR com incorporação de fresados aqui apresentadas foram submetidas a análises microscópicas por MEV e ótica, com o intuito de avaliação da presença de filmes asfálticos sobre agregados e zonas de transição prejudicadas, como maneira de elucidar as perdas ocorridas em termos de resistência e módulo de elasticidade em relação a concreto seco de referência empregado no estudo.

## 2. Tipos de CCR estudados em laboratório e seus constituintes

A investigação laboratorial sobre os efeitos da incorporação de fresados em CCR tomou como referência a montagem de misturas com distribuição granulométrica atendendo as recomendações de Pittman e Ragan [8] que estudaram os aspectos relacionados à re-

tração desses materiais, objetivando misturas menos retráteis. Tal distribuição granulométrica é apresentada na Figura 1, em termos de distribuição superior, média e inferior; juntamente com essas faixas é indicada a faixa granulométrica adotada para a mistura de referência com agregados virgens e sem incorporação de fresados asfálticos, bem graduada e tendendo à curva média indicada. Para a elaboração das misturas foram empregados materiais britados (brita 1, pedrisco e pó de pedra) provenientes da Pedreira Cantareira (SP), areia limpa de rio e o ligante hidráulico CP III-RS-40. A água de amassamento foi potável fornecida na rede de distribuição de São Paulo. O fresado asfáltico foi extraído na Via Anchieta, km 39, sentido Litoral-São Paulo, no momento de sua extração com fresadora, sendo na Figura 2 apresentadas suas distribuições granulométricas, antes e após a extração do ligante asfáltico envolvente. Os fresados asfálticos seriam empregados, evidentemente, sem extração do ligante asfáltico envolvente e portanto, com distribuição de grãos mais tendendo à uniformidade. Tais fresados asfálticos foram posteriormente classificados com separação em três faixas de diâmetros: graúdos ou brita 1 (de 9,5 a 19 mm), médios ou pedrisco (de 2,4 a 9,5 mm) e a fração de finos ou areia (com diâmetro inferior a 2,4 mm), conforme mostrado na Figura 3. A substituição dos agregados naturais por agregados fresados

Tabela 1 – Composição granulométrica das misturas de CCR

Mistura	Composição	Agregados naturais (%)	Agregados fresados (%)
CCR1	CCR referência com areia industrial	100	–
CCR2	CCR com areia de natural de rio	100	–
CCR1-FA	CCR com substituição de 100% do pó de pedra por fresados na faixa de finos (<2,4mm)	63	37
CCR1-FP	CCR com substituição de 100% do pedrisco por fresados na faixa dos médios (2,4 a 9,2mm)	61	39
CCR1-FB	CCR com substituição de 100% da brita 1 por fresados na faixa dos graúdos (9,2 a 19 mm)	76	24
CCR1-FT	CCR com substituição de 50% da faixa total por fresados na distribuição original	50	50

Tabela 2 – Caracterização dos agregados naturais

Parâmetro	Areia natural	Pó de pedra	Pedrisco	Brita 1
Dimensão máxima característica (mm)	4,8	2,4	9,5	19
Módulo de finura	4,018	3,507	6,814	7,967
Massa específica (kg/cm <sup>3</sup> )	2,632	2,620	2,708	2,682
Massa unitária seca (kg/cm <sup>3</sup> )	1,590	1,630	1,390	1,430

asfálticos foi realizada de tal sorte a comporem-se quatro misturas, conforme indicadas na Tabela 1. O CCR de referência é o CCR1; o CCR2 é alternativo por empregar areia de rio em sua fração fina; as misturas com fresados asfálticos são designadas por CCR1 segui-

Tabela 3 – Caracterização física do fresado

Parâmetro	Fresado graúdo*	Fresado miúdo*
Dimensão máxima característica (mm)	19,0	2,4
Densidade aparente dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,288	2,157
Absorção (%)	1,32	–
Módulo de finura	0,78	4,43

\*sem a extração de betume

do da abreviatura da fração de fresados asfálticos incorporados (a fração areia é designada por FA e assim por diante).

Para que o CCR1 apresentasse resistência à tração indireta ( $f_{t,sp}$ ) de 2,5 N/mm<sup>2</sup> os estudos prévios de dosagem resultaram em consumo de cimento de 100 kg/m<sup>3</sup> [6]. A compactação dos CCR foi realizada em moldes cilíndricos (100 mm x 200 mm) e prismáticos (100 mm x 100 mm x 400 mm). Para os corpos de prova cilíndricos a moldagem foi realizada em cinco camadas com 24 golpes por camada. Nos corpos de prova prismáticos a moldagem consistiu de duas camadas compactadas com 154 golpes cada. A energia de compactação utilizada foi a Energia Normal com soquete de 2,5 kg e altura de queda de 300 mm (NBR 7182). Nas Tabelas 2 e 3 são apresentadas algumas características físicas dos agregados empregados nos estudos.

Na Tabela 4 os índices físicos das misturas de concretos secos estudadas são indicados, sendo observados os aumentos mais relevantes na unidade de compactação quando da incorporação de frações areia ou total; para ambos os casos tem-se também as reduções mais relevantes na massa específica dos concretos. De qualquer maneira, qualquer incorporação de fresado causou redução na massa específica da mistura compactada, o que é em parte explicado pela presença de ligantes asfálticos (com densidade unitária).

### 3. Ensaio e métodos empregados

Após a cura em câmara úmida os corpos de prova foram submetidos, aos 7 e aos 35 dias de idade, ao seguintes ensaios mecânicos:

- *Ensaio de compressão diametral* de acordo com a NBR 7222 [9], realizado para determinação da resistência à tração indireta e do módulo de elasticidade;
- *Ensaio de tração na flexão* de acordo com a ASTM-C78-08 [10], realizado para a determinação da resistência à tração na

Tabela 4 – Umidade ótima de compactação dos CCR estudados

Concreto	Umidade ótima (%)	Relação a/c	$\gamma_{cs}$ (kg/m <sup>3</sup> )
CCR1	7,15	1,137	2.268
CCR2	8,05	1,196	2.258
CCR1-FA	8,40	1,334	2.046
CCR1-FP	7,30	1,159	2.130
CCR1-FB	7,50	1,175	2.148
CCR1-FT	8,20	1,302	2.048

Figura 4 – Microscópio eletrônico de varredura JOEL-JSM 6060 (à esquerda); Microscópio eletrônico



Figura 5 – Observações em lupa estereoscópica modelo Olympus BX51M



flexão e do módulo de elasticidade com medida da flecha no meio do vão da vigota; o ensaio foi realizado com um cutelo.

Os ensaios de microscopia, objeto principal desse artigo e sua discussão, teve por meta a observação da porosidade dos concretos, as possíveis alterações microestruturais pela presença de fresados asfálticos e, principalmente, a interface (zona de transição) entre agregado fresado e a pasta de cimento. Tais observações foram feitas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) por elétrons secundários (SE) e retroespalhados (BSE), bem como com emprego de lupa estereoscópica. Tais ensaios foram realizados no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (URFGS) e no Laboratório de Cerâmica (LACER) da UFRGS. Uma breve apresentação dos equipamentos e métodos é apresentada na sequência. Para as observações em MEV SE (Elétrons Secundários) foram utilizados fragmentos de seis amostras de CCR. As amostras foram previamente secas em estufa e metalizadas com névoa de ouro. Nas observações em elétrons secundários o objetivo era observar a morfologia das amostras por meio de uma leitura topográfica das amostras. O microscópio utilizado para esta análise foi o modelo JEOL JSM – 6060 (Figura 4) que microscópio opera entre 0,3 a 30 kV, com resolução de imagem de ponto de 3,5 nm, com faixa de magnificação de 18 X a 300.000 X, estágio goniométrico motorizado de 5 eixos, excêntrico em todas as posições, com inclinação de amostras de  $-10^\circ$  a  $+90^\circ$  e rotação de  $360^\circ$ . Para as análises através de MEV BSE (Elétrons Retroespalhados) as amostras foram metalizadas com névoa de carbono. O micros-

cópio utilizado foi o modelo JEOL JSM – 5800 (Figura 4). Tais amostras foram obtidas pelo corte de corpos de prova para se obter pastilhas com aproximadamente 5 mm de espessura e 10 mm de lado. As imagens obtidas por meio de elétrons retroespalhados evidenciam alterações de composição química das feições observadas através das mudanças na escala de cinza. Por isso é importante que a pastilha analisada seja o mais plana possível. Este microscópio opera entre 0,3 a 30 kV, com resolução para imagem de ponto 3,5 nm, faixa de magnificação: 18 X a 300.000 X, com estágio goniométrico motorizado de 5 eixos, excêntrico em todas as posições ( $X=125$  mm,  $Y=100$  mm,  $Z=43$  mm), inclinação de amostras de  $-10^\circ$  a  $+90^\circ$  e rotação de  $360^\circ$ , com uma pré-câmara de vácuo, sendo possível a análise química qualitativa através de espectroscopia por dispersão de energia (EDS).

As observações feitas em lupa estereoscópica, da marca Olympus BX51M (Figura 5), foram realizadas para se avaliar a porosidade das amostras e a aderência entre a pasta de cimento e o agregado fresado.

## 4. Apresentação e análise dos resultados

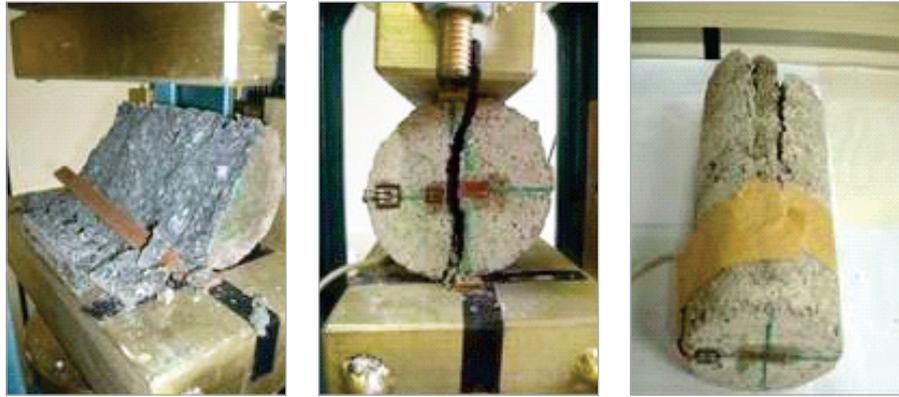
### 4.1 Ensaios mecânicos

As resistências à tração indireta ( $f_{t,sp}$ ) dos concretos estão apresentadas na Tabela 5 (para todos os resultados de ensaios mecânicos realizados são apresentados os valores médios, o desvio padrão e o coeficiente de variação), onde também são indicadas suas massas específicas. A redução dos valores das massas específicas

Tabela 5 – Valores de resistência à tração indireta dos CCR

Concreto	n	Idade (dias)	$\gamma_{as}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$f_{t,sp}$ (MPa)	sv (MPa)	cv (%)	$\Delta f_{t,sp}$ (%)
CCR1	3	7	2.425	1,15	0,07	4,7	–
CCR1	6	35	2.417	2,45	0,08	3,4	–
CCR2	3	7	2.401	1,19	0,04	3,7	3,5
CCR2	6	35	2.347	2,06	0,05	2,6	-15,9
CCR1-FA	6	35	2.248	0,96	0,04	4,1	-60,8
CCR1-FP	6	35	2.310	1,64	0,10	6,1	-33,1
CCR1-FB	6	35	2.302	1,48	0,09	6,6	-39,6
CCR1-FT	6	35	2.285	1,21	0,07	6,3	-50,6

Figura 6 – Ensaio de compressão diametral do CCR1 (foto à esquerda - ruptura abrupta) e CCR com fresado (foto central e a direita - ruptura sem separação abrupta)



das misturas com fresados fica evidente nos resultados, sendo nos concretos incorporando frações finas ou totais de fresados verificadas as maiores reduções. A queda de  $f_{t,sp}$  foi muito importante no caso de incorporação de fração areia, chegando na média a mais de 60%; a incorporação da fração total de fresados, por sua vez, reduziu em mais de 50%. As resistências à tração indireta foram, em todos os casos, afetadas de modo bastante relevante. Os resultados mostram-se coerentes com as umidades de compactação que foram maiores para os concretos CCR1-FA e CCR1-FT.

É importante ressaltar que foram observadas diferenças marcantes na forma de ruptura das amostras quando houve incorporação de fresados asfálticos. Os concretos sem fresados tiveram fraturas do tipo abruptas e cônicas, com separação do cilindro, caracterizadas pelo rompimento da argamassa. As amostras com adição de fresados tiveram as fraturas mais sutis; os cilindros não se separaram e continuaram sustentando alguma carga após a fratura inicial (Figura 6). Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão ( $f_{ct,f}$ ) são apresentados na Tabela 6 com as devidas estatísticas já men-

Tabela 6 – Valores de resistência à tração na flexão dos CCR

Concreto	n	Idade (dias)	$\gamma_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	$f_{ct,f}$ (MPa)	sv (MPa)	cv (%)	$\Delta f_{ct,f}$ (%)
CCR1	3	7	2.446	2,31	0,04	1,7	–
CCR1	6	35	2.321	4,23	0,32	8,7	–
CCR2	3	7	2.347	2,18	0,02	1,1	-5,6
CCR2	6	35	2.292	3,91	0,24	6,2	-7,6
CCR1-FA	6	35	2.269	3,78	0,10	2,9	-10,6
CCR1-FP	6	35	2.296	3,80	0,32	8,9	-10,2
CCR1-FB	6	35	2.300	2,37	0,31	11,6	-44,0
CCR1-FT	6	35	2.164	2,55	0,21	8,6	-39,7

Tabela 7 – Módulos de elasticidade em tração dos concretos

Concreto	n	Idade (dias)	$E_{sp}$ (MPa)	sv (MPa)	cv (%)	$\Delta E_{sp}$ (%)
CCR1	6	35	30.403	6.176	20,3	–
CCR2	6	35	19.029	6.285	33,0	-37,4
CCR1-FA	3	35	10.534	2.743	26,0	-65,4
CCR1-FP	2	35	7.685	1.569	20,4	-74,7
CCR1-FB	3	35	18.920	2.351	12,4	-37,8
CCR1-FT	6	35	7.038	1.570	22,3	-76,9

Tabela 8 – Módulos de elasticidade em flexão dos concretos

Concreto	n	Idade (dias)	$E_{11}$ (MPa)*	sv (MPa)	cv (%)	$\Delta E_{11}$ (%)	$E_{12}$ (MPa)**	sv (MPa)	cv (%)	$\Delta E_{12}$ (%)
CCR1	6	35	24.313	3.494	14,4	–	28.632	4.373	15,3	–
CCR2	6	35	27.540	6.126	22,2	13,3	31.357	5.779	18,4	9,5
CCR1-FS	6	35	13.394	3.216	24,0	-44,9	17.888	5.594	31,3	-37,5
CCR1-FM	5	35	12.132	1.186	17,1	-50,1	18.725	1.630	12,4	-34,6
CCR1-FC	5	35	10.416	922	8,9	-57,2	13.925	2.402	21,3	-51,4
CCR1-FT	6	35	7.972	1.453	18,2	-67,2	13.017	3.426	26,3	-54,5

\* $E_{11}$  por medida da flecha no vão central; \*\* $E_{12}$  pela curva tensão-deformação

cionadas. Durante os ensaios verificou-se a presença de grumos nas misturas, provenientes da união de grãos grossos e finos com ligante asfáltico. Evidentemente ligações dessa natureza enfraquecem o concreto; esses grumos acarretam em distribuição heterogênea dos agregados na mistura, o que também pode promover o aparecimento de zonas mais frágeis. Observa-se que o valor de  $f_{ct,f}$  (ensaio de um cutelo) é na prática o dobro do valor de  $f_{t,sp}$ . A queda de resistência não foi equânime para todos os concretos com diferentes frações de fresados incorporados; frações de areia e de pedrisco resultaram em baixa queda no valor de  $f_{ct,f}$  enquanto que frações de brita 1 ou fração total causam quedas expressivas na resistência; assim, não se mantém uma relação com os resultados observados para  $f_{t,sp}$ . Valores de módulo de elasticidade de concretos contendo fresados asfálticos apresentam quedas expressivas, conforme podem ser observadas nas Tabelas 7 e 8. A princípio essas reduções podem ser atribuídas à ocorrência de maior quantidade de vazios e heterogeneidade em concretos com fresados; deve ser entendido também que os coeficientes de variação para esse parâmetro indicam razoável dispersão nos resultados na maioria dos casos. As quedas mais importantes são verificadas nos módulos de elasticidade aferidos durante os ensaios de compressão diametral com o traçado das curvas tensão *versus* defor-

mação. Em todos os casos os concretos com incorporação de fração total de fresados asfálticos foram as amostras mais atingidas quanto a redução nos valores de módulo de elasticidade.

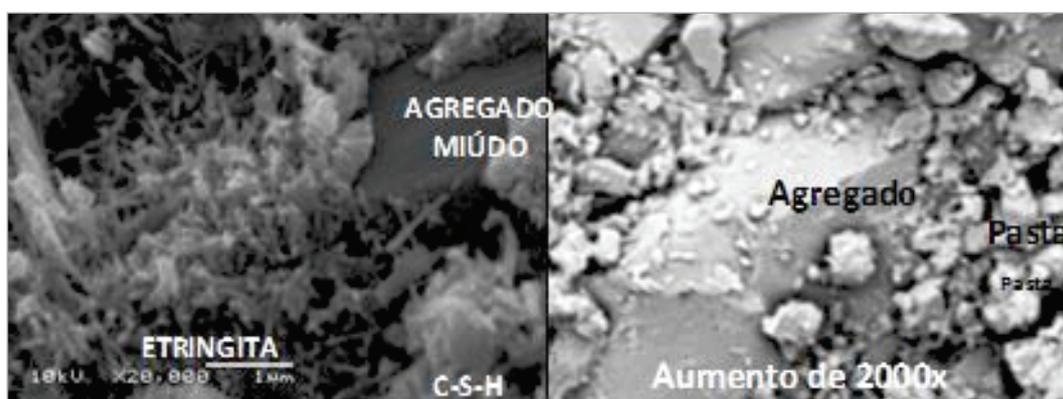
Fazendo-se juízo comparativo, os valores de módulos de elasticidade obtidos com a incorporação de fresados são indicativos de uma relevante perda de grau de liberdade dos materiais; passam a comportar-se como britas graduadas tratadas com cimento ou até mesmo como solo-cimento; mesmo assim ainda podem ser consideradas vantajosas em reação aos materiais de pavimentação citados pois apresentam resistências maiores, o que garante menores valores de relação módulo de elasticidade/resistência. Isso é indicativo de que são reais alternativas de pavimentação em relação às tradicionais bases cimentadas.

## 4.2 Interpretação das análises microscópicas

### 4.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (SE e BSE)

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada em todas as seis misturas estudadas. Como esperado, as análises com MEV permitiram a observação da zona de transição entre pasta de ci-

Figura 7 – Observações com MEV SE e BSE da mistura CCR1



mento e agregados. As imagens obtidas por meio de MEV SE das amostras de CCR mostram a presença de formações características de etringita e de outros produtos de hidratação, evidenciando que as reações de hidratação efetivamente ocorreram mesmo nos

concretos contendo agregados fresados (Figura 7). Contudo, devido às limitações desse tipo de análise, não foi possível estimar se a quantidade de etringita formada foi equivalente para todos os concretos.

Figura 8 – Observações com MEV SE e BSE na mistura CCR2



Figura 9 – Observações com MEV na mistura CCR1 – FT

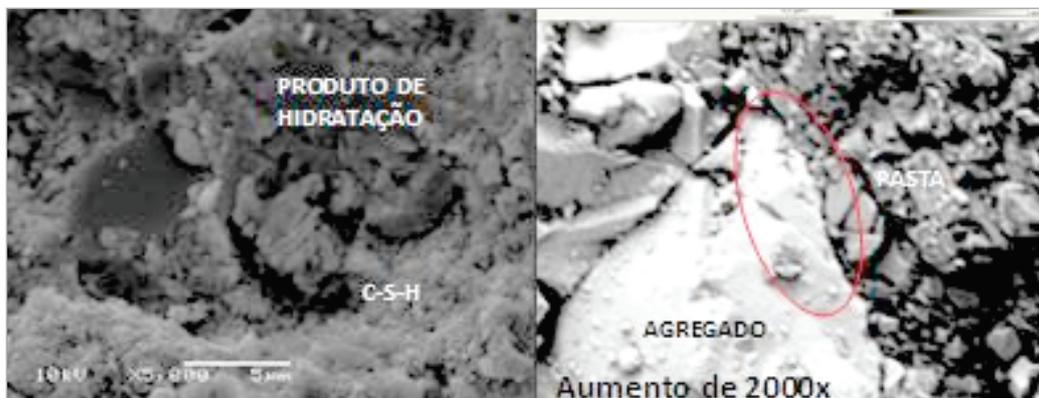
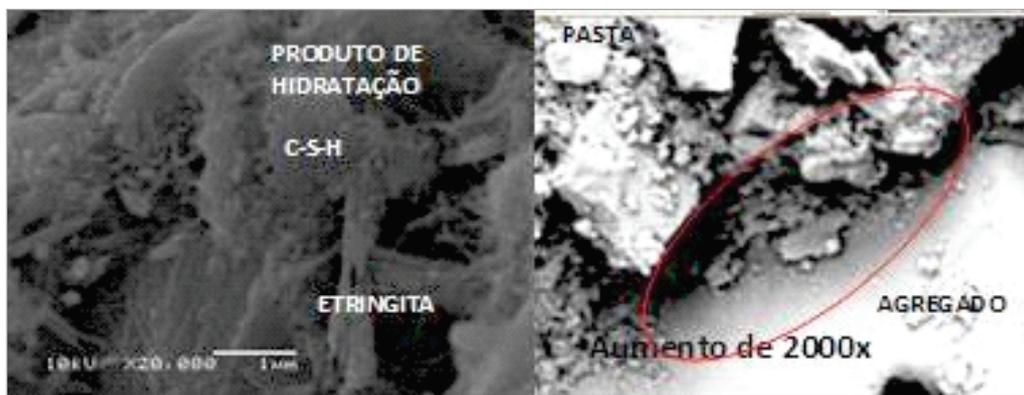


Figura 10 – Observações com MEV na mistura CCR1-AF



Figura 11 – Observações com MEV na mistura CCR1-FP



Na Figura 7 é possível observar que no concreto CCR1 a pasta é densa e não homogênea, bem como o volume de argamassa não foi suficiente para envolver os grãos; isso é típico de concretos compactados com baixo consumo de cimento. Observou-se nesta mistura a formação dos produtos de hidratação, C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e etringita. As observações com MEV BSE possibilitaram visualizar alguns aspectos importantes na zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados (Figura 8). Aparentemente, em todas as misturas existe uma tendência de falha na ligação entre pasta de cimento e agregados; isso se sobressai nos concretos com agregados fresados. A Figura 8 mostra ainda que no CCR2 a quantidade de pasta também foi insuficiente para envolver os agregados. Foi possível observar a existência de grande quantidade de vazios característicos de ar incorporado.

No concreto CCR1-FT observa-se produtos de hidratação, como por exemplo, o C-S-H. Mais importante, verificou-se que esta mistura não é densa nem homogênea (Figura 9). As imagens possibilitaram visualizar microfissuras na zona de transição entre o agregado fresado e a pasta de cimento.

Na Figura 10, que apresenta imagens da mistura CCR1-FA, observou-se a presença de poro de ar incorporado com fissuras de

retração por secagem e formação de  $C_3S$  (silicato tricálcico), um dos responsáveis pela resistência da mistura. Também foram observadas microfissuras na zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento.

Nas micrografias da mistura CCR1-FP a presença de uma pasta heterogênea é evidente, bem como a formação de monossulfato de cálcio e de C-S-H (Figura 11). A porosidade é característica importante deste concreto, verificando-se ausência de aderência adequada entre o fresado asfáltico e a pasta de cimento. A falta de aderência também é visível na mistura CCR1-BF (Figura 12). Sais de cálcio foram identificados neste caso; a zona de transição observada não era muito densa, indicando ser uma região mais frágil, resultando em concretos com menor resistência.

#### 4.2.2 Observações com lupa estereoscópica

As observações por meio de lupa estereoscópica (Figuras 13 a 18) não evidenciaram diferenças entre as amostras de concretos produzidos com agregados naturais (CCR1 e CCR2) e aquelas produzidas com agregados de fresados asfálticos. Contudo, analisando-se de maneira qualitativa, nas imagens parece ocorrer uma

Figura 12 – Observações com MEV na mistura CCR1-FB



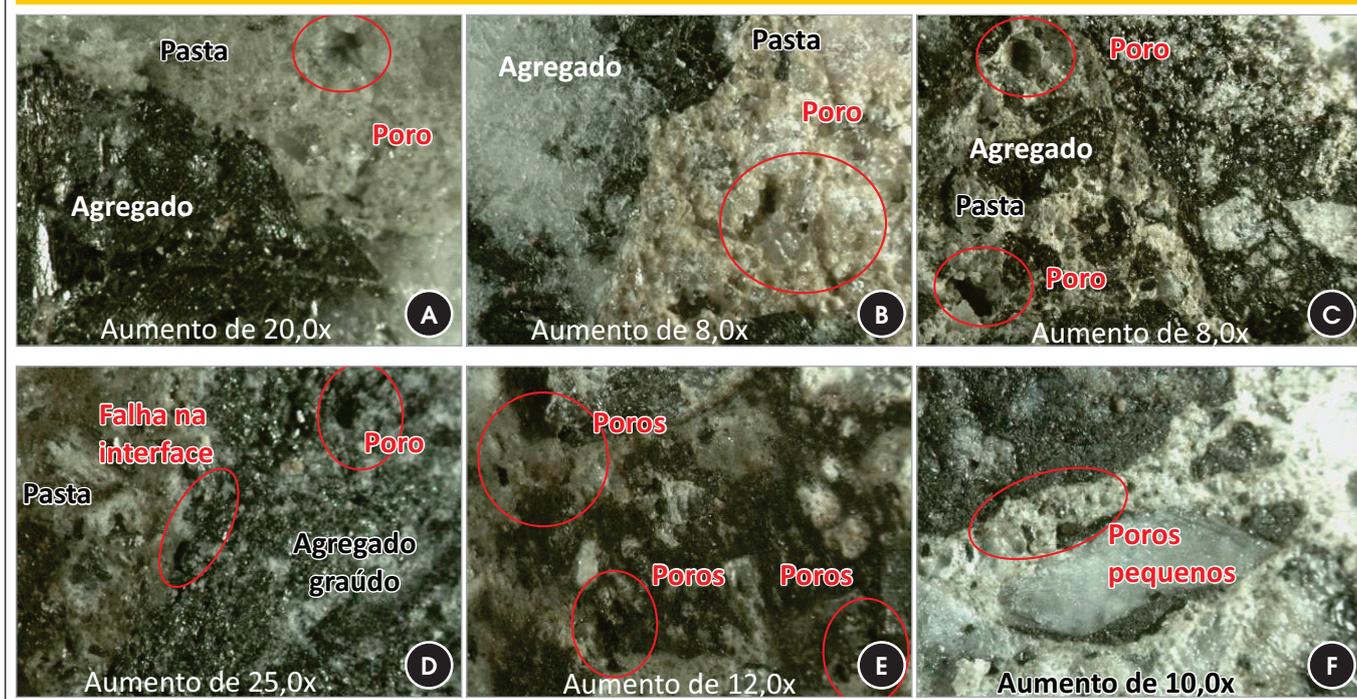
melhor ligação entre os agregados naturais e a pasta de cimento, ou seja, a menor resistência dos concretos com agregados fresados pode estar relacionada à baixa adesão mecânica das partículas do fresado asfáltico à matriz cimentícia. Desta forma, acredita-se, com o aumento na relação água/cimento (umidade) dos concretos com incorporação de fresados asfálticos, a baixa adesão mecânica nas interfaces é uma das causas, talvez a maior, que contribuíram para que os concretos com agregados fresados tenham apresentado valores de resistência inferiores.

## 5. Conclusões

O estudo realizado em laboratório para avaliar as propriedades dos concretos secos compactados, à maneira dos concretos compactados com rolo, contendo fresados asfálticos em sua composição granulométrica, permitiu que se chegasse às seguintes conclusões:

- As relações a/c dos concretos com fresados aumentaram em comparação aos concretos de referência. Este aumento foi causado pela impermeabilidade da superfície dos agregados fresados, devido à presença de filme asfáltico em torno deles. O concreto que apresentou maior relação a/c foi o CCR1-AF (com incorporação do fresado na faixa areia), seguido pelo CCR1-FT (incorporação da fração total), que resultaram as amostras mais porosas. Assim, há evidente suspeita que a presença de fração fina dos fresados exige maior consumo de água de compactação e, mantido o consumo de cimento, há queda de resistência;
- Qualquer dos concretos secos (estudados) incorporando fresados asfálticos exibem redução expressiva nas resistências à tração indireta e à tração na flexão, independente da quantidade e da faixa granulométrica dos fresados, acompanhada a queda nos valores de módulo de elasticidade;
- O concreto com incorporação de fração total de fresados asfálticos foi aquele mais atingido quanto a redução nos valores de módulo de elasticidade;
- Nos concretos incorporando fresados, a ruptura foi visivelmente diferenciada, sendo que os corpos de prova não se separaram imediatamente após a carga de pico para a ruptura; de modo oposto, os concretos sem fresados, romperam mais bruscamente na carga máxima de ruptura;
- Segundo análises microscópicas, os concretos com fresados apresentam mais vazios, fato que aparentemente interferiu na queda dos valores de massa específica;
- As observações microscópicas revelaram que mesmo com agregados fresados houve a formação de produtos de hidratação do cimento Portland nas misturas de CCR;
- As imagens de Mev foram importantes na medida em que possibilitaram a observação da interface entre a pasta e o agregado fresado. Ficaram evidentes falhas de aderência nessa zona; as observações permitiram concluir que para o concreto seco estudado a quantidade de pasta não é o suficiente para envolver os agregados (baixo teor de argamassa);
- O concreto CCR2 (com areia de rio) apresentou maior porosidade em relação ao CCR1 (com areia industrial), mas ambos foram apresentados melhor qualidade de ligação entre pasta de cimento e agregado;

Figura 13 – Micrografias obtidas por meio de lupa estereoscópica. (a) CCR1 - aumento 20X; (b) CCR2 - aumento 8X; (c) CCR1-FT - aumento 8X; (d) CCR1-AF - aumento 25X; (e) CCR1-PF - aumento 25X; (f) CCR1-BF - aumento 10X



- No concreto CCR1-FP (pedrisco) se observou durante as análises com Mev a presença de poros com formas arredondadas, ocasionados pela presença de ar aprisionado na mistura; além disso, o agregado pedrisco fresado não se rompeu com a ruptura do corpo de prova, o que se refletiu nos resultados de resistência à tração e de módulos de elasticidade, que foram maiores para essa mistura;
- As características microestruturais observadas para o concreto CCR1-FB (gráudos) são a presença de poros grandes e arredondados e agregados gráudos com relevo, que permitem concluir que a ruptura se deu na pasta de cimento e não no agregado.
- As análises microscópicas permitiram observar maior porosidade no concreto CCR1-FA, o que foi coerente com a maior umidade de compactação observada.

Quanto aos resultados mecânicos observados foi possível concluir que, embora a incorporação dos fresados nos concretos secos diminua a resistência dos concretos secos, afete todos os parâmetros mecânicos e aparentemente aumente a porosidade das misturas, ainda assim é um material que pode ser empregado como base e sub-base de pavimentos por comparação a outros materiais tradicionais como as britas graduadas tratadas com cimento e as misturas solo-cimento, pois suas propriedades ainda são melhores se comparadas aos demais. Essa conclusão é relevante na medida em que os resultados do estudo provam que a incorporação de fresados para a preparação de bases de concreto compactado com rolo é bastante viável, sendo ainda o material resultante superior em qualidade a outros materiais tradicionais. Finalmente, fica evidenciada uma possibilidade de manejo sustentável dos produtos de fresagem com seu emprego na preparação de concretos secos.

## 6. Agradecimentos

Os dois primeiros autores tiveram seu projeto de pesquisa financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, processo 473498/06-5. Os autores são gratos ao Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (URFGS) e ao Laboratório de Cerâmica (LACER) da UFRGS que viabilizaram os estudos e análises com microscopia.

## 7. Referências

- [01] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Reclaimed Asphalt Pavement. Disponível em: <<http://www.fhrc.gov/hnr20/recycle/waste/rap131.htm>>. Acesso em 03/07/2009.
- [02] DELWAR, M., FAHMY, M., TAHA, R. Use of reclaimed asphalt pavement as an aggregate in Portland cement concrete. *ACI Materials Journal*, v. 94, 3, 1997, p.251-256.
- [03] HUANG, B., SHU, X., LI, G. Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. *Cement and Concrete Research*, 35, 2005, p.2008-2013.
- [04] HUANG, B., SHU, X., BURDET, E., G. Mechanical properties of concrete containing recycled asphalt pavements. *Magazine of Concrete Research*, 58 (5), 2006, p.313-320.
- [05] HOSSINEY, N., WANG, G., TIA, M., BERGIN, M. J. Evaluation of concrete containing RAP for use in concrete pavement. *Proceedings of the Transportation Research Board Annual Meeting (Cdrom)*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2008, 13 p.
- [06] SACHET, T.; BALBO, J.T.; PINTO, P.C.; MUGAYAR, A.N.; ALBUQUERQUE, M.C.F. Incorporação de fresado asfáltico em concreto compactado com rolo. *Proceedings of the 51th Brazilian Concrete Conference (Cdrom)*, IBRACON, 2009, Curitiba.
- [07] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Roller Compacted Concrete - Authorized Reprint form Concrete International: Design and Construction*. v.9, 2, 1987, 55p.
- [08] PITTMAN, D. W., RAGAN, S. A. Drying shrinkage of roller-compacted concrete for pavement applications. *ACI Materials Journal*, vol. 95, 1, 1998, p.19-26.
- [09] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994, 3p.
- [10] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. C78-08: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), 2008.