

O EFEITO DA HETEROGENEIDADE DO AGREGADO DE ESCÓRIA DE ACIARIA NAS PROPRIEDADES DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

LMP/DET/UFC e COPPE/UFRJ

Laura Maria Goretti da Motta

COPPE/UFRJ

Jorge Barbosa Soares

LMP/DET/UFC

RESUMO

Este trabalho trata do efeito da heterogeneidade do agregado de escória de aciaria na caracterização de misturas asfálticas. Foram dosadas misturas asfálticas do tipo CBUQ com variações no tipo de compactação (manual e mecânica), no tipo de caracterização mecânica (para corpos de prova dosados no teor de projeto e para todos os corpos de prova utilizados na dosagem) e no tipo de escória utilizado (no estado bruto e separado manualmente). Os resultados encontrados (parâmetros volumétricos e mecânicos) foram comparados com os obtidos para uma mistura dosada apenas com agregados pétreos. Foram feitos ensaios de resistência à tração estática, módulo de resiliência, vida de fadiga por compressão diametral a tensão controlada e resistência à tração retida por umidade induzida. A escória de aciaria apresenta possibilidade de uso em misturas asfálticas, porém diante da natureza deste rejeito, as especificações, bem como a armazenagem deste material, precisam ser adaptadas.

ABSTRACT

This investigation is about the effect heterogeneity of steel slag used as aggregate for asphaltic pavement mixtures. Hot asphalt mixes with steel slag were designed varying the following factors: (i) mode of compaction (manual and automatic), (ii) mechanical characterization (only for mixtures at optimum asphalt content and for all specimens prepared during mix design, i.e., five different asphalt contents), and (iii) type of slag (raw material or manually selected slag). Volumetric and mechanical parameters of the mixes with slag investigated were compared to those of a controlling mix with conventional rock aggregates. Indirect tensile strength, resilient modulus, fatigue life under diametral compression and controlled stress, and retained, and retained tensile strength due to moisture-induced damage were the laboratorial tests performed. The steel slag showed potential for use in asphaltic mixtures performed. Nevertheless, given the nature of the residue, specifications and storage procedures need to be further adapted.

1. INTRODUÇÃO

A escória de aciaria juntamente com a de alto forno, soma aproximadamente 60% dos rejeitos gerados pelas indústrias siderúrgicas (Geyer, 2001). Diante do alto volume gerado, das qualidades técnicas e do baixo custo, a escória de aciaria apresenta alto potencial de uso na infra e superestruturas rodoviárias (Machado, 2000).

Desde 1970 países como Estados Unidos, Inglaterra, Japão, Canadá, França, Alemanha, Polônia e Rússia já utilizam este material em subcamadas e como agregado em camadas de revestimento de seus pavimentos. No Brasil a escória vem sendo utilizada em ruas e estradas no estado do Rio de Janeiro e em Minas Gerais há muitas décadas, e no Espírito Santo a partir da década de 80, em camadas de pavimentos e em vias não pavimentadas (Alvarenga, 2001; Silva, 1994; Silva e Mendonça, 2001).

Como desvantagens do uso da escória de aciaria em projetos de pavimentação estão a heterogeneidade do rejeito (devido à matéria-prima utilizada, ao processo de fabricação do aço, à forma de resfriamento e ao armazenamento deste rejeito), a porosidade (aumenta o consumo de cimento asfáltico e, conseqüentemente o custo), o alto potencial expansivo deste material e a formação de tufo (precipitação do carbonato de cálcio) que danifica o sistema de drenagem. A expansão é a maior causadora dos defeitos encontrados nos pavimentos que utilizaram escória de aciaria em suas subcamadas e camadas de revestimento.

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o potencial de utilização da escória de aciaria elétrica como agregado em misturas asfálticas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), em continuação ao apresentado por Cavalcante *et al.* (2003).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Cavalcante *et al.* (2003) e Castelo Branco (2004) apresentam uma extensa revisão bibliográfica sobre a escória em pavimentação. Também mostram o processo de formação deste rejeito desde a fabricação do aço, geração do rejeito, vantagens e desvantagens do uso deste material em diversos campos de aplicação (em especial na construção rodoviária), estudos já realizados com o uso de escória de aciaria e algumas características deste material. Neste trabalho atual será dada ênfase somente à produção da escória de aciaria no Ceará, visto que este estudo foi desenvolvido neste estado, com material proveniente de empresa local.

No Ceará são produzidas em torno de 120.000 t. de aço por ano, 15% em massa é de escória de aciaria. A produção cearense é considerada pequena se comparada com a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), cuja produção atinge 85.000 t. por mês (Alvarenga, 2001). A Gerdau Cearense S.A. é a única siderúrgica do Estado. Localizada em Maracanaú, distante 30 km da capital Fortaleza, utiliza o processo elétrico em seu refino.

A Gerdau Cearense S.A. utiliza como matéria-prima a sucata ferrosa e o ferro gusa, aproximadamente 90% e 10% de cada, respectivamente. A sucata é colocada em um pátio onde é separada e prensada (para sucata leve) ou cortada (para sucata pesada), com o intuito de reduzir o volume. Posteriormente este material é colocado em cestos com capacidade para dez toneladas e conduzido para os fornos através de pontes rolantes. A matéria-prima é então fundida em dois fornos. No primeiro, forno elétrico, são feitas adições de grafite, carbono e oxigênio e é gerada a escória de refino oxidante. Neste forno são gerados em torno de 80% da escória produzida. No segundo, forno panela, são feitas adições de ligas ferro-silício, ferro-manganês e cal (com a finalidade de absorver e neutralizar os óxidos ácidos que seriam responsáveis por ataques ao forno) e é gerada a escória de refino redutor. Estas adições são também feitas para ajustar a composição química do aço (Aderaldo, 2003).

A escória é transportada posteriormente para a empresa que comercializa este resíduo, Sobremetal Recuperação de Metais Ltda., localizada no estado do Ceará. Após o resfriamento que transforma a escória líquida em sólida com cor acinzentada e forma cúbica (Alvarenga, 2001), a mesma é transportada por esteiras e passada através de um eletro-ímã. Cerca de 20% da escória de aciaria é metálica e, depois de separada, é recirculada no processo.

O material é britado, transportado por meio de correias rolantes e separado nas graduações de 1", 3" e 8". A escória é estocada, pela empresa, em pilhas a céu aberto, o que provoca uma pré-expansão da mesma. Porém, o rejeito é estocado sem controle de idade e/ou de tipo, o que é um entrave à sua comercialização. Atualmente, a Sobremetal Recuperação de Metais Ltda. vende a maior parte deste rejeito para ser utilizado em aterros na capital Fortaleza. Porém, a Prefeitura Municipal de Maracanaú já utiliza este material em revestimentos primários de rodovias vicinais, com o intuito de facilitar o tráfego e diminuir a formação de poeira (Aderaldo, 2003).

Os ensaios de lixiviação (separação de certas substâncias contidas nos resíduos industriais por meio de lavagem ou percolação) e solubilização (realização de análise química de amostra representativa do resíduo, depois de dissolvido em água deionizada ou destilada e filtrado) são realizados pela Gerdau Cearense S.A. a cada seis meses (no laboratório TASQA localizado em Paulínia no estado de São Paulo), para avaliação do rejeito em relação ao seu potencial contaminante. O último relatório recebido em 2003 classifica o material como classe II, isto é, não inerte devendo ser acondicionado de maneira especial (Aderaldo, 2003).

3. OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1. Obtenção da escória de aciaria

A escória de aciaria foi obtida na Sobremetal Recuperação de Metais Ltda. Nenhum procedimento normalizado de amostragem foi realizado neste estudo. As amostras foram retiradas de locais diferentes da pilha para garantir a representatividade do material. Foram coletados 750 kg de material para os estudos de Cavalcante *et al.* (2003), Parente *et al.* (2003) e Castelo Branco (2004). A escória foi estocada a céu aberto para propiciar a cura do rejeito. O material foi disposto sobre uma lona impermeável para evitar a perda de finos. Depois de colocado sobre a lona, o rejeito foi misturado para garantir a homogeneização do material.

3.2. Caracterização da escória de aciaria

A caracterização do material está detalhada em Cavalcante *et al.* (2003). Além dos ensaios exigidos pela norma DNER – ME 262/94, foram realizados: análise química quantitativa, análise química realizada pelo Microscópio de Varredura Eletrônica (MVE), difração de raios-X e expansibilidade (PTM 130/78). O ensaio de adesividade, pelo método do DNER (ME 078/94) apontou a necessidade de utilização de 1% de DOPE, porém com o constante questionamento do meio técnico em relação à sua subjetividade, optou-se por analisar a ação deletéria da água através do método AASHTO T – 283 (Bernucci *et al.*, 1999, Moura, 2001).

3.3. Obtenção e caracterização dos demais materiais

Tanto os agregados utilizados nesta pesquisa quanto na pesquisa que serviu de comparação para este estudo (LMP, 2003) foram coletados na Pedreira Itaitinga. Esta pedreira localiza-se no município de Itaitinga, distante 30 km da capital Fortaleza. Além da escória de aciaria, este estudo utilizou em suas misturas areia de campo e filer mineral. Os agregados naturais utilizados na pesquisa comparativa foram: brita ¾” e 3/8” (granítica), areia de campo, pó de pedra e filer mineral. A areia de campo foi caracterizada através das normas DNER – ME 054/94, 084/95, 083/98 e ASTM C 128-97. O filer utilizado foi natural, proveniente da areia de campo. A densidade do mesmo foi determinada por meio do método DNER – ME 367/97.

O ligante escolhido para este estudo é classificado por penetração como CAP 50/60. Originado da Fazenda Alegre e fornecido pela Lubnor/Petrobras, o mesmo atendeu às especificações brasileiras regulamentadas pelo Departamento Nacional de Combustíveis (DNC, 1993). Este CAP pode ainda ser classificado, de acordo com as especificações Superpave, como um PG 64-28 (Soares *et al.*, 1999). O DOPE escolhido para ser utilizado foi o CAP-DOP, fornecido pela Petrobras Distribuidora S.A. (Petrobras, 2003).

4. DOSAGEM MARSHALL

A intenção inicial deste estudo foi comparar o desempenho mecânico de uma mistura asfáltica utilizando escória de aciaria como agregado com uma outra mistura asfáltica dosada com

agregados convencionais (mistura comparativa). A mistura comparativa escolhida foi uma mistura asfáltica do tipo CBUQ (LMP, 2003). Os dois tipos de misturas foram dosados segundo a metodologia Marshall. As misturas apresentam a mesma curva granulométrica em peso dos agregados, diminuindo assim o número de variáveis a serem avaliadas.

O estudo iniciou com a utilização da escória de aciaria em uma mistura asfáltica na proporção de 60% em peso do agregado mineral (Mistura 2 - M2) (Cavalcante *et al.*, 2003). Porém, nesta dosagem foi encontrada uma grande variação (até 44%) nos parâmetros volumétricos. Mesmo assim, a partir de corpos-de-prova (cps) moldados no Teor de Projeto (TP) realizou-se a caracterização mecânica desta mistura. Com relação aos ensaios de Resistência à Tração estática por compressão diametral (RT) e Módulo de Resiliência (MR) para cps moldados no TP, foram obtidos valores com menor variação. Nesta ocasião foi detectado que o material, escória de aciaria, era bastante heterogêneo, isto é, grãos com mesmo tamanho possuíam características tanto vítrea quanto porosa. Porém as dosagens continuaram sendo feitas com o material bruto, isto é, sem nenhuma separação de grãos com diferentes aspectos.

Depois de eliminado o risco de erro operacional, foram realizadas as dosagens de mais duas misturas asfálticas com escória, Mistura 1 (M1) e Mistura 3 (M3). Foram escolhidas proporções de escória abaixo e acima daquela escolhida para a M2, isto é, 80% e 40%. Os cps moldados com estes teores de escória também apresentaram grande variação nos parâmetros volumétricos. Estas misturas foram caracterizadas mecanicamente no TP e em relação a esta caracterização também houve grande variação (quantificada a seguir).

Com a intenção de pesquisar possíveis fatores causadores da variação nos parâmetros volumétricos, a compactação foi trocada de mecânica para manual. Esta mudança foi realizada para verificar se as variações encontradas não estavam associadas com problemas no compactador automático. Desta nova maneira, foram dosadas as Misturas 4 (M4) e 5 (M5) com as mesmas proporções de escória utilizadas nas M1 e M2, 40% e 60% respectivamente. As variações nos parâmetros volumétricos persistiram. Foi, contudo, realizada a caracterização mecânica destas misturas não apenas para o TP, mas para todos os teores utilizados na dosagem a fim de verificar se havia alguma tendência com relação aos demais teores. A grande variação (quantificada a seguir) nos valores de MR persistiu.

Como última tentativa de obter resultados mais homogêneos, o material foi separado manualmente, com a intenção de reduzir a heterogeneidade do rejeito, e a dosagem da Mistura 6 (M6), com 40% de escória, foi realizada. O material escolhido para ser utilizado foi aquele de aspecto poroso por ser o mais abundante, descartando-se os agregados de aspecto vítreo. Esta separação também pode ser feita em grande escala, visto que estes dois tipos de escória são vazados em dois momentos distintos do processo siderúrgico: a escória porosa é proveniente do forno de arco elétrico (chamada de escória de refino oxidante) e a escória lisa é proveniente do forno panela (chamada de escória de refino redutor). Antes da moldagem dos cps, a mistura foi condicionada durante duas horas em estufa na temperatura de mistura (160°C). Este condicionamento foi realizado para proporcionar melhor interação ligante-agregado, visto que a escória é bastante porosa. Depois destas precauções a variação nos parâmetros volumétricos diminuiu para 7,8%, valor considerado aceitável neste estudo. A M6 foi caracterizada mecanicamente, no TP, para verificação da variação dos resultados dos ensaios mecânicos. Esta última mistura foi caracterizada mecanicamente em dois laboratórios, para verificar a dispersão dos resultados para diferentes equipamentos e operadores.

4.1. Densidade Máxima Teórica (DMT)

Para o presente estudo, a DMT, além de calculada foi medida em laboratório com aplicação de vácuo, segundo os procedimentos da norma ASTM D 2041 (2000) e nesta situação passou a ser chamada de Densidade Máxima Medida (DMM).

Acreditava-se que um maior valor de DMT seria obtido com a utilização da fórmula, já que desta maneira um menor volume é considerado (Vasconcelos *et al.*, 2003), porém para este estudo isto não foi constatado. Para todas as misturas e em todos os teores de CAP, os valores calculados (DMT) foram inferiores aos medidos (DMM). A hipótese levantada foi que as diferenças estariam sendo encontradas devido à diferença entre a obtenção das densidades reais (utilizadas no cálculo da DMT) e da DMM. A DMM é obtida com utilização do vácuo e as densidades reais não. Isto estaria levando a menores valores de densidades reais destes agregados bastante porosos e conseqüentemente a menores valores de DMT (Marques, 2004).

O ensaio foi feito provocando a expulsão do ar da amostra com fervura de 15 minutos e posteriormente com pressão de 30 mm de mercúrio no equipamento Rice. O resultado encontrado (média de três determinações) para a densidade real da escória foi de 3,59. Este valor foi 8% superior ao encontrado com o procedimento convencional (3,30) (DNER – ME 081/98). Os ensaios para obtenção das densidades reais da escória miúda (passando na peneira nº 4) e da areia também foram refeitos. O procedimento convencional (DNER – ME 084/95) foi também adaptado. O valor da densidade real da escória miúda passou de 3,51 para 3,67 e da areia de 2,61 para 2,62. Como era de se esperar, as DMTs calculadas com o valor de densidade real da escória obtida com o procedimento adaptado foram superiores às calculadas com a densidade real obtida de maneira convencional. Os valores calculados foram ainda superiores aos obtidos (DMM), como era esperado e compatível com o encontrado na literatura (Vasconcelos e Soares, 2003). Estes resultados estão na Tabela 1.

Tabela 1: Valores de Densidade Máxima Teórica (DMT*) com obtenção das densidades reais de maneira não-convencional e de Densidade Máxima Medida (DMM) das M1, M2 e M3.

Teor de CAP (%)														
% Escória	5,0		5,5		6,0		6,5		7,0		7,5		8,0	
	DMT*	DMM	DMT*	DMM	DMT*	DMM	DMT*	DMM	DMT*	DMM	DMT*	DMM	DMT*	DMM
40 (M1)	2,690	2,685	2,667	2,666	2,645	2,637	2,623	2,600	2,602	2,583	2,580	2,560	2,560	2,546
60 (M2)	2,816	2,734	2,790	2,718	2,765	2,695	2,741	2,669	2,717	2,639	2,693	2,613	2,670	2,595
80 (M3)	2,980	2,929	2,966	2,897	2,922	2,895	2,906	2,849	2,876	2,838	2,847	2,808	2,819	2,786

Foram utilizados os valores de DMM, para cálculo das propriedades volumétricas. A menos da mistura M4 na qual foi utilizada a DMT por quebra do equipamento de medida da densidade no período em que esta mistura estava sendo realizada. A decisão de obter as densidades reais com o procedimento adaptado foi tomada no final da pesquisa.

Neste trabalho foi utilizada a faixa C do DNER para CBUQ. As misturas experimentais (com escória) e comparativa (com agregados naturais) se enquadram na faixa C e são semelhantes. As misturas atendem os requisitos dos pontos de controle e da zona de restrição de 12,7 mm do Superpave (Motta *et al.*, 1994). Os TPs foram baseados num valor selecionado a partir dos teores obtidos para atender os limites do DNER de Vv (3% e 5%) e RBV (75% e 82%). O

método para obtenção do TP é o descrito em Soares *et al.* (2000) e correntemente adotado pelo DNER. Os cps foram compactados com 50 golpes e as temperaturas de mistura e compactação foram obtidas a partir da viscosidade do CAP utilizado (DNER – ME 043/95).

O TP, o número de cps moldados, a maior variação encontrada no Vv e o tipo de compactação utilizado para as misturas comparativa e experimentais estão na Tabela 2. Os cps para este estudo foram moldados com uma quantidade superior a 1.200g, devido à densidade da escória. A tolerância em relação à variação de Vv e RBV foi estabelecida arbitrariamente em 10% em relação à média destes parâmetros.

Tabela 2: Características das dosagens Marshall das misturas comparativa e experimentais

	Comparativa	Mistura					
		M1	M2	M3	M4	M5	M6
TP (%)	6,4	6,2	7,0	6,7	5,7	6,2	6,2
Nº cps	10	21	60	19	24	54	30
Maior Variação (%)	7,3	84,8	44,0	42,4	25,8	100,0	7,8
Compactação		mecânica			manual		

A M6 foi a única mistura experimental em que os parâmetros volumétricos encontrados não variaram além de 10% em relação à média dos mesmos. A consistência nos resultados para esta mistura confirma que a separação do material usando somente partículas porosas da escória graúda, diminui a heterogeneidade do rejeito e, conseqüentemente, as variações nos parâmetros volumétricos das misturas. Outro fato que deve ter contribuído para os valores encontrados foi o condicionamento ao qual esta mistura foi submetida antes da compactação. A permanência da massa asfáltica em estufa (160°C) durante duas horas aumenta a interação ligante-agregado e contribui para redução das variações dos parâmetros.

Percebe-se que a dosagem de misturas asfálticas com utilização de escória deve ser reavaliada. A maneira tradicional de obtenção do TP deve ser repensada devido à heterogeneidade e a absorção do rejeito. Embora sem comparação de custos, parte do que se economiza com a redução do preço do agregado será perdido com o aumento do teor de ligante, porém há de se computar ainda o ganho ambiental não quantificado. Apesar dos resultados encontrados terem sido dispersos, para as misturas investigadas entende-se que, as dosagens realizadas são importantes por indicar que, para este tipo de mistura, a preocupação deva estar mais concentrada nos parâmetros mecânicos de que nos volumétricos.

Com a intenção de avaliar a porosidade do agregado de escória foram realizadas tomografias computadorizadas (Braz, 1993) no próprio grão do material. É possível perceber na Figura 1 que a escória é bastante porosa e apresenta até vazios internos (Castelo Branco, 2004).

Devido à alta porosidade da escória de aciaria utilizada, optou-se por avaliar o percentual de ligante absorvido pelos agregados (Roberts *et al.*, 1996). O percentual de ligante absorvido encontrado foi 2,9% para a M2 (60% de escória). Logo, parte do ligante que se imaginava que estivesse sendo utilizado na mistura para impermeabilizar e unir os agregados está sendo absorvido pela escória. Esta absorção é considerada alta embora este valor fosse esperado porque o valor da absorção d'água encontrada para a escória de aciaria foi também alto (4,5%) e superior ao estabelecido pela norma do DNER (ME 262/94) (1,0% a 2,0%).

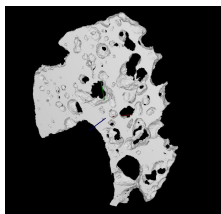


Figura 1: Tomografia computadorizada de um grão da escória porosa, utilizada neste estudo

5. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

A caracterização mecânica das misturas asfálticas foi feita através dos ensaios de RT, MR, fadiga por compressão diametral a tensão controlada e resistência à tração retida por umidade induzida. As M1, M2, M3 e M6, com 40%; 60%; 80% e 40% de escória, respectivamente, foram caracterizadas mecanicamente com cps moldados no TP. M4 e M5 (com 40% e 60% de escória, respectivamente) foram caracterizadas mecanicamente com cps moldados nos teores utilizados para a dosagem Marshall. A M6 foi a única caracterizada através do ensaio de resistência à tração retida por umidade induzida, para avaliação da adesividade.

5.1. RT (DNER – ME 138/94) e MR (DNER – ME 133/94)

Para o RT os cps foram submetidos ao ensaio antes do ensaio de MR. Os ensaios de MR foram realizados sem a consideração dos valores de RT, devido à alta variação encontrada e à baixa sensibilidade dos LVDTs (0,006 mm) utilizados. Para M1, M2 e M3, os cps moldados nos TPs foram submetidos aos ensaios. A média aritmética e o desvio padrão dos resultados de três cps estão na Tabela 3. A comparação dos valores de RT e MR não pode ser dissociada dos teores de ligante. É esperado que a mistura com teor de ligante maior (M2) apresente menor RT e MR, porque o ligante lubrifica o intertravamento entre os agregados.

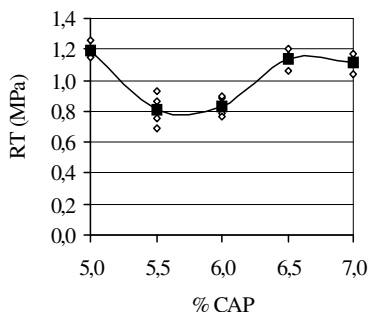
Tabela 3: Resultados de RT e MR para as M1, M2, M3 e comparativa

Mistura	RT (MPa, 25°C)		MR (MPa, 25°C)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
M1 (40%)	0,77	0,02	2.276	220
M2 (60%)	0,62	0,01	1.836	34
M3 (80%)	0,76	0,03	2.188	607
Comparativa	0,75	0,07	2.051	264

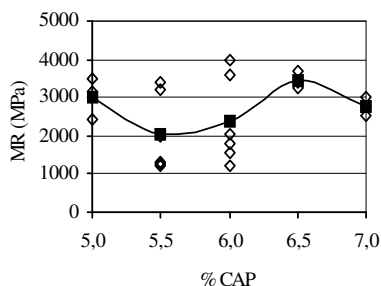
Para as M4 e M5 (40% e 60% de escória, respectivamente) os cps moldados nos cinco teores da dosagem Marshall foram ensaiados. As variações nas médias dos valores de RT e MR para os diferentes teores de CAP e a dispersão dos valores podem ser visualizadas na Figura 2.

Observando-se os resultados de MR para M4 e M5, nota-se que existe uma zona onde a dispersão dos valores é maior. Para a M4 entre os teores de 5,5% e 6,0% de CAP e para a M5 entre os teores de 6,0% e 6,5% de CAP. Os TPs para esta duas misturas estão localizados entre estes teores. Isto sugere que para um teor baixo de ligante o mesmo penetra os poros da escória (Figura 3(a)), sobrando pouco ligante para o recobrimento dos agregados. O aumento do teor de ligante em pequena quantidade conduz ao preenchimento dos poros da escória, porém em quantidade insuficiente para compensar a heterogeneidade deste rejeito (Figura 3(b)). Com a continuação do aumento do teor de ligante, a heterogeneidade deixa de ser

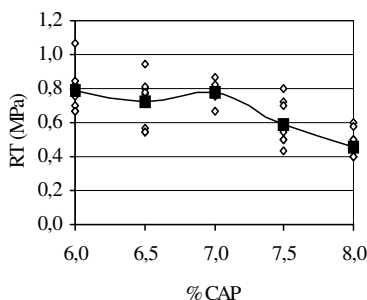
relevante e a dispersão dos valores, conseqüentemente, diminui (Figura 3(c)). Este fato é um indicativo de que, a fim de minimizar a dispersão nos resultados, o TP deve ser aumentado.



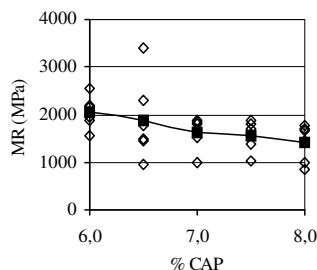
(a) Variação dos valores de RT para a M4



(b) Variação dos valores de MR para a M4

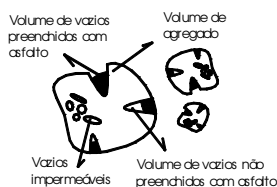


(c) Variação dos valores de RT para a M5



(d) Variação dos valores de MR para a M5

Figura 2: Variação dos valores de RT e MR versus percentual de CAP para a M4 e M5



(a) Pouco ligante



(b) Maior quantidade de ligante, mas ainda insuficiente



(c) Ligante em quantidade suficiente

Figura 3: Esquema da interação Ligante-agregado para a compensação da heterogeneidade

Os ensaios de RT e MR para a M6 (40% de escória) foram realizados na UFC e na COPPE (Tabela 4). Os tamanhos das amostras foi variável, o número de determinações na COPPE foi superior ao da UFC porque foram realizados ensaios também com cps após o ensaio de MR.

Apesar de nenhum tratamento estatístico ter sido realizado, a M6 apresentou os maiores valores de RT e MR, se comparada com as outras misturas experimentais e com a mistura comparativa. A mesma mistura (M6) apresentou valores de RT e MR próximos para equipamentos e operadores diferentes. Os resultados obtidos na UFC foram apenas 9,0% e 1,9% superiores aos obtidos na COPPE, para os ensaios de RT e MR, respectivamente.

Tabela 4: Resultados de RT e MR para a M6 (40% de escória) e comparativa

Mistura	RT (MPa, 25°C)		MR (MPa, 25°C)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
M6 (UFC)	1,42	0,20	4.715	1.293
M6 (COPPE)	1,29	0,19	4.626	1.136
Comparativa	0,75	0,07	2.051	264

Já era esperado que a M6 apresentasse maiores valores de RT e MR, se comparada com as outras misturas, porque a mesma contém o menor teor de ligante e sofreu condicionamento de curto prazo em estufa. Quanto menor o teor de ligante, maior o efeito do intertravamento dos agregados. Este efeito é mais significativo para esta mistura que utilizou apenas agregados porosos, que também são os mais rugosos. Por se tratar de mistura com utilização de rejeito, o tamanho da amostragem nestes ensaios tem que ser repensado, sendo necessário um maior número de cps para os ensaios de modo que as comparações possam ser mais conclusivas.

5.2. Fadiga por compressão diametral a tensão controlada (TC)

Os ensaio de vida de fadiga foram realizados a tensão controlada com frequência de aplicação de carga de 1 Hz (Pinto, 1991). Para as M2 (60% de escória) e M6 (40% de escória), os cps moldados no TP, foram submetidos ao ensaio. Os resultados do ensaio de fadiga estão na Figura 4. Nesta figura as equações $Y = f(x)$ representam o modelo corrente de representação do ensaio de fadiga a TC de $N = k (\sigma)^n$. Para a M2, foram ensaiados quatro cps para cada nível de tensão, exceto para a menor diferença de tensões, que devido à longa duração do ensaio (48 horas), foi ensaiado apenas um cp. Este ponto para a tensão mais baixa pode ter sido responsável pela maior inclinação da reta no gráfico log-log, fazendo com que a diferença em relação à reta da mistura comparativa fique maior. Para a M6 foram ensaiados dois cps para cada nível de tensão, assim como para a mistura comparativa.

Os ks para a M2 e para a comparativa são próximos, porém o expoente n da curva com aciaria é quase o dobro do expoente da curva de comparação o que indica maior sensibilidade da mistura com escória ao estado de tensões. A escória de aciaria pode ter formado um esqueleto mineral mais intertravado do que aquele formado pelo agregado convencional. O k para a M6 mostrou-se bastante superior aos outros dois e o expoente n é ainda maior do que o da M2. Para este caso, a mistura que apresentou os maiores valores de RT e MR (M6) apresentou uma tendência de maior vida de fadiga o que é comum em ensaios de TC.

A comparação entre as vidas de fadiga neste tipo de ensaio é limitada porque o desempenho das misturas em serviço estará associado às tensões na estrutura do sistema de camadas como um todo. O ideal é verificar fadiga a partir das tensões geradas num sistema de camadas. Estabelecendo-se uma mesma espessura de pavimento, as curvas podem ser comparadas e será possível estimar para qual mistura seria esperada maior vida de fadiga. Um pequeno estudo paramétrico deste tipo para estas misturas está mostrado em Castelo Branco (2004).

É importante observar que como em campo o número de aplicações é bem maior do que ocorre no ensaio, a inclinação das retas torna-se mais relevante do que o fato de uma estar ou não sobre a outra. A M6 apresenta-se com maior inclinação, se comparada com as misturas M2 e comparativa, e com isso tende a apresentar também uma melhor vida de fadiga.

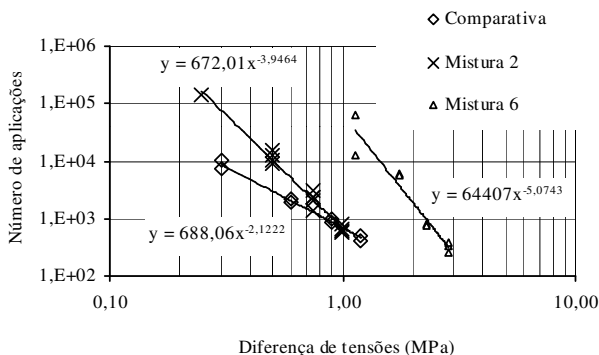


Figura 4: Vida de fadiga a tensão controlada (25°C)

5.2. Resistência à tração retida por umidade induzida (AASHTO T – 283/89)

Com o intuito de melhor avaliar a adesividade, foi realizado o ensaio de resistência à tração retida por umidade induzida. O método utilizado neste estudo, AASHTO T-283/89, é uma junção de dois outros métodos: TUNNICLIFF e ROOT NCHRP-274/84 (ASTM-D 4867/88) e o Ensaio de *Lottman* NCHRP-246/82 (Moura, 2001). Este método avalia o efeito danoso da água em cps com Vv entre 6% e 8%. O ensaio de RT é realizado em dois grupos de cps. O primeiro sem condicionamento e o segundo com o condicionamento normatizado.

Optou-se por moldar quatro grupos de cps. Os dois primeiros foram confeccionados com o uso do CAP-DOP, sendo um para realização do ensaio com condicionamento e o outro para realização do ensaio sem o condicionamento. Os outros dois grupos de cps foram confeccionados com a utilização de 1% de CAP-DOP e os ensaios foram realizados da mesma forma com e sem condicionamento. O resultado é a média de três cps por situação.

A Razão de Resistência à Tração (RRT) é a divisão da RT dos cps com condicionamento pelo valor da RT dos cps sem condicionamento. Este percentual deve ser maior ou igual a 80% para que a amostra seja aprovada (Moura, 2001). A mistura com utilização de DOPE apresentou uma RRT de 83,0%, perda de resistência de 17,0%. Enquanto que a mistura sem utilização de DOPE apresentou uma RRT de 82,6%, perda de resistência de 17,4%.

6. CONCLUSÕES

- A escória de aciaria objeto desta pesquisa apresenta possibilidade de uso em revestimentos asfálticos. Porém a metodologia de dosagem tem que ser compatibilizada para tornar-se adequada diante da natureza do rejeito.
- Diante da heterogeneidade do rejeito, sugere-se que as empresas façam adequação no seu processo de vazamento, disposição e controle da idade da escória, para incentivar o seu uso na pavimentação.
- O estudo indicou que é necessário compatibilizar os procedimentos para obtenção da densidade máxima com o utilizado para obtenção das densidades reais dos agregados. Isto é, para o caso em estudo, agregado muito poroso, recomenda-se a utilização do vácuo também para a obtenção das densidades reais dos agregados.
- O procedimento para obtenção do teor de projeto tem que ser investigado para utilização deste rejeito como agregado em misturas asfálticas. Há um indicativo de que com o

aumento do teor de ligante, computando-se o percentual absorvido pela escória ou parte dele, as variações encontradas nos parâmetros volumétricos diminuirão. Qualquer comparação entre os teores de projeto pode ser considerada precipitada devido à alta variação encontrada nos parâmetros volumétricos para as misturas que utilizaram escória no estado bruto, isto é, com grãos lisos e porosos.

- O condicionamento de curto prazo (duas horas em estufa) ao qual a mistura 6 (40% de escória) foi submetida contribuiu para o aumento dos valores de resistência à tração e módulo de resiliência. Este fato (envelhecimento) pode ter sido mais relevante até do que a separação da escória, no que diz respeito a estes resultados.
- O uso de DOPE, segundo o método empírico do DNER – ME 078 (1994), mostrou-se inadequado diante dos resultados do ensaio de resistência à tração retida por umidade induzida (AASHTO T-283, 1989). Os resultados deste segundo ensaio não mostram qualquer vantagem na adição de DOPE ao ligante neste caso.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos aos colegas do LMP/DET/UFC e da COPPE/UFRJ, à Lubnor e ao Cenpes/Petrobras pelo fornecimento do CAP e apoio operacional, à Gerdau Cearense S.A e à Sobremetal Recuperação de Metais Ltda pelo fornecimento da escória de aciaria e ao CNPq pelo apoio financeiro aos autores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials, 1999, T 283 “Standard Method of Test for Resistance of Compacted Bituminous Mixtures to Moisture Induced Damage”.
- ADERALDO, P.S.G., 2003, *Contato Pessoal*, Gerdau Cearense S.A - 15/10/2003.
- ALVARENGA, J.C.A., 2001, *Um estudo de avaliação estrutural e econômica de pavimentos flexíveis de escória de aciaria*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- ASTM - American Society for Testing and Materials, 1997, C 128 “Standard test method for specific gravity and absorption of fine aggregate”.
- ASTM - American Society for Testing and Materials, 2000, D 2041 “Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures”.
- BERNUCCI, L.B.; J.A.P. CERATTI; J.M. CHAVES; E. MOURA e A.D. CHAVES, 1999, “Estudo da adesividade no comportamento de misturas asfálticas”. *10º Congresso Ibero-Latinoamericano de Asfalto*, Sevilla, Espanha, v.I, p. 383-395.
- BRAZ, D., 1993, *Tomografia computadorizada na análise de solo compactado e de mistura asfáltica*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- CASTELO BRANCO, V.T.F., 2004, *Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- CAVALCANTE, V.T.F.; J.B. SOARES; L.M.G. MOTTA; D.R. ALDIGUERI e E.B. PARENTE, 2003, “Caracterização mecânica de mistura asfáltica com utilização de escória de aciaria como agregado”. *XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, v.1, p. 91-104.
- DNC - Departamento Nacional de Combustíveis, 1993, “Portaria DNC 5 de 18 de fevereiro”.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994, ME 054 “Equivalente de Areia”.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994, ME 078 “Agregado graúdo - adesividade à ligante betuminoso”.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994, ME 133 “Misturas Betuminosas - determinação do módulo de resiliência”.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994, ME 138 “Misturas Betuminosas - determinação da resistência à tração por compressão diametral”.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994, ME 262 “Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários”.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1995, ME 043 “Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall”.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1995, ME 084 “Agregado miúdo - determinação da densidade real”.

- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997, ME 367 "Material de enchimento para misturas betuminosas".
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998, ME 081 "Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo".
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998, ME 083 "Agregados - análise granulométrica".
- GEYER, R.M.T., 2001, *Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto*. Tese de D.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS.
- LMP, 2003, "Estudo de resíduo de vácuo de petróleo nacional como matéria-prima para pavimentação". Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes, Laboratório de Mecânica dos Pavimentos. 3º Relatório Parcial. Fundo Setorial do Petróleo.
- MACHADO, A.T., 2000, *Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria*. Tese de M.Sc., POLI/USP, São Paulo, SP.
- MARQUES, G.L., 2004, *Contato Pessoal*, COPPE/UFRJ - 14/04/2004.
- MOTTA, L.M.G.; I. TONIAL; L.M. LEITE e R.S. CONSTANTINO, 1994, *Princípios do projeto e análise Superpave de misturas asfálticas*. Tradução comentada, Petrobras.
- MOURA, E., 2001, *Estudo do efeito de aditivos químicos e da cal como melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas*. Tese de M. Sc., POLI/USP, São Paulo, SP.
- PARENTE, E.B.; A.H. BOAVISTA e J.B. SOARES, 2003, "Estudo do comportamento mecânico de misturas de solo e escória de aciaria para aplicação na construção rodoviária na região metropolitana de Fortaleza". *XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, v.I, p. 215-222.
- PETROBRAS, 2003, www.br.com.br - 16/12/2003
- PINTO, S., 1991, *Estudo do comportamento a fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- PTM - Pennsylvania Testing Method 130, 1978, "Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria". Adaptado pelo Departamento de Estradas e Rodagem de Minas Gerais-DMA-1/ DER-MGG-1982.
- ROBERTS, F.L.; P.S. KANDHALL; E.R. BROWN; D. LEE e T.W. KENNEDY, 1996, *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction* (2ª ed.). NAPA Education Foundation, Lanham, Maryland.
- SILVA, E.A., 1994, "Uso de escória de aciaria em pavimentação viária". *28ª Reunião Anual de Pavimentação*, ABPv, Belo Horizonte, v. 1, p. 261-283.
- SILVA, E.A. e R.L. MENDONÇA, 2001, "Brésil: laitier d'aciérie à tous les étages, laitiers sidérurgiques", n. 81, p.11-24.
- SOARES, J.B., L.F.M. LEITE, L.M.G. MOTTA e J.V.C. BRANCO, 1999, "O efeito da consistência do CAP no teor ótimo e nas propriedades das misturas asfálticas". *XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, v.I, p. 115-125.
- SOARES, J.B.; F.A.C. FREITAS; J.V.C. BRANCO e L.M.G. MOTTA, 2000, "Método de previsão do teor ótimo de ligante em misturas asfálticas tipo CBUQ". *32ª Reunião Anual de Pavimentação*, ABPv, Brasília, v. 1, p. 149-162.
- VASCONCELOS, K.L. e J.B. SOARES, 2003, "Influência dos métodos de ensaio para determinação das densidades real e aparente de agregados na dosagem de misturas asfálticas". *34ª Reunião Anual de Pavimentação*, ABPv, Campinas, SP.
- VASCONCELOS, K.L.; J.B. SOARES e L.F.M. LEITE, 2003, "Influência da densidade máxima teórica na dosagem de misturas asfálticas". *17º Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Rio de Janeiro, v. 1, p. 5-17.

Endereço dos autores:

Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia – Campus do Pici, S/Nº
Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, Departamento de Engenharia de Transportes Bloco 703,
60.455-970 Fortaleza – Ceará – Brasil
e-mail: veronica@det.ufc.br; jsouares@det.ufc.br

Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Centro de Tecnologia, Cidade Universitária, Ilha do Fundão.
Laboratório de Geotecnia, Bloco Anexo
21.945-970 Rio de Janeiro – Rio de Janeiro – Brasil
e-mail: laura@geotec.coppe.ufrj.br