

ESTUDO DE CARACTERÍSTICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE COM O EMPREGO DE USINAS TRANSPORTÁVEIS DE PEQUENO PORTE

Marcelo Pezutti Domingues

Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Illinois em Urbana/Champaign

José Tadeu Balbo

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo145

RESUMO

A reabilitação e manutenção corretiva de pavimentos asfálticos urbanos produzem grande quantidade de material reciclável, ou seja, fresados ou pedaços de misturas asfálticas antigas. Seu emprego como bases de agregados em pavimentação de vias, entretanto, subestima o potencial do material tanto em termos granulométricos quanto no que diz respeito ao asfalto presente. Na última década, o emprego de mini-usinas transportáveis tem crescido, aproveitando-se dos fresados e pedaços de revestimentos asfálticos antigos para a produção de CAUQ reciclado para serviços de manutenção corretiva. A questão do aquecimento dos recicláveis com chamas nessas mini-usinas deve ser investigada, empregando-se novo CAP ou agentes de reciclagem, para que sejam produzidos CAUQ de qualidade satisfatória. Os resultados apresentados neste artigo revelam as características de CAUQ reciclados por tal processo, tais como o elevado módulo de elasticidade para misturas sem adição de agentes de reciclagem e o contrário quando da introdução de produtos desta espécie. É dada ênfase na discussão, com base nos resultados obtidos para alguns parâmetros mecânicos de CAUQ reciclados, bem como às inerentes dificuldades que envolvem o processo empregado.

ABSTRACT

Urban streets repairs and rehabilitation commonly produce large amounts of reclaimed asphalt pavement (RAP). These old asphalt pavements are then available as chunks or as crunched material to be used mostly as aggregate for bases or even primary cover for low volume streets. However, it should be used mainly for recycling purposes, recycling both aged asphalt and aggregates, taking great advantage of its remaining properties as asphalt cemented material. Drum-mixers asphalt mini-plants have been put in operation in the last decade for asphalt recycling with regards to corrective tasks like patching and trenches reinstatement; issues concerning the RAP heating process within the mini-drum mixer system could be clarified by experimental investigation over the recycled asphalt mixture, using or not recycling agents or new asphalts to improve quality. Tests disclosed particular characteristics of such a recycled asphalt mixture such as high resilient modulus and tensile strength when processing 100% RAP without adding regenerator agent for asphalts. The paper emphasizes the recycled material potential and intrinsic difficulties and issues on the studied process for recycling on the basis of the recycled HMA parameters like resilient modulus and tensile strength.

1. INTRODUÇÃO

Muitas são as causas para a ocorrência de defeitos nos pavimentos urbanos, tais como espessuras insuficientes para suportar o tráfego, saturação de camadas, drenagem deficiente, restauração de valas inadequada e a presença de fissuras que permite a percolação de água nas camadas e sua saturação. Nos EUA, essa questão tornou-se um problema de dimensão nacional fazendo com que o Congresso liberasse emendas num total de US\$ 250 milhões três décadas atrás (USACE, 1978) para manutenção de vias urbanas. O USACE recomenda para a correção desses defeitos elaboração de reparo profundo empregando misturas asfálticas ao passo que mundialmente é comum o emprego de base cimentada sob uma camada de revestimento asfáltico, ao menos no caso de fechamento de valas em pavimentos urbanos, inclusive como maneira de redução de custos com espessas camadas asfálticas.

O CAUQ seria o mais eficiente material para a execução de remendos em pavimentos. Todavia tal material pode ser indisponível para muitas cidades do interior que não dispõe de usinas fixas bem como durante feriados e finais de semana. Além disso, os remendos podem requerer quantidades pequenas de CAUQ, muitas vezes economicamente inviabilizando o funcionamento de uma usina em um dia. Uma de suas restrições para emprego em reparos é exatamente o fato de não ser

estocável, embora seja extremamente adequado quanto à estabilidade e resistência desejada para o material em serviço, além de oferecer durabilidade, estanqueidade e aderência adequadas (Roberts *et al.*, 1991). Décadas atrás as dificuldades de reciclagem de misturas asfálticas em usinas tipo *batch plant* eram restrições sérias a esse tipo de reemprego de material asfáltico. Contudo, após a introdução de usinas do tipo *drum mixer*, aquecer o agregado novo e misturá-lo aos fresados foram pouco a pouco criando as condições adequadas para a reciclagem a quente. Apesar disso, em um primeiro instante, o processo não podia ser usado para reciclar os fresados integralmente, sem adições de CAP e novo agregado, mesmo porque o aquecimento direto dos fresados trazia impactos na poluição do ar.

A reciclagem empregando elevadas taxas de fresados ou de blocos de misturas asfálticas removidos de pista foi se tornando uma alternativa nos EUA para a produção de CAUQ para uso em manutenção de pavimentos, sobretudo corretiva, reduzindo despesas de administrações públicas. Não apenas se reduzem custos das obras como também se consegue a preservação de matérias primas e conservação de energia elétrica empregada em várias fases de produção de insumos para CAUQ ou sua mistura propriamente dita (Roberts *et al.*, 1991). O processo de reciclagem a quente de fresados é factível por dois diferentes métodos: (a) uso de *drum mixers* e combinação de até 30% de fresados a frio com novos agregados e CAP, e possivelmente agentes de reciclagem (AR) para correção de frações de hidrocarbonetos presentes nos asfaltos oxidados aderidos aos fresados; (b) aquecendo a superfície do pavimento, fresando o revestimento e reciclando a mistura *in situ* com adição ocasional de materiais virgens (Kandhal e Mallick, 1997; *Asphalt Recycling and Reclaiming Association*, 1992).

O primeiro método poderá apresentar algumas vantagens mensuráveis sobre o segundo, sobretudo no que tange à sua eficiência de aquecimento para fazer com que o asfalto antigo atinja seu fluxo viscoso novamente, permitindo durante a homogeneização uma mistura de CAUQ melhor acabada. Entretanto, os custos de transporte que envolvem o processo bem como o semi-uso dos fresados poderá não ser tão atrativo como o total reuso dos fresados tal como a possibilidade de emprego de 100% de material reciclado, com ou sem adição de mínima quantidade de CAP ou de AR. Em ambos os casos, contudo, os equipamentos envolvidos são de grande porte e não viáveis para transporte em tarefas de manutenção corretiva de pavimentos urbanos, mesmo porque sua produção horária seria muito elevada para trabalhos de volume limitado como remendos e tapa-valas.

A maior questão de ordem prática na reciclagem a quente, ou seja, um eficiente aquecimento e homogeneização (re-mistura) do material, combinada com fácil locomoção dentro de vias urbanas e com a necessidade de pequenos volumes de reciclagem, foi em parte resolvida com o surgimento no mercado de equipamentos tipo mini-usinas *drum mixer* transportáveis. Na Figura 1 são apresentadas esquematicamente as fases de operação de mini-usinas deste tipo, com capacidade unitária de 1 a 2 toneladas por lote, e aquecimento realizado por conjunto de chamas queimadoras. O tambor pode ser abastecido com 100% de fresados ou CAUQ em pedaços, ou acrescentando-se parcialmente novos agregados, bem como se adicionando novo CAP ou AR de modo bastante simples (manual), sendo depois a mistura aquecida e remisturada.

Atualmente, em várias cidades médias e grandes da América do Norte e da Europa, além de Ásia, tecnologias semelhantes de reciclagem de CAUQ a quente *in situ* estão sendo estudadas tendo em vista redução de custos de manutenção de rotina em pavimentos, de maneira a tornar possíveis tais serviços em qualquer dia ou época do ano. Evidentemente, a qualidade do CAUQ reciclado depende do material a ser reciclado como também na fixação de diretrizes de qual tipo de CAUQ seria mais

adequado como reciclado. Além disso, a garantia de qualidade no produto final exige evitar a queima do material no tambor. A recuperação das características originais ou normais de um asfalto no CAUQ reciclado é realizada por meio de um agente de reciclagem (AR), óleo rico em maltenos, caso contrário a mistura resultaria bastante rígida devido à elevada viscosidade do asfalto oxidado presente, e neste caso a mistura seria mais adequada para bases, em especial se produzida em pequenos volumes, para enchimentos de valas e remendos em pavimentos (Balbo e Bodi, 2004). O emprego de AR permite obter um CAUQ mais flexível, adequado para revestimentos e binders. Neste artigo serão examinadas as características resultantes da reciclagem de CAUQ empregando 100% de agregados reciclados (fresados ou em pedaços), com e sem adições de AR ou asfalto modificado para finalidades de modificação das características do asfalto já oxidado em antigos CAUQ, focando principalmente na determinação de parâmetros como a estabilidade Marshall, o módulo de resiliência e a resistência à tração dos materiais reciclados.

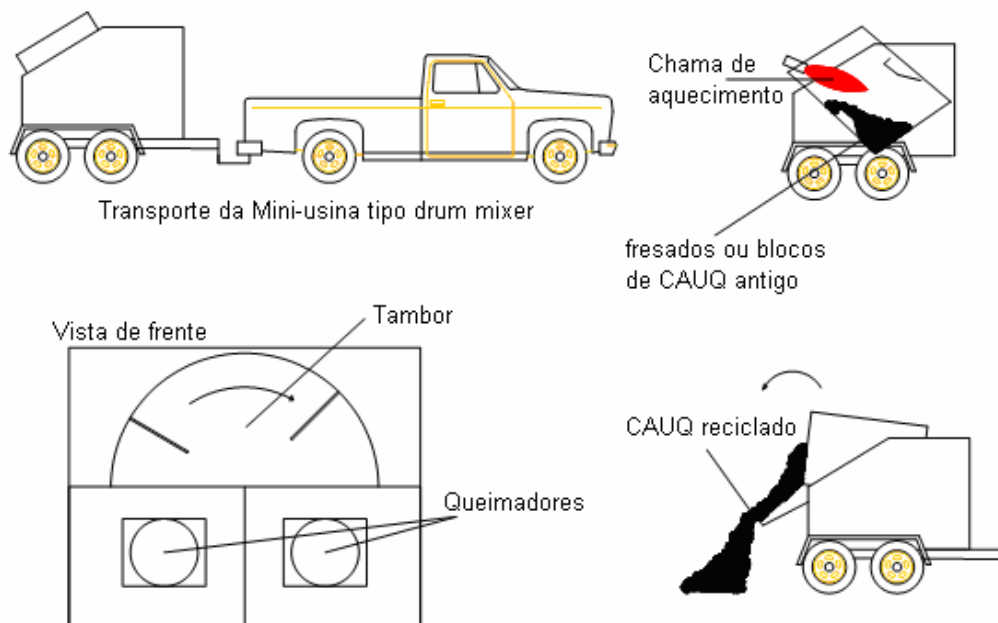


Figura 1: Fases de operação de uma mini-usina recicladoras a quente transportável.

2. RELAÇÕES ENTRE ASFALTO E AGREGADOS EM MISTURAS RECICLADAS

O teor de asfalto na mistura de CAUQ é definido como a relação entre o peso de asfalto e o peso total da mistura. Em um CAUQ reciclado, o teor de asfalto (total) é dependente da introdução ou não de AR ou novo CAP na mistura. Por outro lado, o CAUQ reciclado poderá comportar novas frações de agregados virgens com o propósito de alteração na distribuição granulométrica presente nos fresados, por exemplo. Portanto, a seguinte fórmula geral poderá ser estabelecida para a determinação do teor de asfalto na mistura reciclada final:

$$A(\%) = \frac{P_{AA} + P_{AN} + P_{AR}}{P_{AA} + P_{AN} + P_{AR} + P_{GA} + P_{GN}} \quad (1)$$

sendo A(%) o teor de asfalto total na mistura reciclada (%), P_{AA} o peso de asfalto antigo (kg) nos fresados ou pedaços de CAUQ, P_{AN} o peso de asfalto novo (kg) adicionado na mistura reciclada, P_{AR} o peso de agente de reciclagem (kg) adicionado como corretor reológico do CAP antigo, P_{GA} o

peso de agregado antigo (kg) nos fresados ou pedaços a reciclar e P_{GN} o peso de novo agregado (kg) introduzido na mistura reciclada. O teor de asfalto antigo (A_{REC}) no material a reciclar será:

$$A_{REC}(\%) = \left[\frac{P_{AA}}{P_{AA} + P_{GA}} \right] \times 100 \quad (2)$$

Tomando P_{REC} como o peso total de material a reciclar em um lote, pode ser escrito:

$$P_{REC} = P_{AA} + P_{GA} \quad (3)$$

E portanto:

$$P_{AA} = A_{REC} \times P_{REC} \quad (4)$$

O peso de AR a ser misturado deverá ser tal que seja obtida uma completa recuperação das características originais do asfalto antigo nos reciclados. Este valor é previamente fixado por meio experimental, extraindo-se e recuperando-se o CAP dos reciclados e adicionando-se paulatinamente o AR para verificação das propriedades resultantes da regeneração. Este procedimento permite a definição da quantidade de AR a ser adicionada à mistura para que o CAP regenerado alcance o padrão de viscosidade desejado. O peso de AR é assim expresso em termos de porcentagem do peso do antigo CAP presente nos recicláveis, portanto:

$$P_{AR} = \%AR \times P_{AA} \quad (5)$$

O peso de agregado antigo dentro dos recicláveis é o peso remanescente de recicláveis após a subtração do asfalto antigo, portanto:

$$P_{GA} = [1 - A_{REC}] \times P_{REC} \quad (6)$$

Por substituição das equações (3) até (6) na equação (1) encontra-se:

$$A(\%) = \frac{A_{REC} \times P_{REC} + P_{AN} + \%AR \times A_{REC} \times P_{REC}}{P_{REC} + P_{AN} + \%AR \times A_{REC} \times P_{REC} + P_{GN}} \quad (7)$$

Assim, quando a reciclagem não prevê adição de CAP ou de agregados novos a equação (7) resulta:

$$A(\%) = \frac{A_{REC} \times P_{REC} + \%AR \times A_{REC} \times P_{REC}}{P_{REC} + \%AR \times A_{REC} \times P_{REC}} \quad (8)$$

Porquanto não se deseje a adição de agente de reciclagem, o teor de asfalto final é aquele determinado para os recicláveis. Por outro lado, caso se proponha apenas a adição de novo CAP como corrector de viscosidade, tem-se então:

$$A(\%) = \frac{A_{REC} \times P_{REC} + P_{AN}}{P_{REC} + P_{AN}} \quad (9)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS DE ANÁLISE DOS CAUQ RECICLADOS

3.1 Escopo dos Estudos Experimentais

O procedimento de reciclagem adotado neste estudo contemplou o caso de elevada taxa de reciclagem, com 100% de CAUQ fresado ou em pedaços, sem adição de novos agregados; incorporação de AR bem como de CAP modificado (com borracha moída) foi considerada. A mini-usina misturadora foi levada a vários locais para a aplicação direta do material extraído dos revetimentos. A preparação e a coleta de amostras para testes em laboratório foram realizadas durante a execução de serviços de remendos em pavimentos asfálticos urbanos e rurais (Tabela 1). Em campo, as amostras para ensaios de estabilidade Marshall, módulo de resiliência e de resistência à tração foram moldadas empregando-se 75 golpes por face em temperatura de 145°C. As misturas foram preparadas até homogeneização em temperatura final de aproximadamente 185°C. Procurou-se sempre a moldagem de quatro corpos-de-prova; quando em número inferior, foram empregados preferencialmente para ensaios em compressão diametral.

Tabela 1: Descrição das condições em campo para preparação de amostras de CAUQ reciclado

Teste	Material	Peso total (kg)	AR adicionado (kg)	CAP novo adicionado (kg)	Teor de asfalto original (%)	Tempo de mistura (min)	Fumaça durante mistura	Local
01	fresados	300	-	-	5,7	24	não	A
02	pedaços	220	-	-	-	14	sim	A
03	fresados	100	0,58	-	5,7	7	não	A
04	pedaços	1.000	-	-	-	28	não	B
05	fresados	1.000	-	-	5,5	25	não	B
06	pedaços	1.000	-	-	-	21	não	B
07	fresados	1.000	-	-	5,5	26	não	B
08	fresados	1.000	-	-	-	43	sim	C
09	CAUQ novo	-	-	-	-	-	-	D
10	fresados	1.000	-	-	-	20	não	D
11	fresados	1.000	-	-	-	20	não	D
12	fresados	1.000	-	-	4,8	20	não	E
13	fresados	1.000	-	-	4,8	36	não	E
14	fresados	1.000	10	-	4,8	36	não	E
15	fresados	1.000	4,5	-	4,8	27	não	E
16	fresados	1.000	5	-	4,8	19	não	E
17	fresados	500	7,5	-	4,8	10	não	E
18	fresados	1.000	2	-	5,8	20	não	F
19	fresados	1.000	2	-	5,8	16	não	F
20	pedaços	65	-	-	5,9	16	sim	G
21	pedaços	71	-	0,355	5,9	10	sim	G
22	fresados	94	-	-	6,5	8	sim	G
23	fresados	91	-	0,673	6,5	6	sim	G

É relevante estar atento aos casos nos quais se observou fumaça durante a usinagem (testes 02, 08, 20, 21, 22 e 23) e ao caso 08, que levou 43 minutos para reciclagem de cerca de 1.000 kg, devido ao fresado estar muito úmido. Observe-se que, logicamente, quanto menor a quantidade de reciclados no misturador, o tempo de mistura foi menor, embora material úmido, como mencionado, aumente tal tempo. Os teores de asfalto indicados na Tabela 1 foram determinados por meio de extração na presença de tetracloreto de carbono (rotarex). A extração permitiu também a determinação de curvas de distribuição granulométrica dos CAUQ a reciclar.

O método de Abson foi empregado para a recuperação de CAP extraído e os valores de penetração resultaram entre 17 e 25 décimos de mm, indicando viscosidade elevada do material. Testes de viscosidade falharam devido à excessiva dureza do CAP recuperado. Para o AR empregado, Peres e Balbo (1998) haviam já definido uma curva de correção do CAP conforme apresentada na Figura 2.

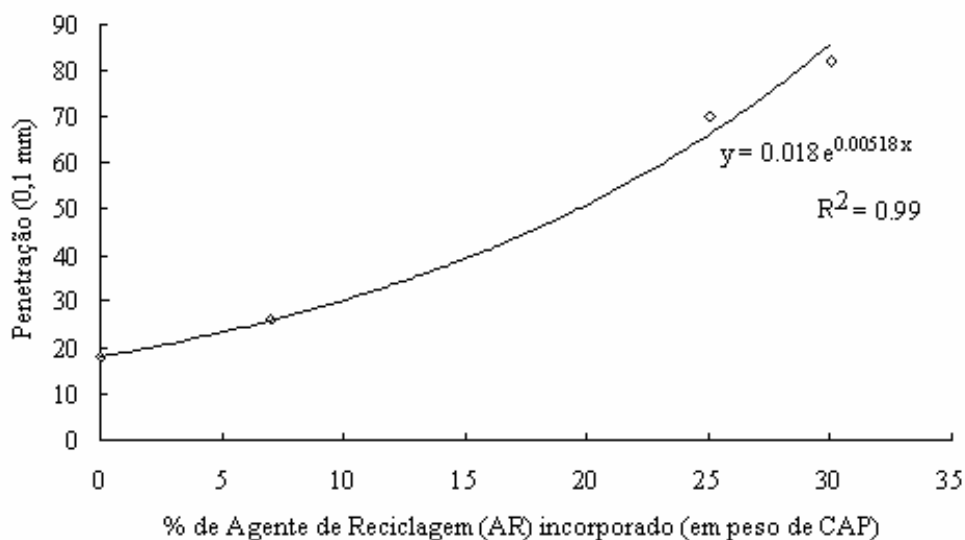


Figura 2: Curva para ajuste de consistência com o AR empregado (Perez e Balbo, 1998)

Duas décadas atrás Bicheron and Migliori (1986) empregaram CAP recuperado de fresados com penetração baixa de até 12 décimos de mm porém com adição de 50% de novos agregados e conseqüentemente, novo CAP. Baroux *et al.* (1982) perceberam que ao adicionar-se CAP novo e mole no processo de reciclagem resultava em misturas com maior suscetibilidade à deformação plástica, não como resultado do emprego desse asfalto, porém devido à formação de dupla camada asfáltica sobre os agregados fresados, ou seja, não havia ocorrido efetiva mistura entre CAP novo e velho. Este fato pode ocorrer mesmo em laboratório em conseqüência à ausência de uma fonte de calor e misturação à temperatura adequada.

3.2 Análise de Distribuições Granulométricas dos Recicláveis

Foi realizado o peneiramento dos agregados para as misturas dos locais A, B, E, F and G, onde foram coletadas amostras. Os resultados obtidos, antes da remoção de asfalto dos recicláveis são apresentados na Figura 3, sendo que todos os CAUQ recicláveis eram bem graduados e não possuíam agregados com dimensão superior a 19 mm. No local G o antigo CAUQ foi removido da pista imediatamente antes de sua reciclagem, na forma de fresados e também em pedaços, sendo que as distribuições granulométricas encontradas para este CAUQ revelaram que a extração por fresagem resultou em maior quantidade de finos. Também se verificou nesse caso, após extração do asfalto, por comparação entre curvas de distribuição granulométrica, que os fresados apresentariam muitos grumos retendo finos junto a grãos maiores.

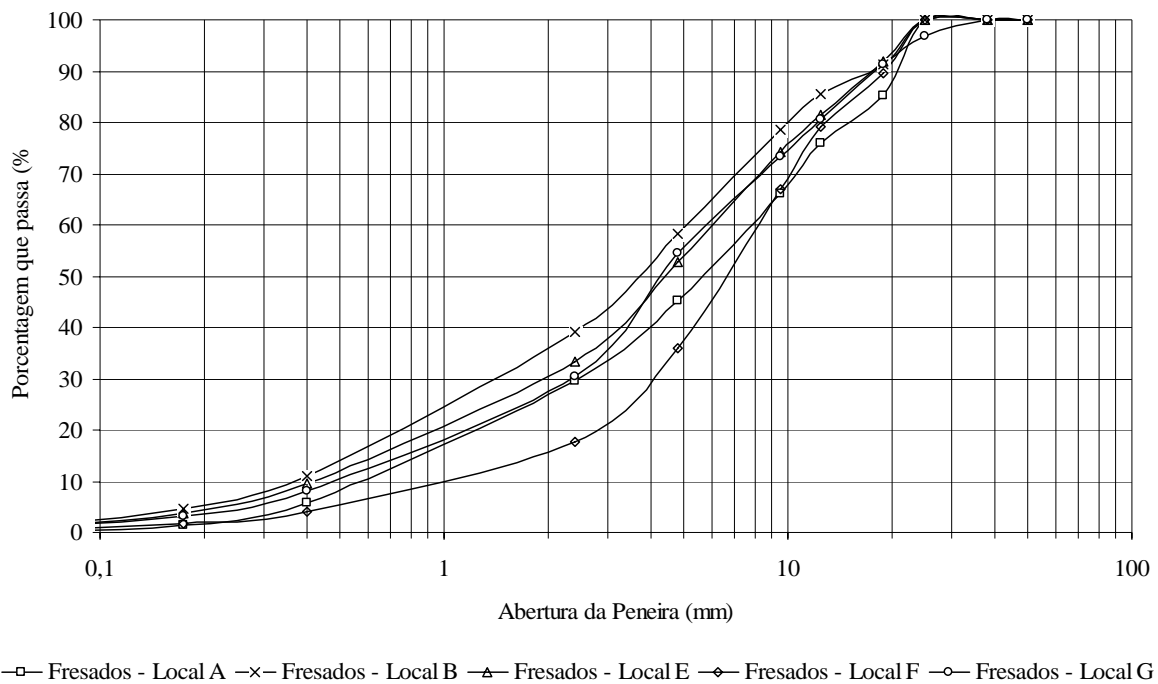


Figura 3: Curvas granulométricas para recicláveis de diversos locais

4. RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS

Durante os estudos três tipos de CAUQ reciclados (à taxa de 100% de agregados antigos) foram preparados: (1) com fresados ou em pedaços, sem adição de CAP ou AR; (2) com introdução de AR; (3) com introdução de CAP modificado. Os corpos-de-prova moldados em pista foram levados a testes em laboratório, tendo sido obtidos os resultados indicados na Tabela 2 e representados nas Figuras 4, 5 e 6. Por meio de regressão multi-linear procurou-se um modelo relacional entre o módulo resiliente (M_r), a estabilidade Marshall (E em kN) e a fluência (em mm) observada neste teste, o que resultou na seguinte correlação ($R^2 = 0,5$):

$$M_r = 1100 \times \sqrt{\frac{E}{F}} \text{ [MPa]} \quad (10)$$

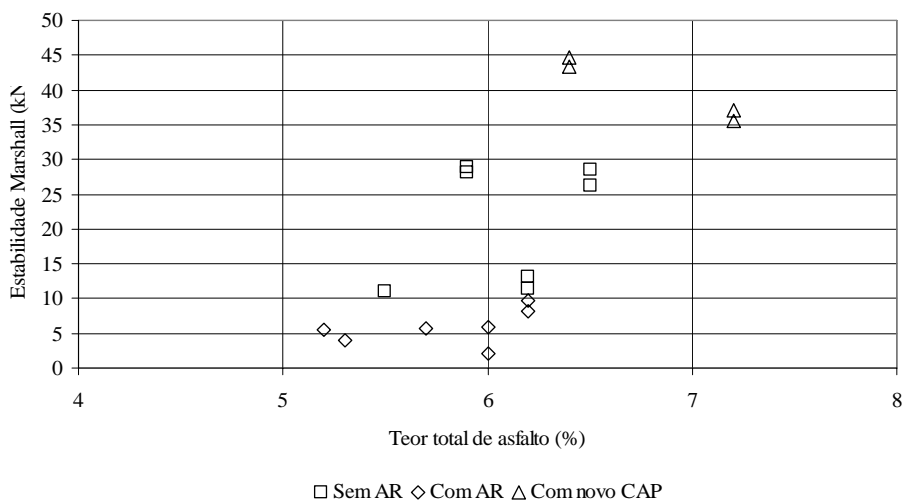


Figura 4: Estabilidade Marshall das misturas

Tabela 2: Resultados para parâmetros do ensaio Marshall, módulo de resiliência e resistência

Teste	Teor de asfalto original (%)	AR (%)	Teor de asfalto total (%)	Peso específico (kN/m ³)	Estabilidade Marshall (kN)	Fluência (mm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Resistência à tração (MPa)
1	5,7	-	6,2	23,8	13,17	3,2	9.839	2,21
1	5,7	-	6,2	23,7	11,47	2,4	8.864	1,88
2	-	-	-	22,2	18,37	3,2	26.401	2,79
2	-	-	-	22,0	16,42	2,4	18.639	2,86
3	5,7	10,18	6,2	24,1	9,65	4,0	5.659	1,58
3	5,7	10,18	6,2	-	8,19	5,6	3.980	1,53
4	-	-	-	24,7	12,05	6,4	10.830	2,83
5	5,5	-	5,5	-	11,03	5,6	19.298	3,86
6	5,5	-	5,5	-	-	-	22.818	4,97
8	-	-	-	-	18,26	1,5	-	-
9	-	-	-	24,4	7,01	2,4	8.364	1,42
10	-	-	-	-	-	-	2.840	0,99
11	-	-	-	-	-	-	690	0,27
12	4,8	-	4,8	-	-	4,0	9.939	1,85
13	4,8	-	4,8	-	-	-	18.086	3,01
14	4,8	20,83	5,7	24,0	5,65	2,4	1.815	1,08
15	4,8	9,38	5,2	23,5	5,54	4,0	5.927	1,51
16	4,8	10,42	5,3	23,5	4,08	3,2	1.830	0,94
17	4,8	31,25	6,2	-	-	-	726	0,2
18	5,8	3,45	6,0	-	5,86	1,6	2.836	1,13
19	5,8	3,45	6,0	-	2,04	4,0	4.671	1,47
20	5,9	-	5,9	24,25	28,12	3,2	17.383	1,95
20	5,9	-	5,9	-	28,96	4,0	-	-
21	5,9	-	6,4	24,09	43,44	3,5	11.440	3,01
21	5,9	-	6,4	-	44,69	2,4	22.255	2,71
22	6,5	-	6,5	24,04	28,55	3,9	25.495	2,42
22	6,5	-	6,5	-	26,33	3,6	22.606	3,31
23	6,5	-	7,2	23,78	37,07	3,0	10.394	2,5
23	6,5	-	7,2	-	35,48	3,2	17.150	2,96

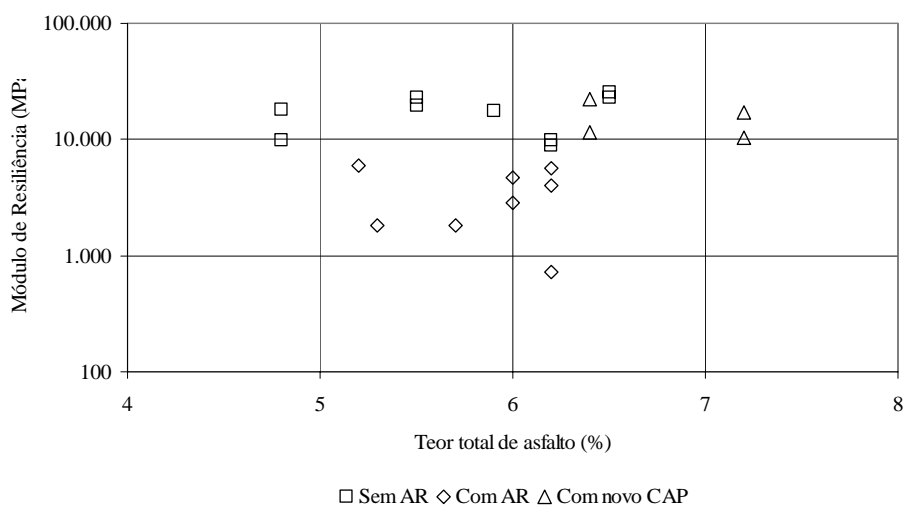


Figura 5: Módulo de resiliência das misturas

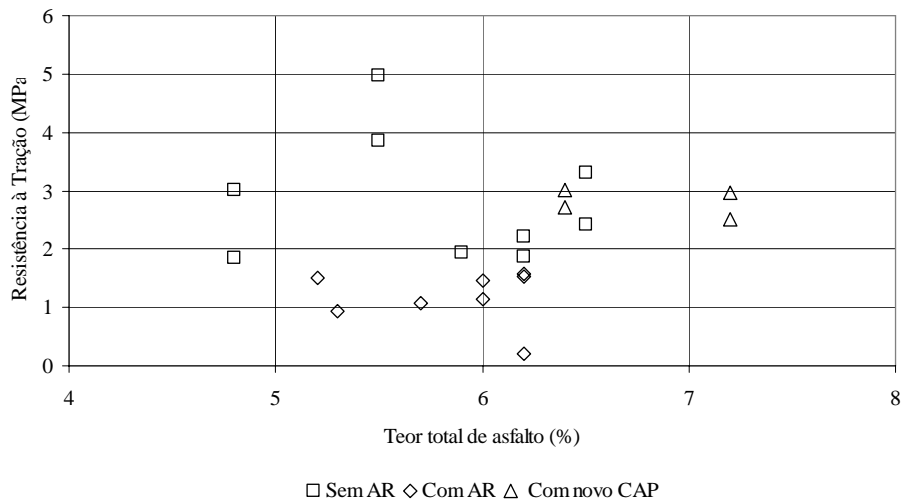


Figura 6: Resistência à tração indireta das misturas

Das Figuras 4 a 6 observa-se que a ação do AR diminui todos os parâmetros mecânicos medidos. Já no caso de adição de novo CAP, houve incremento substancial na estabilidade das misturas porém pouco foram afetados o módulo de resiliência e a resistência à tração. Na Figura 7 é apresentada a dispersão de pontos relacionando o valor do módulo de resiliência com a resistência à tração para as misturas recicladas de CAUQ. Na parte inferior da curva se concentram os pares de pontos para CAUQ reciclados com adição de AR.

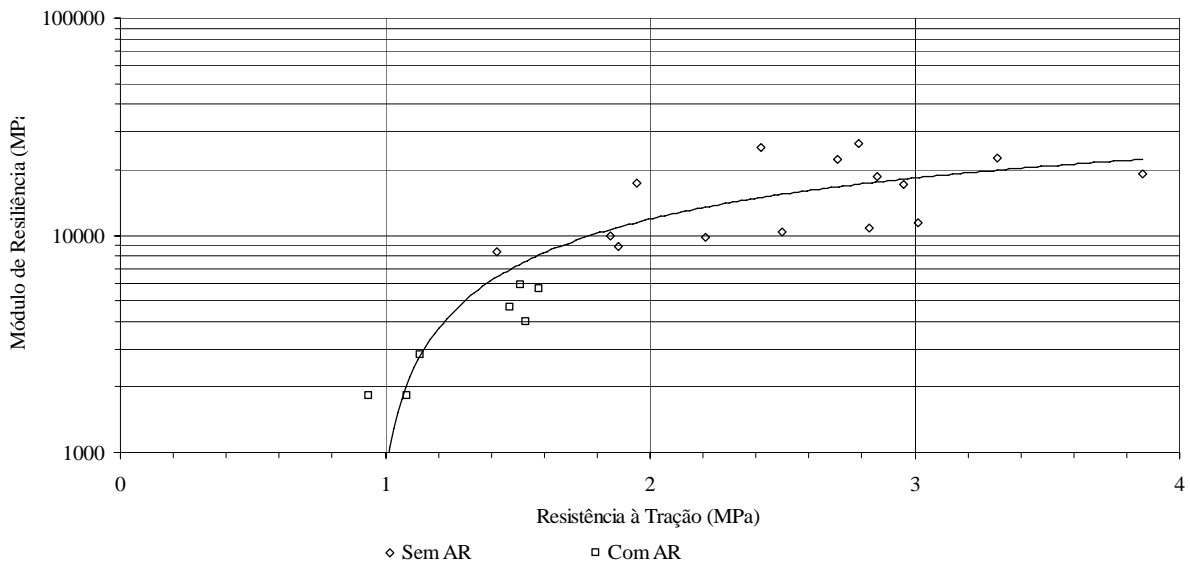


Figura 7: Dispersão de pares de ponto de módulo de resiliência *versus* resistência à tração

A seguinte correlação ($R^2 = 0,65$) entre o módulo de resiliência (M_r) e a resistência à tração (RT) foi encontrada para os CAUQ reciclados a quente:

$$M_r = 15985 \times \ln RT + 794 [\text{MPa}] \quad (11)$$

Embora não tenham sido encontradas relações aceitáveis entre os parâmetros de elasticidade e resistência e a fluência apresentada pelas misturas, algum resultado razoável pode ser ao menos graficamente vislumbrado com a estabilidade Marshall, conforme mostrado nas Figuras 8 e 9, de onde se verifica que para valores de estabilidade Marshall até 20 kN uma regra crescente linear pode representar a relação entre módulo de resiliência e resistência à tração com a estabilidade. Ao passo que acima de 20 kN, tais parâmetros poderiam ser tomados com um valor médio.

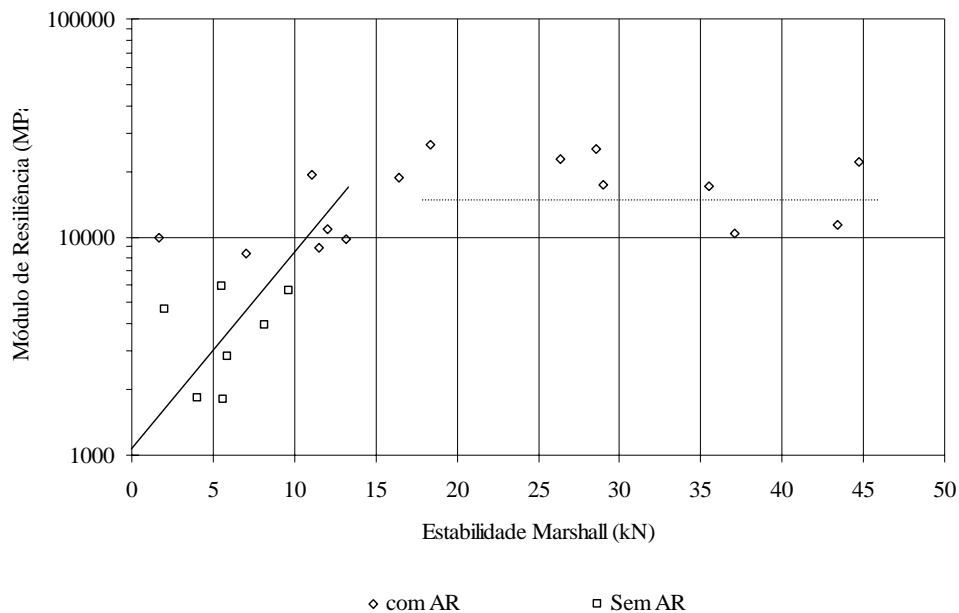


Figura 8: Relação entre modulo de resiliência e estabilidade Marshall

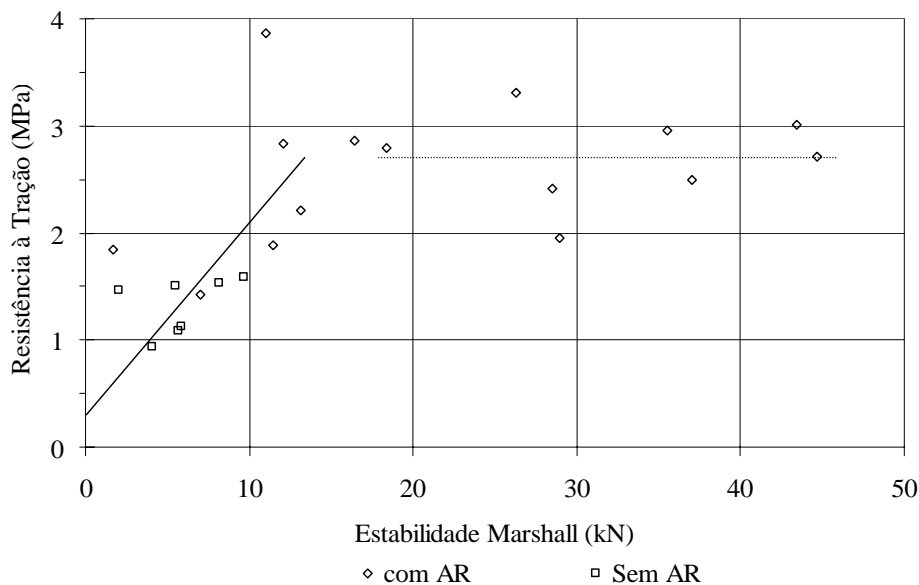


Figura 9: Relação entre resistência à tração e estabilidade Marshall

Os resultados apontam que a incorporação de novo CAP modificado melhorou a estabilidade e a resistência de misturas recicladas (casos 20 e 23). Os resultados para elevados valores de estabilidade, resistência e módulo de resiliência são explicados por fatores como a elevada viscosidade do asfalto envelhecido e até possível queima adicional das misturas em função da

pequena quantidade de material reciclado nos lotes e o rápido aquecimento em pequeno período de tempo. Os resultados obtidos garantem que a mistura foi reciclada atingindo-se o fluxo viscoso necessário para o asfalto envelhecido (o que é mais difícil em laboratório dada a eficiência térmica e agitação necessária), o que é fundamental para a garantia de reciclagem completa sem formação de duplo filme asfáltico.

O efeito de incremento de viscosidade com aumento dos valores dos demais parâmetros mecânicos não pareceu ter sido claramente observado na preparação de misturas em que não se observou fumaça ao final da preparação, ou seja, queima durante a reciclagem. As exceções são os casos 2 e 8 para os quais valores elevados de estabilidade Marshal foram encontrados. Apesar de empregarem uma grande quantidade de recicláveis, ocorreu fumaça durante o final da preparação. O caso 8 levou longo tempo de preparação devido à excessiva umidade dos fresados.

Reduções importantes nos parâmetros mecânicos das misturas de CAUQ recicladas foram impostas com a adição de AR (caso 3 e casos de 14 a 19). A viscosidade alterou-se no CAP como um todo com a introdução do AR, levando a quedas de estabilidade para valores inferiores a 5 kN. As misturas sem AR resultaram em estabilidades satisfatórias entre 8 e 13 kN, a exceção dos casos 2 e 8 quando ocorreu provável queima da mistura. Um dado de controle é o caso da mistura nova (caso 9) que se tratava de uma mistura convencional para reparos em vias urbanas (tapa-buracos) com estabilidade de 9 kN. Em resumo, pode-se verificar que: (a) o CAUQ reciclado ofereceu parâmetros mecânicos satisfatórios e até superiores quando comparados a misturas novas empregadas para reparos em vias urbanas; (b) o CAUQ reciclado resultou muito rígido (e assim sujeito a fissuração precoce) quando ocorreu queima da mistura; (c) a adição de AR permitiu obter CAUQ reciclado mais flexível embora não tenha sido possível estabelecer uma simples relação entre o teor de AR e os parâmetros mecânicos; (d) a adição do CAP modificado melhorou a estabilidade do CAUQ reciclado ao mesmo tempo em que reduziu sua rigidez.

5. CONCLUSÕES

Foram investigadas algumas características mecânicas de misturas de CAUQ recicladas com taxa elevada de recicláveis, com e sem adição de AR e novo CAP, sempre tendo em vista o processo oferecido por mini-usinas móveis para elaboração de pequenos reparos em pavimentos asfálticos. O produto final a ser aplicado em pista dependerá, dentre outros fatores, da introdução ou não de AR nessas misturas recicladas. As principais conclusões do estudo foram:

- Uma pequena quantidade de recicláveis a ser remisturada permite sua rápida preparação e boa produção, aplicável a pequenos reparos. Contudo, nesse processo, os materiais no tambor ficaram sujeitos a superaquecimento resultando em misturas muito rígidas. Uma possível circunstância de emprego desse material seria como base rígida e não como revestimento.
- O emprego de volumes grandes de material reciclagem de uma só vez no tambor misturador evitou a queima da mistura e melhores CAUQ reciclados foram obtidos, passíveis de emprego como camada superficial.
- A incorporação de AR foi satisfatória por possibilitar, no processo empregado, a obtenção de CAUQ reciclado mais próximo de um CAUQ novo; todavia, a quantidade de AR deve ser muito bem controlada sob pena de queda expressiva na estabilidade da mistura.
- O processo de reciclagem empregado torna muito difícil estabelecer *a priori* a proporção ideal de AR. Isto exige, para a correta operação e produção do CAUQ reciclado com o

processo empregado, uma intimidade e experiência muito grande do operador, o que pode ser melhorado com a criação de banco de dados contemplando diversos casos de misturas típicas em áreas urbanas.

A ausência de controle *a priori* sobre o AR ou novo CAP trata-se de uma das maiores limitações do processo empregado, que fica dependente de um empirismo razoável, diferindo, portanto, do processo convencional de reciclagem a quente em usina fixa de grande porte. Tal limitação é importante em zonas urbanas uma vez que os pavimentos são muito diversificados pela época, fonte de agregados, CAP empregados, procesos construtivos empregados, etc. Como resultado, a qualidade do CAUQ reciclado pelo processo estudado dependerá bastante das habilidades do operador em evitar queima da mistura bem como em trabalhar com fresados excessivamente úmidos. Além disso, ele deverá visualmente identificar o momento em que o fluxo viscoso encontra-se satisfatório e o tempo de mistura restante antes de paralizar o processo. A maior limitação observada foi em termos de produção diária, uma vez que o equipamento leva ao menos 20 minutos para reciclar 1.000 kg de material, o que resulta em pequena produção horária (um vigésimo de uma usina fixa), que pode ser agravada em caso de materiais com excesso de umidade.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e à empresa UNIASTEN pela autorização para a coleta de amostras durante os vários trabalhos em pista.

Referências Bibliográficas

- Asphalt Recycling and Reclaiming Association (1992) An overview of recycling and reclamation methods for asphalt pavement rehabilitation. Annapolis, USA.
- Balbo, J.T.; Bodi, J. (2004) Reciclagem a quente de misturas asfálticas em usinas: alternativa para bases de evelado módulo de elasticidade. In: Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes. XVIII Congresso de Pesquisa e Enino em Trasnportes, Vol. I, 174-185, Florianópolis.
- Baroux, R.; Champion, M.; Poirier, J.C.(1982) Recyclage des enrobés en centrale. Aspects techniques. *Bulletin de Liason des Laboratoires des Ponts et Chaussées* , 119, mai-juin, pp. 78-84, Paris.
- Bicheron, G.; Migliori, F. (1986) Effet du régénérant sur le vieux bitume au cours du recyclage à chaud. *Bulletin de Liason des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 144, juil-aôut, pp. 95-99, Paris.
- Kandhal, P. S. and Mallick, R. B. (1997) Pavement recycling guidelines for state and local governments. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report FHWA-SA-98-042, Washington, D.C.
- Peres, A. R.; Balbo, J. T. (1998) Estudo das deformações permanentes em misturas asfálticas recicladas com emprego de agente de reciclagem ARX-1. In: Anais da 31^a. Reunião Anual de Pavimentação, Associação Brasileira de Pavimentação, Vol. 1, pp. 249-269, São Paulo.
- Roberts, F. L.; Kandhal, P. S.; Brown, E. R.; Lee, D-Y; Kennedy, T. W. (1991) Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction. National Center for Asphalt Technology, 1st. edition, NAPA Education Foundation, Lanham.
- United States Army Corps of Engineers (1989) Pothole primer – a public administrator’s guide to understand and managing the pothole problem. Special Report 81-21, Hanover.

Marcelo Pezutti Domingues (mdoming3@uiuc.edu)

José Tadeu Balbo (jotbalbo@usp.br)

Escola Politécnica – USP – PTR – Av. Prof. Almeida Prado,s/n, Travessa 2 – 05508-900 – São Paulo – SP