

## **ESTUDO LABORATORIAL DE PRÉ-MISTURADOS A FRIO DENSOS COM BORRACHA DE PNEU COMO AGREGADO**

**Danielle de Souza Clerman**

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Jorge Augusto Ceratti**

Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

### **RESUMO**

A adição de polímeros a misturas asfálticas tem sido usada por muitos anos estendendo aplicações asfálticas e melhorando características, como susceptibilidade térmica e flexibilidade. Com o aumento da preocupação ambiental com resíduos sólidos, pneus velhos considerados um passivo ambiental, passaram a ser utilizados como aditivo para misturas asfálticas a quente. Tais benefícios incentivam a extensão destes conhecimentos para misturas a frio. Pré-misturados a frio constituem uma alternativa para vias de menor volume de tráfego. Portanto, este trabalho objetiva investigar a utilização da borracha de pneu moída como agregado, em 1% e 2% do peso dos agregados, em pré-misturados a frio densos. Utilizou-se a metodologia Marshall a Frio para determinação do teor ótimo de ligante asfáltico. Foi usada emulsão asfáltica catiônica do tipo RL-1C. Ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência na compressão diametral, com duas idades de cura, caracterizaram tais misturas. As misturas com borracha apresentaram maior consumo de ligante e menor valor de estabilidade que aquelas sem adição de borracha. Os ensaios realizados com amostras com maior tempo de cura refletem melhor as características reais das misturas. Este estudo sugere a viabilidade da utilização de borracha de pneu como aditivo de misturas asfálticas a frio densas.

### **ABSTRACT**

The addition of polymers to asphaltic mixes has been used for many years, demonstrating better characteristics as thermal susceptibility and flexibility. There has been an increasing campaign on environmental conservation. For many years, the addition of old tires rubber started to be used as an additive for hot asphalt mixes and it has been accepted as a viable methodology for pavements. These benefits encourage us to extend this technology for cold mixes. Cold bituminous emulsion mixes are an alternative for low to medium trafficked roads. So, this paper will focus on the use of tire rubber, 1% and 2%, as an aggregate for dense graded cold mixes with cationic emulsion. This study follows the Marshall procedure to establish a minimum asphalt content. Laboratorial mechanical tests as dynamic indirect tensile test (resilient modulus) and indirect tensile test (tensile strength) carried out in different times of cure. It has been observed cold rubber mixes have shown higher binder content and lower stability than traditional cold mixtures. Laboratory tests with higher time of cure are believed to demonstrate the real characteristics of this kind of mixes. This work suggests the viability of production of cold rubber mixes.

### **1. INTRODUÇÃO**

Entre os crescentes problemas ambientais existentes atualmente, destaca-se o acúmulo de resíduos não degradáveis ou de degradação muito lenta. Sabe-se que os pneus, quando descartados, na natureza, são de difícil degradação, tendo hoje se constituído num enorme passivo ambiental.

Na busca de solução para o problema, a moagem de borracha de pneus (“Crumb Rubber Modifier”) já vem sendo desenvolvida e utilizada em muitos países, como Estados Unidos, Portugal, Canadá, entre outros. (Specht, 2004). Pesquisas e experimentos científicos encontraram usos alternativos para estes pneus: como estruturas de contenção, produção de artefatos de borracha, barreiras de inércia, concreto de baixo desempenho, entre outras. Porém, até este momento, segundo Andrietta (2002), somente duas alternativas têm se

mostrado viáveis e práticas para utilização de grandes volumes de pneus: o uso como material de queima em indústrias cimenteiras e termoeletricas e o uso em rodovias.

Com o foco em pavimentação, muitos estudos já iniciaram o entendimento do também chamado “asfalto-borracha” ou “borracha-agregado”.

O uso de borracha como agregado, embora seja um processo que teve menor desenvolvimento que o via úmida, apresenta-se como uma alternativa interessante para consumo de grande quantidade de pneus pois utiliza em média 1 a 3% do peso de agregados.

A maior quantidade de estudos nesta linha de pesquisa, enfatizou, no entanto, as misturas a quente (Mourilla *et al*, 2002). O uso de misturas asfálticas a frio, produzidas com emulsão asfáltica, também é uma opção de uso desta tecnologia.

Desde a década de 70, com o advento das emulsões asfálticas, novas alternativas de uso de misturas a frio têm se desenvolvido. O uso de emulsões oferece vantagens, pois não apresenta emissões atmosféricas, utiliza menos energia (o uso de calor não é necessário) e oferecem estabilidade à estocagem (Holleran e Reed, 2000).

No entanto, seu uso também traz desvantagens provenientes do processo de perda da água. O que restringe o uso das misturas a frio no Brasil. Ainda hoje as misturas a frio são utilizadas fortemente em operações tapa buraco. No entanto, constituem uma alternativa interessante para pavimentação de vias de baixo a médio tráfego, com poucos recursos.

Assim, esta pesquisa tem como objetivos demonstrar as características e o comportamento de misturas a frio com a incorporação de borracha como parte dos agregados. Para isso, serão avaliados os seguintes parâmetros:

- Estabilidade Marshall;
- Consumo de ligante asfáltico;
- Determinação do módulo de resiliência na compressão diametral;
- Resistência à tração na compressão diametral; e,
- Análise do efeito do tempo de cura no módulo de resiliência e na resistência a tração;

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Borracha de Pneu**

A idéia de uso de borracha de pneu iniciou nos Estados Unidos, nos anos 40. Entretanto, somente na década de 70, laboratórios de pesquisa e agências rodoviárias começaram a avaliar e aplicar esta tecnologia. (Heitzman, 1992).

No desmonte do pneu, a borracha é separada dos outros componentes e o arame, a malha de aço e o nylon são recuperados como sucata qualificada. O pneu pode ser reduzido a pó por diferentes processos, entre eles destaca-se o cisalhamento mecânico e o congelamento (processo de criogenia). Os diferentes métodos de desmonte de pneus transmitem diferentes

características de tamanho, formato e textura para cada partícula. Estes três aspectos apresentam um significativo efeito no desempenho dos pavimentos asfálticos.

Segundo Heitzman, 1992, a borracha pode ser incorporada ao material asfáltico de duas maneiras: pelo processo úmido, onde o ligante é modificado, chamado de asfalto-borracha, e pelo processo seco, onde a borracha é usada como agregado.

No processo via úmida, a modificação do ligante é atingida pela interação do cimento asfáltico com o CRM. Teores entre 12 e 20% são comuns na literatura técnica.

Em ambos os processos, via úmida ou via seca, o aumento do teor de borracha faz com que haja necessidade de aumentar-se o teor de ligante asfáltico. Portanto, aumentando assim o custo do produto final. (Takallou e Hicks, 1988),

Takallou e Hicks, em 1988, reuniram as principais características e informações práticas do uso de borracha como agregado em misturas asfálticas a quente.

Além da granulometria e do formato das partículas de borracha, outro aspecto parece ser muito importante para as misturas via seca: o tempo de reação com o ligante asfáltico. Tempos de 1 a 2 horas parecem ser adequados para misturas a quente. (Pinheiro e Soares, 2003).

Specht, em 2004, observou que a incorporação de borracha via seca melhora as características de resistência à fadiga e ao trincamento térmico, devido à menor sensibilidade a variações de temperatura do CBUQ.

Singleton *et al*, 2000, avaliaram o efeito da composição do asfalto e a interação com a borracha no processo via seca. Observaram que a borracha incha absorvendo as frações de menor peso molecular presente no asfalto.

O uso de borracha reciclada via úmida para misturas a frio ainda é um processo pouco desenvolvido. A emulsificação do asfalto-borracha exige o uso de uma borracha reduzida a partículas muito pequenas, livres de metal e compatível com o ligante. O processo via úmida deve sofrer grandes adaptações para que se possa emulsionar um asfalto-borracha. (Holleran e Reed, 2000)

Se o processo via úmida ainda é inviável, o processo via seca para misturas a frio já é utilizado nos Estados Unidos.

A borracha misturada ao CAP funciona como um agregado. Aparentemente, a borracha não interage com o ligante, funcionando apenas como um filler. (Hossain *et al*, 1995)

## 2.2 Misturas a Frio

As misturas a frio são realizadas comumente com emulsões asfálticas catiônicas, caracterizando misturas sempre espalhadas e compactadas na temperatura ambiente (Santana, 1993). Segundo Potti *et al*. (2002), a qualidade do revestimento, assim como a densidade e as propriedades mecânicas finais desejadas, dependem do comportamento de

ruptura da emulsão. Portanto, o elemento essencial para misturas a frio reside na escolha de uma emulsão apropriada com a reatividade do agregado selecionado.

No Brasil, segundo Santana (1993), as misturas asfálticas usinadas constituídas por agregado miúdo são chamadas de argamassas asfálticas e as constituídas por agregados graúdos e argamassa asfáltica são denominados Pré-misturados (PM). A classificação dos Pré-misturados a Frio (PMF) envolve a granulometria (quantidade de argamassa e de agregados) e a quantidade de vazios. Tradicionalmente, os PMFs são classificados em três classes quanto a seu volume de vazios (Vv): Aberto ( $Vv > 22\%$ ), Semi Denso ( $15 < Vv < 22\%$ ) e Denso ( $Vv < 15\%$ ). Não há concordância internacional quanto a estes valores.

O teor mínimo de ligante residual, e conseqüente teor de emulsão, para mistura a frio, podem ser estimados a partir da área superficial dos agregados segundo a fórmula de Duriez (Santana 1993):

$$p = k \cdot (\Sigma)^{0,2} \quad (1)$$

Onde:  $p$  = % de asfalto residual;  
 $k$  = módulo de riqueza; e  
 $\Sigma$  = área específica dos agregados.

Segundo Hérítier *et al.* (2002), a formação do filme asfáltico em torno do agregado e a eliminação da água de ruptura e de umedecimento são partes das condições essenciais para obtenção de uma mistura a frio de alto desempenho.

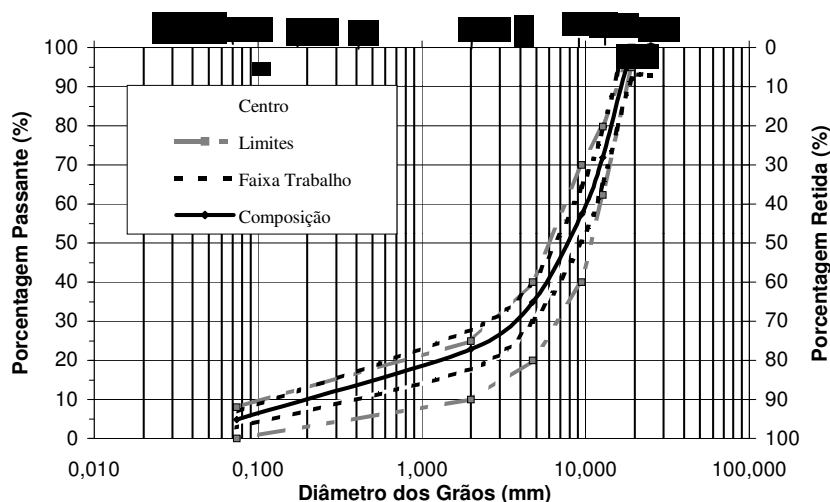
### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Agregado

O agregado, bastante representativo no estado do Rio Grande do Sul, é proveniente de uma jazida de basalto próxima a Porto Alegre.

Este apresenta as seguintes características: absorção de 1,74%, densidade efetiva 2,881 e Abrasão Los Angeles 17%. A composição granulométrica, enquadrada na faixa C do DNER ES 313/97, encontra-se na figura 1 (no gráfico, sob a legenda “Composição” e “Faixa de trabalho”). A curva C da norma é representada pelas curvas centro e limites.



**Figura 1:** Composição granulométrica das misturas densas na faixa C DNER ES 313/97

### 3.1.2 Emulsão Asfáltica

A emulsão asfáltica utilizada neste trabalho foi do tipo RL 1C, classificada como emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta. Este ligante foi fornecido pela empresa Ipiranga Asfaltos S/A, proveniente da usina localizada em Esteio/RS.

Devido ao maior teor de finos, característica das misturas densas, foi escolhido esta emulsão, pois permite um melhor cobrimento dos agregados e trabalhabilidade da mistura. (Santana, 1993).

A tabela 1 apresenta a caracterização da emulsão asfáltica utilizada neste trabalho.

**Tabela 1:** Ensaios de caracterização da EA RL1C

Ensaio	Emulsão Asfáltica RL 1C
Densidade	0,993
Sedimentação	0,08%
Viscosidade 25°C a 20 rpm	0,105 Pa.s
Resíduo por Evaporação	76,1%
Peneiração	0,0

O teor de água de molhagem foi obtido pós mistura de vários teores apresentados na bibliografia, verificando-se aquele que fornecia maior cobrimento dos agregados. A partir deste, foram ensaiados os teores de umidade antes da compactação que resultariam em melhores resultados de estabilidade, volume de vazios e densidade. O valor utilizado foi de 40% da umidade total (ht). Onde:

$$h_t = h_m + h_{EA} \quad (2)$$

em que

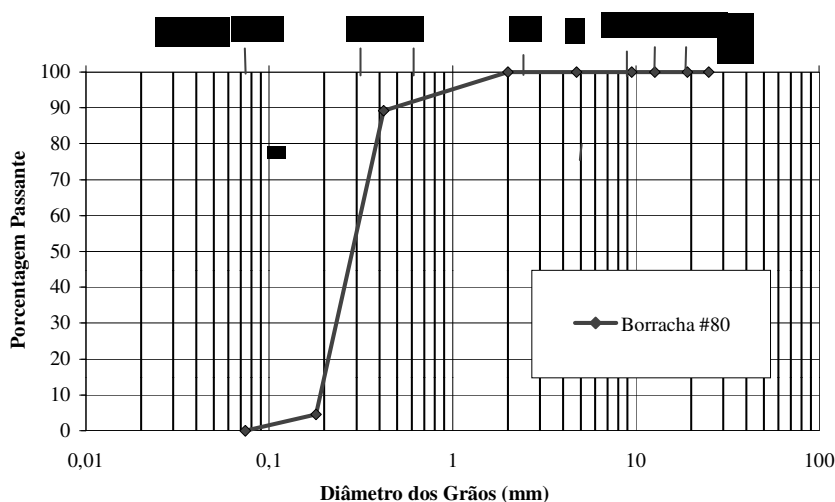
$h_t$  = umidade total [g];

$h_m$  = umidade de molhagem dos agregados [g]; e

$h_{EA}$  = umidade presente na emulsão [g].

### 3.1.3 Borracha de Pneu

Utilizou-se uma borracha proveniente de pneus velhos cisalhada. Esta foi fornecida pela empresa Midas Elastômeros S/A em granulometria de 0,18 mm conforme a figura 2.



**Figura 2:** Granulometria da Borracha de Pneu

### 3.2 Ensaios de caracterização das misturas

A moldagem dos corpos de prova foi realizada a partir da metodologia Marshall a Frio, segundo DNER-ME 107/94. Este procedimento foi modificado em dois parâmetros: cura antes e pós-compactação. Utilizaram-se 75 golpes para compactação das misturas.

É interessante comentar que as misturas a frio têm muitas peculiaridades quando comparadas às misturas a quente. Segundo Hérítier *et al*, 2002, o menor desenvolvimento dessas misturas é devido à falta de um método específico de dosagem desenvolvido especialmente para estas. Para este autor, métodos de dosagem de misturas a quente adaptados para misturas a frio, como o Método Marshall, não são capazes de reproduzir as características finais das misturas com emulsão asfáltica.

A cura antes da compactação respeitou o teor de umidade da mistura, sendo apenas compactada quando houvesse a perda de 40% da umidade total ( $h_i$ ).

Para cura pós-compactação, para ensaio das propriedades Marshall, optou-se por dois dias de cura na estufa a 40°C, segundo Thanaya, 2002.

Foram produzidas amostras de pré-misturados a frio do tipo denso (PMFD) nos seguintes teores de borracha: 1% e 2% em relação ao peso de agregados e amostras sem a incorporação de borracha. A borracha foi misturada ao ligante por processo mecânico e logo após foi misturada aos agregados. Este processo caracteriza uma modificação na metodologia via seca conhecida para as misturas a quente.

Os ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração na compressão diametral foram realizados a temperatura de 25°C e com duas idades: 5 dias e 60 dias de cura. As amostras apresentavam 10 cm de diâmetro e 6,35 cm de altura.

Os corpos de prova foram curados em estufa a 25°C.

A resistência à tração funciona com uma taxa de deformação de 50,8mm/min.

As cargas repetidas do ensaio de Módulo de Resiliência a compressão diametral eram aplicadas com 0,1 segundo de carregamento e 0,9 segundo de alívio. Utilizou-se coeficiente de Poisson de 0,30 para cálculo da resiliência.

#### 4. RESULTADOS E ANÁLISE

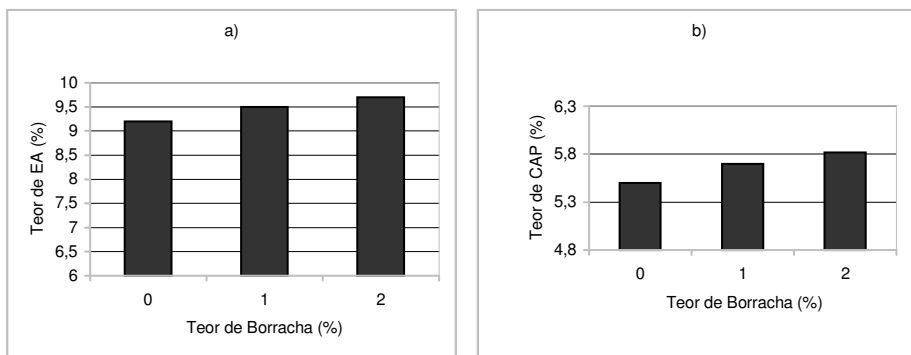
Os resultados das propriedades de todas as misturas, com os diferentes teores de borracha e tempos de cura, encontram-se na tabela 2.

**Tabela 2: Propriedades das misturas a frio com e sem tempo de cura**

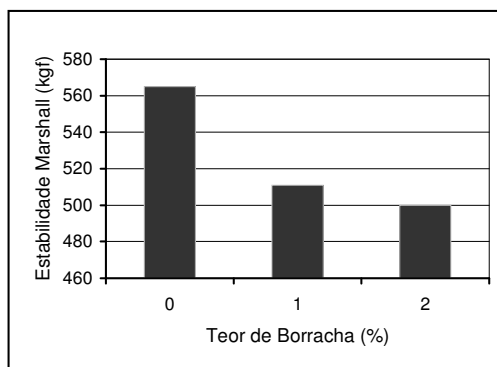
Teor Borracha	5 Dias de Cura					60 Dias de Cura	
	EA (%)	CAP (%)	Estab. (kgf)	Mr (MPa)	Rt (MPa)	Mr (MPa)	Rt (MPa)
0	9,2	5,5	565	1218	0,30	3000	0,50
1	9,5	5,7	511	1500	0,37	2000	0,65
2	9,7	5,8	500	600	0,27	1550	0,48

Onde:

- EA - Emulsão Asfáltica
- CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo
- Estab. - Estabilidade Marshall
- Mr - Módulo de Resiliência
- Rt - Resistência à Tração



**Figura 3-** Relação entre o teor de borracha e de ligante a) Emulsão Asfáltica b) CAP



**Figura 4-** Teor de Borracha versus Estabilidade Marshall

As figuras 3 e 4 salientam os parâmetros obtidos a partir da metodologia Marshall. Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada teor de emulsão. Trabalhou-se com teores de 8,5%; 9%, 9,5%; 10% e 10,5% .

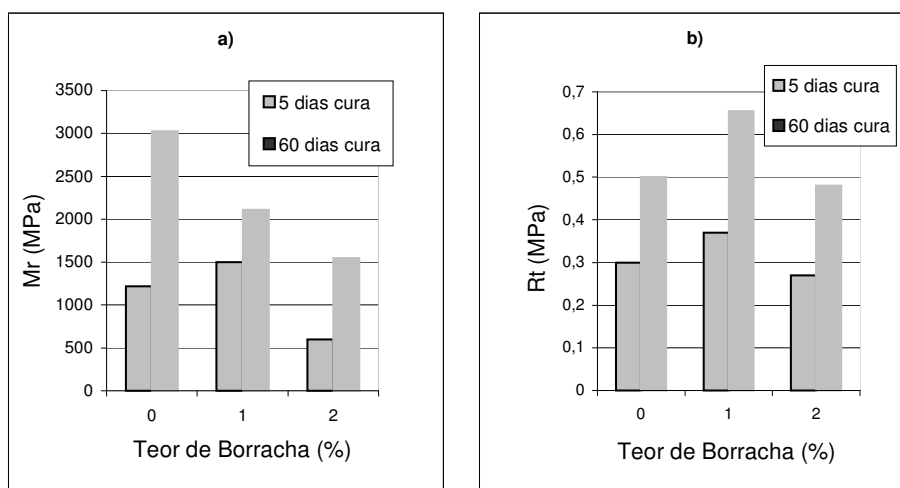
A figura 3 mostra a relação entre o teor de borracha e o consumo de ligante. Como se trata de uma emulsão do tipo RL-1C, sabe-se que no mínimo 60% do teor de emulsão deve ser de cimento asfáltico de petróleo (CAP). Pode se observar o aumento do consumo de ligante em função do aumento do teor de borracha. Este comportamento já era esperado.

Na figura 4, tem-se uma diminuição nos valores de estabilidade com o aumento do teor de borracha. Há uma queda significativa da estabilidade da mistura sem borracha para aquelas com borracha. Comparando-se somente as misturas com borracha, percebe-se uma pequena queda na estabilidade para a mistura de 2%; no entanto, há pouca diferença entre esses valores.

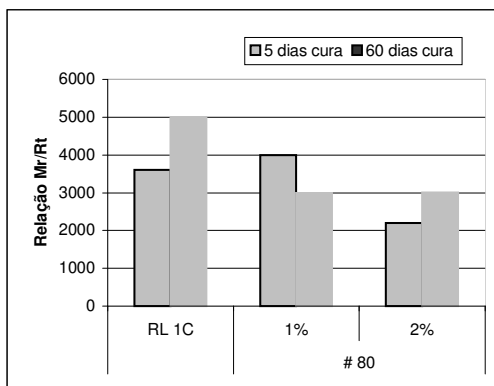


As figuras 5 a) e b), indicam o comportamento do módulo de resiliência das misturas em relação ao aumento do teor de borracha. Observa-se que o comportamento da mistura é diferente para as diferentes idades de cura. Sabe-se que as misturas a frio possuem pouca coesão e resistência nas primeiras idades, podendo levar meses para que as propriedades finais sejam atingidas.(Potti *et al*, 2002). É possível acreditar que 5 dias de cura não reflitam as propriedades resilientes reais das misturas.

O gráfico de módulo de resiliência com 60 dias de cura faz uma indicação mais clara de uma tendência: ao aumentarmos o teor de borracha, diminuimos a resiliência. Um decréscimo nos valores de módulo indicam menor rigidez da mistura e maior flexibilidade. Tal decréscimo também foi encontrado pelos autores Specht (2004); Pinheiro e Soares (2003), entre outros.



**Figura 5-** Relação entre o teor de Borracha e: a) Módulo de Resiliência a 5 e 60 dias de cura  
b) Resistência à Tração a 5 e 60 dias



**Figura 6-** Relação Módulo de Resiliência/Resistência à Tração

Quanto a resistência à tração, indicada nas figuras 5 e) e f), destaca-se a mistura de 1% de borracha como apresentando maior valor. Era esperada que a resistência à tração apresentasse comportamento similar ao parâmetro estabilidade. Diversos autores indicam que o acréscimo de borracha como agregado diminui a capacidade estrutural da mistura asfáltica. (Specht, 2004; Pinheiro e Soares, 2003; Takallou e Ricks, 1988).

No entanto, os gráficos demonstram maior resistência à tração para 1% de borracha.

Os dois gráficos da figura 5 demonstram também a mudança das propriedades mecânicas das misturas a frio. Com o tempo de cura, a fase aquosa restante em forma de gotículas de água continua a evaporar. A diminuição do teor de água presente nas misturas e, conseqüente, aumento da coesão, leva ao aumento da resistência à tração e do módulo de resiliência.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma geral, o acréscimo de borracha às misturas desta pesquisa se mostrou benéfico, resultando em ganhos estruturais e também ambientais.

Os ensaios realizados apresentam claros resultados quanto ao consumo de ligante. O acréscimo de borracha fez com que haja a necessidade de aumentarmos o teor de ligante da mistura.

A incorporação de borracha e conseqüente diminuição do esqueleto mineral resulta em uma queda nos valores de estabilidade Marshall. E quanto maior o teor de borracha, menor será a resistência da mistura.

Todos os teores 0%, 1% e 2% apresentaram valores de estabilidade acima daqueles exigidos por norma estipulado em 250 kgf para 75 golpes de compactação. Entretanto, a estabilidade Marshall não pode servir como único parâmetro referencial para resistência.

Há diversos fatores que influenciam a leitura de estabilidade, podendo haver erros. (Thanaya, 2002).

Com respeito às propriedades mecânicas investigadas, Módulo de Resiliência e Resistência à Tração, observa-se que a leitura desses parâmetros é pouco clara nas primeiras idades de cura.

Conforme, Santana, 1993, a leitura de valores mais coerentes com a realidade em campo deve ser efetuada a, no mínimo, um mês de cura. Os valores de Módulo de resiliência à 60 dias indicam uma tendência de maior flexibilidade para as misturas com maior teor de borracha.

Quanto à resistência a tração, não é claro o comportamento das misturas mesmo a diferentes tempos de cura.

A mistura com acréscimo de 1% de borracha parece salientar-se sobre as demais, aparecendo como uma opção viável e exequível.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrietta, A. J. (2002) *Pneus e Meio Ambiente: um grande problema requer uma grande solução*. Texto retirado do site <http://www.reciclarepreciso.hpg.ig.com.br.htm> Brasil.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM- DNER ME 107/94 Mistura Betuminosa a Frio com Emulsão Asfáltica- Ensaio Marshall.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM- DNER ES 317/97 Pavimentação- Pré-misturados a Frio.
- Heitzman, M. (1992) Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier. *Transportation Research Record*. Washington, n.1339.
- Héritier, A.; Mariotti, S.; Malot, M. (2002) Cold Mix asphalt: new methodology of formulation and new products. *European Roads Review*, Special Issue. Paris França, RGRA.
- Holleran, G.; Reed, J. R.<sup>2</sup> (2000) Emulsification of Asphalt Rubber Blends. *Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference* p.309 a 318. Portugal
- Houssein, M.; Sadeq, M., Funk, L., Maag, R. (1995) A study of Chunk Rubber From Recycled Tires as a Road Construction Material. *Proceedings of 10<sup>th</sup> annual conference on hazardous Waste Research*. USA
- Morilla Jr, A. e Dantas, G.A. (2002). Aplicações Práticas de Ligantes Asfálticos Modificados por Borracha de Pneus de Alta Viscosidade. *11<sup>a</sup> Reunião de Pavimentação Urbana*.
- Pinheiro, J.H.M. e Soares, J.B. (2003) The Effect of Crumb Rubber Gradation and Binder-rubber Interaction Time on the Mechanical Properties of Asphalt-rubber Mixtures (Dry Process). *Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference* p.707 a 718. Brasil
- Potti, J. J.; Lesueur, D.; Eckmwnn, B. (2002) In direction of a cold asphalt mixes method. A Optel contribution. *European Roads Review*, Special Issue. Paris França, RGRA.
- Santana, H. (1993) *Manual de Pré-Misturados a Frio*. IBP, Instituto Brasileiro de Petróleo. Rio de Janeiro, Brasil.
- Singleton, T.M.; Airey, G.D.; Widyatmoko, I. e Collop, A.C. (2000) Residual Bitumen characteristics following Dry Process Rubber-bitumen Interaction. *Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference* p.309 a 318. Portugal
- Spetch, L.P. (2004) *Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Takallou, H. B.; Hicks, R. G. (1988). Development of improvement mix and construction guidelines for rubber-modified asphalt pavements. *Transportation Research Record*. Washington, n.1171.
- Thanaya, I N.A. (2002). *An alternative Design Procedure of Cold Asphalt Mixtures*. Retirado do site: [www.bibcouncil.de/ISSM2002/Proceedings/paperPDF/e01.pdf](http://www.bibcouncil.de/ISSM2002/Proceedings/paperPDF/e01.pdf) U.K

***Endereço dos autores:***

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Av. Osvaldo Aranha, 99 – 3º Andar  
CEP 90035-190 – Porto Alegre, RS, Brasil

Fone: (51)3316-3659

E-mail: [daniclerman@terra.com.br](mailto:daniclerman@terra.com.br)  
[lapav@cpgec.ufrgs.br](mailto:lapav@cpgec.ufrgs.br)