

# UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) EM MISTURAS Á FRIO

**Marcos Lamha Rocha**  
**Geraldo Luciano de Oliveira Marques**  
Universidade Federal de Juiz de Fora

## RESUMO

Nos últimos anos, com o alto crescimento da urbanização, o setor da Construção Civil passou a gerar cada vez mais resíduos de construção e demolição (RCD), atingindo níveis preocupantes. Portanto, torna-se relevante a reutilização desses no contexto brasileiro, especialmente em grandes centros urbanos. Faz-se necessário estudos em relação aos agregados de RCD, para utilização em serviços de pavimentação, em especial na confecção de misturas asfálticas. Neste trabalho é apresentado um estudo da aplicabilidade de RCDs provindos de obras da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) em mistura asfáltica do tipo Pré-Misturado a Frio. Os agregados foram inicialmente caracterizados por meio de ensaios convencionais. As propriedades mecânicas foram obtidas empregando ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e vida de fadiga. Os resultados se mostraram satisfatórios, tanto aqueles avaliados pelas normas brasileiras, quanto quando comparados com outros valores de literatura.

## ABSTRACT

In recent years, with the high urban growth, the Civil Construction sector has increased the generation of construction and demolition waste (CDW), reaching worrying levels. Therefore, the reuse of it becomes relevant in Brazilian context, especially in large urban centers. Studies on CDW aggregates are required for use in paving services, mainly in the manufacture of asphaltic mixtures. This work presents a study of the applicability of CDWs from works of the Federal University of Juiz de Fora (UFJF) in an asphaltic mixture of the type Cold Mix Asphalt. The aggregates were initially characterized by conventional tests. The mechanical properties were calculated using tests of indirect tensile strength, resilient modulus and fatigue. The results were satisfactory, both those evaluated by the Brazilian standards, and when compared with other values found in the literature.

## 1. INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento social e econômico, sendo geradora de grande quantidade de subproduto. Segundo Gaede (2008), essa atividade é responsável por produzir cerca de 60% de todo o resíduo sólido urbano gerado, tornando-se assim uma das grandes responsáveis pelo acúmulo de resíduos nas cidades.

Essa grande quantidade de resíduos acumulados traz à tona a necessidade de alternativas de gerenciamento desse catalisador de efeitos ambientais. No atual contexto de grande desenvolvimento mundial, o reuso desses tipos de materiais tornou-se grande alvo de estudo, devido à importância não só no desenvolvimento sustentável, mas também na melhoria da qualidade das obras (Lourenço e Cavalcante, 2015).

Do ponto de vista de engenharia, os resíduos de construção e demolição (RCD) são materiais nobres, pois apresentam-se resistentes e com baixas expansões. Essas características apontam o seu grande potencial de reciclagem como agregados para pavimentação (Leite, 2007).

Com o intuito de regulamentar e incentivar o emprego do agregado reciclado em pavimentação, em 2004 a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) elaborou a norma NBR 15115, a “Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos”.

Sendo assim, esse trabalho teve como objetivo analisar a aplicabilidade dos resíduos de construção e demolição (RCD) provindos de obras da Universidade Federal de Juiz de Fora

(UFJF), como agregados alternativos em misturas asfálticas do tipo Pré-misturado a frio (PMF) com emulsão catiônica convencional.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Resíduos de Construção e Demolição

São muitas as definições acerca do tema RCD, e essas se divergem tanto na abrangência das frações presentes, como também nas atividades geradoras dessas frações (Angulo, 2001). Dentre essas definições, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), através da Resolução 307, de 5 de julho de 2002, enuncia como “os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras da construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos...”.

No Brasil, a busca por alternativas sobre o reaproveitamento e reciclagem desses RCDs ainda são recentes, e aplicadas ainda de forma incorreta e em apenas alguns municípios. Estas práticas não acompanham a geração de resíduos, sendo o país se sentido cada vez mais obrigado a buscar alternativas diferentes das que estão presentes. A Tabela 1 apresenta a quantidade total de RCD coletados no Brasil em 2016:

**Tabela 1:** Quantidade de RCDs coletados no Brasil em 2016 (ABRELPE 2016)

Região	População Total (hab.)	RCD Coletado (t/dia)	Índice (Kg/hab/dia)
Norte	17.261.983	4.720	0,266
Nordeste	56.978.972	24.387	0,428
Centro-Oeste	15.660.998	13.813	0,882
Sudeste	86.344.130	63.981	0,741
Sul	29.433.099	16.718	0,568
BRASIL	206.031.667	123.619	0,600

Segundo Levy (1997), os RCDs têm uma composição que dependem muita de qual foi a fonte que os originou e em qual momentos esses foram obtidos para reutilização. Como a construção civil é composta por diferentes componentes, seus resíduos acabam se tornando conjuntos de materiais muito diferentes

Lovato (2007), em seu estudo, analisou a composição do entulho provindo de um canteiro de obras brasileiro, colocando todos os materiais presentes e suas respectivas porcentagens. Através da tabela 2, onde são apresentados esses valores, percebe-se um material básico de boa qualidade.

**Tabela 2:** Composição média dos resíduos de construção (Lovato, 2007)

Elemento	%
Argamassas	44,2
Concreto	21,1
Material cerâmico	20,8
Rochas e solos	17,7
Cerâmica polida	2,5
Outros	0,5

Devido à escassez dos recursos naturais, às rigorosas legislações ambientais e os altos custos econômicos e sociais causados pelos desperdícios de materiais, faz-se necessário no atual

contexto, a procura de novos materiais para uso de construção de pavimentos (QUIÑONES, 2014).

Segundo Petkovic *et al.* (2004), todas as estruturas que compõe um pavimento rodoviário podem ser constituídas com materiais reutilizados ou reciclados. Entre essas camadas, destacam-se o revestimento, a base e sub-base.

## **2.2. Pré-Misturado a Frio**

O DNIT (153/2010-ES) define PMF como sendo uma mistura executada à temperatura ambiente, em usina apropriada, composta de agregado mineral graduado, material de enchimento (filler) e emulsão asfáltica, para espalhamento e compressão a frio. Podendo ser usado como revestimentos de ruas e estradas de baixo volume de tráfego, ou ainda como camada intermediária e em operações de manutenção e conservação. No Brasil é maior empregada em serviços rotineiros, como “tapa-buracos”.

Dentre as misturas a frio do tipo PMF, essas variam com relação a distribuição granulométrica de seus agregados, resultando em: misturais mais abertas, com elevado volume de vazio e resultando em um material bastante drenante; e densos, com graduação contínua e com baixo índice de vazios (Brochado, 2015).

Segundo Abeda (2001), as principais vantagens da utilização do PMF quando comparados com as misturas a quente estão ligadas a utilização de equipamento simples, alta produtividade, menor custo, trabalhabilidade à temperatura ambiente e elevada capacidade de suportar às grandes deflexões das camadas subjacentes. Como desvantagem, há maior desgaste ao uso e envelhecimento acelerado, apresenta valores inferiores de resistência e limitações para aplicações em rodovias de alto tráfego.

Segundo Roso (2007, apud Guimarães e Loures, 2015), os reparos superficiais de pavimentos podem ser executados com misturas usinados à frio, pois os resultados de trincamento por fadiga apresentam melhor desempenho para as misturas à frio do que à quente com alto volume de vazios.

A norma DNIT 153/2010-ES contém os procedimentos para fabricação e aplicação de PMF, com emulsão asfáltica catiônica convencional, para construção de camadas de pavimentos flexíveis. Além dos requisitos necessários aos materiais e ensaios dos serviços.

## **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

O desenvolvimento da pesquisa seguiu o procedimento envolvendo as seguintes etapas:

- a) Caracterização dos materiais: nessa etapa, fez-se a caracterização dos RCDs através dos ensaios de granulometria, massa específica, absorção, abrasão “Los angeles”, índice de forma, durabilidade e adesividade. A emulsão asfáltica já veio com caracterização do fornecedor.
- b) Montagem das misturas de agregados: para o estudo, escolheu-se duas faixas para serem trabalhadas: a faixa C da especificação de serviço DNIT 153-2010 e faixa XII de Santana (1993). A partir dessas, variou-se a porcentagem de agregados e montou-se

corpos-de-prova formados apenas com esses (esqueletos minerais), afim de se enquadrarem nas faixas.

- c) Dosagem das misturas asfálticas: para a definição do teor de projeto de ligante, aplicou-se o método Marshall, e com os resultados, obteve-se um teor para cada faixa. Resolveu-se fazer duas dosagens, pelo fato da primeira ter apresentado dificuldade de mistura.
- d) Propriedades mecânicas das misturas asfálticas: Com o teor de projeto já definido, montou-se corpos de prova e avaliou-se algumas propriedades mecânicas, através de ensaios como resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e fadiga.

### **3.1. Caracterização dos Materiais**

O trabalho referente faz um estudo com relação a aplicabilidade de RCD em misturas asfálticas para uso em revestimento. Para se obter um pavimento bem projetado, é necessário que esse proporcione ao usuário conforto e segurança, além de garantir uma boa vida útil.

Para que se cumpra esse objetivo, é de suma importância fazer um estudo e análise dos materiais empregados nos revestimentos asfálticos, assim como suas características mecânicas. Feito isso, fica mais fácil e preciso o dimensionamento posterior do revestimento e pavimento.

O RCD utilizado na pesquisa e na qual foi feita sua aplicabilidade em misturas asfálticas, foi fornecido pela Pró-Reitoria de Infraestrutura (PROINFA) da Universidade Federal de Juiz de Fora, advindo de obras de demolição do próprio Campus. Os resíduos foram levados para o pátio da PROINFA, com o objetivo de se realizar a triagem. O entulho coletado era composto por diversos materiais, como argamassa, concreto, tijolos, cerâmica, vidro, plástico, etc.

Com os entulhos já separados, deu-se início ao processo de britagem do mesmo, em um triturador de mandíbula, afim de obterem frações menores daquelas já obtidas e para a retirada do aço junto ao concreto. Após isso, utilizou-se de 3 frações diferentes: uma acima de 3/8” (9,5mm), uma entre a peneira de 3/8” e a N° 10 (2mm) e outra passante na peneira n° 10, com o objetivo de separar em parcelas menores os materiais e facilitar os ensaios. Desse processo resultou-se em três tipos de materiais, denominados neste trabalho de:

- a) Brita 1
- b) Brita Ø
- c) Pó de Pedra

A figura 1, abaixo, ilustra os passos do entulho no local da demolição até a chegada ao Laboratório:



**Figura 1:** Etapas do processo de produção do RCD.

Para o uso dos agregados e do ligante asfáltico em misturas asfálticas faz-se necessário conhecer suas propriedades tecnológicas e de caracterização, então realizou-se os seguintes ensaios e procedimentos representados na tabela 3 a seguir:

**Tabela 3:** Ensaio de Caracterização dos materiais

Agregado graúdo	Material	
	Agregado miúdo	Ligante Asfáltico
Análise Granulométrica (DNER-ME 083/98)	Análise Granulométrica (DNER-ME 083/98)	Viscosidade Saybolt (NBR 14491)
Massa Específica Real e Aparente (NBR 53/2002)	Massa Específica Real e Aparente (DNIT 081/98)	Peneiração (NBR 143939)
Absorção (DNER-ME 081/98)	Absorção (DNER-ME 081/98)	Sedimentação (NBR 6570)
Abrasão 'Los Angeles' (DNER-ME 035/98)		Carga da Partícula (NBR 6567)
Índice de Forma (DNER 086/94)		Resíduo Seco (NBR 14367)
Durabilidade (DNER 089/94)		pH (NBR 6229)
Adesividade a ligante betuminoso (DNER-ME 078/94)		

### 3.2. Projeto de Mistura de Agregados

Para esse trabalho, usou-se duas faixas para a granulometria das misturas: a faixa C da norma DNIT 153-2010, e faixa XII do livro "Pré-misturado à frio" do (quadro III.20, Santana, 1993), ilustradas na figura 2 abaixo:

Peneiras		% mínima passando				Tolerâncias da faixa de projeto
Malha	mm	A	B	C	D	
1"	25,4	100	-	100	-	± 7%
3/4"	19,1	75-100	100	95-100	100	± 7%
1/2"	12,7	-	75-100	-	95-100	± 7%
3/8"	9,5	30-80	35-70	40-70	45-80	± 7%
N° 4	4,8	10-35	15-40	20-40	25-45	± 5%
N° 10	2,0	5-20	10-25	10-25	15-30	± 5%
N° 200	0,075	0-5	0-5	0-8	0-8	± 2%
Teor de Betume Solúvel no CS <sub>2</sub> %		4-8	4-8	4-8	4-8	± 2%

Peneiras		% mínima passando
Malha	mm	Faixa XII
1"	25,4	-
3/4"	19,1	100
1/2"	12,7	85-100
3/8"	9,5	75-100
N 4	4,8	50-85
N 10	2	30-75
N 200	0,075	4-8

**Figura 2:** Especificações granulométricas do PMF. a) DNIT 153/2010; b) Faixa XII, quadro III.20, Santana (1993).

Para facilitar o enquadramento do RCD nas faixas solicitadas, utilizou-se do recurso da ferramenta computacional Microsoft Excel. Nela, colocou-se a distribuição granulométrica de cada material (Brita 1, Brita 0 e Pó de Pedra) e variou-se a porcentagem de cada um desses na mistura para que se enquadrassem nos limites das faixas (Método das Tentativas).

Após ter a porcentagem de cada um dos agregados, separam-se quantidades suficientes de materiais de acordo com as peneiras especificadas. Depois de cada material separado em cada peneira, montaram-se 24 esqueletos minerais com aproximadamente 1,1Kg cada, formados pelas granulometrias especificadas. Resolveu-se por chamar a faixa C do DNIT 153/2010 de Primeira Mistura, e a Faixa XII do livro de Santana de Segunda Mistura.

### 3.3. Dosagem das Misturas Asfálticas

A dosagem de uma mistura asfáltica consiste na metodologia da escolha de um teor de projeto de ligante, a partir de uma curva granulométrica predefinida. Esse teor de projeto de ligante asfáltico varia de acordo com o método de dosagem, e sendo função de parâmetros como energia de compactação, tipo de mistura, temperatura, etc. (Bernucci *et al.*, 2006).

Para o trabalho proposto, fez-se uso da Norma DNER-ME 107/94, Mistura a frio – Ensaio Marshall. Primeiramente, adotou-se 5 teores de asfalto, variando em 1% na primeira mistura, e para uma segunda mistura adotou-se 3 teores de emulsão, variando em 2%.

Para cada CP, mediu-se: altura, diâmetro, massa seca, massa úmida e massa imersa. Com os valores obteve-se a massa específica aparente compactada (Gmb) e massa específica máxima teórica (DMT). Por seguinte, calculou-se o volume de vazios (Vv), vazios dos agregados minerais (VAM) e relação betume/vazio (RBV).

Com os valores da porcentagem de vazios, estabilidade e fluência de cada CP, traçou-se curvas e comparou-se com os limites estabelecidos pela DNIT 153/2010, optando-se por um teor de projeto para cada mistura.

### 3.4. Propriedades Mecânicas

Para as misturas asfálticas, foram determinadas as propriedades mecânicas das mesmas para analisar se seus resultados atendem as especificações. Para isso, foram realizados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, ensaio de fadiga e módulo de resiliência, com 3 corpos-de-prova para cada ensaio e o resultado final foi a média desses. Os ensaios realizados e suas respectivas normas são representados na tabela 4, a seguir:

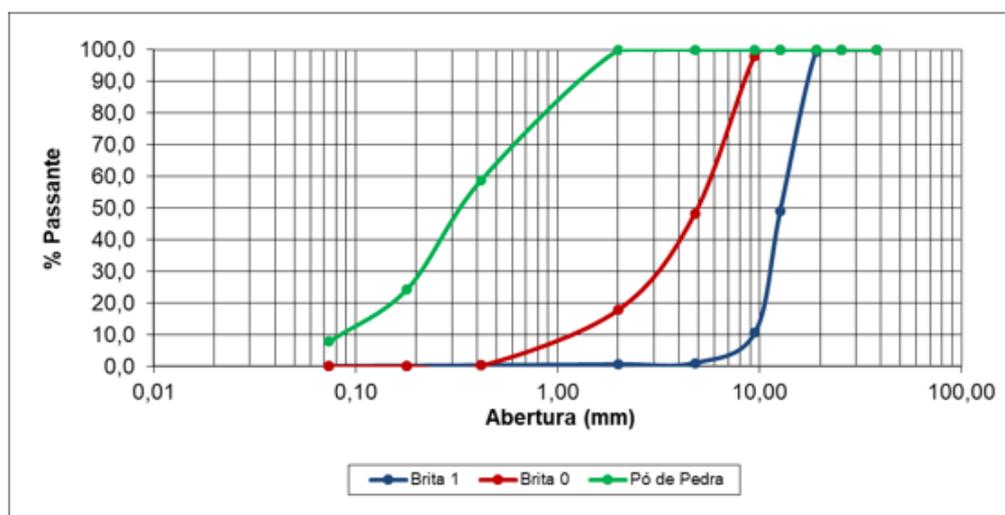
**Tabela 4:** Ensaios mecânicos para as misturas asfálticas

Ensaio	Norma
Resistência a Tração por Compressão Diametral	DNER ME 138/94
Ensaio de Fadiga	-
Módulo de Resiliência	DNIT ME 134/2010

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Caracterização dos Agregados

As respectivas granulometrias dos agregados empregados na composição das misturas asfálticas consideradas na dosagem Marhsall estão apresentadas na Figura 3, e a Tabela 5 reúne os demais índices físicos característicos desses materiais.



**Figura 3:** Curvas Granulométricas dos Agregados de RCD usados na pesquisa.

**Tabela 5:** Resultados dos índices físicos dos agregados

Índice Físico	Valores		
	Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra
Massa Específica real (g/cm <sup>3</sup> )	2,632	2,610	2,225
Massa Específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,314	2,241	2,021
Absorção (%)	4,839	6,276	7,116
Abrasão 'Los Angeles' (%)	38,8	44,1	-
Índice de Forma	0,88	0,79	-
Durabilidade (%)	5,87	4,91	-
Adesividade ao ligante betuminoso	Satisfatória	Satisfatória	-

Os agregados apresentaram propriedades adequadas para a utilização em misturas asfálticas do tipo PMF, em conformidade com a especificação de serviço DNIT 153/2010.

Segundo a norma, os agregados graúdos deveriam apresentar valores de abrasão igual ou inferior a 40, admitindo-se agregados com valores maiores, no caso de em emprego anterior terem apresentado desempenho satisfatório, índice de forma superior a 0,5, durabilidade inferior a 12% e adesividade satisfatória, sendo assim os valores encontrados estão dentro dos limites.

#### 4.2. Caracterização do Ligante

No trabalho em questão foi utilizado a Emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta (tipo: RL-1C denso), fornecido pela Strutura Asfaltos S/A. Os valores de caracterização foram apresentados pelo fornecedor, e estão descritos na tabela 6.

**Tabela 6: Características do Ligante Asfáltico RL-1C**

Características	Método	Especificação	Análise fábrica
Viscosidade Saybolt Furol, 50 °C, em s	NBR 14491	70 máx.	25
Peneiração, em % peso	NBR 14393	0,1 máx.	0
Sedimentação, 5 dias (%)	NBR 6570	5 máx.	0,5
Carga da partícula	NBR 6567	Positiva	Positiva
Resíduo seco	NBR 14376	60 mín.	61,50
pH	NBR 6299	6,5 máx.	2,8

Os valores obtidos entregues pela fornecedora estão de acordo com a Norma DNER 369/97, mostrando que as Emulsões Asfálticas podem ser utilizadas em misturas do tipo pré-misturado a frio para pavimentação asfáltica.

#### 4.3. Projeto de Mistura de Agregados

O projeto de mistura de agregados das misturas asfálticas tem como objetivo a montagem do esqueleto mineral a fim de se enquadrarem nas faixas desejadas. Utilizou-se então da ferramenta Microsoft Excel e através do método das tentativas, onde se variava a porcentagem de cada material, para a mistura final se enquadrar nas faixas. Na tabela 7, estão descritas as misturas de agregados utilizadas:

**Tabela 7: Mistura de agregados para as duas misturas**

	Misturas	
	Mistura 1	Mistura 2
Brita 1	45%	5%
Brita 0	45%	50%
Pó de Pedra	10%	45%

#### 4.4. Dosagem das Misturas Asfálticas

Como teor inicial optou-se por 10% de emulsão, e utilizou-se  $\pm 2\%$  para os outros corpos de provas. Para cada teor, montaram-se 3 CPs e foram feitos ensaios volumétricos e mecânicos para encontrar-se o teor de projeto.

Após as primeiras dosagens, percebeu-se nos corpos de provas dificuldade na mistura, pois se encontraram muito secas e com pouco ligante, devido ao fato do resíduo de construção e

demolição utilizado ser altamente absorvivo. Então como outra tentativa, resolveu-se aplicar o Método Marshall novamente, mas com teores maiores de ligante na mistura.

Optou-se então por partir do teor de 13%, e variar esse em  $\pm 2\%$ , com 3 CPs para cada teor e aplicar a metodologia Marshall para obter o teor de projeto. As tabelas 8 e 9, mostram os valores obtidos para todas as dosagens e misturas.

**Tabela 8: Parâmetros da primeira mistura**

Teor de Emulsão (%)	Primeira Dosagem					Segunda Dosagem		
	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	11,0	13,0	15,0
Teor de asfalto (%)	4,8	5,4	6,0	6,6	7,2	6,6	7,8	9,0
Vv (%)	15,46	13,96	12,90	11,78	12,76	21,34	22,37	19,88
RBV (%)	38,44	43,89	48,59	53,58	53,02	36,13	38,08	44,85
VAM (%)	25,08	24,88	25,08	25,23	27,15	33,34	36,13	36,00
Gmb	2,044	2,062	2,070	2,079	2,039	1,854	1,799	1,827
DMT	2,418	2,397	2,377	2,357	2,337	2,357	2,318	2,280
E (Kgf)	260,5	379,6	340,6	257,1	119,2	265,5	376,8	309,7
f (mm)	4,25	3,25	4	3,50	4,50	4,00	5,50	5,00

**Tabela 9: Parâmetros da segunda mistura**

Teor de Emulsão (%)	Primeira Dosagem					Segunda Dosagem		
	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	11,0	13,0	15,0
Teor de asfalto (%)	4,8	5,4	6,0	6,6	7,2	6,6	7,8	9,0
Vv (%)	21,54	19,93	18,31	17,90	17,79	24,62	17,94	19,18
RBV (%)	29,32	33,77	38,59	41,21	43,27	32,00	44,80	45,88
VAM (%)	30,47	30,09	29,73	30,42	31,35	36,11	32,48	35,43
Gmb	1,897	1,919	1,941	1,935	1,921	1,776	1,902	1,843
DMT	2,418	2,397	2,377	2,357	2,337	2,357	2,318	2,280
E (Kgf)	231,4	234,2	251,3	137,0	101,2	323,3	393,3	340,3
f (mm)	4,25	3,25	4	4,25	5,25	4,25	5,5	5,5

A Norma DNIT 153-2010 ES especifica apenas três quesitos: a porcentagem de vazios, a estabilidade mínima e a fluência, com os respectivos valores mínimos descritos na tabela 3. Analisando-se essas especificações e os gráficos em função do teor de emulsão, obteve-se os seguintes teores de ligante asfáltico para as misturas, descritos na tabela 10.

**Tabela 10: Valores de teores ótimos para as misturas**

Mistura	Faixa	Teor de Ligante
Primeira	C (DNIT 153/2010)	9%
Segunda	Tab. XII (Santana, 1993)	10%
Primeira	C (DNIT 153/2010)	11%
Segunda	Tab. XII (Santana, 1993)	11%

#### 4.5. Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas

##### 4.5.1. Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência

A Tabela 11 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT) e módulo de resiliência (MR) realizados sobre os corpos de prova.

**Tabela 11:** Valores de RT e Módulo das misturas asfálticas

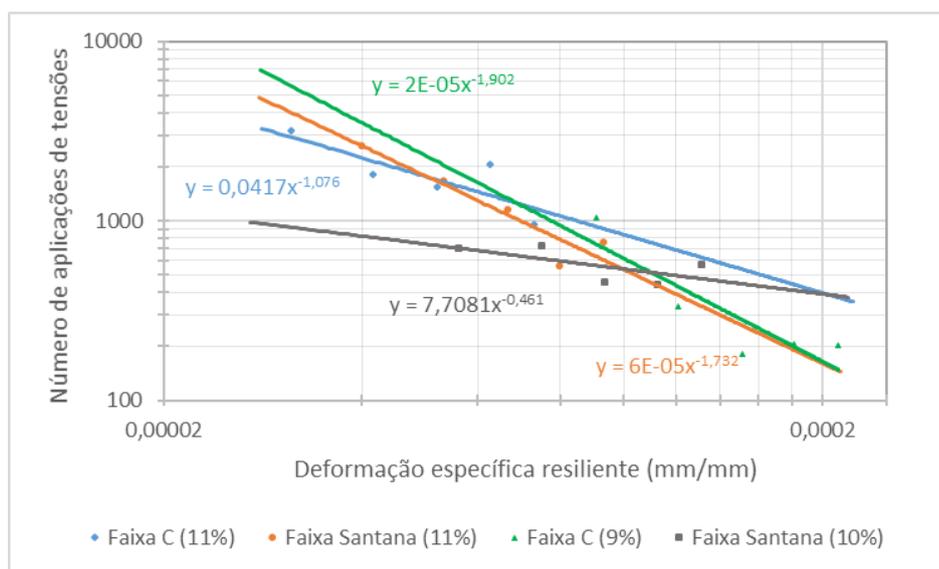
Mistura	Faixa	Teor de Ligante	RT Médio (MPa)	Desvio Padrão	MR Médio (MPa)	Desvio Padrão
Primeira	C (DNIT)	9%	0,52	0,6571	860,0	322,589
Segunda	Tab. XII (Santana)	10%	0,30	0,0723	802,3	256,890
Primeira	C (DNIT)	11%	0,29	0,0458	1392,6	306,245
Segunda	Tab. XII (Santana)	11%	0,25	0,0377	940,3	137,124

Os valores obtidos de RT no trabalho são menores a outros valores encontrados na literatura. Silva (2009), Quiñones (2014) e Silva *et al.* (2016) obtiveram, respectivamente 0,63 MPa, 0,86 MPa e 0,44 MPa. Os valores inferiores, podem ser justificados pelo tipo de mistura, a frio com a quente, quando comparado com os dois primeiros trabalhos, que também usaram RCD, e com o último trabalho, em que se usou o PMF, mas com agregados convencionais.

No Brasil, atualmente não existe padronização nas normas brasileiras quanto aos limites dos valores de módulo de resiliência em misturas asfálticas. Comparando os valores obtidos com o de outras pesquisas, os resultados se mostraram inferiores a demais literaturas. Quiñones (2014) e Silva (2009) que usaram misturas com RCD a quente, acharam valores de 2858 MPa e 6000 MPa, respectivamente, e Silva *et al.* (2016), com misturas a frio com agregados convencionais com valor de 1616 MPa para o módulo, e como no caso do ensaio de resistência à tração, se justificando ao fato de se tratar de misturas a frio e com o uso de RCD.

#### 4.5.2. Ensaio de Fadiga

A expressão da vida de fadiga para as misturas é do tipo  $N = k1 \times \Delta\sigma^{-n1}$  e estão representadas na Figura 4, em um gráfico log-log. Nas abscissas estão representadas as diferenças de tensões ( $\Delta\sigma$ ), e nas ordenadas, o número de solicitações até a ruptura (N).



**Figura 4:** Curvas de Fadiga das misturas asfálticas

A partir da regressão dos dados de ensaio que compõem a curva de fadiga para cada mistura, obteve-se os parâmetros (constantes) de fadiga,  $k1$  e  $n1$ . Os resultados desses valores dos ensaios estão descritos na tabela 12.

**Tabela 12:** Constantes experimentais das curvas de fadiga das misturas

Mistura	Faixa	Teor de Ligante	k1	n1
Primeira	C (DNIT 153/2010)	9%	80,701	-1,906
Segunda	Tab. XII (Santana, 1993)	10%	318,79	-0,461
Primeira	C (DNIT 153/2010)	11%	466,37	-1,038
Segunda	Tab. XII (Santana, 1993)	11%	98,158	-1,732

Com os resultados, pode-se observar que a primeira mistura apresentou uma resistência ao trincamento por fadiga superior ao da segunda mistura. Isto pode ser justificado pela granulometria, observando que uma mistura mais densa apresenta valores superiores de vida de fadiga comparadas a misturas abertas.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização do agregado de RCD possibilitou analisar que o material reciclado apresenta valores um pouco inferiores de massa específica do que agregados naturais. Além disso, observaram-se valores elevados de absorção do material reciclado, quando comparados com os convencionais, devendo-se ao fato de apresentar materiais em sua constituição (tijolos e concreto) que conduzem a maior absorção.

No que se refere aos ensaios de Abrasão “Los Angeles” e Índice de Forma, os agregados de RCD apresentaram resultados satisfatórios com as exigências da norma com relação aos agregados, e resultados próximos a de outras pesquisas e literaturas. A adesividade apresentou valores satisfatório, apesar do agregado se tratar de um material altamente absorvivo.

A primeira dosagem do RCD apresentou teores de projeto de 9% e 10%, valores superiores aos teores usados em misturas com agregados convencionais. As porcentagens inferiores usadas nas primeiras dosagens apresentarem dificuldades na hora de misturar, pelo alto teor absorvido dos RCDs. Então ao aumentar os teores de ligante no ensaio Marshall, a segunda dosagem resultou em valores de 11% para as duas misturas no teor de projeto.

As misturas produzidas com RCD na pesquisa apresentaram valores inferiores de resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência, quando comparados a outros trabalhos, que se utilizaram de outros agregados e misturas. O resultado inferior é justificado pelo fato da pesquisa utilizar de misturas a frio e agregados de resíduos, apresentando resultados inferiores ao valor mínimo indicado para misturas a quente do tipo concreto asfáltico.

Os ensaios de vida de fadiga dos agregados reciclados apresentaram-se satisfatórios, devendo-se ao fato do melhor entrosamento entre as partículas de maior cubicidade, do maior teor de ligante usado (comparado com misturas convencionais) e ao alto teor absorvivo do resíduo reciclado. Embora apresente valores inferiores de resistência a fadiga do que em outras pesquisas, os resultados apresentaram-se adequados para o fim que a mistura teria.

Em suma, com os resultados obtidos pelos ensaios, pode-se concluir que os resíduos da construção e demolição utilizados nessa pesquisa podem ser aplicados em misturas asfálticas do tipo PMF a fim de serem alternativas em revestimentos de pavimento. Esse bom desempenho das misturas com RCD está ligado diretamente à origem do resíduo utilizado, que possuía boa quantidade de concreto de cimento *Portland* e argamassa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEDA – Associação brasileira de Empresas distribuidoras de asfalto. *Manual básico de emulsões asfálticas. Soluções para pavimentar sua cidade*. 1. Ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2001.
- ABRELPE – Associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais - *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2016*.
- Angulo, S. C. (2001) *Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Bernucci, L. B. et al. (2006) *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, v. 504.
- Brochado, M. M. L. (2015) *Estudo da viabilidade do asfalto pré-misturado a frio em rodovias de médio e baixo tráfego*.
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente (2002). Resolução Nº 307, de 5 de julho de 2002. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/2002.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - *Agregados – análise granulométrica. Método de Ensaio*, 083/98. Rio de Janeiro: 1998.
- \_\_\_DNER – *Agregado–avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio*, 089/94. Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_DNER - *Agregados–Índice de Forma de Agregado*, 086/94. *Método de Ensaio*, Rio de Janeiro, RJ.
- \_\_\_DNER - *Emulsões asfálticas catiônicas*, 369/97. Rio de Janeiro, 1997.
- \_\_\_DNER – ES: *Pavimentação: pré-misturados a frio*, 317/97. Rio de Janeiro. 1997. 14 p.
- \_\_\_DNER. *Agregados–determinação da abrasão “Los Angeles”*, 035/98. Rio de Janeiro, RJ.
- \_\_\_DNER. *Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall. Método de Ensaio*, 107/94. Rio de Janeiro: 1994a. 9p.
- \_\_\_DNER. *Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso*, 078/94. Rio de Janeiro, RJ.
- \_\_\_DNER. *Pavimentação Flexíveis – Misturas betuminosas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – ME*, 138/94 Rio de Janeiro, RJ.
- \_\_\_DNER. *Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo*. Rio de Janeiro, RJ, 1998.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes – *Emulsões asfálticas para pavimentação. Especificação de material*, 165/2013, Rio de Janeiro, 2013.
- \_\_\_DNIT. *Agregado graúdo – determinação da densidade real*. Rio de Janeiro, 1995
- \_\_\_DNIT. *Pavimentação asfáltica – Pré-misturado a frio com emulsão catiônica convencional. Especificação de serviço*, 153/2010, Rio de Janeiro, 2010a. 11p.
- \_\_\_DNIT. *Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*, 134/2010. Rio de Janeiro, 2010.
- Gaede, L. P. F. (2008) *Gestão dos resíduos da construção civil no município de Vitória-ES e normas existentes*. Belo Horizonte.
- Guimarães, A. C. R.; Loures, R. C. B. A. (2015) *Utilização de misturas asfálticas usinadas à frio como alternativa técnica, econômica e ambiental às misturas usinadas a quente*. XXIX Anpet, Ouro Preto.
- Leite, F. C. (2007) *Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Levy, S M.; HELENE, P. R. L. (1997) *Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos*. São Paulo, p. 4.
- Lourenço, V. M. Q.; Cavalcante, E. H. (2015) *Dosagem de Misturas asfálticas do tipo CAUQ utilizando reciclados de resíduos de construção e demolição*. 18 ENACOR, Foz do Iguaçu, Rio de Janeiro.
- Lovato, P. S. (2007) *Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto*.
- Petkovic, G., Engelsen, J. C., Haoya, A. O., Breedveld, G. (2004). *Environmental impact from the use of recycled materials in road construction: method for decision-making in Norway*. *Resources. Conversation and Recycling*, 42: p 249-264.
- Quiñones, F. S. (2014) *Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas*. Universidade do Brasília.
- Santana, H. (1993) *Manual de pré-misturados a frio*. IBP.
- Silva, C. A. R. (2009) *Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas*.
- Silva, T. K. et al. (2015) *Dosagem de Misturas Betuminosas a frio e seu estudo sob efeitos de cargas estáticas e repetidas*.