



FATEC-SP

Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Departamento de Transportes e Obras de Terra

LEONARDO DOS SANTOS SILVA

**ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE
RESÍDUOS RECICLADOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL NAS
CAMADAS DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS.**

SÃO PAULO
2014

LEONARDO DOS SANTOS SILVA

**ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE RESÍDUOS
RECICLADOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL NAS CAMADAS DE BASE E
SUB-BASE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.**

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Tecnólogo em Construção Civil na Modalidade de Movimento de Terra e Pavimentação.

Orientador: Prof. Me. Josué Alves Roso

SÃO PAULO
2014



FATEC-SP

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

Departamento de Transporte e Obras de Terra

**Análise de Características Mecânicas de Resíduos Reciclados de
Construção Civil nas Camadas de Base e Sub-base de Pavimentos Flexíveis.**

Leonardo dos Santos Silva

Monografia aprovada pela Banca Avaliadora constituída por

Prof. Me. Josué Alves Roso
Presidente e Orientador

Prof. Me. Décio Moreira

Prof.ª Esp. Josie Pereira de Freitas Micalli

São Paulo, 31 de maio de 2014.

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Valdir dos Santos Silva e a minha mãe Eliene Oliveira de Sousa Silva por todo apoio, incentivo e motivação.

Aos meus irmãos Jefferson, Kelly e Cátia por toda ajuda e incentivo.

A minha namorada Kátia Cilene Dias por todo incentivo nos momentos difíceis.

Ao professor Me. Josué Alves Roso pela orientação neste trabalho, pelo seu profissionalismo, ensinamento e paciência.

Aos amigos da Fatec-SP: Marcelo, Wilson, Pedro, Rodrigo, Fernando e Gabriela que estiveram comigo nessa difícil caminhada e pelos momentos de descontração.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus por nunca me deixar desanimar, por me dar forças para buscar novos conhecimentos e pela saúde para poder lutar pelos meus objetivos.

A empresa JBA ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA. por fornecer dados importantes para esta pesquisa.

RESUMO

O trabalho faz uma revisão bibliográfica, dissertando sobre a utilização de materiais recicláveis em pavimentos flexíveis, com enfoque na utilização desses materiais no projeto de bases e sub-bases de pavimento, e seus vários tipos, métodos, equipamentos e processos. A pesquisa desenvolvida procurou apresentar informações sobre a utilização e desempenho dos materiais reciclados misturados com solo e estabilizados com cimento.

As experimentações avaliaram algumas características mecânicas de misturas asfálticas realizadas com material reciclado de construção e demolição civil (RCD) e sua mistura com solo e cimento, para isso, foram moldados corpos de prova com as misturas em proporções variadas a fim de verificar seu desempenho.

O comportamento das misturas recicladas e produzidas no laboratório foi avaliado fundamentalmente, por meio de ensaios de resistência a compressão (RC) e ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR). As misturas foram realizadas com dois tipos de solos distintos, sendo uma Argila Silto Arenosa e o outro uma Areia Argilosa.

Esse universo amostral demonstrou que, a utilização de solos, tais como, a Areia Argilosa, os parâmetros especificados por normas brasileiras, são atendidos satisfatoriamente, tanto no parâmetro (RC), quanto no parâmetro do ISC, entretanto, para a Argila Silto Arenosa esses parâmetros não foram totalmente atendidos, pois, variaram, entre aceitáveis e não aceitáveis, dependendo das porcentagens de cimento utilizadas.

Outro fator que ficou bem nítido nos resultados foram que os resultados para os corpos de prova com maior quantidade de material reciclável (RCD) apresentaram valores mais satisfatórios.

As misturas de Areia Silto Arenosa e Areia Argilosa com adição de 6% de cimento atenderam a exigência da NBR 15115.

A Argila Silto Arenosa com RCD pode ser utilizado nas camadas de subleito e sub-base e a Areia Argilosa com RCD pode ser utilizada nas camadas de subleito, sub-base e base, com base nas determinações da NBR 15115 e NBR 15116.

O desempenho melhorou à medida que aumentava a quantidade de RCD e a porcentagem de cimento na sua composição.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: CAMADAS DO PAVIMENTO	4
FIGURA 2.2: CAMADA DE REGULARIZAÇÃO	5
FIGURA 2.3: REFORÇO DO SUBLEITO.....	6
FIGURA 2.4: EXECUÇÃO DE CAMADA DE SUB-BASE	6
FIGURA 2.5: EXECUÇÃO DE CAMADA DE BASE	7
FIGURA 2.6: EXECUÇÃO DE CAMADA DE REVESTIMENTO	8
FIGURA 2.7: PAVIMENTO FLEXÍVEL.....	9
FIGURA 2.8: PAVIMENTO DE CONCRETO DE CIMENTO	10
FIGURA 2.9: CLASSIFICAÇÃO DE BASES E SUB-BASES FLEXÍVEIS E SEMIRRÍGIDAS.....	11
FIGURA 2.10: APLICAÇÃO DE CONCRETO DE CIMENTO	12
FIGURA 2.11: ASPECTO VISUAL DE MACADAME DE CIMENTO.....	12
FIGURA 2.12: BASE DE SOLO CIMENTO	13
FIGURA 2.13: ASPECTO VISUAL DE BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO.....	14
FIGURA 2.14: ASPECTO VISUAL DE SOLO ESTABILIZADO.....	15
FIGURA 2.15: ASPECTO VISUAL DE MACADAME HIDRÁULICO	16
FIGURA 2.16: ASPECTO VISUAL DE BRITA GRADUADA	17
FIGURA 4.1: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO RCD.....	24
FIGURA 4.2: SEPARAÇÃO DOS MATERIAIS EM FUNÇÃO DA SUA NATUREZA.....	25
FIGURA 4.3: TABELA COMPARATIVA EM FUNÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO RCD	26
FIGURA 4.4: ESQUEMA DE USINA DE RECICLAGEM DO RCD.....	27

FIGURA 4.5: USINA RECICLADORA DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)	28
FIGURA 4.6: RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP)	31
FIGURA 4.7: EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA FRESAGEM DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	32
FIGURA 4.8: REMOÇÃO DA CAMADA DE PAVIMENTO	33
FIGURA 4.9: GRANULOMETRIA RECOMENDADA.....	34
FIGURA 4.10: PENEIRAS USADAS NA GRANULOMETRIA	34
FIGURA 4.11: RECICLADORA A FRIO IN SITU WIRTGEN WR 4200	35
FIGURA 4.12: USINA MISTURADORA WIRTGEN KMA 220	36
FIGURA 4.13: CLASSIFICAÇÃO DO RAP.....	37
FIGURA 5.1: PRENSAS UTILIZADAS PARA RUPTURA DE CORPOS DE PROVA	39
FIGURA 5.2: QUARTEAMENTO DE AMOSTRA	40
FIGURA 5.3: MONTAGEM DE CORPOS DE PROVA	43
FIGURA 6.1: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DE COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO 1	47
FIGURA 6.2: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DE COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO 2	47
FIGURA 6.3: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA PARA O SOLO 1.	49
FIGURA 6.4: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA PARA O SOLO 2.....	49

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1 – LIMITES DE RESISTÊNCIA PARA O ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES.....	41
TABELA 5.2: VALORES MÍNIMOS EXIGIDOS PARA O ENSAIO DE CBR.....	42
TABELA 5.3 - MATRIZ DE ENSAIOS PARA O SOLO 1 ARGILA SILTO ARENOSA	44
TABELA 5.4 - MATRIZ DE ENSAIOS PARA O SOLO 2 - AREIA ARGILOSA	44
TABELA 6.1: RESULTADOS DO ENSAIO DE ISC PARA O SOLO 1	45
TABELA 6.2: RESULTADOS DO ENSAIO DE ISC PARA O SOLO 2	45
TABELA 6.3: RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DO ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES PARA O SOLO 1	46
TABELA 6.4: RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DO ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES PARA O SOLO 2	46
TABELA 6.5: RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DO ENSAIO DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA PARA O SOLO 1.....	48
TABELA 6.6: RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DO ENSAIO DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA PARA O SOLO 2.....	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVO.....	2
1.2	JUSTIFICATIVA	2
1.3	METODOLOGIA.....	2
2	PAVIMENTO.....	3
2.1	CONCEITO.....	3
2.2	FUNÇÕES DOS PAVIMENTOS	3
2.3	CAMADAS DOS PAVIMENTOS	4
2.3.1	REGULARIZAÇÃO.....	5
2.3.2	REFORÇO DO SUBLEITO.....	5
2.3.3	SUB-BASE	6
2.3.4	BASE	7
2.3.5	REVESTIMENTO	7
2.4	CLASSIFICAÇÃO DAS CAMADAS DOS PAVIMENTOS	8
2.4.1	PAVIMENTO FLEXÍVEL	8
2.4.2	PAVIMENTO SEMIRRÍGIDO.....	9
2.4.3	PAVIMENTO RÍGIDO	9
2.5	MATERIAIS UTILIZADOS NAS CAMADAS DOS PAVIMENTOS	10
2.5.1	BASES RÍGIDAS	11
2.5.1.1	Concreto de cimento.....	11
2.5.1.2	Macadame de cimento.....	12
2.5.1.3	Solo cimento.....	13
2.5.1.4	Base de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC).....	13
2.5.2	BASES FLEXÍVEIS	14
2.5.2.1	Base de solo estabilizado.....	14
2.5.2.2	Base de macadame hidráulico	15
2.5.2.3	Base de macadame betuminoso.....	16
2.5.2.4	Base de Brita Graduada Simples (BGS).....	16
3	AGREGADOS UTILIZADOS NA PAVIMENTAÇÃO E SUAS APLICAÇÕES	18
3.1	AGREGADOS NATURAIS	18
3.2	AGREGADOS ARTIFICIAIS.....	18
3.3	ASFALTOS E BETUMES	18
3.4	CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A QUENTE (CAUQ)	19
3.5	CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ).....	19
3.6	CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP).....	19
3.7	ESPUMA DE ASFALTO.....	20
3.8	ASFALTOS DILUÍDOS DE PETRÓLEO (ADP)	20
3.9	EMULSÃO ASFÁLTICA	21
4	MATERIAIS ALTERNATIVOS AMBIENTAIS.....	22

4.1	RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)	22
4.1.1	ORIGEM	22
4.1.2	CLASSIFICAÇÃO	23
4.1.3	COMPOSIÇÃO	24
4.1.4	RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	26
4.1.5	UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS RECICLADOS DA CONSTRUÇÃO	28
4.1.6	NORMAS RELACIONADAS À RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO	29
4.1.7	ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS E DOS RCDs COM CIMENTO	29
4.2	RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT – (RAP)	30
4.2.1	CONCEITO	30
4.2.2	HISTÓRICO	30
4.2.3	ORIGEM	31
4.2.4	CLASSIFICAÇÃO DA MISTURA RAP	33
4.2.5	GRANULOMETRIA	33
4.2.6	TRATAMENTO IN SITU	35
4.2.7	TRATAMENTO NA USINA	35
4.2.8	LIGANTE DE BETUME	36
5	ENSAIOS REALIZADOS	38
5.1	ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA - (CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR)- (NBR 9895/87)	38
5.2	ENSAIO A COMPRESSÃO SIMPLES (DNER-IE 004/94)	39
5.3	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA (DNER-ME 083/98)	40
5.4	CONSIDERAÇÕES	41
5.4.1	MATERIAIS SELECIONADOS	41
5.4.2	NORMAS TÉCNICAS	41
5.5	MATRIZ DE ENSAIOS	42
6	RESULTADOS	45
6.1	RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	45
6.2	RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES	46
6.3	RESULTADOS OBTIDOS DE CBR OU ISC (ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA)	48
7	ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
8	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIA	52

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Barreta e Fortes (2011) no aparecimento das grandes guerras, existiu um aumento sem precedentes na implantação de infraestrutura, particularmente de estradas, surgindo a necessidade de novas rodovias, pois houve um crescimento significativo da demanda de tráfego.

Muitas dessas rodovias não têm recebido intervenções significativas de recuperação nos últimos vinte anos, o que fez com que chegassem num estado de deterioração bem avançado, precisando de maiores esforços de manutenção para readquirir os níveis de serviços aceitáveis. Considera-se, ainda, que o peso médio e a quantidade dos veículos de carga aumentaram consideravelmente nos últimos anos, pois a facilidade de escoamento das mercadorias faz com que haja preferência pelo transporte rodoviário, fazendo com que aumente gradativamente a quantidade de carga que trafega pelas rodovias brasileiras. (BARRETA e FORTES, 2011)

O intenso tráfego, a pressão dos pneus, carga por eixo mais abrangente e o tempo de uso são fatores que tem colaborado para a degradação das rodovias. (WIRTGEN, 2012)

Segundo Dau (2001) considerando que existe a necessidade de recuperação de pavimentos, várias alternativas são utilizadas para esse fim. Quando há a necessidade de remoção de materiais do pavimento existente e a construção de novas camadas, surgem algumas preocupações e a necessidade de alternativas para que a recuperação do pavimento seja realizada de forma técnica, econômica e ambientalmente viável.

A preocupação com o destino para os resíduos sólidos produzidos pelas aglomerações urbanas e o possível colapso das reservas naturais não renováveis, recomendam a reciclagem de revestimentos asfálticos como um artifício que no futuro tornar-se-á rotina. Nas vias urbanas, os obstáculos geométricos estabelecidos pelas soleiras das guias de meio-fio, dos prédios e alturas livres de viadutos, dirigem para a adoção da reciclagem, como um meio de recuperar o pavimento. No Brasil tem-se adotado a reciclagem para constituição das camadas de base ou de ligação, nas obras rodoviárias federais e estaduais. (DAU, 2001)

1.1 OBJETIVO

Esta pesquisa tem por objetivo analisar algumas características do comportamento mecânico de materiais reciclados de construção civil (RCD) misturados com solo e cimento utilizados na construção de pavimentos flexíveis. Busca-se confeccionar corpos de prova com a mistura de materiais recicláveis de construção civil, com distintos tipos de solos variando quantidades de solo, RCD e cimento, afim de avaliar suas características mecânicas quanto a resistência a compressão e resistência CBR, para verificar seu desempenho na utilização em camadas de pavimentos flexíveis, utilizando-se de parâmetros especificados por normas brasileiras.

1.2 JUSTIFICATIVA

O alto consumo de recursos naturais e a elevada geração de resíduos da construção causam problemas ambientais, econômicos e sociais, portanto, torna-se necessário buscar alternativas técnicas para minimizar esse problema, para isto reaproveitar materiais, tanto os retirados dos pavimentos, como os extraídos de demolições de construção civil podem ser uma alternativa viável.

Os resíduos de construção e demolição representam 50% dos resíduos sólidos urbanos (RSU). No Brasil, a geração de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) per capita pode ser estimada em 500 kg/hab/ano pela média de algumas cidades brasileiras (PINTO, 1999), entre 0,7 e 1,0 tonelada/hab/ano na Europa (PERA, 1996). O descarte irregular dessa elevada quantidade de resíduos sobre o meio ambiente tem ocasionado problemas de diversas ordens na sociedade.

1.3 METODOLOGIA

Essa pesquisa desenvolve-se por meio de o estudo da bibliografia sobre o assunto e de ensaios de laboratórios para identificação de características do comportamento mecânico dos materiais provenientes dos resíduos sólidos urbanos.

Serão utilizados diferentes materiais e proporções de misturas para essa identificação. Os parâmetros levantados serão submetidos às especificações brasileiras para avaliação da sua utilização em camadas de pavimentos flexíveis.

2 PAVIMENTO

2.1 CONCEITO

O termo pavimento significa:

Uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final da terraplenagem, destinado tecnicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos, às condições do clima e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. No âmbito geral, a rodovia pavimentada incrementa o progresso socioeconômico da região, repercutindo na positiva qualidade de vida da comunidade, na distribuição espacial da população, na disponibilidade de transportes coletivos entre outros itens. (BERNUCCI, 2008, p. 9)

O Departamento de Infraestrutura de Transportes (DNIT) define pavimento como toda estrutura apoiada sobre a camada final de terraplenagem e destinada a receber o tráfego fornecendo ao usuário segurança e conforto. (DNIT, 2006)

2.2 FUNÇÕES DOS PAVIMENTOS

A pavimentação tem como objetivo propiciar um tráfego confortável e seguro, com estruturas e materiais capazes de suportar os esforços oriundos da ação do tráfego combinados com as condições climáticas, a um mínimo custo, buscando sempre que possível, o aproveitamento de materiais locais para obras, visando um bom desempenho em termos de custos operacionais e de manutenção ao longo dos anos de serviço desta infraestrutura. Nesses aspectos, reside a verdadeira arte e ciência da engenharia de pavimentação, como pura técnica (sem aplicação de conceitos científicos, mas como uma arte de saber fazer). (BALBO, 2007)

De acordo com Senço (1997) a pressão aplicada é reduzida conforme a profundidade, sendo que as camadas superiores estão submetidas a maiores pressões, exigindo na sua construção materiais de qualidade mais elevada. Para a mesma carga aplicada, a espessura do pavimento deverá ser tanto maior quanto pior forem as condições do material do subleito. Pode-se mencionar a regra de que subleito ruim e cargas pesadas levam a pavimentos espessos; subleito de qualidade boa, e cargas leves levam a pavimentos finos.

Abaixo Balbo cita a importância da escolha correta do tipo de pavimento adotado:

O objetivo imediato na escolha e seleção de tipos de pavimento a serem empregados em determinada obra e, por consequência, dos materiais a serem aplicados é a minimização de custos, mantidas as demais condições e exigências já discutidas. Esta questão é crucial, pois os custos de

pavimentação para as agências e os operadores viários, com inevitáveis reflexos para os usuários, são fatores limitantes na concepção de um projeto. Na obra de pavimentação, é necessária a pesquisa dos materiais disponíveis nas proximidades, comercializados ou não, considerando sua dificuldade de exploração de transporte (BALBO, 2007, p.16)

2.3 CAMADAS DOS PAVIMENTOS

O pavimento é constituído de forma que alcance a maior durabilidade e ao mínimo custo possível, considerados diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, de caráter obrigatório. (BALBO, 2007)

Bernucci *et al.*(2008), define as camadas de um pavimento como:

- Reforço do Subleito;
- Sub-base;
- Base, e
- Revestimento.

Na figura 2.1 abaixo, segue um detalhamento de seção de pavimento:



Figura 2.1: Camadas do pavimento
Fonte: SALVO E DUARTE (2011)

2.3.1 Regularização

Segundo Senço (1997) regularização é a camada de espessura irregular, construída sobre o subleito e destinada a adequá-lo, transversal e longitudinalmente, com o projeto.

Na figura 2.2 pode se observar uma camada regularizada:



Figura 2.2: Camada de Regularização
Fonte: PRÓPRIA (2013)

2.3.2 Reforço do Subleito

É uma camada de espessura constante transversalmente e variável longitudinalmente, de acordo com o dimensionamento do pavimento, fazendo parte integrante deste por circunstâncias técnicas econômicas, será realizado sobre o subleito regularizado. Como possui o nome de reforço do subleito, às vezes é associado à fundação. (SENÇO, 1997)

Na figura 2.3 abaixo se pode observar uma camada de reforço do subleito:



Figura 2.3: Reforço do Subleito
Fonte: PRÓPRIA (2014)

2.3.3 Sub-base

Pode-se definir a sub-base como camada de pavimentação destinada a distribuir adequadamente as cargas à camada subjacente, executada sobre o subleito ou reforço do subleito devidamente regularizado e compactado. (DNIT, 2010)

Na figura 2.4 se pode observar a execução de uma camada de sub-base:



Figura 2.4: Execução de camada de sub-base
Fonte: PRÓPRIA (2013)

2.3.4 Base

A camada de base é destinada a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los. Na verdade, o pavimento pode ser considerado pela composição de base e revestimento, sendo que a base poderá ou não ser complementada pela sub-base e pelo reforço do sub-leito. (SENÇO, 1997)

A figura 2.5 é uma ilustração de camada de base:



Figura 2.5: Execução de camada de base
Fonte: PRÓPRIA (2013)

2.3.5 Revestimento

O revestimento atua para receber as cargas, estáticas ou dinâmicas, sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes, ou perda de compactação. É composto de materiais totalmente ligados ou dispostos de modo que não se movimentem de maneira horizontal. (BALBO, 2007)

De acordo com Bernucci *et al* (2008), revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmitir de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizando o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança).

A figura 2.6 mostra a execução de uma camada de revestimento:



Figura 2.6: Execução de camada de revestimento
Fonte: PRÓPRIA (2014)

2.4 CLASSIFICAÇÃO DAS CAMADAS DOS PAVIMENTOS

Conforme o DNIT (2005) os pavimentos são classificados em flexíveis, semirrígidos e rígidos.

2.4.1 Pavimento Flexível

Balbo (2007) define pavimento flexível como acamada que absorve de forma dividida os esforços entre as suas camadas, encontrando-se as tensões verticais nas camadas inferiores, concentradas em região próxima da área de aplicação da carga.

Segundo Senço (1997) pavimentos flexíveis são aqueles em que as deformações, até certo limite, não os rompem.

Abaixo segue figura 2.7 que ilustra o pavimento flexível executado:



Figura 2.7: Pavimento Flexível
Fonte: PRÓPRIA (2014)

2.4.2 Pavimento Semirrígido

Segundo o DNIT (2006a) pavimento semirrígido caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com características cimentícias.

Composto por revestimento asfáltico com base ou sub-base em material tratado com cimento com grande rigidez, excluídos quaisquer tipos de concreto. (BALBO, 2007)

2.4.3 Pavimento Rígido

É o pavimento no qual uma camada, absorvendo grande parte dos esforços horizontais solicitantes, acaba por proporcionar pressões verticais bastante aliviadas e bem distribuídas sobre as camadas inferiores. (BALBO, 2007)

Segundo Senço (1997) pavimentos rígidos são pouco deformáveis, constituídos principalmente de concreto de cimento. Rompem por tração na flexão, quando sujeitos as deformações.

A figura 2.8 mostra um pavimento rígido já executado:



Figura 2.8: Pavimento de concreto de cimento

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCRETO PORTLAND – ABCP (2012)

2.5 MATERIAIS UTILIZADOS NAS CAMADAS DOS PAVIMENTOS

Segundo o DNIT (2005), bases e sub-bases granulares, são as camadas constituídas por solos, britas de rochas, de escória de alto forno, ou pela mistura desses materiais. Estas camadas são constituídas de materiais granulares, são sempre flexíveis e são estabilizadas granulometricamente pela compactação de um material ou de mistura de materiais que apresentem granulometria adequada e índices geotécnicos específicos, fixados em normas. Os materiais utilizados em bases e sub-bases, obtidos em jazidas, tem designações, tais como: cascalho ou saibro, Esses materiais podem ser beneficiados como britagem e peneiramento, para se adequarem as normas.

A figura 2.9 mostra os tipos de bases de pavimentos e como são estabilizados:

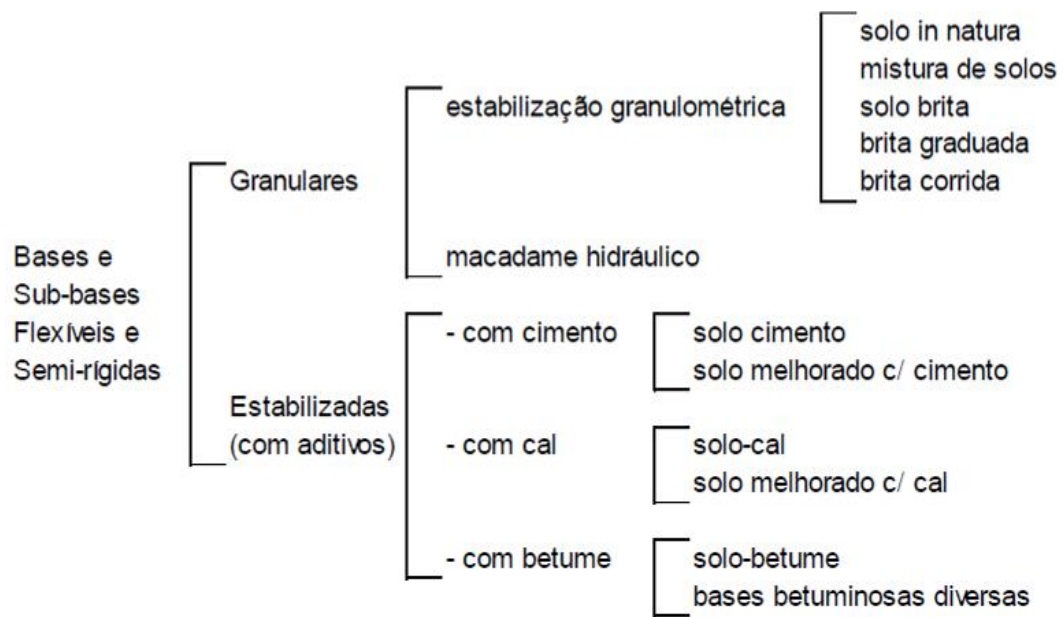


Figura 2.9: Classificação de bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas
Fonte: DNIT (2005)

2.5.1 BASES RÍGIDAS

Neste item terão enfoque as camadas classificadas como rígidas, pois, a abordagem da reciclagem dos materiais dos pavimentos requer algum conhecimento da composição destas camadas.

2.5.1.1 Concreto de cimento

Segundo Senço (1997) concreto de cimento é uma mistura adequadamente dosada e ordenada de agregados, areia, cimento e água nas dimensões levantadas em projeto. É a base que mais se distingue como rígida, e seu dimensionamento obedece a estudos fundamentados na teoria de Westergaard, com autonomia para ser armada com barras metálicas ou não.

A figura 2.10 abaixo mostra a aplicação de concreto de cimento:



Figura 2.10: Aplicação de concreto de cimento
Fonte: PRÓPRIA (2013)

2.5.1.2 Macadame de cimento

Conforme Senço (1997) macadame de cimento é uma base composta com agregado graúdo, com diâmetro máximo entre 50 mm e 90 mm cujos vazios são ocupados por um material de granulometria mais fina, o material do recheio, misturado com cimento, para assegurar, além do travamento das pedras, uma razoável relação entre elas, conforme Figura 2.11.



Figura 2.11: Aspecto visual de macadame de cimento
Fonte: EMBUSA [2014]

2.5.1.3 Solo cimento

De acordo com DNIT (2005) solo cimento é uma mescla que se encontra devidamente compactada de solo, cimento Portland e água; a mistura solo-cimento deve cumprir certos requisitos de densidade, durabilidade e resistência, formando um material forte, cimentado, de acentuada rigidez à flexão. O teor de cimento perfilhado é usualmente da ordem de 6% a 10%.

Abaixo segue a figura 2.12 que mostra uma base de solo cimento em execução:



Figura 2.12: Base de solo cimento

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCRETO PORTLAND (2012)

2.5.1.4 Base de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)

O DER (2005) define a Brita Graduada Tratada com Cimento como camada de base e sub-base, formada por mistura em usina de produtos de britagem, cimento e água, adequadamente compactada e submetida a bom processo de cura.

Segundo Bernucci et al (2008) na brita graduada tratada com cimento emprega-se o mesmo elemento da brita graduada simples, entretanto com adição de cimento na proporção de 3 a 5% em peso. Sugere-se a sua compactação a no mínimo 95% da energia modificada para elevação da resistência e durabilidade. A BGTC, devido à cura do cimento, sofre

retração, induzindo ao aparecimento de fissuras e trincas. Tais problemas podem levar à reflexão destas trincas ao revestimento asfáltico.

A figura 2.13 mostra o aspecto visual da BGTC.



Figura 2.13: Aspecto visual de brita graduada tratada com cimento
Fonte: PRÓPRIA (2014)

2.5.2 BASES FLEXÍVEIS

Neste item serão abordadas as camadas classificadas como flexíveis, pois, a abordagem da reciclagem dos materiais dos pavimentos requer algum conhecimento da composição destas camadas.

2.5.2.1 Base de solo estabilizado

Segundo Senço (1997) base de solo estabilizado é uma camada construída com solo satisfazendo especificações de granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade, cuja estabilização pode ser conseguida de forma natural ou artificial. Quando a estabilização decorre da própria distribuição granulométrica dos grãos, admitindo a obtenção de uma base densa e relativamente impermeável, é chamada de base estabilizada granulometricamente. A granulometria ideal pode ser obtida por meio da adição de pedra britada, repondo a ausência de material graúdo, neste caso a camada recebe o nome de solo brita. Finalmente a

estabilização, pode ser obtida pela soma de um aglutinante como asfalto, sendo assim, a base é chamada de solo asfalto ou solo betume.

A figura 2.14 representa uma base de solo estabilizada já concluída.



Figura 2.14: Aspecto visual de solo estabilizado
Fonte: PRÓPRIA (2013)

2.5.2.2 Base de macadame hidráulico

De acordo com Senço (1997) a palavra **macadame** reproduz uma homenagem ao Engenheiro escocês John McAdam, que substituiu os serviços de assentamento de pedras pela edificação de camadas de agregados por pressão. A base ou sub-base de macadame hidráulico é constituída de uma ou mais camadas de pedra britada, entrosadas entre si e material de enchimento. Este último tem o objetivo principal de travar o agregado graúdo e de agir eventualmente como aglutinante. A característica do material de enchimento nos vazios do agregado graúdo é efetuado com o auxílio da água, fundamentando o nome de macadame hidráulico.

Figura 2.15 demonstra a construção de base de macadame hidráulico:



Figura 2.15: Aspecto visual de macadame hidráulico
Fonte: PRÓPRIA (2013)

2.5.2.3 Base de macadame betuminoso

Conforme Senço (1997) a base de macadame betuminoso se baseia na superposição de camadas de agregados interligadas por pinturas de material betuminoso. É conhecida também como base negra, sendo que o número de camadas deriva da espessura estabelecida em projeto. Os agregados empregados tem granulometria que se ajusta em uma relação de diâmetro do menor para o maior, podendo também chegar ao nível final superior com granulometria própria de camada de capa.

2.5.2.4 Base de Brita Graduada Simples (BGS)

De acordo com Senço (1997) base de brita graduada é um tipo de base que adquiriu a preferência entre as bases de pedra. É resultante da mescla, feita em usinas de agregado previamente dosado, contendo também material de enchimento, água eventualmente, cimento. Respeitadas as proporções, principalmente quanto a granulometria dos materiais, é uma base que substitui o macadame hidráulico, com notáveis vantagens quanto ao processo de construção.

A figura 2.16 demonstra o aspecto visual da camada de brita graduada simples.



Figura 2.16: Aspecto visual de brita graduada
Fonte: EMBUSA [2014]

3 AGREGADOS UTILIZADOS NA PAVIMENTAÇÃO E SUAS APLICAÇÕES

Balbo (2007) define os agregados como conjuntos de grãos minerais, com limites de dimensões, naturais ou artificiais, britados ou não, empregados na construção civil, evidentemente na produção de argamassas, concretos de cimento Portland, concretos asfálticos, misturas estabilizadas com ligantes etc. Na construção de vias de transporte, são de grande importância na composição de diversas camadas que compõem as estruturas de pavimentos.

3.1 AGREGADOS NATURAIS

Os agregados naturais são todos aqueles materiais disponíveis na crosta terrestre, resultantes de processos geológicos, com possível utilização direta ou que necessitam de uma série de processos para sua viabilização de uso. Agregados naturais são os materiais obtidos sem a necessidade de processos de britagem ou aqueles materiais procedentes de rochas maciças ou alteradas, cascalheiras e areias não aluvionares. (BALBO, 2007)

3.2 AGREGADOS ARTIFICIAIS

Os agregados artificiais tem procedência de rejeitos industriais, associados às indústrias siderúrgicas (escórias), e também recentemente, cresceu o emprego de resíduos reciclados da construção e também os resíduos da fresagem de pavimentos. A utilização desses materiais na confecção de concretos, bases granulares e misturas asfálticas são condicionadas ao atendimento das especificações próprias. (BALBO, 2007)

3.3 ASFALTOS E BETUMES

No parágrafo abaixo Senço utiliza uma citação bíblica para escrever sobre o asfalto:

Segundo a tradição, o asfalto é o mais antigo material impermeabilizante utilizado pelo homem. No Gênesis, Cap.6, Heróis antediluvianos, encontra-se, na história de Noé, versículo 14, a ordem do Criador: Faze para ti uma arca de madeira alisada. Farás nela uns pequenos repartimentos e betumá-las por dentro e por fora. (SENÇO, 1997)

Os betumes podem ser definidos como substâncias compostas por hidrocarbonetos pesados, com propriedades ligantes, inflamáveis, de elevada viscosidade em

temperatura ambiente e ocorrem na natureza ou são obtidos por fabricação, a partir da destilação de petróleo, de carvão, de madeira ou de resinas. O asfalto está presente naturalmente em rochas ou em depósitos lacustres, como os asfaltos de Trinidad e de Bermudez ou derivado de petróleo, constituído essencialmente de betumes. (BALBO, 2007)

3.4 CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A QUENTE (CAUQ)

Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) é uma combinação asfáltica realizada em usina apropriada, composta de agregados minerais e cimento asfáltico de petróleo, espalhada e compactada a quente. (DER, 2005)

De acordo com Balbo (2007) o Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) também conhecido como CA, é frequentemente utilizada por ser a mistura asfáltica mais tradicional empregada a quente, o CAUQ pode ser utilizado para construção de revestimentos asfálticos, abrangendo as capas de rolamento e camadas de ligação.

3.5 CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ)

Segundo Bernucci *et al.* (2008) concreto betuminoso usinado a quente é uma mistura convenientemente proporcionada (composta) de diversos agregados de tamanhos variados e cimento asfáltico, ambos aquecidos em temperaturas previamente recomendadas, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante.

De acordo Balbo (2007) o Concreto Asfáltico Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) pode ser considerado a mais comum e tradicional mistura asfáltica a quente empregada no país, seja pelos materiais utilizados em sua fabricação e também pelos processos de controle exigidos para sua utilização, em usina ou na pista.

3.6 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)

Os asfaltos ou Cimentos Asfálticos de Petróleo (conhecidos simplesmente por CAP) são obtidos a partir de processos de refinamento do petróleo cru. São materiais que possuem grande quantidade de betume (hidrocarbonetos pesados e não voláteis), por isso as vezes são designados por betumes. São muito viscosos, possuem cor negra ou marrom muito escuro agem como ligantes têm consistência sólida a semissólida em temperaturas ambientes. O CAP, como material aglutinante ou ligante, apresenta propriedades impermeabilizantes, boa

aderência aos agregados, flexibilidade e relativa durabilidade, além de ser insolúvel em água. (BALBO, 2007)

3.7 ESPUMA DE ASFALTO

Segundo o DNIT (2005) espuma de asfalto é o estado temporário obtido a partir da injeção de ar sob pressão e pequena quantidade de água no cimento asfáltico de Petróleo (CAP) aquecido à temperatura definida pelo fabricante do equipamento de reciclagem como a mais adequada para o tipo de CAP selecionado para a execução da obra, o que ocasiona forte expansão do ligante.

O CAP para ser empregado nas misturas asfálticas necessita de aquecimento para torná-lo trabalhável. Alguns materiais foram desenvolvidos a fim de baixar a viscosidade do CAP e facilitar a trabalhabilidade desse material em temperaturas mais baixas, tais como, os asfaltos diluídos (misturas de CAP com diluentes) e as emulsões asfálticas (mistura de CAP com agentes emulsificantes e água).

Outra forma de diminuir a viscosidade do asfalto e obter uma melhor junção da mistura com os agregados, mas utilizando o CAP aquecido, é chamada de espuma de asfalto. Essa técnica consiste em promover o aumento de volume do CAP por resfriamento, provocando um choque térmico pela injeção de água à temperatura ambiente, em asfalto aquecido, em condições controladas. A espuma de asfalto tem emprego preferencial na estabilização de solos e na reciclagem de camadas com incorporação de ligante asfáltico. (BALBO, 2007)

3.8 ASFALTOS DILUÍDOS DE PETRÓLEO (ADP)

Os asfaltos diluídos de Petróleo (ADP) são produzidos pela adição de um diluente volátil, obtido do petróleo, que varia conforme o tempo necessário para a evaporação desse diluente restando o asfalto residual. Esse diluente serve apenas para baixar a viscosidade e permitir o uso à temperatura ambiente. Conforme a natureza do diluente utilizado e sua fabricação, os ADP serão classificados em asfaltos diluídos de cura rápida ou de cura lenta. (BERNUCCI *et al.*, 2008)

3.9 EMULSÃO ASFÁLTICA

De acordo com Senço (1997) as misturas que são formadas de dois materiais não miscíveis, constituem uma fase dispersante ou fase contínua que é normalmente um líquido, enquanto que a fase dispersa ou descontínua pode ser formada por um líquido viscoso, um sólido ou semissólido e tem como exemplos o asfalto e o alcatrão. As emulsões surgiram para dissolver os asfaltos com água num processo desenvolvido inteiramente a frio. As emulsões são agrupadas em dois tipos:

- Emulsões diretas: constituídas por óleo ou betume dispersado em água;
- Emulsões inversas: constituídas de água dispersada no óleo ou ligante de hidrocarboneto.

A passagem gradual de um tipo para o outro é conhecido como **inversão de fase**. As proporções entre o ligante asfáltico e o agente emulsificante que entram na mistura são na ordem de 0,2% a 1,0%, com máximo de 2,0% para o agente e da ordem de 60% a 70% para o asfalto.

4 MATERIAIS ALTERNATIVOS AMBIENTAIS

Devido a grande demanda nacional de infraestrutura urbana, rodoviária e aeroportuária, somado às necessidades ambientais, é preciso aumentar o emprego de materiais alternativos na construção de pavimentos, abrangendo os mais diversos elementos construtivos em diferentes escalas, portanto cresce a necessidade da utilização de agregados alternativos, que em muitos casos são descartados de maneira não sustentável. Precisa melhorar essa frase.

Dentre os materiais descartados, os mais comuns são os entulhos de construção civil, de demolição das edificações, estruturas de concreto, bem como entulhos de demolição e fresados, resultantes da fresagem de capas asfálticas dos pavimentos.

4.1 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

4.1.1 Origem

A Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON) define as matérias listadas abaixo como entulho.

caliça, pedregulhos, areia, tudo que sirva para aterrar, nivelar depressão de terreno, vala. Restos de tijolos, argamassa e materiais inúteis resultantes da demolição.

Caliça são fragmentos de argamassa de cal resultantes da demolição de alvenaria.

O RCD pode ser originário de obras viárias, material de escavação, construções, demolição de edificações, renovação de edifícios, limpeza de terrenos e até mesmo de catástrofes naturais (terremotos, tornados e tsunamis, etc.) ou artificiais (incêndios, desabamentos, bombardeios, etc.). (LEVY; HELENE, 1997)

Segundo Leite (2007) os Resíduos da Construção e de Demolição (RCD) consistem em materiais sublimes do ponto de vista da engenharia, oferecem através de ensaios laboratoriais resistência e baixa expansão, essas características apontam o seu grande potencial de reciclagem como agregado para pavimentação.

4.1.2 Classificação

De acordo com o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) quem gera os resíduos são responsáveis por eles. A prioridade é não gerar e, caso não seja possível, deve-se considerar a diminuição, reutilização, reciclagem e disposição final. No caso da disposição final, os materiais devem ser encaminhados para os locais conhecidos como aterros de resíduos da construção civil ou áreas de destinação de resíduos, além de serem depositados de uma maneira que seja possível sua utilização ou reciclagem posterior.

O CONAMA classifica os resíduos da construção e demolição segundo sua atividade geradora e seu potencial de reutilização de reciclagem, dividindo-os em quatro classes:

- Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação, edificações e de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto;
- Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel/papelão, metais, vidros e madeiras;
- Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação;
- Classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

A classificação da granulometria do material é feita através do peneiramento seco, de acordo com a NBR 7181. Aliás, deve ser acatada a dimensão característica máxima exigida na NBR 15115, que é de 63,5mm. (BERNUCCI *et al.*, 2004)

A figura 4.1 apresenta distribuição granulométrica do RCD.

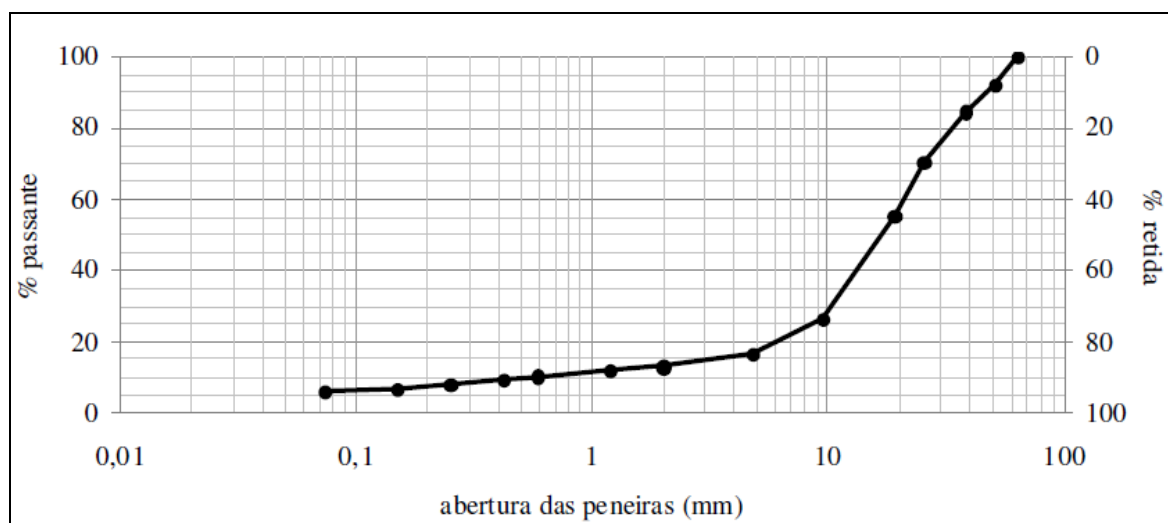


Figura 4.1: Distribuição granulométrica do RCD

Fonte: BERNUCCI *et al.* (2004)

O Resíduo de Construção e Demolição, apesar de possuir uma composição muito variável, apresenta grande potencial para a reciclagem, sendo a produção de agregados reciclados a sua maior utilização. Normalmente apresentam boa resistência e baixa expansão, características que indicam seu grande potencial para utilização em pavimentação. Este resíduo após passar por um processo de reciclagem pode ser empregado nas mais diferentes formas como, por exemplo, na confecção de elementos pré-moldados e na execução de camadas em estruturas de pavimentos. (TRICHÊS; KRYCKYJ, 1999)

4.1.3 Composição

O RCD tem, no mínimo, duas fontes de geração típicas: construção e demolição. Em diversos países os resíduos de construção representam de 19 a 52% do RCD, enquanto que os resíduos de demolição representam 50 a 81% do RCD. No Brasil, estima-se que mais de 50% do RCD é originado da construção (canteiros de obras e construções informais). (SINDUSCON-SP, 2005)

De acordo Santos (2007) os fatores históricos, níveis de desenvolvimento econômico, condições topográficas, a composição e a característica do resíduo reciclado podem contribuir para a variação dos seus componentes. Essas modificações ocorrem também

em razão de sua origem, do emprego de materiais de diferentes naturezas e daquelas obras com maior ou menor concentração de concreto e/ou materiais cerâmicos.

A figura 4.2 mostra os materiais que compõem o RCD, separados em função da sua natureza.

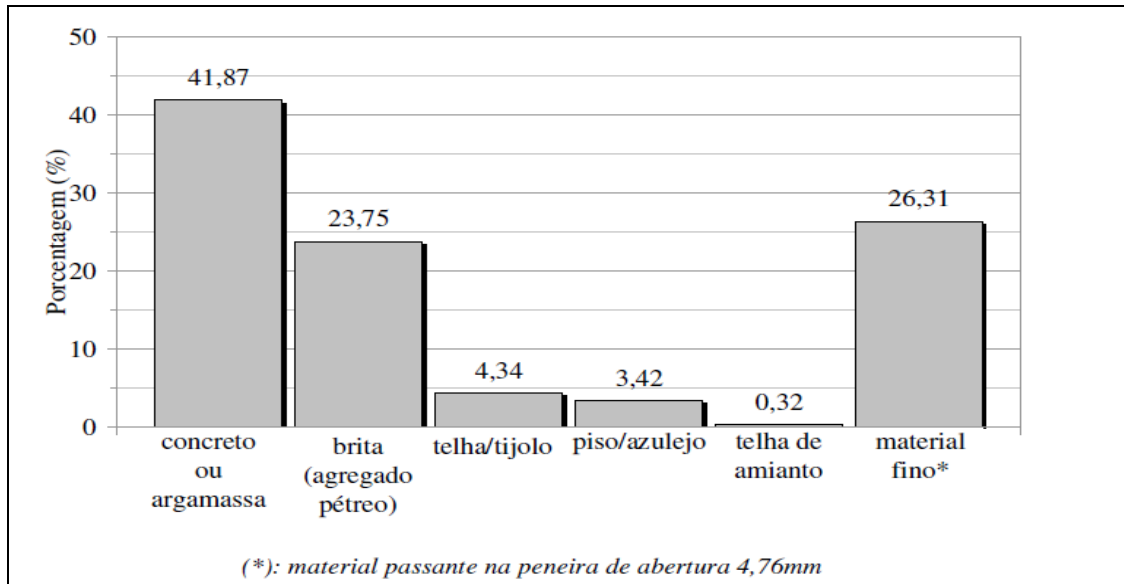


Figura 4.2: Separação dos materiais em função da sua natureza
Fonte: BERNUCCI *et al.*(2004)

A composição do Resíduo da Construção e de Demolição está estritamente ligada às diversas características de sua fonte geradora e do momento de coleta da amostra. Dessa forma, há uma gama muito grande de aspectos que interferem na quantidade, composição e características desse resíduo. Entre esses aspectos, destacam-se (CARNEIRO *et al.*, 2001):

1. O nível de desenvolvimento da indústria da construção local.
 - i. Qualidade e treinamento da mão-de-obra disponível;
 - ii. Técnicas de construção e demolição empregadas;
 - iii. Adoção de programas de qualidade e de redução de perdas;
 - iv. Adoção de processos de reciclagem e reutilização no canteiro;
2. Os tipos de materiais predominantes e/ou disponíveis na região;
3. O desenvolvimento de obras especiais na região (metrô, esgotamento sanitário, restauração de centros históricos, entre outros);
4. O desenvolvimento econômico da região; e
5. A demanda por novas construções.

Todas essas variantes fazem com que o RCD tenha características diferentes para cada país, estado, cidade e, em alguns casos específicos, até para bairros de uma mesma cidade, o que explica sua heterogeneidade. É bom ressaltar que o resíduo de construção e demolição talvez seja o mais heterogêneo de todos os resíduos industriais e, ainda, que a sua composição química está relacionada com a composição dos materiais que o compõe. (ZORDAN, 2003)

A figura 4.3 apresenta a composição gravimétrica e a fase da obra que foi aplicado o RCD:

Pesquisa	Aplicação	Composição (%)						
		Concreto	Argamassa	Cerâmicos	Rochas	Solo	Mat. Indesej.	Miúdos
Zordan (1997)	Concreto	21,0	36,0	21,0	18,0	-	3,0	1,0
Leite (2001)	Concreto	28,3	15,2	26,3	29,8	-	-	0,4
Vieira e Molin (2004)	Concreto	19,0	28,0	48,0	-	-	3,0	2,0
Motta (2005)	Pavimentação	41,9		4,3	23,8	-	3,7	26,5
Carneiro (2005)	Reciclagem	-	24,0	17,0	6,0	23,0	9,0	-
Moraes (2006)	Diagnóstico deposição	38,0	22,0	1,0	-	-	37,4	2,0
Hood (2006)	Pavimentação	26,6	38,4	29,1	5,9	-	-	-
Leite (2007)	Pavimentação	55,3		15,9	11,8	-	13,5	3,5
Nóbrega e Melo (2009)	Pavimentação	42,3		38,4	11,5	-	7,0	0,8
Silva (2009)	Pavimentação	20,9	44,0	8,7	23,6	-	2,0	1,2
Lira Jr. (2010)	Reforço de solo	61,0	17,0	11,0	-	-	5,0	6,0
Rodrigues (2011)	Concreto	69,0	28,0		-	-	-	3,0

Figura 4.3: Tabela comparativa em função da composição do RCD

Fonte: CARNEIRO *et al.* (2001)

4.1.4 Reciclagem dos Resíduos de Construção e Demolição

O processo de reciclagem incide essencialmente na britagem do RCD do tipo classe A, diminuindo o tamanho dos grãos e produzindo assim o agregado reciclado. Entretanto, o resíduo antes da britagem já deve ser pré-selecionado e passar por uma fase de seleção ("catação"), onde os materiais indesejáveis, como vidro, metal, borracha, gesso e

madeira devem ser removidos. São instaladas nas correias transportadoras sistemas para realizar a separação magnética de elementos metálicos, como armaduras e pregos. (ÂNGULO, 2005)

A figura 4.4 apresenta um fluxograma de sequencia de atividades da usina de reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição do Estado de São Paulo. (ÂNGULO, 2005)

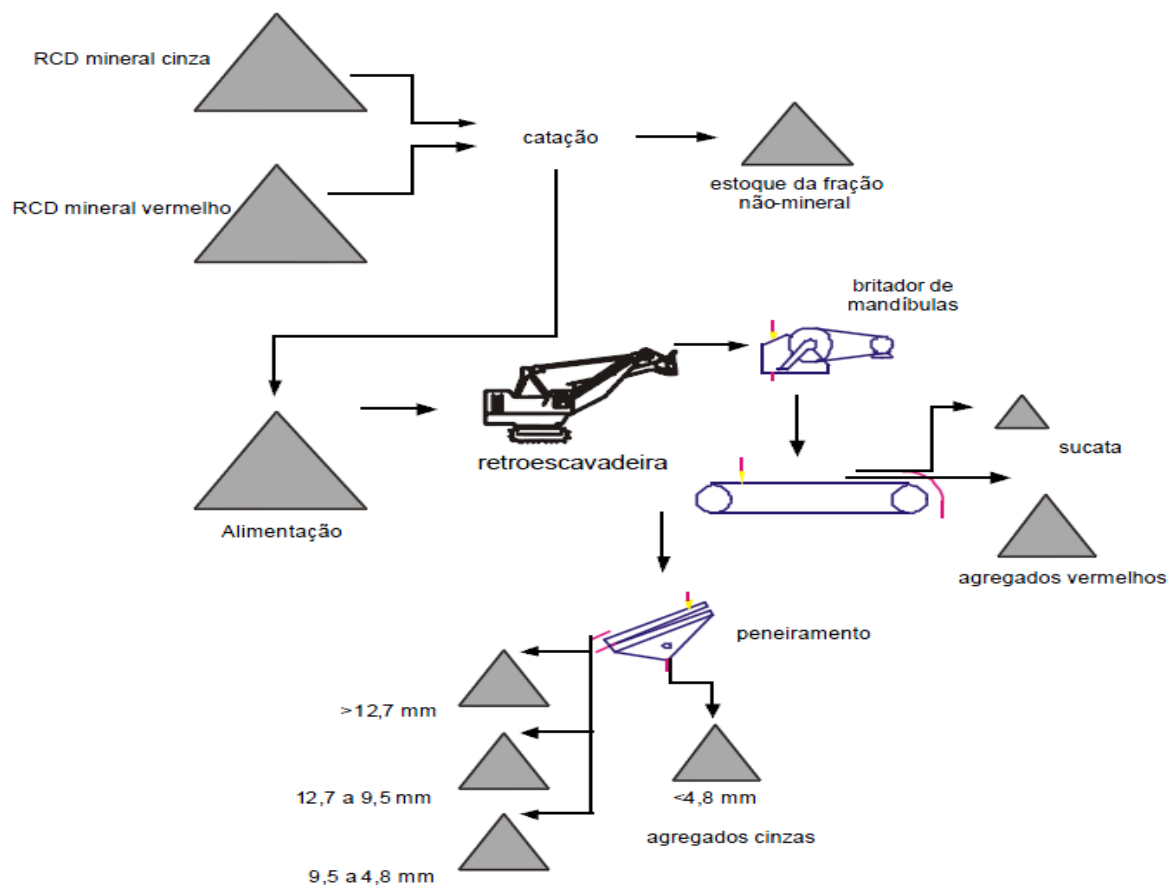


Figura 4.4: Esquema de usina de reciclagem do RCD
Fonte: ÂNGULO (2005)

O processo de reciclagem segue este fluxo: descarte do material na obra e deslocamento através de caçambas estacionárias até o aterro, triagem do material de acordo com suas propriedades, transporte do material até um alimentador vibratório, redução das partículas, peneiramento e separação por faixas granulométricas.

Os agregados reciclados oferecem um custo de produção inferior aos agregados naturais, sendo a opção desse produto um ganho ambiental, pois deixa de extrair matéria-prima natural e utiliza-se um tipo de resíduo que tem considerável participação nos Resíduos

Sólidos Urbanos (RSU). De forma geral, estes agregados apresentam grande potencial de utilização como insumo na construção civil. (CABRAL, 2007)

Segundo Pinto (1999), nos países onde a reciclagem está mais consolidada, a utilização dos elementos e materiais recuperados da construção civil é muito diversificada, estando de acordo com as imposições de mercado e com a sofisticação dos métodos utilizados para obtenção dos resíduos.

A figura 4.5 mostra uma usina recicladora de Resíduos da Construção e Demolição:



Figura 4.5: Usina recicladora de Resíduos da construção e Demolição (RCD)
Fonte: FRAGMAQ (2013)

4.1.5 Utilização dos Resíduos Reciclados da Construção

Consistindo em uma alternativa aos materiais mais conhecidos e utilizados na pavimentação, o agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil torna-se atraente por ser disponível em grande quantidade e por oferecer custo inferior em comparação aos materiais comumente empregados, sobretudo por estes últimos só serem descobertos em distâncias cada vez maiores, em virtude da profunda ocupação das cidades, o que sugere num aumento do custo de transporte. Na cidade de São Paulo, os agregados reciclados proporcionam preço cerca de 20 a 30% mais baixo que das britas graduadas simples, tornando

este material uma boa alternativa para pavimentação de vias em terra ou cascalhadas nas periferias e em bairros mais pobres. (BERNUCCI *et al.*, 2004)

4.1.6 Normas relacionadas à Reciclagem de Resíduos Sólidos da Construção

No ano de 2004, foram divulgadas as primeiras normas pertinentes aos resíduos da classe A, à sombra da resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Esses registros, editados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) abordam desde a disposição adequada dos resíduos até o emprego dos agregados reciclados em obras de pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural. Essas normas são:

NBR. 15.112 – Resíduos de construção civil e resíduos volumosos: áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.

NBR. 15.113 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes: Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.

NBR. 15.114 – Resíduos sólidos da construção civil: áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.

NBR. 15.115 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Execução de camadas de pavimentação – procedimentos.

NBR. 15.116 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos.

4.1.7 Estabilização dos solos e dos RCDs com cimento

A estabilização de solos com adição de cimento classifica-se em misturas de solo-cimento e solo melhorado com cimento, diferenciando-se pelo comportamento que pretende obter com a mistura e com os percentuais em massa de adição de cimento. (BERNUCCI *et al* 2008).

Segundo DNIT, 2006, as misturas que se quer a melhoria de propriedades físicas do solo, tais como, plasticidade, sensibilidade à água e capacidade de suporte, denomina-se de mistura de solo melhorado com cimento, obtida com pequenas adições percentuais em massa de cimento, entre 2% e 4%. Quando o objetivo é melhorar critérios de densidade, durabilidade e resistência, a estabilização é denominada de solo-cimento, com teores de cimento recomendados entre 6% e 10%.

As misturas de solo-cimento e solo melhorado com cimento têm grande aplicabilidade na construção de camadas de base e sub-bases de pavimentos. Nestes casos, o solo deve apresentar características, que garantam condições mínimas estabelecidas pelas normas do setor rodoviário.

4.2 RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT – (RAP)

4.2.1 Conceito

De acordo com Wirtgen (2012):

O termo Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) ou concreto de asfalto é usado para identificar qualquer material asfáltico recuperado de um pavimento existente. O tipo de asfalto originalmente utilizado em conjunto com as variações na mistura asfáltica será consequentemente refletido no material do RAP. Quando camadas múltiplas de asfalto com misturas diferentes são recuperados pela fresagem (ou trituradas das lajes), o RAP resultante será uma mistura de todas as misturas do componente. As duas características principais de um material RAP estão associadas ao ligante de betume (o estado, a quantidade e a consistência do betume do material) e a granulometria. Igualmente importante é a tendência de partículas maiores do RAP se dividirem mais quando sujeitas as forças da mistura e da compactação [...].

4.2.2 Histórico

Segundo Balbo (2007), devido a crescente produção de material fresado, é cabível uma solução para sua destinação final, e essa alternativa envolve as obras que utilizam misturas asfálticas como material de construção. Com essa realidade nasce a reciclagem de pavimentos asfálticos como opção econômica e ambiental sustentável, visto que apresenta uma finalidade para o material fresado e em certos casos reaproveitamento de ligantes e também apresenta economia de energia.

A figura 4.6 apresenta o aspecto visual do RAP.



Figura 4.6: Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)
Fonte: FREMIX [2012]

4.2.3 Origem

Conforme Wirtgen (2012) as ações de remoção das camadas de revestimento asfáltico existente num pavimento com uma ruptura em determinada profundidade do revestimento, no Brasil é chamado de Revestimento Asfáltico Recuperado – RAR equivalente a *Reclaimed Asphalt Pavement* – RAP.

O Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) admite o uso do concreto betuminoso reciclado em revestimento, base, regularização e reforço na restauração de pavimentos. (DNER, 1997)

É muito importante entender que o tipo e o nível de deterioração no revestimento do pavimento existente influenciarão no método de remoção aplicado, que pode determinar a retirada parcial ou total da camada de revestimento. O desmonte e a retirada da totalidade de uma camada do pavimento podem ser executados empregando os equipamentos tradicionais de obras de pavimentação tais como escavadeiras, tratores, carregadeiras e estações de britagem móveis ou fixas, ou até mesmo máquinas fresadoras. (DAU, 2001)

O termo fresagem remonta à técnica de desbaste ou corte de metais, ou outras peças, por intermédio de uma engrenagem motora constituída de um cortador giratório de múltiplos ângulos, em sucessivo movimento giratório. (BONFIM, 2000)

A figura 4.7 mostra algumas etapas da fresagem:



Figura 4.7: equipamentos utilizados na fresagem de pavimentos flexíveis
Fonte: WIRTGEN (2012)

Outra alternativa para obtenção do RAP é através do desmonte com marteletes, que pode ser pelo simples arranque do material com utilização de equipamentos mecânicos, como retroescavadeiras, tratores ou pás carregadeiras e etc., ou equipamentos de mão, como picaretas e alavancas. (DAU, 2001)

A figura 4.8 mostra a remoção da camada do pavimento com utilização de equipamento mecânico:



Figura 4.8: Remoção da camada de pavimento
Fonte: DAU (2001)

4.2.4 Classificação da mistura RAP

De acordo com Wirtgen (2012) a classificação do material RAP fresado será sempre influenciada pelo escopo da operação de fresagem. Os principais aspectos para sua classificação são:

- a composição e a uniformidade do material asfáltico existente;
- a condição do material asfáltico existente;
- a temperatura do asfalto no horizonte fresado;
- a profundidade do material fresado;
- a velocidade de rotação do tambor de fresagem;
- o tipo de tambor de fresagem e a condição das ferramentas de fresagem;
- o sentido do corte (para cima ou para baixo).

4.2.5 Granulometria

Um material com granulometria precária é difícil de compactar e a baixa densidade afetará muito a resistência do material estabilizado. (WIRTGEN, 2012)

Na figura 4.9 abaixo, podemos ver com maior clareza os limites granulométricos do RAP:

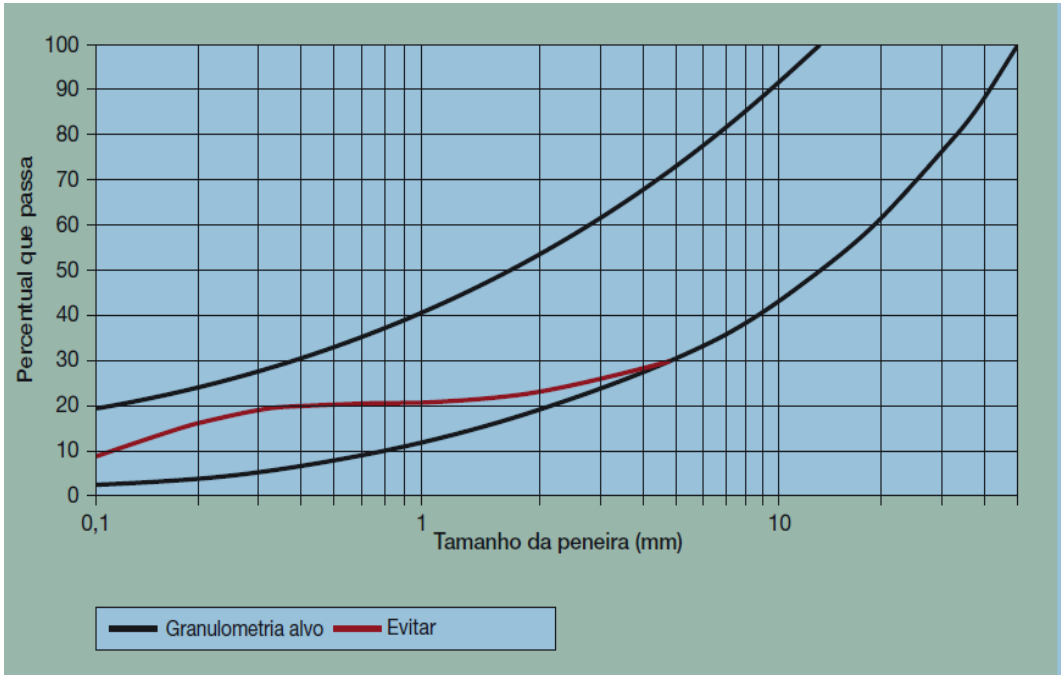


Figura 4.9: Granulometria recomendada
Fonte: WIRTGEN (2012)

Na figura 4.10 abaixo, segue a relação das peneiras utilizadas para determinação da granulometria aceitável da mistura reciclada:

Tamanho da peneira (mm)	Tamanhos recomendados das partículas	
	Percentual passante (%)	
	Grossa	Fina
50	100	100
37,5	85	100
26,5	72	100
19	60	100
13,2	50	100
9,5	42	90
6,7	35	80
4,75	30	72
2,36	21	56
1,18	14	44
0,6	9	35
0,425	7	31
0,3	5	27
0,15	3	21
0,075	2	18

Figura 4.10: Peneiras usadas na granulometria
Fonte: WIRTGEN (2012)

4.2.6 Tratamento in situ

De acordo com Wirtgen (2012) o asfalto existente pode ser recuperado e tratado utilizando a tecnologia de reciclagem a frio no local. Essa técnica utiliza uma grande recicladora montada sobre esteiras que recupera uma fração superior de asfalto do pavimento existente (normalmente entre 100 mm e 150 mm de profundidade de corte) e mistura o RAP com aditivos.

A figura 4.11 abaixo mostra uma recicladora WR 4200:



Figura 4.11: Recicladora a frio in situ Wirtgen WR 4200
Fonte: WIRTGEN (2012)

4.2.7 Tratamento na usina

Conforme Wirtgen (2012) o tratamento em usina consiste na utilização do asfalto fresado, que após ser estocado em local apropriado e depositado em uma usina misturadora. O material RAP é tratado e aplicado no local de origem. Este tratamento também conhecido como reciclagem a frio na usina, esta tecnologia apresenta fatores importantes a serem considerados como: flexibilidade no processo de reciclagem e oportunidade de britar e/ou peneirar o material RAP, bem como misturá-lo com um agregado novo.

A figura 4.12 a seguir mostra uma usina móvel misturadora:



Figura 4.12: Usina misturadora Wirtgen KMA 220
Fonte: WIRTGEN (2012)

4.2.8 Ligante de Betume

Segundo Wirtgen (2012) tratando de uma reciclagem a frio, o fundamental é saber se o material RAP é ativo ou inativo. O RAP é um agregado preto (inativo) com propriedades parecidas a da brita graduada ou é um material coloidal (ativo) com a coesão inerente resultante do betume. O estado do ligante antigo influenciará expressivamente no comportamento do material reciclado quando da sua utilização. É importante identificar se o material é ativo ou inativo. Essa análise é visual e de acordo com sua aparência, fragilidade e adesão. Caso fiquem dúvidas se o RAP pode ou não ser classificado como ativo ou inativo, uma amostra representativa pode ser testada em um laboratório para determinação do seu teor de betume e de suas propriedades.

A figura 4.13 mostra a relação de parâmetros para classificação do RAP:

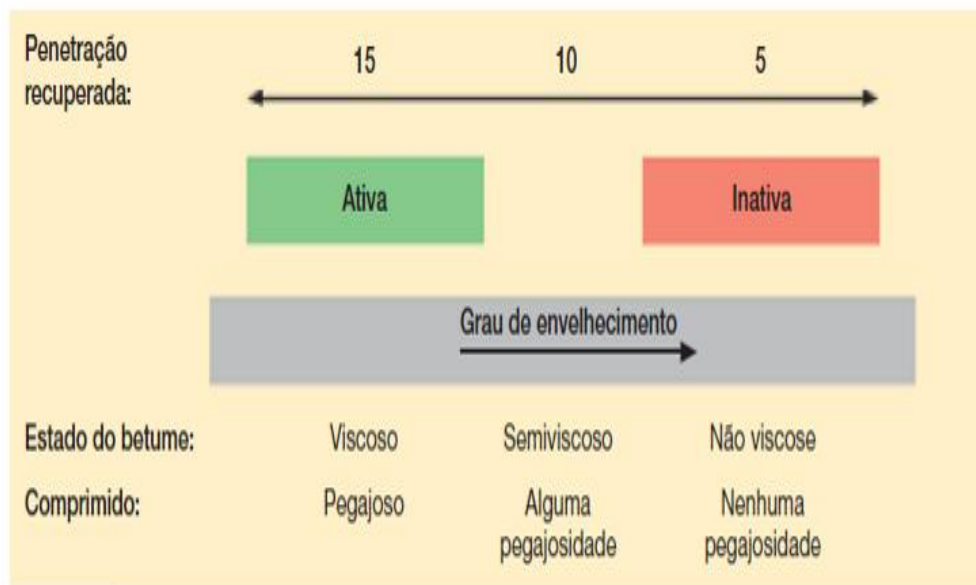


Figura 4.13: Classificação do RAP

Fonte: WIRTGEN (2012)

Uma maneira rápida e fácil de estimar se uma amostra RAP é ativa ou inativa é aquecer a amostra a 70° C e manufaturar amostras de 100 mm. Saturar as amostras com água por 24 horas antes de realizar os testes de ITS. Se o valor do teste de ITS saturado for > 100 KPa, o RAP deve ser considerado como ativo. (WIRTGEN, 2012)

5 ENSAIOS REALIZADOS

Para obtenção de resultados foi escolhido o Resíduo da Construção e Demolição (RCD).

5.1 *ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA - (CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR)- (NBR 9895/87)*

A utilização do índice de suporte Califórnia (ISC) expresso em percentual é muito usual no dimensionamento dos pavimentos. O principal objetivo incide em auxiliar na avaliação da resistência estática das camadas, a partir do valor de suporte dos materiais granulares empregados em pavimentação. O ISC determina a capacidade do solo e/ou materiais utilizados em camadas do pavimento em suportar cargas aplicadas sobre os mesmos. A determinação do ISC é obtida a partir da relação entre a pressão de penetração de um pistão num corpo de prova pela pressão num material granular de referencia (DNIT, 2006).

Conforme a norma NBR 15115 (ABNT, 2004), aplicada para resíduos da construção civil para uso do agregado reciclado de RCD em obras de pavimentação, utiliza o ISC como parâmetro que apresenta valor limite em função de cada camada do pavimento: base, sub-base e reforço de subleito.

A determinação do ISC auxilia na análise de deslocamentos significativos das camadas de reforço, de subleito, sub-base e base e verifica o seu potencial de ruptura, por meio de ensaio penetrométrico em laboratório, que corresponde a cargas estáticas, com intensidades crescentes, que causa grandes deslocamentos. Os materiais granulares de camadas de pavimentos selecionados a partir do seu desempenho, através da resistência à penetração no ensaio ISC e do material utilizado, são comparados com um material padrão, para servir de valor de referência, equivalente a 100%. Porém, podem-se encontrar valores de ISC acima de 100%. (BERNUCCI *et al.*, 2008)

A figura a seguir mostra duas prensas utilizadas no ensaio penetrométrico:



Figura 5.1: Prensas utilizadas para ruptura de corpos de prova
Fonte: PRÓPRIA [2013]

A resistência no ensaio ISC é referente, indiretamente, à relação da coesão com o ângulo de atrito do solo, sendo a relação entre a pressão produzida pela penetração de um pistão num corpo de prova de solo ou material granular e a pressão necessária para produzir a mesma penetração no material padrão referencial.

5.2 ENSAIO A COMPRESSÃO SIMPLES (DNER-IE 004/94)

O ensaio de compressão simples visa à determinação da resistência à compressão não confinada (ou simples) de corpos de prova constituídos por solos coesivos, mediante aplicação de carga axial com controle de deformação. Tais corpos de prova podem ser indeformados ou obtidos por compactação ou mesmo por remoldagem. Os valores resultantes da aplicação deste ensaio correspondem à resistência de solos coesivos em termos de tensões totais. Este tipo de ensaio se aplica a solos coesivos que não expulsam água durante a fase de carregamento do ensaio e que retém uma resistência após o alívio das pressões confinantes de campo, tais como argilas ou solos cimentados saturados e solos com aditivos químicos, tais como, cal, cimento e etc.

O equipamento de compressão pode ser uma prensa hidráulica, de engrenagem ou qualquer outro equipamento de compressão com capacidade e controle suficientes para fornecer a velocidade de deslocamento necessária. O carregamento é efetuado com

deformação controlada. O anel dinamométrico é utilizado para determinar os esforços aplicados e o medidor de deslocamento deve ser constituído por um deflectômetro ou relógio comparador.

5.3 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA (DNER-ME 083/98)

A distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características, já que influencia propriedades como resistência, rigidez e coesão das misturas (BERNUCCI *et al.*, 2008). As amostras para o ensaio de determinação da curva granulométrica foram obtidas por quarteamento, conforme preconiza o método de ensaio DNER-ME 083/98 e o ensaio realizado por peneiramento manual.

A figura a seguir mostra-nos com clareza o procedimento conhecido como quarteamento:



Figura 5.2: Quarteamento de amostra
Fonte: PRÓPRIA [2013]

5.4 CONSIDERAÇÕES

5.4.1 Materiais selecionados

Para a viabilidade da comparação dos resultados as misturas, foram escolhidos dois tipos de solos, os solos foram fornecidos pela usina JBA ENGENHARIA E CONSULTORIA, sendo o **solo 1** uma Argila Silto Arenosa, classificada como do grupo A-7-5, e o **solo 2** sendo uma Areia Argilosa, classificado como do grupo A-2-6 de acordo com o manual de normas DNIT (2006).

Foi escolhido para esta pesquisa um Resíduo de Construção e Demolição (RCD) composto de restos de blocos cerâmicos e argamassas, este resíduo é considerado como material inerte e pertencente à classe A de resíduos, segundo a resolução 302 do CONAMA de 2002.

5.4.2 Normas técnicas

A utilização desses materiais em pavimentação deve atender limites mínimos em algumas características. Entre as características analisadas tem-se para o CBR e para a Resistência a Tração os seguintes limites para solo cimento.

O DER-PR classifica o solo cimento e o solo melhorado com cimento de acordo com sua resistência à tração, portanto para fins de especificação, a distinção entre os dois tipos de mistura se faz pela resistência à compressão simples da mistura, aos sete dias de idade, de acordo com seguintes valores:

- Solo melhorado com cimento variando de 1,2 a 2,1 MPa;
- Solo cimento com valores superior a 2,1 MPa.

Sendo assim classificados, os valores mínimos especificados para atender as exigências da norma são os apresentados na figura 5.1.

LIMITES DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES, AOS SETE DIAS DE IDADE

Aplicação	Resistência a compressão simples (Mpa)	
	Solo melhorado com cimento	Solo cimento
Base	1,5 a 2,10	Superior a 2,10
Sub-Base	1,2 a 2,10	Superior a 2,10

Tabela 5.1 – Limites de resistência para o ensaio de compressão simples

- A norma da ABNT NBR 15115 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos - preconiza que, estes podem ser estabilizados granulometricamente, conforme a ABNT NBR 11804, ou com adição de cimento e/ou cal hidratada, e neste caso ser submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, após 7 dias de cura, devendo apresentar resistência de no mínimo 2,1 MPa, em corpos-de-prova moldados na energia de compactação especificada;

- A norma da ABNT NBR 15116 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural, preconiza que os resultados de ensaio de compactação CBR (Índice de Suporte Califórnia) apresentem as condições demonstradas na tabela 5.2.

APLICAÇÃO	CBR (ISC)	EXPANSIBILIDADE (%)	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO
Reforço do sub-leito	≥ 12	$\leq 1,0$	Normal
Revestimento primário e sub-base	≥ 20	$\leq 1,0$	Intermediária
Base de pavimento	≥ 60	$\leq 0,5$	Intermediária ou Modificada

Tabela 5.2: Valores mínimos exigidos para o ensaio de CBR

5.5 MATRIZ DE ENSAIOS

Os resíduos foram caracterizados quanto a sua granulometria e massa específica. A massa específica do resíduo é igual a 2,58 g/cm³, em ensaios realizados de acordo com a NBR 6508/84 (fornecidos pela JBA ENGENHARIA E CONSULTORIA). Foi utilizado cimento da marca Cauê, do tipo cimento Portland composto com escoria de alto forno CP II-E-32.

Foram estudadas quatro misturas, variando as proporções de solo e RCD, utilizando em cada uma das misturas porcentagens de 2% e 6% de cimento. Adotou-se a nomenclatura das misturas de acordo com a proporção de resíduo que compõe cada mistura em: **Mistura A** para mistura com 100% de solo e 0% de RCD, sendo esta a mistura base para controle, **Mistura B** para mistura com 70% de solo e 30% de RCD, **Mistura C** para mistura

com 60% de solo e 50% de RCD e **Mistura D** para mistura com 40% de solo e 60% de RCD, e para cada tipo de mistura foram moldados 6 (seis) corpos de provas.

A figura 5.3 abaixo mostra algumas etapas da montagem de corpos prova:



Figura 5.3: Montagem de corpos de prova
Fonte: PRÓPRIA (2014)

As tabelas 5.3 e 5.4 mostram a montagem da matriz de ensaios realizados para efeitos comparativos das misturas realizadas.

ENSAIOS ARGILA SILTO ARENOSA

Mistura	Mistura (%) Solo + RCD	Porcentagem de cimento	
		2%	6%
Mistura A	100/0	6 cps	6 cps
Mistura B	70/30	6 cps	6 cps
Mistura C	60/40	6 cps	6 cps
Mistura D	40/60	6 cps	6 cps

Tabela 5.3 - Matriz de ensaios para o solo 1 Argila Silto Arenosa

ENSAIOS AREIA ARGILOSA

Mistura	Mistura (%) Solo + RCD	Porcentagem de cimento	
		2%	6%
Mistura A	100/0	6 cps	6 cps
Mistura B	70/30	6 cps	6 cps
Mistura C	60/40	6 cps	6 cps
Mistura D	40/60	6 cps	6 cps

Tabela 5.4 - Matriz de ensaios para o solo 2 - Areia Argilosa

6 RESULTADOS

Foram realizados ensaios de compactação Proctor para determinação do $\gamma_{\text{máx}}$ e $w_{\text{ót}}$ (umidade ótima%) com porcentagens de 2% e 6% de cimento, e também foram realizados ensaios de compressão simples para determinação da resistência dos solos, em quatro misturas diferentes, com proporções de 2% e 6% de cimento.

6.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Os Resultados das tabelas 6.1 e 6.2 foram obtidos a partir do ensaio de compactação e estão divididos em solo 1 e solo 2 com adição de cimento na proporção de 2% e 6% e para cada tipo de solo, tem-se quatro tipos de misturas: A, B, C, D e para cada mistura obtém-se uma densidade máxima e umidade ótima de compactação.

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PROCTOR

Solo 1 - Argila Silto Arenosa	Unidade medida	2%	6%
MISTURA A	$\gamma_{\text{máx}}$ (g/cm ³)	1,50	1,52
	w (umidade %)	25,60	27,8
MISTURA B	$\gamma_{\text{máx}}$ (g/cm ³)	1,55	1,51
	w (umidade %)	23,40	23,5
MISTURA C	$\gamma_{\text{máx}}$ (g/cm ³)	1,49	1,54
	w (umidade %)	21,80	23,6
MISTURA D	$\gamma_{\text{máx}}$ (g/cm ³)	1,57	1,62
	w (umidade %)	22,60	21,8

Tabela 6.1: Resultados do ensaio de ISC para o solo 1

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PROCTOR

Solo 2 - Areia Argilosa	Unidade medida	2%	6%
MISTURA A	$\gamma_{\text{máx}}$ (g/cm ³)	1,75	1,79
	w (umidade %)	14,60	13,8
MISTURA B	$\gamma_{\text{máx}}$ (g/cm ³)	1,82	1,82
	w (umidade %)	14,90	14,2
MISTURA C	$\gamma_{\text{máx}}$ (g/cm ³)	1,89	1,83
	w (umidade %)	15,20	15,4
MISTURA D	$\gamma_{\text{máx}}$ (g/cm ³)	1,81	1,86
	w (umidade %)	15,20	15,2

Tabela 6.2: Resultados do ensaio de ISC para o solo 2

6.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

Os resultados representados na tabela 6.3 e 6.4 foram obtidos por meio dos ensaios de compressão simples, que tem por objetivo determinar a resistência de solos coesivos em termos de tensões totais:

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Solo 1 - Argila Silto Arenosa	Unidade de medida	2%	6%
MISTURA A	Mpa	1,48	2,55
MISTURA B	Mpa	1,47	2,58
MISTURA C	Mpa	1,49	2,69
MISTURA D	Mpa	1,52	2,72

Tabela 6.3: Resultados obtidos a partir do ensaio de compressão simples para o solo 1

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Solo 2 - Areia Argilosa	Unidade de medida	2%	6%
MISTURA A	Mpa	1,88	3,39
MISTURA B	Mpa	2,12	3,89
MISTURA C	Mpa	2,38	4,12
MISTURA D	Mpa	2,56	4,28

Tabela 6.4: Resultados obtidos a partir do ensaio de compressão simples para o solo 2

As figuras 6.1 e 6.2 demonstram uma representação gráfica dos resultados, sendo a série 1 os materiais com adição de 2% de cimento e a série 2 os materiais com 6% de cimento:

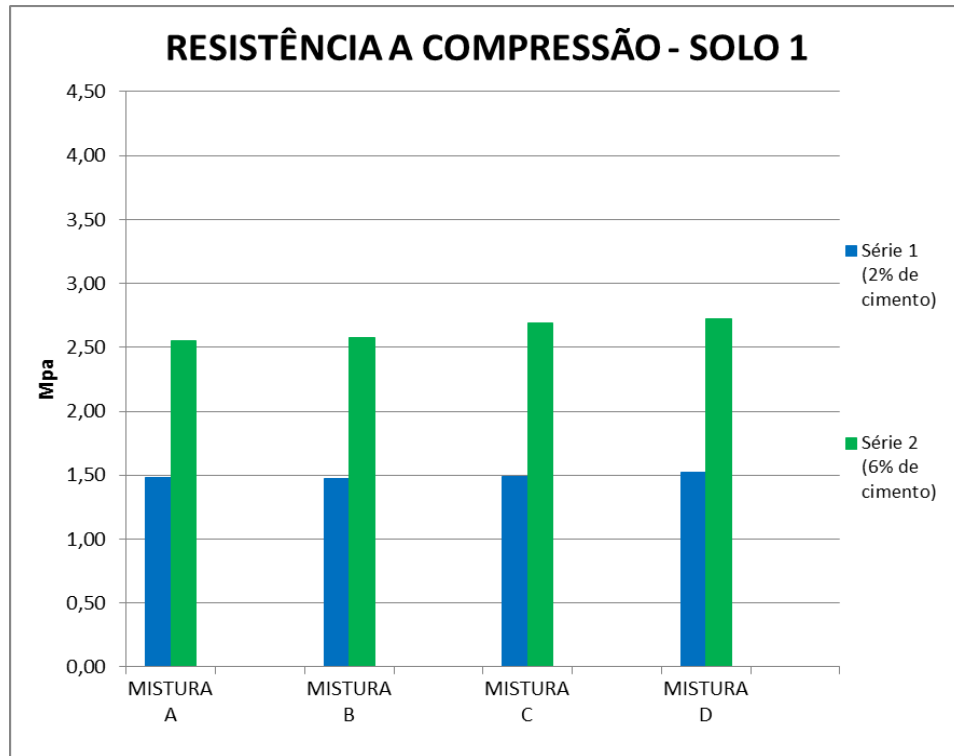


Figura 6.1: Representação gráfica dos resultados de compressão simples do solo 1
Fonte: PRÓPRIA (2014)

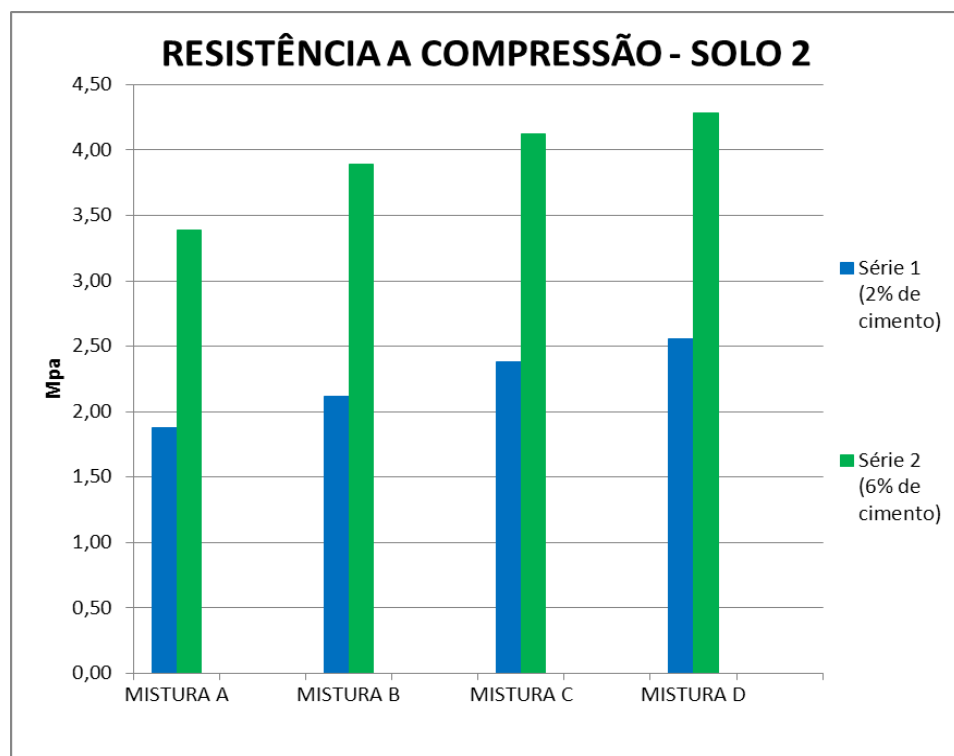


Figura 6.2: Representação gráfica dos resultados de compressão simples do solo 2
Fonte: PRÓPRIA (2014)

6.3 RESULTADOS OBTIDOS DE CBR OU ISC (ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA)

Os resultados representados na tabela 6.5 e 6.6 foram obtidos por meio dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC), que tem por objetivo determinar a resistência de solos coesivos em termos de tensões totais:

CBR ou ISC (Índice de Suporte Califórnia)			
Solo 1 - Argila Silto Arenosa	Unidade medida	2%	6%
MISTURA A	%	18	24
MISTURA B	%	19	26
MISTURA C	%	22	32
MISTURA D	%	26	33

Tabela 6.5: Resultados obtidos a partir do ensaio de Índice de Suporte Califórnia para o solo 1.

CBR ou ISC (Índice de Suporte Califórnia)			
Solo 2 - Areia Argilosa	Unidade medida	2%	6%
MISTURA A	%	28	42
MISTURA B	%	31	43
MISTURA C	%	34	58
MISTURA D	%	38	62

Tabela 6.6: Resultados obtidos a partir do ensaio de Índice de Suporte Califórnia para o solo 2.

As figuras 6.3 e 6.4 demonstram uma representação gráfica dos resultados, sendo a série 1 os materiais com adição de 2% de cimento e a série 2 os materiais com 6% de cimento:

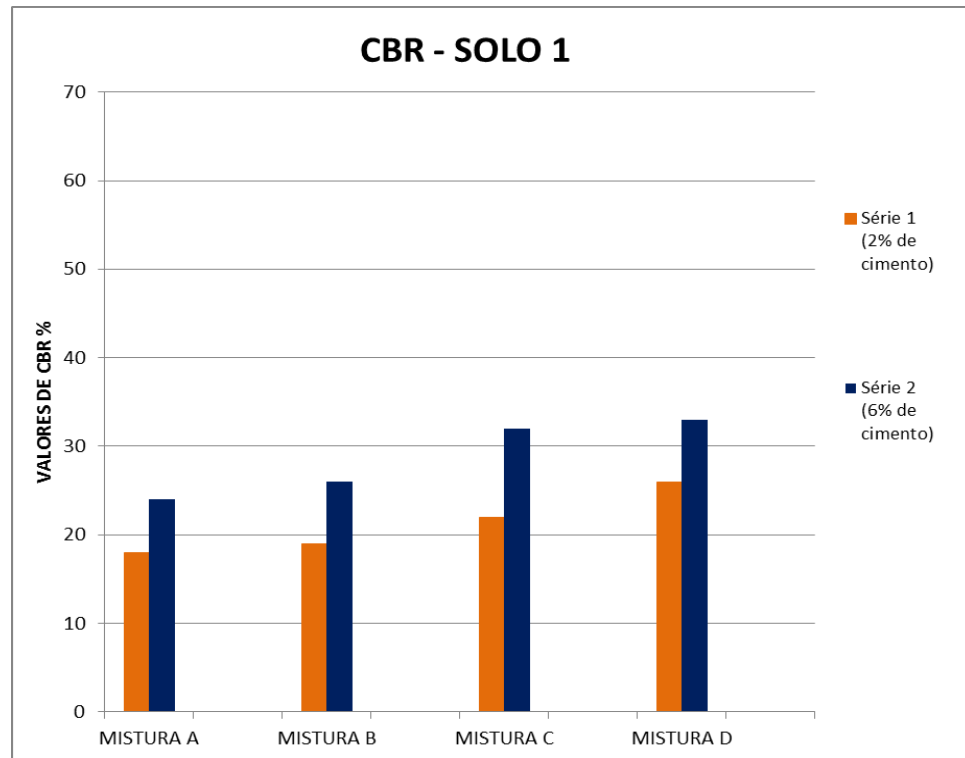


Figura 6.3: Representação gráfica dos resultados do ensaio de Índice de Suporte Califórnia para o solo 1.
Fonte: PRÓPRIA (2014)

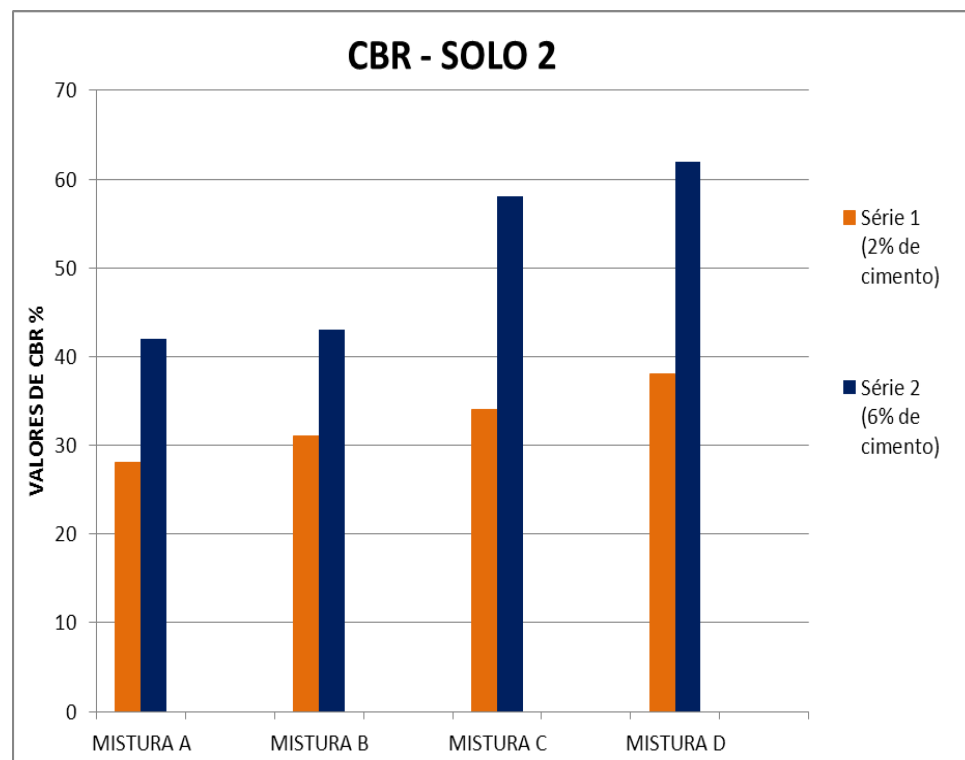


Figura 6.4: Representação gráfica dos resultados do ensaio de Índice de Suporte Califórnia para o solo 2.
Fonte: PRÓPRIA (2014)

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

De acordo com os resultados de resistência à compressão na Argila Silto Arenosa, apresentou tendência de crescimento à medida que a mistura recebia porcentagens maiores de RCD.

Houve aumento nos resultados de compressão mais nítidos na Areia Argilosa, pois apresentou tendência de crescimento mais acentuada que na Argila Silto Arenosa.

De acordo com a recomendação da NBR 15115, que exige valor mínimo de resistência a compressão de 2,1 Mpa, observa-se que a Argila Silto Arenosa com adição 2% de cimento não atendeu à exigência e a Areia Argilosa sem a adição de RCD também não atende a esta exigência.

As misturas de Argila Silto Arenosa e Areia Argilosa com adição de 6% de cimento atenderam a exigência da NBR 15115.

As misturas de Areia Argilosa com adição de 2% de cimento misturados com RCD também atenderam a exigência da NBR 15115.

A norma do DER-PR ES-P32/05, recomenda valores para solo melhorado ou tratado com cimento entre 1,2 e 2,1 Mpa, baseado nessa prerrogativa as Argilas Silto Arenosas poderão ser utilizadas como sub-base.

Conforme os resultados de CBR o solo Argila Silto Arenosa apresentou leve tendência de alta, o crescimento se tornou maior com a adição de RCD.

A Areia Argilosa apresentou resultados mais significativos, pois sua tendência de crescimento ficou bem mais visível que na Argila Silto Arenosa.

De acordo com a recomendação da NBR 15116, que normatiza a utilização de materiais reciclados na pavimentação, apresenta valores mínimos de CBR para utilização nas camadas de subleito, sub-base e base. Para subleito deve apresentar valor $\geq 12\%$, para sub-base $\geq 20\%$ e base $\geq 60\%$. Sendo assim a Argila Silto Arenosa com RCD, pode ser utilizada nas camadas de subleito e sub-base, e a Areia Argilosa com RCD pode ser utilizada nas camadas de subleito, sub-base e base.

Somente a mistura D de Areia Argilosa apresenta índices para utilização nas camadas de base.

8 CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que as técnicas de reciclagem com a utilização de RCD misturado com solo e cimento, para o universo amostral verificado são viáveis para a utilização em camadas estruturais de pavimentos flexíveis e semirrígidos, entretanto demonstrou também que tipos distintos de solo podem apresentar resultados bem divergentes, portanto sua viabilidade depende de resultados de ensaios laboratoriais, para identificação do seu melhor emprego.

Alguns fatos podem ser destacados pelos resultados, sendo que a areia argilosa apresentou resultados melhores que a argila silto arenosa, sendo que o desempenho das misturas melhora à medida que aumenta a quantidade de RCD na mistura.

Os valores apresentados demonstraram que os materiais ensaiados podem ser utilizados como reforço ou sub-base de pavimento, para sua utilização em bases será necessário mais resultados de ensaios com porcentagens maiores de cimento para fazer essa afirmação.

Entre as conclusões, destaca-se a vantagem dessa técnica no fato de que há a utilização de material que seria passivo ambiental, diminuindo também a exploração de jazidas, preservando assim o meio ambiente e diminuindo o custo na obra.

REFERÊNCIA

ÂNGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, [2005].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (ABRECON). **O que é entulho**. [2013]
Disponível em:< <http://www.abrecon.com.br/Conteudo/5/O-que-e.aspx>>. Acesso em 20 dez. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCRETO PORTLAND- ABCP. **Pavimento de concreto é alternativa para melhoria das rodovias**. [2012]
Disponível em:< <http://www.abcp.org.br/contendo/imprensa/pavimento-de-concreto-e-alternativa-para-melhoria-das-rodovias>>. Acesso em 02 fev. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT - NBR 14736 - **Determinação do efeito do calor e do ar - Método da película delgada**, Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR 15112 – **Resíduos da Construção Civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação**, Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 15113 – **Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes: Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação**, Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 15114 – **Resíduos sólidos da construção civil: áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação**, Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 15115 – **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Execução de camadas de pavimentação – procedimentos**, Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 11341 – **Produtos de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland**, Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 6576 – **Materiais asfálticos – Determinação da penetração**, Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 15116 – **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos**, Rio de Janeiro, 2004.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração** – São Paulo, 2007.

BARRETA, Ana Carolina e FORTES, Rita Moura. VII Jornada de Iniciação Científica – 2011. **Estudo comparativo de duas tecnologias diferentes na reciclagem de pavimento asfáltico com espuma de asfalto para utilização em camada de base.** São Paulo, 2011.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros.** 1 ed. Rio de Janeiro: Petrobrás ABEDA, 2008.

BERNUCCI, Liedi Bariani e Abdou, Moíses Ribeiro. **Pavimento Ecológico: Uma opção para a pavimentação de vias das grandes cidades.** São Paulo, 2006.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos.** São Paulo: Fazendo Arte, 2001.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** 2007. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, [2007].

CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. **Reciclagem de Entulho para Produção de Materiais de Construção.** Salvador: Universidade Federal da Bahia -UFBA. 2001.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução CONAMA Nº 307, de 05 de julho de 2002 Dispõe sobre gestão dos resíduos da construção civil. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em 02 fev.2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução CONAMA Nº 307, de 05 de julho de 2002 Dispõe sobre gestão dos resíduos da construção civil. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em 02 fev.2014.

DAU, Flávio Nestor Ferreira. **Uma avaliação técnico/econômica da reciclagem de revestimentos asfálticos a frio em usina em área urbana.** 2001. 171 f. Tese (Mestrado) . Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, [2001].

DER - DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Pavimentação: Concreto Asfáltico Usinado à Quente.** Paraná, 2005, 22 p. Disponível em: <<http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/ES-P21-05CAUQ.pdf>> Acesso em 17 fev 2014.

_____. **Especificação de Serviço ES-P 16/05 - Pavimentação: Brita Graduada Tratada com Cimento.** Paraná, 2005.

_____. **Especificação de Serviço ES-P32/05 – Pavimentação: Reciclagem de Pavimento a Frio “in situ” com espuma de asfalto.** Paraná, 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Especificação de Serviço ES 318 – Pavimentação – concreto betuminoso reciclado a quente em usina**. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006a. 274 p. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf>. Acesso em: 21 set. 2013.

_____. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006b. (IPR Publicação 719).

_____. **Pavimentação – Base Estabilizada**. Rio de Janeiro, 2010. (IPR Publicação 09).

_____. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro, 2006c. (IPR Publicação 720).

_____. **Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de serviço** - Rio de Janeiro, 2006d.
Disponível em: < http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT031_2006_ES.pdf>. Acesso em 20 de Dez. 2013.

EMBUSA. **Materiais Pétreos** [2013]

Disponível em: <http://www.embusa.com.br/index.php/pedreiras/>. Acesso em 20 jan. 2014.

FRAGMAQ. **Reciclagem de material de construção e entulho**. (2013)

Disponível em:< <http://www.fragmaq.com.br/blog/reciclagem-material-construcao-entulho/>>. Acesso em 30 jan. 2014.

FREMIX. **Manutenção e Recuperação de Pavimentos**. [2012]

Disponível em: <<http://fremix.com.br/>>. Acesso em 10 jan. 2014.

LEITE, F. C., **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2007. Tese (mestrado) – Curso de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [2007].

Levy, S. M., Helene, P. R. L. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**.1997. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, [1997].

PERA, J. *State of the art Report t- use of waste materials in construction in western Europe*. In: **Seminário sobre reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção**, 1996, São Paulo. Anais: São Paulo: Departamento de Engenharia e Construção Civil, Universidade de São Paulo, 1996. p. 1-20.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 209p Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

PINTO, T. P. Gestão dos resíduos de construção e demolição em áreas urbanas – da ineficácia a um modelo de gestão sustentável. **Projeto entulho bom**. Salvador: EDUFBA/ Caixa Econômica Federal, 2001. p. 78-113.

SALVO, Maria Paola de e DUARTE, Sara. Buracos em São Paulo: 10 sugestões para minimizar o problema. São Paulo, 2011.

Disponível em:< <http://vejasp.abril.com.br/materia/buracos-em-sao-paulo-10-sugestoes-para-minimizar-problema>>. Acesso em 02 de Jan. 2014.

SANTOS, Eder Carlos Guedes dos. **Aplicação de Resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. 2007. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, [2007].

SENÇO, Wastermiller de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2ª ed. São Paulo: Pini, 1997.

Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo (SindusCon-SP). **Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil: a experiência do SindusCon-SP**. São Paulo, 2005.

TRICHÊS, G.; KRYCKYJ, P. R. **Aproveitamento de entulho da construção civil na pavimentação urbana**. [1999] Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São José dos Campos, São Paulo, 1999.

WIRTGEN. **Reciclagem a Frio: Tecnologia de reciclagem a frio**, Alemanha, p. 370, 2012. Disponível em: http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf-dokumente/03_kaltrecycling_stabilisierung/_allgemein_1/manual/SD_HandbuchKaltrecycling_PT_0113_LO.pdf. Acesso em 10 fev 2014.

ZORDAN, S. E. **Metodologia de avaliação do potencial de reciclagem de resíduos**. 2003. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, [2003].