

**FACULDADE GUARAPUAVA
ENGENHARIA CIVIL**

MIRIELLI SCHELESKI DOS SANTOS

**UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS
DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO
CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE**

GUARAPUAVA - PR

2017

MIRIELLI SCHELESKI DOS SANTOS

**UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS
DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO
CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Faculdade Guarapuava, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Esp. Luis Fernando Sequinel

GUARAPUAVA - PR

2017

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e as oportunidades que me foram concedidas.

À minha família, por ser essencial nesta conquista, me incentivando e apoiando em todos os momentos.

Ao meu namorado Luis Henrique, por ter vivenciado comigo todo o desenvolvimento deste trabalho, além do carinho e apoio.

Aos amigos que fiz no decorrer destes cinco anos, pelo apoio, incentivo e principalmente, pelo convívio ao longo desta jornada.

Ao Professor Luis Fernando Sequinel, pela confiança, orientação, atenção e conhecimento técnico necessário em toda a realização deste trabalho.

À empresa Future Reciclagem Inteligente pela doação dos agregados reciclados utilizados para a realização desta pesquisa, especialmente ao Engenheiro Robson Biela por ter disponibilizado seu tempo para apresentar todos os processos envolvidos na reciclagem dos resíduos da construção civil além do incentivo para a realização da pesquisa nesta área.

À empresa Dalba Engenharia que permitiu a realização dos ensaios em seu laboratório, principalmente, ao Laboratorista Jorge Vieira pelo conhecimento técnico e auxílio durante o período de realização dos ensaios.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente nesta conquista.

RESUMO

A intensificação das atividades da Construção Civil tem gerado uma quantidade expressiva de resíduos. Os impactos negativos por eles gerados podem se transformar em fonte de insumos para o próprio setor, quando estes são reciclados e utilizados como agregados. Entre as diversas aplicações dos agregados reciclados na engenharia, destacam-se as obras de pavimentação, por utilizarem grandes quantidades deste material. Neste contexto, o trabalho visa estudar a viabilidade técnica do emprego de resíduos da construção civil e demolição como agregados em misturas asfálticas do tipo CBUQ. Para isso, foram realizados ensaios laboratoriais com base no Método Marshall, enquadrados na faixa "C" do DNIT com ligante convencional CAP 50/70. As propriedades volumétricas e mecânicas encontradas nos ensaios comprovam a viabilidade técnica dos agregados reciclados para emprego em revestimentos asfálticos. No entanto, a porosidade dos agregados resultou em um maior consumo de ligante (6,1%) e pode dificultar sua utilização por questões econômicas visto que o ligante asfáltico é o material de maior custo da composição.

Palavras chave: Resíduos da Construção Civil e Demolição. Agregados Reciclados. Pavimentação. CBUQ. Método Marshall.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Corte transversal do pavimento.....	15
Figura 2. Corte longitudinal do pavimento.....	15
Figura 3. Estrutura do pavimento-tipo.....	16
Figura 4. Classificação dos revestimentos.....	19
Figura 5. Moldagem dos corpos-de-prova em laboratório.....	23
Figura 6. Exemplo de corpos de prova submersos em água e molde de compressão.....	26
Figura 7. Prensa Marshall.....	26
Figura 8. Curva resultante do ensaio.....	26
Figura 9. Exemplos de curvas dos parâmetros determinados na dosagem Marshall.....	27
Figura 10. Teor de asfalto x Vv e RBV.....	28
Figura 11. Usina de Reciclagem Future Reciclagem Inteligente.....	29
Figura 12. Brita Reciclada.....	29
Figura 13. Pedrisco Reciclado.....	29
Figura 14. Materiais retidos em algumas peneiras.....	30
Figura 15. Pesagem dos agregados.....	31
Figura 16. Agregados homogeneizados.....	31
Figura 17. Ligante sendo adicionado aos agregados.....	32
Figura 18. Mistura sendo homogeneizada após adição de CAP.....	32
Figura 19. Preparação para compactação.....	32
Figura 20. Amostra após compactação.....	32
Figura 21. Massa ao ar.....	33
Figura 22. Massa submersa.....	33
Figura 23. Corpos de prova em banho maria.....	33
Figura 24. Prensa Marshall.....	33

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Termos aplicáveis a camadas de revestimento asfáltico.....	18
Quadro 2. Massa mínima de agregados para ensaio.....	30
Quadro 3. Parâmetros Marshall.....	34
Quadro 4. Traço das misturas com substituição parcial de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado.....	35
Quadro 5. Traço das misturas com 100% de agregado natural.	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO.....	10
2.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO.....	10
2.2 NORMATIZAÇÃO.....	11
2.3 RECICLAGEM.....	12
2.4 UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO.....	12
2.4.1 RCD aplicado à pavimentação.....	12
3 PAVIMENTAÇÃO.....	14
3.1 DEFINIÇÃO.....	14
3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS.....	14
3.3 ESTRUTURA DO PAVIMENTO.....	16
3.3.1 Subleito.....	16
3.3.2 Reforço do subleito.....	17
3.3.3 Base e sub-base	17
3.3.4 Revestimento	18
3.4 CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE.....	19
3.5 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS.....	20
3.5.1 Método Marshall.....	21
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1 COLETA DE AGREGADOS.....	28
4.1.1 Agregados naturais	28
4.1.2 Agregados reciclados	29
4.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	29
4.3 DEFINIÇÃO DO TRAÇO E MASSA DOS COMPONENTES DAS MISTURAS.....	31
4.4 ENSAIO MARSHALL.....	31
4.4.1 Moldagem dos corpos de prova.....	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
5.1 GRANULOMETRIA.....	34
5.2 DOSAGEM MARSHALL.....	36
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
7 REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é reconhecida como uma das áreas fundamentais para o desenvolvimento econômico e social de um país. No entanto, o crescimento acelerado das cidades conjuntamente com a intensificação das atividades do setor construtivo, tem causado sérios impactos ambientais. O setor faz uso de um volume significativo de recursos naturais e, por consequência, gera uma quantidade expressiva de resíduos, que acarretam sérias consequências ao meio ambiente e também à qualidade de vida das pessoas.

Segundo dados da Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), os municípios coletaram cerca de 45,1 milhões de toneladas de resíduos provenientes da construção civil e demolição em 2016, isso é alarmante, considerando-se que não representa o total gerado pelos municípios, pois esses dados são apenas dos resíduos lançados em locais públicos.

Em função desse enorme volume de resíduos gerados, fica evidente a necessidade da implementação de práticas construtivas que venham a garantir o desenvolvimento sustentável do setor. A reciclagem dos resíduos torna-se uma solução eficaz para essa problemática. Por meio dela, os resíduos são transformados em agregados e possuem grande potencial na engenharia, principalmente, em obras de pavimentação que requerem elevadas quantidades deste material.

As misturas asfálticas para construção e manutenção de estradas consomem grande quantidade de agregados, o que representa uma porcentagem significativa de seu volume. O uso de agregados reciclados se torna uma alternativa plausível para reverter a atual situação do país, em que somente 12,2% das rodovias são pavimentadas, segundo dados da Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2017).

Neste contexto, o presente trabalho visa estudar a viabilidade técnica, por meio de ensaios laboratoriais, da utilização de resíduos da construção civil e demolição como agregados em misturas asfálticas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), de modo a proporcionar a destinação adequada aos resíduos gerados pela construção civil. Para isso, foi necessária a verificação da granulometria dos agregados reciclados e também dos naturais componentes das misturas para que os mesmos se enquadrassem nas especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Posteriormente, foram dosadas as

misturas com substituição parcial de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados para avaliar o comportamento volumétrico e mecânico das mesmas, verificando a viabilidade do seu emprego na camada de rolamento em revestimentos asfálticos.

2 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO

2.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

Segundo a NBR 15113 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), resíduos da construção civil são:

[...] provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha. (ABNT, 2004).

Considerando que os resíduos provenientes da construção civil representam um significativo percentual dos resíduos sólidos urbanos, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) criou a Resolução 307, de 5 Julho de 2002, que define as responsabilidades tanto do setor público como da iniciativa privada para minimizar os impactos causados por estes resíduos e, torna obrigatória a adoção de planos de gerenciamento nos municípios bem como, no canteiro de obras.

A Resolução 307 classifica os resíduos em quatro classes, de A a D, com base no potencial de reciclagem ou reuso. A classe 'A', abrange os resíduos reutilizáveis ou passíveis de reciclagem que podem ser utilizados como agregados, sendo que esta classe engloba os resíduos de construção, demolição, obras de infraestrutura, reformas, reparos de edificações e pavimentação, peças pré-moldadas em concreto e solos provenientes de terraplanagem. A classe 'B', engloba resíduos que são recicláveis, porém não podem ser utilizados como agregados, são eles: plásticos, metais, vidros, madeiras, de papel, tintas e gesso. A classe 'C' abrange os resíduos os quais ainda não possuem tecnologias ou aplicações de reciclagem. E, por

fim, a classe 'D' é composta pelos resíduos perigosos, contaminados ou nocivos à saúde, provenientes do processo de construção.

2.2 NORMATIZAÇÃO

A partir da Resolução CONAMA nº 307/2002 já citada, algumas normas foram publicadas pela ABNT em 2004. São elas:

- NBR 15113/2004 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15114/2004 – Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15115/2004 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos;
- NBR 15116/2004 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

Além das normas publicadas, vários municípios regulamentaram o gerenciamento de resíduos conjuntamente com a utilização de agregados reciclados, seguem alguns exemplos:

- Decreto nº 1068 de 18 Novembro de 2004 do município de Curitiba- PR;
- Lei Complementar Nº 276 de 16 de Dezembro de 2010 do município de Umuarama- PR;
- Lei nº 5.159 de 24 de dezembro de 2005 do município de Joinville –SC;
- Lei nº 9.393 de 20 de dezembro de 2004 do município de São José do Rio Preto –SP.

Em São Paulo foi publicado em 2006, o decreto nº 48.075 que regulamenta a obrigatoriedade da utilização de agregados reciclados, provenientes de resíduos da construção civil, em obras de pavimentação das vias públicas municipais.

2.3 RECICLAGEM

Segundo a NBR 15116/2004, reciclagem é o “processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação”, se tratando da reciclagem dos resíduos da construção civil e demolição (RCD), o mesmo deve ser de Classe A baseado na Resolução CONAMA nº 307/2002 e passar por um processo de beneficiamento que resultará no agregado reciclado de RCD.

A NBR 15116/2004, define agregado reciclado como “material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infraestrutura”. O beneficiamento é realizado em usinas recicladoras, através da britagem dos resíduos. Primeiramente, passam por etapas de catação, posteriormente pela britagem e, por fim, por peneiramento.

Após todo esse processo, obtêm-se agregados miúdos e graúdos similares aos agregados naturais, porém, com maior porosidade e textura irregular. Embora isso resulte em maior absorção de água, os agregados reciclados apresentam propriedades relevantes para utilização na construção de pavimentos (YOMASA, 2013).

2.4 UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO

A reciclagem dos resíduos representa uma oportunidade de transformar o problema em fonte de insumos para o próprio setor, o que garante também a redução do volume de extração de recursos naturais.

O RCD, após o processo de reciclagem, pode ser empregado nos mais variados segmentos da engenharia, destacando-se as obras de pavimentação e também os concretos não estruturais.

2.4.1 RCD aplicado à pavimentação

Conforme (BERNUCCI et al., 2008, p.9) “Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente

de agregados e ligantes asfálticos”. Justamente devido ao grande volume de agregados que compõem a mistura asfáltica, estudos tem analisado a viabilidade técnica da substituição parcial do agregado natural pelo agregado reciclado.

De acordo com Motta (2005), as primeiras experiências com uso de agregados reciclados em pavimentação no Brasil datam a década 1980. Desde então, outras pesquisas vêm sendo realizadas com intuito de provar a viabilidade da utilização de RCD na pavimentação asfáltica.

D’Antona (2009), analisou em laboratório misturas CBUQ com ligante CAP 50/70, misturado com polímero EVA para analisar o comportamento mecânico desse concreto asfáltico com vistas a aplicação como revestimento em vias urbanas de Manaus (AM).

Oliveira *et al.* (2009 apud SINISTERRA, 2014), avaliaram misturas compostas com 100% de agregado natural e, 50% de RCD e 50% de agregado natural – ambas com CAP 50/70 como ligante e concluíram que a mistura com RCD apresentou resiliência e resistência à tração superiores a mistura com 100% de agregado natural. Entretanto, a vida de fadiga se mostrou inferior.

Zhu, Wu e Wang (2012 apud BRASILEIRO, 2013, p.49) estudaram “as propriedades do concreto asfáltico produzido com agregados reciclados provenientes de edificações danificadas pelo Terremoto Wenchuan (China)”.

Silva (2009) realizou ensaios para avaliar o comportamento mecânico do RCD em misturas asfálticas do tipo CBUQ utilizando ligantes CAP 30/45 E 50/70 e duas faixas granulométricas “B” e “C” do DNIT. O autor concluiu que o RCD associado aos ligantes é adequado para substituir os agregados naturais em camadas betuminosas em vias de tráfego leve.

Um artigo apresentado na 15ª Reunião de Pavimentação Urbana por Ron et al. (apud BRASILEIRO, 2013), utilizou o agregado RCD como agregado alternativo em misturas asfálticas e comparou suas características com misturas realizadas com agregado natural. Os autores concluíram que os agregados reciclados atendem às especificações das normas na maioria dos aspectos, entretanto, o teor de ligante da mistura foi de 7,6%, elevado em relação ao teor de ligante normalmente utilizado para misturas com agregados naturais que é de 5%.

Desse mesmo modo, Lourenço e Cavalcante (2015) estudaram a caracterização do agregado reciclado de RCD a fim de analisar a viabilidade técnica

do mesmo em substituição ao agregado convencionalmente utilizado em misturas asfálticas usinadas a quente, para aplicação em camadas de rolamento de rodovias. Concluíram que devido ao alto índice de absorção do agregado o teor de ligante asfáltico do tipo CAP 50/70 ideal é de 9,1%, sendo considerado um valor alto quando comparado ao convencional.

3 PAVIMENTAÇÃO

3.1 DEFINIÇÃO

O pavimento é composto por um sistema de camadas que estão sujeitas às cargas dos veículos, ocasionando tensões, deformações e deslocamentos sobre o mesmo (GOUVEIA, 2007).

Bernucci *et. al* (2008) expõe uma definição mais complexa, define o pavimento como:

“[...] uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.”

Balbo (2007) também afirma que o pavimento é uma estrutura composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados, apropriada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, com durabilidade e ao mínimo custo.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS

De uma maneira geral, os pavimentos classificam-se em três tipos básicos:

a) Pavimentos flexíveis

“Aquele, em que todas as camadas sofrem deformações elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas

aproximadamente equivalentes entre as camadas” (DNIT, 2006). Em geral, são compostos por uma camada superficial asfáltica denominada revestimento, apoiada sobre a camadas de base, sub-base e reforço do subleito do pavimento, sendo que estas camadas são constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem adição de agentes cimentantes (BERNUCCI *et al.*, 2008). A Figura 1 exemplifica a estrutura-tipo do pavimento flexível.

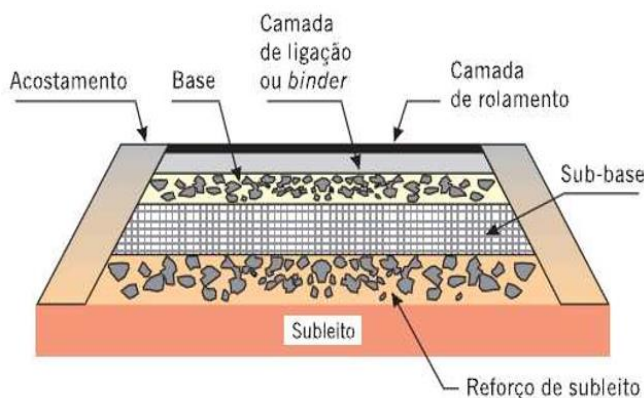


Figura 1. Corte transversal do pavimento.
Fonte: Bernucci *et al.*, 2008.

b) Pavimentos rígidos

Nos pavimentos rígidos, o revestimento normalmente é uma placa de concreto com cimento Portland, com uma espessura especificada, o que garante uma elevada rigidez, em comparação às camadas inferiores, isso por sua vez, faz com que ele absorva praticamente todas as tensões provenientes da ação do tráfego (DNIT, 2006). Conforme ilustra a Figura 2.

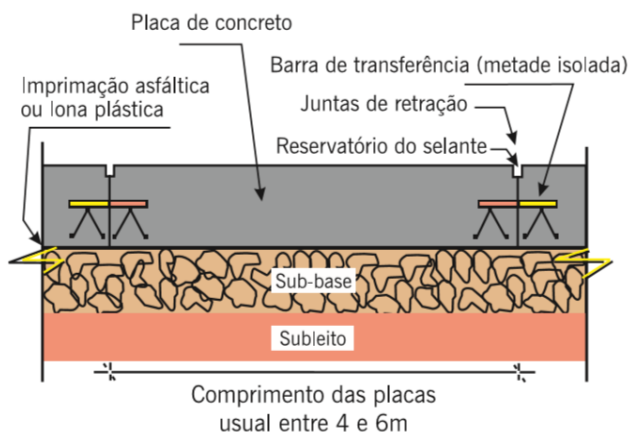


Figura 2. Corte longitudinal do pavimento.
Fonte: Bernucci *et al.*, 2008.

c) Pavimentos Semirrígidos

Os pavimentos semirrígidos caracterizam-se por uma base cimentada com um aglutinante cimentício, geralmente misturas do tipo solo-cal, solo-betume, solo-cimento, que é revestida por uma camada asfáltica (DNIT, 2006).

3.3 ESTRUTURA DO PAVIMENTO

A estrutura do pavimento tem por função receber e transmitir os esforços entre suas camadas, aliviando as pressões entre as camadas inferiores que, geralmente, são menos resistentes. O comportamento estrutural de cada camada depende da sua espessura, rigidez e da interação delas entre si. Dessa forma, (BALBO, 2007, p.35) defende que “cada camada do pavimento possui uma ou mais funções específicas, que devem proporcionar aos veículos as condições adequadas de suporte e rolamento em qualquer condição climática.”

Segundo Balbo (2007) o pavimento rodoviário é composto pelas seguintes camadas: revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito, conforme mostra a Figura 3.

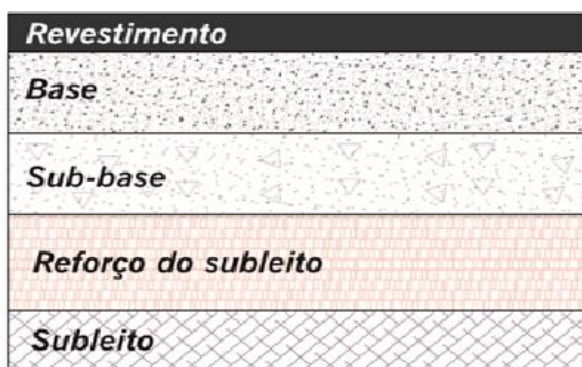


Figura 3. Estrutura do pavimento-tipo.
Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.*, 2008.

3.3.1 Subleito

É a camada de fundação do pavimento, sendo constituído de material natural consistente, ou por um material transportado e compactado.

3.3.2 Reforço do subleito

É uma camada de espessura constante, construída, se necessário, acima do subleito, com características superiores às do subleito e inferiores às da camada imediatamente superior, ou seja, a sub-base (DNIT, 2006).

3.3.3 Base e sub-base

As camadas de base e sub-base servem para aliviar as pressões sobre as camadas inferiores do pavimento, além de atuar na drenagem subsuperficial do mesmo. Geralmente, quando a camada de base exigida para desempenhar essas funções no pavimento é espessa, procura-se por motivos econômicos dividi-la em duas camadas, assim cria-se uma sub-base (BALBO, 2007).

Segundo Senço (2007) as bases podem ser classificadas em rígidas e flexíveis. As bases rígidas podem ser:

- Concreto de cimento: mistura de agregados, areia, cimento e água, conforme o projeto;
- Macadame de cimento: constituído de agregado graúdo, onde os vazios são preenchidos por um material de granulometria mais fina misturado com cimento;
- Solo cimento: mistura de solo, cimento e água, com proporções previamente determinadas.

As bases flexíveis, por sua vez, podem ser:

- Base de solo estabilizado: é constituída de solo com características específicas, como a granulometria, o limite de liquidez e o índice de plasticidade, especificados previamente;
- Base de macadame hidráulico: constituída de uma ou mais camadas de pedra britada, em que o material de enchimento é introduzido com o auxílio de água;
- Base de brita graduada: mistura de agregados previamente dosados, contendo material de enchimento, água e cimento, devendo ser feitas em usinadas;

- Base de macadame betuminoso: superposição de camadas de agregados por pinturas de material betuminoso, com o número de camadas dependente da espessura determinada em projeto.

3.3.4 Revestimento

O revestimento é a camada que destina-se à receber diretamente a carga dos veículos, sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes ou perda de compactação. Para isso, precisa ser composto por materiais bem dispostos que atendam a essas condições (BALBO, 2007).

Para Bernucci *et al.* (2008) o revestimento é uma mistura de agregados minerais, de várias dimensões, com ligantes asfálticos que, adequadamente proporcionada e processada, garante a estrutura impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local.

Senço (2007) define revestimento como a camada tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do tráfego e deve garantir conforto e segurança à, além de resistir ao desgaste, aumentando a durabilidade. “Os revestimentos asfálticos, muitas vezes, são subdivididos em duas ou mais camadas por questões técnicas, construtivas e de custo” (BALBO, 2007, p. 37). As distinções entre essas camadas de revestimento asfáltico são indicadas no Quadro 1.

Designação do revestimento	Definição	Associações
Camada de rolamento	Camada superficial do pavimento, diretamente em contato com as cargas e ações ambientais	Capa de rolamento
Camada de ligação	Camada intermediária entre a camada de rolamento e a base do pavimento	Binder
Camada de nivelamento	Primeira camada de mistura asfáltica com função de corrigir os desníveis em pista e nivelar o perfil do greide para execução da nova camada de rolamento	Reperfilagem
Camada de reforço	Nova camada de rolamento, após anos de uso do pavimento existente, executada por razões estruturais e funcionais	“Recape”

Quadro 1. Termos aplicáveis a camadas de revestimento asfáltico.

Fonte: Adaptado de Balbo, 2007.

Segundo o DNIT (2006), o revestimento é classificado em: rígido e flexível. O revestimento rígido segue o mesmo princípio das bases rígidas, sendo composto basicamente de concreto de cimento. Enquanto o revestimento flexível pode ser composto por material betuminoso ou por calçamento. A Figura 4 apresenta a classificação dos revestimentos.

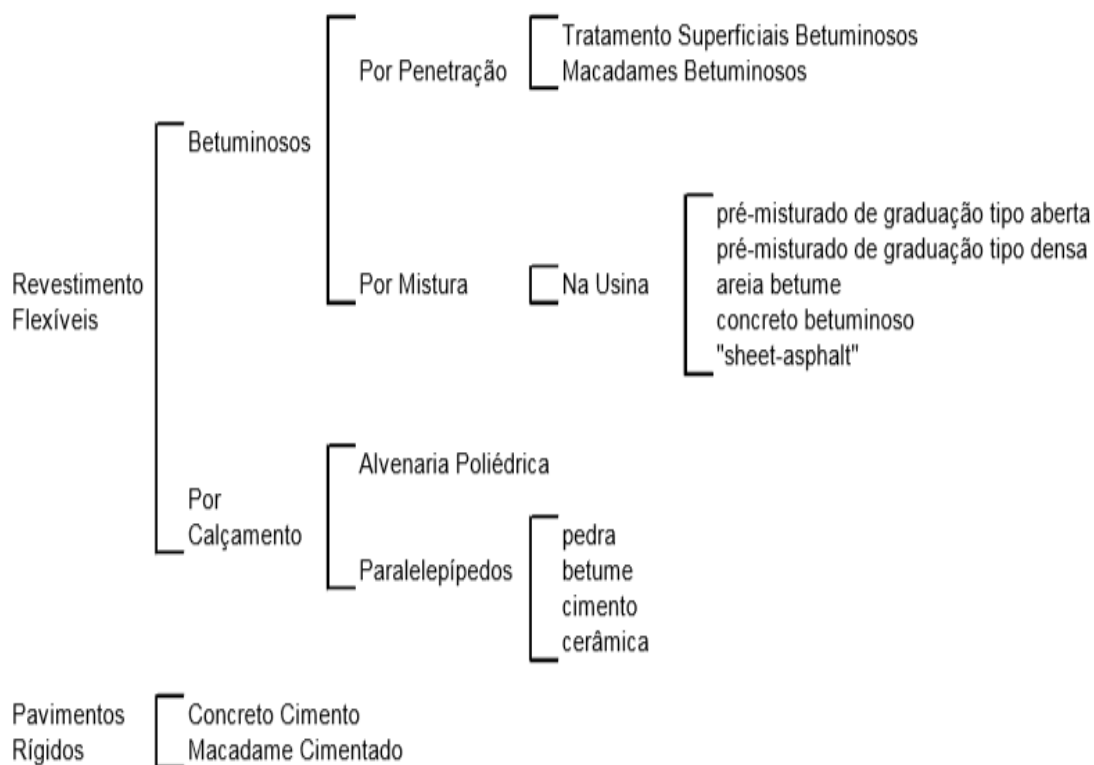


Figura 4. Classificação dos revestimentos.

Fonte: DNIT, 2006.

3.4 CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE

O Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) ou Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) como também é conhecido, é um material utilizado para a construção de revestimentos de pavimentos, incluindo as camadas de rolamento e ligação. Pode ser considerado a mais comum mistura asfáltica a quente utilizada no país, tanto pelos materiais empregados quanto pelos processos de controle exigidos para sua execução (BALBO, 2007).

Balbo (2007) define betume como uma substância composta por hidrocarbonetos, com propriedades ligantes, inflamáveis e de elevada viscosidade

que pode ser encontrado na natureza ou a partir da destilação do petróleo, de carvão, madeira ou resinas. Em geral, engloba asfaltos (derivados do petróleo) e alcatrões (obtidos a partir da destilação destrutiva do carvão) daí surge a denominação de CAUQ.

De acordo com Senço (2007), o CBUQ é considerado o mais nobre dos revestimentos flexíveis, sendo resultante da mistura a quente, em usina adequada, de agregado mineral graúdo e miúdo, material de enchimento (filer) e material betuminoso, espalhado e comprimido a quente. Dessa forma, uma série de condições devem ser obedecidas para garantir a qualidade da execução do revestimento.

A granulometria do agregado graúdo da mistura deve ter boa adesividade com o asfalto utilizado e apresentar Abrasão Los Angeles inferior a 50%. O agregado miúdo que pode ser constituído de areia, pó de pedra ou da mistura de ambos, deve apresentar um valor igual ou inferior a 55 no método Equivalente de Areia (SENÇO, 2007).

O material betuminoso utilizado, geralmente, é o Concreto Asfáltico de Petróleo (CAP) que por possuir elevada quantidade de betume é viscoso e atua como ligante na mistura, colando as partículas minerais e transformando-se em um agente impermeabilizante. Os tipos de cimento asfálticos, no Brasil, são quatro, sendo eles: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200 (BALBO, 2007).

A classificação do CAP é baseada em duas das suas propriedades, consistência (medida pelo ensaio de penetração) e viscosidade.

O ensaio de penetração fornece a medida em décímetros de milímetros da penetração de uma agulha no CAP em que, valores baixos representam asfalto muito consistente e valores altos, asfalto excessivamente mole. O ligante utilizado para a dosagem das misturas do trabalho será o CAP 50/70.

3.5 DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

A dosagem de uma mistura asfáltica consiste em estabelecer proporções de agregados e ligante, através de procedimentos laboratoriais, de modo que quando estes sejam misturados satisfaçam as especificações técnicas de projeto.

Nesse contexto, tanto as propriedades dos agregados quanto a dosagem do ligante que será utilizado na mistura são de extrema importância. Ambos refletem diretamente no desempenho da mistura e também nas características do revestimento, como durabilidade e estabilidade (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O primeiro Método de dosagem documentado é conhecido como método Hubbard-Field. Ele foi inicialmente desenvolvido para dosagem de misturas de areia e asfalto, posteriormente, foi modificado para aplicação em misturas com agregados graúdos. Atualmente, os métodos mais difundidos são o Método Marshall (compactação por impacto) e o Método Superpave (compactação por amassamento) (BERNUCCI *et al.*, 2008). O Método Marshall é o mais empregado mundialmente e será utilizado para a realização do presente trabalho.

3.5.1 Método Marshall

O método foi desenvolvido na década de 1940, pelo engenheiro Bruce Marshall, com a finalidade de definir a proporção de agregado e ligante em misturas a serem utilizadas em pistas de aeronaves militares. Em sua forma original, a compactação Marshall utilizava-se de um esforço de 25 golpes com o soquete Proctor e, posteriormente, da aplicação de uma carga de 5000 libras durante dois minutos. Essa carga tinha como propósito nivelar a superfície do corpo de prova, visto que, o soquete utilizado possuía diâmetro menor que o corpo de prova (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Por meio de análises de trechos experimentais, verificou-se que o teor de ligante obtido através do método Marshall era elevado. As pistas apresentaram exsudação com o decorrer do tempo, devido à compactação causada pelo tráfego. A partir dessas análises concluiu-se que o esforço de compactação utilizado em laboratório era baixo, diferente da real magnitude exercida em campo (WHITE apud BERNUCCI *et al.*, 2008).

Com base nas conclusões das análises, estudos foram realizados para identificar o esforço real de compactação que levaria à escolha de um teor de ligante ideal para a mistura. Estes estudos resultaram na adoção de um soquete de 10 libras, 50 golpes e diâmetro de 3 7/8" (WHITE apud BERNUCCI *et al.*, 2008).

No Brasil o Método Marshall é normatizado pela DNER-ME 043/95 e o procedimento da dosagem é realizado seguindo uma série de passos. Segundo Bernucci *et al.*, (2008), são eles:

- a) Determinação das massas específicas reais do CAP e dos agregados;
- b) Seleção da faixa granulométrica a ser utilizada na mistura, dependendo da sua finalidade;
- c) Escolha do percentual em massa de cada agregado que irá compor a mistura, de modo que esta se enquadre nos limites da faixa granulométrica escolhida;
- d) Escolha das temperaturas de mistura e de compactação, a partir da curva viscosidade-temperatura do ligante escolhido. A temperatura do ligante para mistura deve ser tal que ele apresente viscosidade entre 75 e 150SSF (segundos Saybolt-Furol), já a temperatura de compactação deve ser tal que ele apresente viscosidades na faixa de 125 a 155SSF. Para os agregados dever ser de 10 a 15°C acima da temperatura definida para o ligante, não ultrapassando 177°C;
- e) Adoção de teores de asfalto para os diferentes grupos de corpos-de-prova a serem moldados, sendo que cada grupo deve ter no mínimo 3 corpos de prova. Os corpos-de-prova são moldados conforme indica a Figura 5;



(a) Adição de asfalto aos agregados



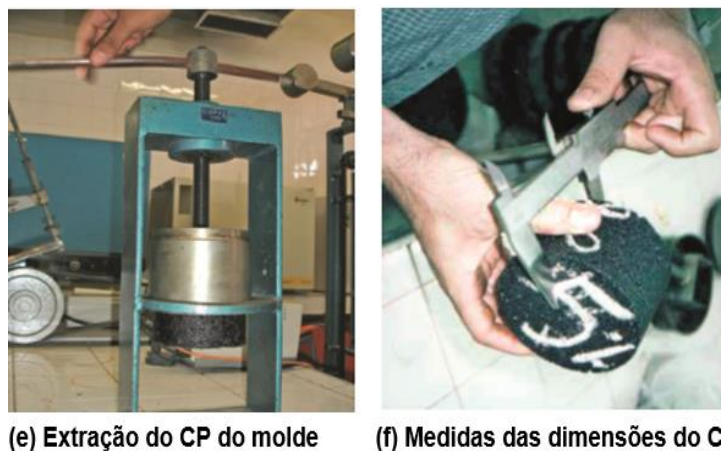
(b) homogeneização da mistura



(c) Colocação da mistura no molde



(d) Compactação da mistura



(e) Extração do CP do molde

(f) Medidas das dimensões do CP

Figura 5. Moldagem dos corpos-de-prova em laboratório.

Fonte: Adaptado de Bernucci et al., 2008.

- f) Com base na percentagem de ligante (%a), agregado (%n) e nas massas específicas reais dos constituintes (G_i), calcula-se a DMT correspondente ao teor de asfalto considerado conforme mostra a Equação 1;

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%Ag}{G_{Ag}} + \frac{\%Am}{G_{Am}} + \frac{\%f}{G_f}} \quad (1)$$

Em que:

DMT = massa específica máxima teórica da mistura (g/cm^3);

%a = percentagem de asfalto em relação à massa total da mistura;

%Ag, %Am e %f = percentagens do agregado graúdo, agregado miúdo e fíler, respectivamente, em relação à massa total da mistura asfáltica;

G_a , G_{Ag} , G_{Am} e G_f = massas específicas reais do asfalto, do agregado graúdo, do agregado miúdo e do fíler, respectivamente.

- g) Calculam-se os parâmetros de dosagem para cada CP, conforme as equações:

Volume dos corpos-de-prova:

$$V = M_s - M_{Ssub} \quad (2)$$

Em que:

V = volume do corpo de prova (cm^3);

M_s = massa seca do corpo de prova compactado (g);

$M_{s \text{ sub}}$ = massa do corpo de prova compactado submerso em água (g).

Massa específica aparente da mistura:

$$Gmb = \frac{M_s}{V} \quad (3)$$

Em que:

Gmb = massa específica aparente da mistura asfáltica (g/cm^3);

M_s = massa seca do corpo de prova compactado (g);

V = volume do corpo de prova compactado (cm^3).

Os parâmetros volumétricos abaixo devem ser calculados com valores de Gmb médio de três corpos-de-prova:

Volume de vazios:

$$V_v = \frac{DMT - Gmb}{DMT} \quad (4)$$

Em que:

V_v = volume de vazios (%);

DMT = massa específica máxima teórica da mistura (g/cm^3);

G_{mb} = massa específica aparente da mistura (g/cm^3).

Porcentagem em massa dos agregados:

$$\sum \%n = 100 - \%a \quad (5)$$

Em que:

$\%n$ = percentual em massa do agregado "n" na mistura;

$\%a$ = percentual de CAP na mistura.

Vazios do agregado mineral:

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} \times \sum \%n}{G_{sb}} \quad (6)$$

Em que:

VAM = vazios do agregado mineral (%);

G_{mb} = massa específica aparente da mistura (g/cm^3);

G_{sb} = massa específica aparente da composição de agregados (g/cm^3);

$\%n$ = percentual em massa do agregado “n” na mistura.

Relação betume/vazios:

$$RBV = 100 \times \left(\frac{VAM - V_v}{VAM} \right) \quad (7)$$

RBV = relação betume/vazios (%);

VAM = vazios do agregado mineral (%);

V_v = volume de vazios (%);

h) Após as medidas volumétricas, os corpos-de-prova são submersos em banho-maria a 60°C por 30 a 40 minutos, exemplificado na Figura 6(a). Decorrido esse tempo, retiram-se os corpos-de-prova colocando-os imediatamente dentro do molde de compressão ilustrado na Figura 6(b), e são determinadas, por meio da prensa Marshall conforme a Figura 7, as propriedades mecânicas das misturas, estabilidade e fluência.

- Estabilidade Marshall (N): carga máxima que o corpo de prova resiste antes da ruptura, conforme a Figura 7 (BERNUCCI *et al.*, 2008);
- Fluência (mm): deslocamento na vertical apresentado pelo corpo de prova com a aplicação da carga máxima (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A Figura 8 exibe um exemplo de curva resultante dos ensaios de estabilidade e fluência.

Com todos os parâmetros encontrados, são plotadas seis curvas em função do teor de asfalto, que serão utilizadas para a definição do teor de projeto, conforme ilustradas na Figura 9.

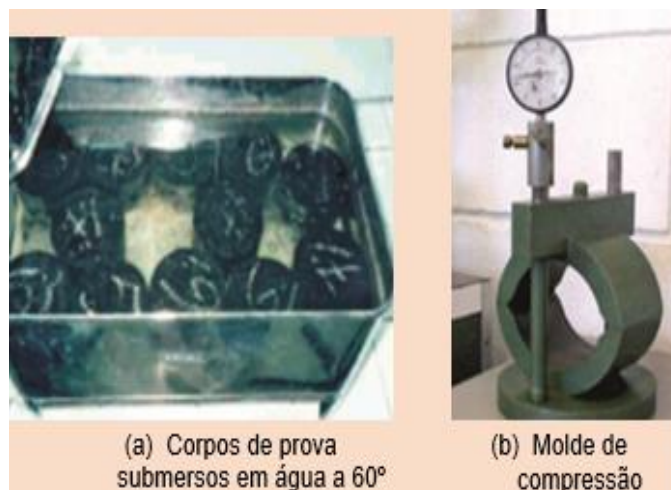


Figura 6. Exemplo de corpos de prova submersos em água e molde de compressão.
 Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.*, 2008.



Figura 7. Prensa Marshall.
 Fonte: Bernucci *et al.*, 2008.

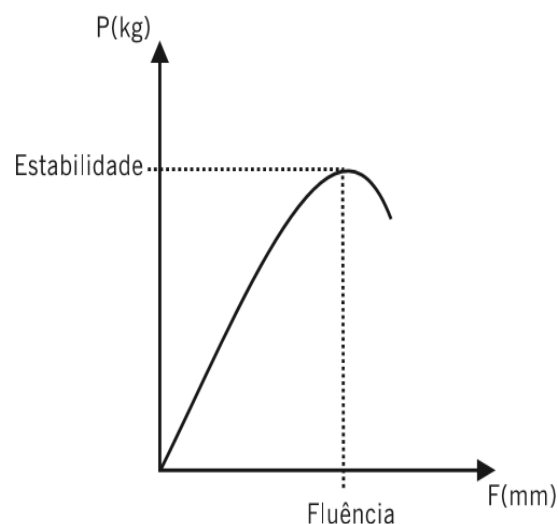


Figura 8. Curva resultante do ensaio.
 Fonte: Bernucci *et al.*, 2008.

A partir das curvas, o método Marshall apresenta algumas alternativas para a escolha do teor ótimo de ligante. Segundo Napa apud Bernucci *et al.*, 2008, a escolha do teor para camadas de rolamento é baseada somente no volume de vazios (V_v) conforme gráfico da Figura 9(c), correspondente a 4% ou o V_v que corresponde à média das especificações. Também é comum escolher a partir da massa específica aparente conforme o gráfico da Figura 9(a) e V_v . Neste caso, o teor é a média de três teores, de acordo com a máxima estabilidade, à massa específica aparente máxima da amostra compactada e um V_v correspondente à 4%.

Além das alternativas citadas, há também como determiná-lo fazendo uso de dois parâmetros volumétricos, V_v e relação betume-vazios (RBV), gráfico da Figura

9(e). Desse modo, utilizam-se cinco valores médios de Vv e RBV obtidos nos grupos de corpo-de-prova, traçando um gráfico com teor de asfalto no eixo x, Vv no eixo y1 e RBV no eixo y2. Adicionam-se linhas para os valores encontrados nos parâmetros, além disso deve-se traçar linhas determinando os limites de cada variável (indicados no gráfico pelas linhas tracejadas) e a partir da interseção das linhas do Vv e do RBV com os limites de cada um, são determinados quatro teores de CAP, conforme mostra a Figura 10. O teor ótimo será obtido a partir da média entre dois teores centrais (BERNUCCI et al. 2008).

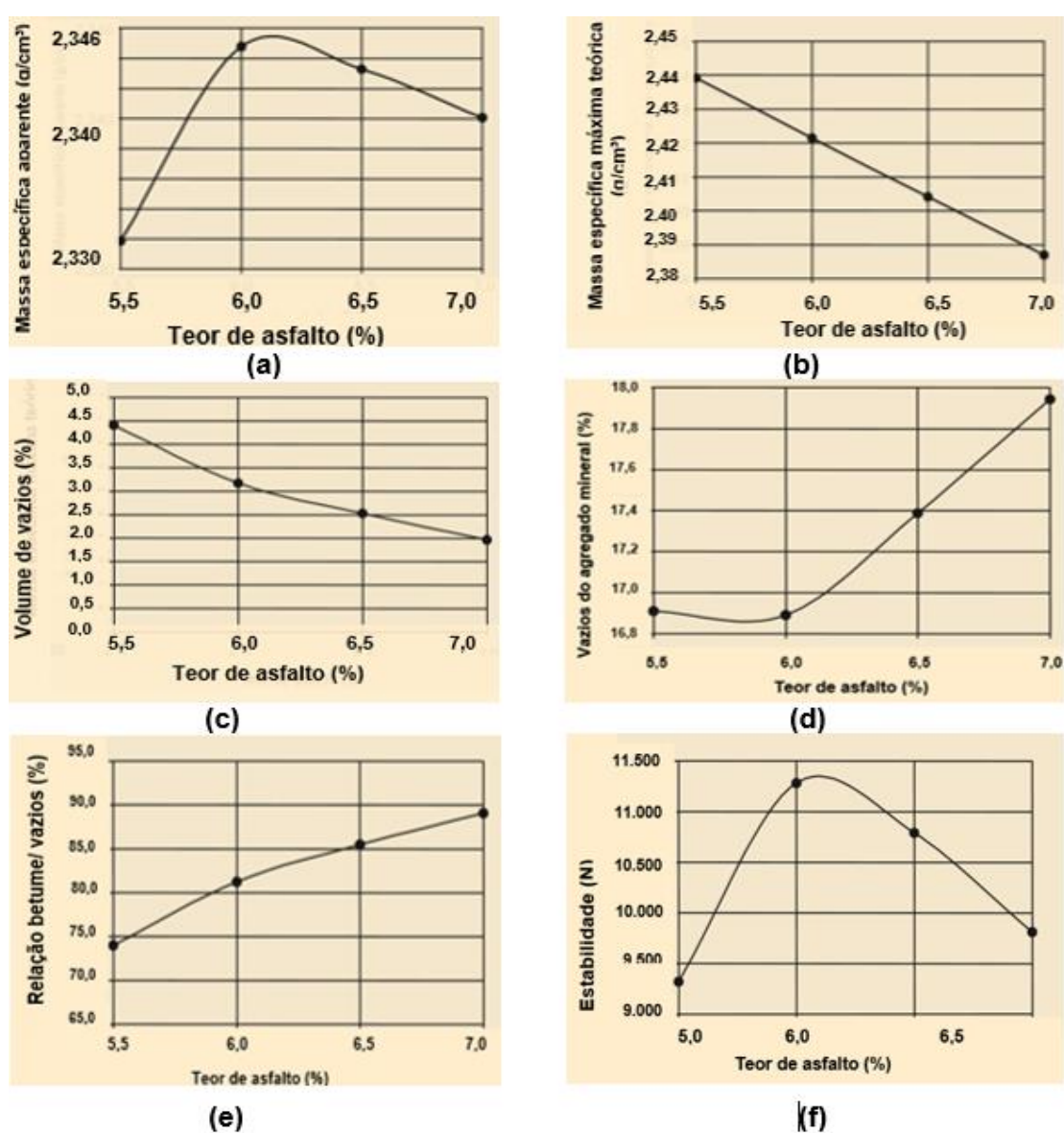


Figura 9. Exemplos de curvas dos parâmetros determinados na dosagem Marshall.
Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.*, 2008.

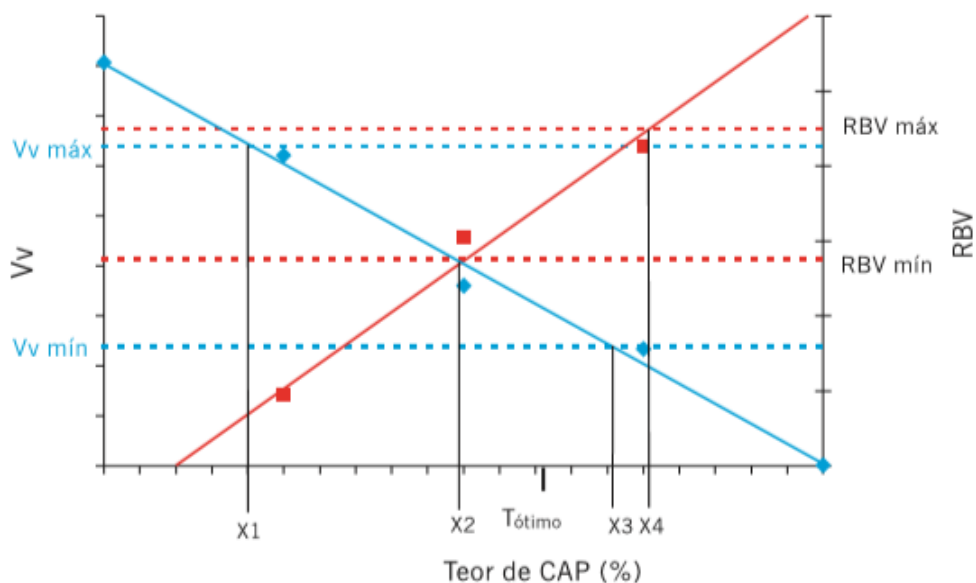


Figura 10. Teor de asfalto x Vv e RBV

Fonte: Bernucci *et al.*, 2008.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, inicialmente, foram realizadas pesquisas bibliográficas relacionadas a utilização de agregados reciclados em obras de Engenharia, com ênfase às obras de pavimentação.

Em segundo momento, procedeu-se com a coleta dos agregados necessários e, então com a realização dos ensaios laboratoriais para determinação dos parâmetros volumétricos e mecânicos das misturas de modo a encontrar o teor ótimo das mesmas.

4.1 COLETA DE AGREGADOS

4.1.1 Agregados naturais

Para a composição das misturas foram utilizados Brita 3/4", Pedrisco 3/8" e Pó de pedra, ambos disponibilizados pela Dalba Pedreira, localizada na PR-170, Km 7,5 do Município de Guarapuava – PR.

4.1.2 Agregados reciclados

Os agregados reciclados que compõem as misturas são Brita 3/4" reciclada (Figura 12) e Pedrisco 3/8" reciclado (Figura 13). Estes agregados foram disponibilizados pela empresa Future Reciclagem Inteligente localizada na BR-369, km 517 do município de Cascavel-PR.



Figura 11. Usina de Reciclagem Future Reciclagem Inteligente

Fonte: Autor, 2017.



Figura 12. Brita Reciclada.

Fonte: Autor, 2017.



Figura 13. Pedrisco Reciclado.

Fonte: Autor, 2017.

4.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

O ensaio granulométrico foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos da Faculdade Guarapuava. Inicialmente, as amostras foram reduzidas por

quarteamento, até atingir as quantidades mínimas indicadas na norma DNER-ME 083/98, como mostra o Quadro 2.

Dimensão máxima característica do agregado (mm)	Massa mínima da amostra de ensaio (kg)
Agregados miúdos: 4,8	1
Agregados graúdos: 9,5 19,0 25,0 38,0 50,0	5 7 10 15 20

Quadro 2. Massa mínima de agregados para ensaio.

Fonte: Adaptado de DNER-ME 083/98.

Em seguida, realizou-se a secagem dos agregados na estufa de secagem, em uma temperatura de aproximadamente 110°C, obtendo-se uma secagem uniforme do material.

Após a secagem, procedeu-se o peneiramento através do agitador mecânico, de acordo com a DNER-ME 083/98, para verificação granulométrica dos agregados de modo que os mesmos se enquadrassem na faixa C especificada pela norma DNIT 031/2006-ES. O conjunto de peneiras utilizadas foi: 3/4", 1/2", 3/8", nº4, nº 10, nº 40, nº 80 e nº 200, indicada na Figura 14.



Figura 14. Materiais retidos em algumas peneiras.

Fonte: Autor, 2017.

4.3 DEFINIÇÃO DO TRAÇO E MASSA DOS COMPONENTES DAS MISTURAS

A partir do ensaio granulométrico obteve-se a distribuição granulométrica dos agregados então, pelo método das tentativas, encontrou-se um traço para as misturas de modo que as mesmas se enquadrassem na faixa granulométrica escolhida. O traço foi baseado em um traço usual da Dalba Engenharia que foi ajustado conforme a curva granulométrica dos agregados reciclados.

Em seguida, foram adotados cinco teores de CAP 50/70: 5%, 5,5%, 6% ,6,5% e 7%. Para cada teor de ligante, a composição do traço foi ajustada, sendo compostas cinco misturas com substituição de 20% do agregado natural graúdo por agregado graúdo reciclado e outras cinco com 100% de agregado natural.

Com o traço das misturas definido e visando um corpo-de-prova de 1250g, os agregados componentes das misturas foram pesados para cada corpo de prova (Figura 15), e, posteriormente, identificados e homogeneizados, conforme a Figura 16.



Figura 15. Pesagem dos agregados
Fonte: Autor, 2017.



Figura 16. Agregados homogeneizados
Fonte: Autor, 2017.

4.4 ENSAIO MARSHALL

4.4.1 Moldagem dos corpos de prova

Para a execução dos corpos de prova, os agregados foram aquecidos a uma temperatura superior a do CAP de modo que este pudesse ser acrescentado. Em

seguida, a mistura foi homogeneizada, conforme indicam as Figuras 17 e 18, respectivamente.



Figura 17. Ligante sendo adicionado aos agregados.
Fonte: Autor, 2017.



Figura 18. Mistura sendo homogeneizada após a adição do CAP.
Fonte: Autor, 2017.

Após a homogeneização da mistura com o CAP, a mesma foi levada até o molde no qual foi compactada (Figura 19). A compactação foi realizada com 75 golpes em cada face do corpo de prova com um soquete de aproximadamente 4,5 kg (Figura 20). Após o resfriamento, cerca de 12 horas, os corpos de prova foram desmoldados e então, determinadas as suas massas ao ar e submersa em água, para o cálculo da densidade aparente, apresentados nas Figuras 21 e 22.



Figura 19. Preparação para compactação.
Fonte: Autor, 2017.



Figura 20. Amostra após compactação.
Fonte: Autor, 2017.



Figura 21. Massa ao ar.

Fonte: Autor, 2017.



Figura 22. Massa submersa.

Fonte: Autor, 2017.

Obtidas as medidas volumétricas, os corpos de prova foram submersos em água em banho maria a 60 °C por 30 minutos (Figura 23). Então, foram colocados no molde de compressão na prensa Marshall (Figura 24) para determinação da estabilidade e fluência da mistura.



Figura 23. Corpos de prova em banho maria.

Fonte: Autor, 2017.



Figura 24. Prensa Marshall.

Fonte: Autor, 2017.

Após a obtenção de todos os dados necessários foram plotados os gráficos para avaliação das propriedades volumétricas e mecânicas conforme as especificações do DNIT apresentadas no Quadro 3, e determinação do teor ótimo de ligante para as misturas.

Características	Método de ensaio	Camada de rolamento	Camada de ligação
Porcentagem de vazios (%)	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75 – 82	65 – 72
Estabilidade mínima (Kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência à tração por compressão diametral à 25°C (MPa)	DNER-ME 138	0,65	0,65

Quadro 3. Parâmetros Marshall.
Fonte: Adaptado de DNIT 031/2006-ES.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 GRANULOMETRIA

Os resultados obtidos na análise granulométrica estão apresentados na Figura 25.

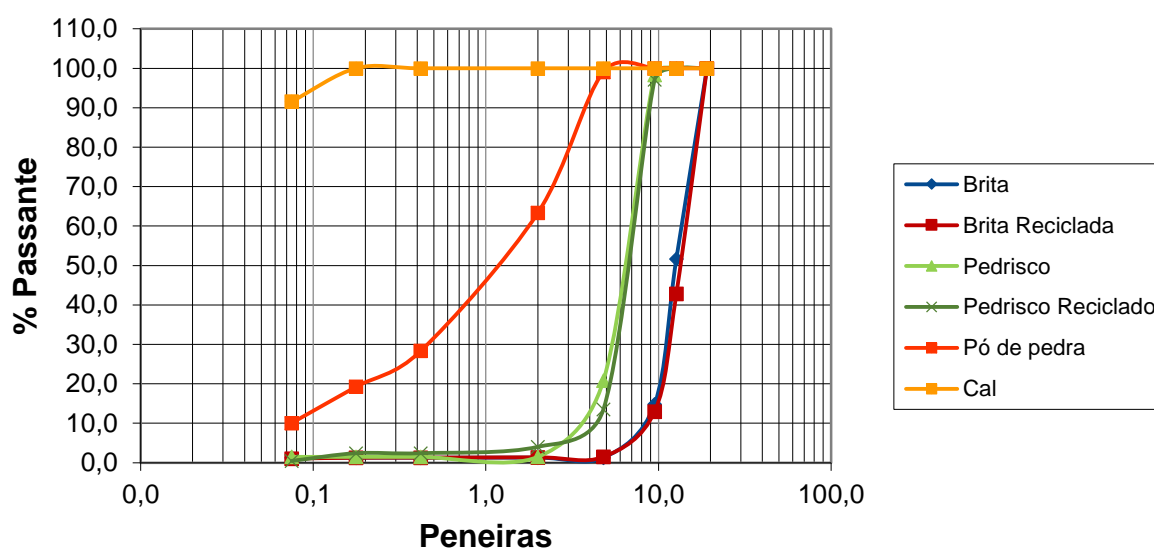


Gráfico 1. Curva granulométrica dos agregados.

Fonte: Autor, 2017.

Como pode-se observar graficamente (Gráfico 1), os agregados reciclados apresentam comportamento bastante semelhante aos naturais. A brita e o pedrisco demonstram uma granulometria aberta enquanto o pó de pedra e o cal uma granulometria mais densa.

Após a análise granulométrica dos agregados, encontrou-se o traço para as misturas. Tratando-se das misturas com substituição de agregado gráudo natural por agregados gráudo reciclado, foram utilizados 20% de substituição, fazendo uso do mesmo traço para todas as misturas, diferindo-se apenas na porcentagem de ligante, conforme o Quadro 4.

Agregados	Porcentagem (%)
Brita 3/4"	15,00
Brita 3/4" Reciclada	10,0
Pedrisco 3/8"	19,0
Pedrisco 3/8" Reciclado	10,0
Pó de Pedra	45,0
Cal CH-1	1,0

Quadro 4. Traço das misturas com substituição parcial de agregado gráudo natural por agregado gráudo reciclado.

Fonte: Autor, 2017.

Para as misturas com 100% de agregado natural, o traço utilizado foi o mesmo, exemplificado no Quadro 5, para que seja possível a comparação do comportamento das misturas.

Agregados	Porcentagem (%)
Brita 3/4"	25,00
Pedrisco 3/8"	29,0
Pó de Pedra	45,0
Cal CH-1	1,0

Quadro 5. Traço das misturas com 100% de agregado natural.

Fonte: Autor, 2017.

As curvas granulométricas das misturas estão apresentadas nos Gráficos 2 e 3, respectivamente, comprovando que as mesmas se enquadram nas especificações do DNIT para a faixa escolhida.

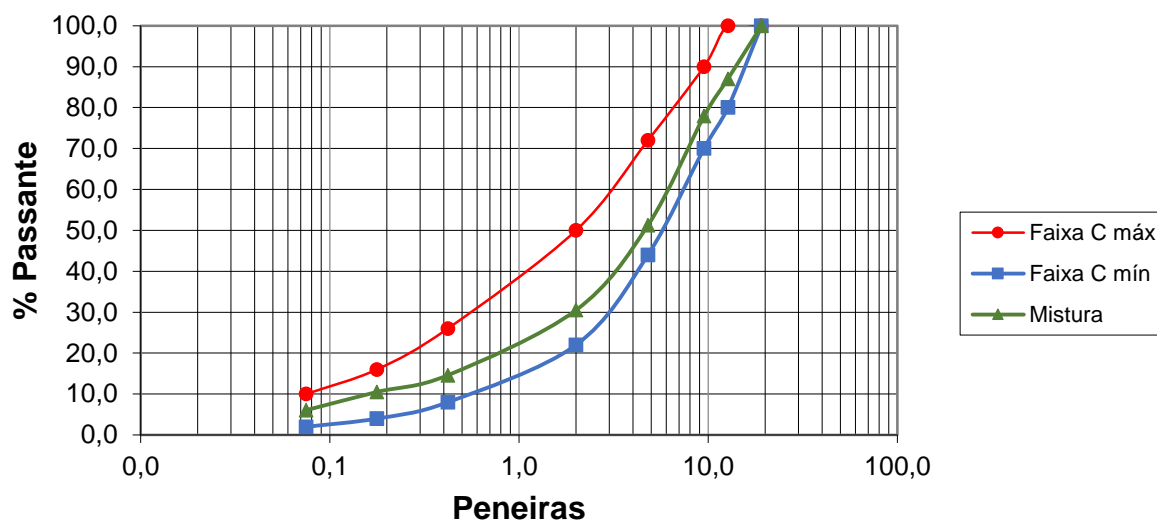


Gráfico 2. Curva granulométrica das misturas com substituição parcial de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados.

Fonte: Autor, 2017.

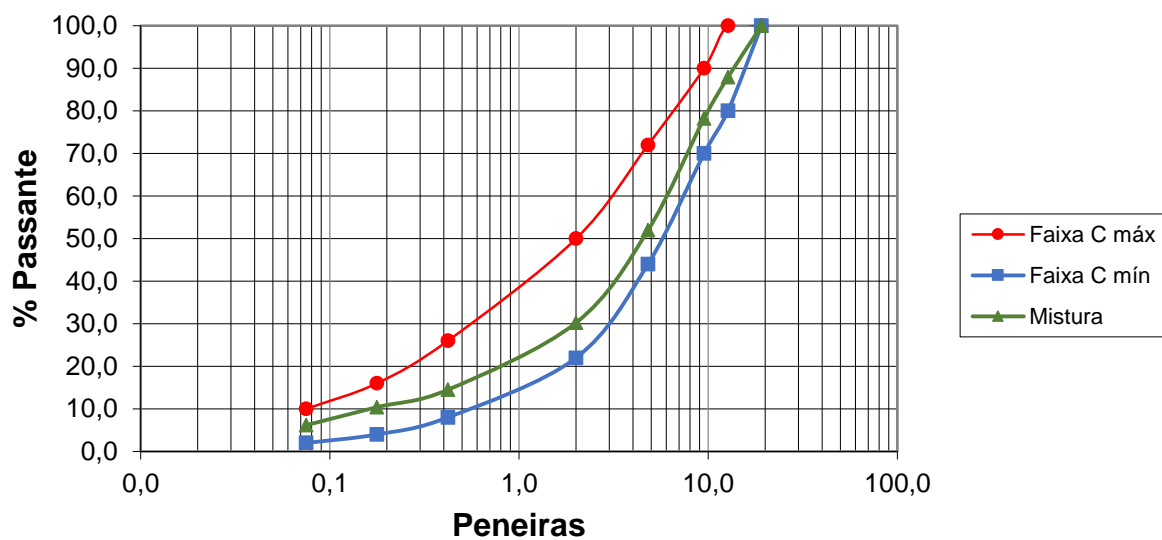


Gráfico 3. Curva granulométrica das misturas com 100% de agregado natural.

Fonte: Autor, 2017.

5.2 DOSAGEM MARSHALL

Os resultados dos ensaios de dosagem Marshall estão apresentados a seguir. Para ter uma medida da dispersão entre os três corpos de prova de cada mistura, foi utilizado o desvio padrão entre eles e demonstrado graficamente. O valor de desvio

padrão apresentado em todos os parâmetros pode ser considerado baixo, indicando a homogeneidade dos dados

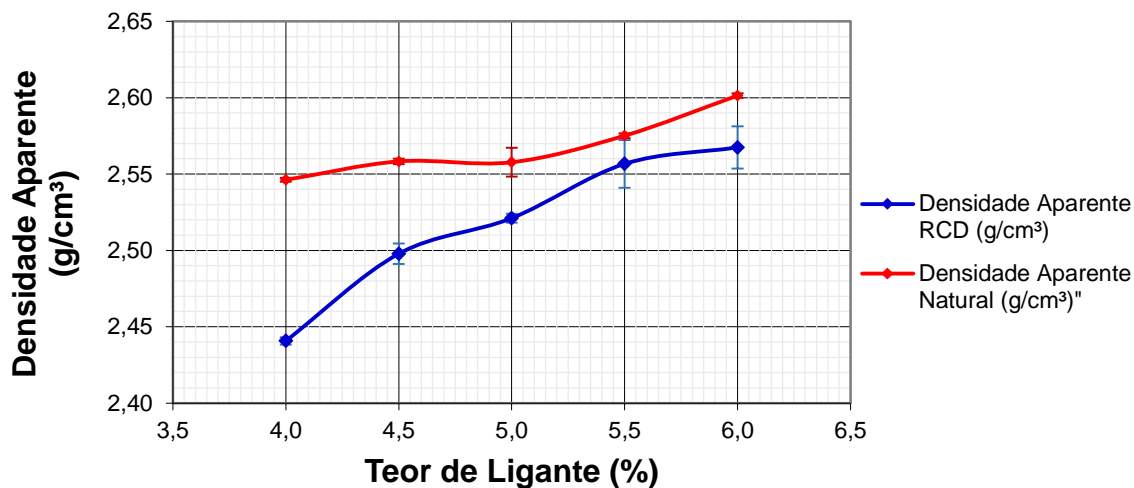


Gráfico 4. Densidade aparente das misturas (g/cm³).

Fonte: Autor, 2017.

A densidade aparente das misturas, apresentada no Gráfico 4, indica um valor baixo nas misturas com agregados reciclados em comparação às misturas com 100% de agregado natural. Gouveia *et al.* (2004) defende que quanto menor a densidade aparente, maior é a absorção de água e asfalto, indicando a porosidade do agregado.

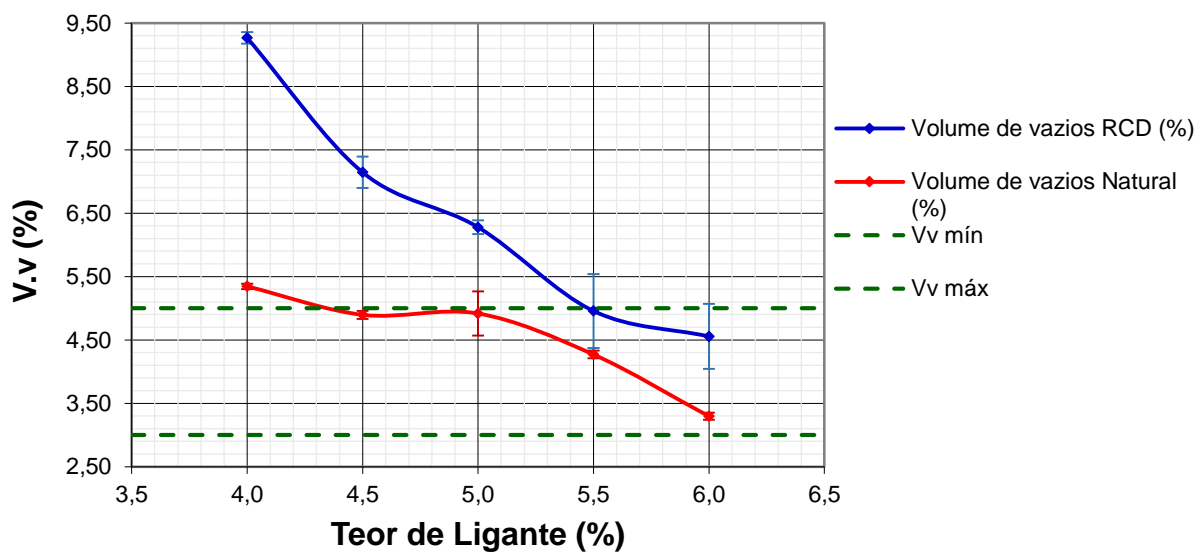


Gráfico 5. Volume de vazios (V.v.).

Fonte: Autor, 2017.

O índice de volume de vazios das misturas é uma das propriedades volumétricas mais importantes, pois quando apresentam valores baixos, abaixo de 3%, podem causar trilhas de rodas e quando altos, acima de 5%, vem a comprometer a durabilidade do pavimento (JÚNIOR e ROCHA, 2013).

O Gráfico 5 apresenta o volume de vazios das misturas, indicando que a medida que o teor de CAP aumenta o Vv diminui. As misturas com agregados reciclados demonstram um índice alto comparado às misturas de agregado natural, e somente se encaixam nos parâmetros especificados pelo DNIT, Vv de 3 a 5%, nos teores de 5,5 e 6%. Isto confirma que a porosidade elevada dos agregados reciclados resulta em um maior consumo de ligante.

O comportamento das misturas com 100% de agregado natural foi diferente, apresentou valores menores fazendo com que três das cinco misturas se enquadrassem nos parâmetros do DNIT.

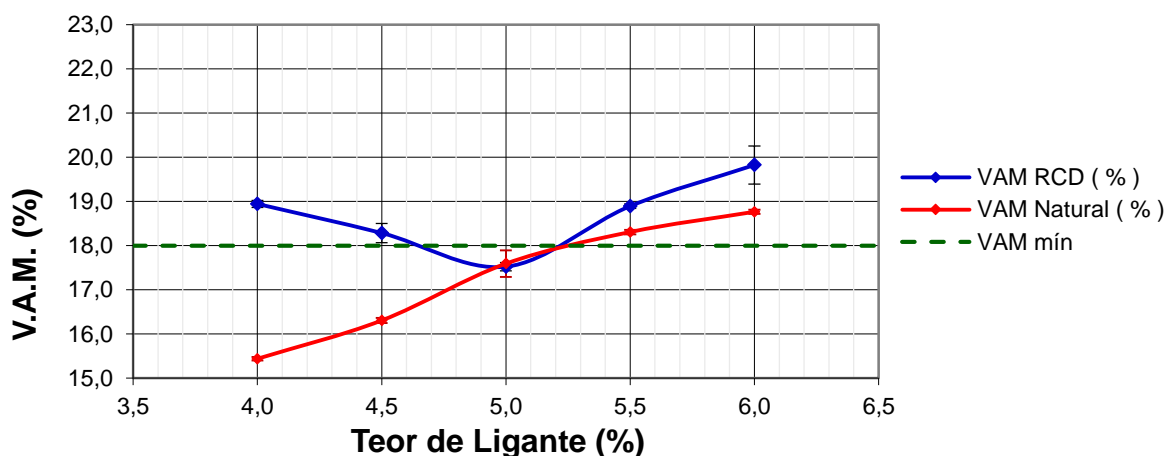


Gráfico 6. Vazios de Agregado Mineral (V.A.M.).
Fonte: Autor, 2017.

O volume de vazios de agregado mineral é o volume de vazios da massa levando em consideração somente os agregados. Dessa forma, se este valor for baixo compromete a durabilidade do pavimento permitindo a oxidação mais rápida do asfalto (SOUZA *et al.* 2015).

Observando o Gráfico 6, é possível perceber que as misturas com agregado reciclado apresentaram um V.A.M. superior em comparação às misturas naturais. Nos teores 5,5 e 6,0% em ambas as misturas o volume de vazios de agregado mineral foi satisfatório, atingindo as especificações da norma para V.A.M. mínimo de 18%. No entanto, a curva apresentada pelas misturas com 100% de agregado natural se

comportou diferente do que indica a teoria, isso pode ter ocorrido devido a algum erro na moldagem dos corpos de prova.

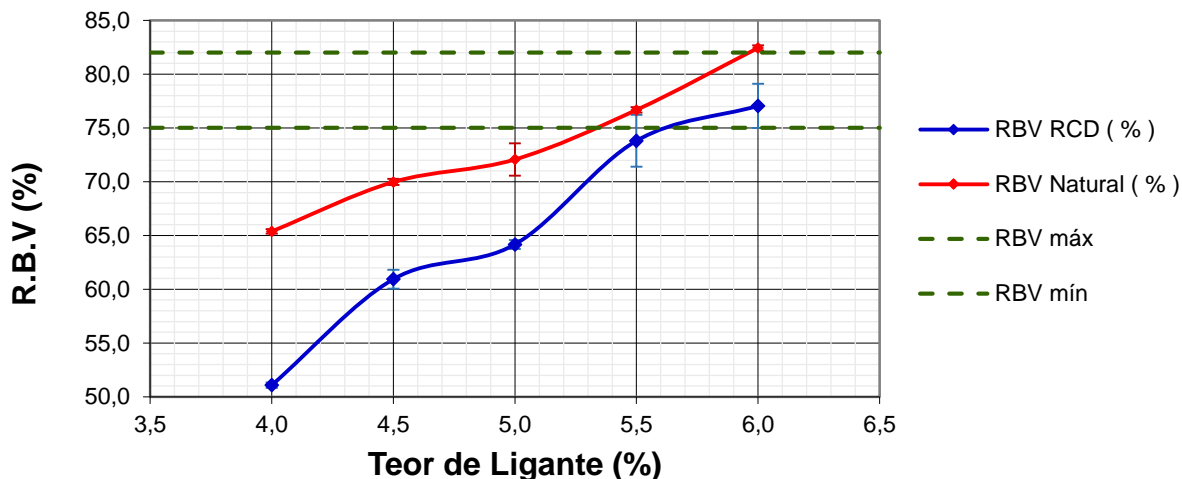


Gráfico 7. Relação Betume/Vazios (R.B.V.).

Fonte: Autor, 2017.

A relação betume/vazios é a porcentagem de vazios preenchidos por ligante. Valores baixos comprometem a durabilidade da mistura e altos a estabilidade (SPECHT, 2004).

Pode-se observar no Gráfico 7 que a relação betume/vazios somente ficou entre os parâmetros especificados pelo DNIT de RBV 75 a 82% nos teores de 5,5 e 6% nas misturas com 100% de agregado natural e somente no teor de 6% para as misturas com agregado reciclado.

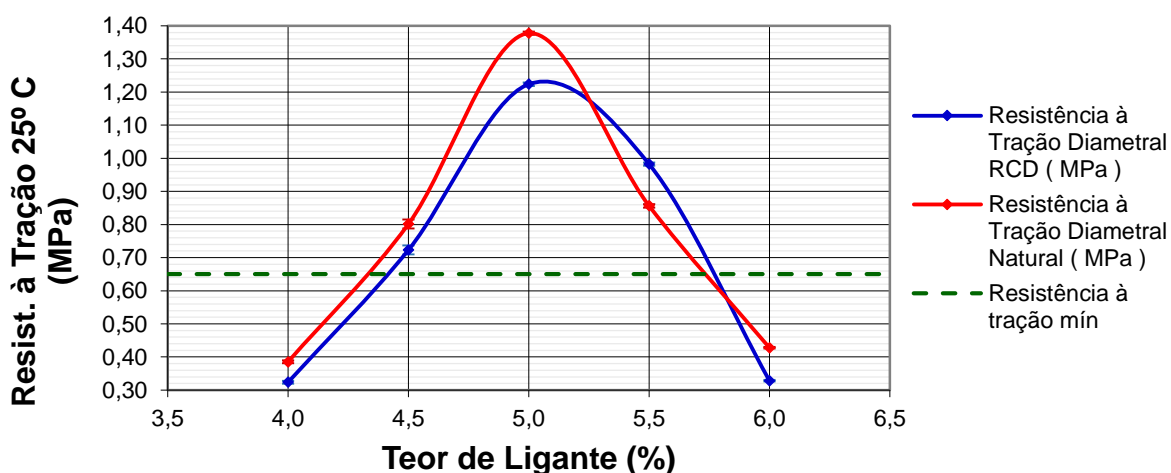


Gráfico 8. Resistência a tração por compressão diametral.

Fonte: Autor, 2017.

A resistência à tração por compressão diametral está relacionada a resistência à ruptura e fadiga do pavimento. Conforme o Gráfico 8, o comportamento das misturas de agregados reciclados comparados com o de agregados naturais mostrou-se próximo atingindo, na maior parte das misturas, valores acima dos especificados pelo DNIT de mínimo 0,65 MPa.

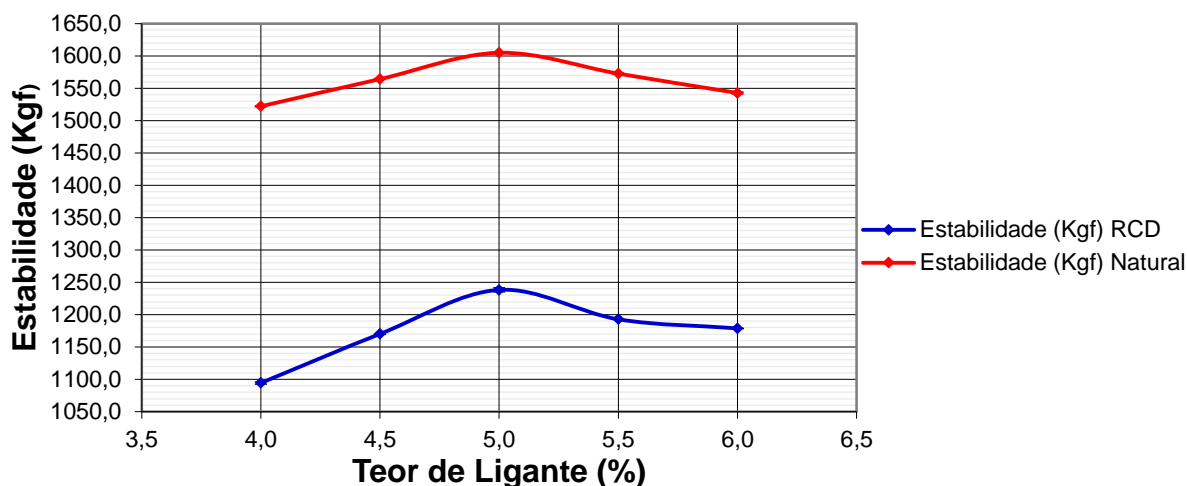


Gráfico 9. Estabilidade (Kgf).

Fonte: Autor, 2017.

O ensaio de estabilidade consiste na aplicação de carga de compressão que faz com que os agregados se desloquem ou quebrem, provocando perda de estabilidade na mistura a medida que a carga aumenta até ser atingida a máxima carga (OLIVEIRA *et al.*, 2014). Observando-se o Gráfico 9, conclui-se que todas as misturas atendem o mínimo de 500 kgf especificado pelo DNIT.

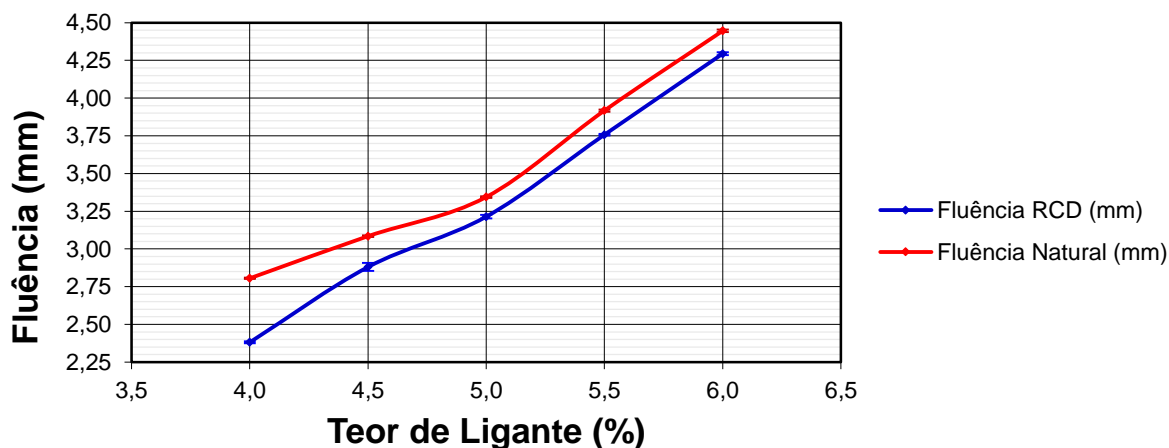


Gráfico 10. Fluência (mm).

Fonte: Autor, 2017.

A fluência é a deformação vertical que o corpo de prova apresenta desde a aplicação da carga de compressão até o momento em que começa a perder estabilidade, logo valores altos indicam uma mistura plástica, que pode sofrer exsudação ou trilhas de rodas, e valores baixos contribuem para a fadiga do pavimento prejudicando a sua durabilidade (SOUZA *et al.*, 2015).

Analisando os resultados obtidos (Gráfico 10), verifica-se que as misturas com agregados reciclados tiveram um comportamento semelhante às misturas com agregado natural indicando valores satisfatórios neste parâmetro. Pode-se observar também, que a fluência aumenta com o aumento do teor de ligante tornando a mistura mais suscetível a exsudação ou trilhas de rodas.

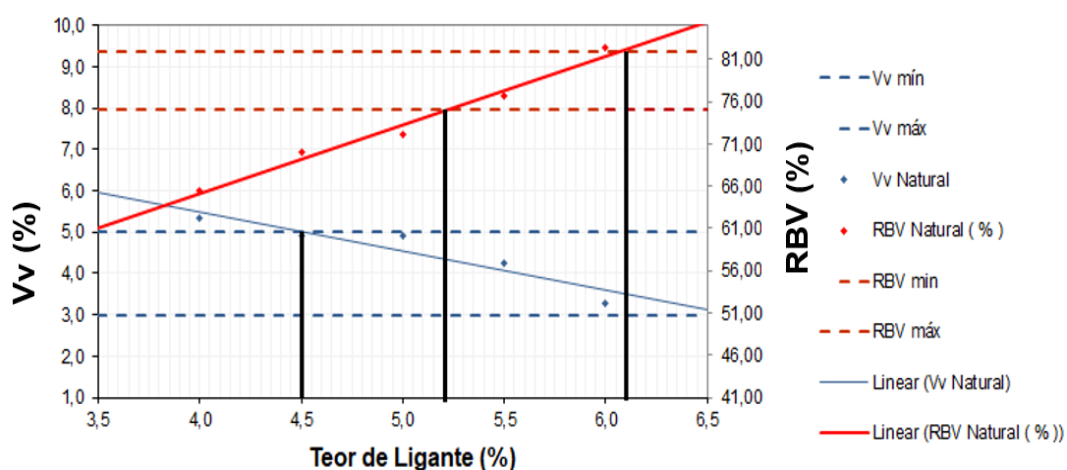


Gráfico 11. Determinação do teor ótimo de ligante para as misturas com 100% de agregado natural.

Fonte: Autor, 2017.

O teor ótimo de projeto foi encontrado a partir dos parâmetros de Vv e RBV. Com os valores médios encontrados para cada grupo de corpo de prova foram adicionadas linhas de tendência e os limites mínimos e máximos dos parâmetros. A partir da interseção das linhas de tendência com os parâmetros máximos e mínimos foram determinados três teores conforme o Gráfico 11. Os teores determinados foram 4,5; 5,2 e 6,1%. A linha de tendência não atingiu o volume mínimo de vazios, desse modo foram selecionadas as médias entre os valores máximos de RBV e Vv para encontrar o teor ótimo, ou seja, 4,5 e 6,1%. O teor ótimo obtido foi de 5,3%.

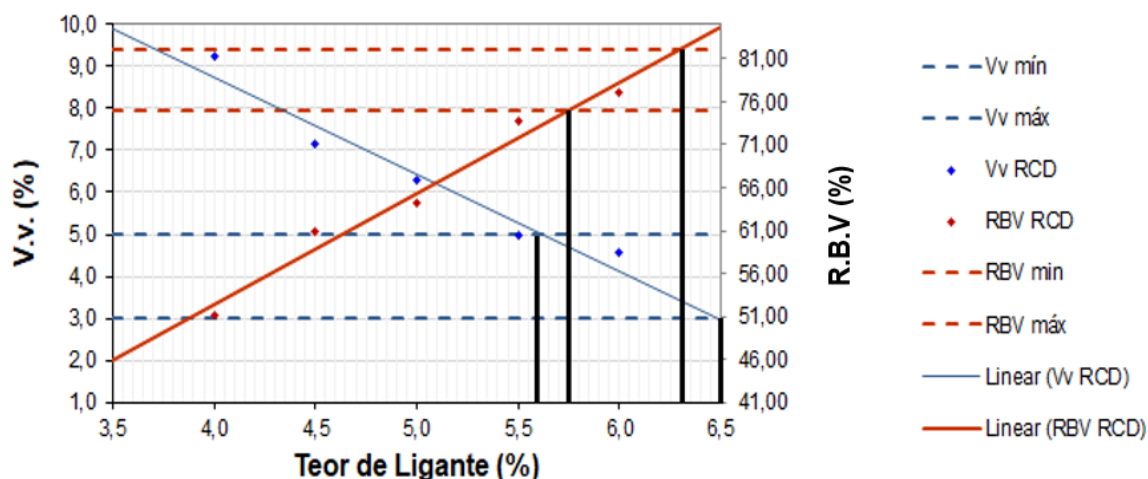


Gráfico 12. Determinação do teor ótimo de ligante para as misturas com agregados reciclados.

Fonte: Autor, 2017.

Para as misturas com agregados reciclados todos os parâmetros máximos e mínimos foram atingidos, sendo assim foram determinados quatro teores: 5,6; 5,8; 6,3 e 6,5% (Gráfico 12). Para determinação do teor ótimo das misturas foram selecionadas as médias entre os valores mínimos de RBV e Vv, ou seja, 5,8 e 6,5 %. Sendo assim, obteve-se o teor ótimo de 6,1%.

O teor ótimo de ligante obtido em ambas as misturas mostrou-se satisfatório e dentro das especificações do DNIT para faixa "C" que é de 4,5 à 9,0%. Segundo Júnior e Rocha (2013), o teor de ligante usual para a faixa escolhida está em torno de 5,0%, o que foi comprovado pelos ensaios que indicam um teor de ligante de 5,3% para as misturas com agregado natural. No entanto, as misturas com agregado reciclado apresentaram um teor de ligante de 6,1%, que é consideravelmente superior e pode impactar economicamente a mistura.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os agregados reciclados apresentaram boa graduação na análise granulométrica, enquadrando-se na faixa “C” do DNIT. Nos parâmetros volumétricos, demonstraram maior porosidade em comparação aos naturais. Em consequência, apresentam baixa densidade aparente e alto índice de vazios consumindo um maior percentual de ligante asfáltico para ficar entre os parâmetros especificados pelo DNIT.

Em relação aos parâmetros mecânicos (estabilidade, resistência a tração diametral e fluência), os resultados obtidos nas misturas com agregados reciclados foram satisfatórios, atendendo as especificações do DNIT e apresentando resultados próximos aos obtidos nas misturas com agregado natural.

De modo geral, as propriedades alcançadas no estudo comprovam a viabilidade técnica dos agregados reciclados para uso em revestimentos asfálticos. A principal característica negativa é a porosidade, que resultou em alto teor de ligante (6,1%) e pode dificultar sua utilização por questões econômicas, pois o ligante é o material de maior custo da composição.

Dessa forma, para trabalhos futuros sugere-se a realização do ensaio de adesividade do agregado ao ligante para verificação da necessidade do uso de aditivos que possam melhorar esta característica do agregado. Também sugere-se a realização do estudo do agregado reciclado para aplicação em outras faixas granulométricas, testando diferentes tipos de CAP para tentar obter teores menores do mesmo. Além de estudar o custo/benefício da substituição do agregado natural pelo reciclado, considerando a questão da sustentabilidade.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAL/S. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em <<http://licenciadorambiental.com.br/wp-content/uploads/2015/01/NBR-15.113-RCC-e-Res%C3%ADduos-Inertes.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114**: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/45993238/NBR-15114-Residuos-solidos-da-construcao-civil-Areas-de>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<http://www.areiavitoria.com.br/download/NBR%2015115.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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. Disponível em: <<http://www.portofeliz.sp.gov.br/cmsBusiness/upload/translin/4c8a10f4a2709f403fded9d9b33f4000.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos (2007).

BERNUCCI, L. B.; Motta, L. M.; Ceratti, J. A.; Soares, J. B. **Pavimentação Asfáltica**: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABeda(2008).

BRASILEIRO, L. L. **Utilização de agregados reciclados provenientes de RCD em substituição ao agregado natural no concreto asfáltico**. Disponível em: <<http://www.leg.ufpi.br/subsiteFiles/materiais/arquivos/files/DISSERTACAO%20-%20Luzana.pdf>>. Acesso em: 16 de jun. 2017.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Anuário CNT do transporte 2017**. Disponível em: <<http://anuariodotransporte.cnt.org.br/>>. Acesso em: 10 out. 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 307, de 05 de Julho de 2002**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

CURITIBA. **Decreto nº 1068, de 18 de Novembro de 2004**. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/pr/c/curitiba/decreto/2004/106/1068/decreto-n-1068-2004-institui-o-regulamento-do-plano-integrado-de-gerenciamento-de-residuos-da-construcao-civil-do-municipio-de-curitiba-e-altera-disposicoes-do-decreto-n-1120-97-2004-11-18.html>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

D'ANTONA, D. M. G.; FROTA, C. A. Da. **Estudo de Misturas Asfálticas com Ligante Modificado pelo Polímero EVA para Pavimentos Urbanos de Manaus – AM**. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/po/2011nahead/AOP_0531.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-083/98: Agregados – análise granulométrica**. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me083-98.pdf>>. Acesso em: 02 set. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006: Pavimentos Flexíveis – concreto asfáltico**. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit031_2006_es.pdf>. Acesso em: 02 set. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2017.

GOUVEIA, L. T. de et al. **Considerações Acerca da Absorção de Asfalto pelos Agregados e sua Influência na Suscetibilidade à Umidade**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/267994602_CONSIDERACOES_ACERCA_DA_ABSORCAO_DE_ASFALTO_PELoS_AGREGADOS_E_SUA_INFLUENCIA_NA_SUSCETIBILIDADE_A_UMIDADE>. Acesso em: 29 set. 2017.

GOUVEIA, L. T. de et al. **Influência da energia de compactação no comportamento volumétrico e mecânico de misturas asfálticas**. Disponível em: <<https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/45/34>>. Acesso em: 16 out. 2017.

JOINVILLE. **Lei nº 5.159 de 24 de Dezembro de 2005**. Disponível em: <<https://cm-joinville.jusbrasil.com.br/legislacao/500155/lei-5159-05>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

JÚNIOR, M. L. P. C.; ROCHA, P. H. T. **Estudo preliminar de misturas asfálticas à quente utilizadas em obras de pavimentação na região metropolitana de Goiânia.** Disponível em: <https://www.eec.ufg.br/up/140/o/ESTUDO_PRELIMINAR_DE_MISTURAS_ASF%C3%81LTICAS_%C3%80_QUENTE_UTILIZADAS_EM_OBRAS_DE_PAVIMENTA%C3%87%C3%83O_NA_REGI%C3%83O_METROPOLITANA_DE_GOI%C3%82NIA.pdf>. Acesso em: 01 out. 2017.

LOURENÇO, V. M. de Q.; CAVALCANTE, E. H. **Dosagem de misturas asfálticas do tipo CAUQ utilizando agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Disponível em: <http://www.sinicesp.com.br/44rapv/trabalhos/TrabalhoFinal_215.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2017.

MOTTA, R. dos S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego.** Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-19072006-114729/pt-br.php>>. Acesso em: 16 jun. 2017.

OLIVEIRA, D. D. de O.; ANDRADE, G. S. de A.; LAPERCHE, L. A. **Estudo comparativo de concreto betuminoso usinado a quente com diferentes tipos de ligante na região metropolitana de Goiânia.** Disponível em: <https://www.eec.ufg.br/up/140/o/ESTUDO_COMPARATIVO_DE_CONCRETO_BETUMINOSO_USINADO_A_QUEENTE_COM_DIFERENTES_TIPOS_DE_LIGANTE_NA_REGI%C3%83O_METROPOLITANA_DE_GOI%C3%82NIA.pdf>. Acesso em: 01 out. 2017.

SÃO JOSÉ DO RIO PRETO. **Lei nº 9393, de 20 de Dezembro de 2004.** Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/sp/s/sao-jose-do-rio-preto/lei-ordinaria/2004/939/9393/lei-ordinaria-n-9393-2004-institui-o-sistema-para-a-gestao-sustentavel-de-residuos-da-construcao-civil-e-residuos-volumosos-e-da-outras-providencias>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

SÃO PAULO. **Decreto nº 48.075, de 28 de Dezembro de 2016.** Disponível em: <http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integr_a.asp?alt=29122006D%20480750000>. Acesso em: 10 jun. 2017.

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação: Volume 1.** São Paulo: Pini (2007).

SILVA, C. A. R. da. **Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas.** Disponível em: <<http://www.der.mg.gov.br/images/TrabalhosAcademicoscesar%20augusto%20rodrigues%20silva%20dissertacao%20de%20mestrado.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2017.

SINISTERRA, F. Q. **Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas.** Disponível em: <<http://www.geotecnia.unb.br/downloads/teses/099-2014.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2017.

SOUZA, J. A.; SOUSA, J. M.; KATO, R. B. **Análise do desempenho de Concreto Betuminoso Usinado à Quente com adição de rejeito da mineração do cobre segundo os parâmetros Marshall.** Disponível em: <<http://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/3168>>. Acesso em: 29 set. 2017.

SPECHT, L. P. **Projeto de misturas asfálticas.** Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/236276919/aula8>>. Acesso em: 01 out. 2017. Acesso em: 01 out. 2017.

UMUARAMA. **Lei Complementar nº 276, de 16 de Dezembro de 2010.** Disponível em: <<http://www.umuarama.pr.gov.br/legislacoes/down/2477>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

YIOMASA, F. B. M. **Utilização de agregados reciclados de resíduos da construção civil em camadas de pavimentos de tráfego leve: estudo de caso no município de Americana.** Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4372>>. Acesso em: 16 jun. 2017.