



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA – UNIPAMPA
CENTRO TECNOLÓGICO DE ALEGRETE – CTA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

FELIPE FERNANDES DESCONSI

**REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO ORIUNDO DE SERVIÇOS DE RESTAURAÇÃO
ASFÁLTICA EM SUA FORMA NATURAL E COM ADIÇÕES COMO ALTERNATIVA
DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS**

**ALEGRETE/RS
2014**

FELIPE FERNANDES DESCONSI

**REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO ORIUNDO DE SERVIÇOS DE RESTAURAÇÃO
ASFÁLTICA EM SUA FORMA NATURAL E COM ADIÇÕES COMO ALTERNATIVA
DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para obtenção
do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Me. Magnos Baroni

ALEGRETE/RS

2014

FELIPE FERNANDES DESCONSI

**REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO ORIUNDO DE SERVIÇOS DE RESTAURAÇÃO
ASFÁLTICA EM SUA FORMA NATURAL E COM ADIÇÕES COMO ALTERNATIVA
DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para obtenção
do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso II defendido
e aprovado em: 20 de Agosto de 2014.

Banca examinadora:

Prof. Me. Magnos Baroni
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Me. Jaelson Budny
UNIPAMPA

Prof. Rodrigo Klamt
UNIPAMPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida que possuo e por ter me dado forças para alcançar mais um dos meus objetivos, me tornando um profissional em Engenharia Civil. Ao meu pai e amigo Luiz Fernando, pelo carinho e por ter me mantido todos esses anos em Alegrete. A minha mãe, Ceila Fernades e minha avó Malvina Fernandes por sempre terem me defendido, apoiado e pelo amor incondicional.

Ao meu orientador, professor Magno Baroni, pela amizade e apoio. Por acreditar no meu potencial, me incentivar e por também pela escolha do tema do TCC. Aos professores Jaelson Budny e Rodrigo Klamt pela participação na banca examinadora. Aos colegas e amigos sem os quais este trabalho não teria chegado ao final:

Luiz Fernando Trindade Gomes, por todos esses anos de amizade, os estudos, festas e o tempo gasto em laboratório.

Everton Luis Soares, por ter me auxiliado e me passado conhecimento.

Priscila Rodrigues colaboradora deste trabalho.

Rosiéli e Lisiane as minhas voluntárias de Laboratório.

A todos os funcionários do laboratório especialmente Clayton e Cléber, pelos bons papos e pelo estímulo de continuar lutando contra as adversidades. A todos os professores que contribuíram com a minha formação acadêmica, aos colegas que me enriquecem na convivência diária das aulas.

Ao amigo Philipe Rangel pela força na edição do texto e a toda a minha família pelo apoio. Muito Obrigado.

RESUMO

A malha rodoviária brasileira possui uma extensão com mais de 212.000 Km pavimentados. Estas rodovias possuem uma vida útil de 10 a 20 anos e necessitam de manutenções periódicas. A fresagem de pavimentos asfálticos é uma das técnicas constantemente aplicada no processo de manutenção e restauração do sistema rodoviário. A fresagem consiste na remoção de parte da espessura do revestimento antigo e o material resultante é geralmente descartado, sendo um dos maiores poluentes das obras de manutenção. Existem estudos para a reutilização desse material em obras, como: a camada de rolamento, base e/ou sub-bases. Com este processo de reciclagem fica possível mitigar o impacto causado ao meio ambiente.

Neste contexto este trabalho avaliou o acréscimo à compressão simples do material fresado com aglomerantes para aplicação de base e sub-base de pavimentos. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação e no Laboratório de Materiais de Construção Civil, ambos da Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete. O material fresado é proveniente de um trecho da BR-290 próximo à cidade de Rosário do Sul. Foram moldados corpos de prova cilíndricos com as dimensões 10 x 20 cm para realizar o ensaio de resistência à compressão simples. As adições foram realizadas em diferentes teores. A partir dos resultados definiu a mistura que obteve maior resistência, composta de 80% fresado, 20% pó de pedra, 10% sílica da casca de arroz e 5% cal hidráulica.

Palavras-Chave: Pavimentos flexíveis; Fresagem; Material fresado; Reciclagem.

ABSTRACT

The highway network has an extension of more than 212,000 km paved. These roads have a lifespan of 10 to 20 years and require periodic maintenance. The milling of asphalt pavements is one of the techniques consistently applied in the maintenance and restoration of the road system process. Milling involves the removal of old coating and the resulting material is usually discarded, one of the major pollutants from maintenance works. There are studies to reuse this material works as follows: a layer of bearing base and / or sub-bases. With this process of recycling is possible to mitigate the impact to the environment.

Therefore, this study evaluated the addition to simple compression of the milled material with binders for the application of base and sub-base pavement. The tests were performed at the Laboratory of Geotechnical and Pavement and Materials Laboratory Construction, both the Federal University of Pampa - Campus Alegrete. The milled material is from a stretch of the BR-290 near the city of Rosario do Sul and were molded cylindrical specimens with dimensions 10 x 20 cm to perform the test of compressive strength. The additions were made at different levels. From the results set the mixture with highest resistance, consisting of 80% milled 20% stone powder, 10% of rice hull silica and 5% hydraulic lime.

Palavras-Chave: Flexible pavement; Milling; Milled material; Recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pavimento Rígido.....	20
Figura 2 - Camadas do Pavimento Rígido.....	20
Figura 3 - Camadas do Pavimento Semi-Rígido.....	21
Figura 4 - Camadas do Pavimento Flexível.....	22
Figura 5 - Pavimento Flexível.....	22
Figura 6 - Estrutura do Pavimento Flexível.....	23
Figura 7 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas	24
Figura 8 - Etapa de imprimação/pintura de ligação.	26
Figura 9 - Tambores Fresadores.....	27
Figura 10 - Vista do tambor de uma máquina fresadora	27
Figura 11 - Processo de fresagem à frio	28
Figura 12 - Material depositado à beira da BR-290.....	29
Figura 13 - Esquema de reciclagem a quente em usina.....	31
Figura 14 - Esquema de reciclagem a quente <i>in situ</i>	32
Figura 15 - Reciclagem a quente <i>in situ</i> com central móvel.....	32
Figura 16 - Reciclagem a frio <i>in situ</i> em espessura parcial	34
Figura 17 - Unidade simples de reciclagem.....	35
Figura 18 - Múltipla unidade de reciclagem	35
Figura 19 - Reciclagem a frio <i>in situ</i> em espessura total.....	36
Figura 20 - Reciclagem a frio <i>in situ</i> com emulsão betuminosa	36
Figura 21 - Esquema do processo de reciclagem em central com emulsão betuminosa	37
Figura 22 - Esquema de formação do betume espuma.....	37
Figura 23 - Reciclagem a frio <i>in situ</i> com cimento	38
Figura 24 - Distribuição do pó de pedra e cimento Portland	40
Figura 25 - Passagem da recicladora e compactação inicial da camada reciclada.....	40
Figura 26 - Compactação final da camada reciclada.....	41
Figura 27 - Fresadora.....	42
Figura 28 - Pó de pedra.....	43
Figura 29 – Cal Hidráulica.....	44
Figura 30 – Sílica da Casca de Arroz	45
Figura 31 - Coleta do Material Fresado.....	46

Figura 32 - Série de Peneiras	48
Figura 33 – Curva Granulométrica do Material Fresado e do Pó de pedra	48
Figura 34 - Ensaio Proctor Modificado	50
Figura 35 – Curva de Compactação do Material Fresado com Pó de Pedra	50
Figura 36 – Curva de Compactação do Material Fresado+Pó de Pedra+ 10% Sílica+ 5% Cal ..	51
Figura 37 - Betoneira.....	51
Figura 38 – Moldagem dos Corpos de Prova.....	52
Figura 39 – Identificação dos Corpos de Prova	53
Figura 40 – Pesagem dos Corpos de Prova.....	54
Figura 41 – Medidas dos diâmetros e alturas dos Corpos de Prova.....	55
Figura 42 – Armazenagem dos Corpos de Prova.....	55
Figura 43 – Aguardando Tempo de Cura	56
Figura 44 – Moldes utilizados.....	57
Figura 45 – Compactador Marshall.....	59
Figura 46 – Moldagem dos CPs	60
Figura 47 – Corpos de Prova Submersos.....	61
Figura 48 – Realização de Ensaio de Compressão.....	62
Figura 49 – Resistência à Compressão das Misturas de Material Fresado e Pó de Pedra.....	65
Figura 50 – Tensão x Deformação para 10% SCA+ 5% CAL com as 3 idades de cura.....	66
Figura 51 – Tensão x Deformação para 5% SCA+ 2,5% CAL com as 3 idades de cura.....	67
Figura 52 – Tensão x Deformação para 3% SCA+ 1,5% CAL com as 3 idades de cura.....	67
Figura 53 – Comparação entre umidade moldada e umidade ensaiada.....	68
Figura 54 – Diferença entre umidade moldada e umidade ensaiada.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Granulométrica.....	47
Tabela 2 – CPs com 7 dias de cura.....	63
Tabela 3 – CPs com 14 dias de cura.....	64
Tabela 4 – CPs com 28 dias de cura.....	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Nomenclatura das Misturas.....	54
Quadro 2 - Parâmetros de ensaio e características dos cilindros e soquetes de Compactação.....	58
Quadro 3 - Parâmetros de Ensaio de Compactação.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS

D – diâmetro do corpo de prova

F – carga de ruptura

H – altura do corpo de prova

n. – número

MPa – Megapascal

p. – página

LISTA DE SIGLAS

ARRA – The Asphalt Recycling and Reclaiming Association
BR – Rodovia Federal
CA – Casca de Arroz
CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CAP – Concreto Asfáltico de Petróleo
CP – Corpo de Prova
DER – Departamento de Estradas de Rodagem
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
NBR – Normas Brasileiras Regulamentadoras
RCS – Resistência à Compressão Simples
RS – Rio Grande do Sul
SCA – Sílica da Casca de Arroz
UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

LISTA DE SÍMBOLOS

F – carga de ruptura, kgf.

d – diâmetro do corpo de prova, cm;

h – altura do corpo de prova, cm.

r – raio do corpo de prova, cm.

MPa – MegaPascal

KPa – kiloPascal

Kgf – Kilograma força

cm – centímetro

$^{\circ}C$ – graus Celsius

σ_c – tensão à compressão simples

σ_t – tensão à tração diametral

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivos	16
1.2. Justificativa.....	17
1.3. Organização do Trabalho	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1. Classificação dos Pavimentos	19
2.1.1. Pavimento Rígido	19
2.1.2. Pavimento Semi-rígido	20
2.1.3. Pavimento Flexível	21
2.1.4. Estrutura do Pavimento Flexível	22
2.2. Fresagem.....	26
2.2.1. Reciclagem de Material Fresado.....	28
2.2.2. Vantagens em reutilizar o material fresado	29
2.2.3. Técnicas de Reciclagem de Pavimentos	30
2.2.4. Técnicas de Reciclagem a Quente	31
2.2.5. Reciclagem a quente em usina	31
2.2.6. Reciclagem a quente <i>in situ</i>	32
2.2.7. Técnicas de Reciclagem a Frio	33
2.2.8. Reciclagem a frio em usina	33
2.3. Reciclagem a frio <i>in situ</i>	33
2.3.1. Reciclagem a frio <i>in situ</i> (parcial)	34
2.3.2. Reciclagem a frio <i>in situ</i> (total)	35
2.3.3. Reciclagem a frio com emulsão betuminosa.....	36
2.3.4. Reciclagem a frio com betume-espuma	37
2.3.5. Reciclagem a frio <i>in situ</i> com cimento	38
2.4. Obras realizadas no Brasil com a utilização de material fresado.....	39
3. MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1. Materiais	42
3.1.1. Material Fresado	42
3.1.2. Pó de Pedra.....	43

3.1.3.	Cal Hidráulica	43
3.1.4.	Sílica da Casca de Arroz (SCA)	44
3.1.5.	Água	45
3.2.	Metodologia	45
3.2.1.	Coleta e Preparação do Asfalto Fresado	46
3.3.	Caracterização Granulométrica	47
3.4.	Determinação do Teor de Umidade	49
3.5.	Mistura.....	51
3.5.1.	Fresado+Pó de Pedra	52
3.5.2.	Fresado+Pó de Pedra+Adição de Cal+Adição de Sílica.....	52
3.6.	Tempo de Cura.....	53
3.7.	Moldagem dos Corpos de Prova	56
3.7.1.	Corpo de Prova.....	56
3.7.2.	Compactação	57
3.7.3.	Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....	60
4.	RESULTADOS.....	63
4.1.	Resistência à Compressão Simples	63
4.2.	Análise da Umidade das Misturas	68
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
	APÊNDICE.....	75

1.INTRODUÇÃO

O Brasil tem como principal modal o sistema rodoviário, sendo o mais expressivo, tanto para transporte de cargas como o de passageiros, com uma malha rodoviária composta por 1.580.992 quilômetros. Segundo o boletim estatístico da Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2012), 90% da malha pavimentada se encontram sem revestimento sendo apenas 10% constituído por pavimentação, esta podendo ser asfáltica ou de concreto.

Obras de manutenção e recuperação de pavimentos, em particular, são na grande maioria das vezes executadas removendo-se a camada superior da pista de rodagem, que se encontra desgastada e fissurada. O resíduo gerado por sua vez, é descartado ou subutilizado (SACHET, 2008).

Segundo Sachet (2008), a utilização do material fresado da camada superior de rodagem como agregado na execução da base do pavimento, estará não somente ocasionando vantagem econômica, mas também, um grande benefício para a sustentabilidade e preservação ambiental, evitando o descarte deste material em aterros e também a extração de recursos naturais para execução desses serviços. Resta como questão, conhecer a melhor forma de reutilização.

Assim essa pesquisa compreende o estudo do ganho de resistência à compressão simples desse material através de adições de pó de pedra, sílica da casca de arroz e cal hidráulica visando a aplicação alternativa em camadas de bases e sub-bases de pavimentos.

1.1.Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a viabilidade do reaproveitamento de material fresado de pavimentos flexíveis extraídos a frio e melhorados quimicamente com a inclusão de aglomerantes. São realizadas adições de pó de pedra, sílica da casca de arroz e cal. Componentes finos que preencham os vazios, e agentes químicos que aumentem a coesão e a resistência do material, com o intuito de atingir as resistências mínimas estabelecidas em norma para sua utilização em base e sub-base de pavimentos.

Para que esse trabalho possa cumprir com os objetivos determinados, deverá ter seguintes objetivos específicos compreendidos:

- Caracterização física do material fresado e pó de pedra através da curva granulométrica;

- Obter a umidade ótima dos traços de referência através do ensaio Proctor na energia modificada;
- Avaliar a resistência à compressão simples da mistura asfalto fresado e pó de pedra com e sem adições de sílica da casca de arroz e cal para diferentes traços e tempos de cura;
- Verificar quais traços apresentaram a resistência mínima de 2,1 MPa conforme preconizado na norma ES 305 (DNER, 1997).

1.2.Justificativa

A engenharia rodoviária é reconhecida como uma atividade importante para o crescimento socioeconômico de um país, mas inegavelmente produz grandes impactos ambientais, seja consumindo recursos naturais, como também gerando resíduos.

Ao longo da sua vida, um pavimento deverá “produzir” o mínimo volume de resíduos, consumindo também o mínimo de novos recursos naturais, quer os agregados, quer particularmente aqueles que exigem um elevado consumo de energia, como é o caso dos ligantes betuminosos. Por outro lado, os pavimentos rodoviários, pelo enorme volume de materiais que consomem, poderão constituir a solução para a absorção de grandes quantidades de resíduos industriais (MOREIRA; PEREIRA, 2007).

Referente a este assunto, está pesquisa aborda o estudo da reutilização do material fresado a frio de revestimentos asfálticos através da adição de pó de pedra, sílica da casca de arroz e cal como alternativa para as camadas de base e sub-base de pavimentos. Objetivando utilizar os resíduos muitas vezes descartados de forma inadequada, colaborando com o aperfeiçoamento da técnica e diminuindo o passivo ambiental causado pela execução de obras rodoviárias ou depósito do material fresado em locais inadequados.

1.3.Organização do Trabalho

Este trabalho se encontra estruturado em seis capítulos. O presente capítulo traz a introdução sobre a pesquisa, à delimitação do tema abordado, as definições de objetivos gerais e específicos, as justificativas e a organização geral.

No Capítulo 2 será visto o conteúdo que deu o embasamento teórico para a elaboração deste trabalho, abordando os seguintes assuntos: classificação, estrutura dos pavimentos, fresagem, reutilização de material fresado, vantagens em reciclar e obras realizadas no Brasil com utilização de material fresado.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados para realização dos ensaios em laboratório. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos durante a pesquisa, a análise e a discussão dos mesmos.

As considerações finais estarão no Capítulo 5, juntamente com as sugestões para trabalhos futuros. Ao final, serão apresentadas no Capítulo 6 todas as bibliografias consultadas e os apêndices.

2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresenta os embasamentos teóricos necessários para a compreensão e desenvolvimento da pesquisa.

2.1.Classificação dos Pavimentos

Pavimento é uma estrutura composta de múltiplas camadas de espessuras finitas, onde cada camada tem sua função estrutural e funcional, localizadas acima da superfície final de terraplenagem, destinadas a receber e resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos e as variações climáticas, devendo proporcionar aos usuários boas condições de deslocamento, segurança, conforto e economia.

De acordo com a NBR-11170 – Serviços de Pavimentação da ABNT (1990) esta define:

O pavimento é uma estrutura constituída sobre o leito natural ou terrapleno de uma via, constituída de uma ou várias camadas, capaz de resistir às tensões geradas pelas cargas dos veículos e pelas variações ambientais, distribuí-las minoradas no subleito, e dar condições de conforto e segurança de rolamento.

A engenharia rodoviária subdivide as estruturas dos pavimentos segundo sua rigidez, assim existe basicamente três tipos de pavimentos: o pavimento rígido, semi-rígido e flexível, que serão vistos nos próximos subitens, onde o pavimento flexível, por ser o foco deste trabalho é abordado de maneira mais detalhada.

2.1.1.Pavimento Rígido

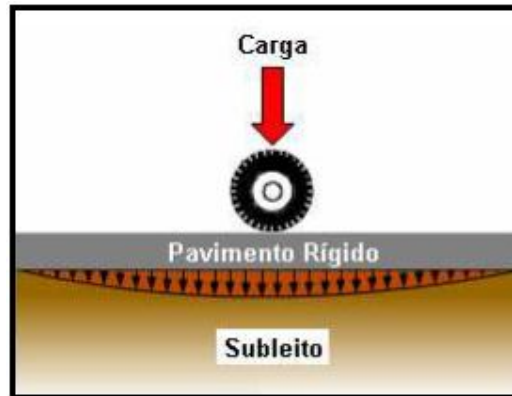
Pavimento rígido, como o próprio nome diz, significa uma estrutura rígida, associado geralmente ao uso de concreto de cimento Portland, sendo composto por uma camada superficial de concreto de cimento Portland (em geral placas, podendo ser armadas ou não), apoiadas sobre uma sub-base e assentadas sobre o subleito ou reforço de subleito se necessário.

O DNIT (2006) define pavimento rígido como:

Aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Exemplo típico: pavimento constituído por lajes de concreto de cimento Portland.

Conforme a definição de pavimento rígido dada pelo DNIT, pode ser visualizada a Figura 1 demonstrando a distribuição de cargas no pavimento.

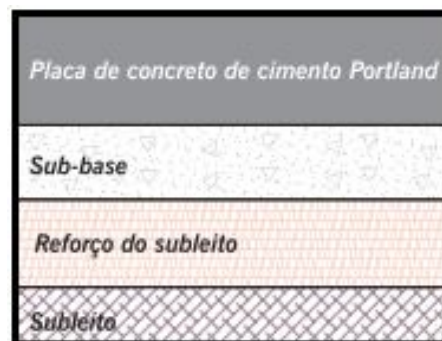
Figura 1 - Pavimento Rígido



Fonte: Bernucci et al. (2008)

Na Figura 2 podem ser visualizadas as camadas constituintes de um pavimento rígido.

Figura 2 – Camadas do Pavimento Rígido



Fonte: Bernucci et al. (2008, p.337)

2.1.2. Pavimento Semi-rígido

Pavimento formado por uma base de material estabilizado com ligante hidráulico e sobre esta, revestimento flexível, como por exemplo, revestimento asfáltico, que trabalhará sobre compressão devido à alta rigidez da camada cimentada.

O DNIT (2006) define pavimento semi-rígido como:

Caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como por exemplo, uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica.

Um dos problemas freqüentes deste tipo de pavimento é a propagação das trincas da base cimentada para o revestimento asfáltico, devido ao processo de retração em

consequência da cura do cimento, causando assim uma redução da rigidez do material e diminuição da durabilidade do pavimento.

Pavimentos semi-rígidos tem comportamento estrutural diferenciado dos pavimentos flexíveis, ocorrendo o trincamento na camada cimentada que apresenta comportamento frágil. Quando a camada cimentada atinge um grau elevado de fissuração, está passa a ter o comportamento de uma base granular, fazendo com que o revestimento asfáltico sofra tensões de tração e levando com que ocorra a propagação das trincas (BALBO, 2007). A Figura 3 mostra o sistema de camadas para um pavimento semi-rígido:

Figura 3 - Camadas do Pavimento Semi-Rígido.



Fonte: Adaptado de Balbo (2007)

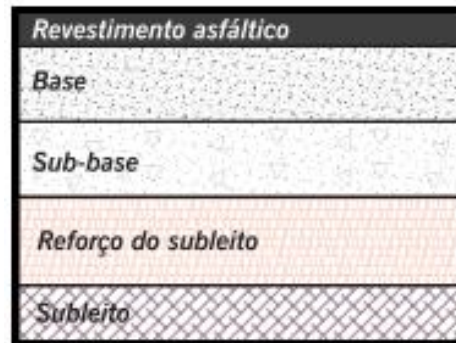
2.1.3. Pavimento Flexível

Pavimento constituído apenas por camadas granulares e/ou asfálticas, tendo características de serem deformáveis, de modo que as tensões atuam de forma mais concentrada nas proximidades do ponto de aplicação da carga. Na Figura 4 é mostrado o sistema de camadas para o pavimento flexível.

O DNIT (2006) define pavimento flexível como:

Aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Exemplo típico: pavimento constituído por uma base de brita (brita graduada, macadame) ou por uma base de solo pedregulho, revestida por uma camada asfáltica.

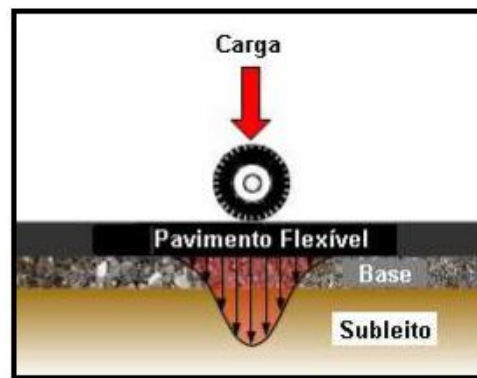
Figura 4 - Camadas do Pavimento Flexível



Fonte: Bernucci et al. (2008, p.338)

A Figura 5 apresenta a distribuição de cargas no pavimento flexível que atua de forma mais concentrada do que no pavimento rígido, pois este se distribui pela superfície rígida.

Figura 5 - Pavimento Flexível

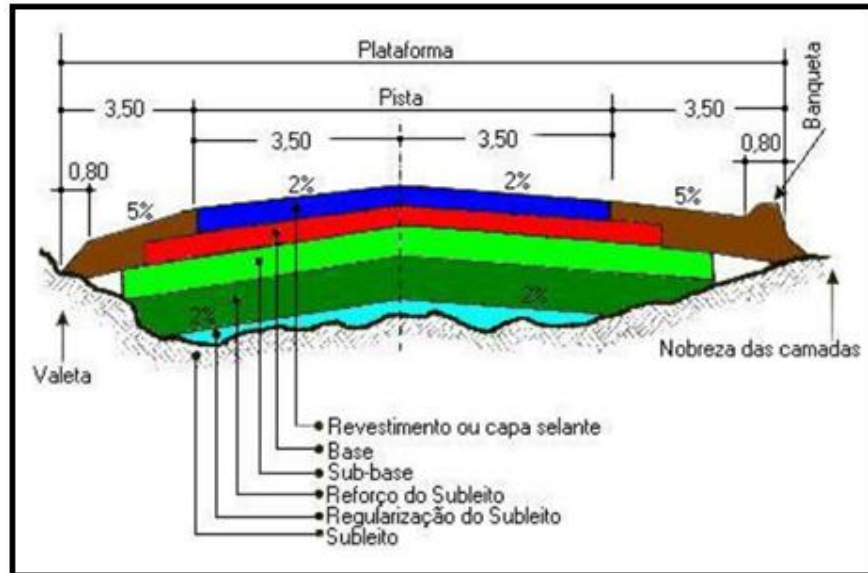


Fonte: Bernucci et al. (2008)

2.1.4. Estrutura do Pavimento Flexível

O pavimento flexível é formado pelas seguintes camadas: revestimento, base, sub-base, reforço de subleito quando necessário e subleito, sendo esse último o próprio terreno natural, servindo de fundação e parte integrante da estrutura (BERNUCCI et al., 2008). Todas essas camadas serão vistas detalhadamente nos próximos itens apresentados. Na Figura 6 pode ser visualizada uma seção transversal típica de um pavimento flexível.

Figura 6 - Estrutura do Pavimento Flexível



Fonte: Adaptado de Senço (2007)

2.1.4.1.Revestimento

Revestimento ou também chamada capa de rolamento é a camada que está diretamente em contato com as cargas e ações climáticas, devendo ser o mais impermeável possível e ter a função de melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de segurança e conforto.

Segundo Senço (2007) o revestimento é considerado a camada mais nobre do pavimento e seu dimensionamento pode ser realizado através de critérios próprios ou também em relação ao volume de tráfego, mas costuma se utilizar espessuras de 3 a 5 cm em vias simples e 7,5 a 10 cm em rodovias.

Por ser construída com materiais de alto custo, principalmente a mistura de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), a camada é subdividida por razões técnicas, construtivas e de custo em “camada de rolamento” e “camada de ligação” (do inglês *binder*), sendo a primeira a camada superficial e a segunda a intermediária entre a camada de rolamento e a base do pavimento (BALBO, 2007).

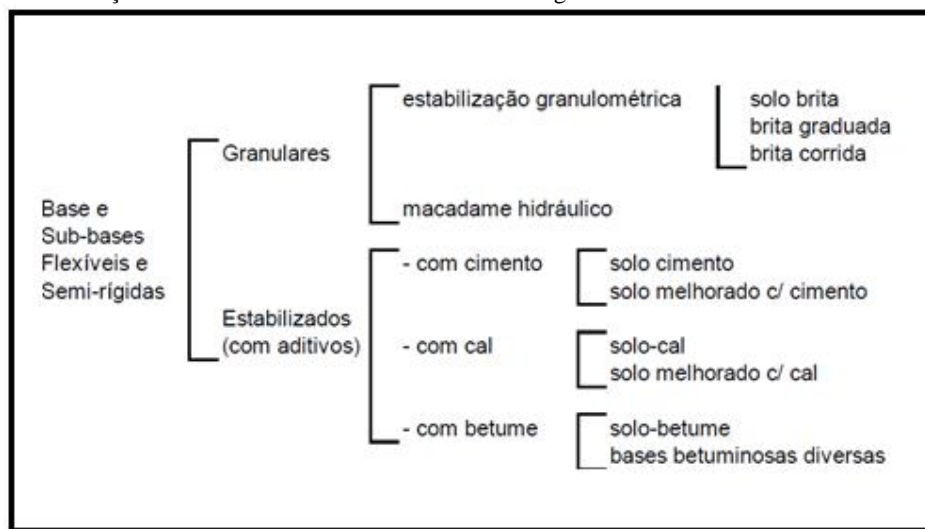
2.1.4.2.Base

A base é a camada sobre a qual se constrói o revestimento, destinada a resistir aos esforços decorrentes das cargas de tráfego, distribuindo-os para as camadas subjacentes. Segundo Hunter (1994) e Coronado (2002), a base é a camada importante do pavimento

flexível, tendo como finalidade distribuir as cargas sofridas na superfície, para não exceder a capacidade de suporte do subleito.

Os materiais utilizados para a camada de base são divididos em granulares (brita corrida, brita graduada, macadame, solo arenoso, solo argiloso, solo brita, agregado reciclado, etc); cimentados (brita graduada tratada com cimento, solo cimento, solo cal, etc); asfálticos (macadame betuminoso, solo betume e concreto asfáltico). A Figura 7 apresenta esquematicamente divisão dos materiais utilizados nas camadas de base e sub-base de pavimentos.

Figura 7 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas



Fonte: Manual de pavimentação DNIT (2006, p.96)

2.1.4.3.Sub-base

A sub-base é a camada complementar à base, utilizada quando a camada de base for muito espessa, assim por razões construtivas e econômicas procura-se dividi-la em duas camadas, criando assim a sub-base, geralmente de menor custo, podendo utilizar os mesmos materiais da base, mas no caso de solos tratados quimicamente, o consumo de aglomerantes será menor (BALBO, 2007).

Além das funções estruturais, a sub-base apresenta outras secundárias:

- Prevenir a entrada ou a presença de água livre no pavimento, geralmente oriundo de infiltrações do subleito na base, levando o pavimento à ruína;

- Proporcionar uma plataforma de trabalho para os equipamentos pesados utilizados na fase de construção do pavimento;

A sub-base deve apresentar: capacidade de suporte, ótima capacidade drenante, estabilidade e reduzida suscetibilidade às variações volumétricas (MATOS; BENKENDORF, 2010).

2.1.4.4. Reforço de Subleito

Camada construída se necessário acima da camada de regularização do subleito, não sendo obrigatória, com propriedades e características superiores a camada de regularização, mas inferiores a camada de sub-base que se encontra acima da mencionada camada de reforço (NBR 11170, 1990).

Sendo uma camada intermediária, utilizada quando o subleito é formado por solos de baixa resistência, havendo a necessidade de um material de melhor qualidade e menor custo para absorver os esforços sofridos, já que camadas superiores de base e sub-base com espessuras maiores poderiam receber e aliviar os esforços, mas para evitar a utilização de camadas mais espessas e caras, como camadas cimentadas e granulares, utiliza-se como alternativa o reforço de subleito (BALBO, 2007).

2.1.4.5. Subleito

Definido como maciço teoricamente infinito que serve de fundação para um pavimento (NBR 11170, 1990). O subleito será construído com material natural consolidado e compactado, ou por um material transportado e compactado, em caso que necessite de aterro. Os esforços impostos que agirem sobre a sua superfície, serão aliviados em sua profundidade, se dispersando normalmente em seu primeiro metro (SENÇO, 2007).

2.1.4.6. Imprimações das Camadas

Entre as várias camadas mencionadas do pavimento, faz-se necessário a utilização e execução de um filme asfáltico, que é denominado “pintura de ligação”, tendo a função de aderir uma camada à outra impermeabilizando uma camada de solo ou granular antes do lançamento da camada superior (BALBO, 2007).

A NBR 11170/90 define imprimação como sendo:

Camada de material betuminoso aplicada sobre a base com finalidades de conferir certa coesão na parte superior da base, preservar contra a penetração da água e promover a necessária aderência da base com o revestimento.

Para as camadas de revestimento asfáltico sempre é aplicada uma pintura de ligação, usando emulsões asfálticas e as imprimações impermeabilizantes também utilizam emulsões. A Figura 8 apresenta uma etapa de imprimação sendo executada.

Figura 8 - Etapa de imprimação/pintura de ligação.



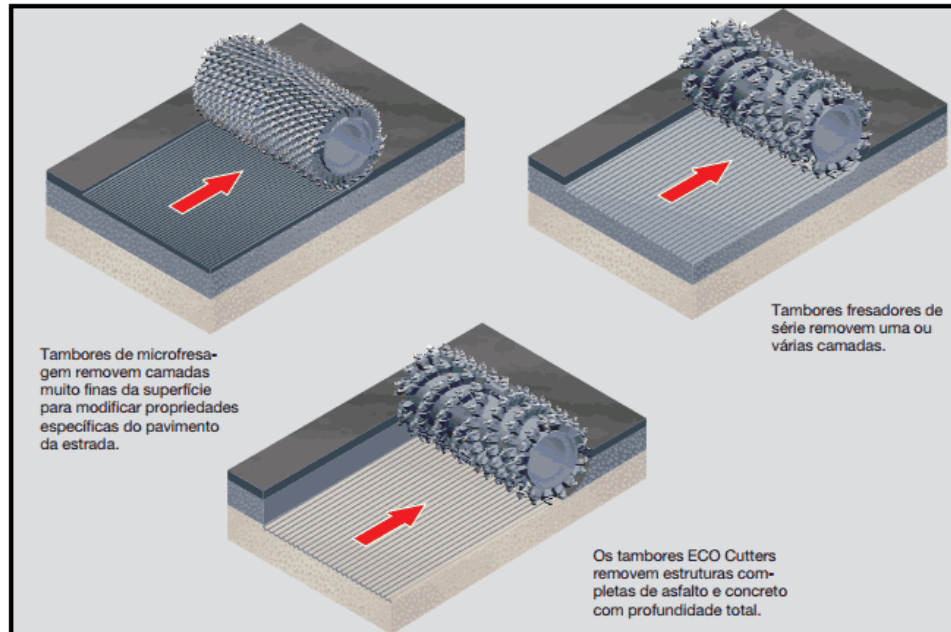
Fonte: SITRAER (2008, p.07)

2.2.Fresagem

A fresagem é uma técnica que consiste no corte ou desbaste mecânico, podendo ser a quente ou a frio, de uma ou mais camadas do pavimento através do movimento rotatório contínuo do tambor de fresagem. Este pode ser aplicado em camadas finas constituídas principalmente por material asfáltico (reciclagem a frio *in situ*), ou em camadas espessas que sejam constituídas, além da camada asfáltica, a camada granular do pavimento, método conhecido como *full depth reclamation* (FDR), como também a simples fresagem do pavimento, dependendo das especificações do equipamento e do tamanho e largura entre os dentes do tambor (WIRTGEN, 2010).

Existem três tipos de fresagem, que são determinados conforme o parâmetro de rugosidade resultante na pista e profundidade, elas são: fresagem padrão, fresagem fina e microfresagem. Os tambores para realização dessas fresagens são mostrados na Figura 9.

Figura 9- Tambores Fresadores



Fonte: Wirtgen (2010)

A pioneira no mercado consiste na fresagem padrão, resultante do cilindro originalmente oferecido nos equipamentos, tendo uma distância lateral entre os dentes de corte de aproximadamente 15 mm, dando uma elevada rugosidade para a superfície resultante e aderência para a camada superior a ela (BONFIM, 2007). O tambor de uma máquina fresadora é visualizado abaixo na Figura 10.

Figura 10 - Vista do tambor de uma máquina fresadora



Fonte: Specht et al. (2012, p.56)

Segundo Arra (1997), o início do processo de fresagem possibilitou a reobtenção dos agregados, mesmo que envoltos por ligante envelhecido, contribuindo assim para sua reutilização, necessitando em muitos casos de correção granulométrica.

A fresadora remove a camada de pavimento mecanicamente, controlando a espessura da camada fresada de acordo com a profundidade desejada, conforme a potência e as especificações do equipamento (ARRA, 1997). O processo pode ser visto na Figura 11:

Figura 11 - Processo de fresagem à frio



Fonte: Specht et al. (2012, p.57)

2.2.1. Reciclagem de Material Fresado

Em 1915 surgiu a ideia de fazer a reciclagem de pavimentos, mas esta não ganhou muita importância e foi pouco difundida até os meados de 1970. Sendo no Brasil, o processo de reciclagem iniciado na década de 80, contemplando apenas o concreto betuminoso usinado à quente reciclado, ou seja, utilizando o material fresado com adição de um novo ligante CAP (SANCHT, 2008).

Isso se dá devido à ideia da consciência ambiental tomada pelo ser humano, percebendo que a reciclagem traz repercussões econômicas e sociais, reutilizando de forma total ou parcial os materiais existentes no revestimento, eliminando a necessidade da exploração de pedreiras ou a execução de aterros de bota-fora, resolvendo um grande problema que é a disposição de materiais em locais de forma inadequada, já que esses locais

se encontram escassos e os existentes em processo de esgotamento (MOTTA, 2005). A Figura 12 apresenta o local da coleta do material fresado utilizado nos ensaios desta pesquisa.

Figura 12 - Material depositado à beira da BR-290



Fonte: Elaboração Própria (2013)

Reciclar pavimentos consiste em retirar os materiais que se encontram na pista em estado de degradação, para efetuar a construção de novas camadas mediante a desagregação dos mesmos. Através de fresagem e adição de algum tipo de ligante (cimento, cal, emulsão, betume), água (para hidratar e realizar a mistura e compactação), utilização de novos agregados (para se fazer a regularização granulométrica) e aditivos, sendo dosados mediante à ensaios realizados, para que o material degradado da rodovia possa ser reutilizado. Essa mistura homogênea de materiais é espalhada, compactada e curada, formando uma nova camada de pavimento (MOREIRA; PEREIRA, 2007).

2.2.2. Vantagens em reutilizar o material fresado

As vantagens da técnica de reciclagem são bem conhecidas do ponto de vista da proteção ambiental, em virtude da menor necessidade da extração de materiais granulares em pedreiras, menor consumo de energia, como também da reutilização de materiais existentes, evitando assim o seu descarte inadequado em bota-fora, etc.

Conforme Moreira e Pereira (2007) reciclando os pavimentos temos como principais vantagens:

- Redução de impactos ambientais, pois não será necessária a colocação de materiais fresados em depósitos de bota-fora, reduzindo assim a produção de resíduos;
- Proteger o meio ambiente;
- Reutilizar materiais de valor econômico residual baixo;
- Redução dos gastos de agregados britados;
- Aumentar a capacidade de carga do pavimento;
- Economia de materiais e de energia;
- Redução da utilização de novos agregados, consequentemente preservando as jazidas existentes;
- Redução dos impactos das obras rodoviárias;
- Manutenção da cota do pavimento existente, já que o material terá que ser fresado e retirado, conservando assim o mesmo greide, após a colocação de uma nova camada de revestimento.

Além de em muitos locais do país já se encontrarem escassos a existência de materiais granulares de boa qualidade para obras rodoviárias, necessitando de transporte por longas distâncias e acarretando maior custo e também maior número de caminhões em circulação na rede de estradas, que acabam prejudicando as outras vias, pois muitas vezes esses se encontram com a carga acima da permitida, assim a técnica de reciclagem não apresenta apenas vantagens econômicas, mas vantagens ambientais, como também evitando o deterioramento das pistas por onde os agregados são transportados, pois através da técnica de reciclagem o material fresado é reutilizado no próprio local ou nas proximidades.

2.2.3. Técnicas de Reciclagem de Pavimentos

Existem diversas técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis. Essas se dividem quanto à mistura e compactação que podem ser a quente ou a frio e ao processamento que pode ser em usina ou *in situ*. Todas essas técnicas serão vistas, dando maior atenção à técnica de reciclagem a frio que corresponde a essa pesquisa, pois apresenta vantagens de não necessitar de aquecimento prévio e todo material fresado é reaproveitado com as adições de pó de pedra, sílica da casca de arroz e cimento Portland para as camadas de base e sub-base dos pavimentos.

Segundo a Associação de reciclagem asfáltica dos Estados Unidos (The Asphalt Recycling and Reclaiming-ARRA, 2009) os métodos de reciclagem podem ser definidos em cinco principais categorias:

- Reciclagem a quente (Hot recycling);
- Reciclagem a quente *in situ* (Hot in-place recycling);
- Reciclagem a frio (Cold recycling);
- Reciclagem a frio *in situ* (Cold in-place recycling);
- Reciclagem Profunda (Full depth reclamation).

2.2.4.Técnicas de Reciclagem a Quente

Método em que o revestimento asfáltico fresado é misturado a quente com agregado virgem, CAP ou agente rejuvenescedor para produzir uma mistura asfáltica reciclada a quente. Esse processo pode ser realizado em usina ou *in situ* (KANDHAL; MALLICK, 1997).

2.2.5.Reciclagem a quente em usina

Ocorre a partir da fresagem do material na pista de rodagem e transporte até a usina. A fresagem geralmente é realizada a frio, na profundidade especificada em projeto e a mistura reciclada é utilizada no revestimento. Neste processo o material fresado pode ser estocado. Após a mistura em usina, essa é transportada até a pista, espalhada e compactada, utilizando os procedimentos convencionais do CBUQ (DAVID, 2006). A Figura 13 mostra o processo de reciclagem a quente em usina.

Figura 13- Esquema de reciclagem a quente em usina



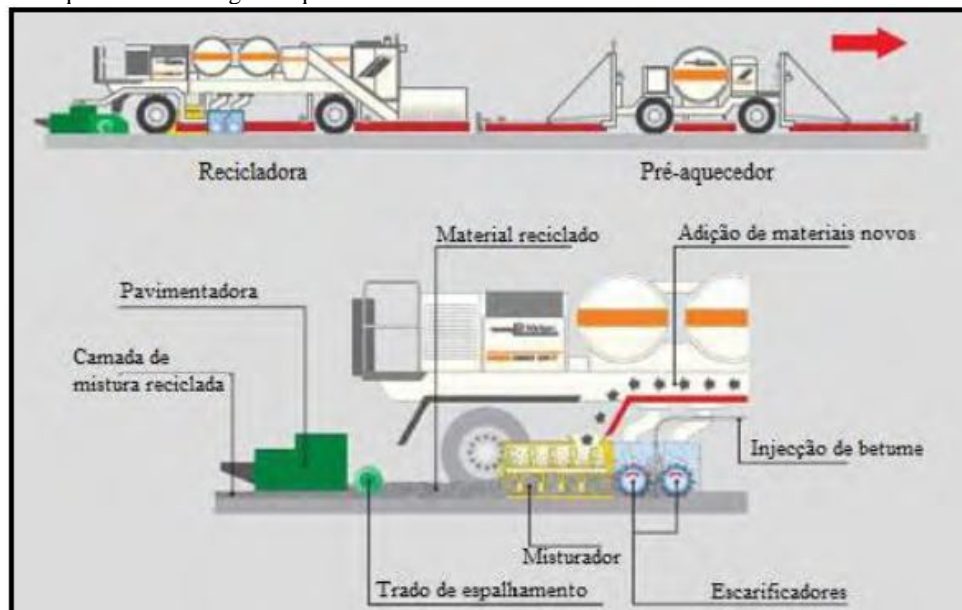
Fonte: Wirtgen (2010)

2.2.6. Reciclagem a quente *in situ*

A reciclagem a quente *in situ* é definida como as operações de remoção e processamento, no local da obra, do material asfáltico e granular do pavimento flexível com a utilização de calor, transformando-o em uma nova mistura asfáltica após a realização da compactação da mistura quente. Essa técnica é utilizada para solucionar problemas decorrentes de defeitos em revestimentos e nesse campo atua com eficiência e economia (SPECHT et al., 2012).

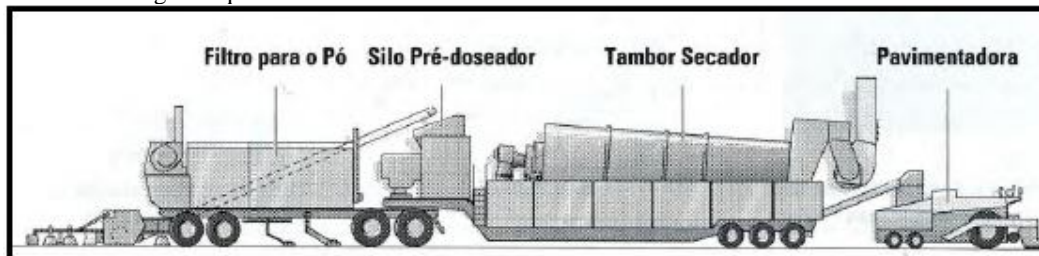
Existem duas variantes desta técnica: uma delas funciona com sistema prévio de aquecimento do pavimento, já a segunda fresa a frio e aquece o material em um tambor secador misturador instalado no próprio trem de reciclagem, adicionando o agente rejuvenescedor (FONSECA, 2002). Os respectivos equipamentos podem ser vistos nas Figuras 14 e 15.

Figura 14- Esquema de reciclagem a quente *in situ*



Fonte: Adaptado de Wirtgen (2003)

Figura 15 - Reciclagem a quente *in situ* com central móvel



Fonte: David (2006)

2.2.7. Técnicas de Reciclagem a Frio

A técnica de reciclagem a frio é definida como o processo em que o material fresado retirado do pavimento é adicionado com algum outro produto aglomerante, como novo ligante, emulsão betuminosa, betume-espuma ou cimento Portland, adicionando ainda agregados virgens (se necessário) para se fazer a correção granulométrica, produzindo assim uma mistura reciclada a frio no local ou em usina. Esse novo material é então utilizado na execução de novas camadas de pavimentos, sendo necessária a aplicação de novas camadas betuminosas, pois os materiais reciclados são aplicados nas camadas de base e/ou sub-base.

As técnicas de reciclagem a frio apresentam claras vantagens econômicas e ambientais, pelo fato do processo não exigir elevado consumo energético e por permitir um aproveitamento significativo dos materiais do pavimento (SANTOS, 2009).

2.2.8. Reciclagem a frio em usina

Usada quando há material fresado estocado, que por algum motivo não foi possível reciclar *in situ*. Esse processo consiste na mistura do material fresado com adição de novo ligante ou agente de reciclagem para produzir a mistura a frio, utilizando-a em base e sub-base (DAVID, 2006).

Conforme Kandhal e Mallick (1997) as usinas mais usadas neste tipo são as usinas de solo, como também usinas gravimétricas e as *drum mixer*. Pinto (2002) cita também as usinas móveis para a produção da mistura reciclada a frio.

2.3. Reciclagem a frio *in situ*

Definida como técnica em que os materiais existentes no pavimento são reutilizados no próprio local, sem a aplicação de aquecimento. Esse processo utiliza máquinas recicladoras que são a evolução das máquinas fresadoras e estabilizadoras de solo, podendo reciclar uma camada espessa de pavimento em uma única passada (DAVID, 2006).

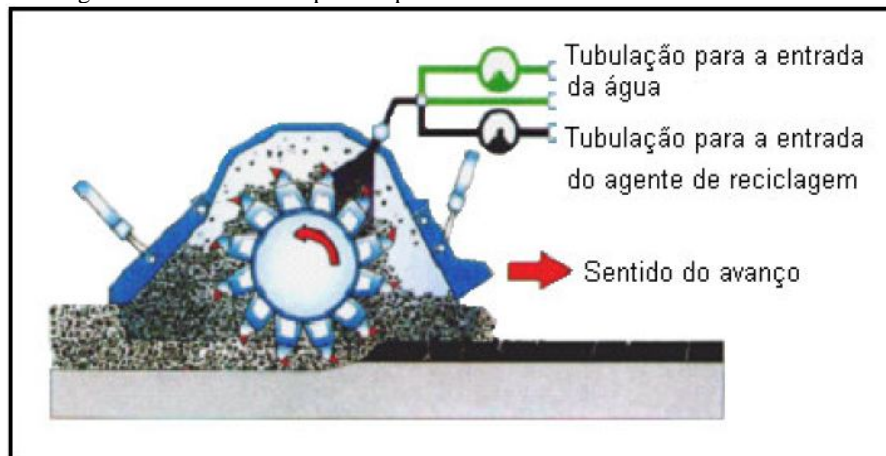
Segundo Kandhal e Mallick (1997), a técnica de reciclagem a frio *in situ* pode ser realizada de duas maneiras: parcial ou total, sendo que na reciclagem total o revestimento e a camada granular são reciclados, já na reciclagem parcial recicla-se apenas o revestimento.

2.3.1. Reciclagem a frio *in situ* (parcial)

Também conhecida por técnica de reciclagem de revestimento asfáltico, é aplicada em pavimentos deteriorados com defeitos encontrados apenas no revestimento, não ocorrendo problemas estruturais de base ou subleito. Essa técnica é destinada a eliminação de problemas superficiais tais como desgaste, irregularidade superficial, trincamento por fadiga e baixa resistência à derrapagem (DAVID, 2006).

O processo é realizado da seguinte forma: a camada asfáltica é fresada sem afetar a base, o material retirado é misturado com agente de reciclagem, se necessário é adicionado agregado virgem, esse é espalhado na pista previamente. Após a mistura é realizado o espalhamento e a compactação, sendo mostrado o processo de reciclagem parcial a frio *in situ* na Figura 16.

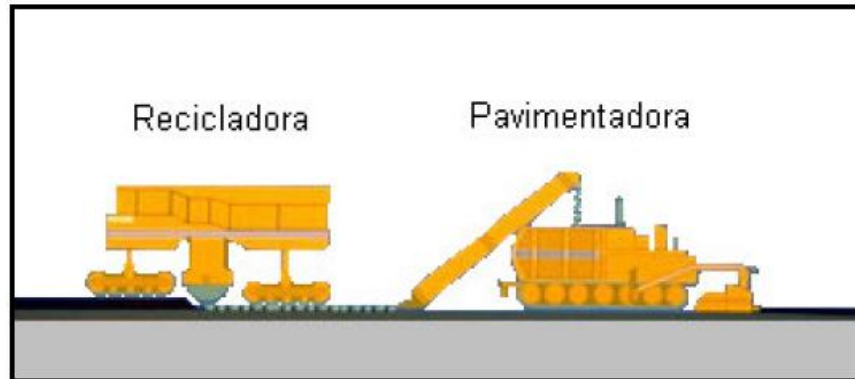
Figura 16 - Reciclagem a frio *in situ* em espessura parcial



Fonte: Wirtgen (2004)

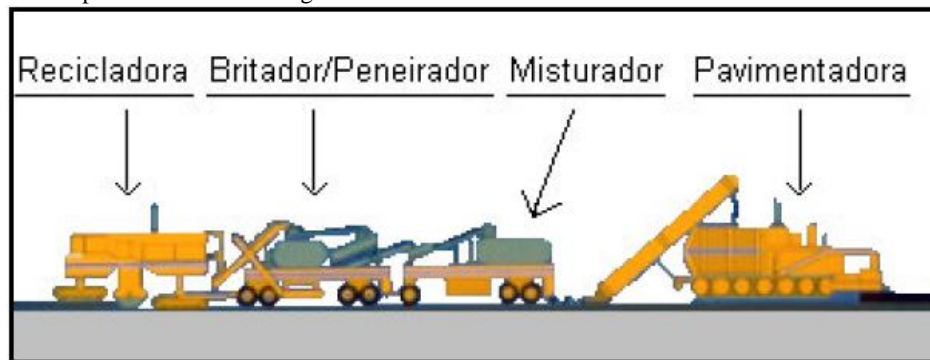
Para que esse processo seja realizado são necessários os seguintes equipamentos, ver Figuras 17 e 18. No primeiro caso é mostrada uma unidade simples, já a unidade múltipla é composta por mais outros dois equipamentos, que são o britador/peneirador e o misturador, esses servem para evitar os grumos de asfalto agregado e assim garantir que as partículas da mistura tenham as dimensões ideais.

Figura 17 - Unidade simples de reciclagem



Fonte: Kandhal e Mallick (1997)

Figura 18 - Múltipla unidade de reciclagem



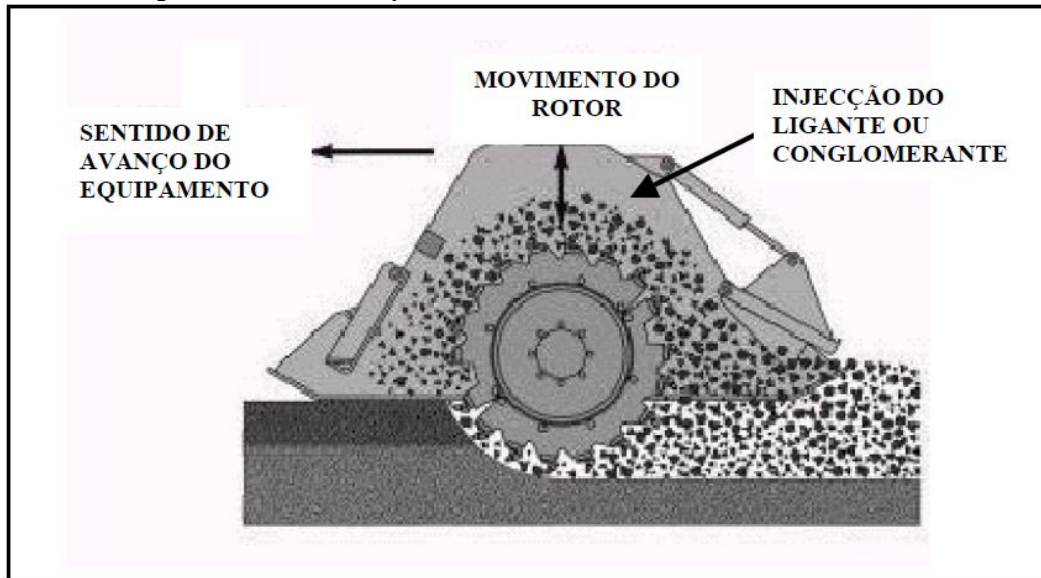
Fonte: Kandhal e Mallick (1997)

2.3.2. Reciclagem a frio *in situ* (total)

Esse tipo de reciclagem tem por objetivo obter uma base estabilizada e é adequada em rodovias em que a base e o revestimento apresentam-se com problemas. Diferentemente da reciclagem parcial, essa atinge profundidades maiores, que envolvem o revestimento asfáltico como também parte da base granular, variando a profundidade de execução de 100 a 300 mm, podendo ser adicionados novos agregados à mistura (DAVID, 2006).

Vários agentes de reciclagem podem ser usados como: emulsão asfáltica, espuma de asfalto, cal hidratada ou cimento Portland, esses serão vistos detalhadamente nos próximos itens, sendo os mais utilizados no Brasil em reciclagens à frio. O processo de reciclagem a frio *in situ* em espessura total pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 - Reciclagem a frio *in situ* em espessura total

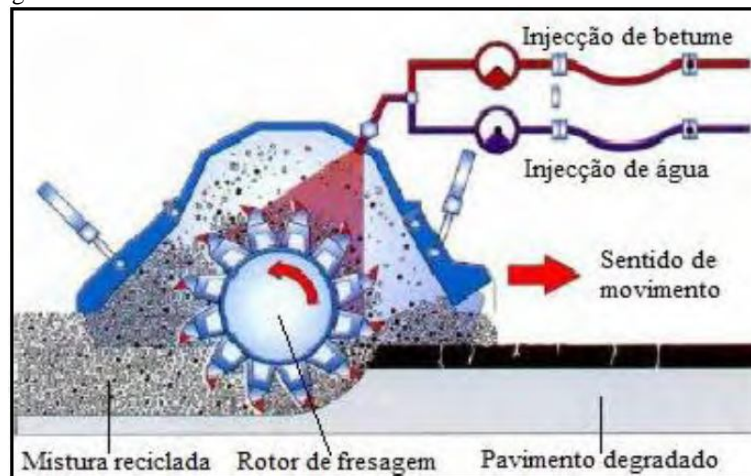


Fonte: Fonseca (2002, p. 5)

2.3.3. Reciclagem a frio com emulsão betuminosa

Esse processo pode ser realizado *in situ* ou em usina, o primeiro citado é semelhante aos outros processos de reciclagem a frio, variando apenas o ligante que é uma emulsão betuminosa formada por água e betume, de cura lenta, necessitando que o tempo esteja seco para ser aplicada (Branco et al., 2005). A Figura 20 mostra como é feita a mistura reciclada com emulsão betuminosa.

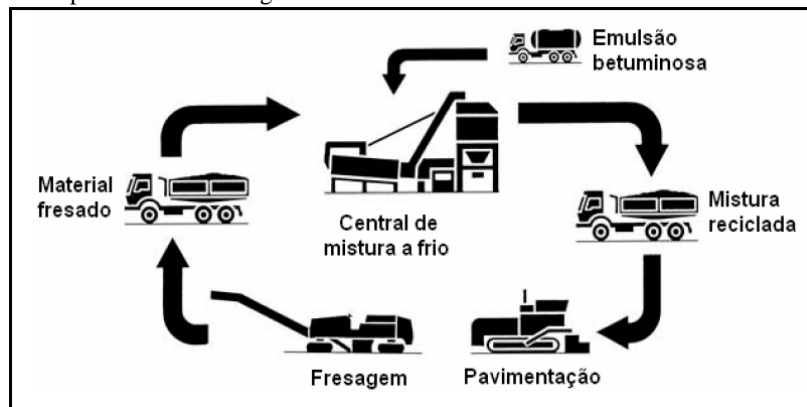
Figura 20 - Reciclagem a frio *in situ* com emulsão betuminosa



Fonte: Adaptado Baptista (2006)

Assim o processo compreende em fresar o pavimento, adicionar os diferentes componentes, como: água, emulsão e agregados (se necessário), misturar esse material, espalhar e compactar. Já a reciclagem em usina necessita do transporte do material fresado até a usina, onde essa é misturada com emulsão betuminosa à temperatura ambiente, como pode ser visto na Figura 21.

Figura 21 - Esquema do processo de reciclagem em central com emulsão betuminosa

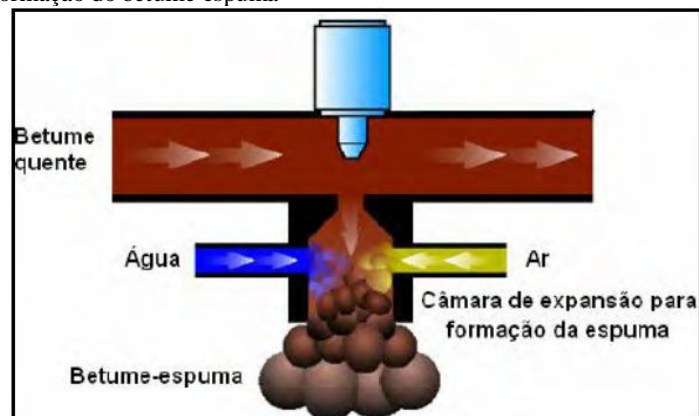


Fonte: Baptista (2006)

2.3.4. Reciclagem a frio com betume-espuma

A espuma de asfalto é obtida por meio da adição de certa quantidade de água e asfalto quente, assim há um aumento do volume e da energia de superfície do asfalto (SPECHT et al., 2012). Abaixo é mostrado como se forma o betume espuma na Figura 22.

Figura 22 - Esquema de formação do betume espuma



Fonte: Baptista (2006)

O processo de reciclagem pode ocorrer de duas formas: em usina ou *in situ*, da mesma forma que a reciclagem a frio com emulsão betuminosa, apenas mudando o ligante que é o betume-espuma (DNER – ES 405/2000).

2.3.5. Reciclagem a frio *in situ* com cimento

Esta técnica consiste num processo de rejuvenescimento/reforço de pavimentos com a reutilização parcial ou total dos materiais constituintes das camadas de misturas betuminosas e materiais granulares, que depois de realizado o processo de fresagem é misturado com cimento, água e eventualmente agregados para fazer a correção granulométrica (SANTOS, 2009). A principal função do cimento é o ganho de resistência (compressão/tração) e a manutenção da durabilidade ao longo do tempo, assim nos projetos de misturas estabilizadas com cimento, diferente das camadas granulares em que o CBR é largamente empregado, esse é realizado segundo os critérios de resistência e durabilidade (SPECHT et al., 2012). No Brasil o critério de dosagem adota uma resistência à compressão simples aos 7 dias de cura, que deve ser superior a 2,1MPa para o caso de bases (DER/PR 11, 2005).

Segundo Santos (2009) essa técnica quando utilizada na reabilitação de pavimentos flexíveis degradados que tenham elevada espessura das camadas granulares, pode constituir uma solução bastante econômica e com vantagens a nível ambiental. Assim o processo de reciclagem a frio *in situ* com cimento em pavimentos flexíveis, pode ser estabelecido da seguinte maneira: fresagem do pavimento deteriorado, espalhamento dos materiais como cimento, água e agregado virgem se necessário, espalhamento, mistura, compactação e cura. A cura é importante para o comportamento da mistura à longo prazo, assim é aplicado uma rega de cura com emulsão de rotura rápida, após à compactação, de modo a evitar a perda de umidade. Na Figura 23, são mostrados os equipamentos utilizados nessa técnica de reciclagem.

Figura 23 - Reciclagem a frio *in situ* com cimento



Fonte: Adaptado Baptista (2006)

2.4. Obras realizadas no Brasil com a utilização de material fresado

No Brasil, a primeira utilização da técnica de reciclagem de revestimentos betuminosos foi realizada na cidade do Rio de Janeiro em 1960, sendo o revestimento removido, transportado para a usina e reciclado. A primeira rodovia a ser reciclada foi a Via Anhanguera, trecho entre São Paulo e Campinas, na década de 1980 (Pinto, 1989).

Na década de 1990, após a chegada das recicladoras móveis iniciou-se a reciclagem a frio *in situ*, pois nos primeiros trabalhos realizados no país ocorreu o emprego de fresadoras de asfalto e posteriormente o uso de recicladoras sobre pneus, assim a operação se desenvolvia no próprio local, com a fresagem a frio do revestimento, incorporação de emulsões rejuvenescedoras, homogeneização e espalhamento feito pelo próprio equipamento. No Brasil, o primeiro trecho em que foi utilizada a técnica de reciclagem à frio *in situ*, foi na rodovia BR-393/ RJ, em novembro de 1993 (Pinto et al., 1994). A partir desse momento, várias obras desse tipo foram realizadas, alguns exemplos de obras que utilizaram misturas recicladas são citados.

A primeira reciclagem com espuma de asfalto foi realizada no estado do Paraná em março de 1998. Os serviços foram executados em um segmento da rodovia BR-277, no trecho compreendido entre Irati e o entroncamento de Prudentópolis (km 245+000 ao km 275+520). Esse segmento da rodovia apresentava um alto grau de deterioração, havendo a necessidade de sua restauração numa extensão de aproximadamente 30 km (LUCAS et al., 2000).

Também foi utilizada a técnica de reciclagem nas obras de restauração da BR 376/PR executada no período de maio a novembro de 2008, nos trechos compreendidos entre os km 342 ao km 462, através da reciclagem profunda com adição de cimento Portland com reaproveitamento dos materiais existentes na pista (capa asfáltica), onde a capa existente foi transformada em base, e a antiga base de solo cimento, preservada, ficou sendo a sub-base. (FRANCO, 2009).

Em 2006 foi iniciada a restauração da rodovia SC 303 trecho BR 282 com extensão 30 km (Joaçaba – Capinzal/SC), sendo inaugurada em novembro de 2007. A reciclagem a frio da SC 303 se constituiu na incorporação do revestimento à camada de base com a adição de 15% agregado virgem e 3% de cimento em peso. O revestimento, com cerca de 6 a 9 cm de espessura foi triturado juntamente com parte da camada de base (cerca de 12 a 15 cm) de tal forma a se obter uma espessura de material reciclado de 20 cm em toda a plataforma. As

principais etapas do processo são descritas a seguir nas Figuras 24, 25 e 26 que ilustram parte do processo executivo da reciclagem. Inicialmente foi distribuído o agregado virgem sobre a pista para se fazer a correção granulométrica da mistura e após a distribuição do cimento.

Figura 24 - Distribuição do pó de pedra e cimento Portland



Fonte: CBR & C (2011, p.06)

Posteriormente a recicladora triturava o revestimento juntamente com parte da camada de base e em seguida era realizado a compactação prévia e a conformação transversal e longitudinal da plataforma com a motoniveladora.

Figura 25- Passagem da recicladora e compactação inicial da camada reciclada



Fonte: CBR & C (2011, p.07)

Após a conformação da plataforma, foi finalizado o processo de compactação empregando-se rolo liso e rolo de pneus. A figura 26 mostra a compactação final da camada reciclada.

Figura 26- Compactação final da camada reciclada



Fonte: CBR & C (2011, p.07)

3.MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo é destinado a descrever todos os materiais que foram utilizados durante os ensaios e apresentar os métodos adotados na elaboração dos mesmos.

3.1. Materiais

Para possibilitar um melhor entendimento sobre a pesquisa, serão descritos os materiais que foram utilizados nos ensaios desse trabalho.

3.1.1. Material Fresado

O material fresado utilizado foi coletado na BR-290, próximo à cidade de Rosário do Sul/RS, durante a etapa de manutenção do pavimento asfáltico, na data de Julho de 2013. Ele foi obtido através do processo de fresagem rasa a frio com espessura de 3 cm sendo constituído por agregado e ligante retirados da camada de revestimento do pavimento composto de Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ) com espessura de aproximadamente 12 cm. A Figura 27 apresenta o equipamento utilizado para a fresagem.

No momento da coleta o material já se encontrava depositado à beira da pista de rodagem, ele foi acondicionado em sacos plásticos e transportado para o laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UNIPAMPA.

Figura 27- Fresadora



Fonte: Elaboração Própria (2014)

3.1.2. Pó de Pedra

O pó de pedra é definido como material fino, proveniente da britagem de rocha, com diâmetro inferior a 8,5mm, (ADRIOLO, 2005). Ele foi inserido nos traços estudados nesta pesquisa com o objetivo de ajudar na estabilização granulométrica do conjunto. O pó de pedra de agregado virgem que foi usado é proveniente da Pedreira Pedra Rosada que possui rocha de origem basáltica, situada na cidade de Alegrete/RS, Figura 28.

Figura 28 - Pó de pedra



Fonte: Elaboração Própria (2014)

Na indústria o pó de pedra pode ser definido como o rejeito proveniente da exploração de pedreiras, representando de 15 a 20% da produção do processo de britagem. Podendo ser chamado por várias denominações como: pó de brita, finos de pedra britada, finos de britagem e etc, sendo pó de pedra a nomenclatura mais utilizada (ALMEIDA, 2006).

3.1.3. Cal Hidráulica

Nesta pesquisa a cal adotada foi a Cal Hidráulica Extra de origem dolomítica encontrada no comércio local, mostrada na Figura 29. Foi optado por esse aglomerante, pois o uso de cal é mais econômico do que o Cimento Portland e tem menor calor de hidratação de forma a minimizar a ocorrência de fendas de retração (SPECHT et al., 2012).

Figura 29 – Cal Hidráulica



Fonte: Elaboração Própria (2014)

3.1.4. Sílica da Casca de Arroz (SCA)

Do processo de beneficiamento de arroz tem-se como resíduo a casca de arroz (CA) de custo praticamente nulo, mas após a queima em fornalhas ou em fornos especiais com temperatura controlada, tem-se a sílica da casca de arroz (SCA), que é um subproduto rico em sílica (DELLA; KUHN; HOTZA, 2001).

A sílica da casca de arroz (SCA) utilizada na pesquisa foi cedida pela empresa de beneficiamento de arroz Pillecco Nobre, sediada na cidade de Alegrete/RS. A empresa utiliza fornos com a temperatura e o tempo de exposição controlado, permitindo assim a extração da sílica e o aumento de sua qualidade.

Este material tem várias aplicações, podendo ser utilizado em cimentos e concretos, pois a sua adição aumenta a resistência e coesão, diminuindo conseqüentemente a permeabilidade do concreto. Assim foi usado esse produto na pesquisa, para reduzir o teor de cal e tornar ainda mais econômico, reutilizando o material asfáltico fresado e a sílica da casca de arroz. Esse pode ser visto na Figura 30.

Figura 30 – Sílica da Casca de Arroz



Fonte: Elaboração Própria (2014)

3.1.5. Água

A água a ser utilizada deve ser limpa e isenta de impurezas, tais como argilas ou matérias húmicas em suspensão, sais minerais em proporções prejudiciais, ácidos, álcalis ou qualquer outra substância que possa prejudicar as características da cal. De um modo geral, as águas potáveis apresentam boas condições para utilização, quando ocorrer à inexistência dessa fonte, sendo necessário empregar água proveniente de poços, rios, etc, cujas características sejam duvidosas deve-se realizar ensaios comparativos de pega e resistência à compressão (DNIT, 2006). Assim nesse trabalho foi utilizada água potável do sistema de abastecimento urbano da cidade de Alegrete/RS.

3.2. Metodologia

Neste item são descritas as etapas que foram executadas para o desenvolvimento desta pesquisa, o estudo considerou apenas o material fresado (sem ativação do ligante), o pó de pedra para a melhoria granulométrica, a sílica da casca de arroz e a cal para a estabilização química.

3.2.1. Coleta e Preparação do Asfalto Fresado

A coleta do material fresado foi realizada, como descrito no item “3.1.1 Material Fresado”, o mesmo foi coletado em depósito próximo à cidade de Rosário do Sul/RS, onde estava sendo executada a manutenção da BR-290, sendo retirado de vários trechos permitindo assim o aumento da diversidade do material e a representatividade da pesquisa.

Teve-se o cuidado de buscar amostras livres de materiais indesejáveis e fazer o peneiramento inicial, passando pela peneira n° #3/4 de abertura 19 mm, pois o material encontrava-se com alguns grumos de asfalto-agregado. A Figura 31 mostra o material sendo coletado.

Figura 31 - Coleta do Material Fresado



Fonte: Elaboração Própria (2014)

A quantidade de material fresado para a execução de todos os ensaios referentes à pesquisa foi de aproximadamente 300 Kg, que foram colocados em sacos de rafia e transportados do local de fresagem até o Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da Universidade Federal do Pampa.

3.2.2. Fracionamento das Amostras

Foram tirados os grumos asfalto-agregado, através da passagem na peneira de abertura inicial de 19 mm, sendo utilizado o quarteamento para garantir a homogeneidade da granulometria das amostras.

3.2.3. Secagem da Amostra

A secagem das amostras foi realizada em estufa, a uma temperatura controlada de 60 °C, na duração mínima de 24 horas (DNER 080,1994). Essa temperatura foi utilizada para se retirar a umidade presente no material fresado, pois o mesmo se encontrava depositado à beira da BR-290, não sendo utilizadas temperaturas mais elevadas, para que não ocorresse a reativação parcial do ligante.

3.3. Caracterização Granulométrica

Para o reconhecimento e identificação dos materiais, foram realizados ensaios de caracterização granulométrica, objetivando enquadrar os traços estudados em uma das 6 faixas de utilização especificadas pelo DNIT, norma 141/2010-ES. A Tabela 1 apresenta as 6 faixas (A, B, C, D, E e F) de bases estabilizadas granulometricamente.

A mistura reciclada apresentou uma granulometria densa e bem graduada, enquadrando-se na faixa granulométrica C da Tabela 1.

Tabela 1 - Composição Granulométrica

Tipos	Para N > 5 X 10 ⁶				Para N < 5 X 10 ⁶		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2*	100	100	-	-	-	-	± 7
1*	-	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8*	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
N° 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	± 5
N° 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
N° 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
N° 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Fonte: DNIT 141 (2010)

Para a execução dos ensaios de granulometria, foi necessário quebrar as amostras e peneirar utilizando as peneiras estipuladas pela norma DNER-ME 080/94 – Solos - Análise granulométrica por peneiramento. A série de peneiras utilizadas está na Figura 32:

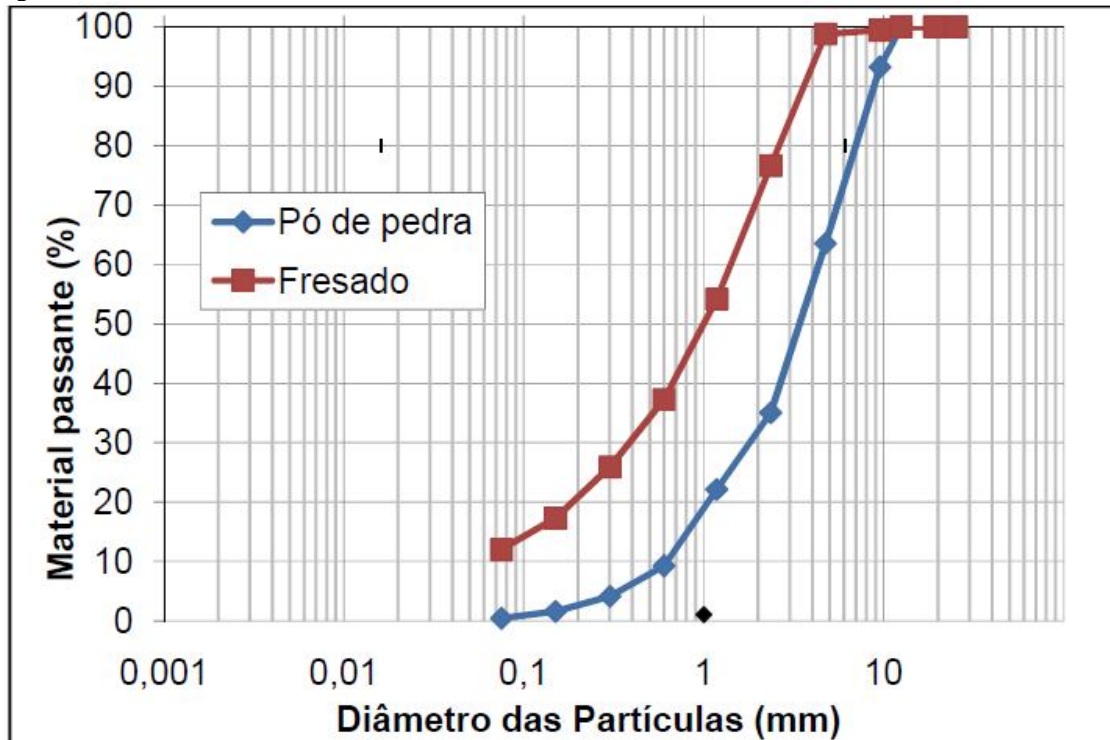
Figura 32 - Série de Peneiras



Fonte: Elaboração Própria (2014)

Para o material fresado e pó de pedra foi obtida a curva granulométrica mostrada na Figura 33. Identificando que o material se encontra na Faixa C determinada pelo DNIT.

Figura 33 – Curva Granulométrica do Material Fresado e do Pó de Pedra



Fonte: Elaboração Própria (2014)

3.4. Determinação do Teor de Umidade

A adição de água foi realizada conforme a curva de umidade ótima. Realizada a partir das preconizações da norma NBR-7182/1982 Ensaio de Compactação Proctor na energia modificada. Foram moldados no mínimo 5 CPs, com umidades diferentes, divididos em cinco camadas, aplicando 55 golpes em cada camada, com energia de compactação modificada. Na Figura 34 pode ser visualizada a realização dos ensaios e na Figura 35 o gráfico de umidade ótima.

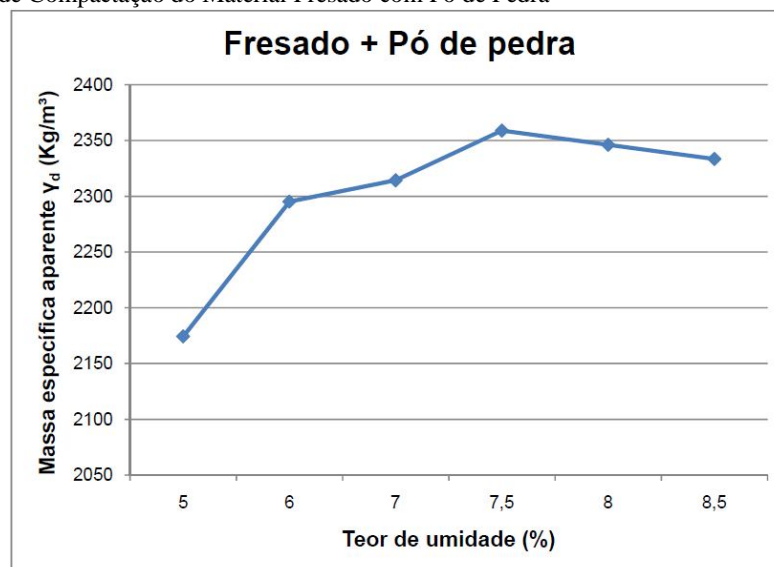
Figura 34- Ensaio Proctor Modificado



Fonte: Elaboração Própria (2014)

Obteve-se através do ensaio de compactação para a mistura de 80% material fresado e 20% pó de pedra a umidade ótima de 7,5% como pode ser observado na Figura 35.

Figura 35 – Curva de Compactação do Material Fresado com Pó de Pedra

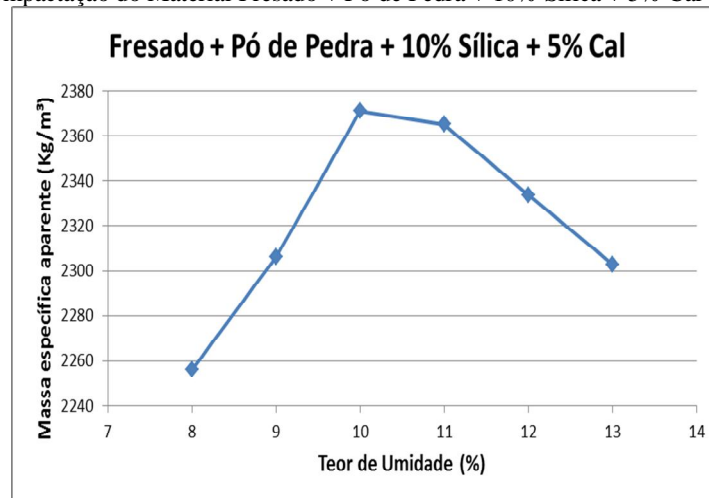


Fonte: Elaboração Própria (2014)

Para a mistura de fresado, pó de pedra, 5% cal e 10% sílica foi obtida a umidade ótima de 10% como visto na Figura 36. Assim como essa mistura era a que apresentava a maior porcentagem de finos, foi adotada a mesma umidade de 10% para as outras misturas que apresentavam menores teores de adições químicas, já que a diferença com o material de

referência composto de fresado e pó de pedra não apresentou muita discrepância em relação a que possuía maior porcentagem de finos.

Figura 36 – Curva de Compactação do Material Fresado + Pó de Pedra + 10% Sílica + 5% Cal



Fonte: Elaboração Própria (2014)

3.5.Mistura

Como ilustrado na Figura 37, para garantir a perfeita homogeneização dos materiais constituintes da mistura fresado, pó de pedra, sílica da casca de arroz, cal hidráulica e água, foi realizada mistura de forma mecânica com auxílio de betoneira. Na Figura 38 também é vista a balança para a pesagem dos materiais e moldagem dos CPs.

Figura 37 - Betoneira



Fonte: Elaboração Própria (2014)

Figura 38 – Moldagem dos Corpos de Prova



Fonte: Elaboração Própria (2014)

3.5.1. Fresado + Pó de Pedra

Essa combinação consistiu em adicionar a mistura 80% material fresado e 20% pó de pedra, para fazer a estabilização granulométrica. Esse ensaio serviu de parâmetro de comparação, para verificar as diferenças de comportamentos para as próximas misturas onde houve adições químicas de cal hidráulica e de sílica da casca de arroz. Para essa mistura foram moldados 12 corpos de prova, para o ensaio de compressão, referentes a 4 CPs para cada uma das três idades de cura, definidas em 7, 14 e 28 dias.

3.5.2. Fresado+ Pó de Pedra+ Adição de Cal+ Adição de Sílica da Casca de Arroz

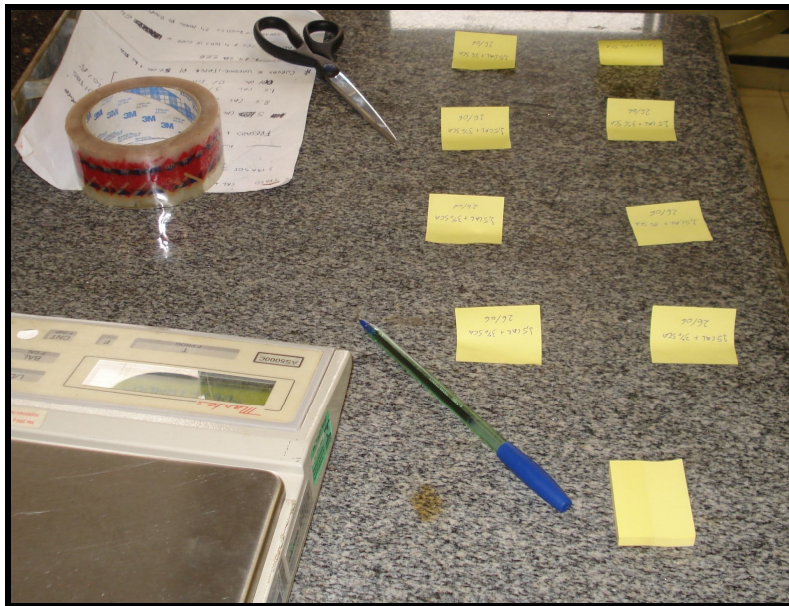
Para essa mistura foram utilizados os mesmos 20% pó de pedra, 80% de material fresado, com a adição de três teores de cal, para cada teor houve uma porcentagem distinta de sílica da casca de arroz adicionada, totalizando 36 corpos de prova moldados com material fresado, pó de pedra, cal e sílica da casca de arroz, sendo 12 CPs para cada teor. Essa mistura visou reduzir o volume de vazios e conseqüentemente a permeabilidade do material, como também aumentar sua resistência. Para identificar o teor que apresente o melhor comportamento e que atenda a resistência mínima de 2,1 MPa especificada na norma ES 305 (DNER, 1997). As misturas foram identificadas da seguinte forma:

- R1 – Mistura de 80% de material fresado e 20% de pó de pedra – F+P (Referência);

- M1 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de pó de pedra, 10% sílica e 5% cal – F+P+Si+C (10%, 5%);
- M2 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de pó de pedra, 5% sílica e 2,5% cal – F+P+Si+C (5%, 2,5%);
- M3 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de pó de pedra, 3% sílica e 1,5% cal – F+P+Si+C (3%, 1,5%);

Na Figura 39, está mostrada a forma como os corpos de prova foram identificados.

Figura 39 – Identificação dos Corpos de Prova



Fonte: Elaboração Própria (2014)

3.6. Tempo de Cura

Após a moldagem, todos os corpos de prova foram identificados, obedecendo as seguintes idades de cura para seu rompimento: 7, 14, 28 dias. O quadro 1 apresenta um resumo com as nomenclaturas adotadas para as misturas, os materiais componentes, bem como suas idades de cura.

Quadro 1 – Nomenclatura das Misturas

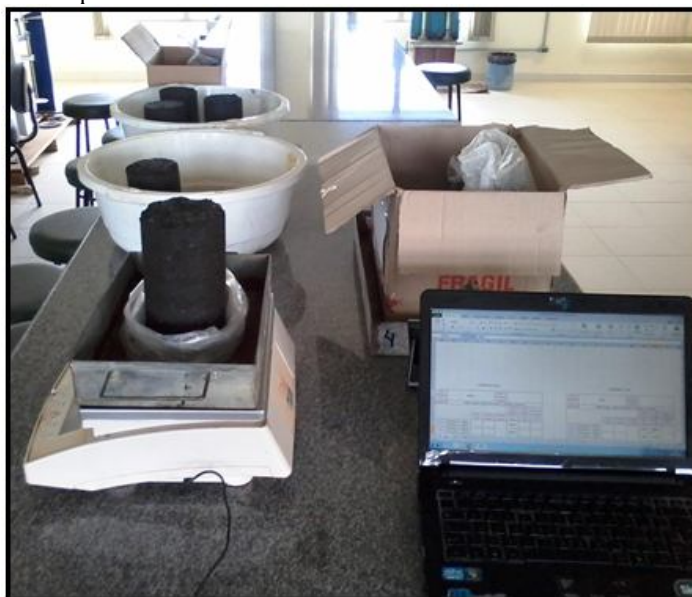
Mistura	Composição	Tempo de Cura
R1	F+P	7 dias
R1	F+P	14 dias
R1	F+P	28 dias
M1	F+P+Si+C (10%, 5%)	7 dias
M1	F+P+Si+C (10%, 5%)	14 dias
M1	F+P+Si+C (10%, 5%)	28 dias
M2	F+P+Si+C (5%, 2,5%)	7 dias
M2	F+P+Si+C (5%, 2,5%)	14 dias
M2	F+P+Si+C (5%, 2,5%)	28 dias
M3	F+P+Si+C (3%, 1,5%)	7 dias
M3	F+P+Si+C (3%, 1,5%)	14 dias
M3	F+P+Si+C (3%, 1,5%)	28 dias

Onde: F= Fresado; P= Pó de Pedra; Si= Sílica; C=Cal

Fonte: Elaboração Própria (2014)

Após 24 horas, os CP's eram desmoldados e medidos (altura e diâmetro) com o auxílio de um paquímetro. Todos foram pesados e embalados a vácuo em sacos plásticos para que mantivessem suas umidades conforme mostrado nas Figuras 40 a 42. Após os CP's foram guardados em caixas de papelão e acondicionadas em ambiente com temperatura controlada de 22°C como visualizado na Figura 43.

Figura 40 – Pesagem dos Corpos de Prova



Fonte: Elaboração Própria (2014)

Figura 41 – Medidas dos diâmetros e alturas dos Corpos de Prova



Fonte: Elaboração Própria (2014)

Figura 42 – Armazenagem dos Corpos de Prova



Fonte: Elaboração Própria (2014)

Figura 43 – Aguardando tempo de cura



Fonte: Elaboração Própria (2014)

3.7.Moldagem dos Corpos de Prova

Neste trabalho foi usado o Equipamento Marshall que simula mesma energia do Proctor Modificado, conforme normatizado pelo DNER ME 107 (DNER, 1994) para misturas betuminosas a frio, com emulsão asfáltica. Foram moldados doze corpos de prova para cada teor, totalizando 48 corpos de prova. Os procedimentos para a moldagem dos CPs estão descritos nos próximos itens.

3.7.1.Corpo de Prova

Foram utilizados os moldes que estão mostrados na Figura 44, com as seguintes dimensões: 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura (10 x 20 cm), conforme a norma DNIT 136 (DNIT, 2010) para os ensaios de resistência a compressão simples (RCS).

Foram rompidos quatro corpos de prova para cada traço e tempo de cura estudado, obtendo assim quatro forças distintas (F_1 , F_2 , F_3 e F_4). O resultado final obtido da força máxima resistente aplicada em cada ensaio foi à média destas quatro forças.

Figura 44 – Moldes utilizados



Fonte: Elaboração Própria (2014)

3.7.2. Compactação

A compactação pode ser definida com a operação que resulta no aumento da massa específica do material (solos, agregados, misturas betuminosas, etc), pela aplicação de impacto, pressão ou vibração, fazendo com que as partículas se aproximem, ocorra expulsão de ar e a redução da quantidade de vazios (DNIT, 2006).

Para esta pesquisa, foi usado o ensaio de compactação referente ao método dinâmico ou por impacto, que é o mais utilizado e tem extrema importância, por causa de sua aplicação em serviços rodoviários no Brasil (SOUZA, 2005). A energia de compactação pode ser expressa através das seguintes relações:

$$E_c = \frac{n.P.H}{V} \times N \quad \dots (1)$$

Onde:

n- número de golpes;

P- peso do soquete;

H- altura de queda;

V- volume de solo compactado;

N- número de camadas.

Nesta pesquisa foi utilizada a energia de compactação modificada, pois se trata apenas de agregados britados com adições aglomerantes, usando assim soquete grande, podendo ser utilizado também cilindro Proctor ou Califórnia, as características e dimensões dos soquetes e cilindros podem ser vistos no Quadro 2.

Quadro 2 - Parâmetros de ensaio e características dos cilindros e soquetes de compactação

Ensaio da AASHTO				
---	<i>Nº de Camadas</i>	<i>Soquete</i>	<i>Nº de Golpes</i>	
Normal	3 camadas	Pequeno	Cilindro Proctor	25
			Cilindro Califórnia	56
Modificado	5 camadas	Grande	Cilindro Proctor	25
			Cilindro Califórnia	56
Características dos cilindros e soquetes (AASHTO)				
<i>Cilindros</i>		<i>Califórnia</i>	<i>Proctor</i>	
Diâmetro interno (cm)		15,24	10,16	
Altura útil (cm)		11,64	11,64	
Volume (cm ³)		2.139,0	944,0	
<i>Soquetes</i>		<i>Grande</i>	<i>Pequeno</i>	
Peso (kg)		4,536	2,495	
Altura de queda (cm)		45,72	30,48	

Fonte: Souza (2005, p.20)

Conforme as normas do DNER (DNER-ME 162/94 amostras trabalhadas e DNER 129/94 amostras não trabalhadas) existem três níveis de energia (normal, intermediária e modificada) que podem ser vistos no Quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros de Ensaio de Compactação

Ensaio do DNER				
<i>Ensaio</i>	<i>Nº de Camadas</i>	<i>Soquete</i>	<i>Nº de Golpes (cilindro CBR)</i>	<i>Energia (kg.cm/cm³)</i>
Normal	5 camadas	Grande	12	5,97
Intermediário	5 camadas	Grande	26	12,93
Modificado	5 camadas	Grande	55	27,35

Fonte: Souza (2005, p.21)

A compactação dos CPs foi realizada com o equipamento Marshall adaptado para os ensaios de compactação do material fresado, pó de pedra, sílica da casca de arroz e cal hidráulica.

Desta forma, para o estudo em questão, a compactação foi adaptada ao equipamento Marshall mantendo a mesma energia de compactação encontrada na metodologia Proctor Modificado. O compactador utilizado nessa pesquisa é o modelo existente no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da Universidade Federal do Pampa, visto na Figura 45.

Figura 45- Compactador Marshall



Fonte: Elaboração Própria (2014)

As misturas eram realizadas com 24 kg de material fresado e 4,8 kg de pó de pedra suficiente para moldar 8 corpos de prova, podendo ser moldados dois corpos de prova por vez e variando a porcentagem de adições químicas e água, dependendo do tipo de mistura. Para a mistura de referência foi utilizado 1,8 litros e as com adições 2 litros. Os CPs eram moldados com a mesma quantidade de material, atingindo a mesma altura, mantendo assim o volume do molde sempre constante, logo garantindo o mesmo grau de compactação. Esta é demonstrada na Figura 46.

Figura 46 – Moldagem dos CPs



Fonte: Elaboração Própria (2014)

3.7.3. Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Os corpos de prova foram colocados submersos em água 24 horas antes da execução do ensaio como mostra a Figura 47, a fim de simular a pior situação de projeto e ensaiados à compressão simples após atingir o tempo de cura especificado, conforme a NBR 5739/1994. A cada mistura, foram moldados no mínimo quatro corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10x20 cm, depois rompidos, o resultado da resistência à compressão simples será a média dos 4 CPs.

Figura 47 – Corpos de Prova submersos



Fonte: Elaboração Própria (2014)

A resistência de compressão simples pode ser obtida através da seguinte fórmula:

$$\sigma_c = \frac{F}{\pi \cdot r^2} \quad \dots(2)$$

Sendo:

σ_c - tensão à compressão simples, MPa;

F - carga de ruptura, kgf;

r - raio do corpo de prova, cm.

Os ensaios ocorreram no Laboratório de Construção Civil da Universidade Federal do Pampa, sendo utilizada uma Máquina Universal de Ensaio da marca EMIC como pode ser observado na Figura 48, com capacidade máxima de 200 KN, modelo DL20.000MF, fornecendo os dados de força máxima de ruptura, tensão e deformação.

Figura 48 – Realização de Ensaio de Compressão



Fonte: Elaboração Própria (2014)

Após os ensaios eram retiradas amostras do CPs, pesadas e colocadas em estufa a 105 °C durante 24 horas a fim de determinar a umidade que se encontravam logo após o ensaio.

4.RESULTADOS

Este capítulo é destinado a demonstrar os resultados obtidos nos ensaios realizados para avaliar quais misturas apresentam maior resistência à compressão, com o objetivo de sua aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos. Os resultados estão mostrados nos próximos itens.

4.1.Resistência à compressão

A RCS (Resistência à compressão Simples) é uma medida bastante utilizada em diversas aplicações de Engenharia Civil, mesmo em casos onde sabidamente os esforços mais importantes não são de compressão, mas têm proporcionalidade a esta medida. No caso de solo cal ou materiais estabilizados para base de pavimento, a medida de CBR, empregada para solos e materiais granulares, foi substituída pela RCS. As Tabelas 2 a 4 apresentam os resultados de RCS das misturas, juntamente com os valores das tensões médias e desvios padrões para os corpos de prova moldados das diferentes misturas com 7, 14 e 28 dias de cura, respectivamente.

Tabela 2 – CPs com 7 dias de cura

7 DIAS							
Mistura	Composição	CP 01	CP 02	CP 03	CP 04	Média (MPa)	Desvio Padrão
R1	F+P	0,15	0,19	0,26	Perdido	0,20	0,05
M1	F+P+Si+C (10%, 5%)	1,14	1,03	1,15	1,10	1,10	0,05
M2	F+P+Si+C (5%, 2,5%)	0,35	0,35	0,41	0,49	0,40	0,06
M3	F+P+Si+C (3%, 1,5%)	Perdido	0,23	0,20	0,26	0,23	0,02

Onde: F=Fresado; P=Pó de Pedra; Si= Sílica da Casca de Arroz; C= Cal Hidráulica.

Fonte: Elaboração Própria (2014)

Analisando a média das tensões na Tabela 2, para os 7 dias de cura o mínimo valor de RCS encontrado foi 0,2 Mpa para a mistura de referência e o máximo 1,1 MPa para a mistura com o maior teor de adições. Comparando a mistura M3 que obteve a mínima resistência com adição com a mistura M1 que se tem o máximo valor de RCS com adições obteve um acréscimo de 378,2%. Nota-se que as misturas R1 e M3 tiveram valores próximos de RCS, tendo também CPs perdidos nas desmoldagens devido sua baixa resistência, sendo as médias composta de 3 CPs.

Tabela 3 – CPs com 14 dias de cura

14 DIAS							
Mistura	Composição	CP 01	CP 02	CP 03	CP 04	Média (MPa)	Desvio Padrão
R1	F+P	0,18	0,19	0,25	0,42	0,21	0,10
M1	F+P+Si+C (10%, 5%)	2,96	2,33	2,84	2,90	2,76	0,25
M2	F+P+Si+C (5%, 2,5%)	0,60	0,70	0,59	0,56	0,61	0,05
M3	F+P+Si+C (3%, 1,5%)	0,17	0,25	0,23	0,16	0,20	0,04

Onde: F= Fresado; P= Pó de Pedra; Si= Sílica da Casca de Arroz; C= Cal Hidráulica.

Fonte: Elaboração Própria (2014)

Observa-se pela Tabela 3, que para os 14 dias de cura a mistura M1 atinge valor superior a 2,1 MPa, obtendo o máximo valor de RCS igual a 2,76 MPa, tendo um acréscimo de 1280% em relação ao mínimo valor de RCS encontrado com adições para a mistura M3 com também os mesmos 14 dias de cura.

Tabela 4 – CPs com 28 dias de cura

28 DIAS							
Mistura	Composição	CP 01	CP 02	CP 03	CP 04	Média (MPa)	Desvio Padrão
R1	F+P	0,17	0,23	0,18	Perdido	0,19	0,03
M1	F+P+Si+C (10%, 5%)	2,44	2,40	3,00	2,77	2,65	0,25
M2	F+P+Si+C (5%, 2,5%)	0,74	0,88	0,75	0,84	0,80	0,06
M3	F+P+Si+C (3%, 1,5%)	0,27	0,19	0,25	0,22	0,23	0,03

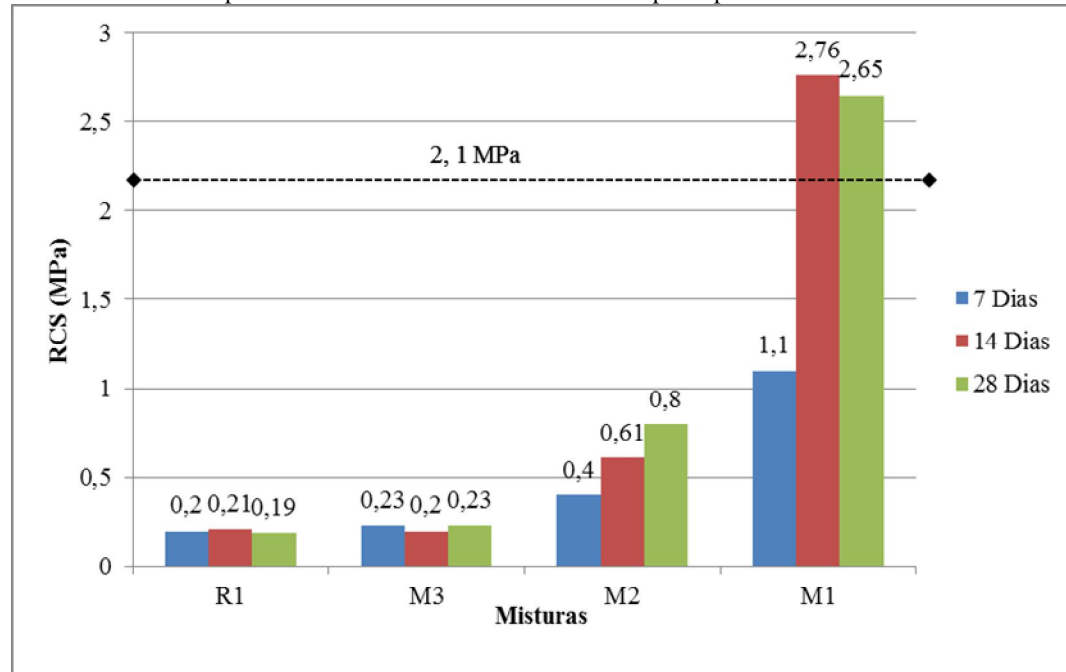
Onde: F= Fresado; P= Pó de Pedra; Si= Sílica da Casca de Arroz; C= Cal Hidráulica.

Fonte: Elaboração Própria (2014)

Para os 28 dias de cura a mistura M1 manteve o maior valor de RCS, demonstrando ser a melhor mistura. Nas tabelas com os resultados das resistências à compressão é mostrado o desvio padrão para os ensaios, verificando que estes foram baixos, tendo pequena variabilidade. Demonstrando a homogeneidade dos corpos de prova e a confiabilidade da pesquisa.

O gráfico da Figura 49 apresenta as comparações dos resultados médios de RCS para as diferentes misturas e tempos de cura.

Figura 49 – Resistência à compressão das misturas de material fresado e pó de pedra



Fonte: Elaboração Própria (2014)

Nota-se que a mistura que apresentou maior valor de resistência à compressão foi à mistura M1, que têm como adição 10% de sílica de casca de arroz e 5% de cal hidráulica, sendo o máximo de resistência encontrado aos 14 dias de cura apresentado o valor de 2,76 MPa, ficando bem acima da resistência de compressão da mistura referência. Percebendo que a mistura M3 com o menor traço de aditivos não apresentou grande diferença em relação ao traço de referência.

A norma ES 305 (DNER, 1997) exige um valor mínimo de resistência aos 7 dias de 2,1 MPa em camadas de base e sub-base de pavimentos e não é recomendado valores muito superiores, para que as camadas do pavimento trabalhem apenas a compressão, não sofrendo ruptura por fadiga. Lembrando que os valores encontrados de RCS nos ensaios não apresentam contenção lateral, o que não simula uma situação real em pista e foram rompidos saturados simulando uma situação de projeto, mesmo sabendo que os valores de RCS seriam menores.

Lovato (2004), em seu trabalho, estudou o comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal cálcica e com cal dolomítica. Para o solo e para as misturas solo-cal nos teores de 3%, 4% e 5%, submetidos a tempos de cura de até 168 dias, foram realizados os ensaios de caracterização física, compactação e compressão simples. Os

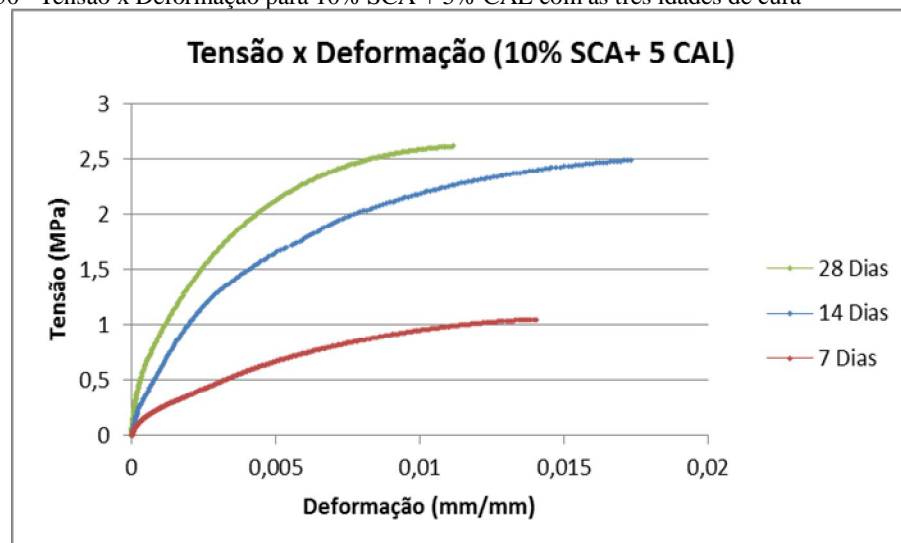
resultados obtidos demonstraram que o solo é reativo à cal, sendo necessário um teor de 3% do aglomerante para sua estabilização. Apresentando uma taxa de ganho de resistência maior de 14 a 28 dias, com aumento contínuo até os 112 dias de cura. Teores abaixo de aglomerantes são muito próximos à referência. Ocorrendo o mesmo caso para a mistura M3 que representa 3% de sílica e apenas 1,5% de cal hidráulica.

Lovato (2004), também observou que para os teores de 3, 5, 7 e 9% de cal, curados por 28 dias a resistência à compressão simples aumentou com o teor de cal. Além disso, as misturas com cal cálcica apresentaram um desempenho superior às misturas com cal dolomítica, com valores de RCS de 28 a 55% superiores.

Assim os CPs não atendem ao valor mínimo de tensão para o tempo de cura de 7 dias, mas segundo (SPECHE et al., 2012) no caso de implantação de uma rodovia e dependendo das condições, é aceitável que ao invés de 7 dias de cura seja considerado 28 dias, quando as reações de cimentação estariam chegando a um patamar de estabilização.

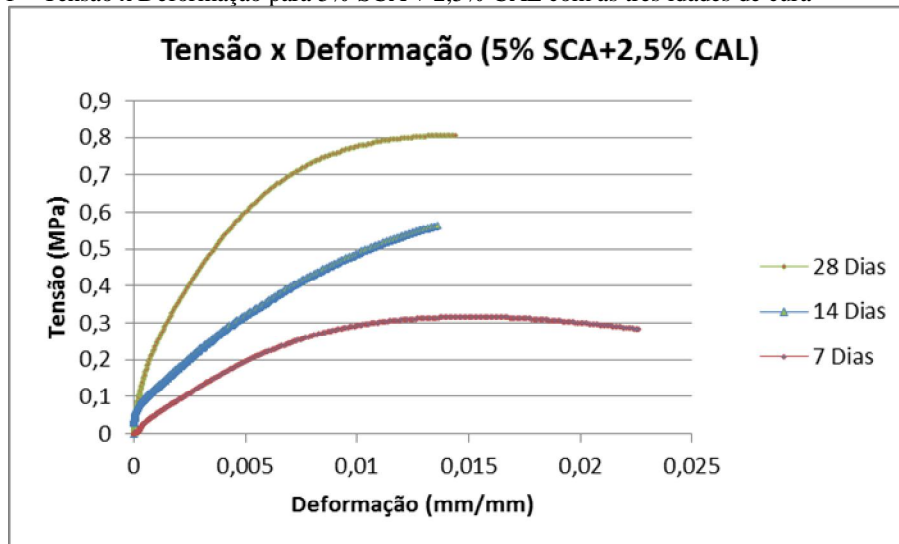
Os gráficos de tensão x deformação para as três idades de cura e as três misturas com adições podem ser vistos nas Figuras 50 a 52. Para a mistura de referência sem adições químicas não foi possível medir a tensão x deformação, devido sua baixa resistência, não podendo prender os anéis com LVDTs que medem as deformações ao corpo de prova, estes são necessários para a realização do ensaio, assim foram ensaiados apenas à compressão simples.

Figura 50– Tensão x Deformação para 10% SCA + 5% CAL com as três idades de cura



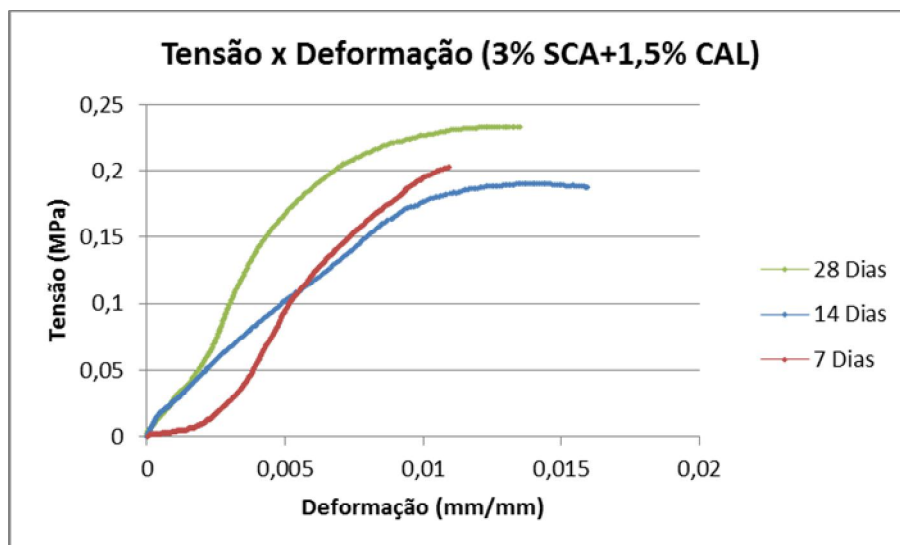
Fonte: Elaboração Própria (2014)

Figura 51 – Tensão x Deformação para 5% SCA + 2,5% CAL com as três idades de cura



Fonte: Elaboração Própria (2014)

Figura 52 – Tensão x Deformação para 3% SCA + 1,5% CAL com as três idades de cura



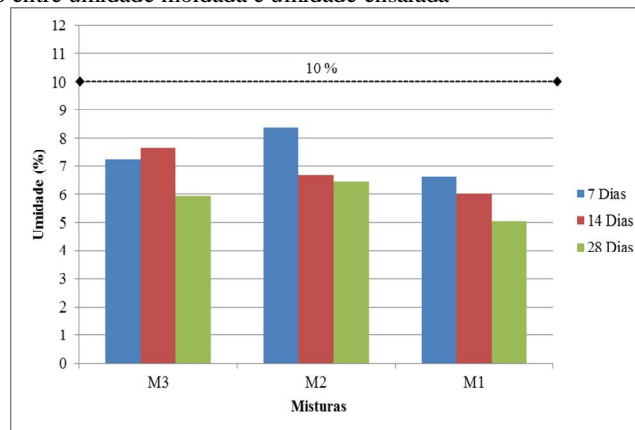
Fonte: Elaboração Própria (2014)

Ambos os gráficos para as misturas M1(10% SCA+ 5%CAL) e M2(5% SCA+ 2,5%CAL) apresentaram um crescimento de RCS para as 3 idades de cura, mas para a mistura M3(3% SCA+ 1,5%CAL) os valores de RCS foram muito próximos nas diferentes idades e também em relação aos valores de RCS da mistura de referência.

4.2. Análise da Umidade das Misturas

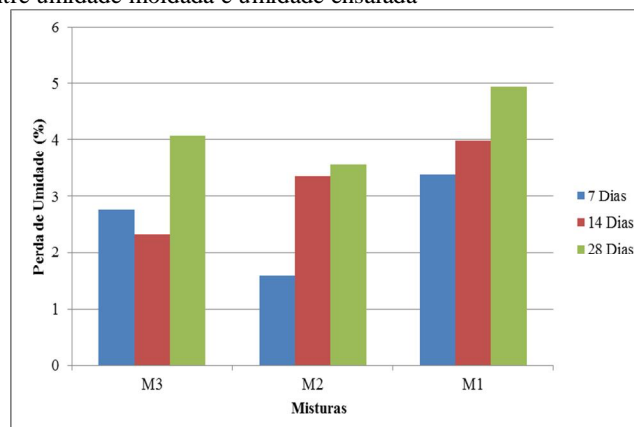
O gráfico da Figura 53 apresenta a comparação entre a umidade que foram moldados os CPs das misturas (10%) e a umidade ensaiada. O gráfico da Figura 54 mostra a perda de umidade dos CPs em relação à umidade moldada, sendo que os corpos de prova para a mistura de referência não foram submersos em água, pois um teste realizado comprovou que não resistiriam à imersão de 24 horas antes da ruptura, não tendo assim as perdas de umidade.

Figura 53 – Comparação entre umidade moldada e umidade ensaiada



Fonte: Elaboração Própria (2014)

Figura 54 – Diferença entre umidade moldada e umidade ensaiada



Fonte: Elaboração Própria (2014)

Pelo gráfico da Figura 54 percebe-se que a maior perda de umidade é de 4,95% para a mistura M1 com o maior teor de finos e na idade de 28 dias de cura. Mostrando que o processo de cura foi bem realizado, pois é necessário que exista uma perda de água, para que as adições reajam.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho, o qual teve como objetivo geral avaliar o efeito de diferentes teores e tempos de cura da cal hidráulica e sílica de casca de arroz na mistura de fresado asfáltico e pó de pedra para a utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos. Com os resultados obtidos nos ensaios realizados e os dados analisados foi possível chegar às seguintes conclusões.

a) Granulometria

A análise granulométrica do material fresado mostrou que o mesmo possui boa distribuição granulométrica para a utilização em base e sub-base de pavimentos, precisando apenas de uma correção de material virgem (pó de pedra) para se enquadrar nas faixas estipuladas.

b) Compactação

A umidade ótima foi determinada para os traços de 80% fresado+20% pó de pedra e 80% fresado+20% pó de pedra+ 10% sílica da casca de arroz+ 5% cal hidráulica, sendo os respectivos valores encontrados 7,5 e 10%.

c) Resistência à compressão Simples

Através do ensaio de resistência à compressão pode se ressaltar que os maiores valores ficaram na mistura M1 de 80% fresado+20% pó de pedra+10% sílica da casca de arroz +5% cal hidráulica, sendo que aos 14 dias atingiu seu máximo valor de 2,76 MPa. O menor valor ficou com a mistura M3 de 80% fresado+20% pó de pedra+3% sílica da casca de arroz +1,5% cal hidráulica com o valor de 0,2 MPa aos 14 dias, apenas acima da mistura referência sem aditivos de 28 dias com 0,19MPa.

Desta forma, suportado pelos resultados laboratoriais apresentados, torna-se importante ressaltar que:

- As técnicas de reciclagem de pavimentos e as experiências apresentadas, aliadas à necessidade de incorporar aspectos ambientais e econômicos aos projetos rodoviários, incentiva e motiva iniciativas de utilização do material fresado como um material de construção nobre e capaz de substituir os materiais tradicionais em diversas camadas do pavimento asfáltico;

- O material fresado estabilizado quimicamente indicou RCS de 2,76 MPa, enquanto que o material fresado referência chegou apenas a 0,19 MPa, sendo que o valor de 2,76 MPa é absolutamente compatível com materiais granulares utilizados em camadas de base e sub base do pavimento.

Como sugestões para trabalhos futuros, para que a mistura seja melhorada e atinja os 2,1 Mpa com menor tempo de cura, para os 7 dias é recomendado se fazer:

- Utilizar os mesmo teores com cal calcítica, sendo essa não encontrada nas rochas do Rio Grande do Sul;
- Aumentar o teor de cal hidráulica;
Recomenda-se também:
- Obter os principais índices físicos como porosidade e índice de vazios para o melhoramento da mistura, aprimorando e procurando reduzir os poros, para que assim aumente a sua resistência à compressão simples;
- Realizar Ensaio de Compressão Triaxial com pressão confinante, para avaliar situação real que ocorre com contenção lateral;
- Realizar Ensaio Rotarex para determinação do teor de ligante e assim determinar a real granulometria do agregado fresado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland, www.abcp.org.br, acessado em 04/09/2013.

ALMEIDA, M.V.V. Influência da substituição de areia natural por pó de pedra no comportamento mecânico, microestrutural e eletroquímico de concretos, 2006. 140 p. Tese (Doutorado), Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

ANDRIOLO, F. R. Usos e abusos do pó de pedra em diversos tipos de concreto. In: Seminário: O uso da fração fina da britagem. II SUFFIB, São Paulo, 2005. Anais...São Paulo, EPUSP, 2005.

ARRA, Asphalt Reclaiming and Recycling Association – Basic Asphalt Recycling Manual. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739- Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto - método de ensaio. Rio de Janeiro. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11170: serviços de pavimentação. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-7182 - Solo - ensaio de compactação - método de ensaio. Rio de Janeiro. 1986.

BALBO, J. T. Pavimentação Asfáltica: materiais projeto, projeto e restauração. São Paulo: oficina de textos, 2007. ISBN 978-85-86238-56-7

BAPTISTA, A. M. C. Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central: Contribuição para seu estudo e aplicação. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra/Portugal, 2006.

BONFIM, V. Fresagem de Pavimentos Asfálticos, 3 ed., São Paulo, Fazendo Arte Editora, 2007.

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS, P.L. Pavimentos Rodoviários. Coimbra: Edições Almedina, 2005.

CNT, Boletim Estatístico. 2012. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Boletim%20Estat%20C3%ADstico/Boletim%20Estatistico%20CNT%20-%20mar_2012.pdf>. Acesso em: 02 set. 2013.

CORONADO, I. J.; Manual Centro Americano para Diseño de Pavimento. Convenio USAID/SIECA N°0596-0184.20. Guatemala, 2002. Disponível em: http://www.sieca.org.gt/Publico/Transporte/Manuales/Vunerabilidad/Manual_normas/Manual_de_Pavimentos.pdf. Acesso em: 04/09/2013.

DAVID, D. Misturas Asfálticas Recicladas a Frio: Estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

DELLA, V.P.; KUHN, I.; HOTZA, D. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. Vol. 24, N° 6. Quim. Nova. Florianópolis, 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). Recebimento e aceitação de cimento Portland comum e Portland de alto forno. DNER-EM 036/95. Rio de Janeiro. 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). Mistura betuminosa a frio, com emulsão-ensaio Marshall. DNER ME 107/94. Rio de Janeiro. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificações de serviço. DNIT 141/2010 – ES. Rio de Janeiro. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). Solos - Análise granulométrica por peneiramento. DNER-ME 080/94. Rio de Janeiro. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas- Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. DNIT 136/2010-ME. Rio de Janeiro. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Pavimentação – reciclagem de pavimentos a frio *in situ* com espuma de asfalto. DNER-ES 405/2000. Rio de Janeiro. 2010.

DNIT, Manual de Pavimentação, Publicação IRP 719/2006.

DNIT, Manual 2006.

FONSECA, P. Reciclagem de pavimentos rodoviários. Escola Superior de tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança. 2002. Disponível em: <http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf> . Acesso em 15 de Setembro de 2013.

HUNTER, R.N.; Bituminous Mixtures in Road Construction. London: Thomas Telford, 1994. [45] IOWA ASPHALT

KANDHAL, P.S.; MALLICK, R.B. FHWA Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Washington, 1997.

LUCAS, PEDRO V. Z.; MORILHA, JUNIOR ARMANDO; MASSARANDUBA, JOSÉ C. M.; SOUZA, FIRMINO S. V., Reciclagem de Pavimento "in situ" com Adição de Espuma de Asfalto - Uma Experiência Pioneira no Paraná. In: Encontro de Asfalto, 150, IBP, Rio de Janeiro, 2000.

MOREIRA, J.P.; PEREIRA, P. Reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimentos- Novas perspectivas. In: JORNADAS LUSO-BRASILEIRAS DE PAVIMENTO, 6., 2007, Porto, Resumos...Minho: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2006 p. 15-35.

MOTTA, R. S. Estudo Laboratorial de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil para Aplicação em Pavimento de Baixo Volume de Tráfego, 2005. 161 p. Dissertação (Mestrado), Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, F.H.L; FERREIRA, E. Correção de patologia em pavimento asfáltico aeroportuário. In: SITRAER, 7. 2008, Rio de Janeiro, Simpósio...Ceará: Universidade Federal do Ceará, 2008. p. 183-192.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros – PETROBRÁS, ABEDA, Rio de Janeiro, 2008.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro, 2002. 380 p.

PINTO, S.; GUARÇONI, D.S.; RAMOS, C.R.; GUERREIRO, F. - Recuperação de Pavimentos através da Reciclagem à Frio “in situ” com a Utilização de Agente Rejuvenescedor Emulsionado - Case Studies. In: International Business Communications - Workshop, Rio de Janeiro, 1994.

PINTO, S. - Tópicos Especiais em Mecânica dos Pavimentos, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1989.

SANCT, T. Reciclagem *in situ* de bases granulares de pavimentos asfálticos. Teoria e Prática na Engenharia Civil, Rio Grande, n 11, p. 31-42, Abril 2008.

SANTOS, A.G.B. Bases Granulares de Agregados Reciclados, 2009. 85p. Dissertação (mestrado), Engenharia Civil. Universidade de Aveiro.

SENÇO, W. Manual de Técnicas de Pavimentação. 2.ed. São Paulo: PINI, 2007. ISBN 978-85-7266-199-7

SPECHT, L.P.; HIRSH, F.; CRONST, F.; TIECKER, E. Reciclagem de Pavimentos: Alternativas de utilização de Material Fresado como camada de Base e Sub-Base- Relatório 02 -Concepa-UFSM, Porto Alegre, 2012.

SOUZA, J. D. O efeito da energia de compactação em propriedades dos solos utilizados na pavimentação de Estado do Ceará, 2005. 211p. Dissertação (mestrado), Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

TRICHÊS, G.; SANTOS, A. Avaliação do desempenho da reciclagem do pavimento da rodovia SC 303. In: 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, Foz do Iguaçu, 2011.

WIRTGEN. Material and Process Procedure Principles for the Hot Recycling. Windhagen, Alemanha, 2003.

WIRTGEN. Manual de reciclagem a frio. 2ª ed. 2004. Wirtgen GmbH. Alemanha.

WIRTGEN. Wirtgen Cold Recycling Manual, 3 ed. Wirtgen GmbH, Windhagen, Alemanha. http://www.wirtgen.de/en/technologien/kaltrecycling/praxisratgeber_1/praxisratgeber_kaltrecycling.html. 2010.

APÊNDICE

Tabelas utilizadas para coletar os dados obtidos durante os ensaios de resistência à compressão simples.

REFERÊNCIA 7 DIAS

Data Moldagem	09/jun			Data Rompimento	16/jun
Mistura R1	80% Fresado + 20% Pó de Pedra				
		Força (KN)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)
CP 1	d (mm)=	101	1,16	0,15	0,2
	h (mm)=	189			
CP 2	d (mm)=	101,6	1,51	0,19	
	h (mm)=	182,7			
CP 3	d (mm)=	101	2,07	0,26	
	h (mm)=	180,6			
CP 4	d (mm)=	PERDIDO			3088
	h (mm)=				

REFERÊNCIA 14 DIAS

Data Moldagem	09/jun			Data Rompimento	23/jun
Mistura R1	80% Fresado + 20% Pó de Pedra				
		Força (KN)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)
CP 5	d (mm)=	100,7	1,38	0,18	0,21
	h (mm)=	182			
CP 6	d (mm)=	100,6	1,53	0,19	
	h (mm)=	184,6			
CP 7	d (mm)=	100,9	1,96	0,25	
	h (mm)=	185,6			
CP 8	d (mm)=	100,85	3,27	0,42	
	h (mm)=	186,2			

REFERÊNCIA 28 DIAS

Data Moldagem	03/jun			Data Rompimento	01/jul
Mistura R1	80% Fresado + 20% Pó de Pedra				
		Força (KN)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)
CP 9	d (mm)=	101,06	1,32	0,17	0,19
	h (mm)=	194,19			
CP 10	d (mm)=	100,82	1,8	0,23	
	h (mm)=	191,38			
CP 11	d (mm)=	100,25	1,38	0,18	
	h (mm)=	192,86			
CP 12	d (mm)=	PERDIDO			-
	h (mm)=				

7 DIAS DE CURA

Data Moldagem	09/jun			Data Rompimento	16/jun			
Mistura M1	80% Fresado + 20% Pó de Pedra + 10% Sílica + 5% Cal							
						Perda de umidade (%)		
		Força (KN)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)			
CP 1	d (mm)=	100,02	8,97	1,14	3072,9	6,474		
	h (mm)=	183,19						
CP 2	d (mm)=	100,39	8,15	1,03			3060	6,954
	h (mm)=	182,23						
CP 3	d (mm)=	100,67	9,14	1,15	3069,3	6,418		
	h (mm)=	182,93						
CP 4	d (mm)=	100,31	8,66	1,10			3079,2	6,639
	h (mm)=	179,54						

14 DIAS DE CURA

Data Moldagem	10/jul			Data Rompimento	24/jul			
Mistura M1	80% Fresado + 20% Pó de Pedra + 10% Sílica + 5% Cal							
						Perda de umidade (%)		
		Força (KN)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)			
CP 5	d (mm)=	100,6	23,48	2,96	3077,6	4,87		
	h (mm)=	181,08						
CP 6	d (mm)=	100,56	18,47	2,33			3074,8	5,23
	h (mm)=	181,12						
CP 7	d (mm)=	100,59	22,56	2,84	3058,5	5,19		
	h (mm)=	180,45						
CP 8	d (mm)=	100,56	23,03	2,90			3057,3	4,91
	h (mm)=	178,63						

28 DIAS DE CURA

Data Moldagem	09/jun			Data Rompimento	07/jul			
Mistura M1	80% Fresado + 20% Pó de Pedra + 10% Sílica + 5% Cal							
						Perda de umidade (%)		
		Força (KN)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)			
CP 9	d (mm)=	100,03	19,14	2,44	3117,4	7,34		
	h (mm)=	190,61						
CP 10	d (mm)=	100,85	19,14	2,40			3048,5	6,79
	h (mm)=	185,67						
CP 11	d (mm)=	100,54	23,83	3,00	3034,7	6,43		
	h (mm)=	184,1						
CP 12	d (mm)=	100,62	21,99	2,77			3044,7	3,54
	h (mm)=	184,41						

7 DIAS DE CURA

Data Moldagem	25/jun					Data Rompimento	02/jul
Mistura M2	80% Fresado + 20% Pó de Pedra + 5% Silica + 2,5% Cal						
						Perda de umidade (%)	
		Força (KN)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)		
CP 1	d (mm)=	100,4	2,8	0,35	0,40	3041,9	8,61
	h (mm)=	184,97					
CP 2	d (mm)=	100,36	2,74	0,35		3061,2	8,48
	h (mm)=	185,28					
CP 3	d (mm)=	100,23	3,25	0,41	3015	9,14	
	h (mm)=	178,82					
CP 4	d (mm)=	100,13	3,84	0,49	3061	7,42	
	h (mm)=	182,32					

14 DIAS DE CURA

Data Moldagem	25/jun					Data Rompimento	09/jul
Mistura M2	80% Fresado + 20% Pó de Pedra + 5% Silica + 2,5% Cal						
						Perda de umidade (%)	
		Força (KN)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)		
CP 5	d (mm)=	100,64	4,78	0,60	0,61	3041,4	10,43
	h (mm)=	179,33					
CP 6	d (mm)=	100,29	5,52	0,70		3066,2	4,95
	h (mm)=	180,86					
CP 7	d (mm)=	100,33	4,66	0,59	3047,7	4,75	
	h (mm)=	180,22					
CP 8	d (mm)=	100,21	4,42	0,56	3041,9	6,51	
	h (mm)=	182,7					

28 DIAS DE CURA

Data Moldagem	26/jun					Data Rompimento	24/jul
Mistura M2	80% Fresado + 20% Pó de Pedra + 5% Silica + 2,5% Cal						
						Perda de umidade (%)	
		Força (KN)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)		
CP 9	d (mm)=	100,57	5,87	0,74	0,80	3053,4	6,25
	h (mm)=	185,78					
CP 10	d (mm)=	100,47	6,96	0,88		3051,6	5,88
	h (mm)=	182,35					
CP 11	d (mm)=	100,6	5,97	0,75	3060	6,95	
	h (mm)=	185,6					
CP 12	d (mm)=	100,59	6,65	0,84	3055,3	6,67	
	h (mm)=	185,66					

7 DIAS DE CURA

Data Moldagem	25/jun			Data Rompimento	02/jul		
Mistura M3	80% Fresado + 20% Pó de Pedra + 3% Sílica + 1,5% Cal						
						Perda de umidade (%)	
		Força (KN)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)		
CP 1	d (mm)=	100,51	perdido	-	0,23	3035,3	7,52
	h (mm)=	182,43					
CP 2	d (mm)=	100,45	1,84	0,23		3025	7,35
	h (mm)=	181,7					
CP 3	d (mm)=	100,91	1,63	0,20	3033,1	7,68	
	h (mm)=	181,78					
CP 4	d (mm)=	100,6	2,06	0,26	3009,3	6,43	
	h (mm)=	181,8					

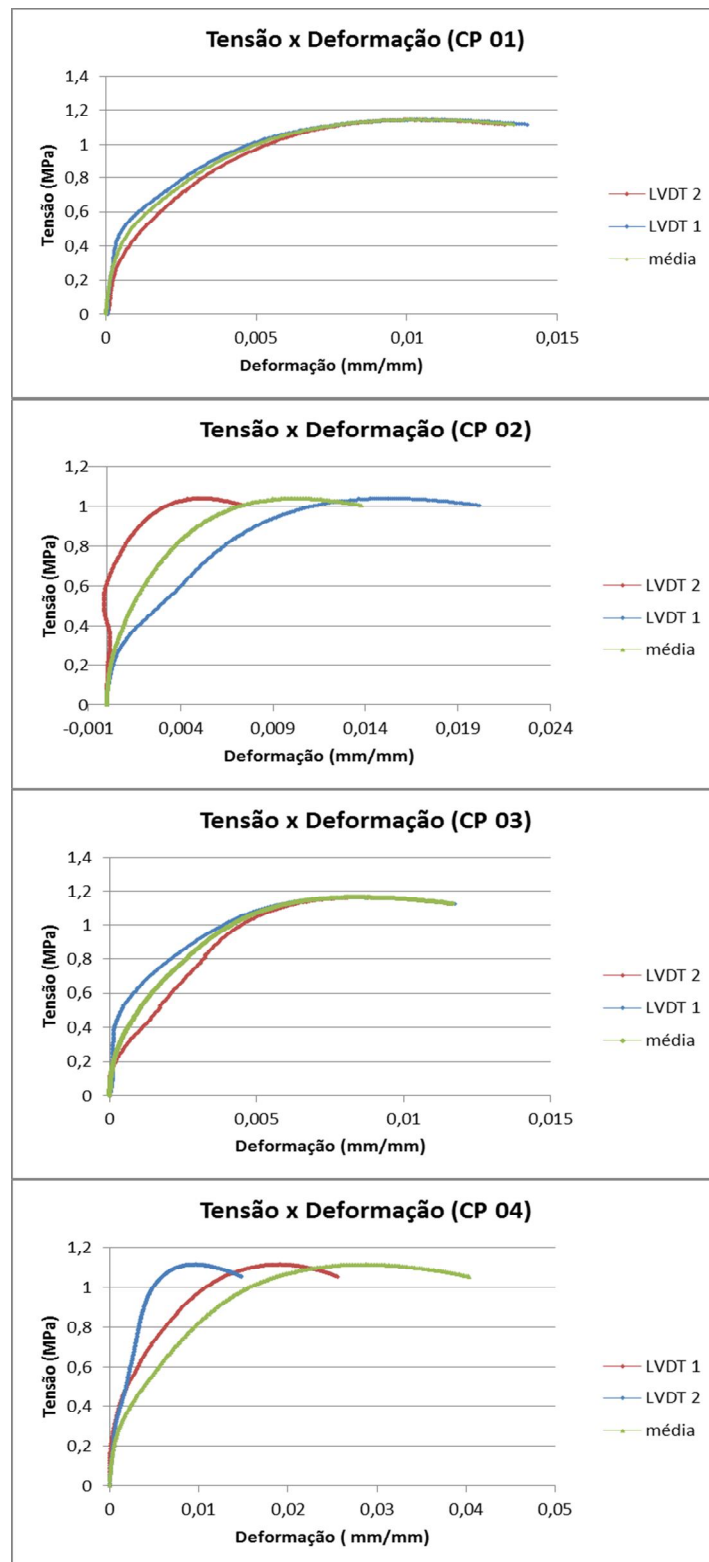
14 DIAS DE CURA

Data Moldagem	25/jun			Data Rompimento	09/jul		
Mistura M3	80% Fresado + 20% Pó de Pedra + 3% Sílica + 1,5% Cal						
						Perda de umidade (%)	
		Força (KN)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)		
CP 5	d (mm)=	100,81	1,34	0,17	0,20	3011,2	5,44
	h (mm)=	188,95					
CP 6	d (mm)=	100,61	1,99	0,25		3017	8,50
	h (mm)=	180,11					
CP 7	d (mm)=	100,55	1,86	0,23	3059,6	7,13	
	h (mm)=	184,64					
CP 8	d (mm)=	100,18	1,26	0,16	3047,5	9,67	
	h (mm)=	184,8					

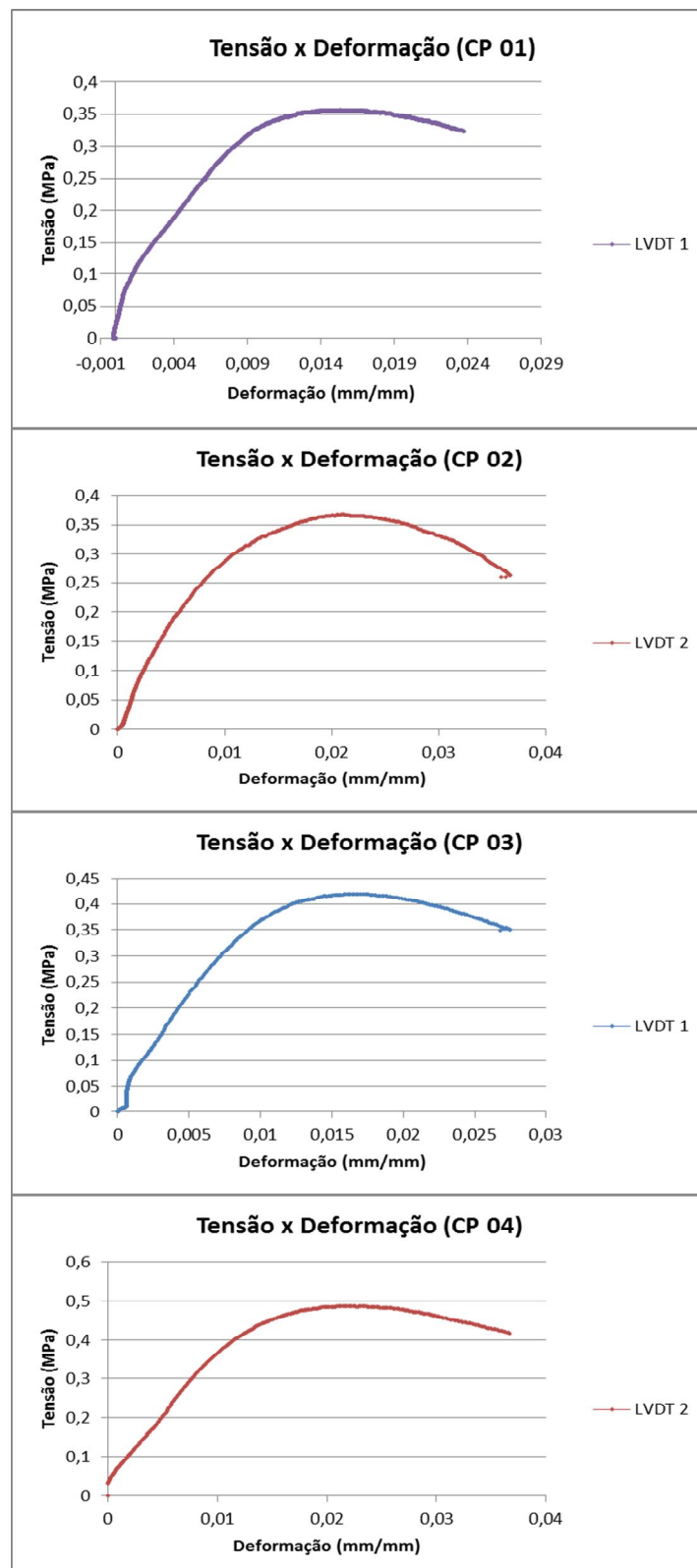
28 DIAS DE CURA

Data Moldagem	26/jun			Data Rompimento	24/jul		
Mistura M3	80% Fresado + 20% Pó de Pedra + 3% Sílica + 1,5% Cal						
						Perda de umidade (%)	
		Força (KN)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)		
CP 9	d (mm)=	100,28	2,17	0,27	0,23	3040,4	5,77
	h (mm)=	184,06					
CP 10	d (mm)=	100,75	1,52	0,19		3009,4	6,03
	h (mm)=	185,14					
CP 11	d (mm)=	100,41	2	0,25	3041,6	5,75	
	h (mm)=	183,77					
CP 12	d (mm)=	100,58	1,75	0,22	3021,6	6,22	
	h (mm)=	184,64					

7 dias de cura: 10% sílica e 5% cal

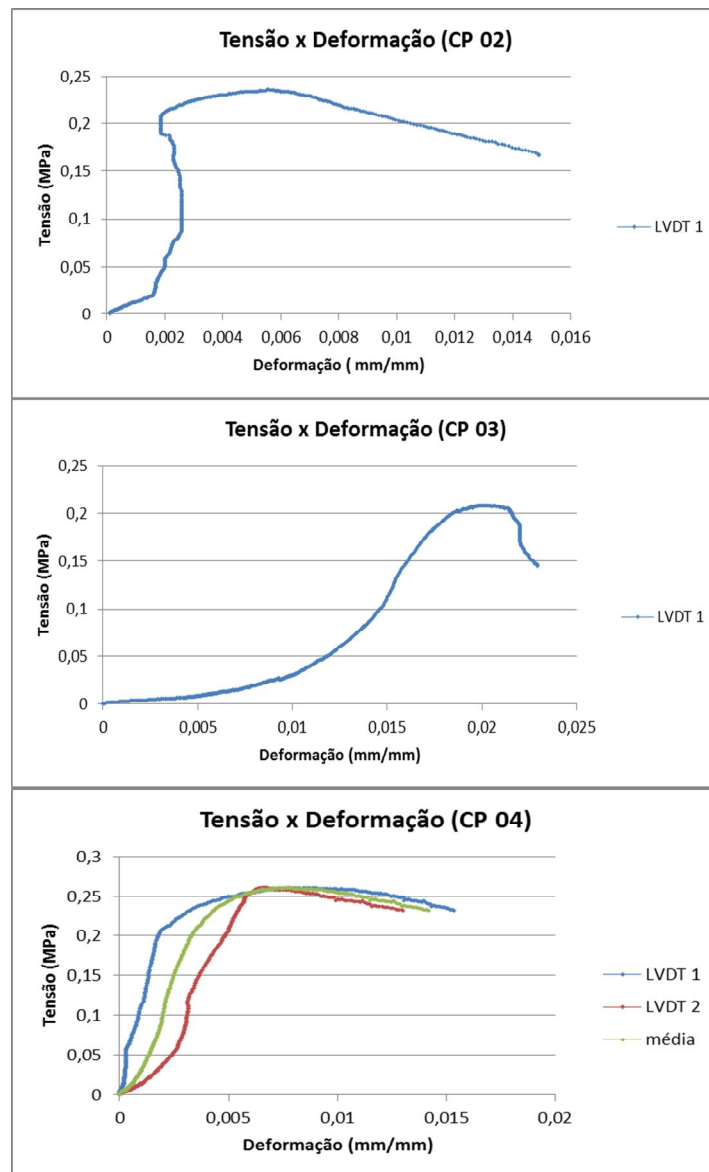


7 dias de cura: 5% silica e 2,5% cal

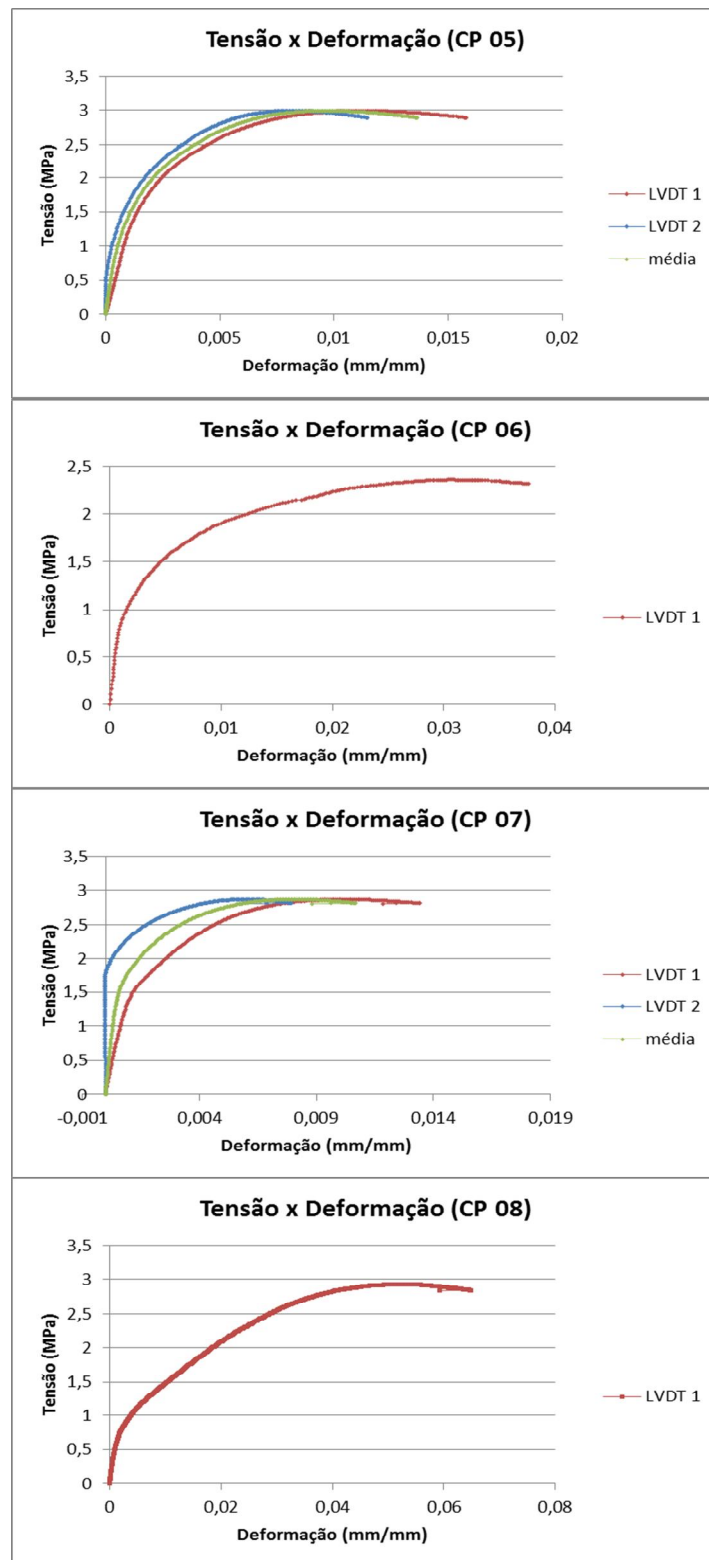


7 dias de cura: 3% de sílica e 1,5 de cal

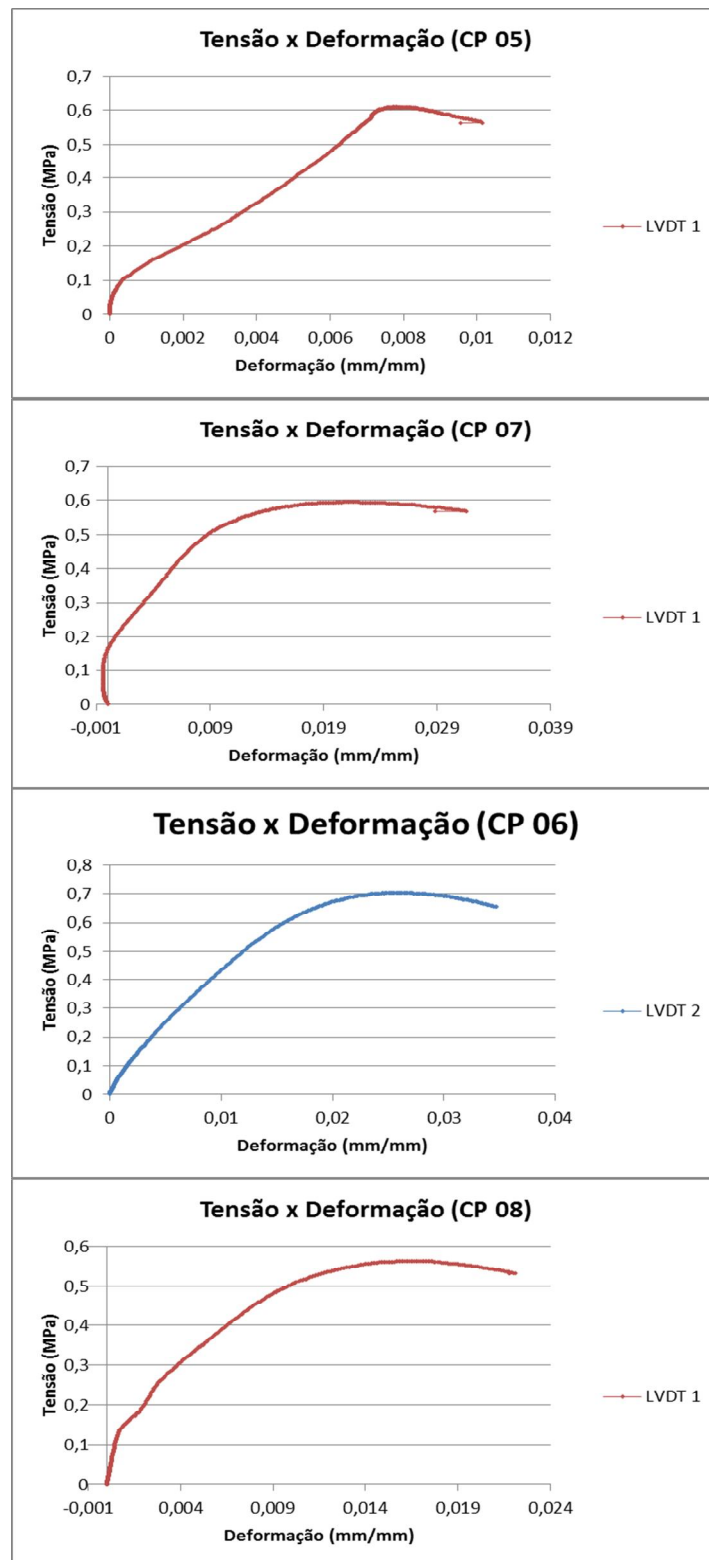
Sem dados CP 01



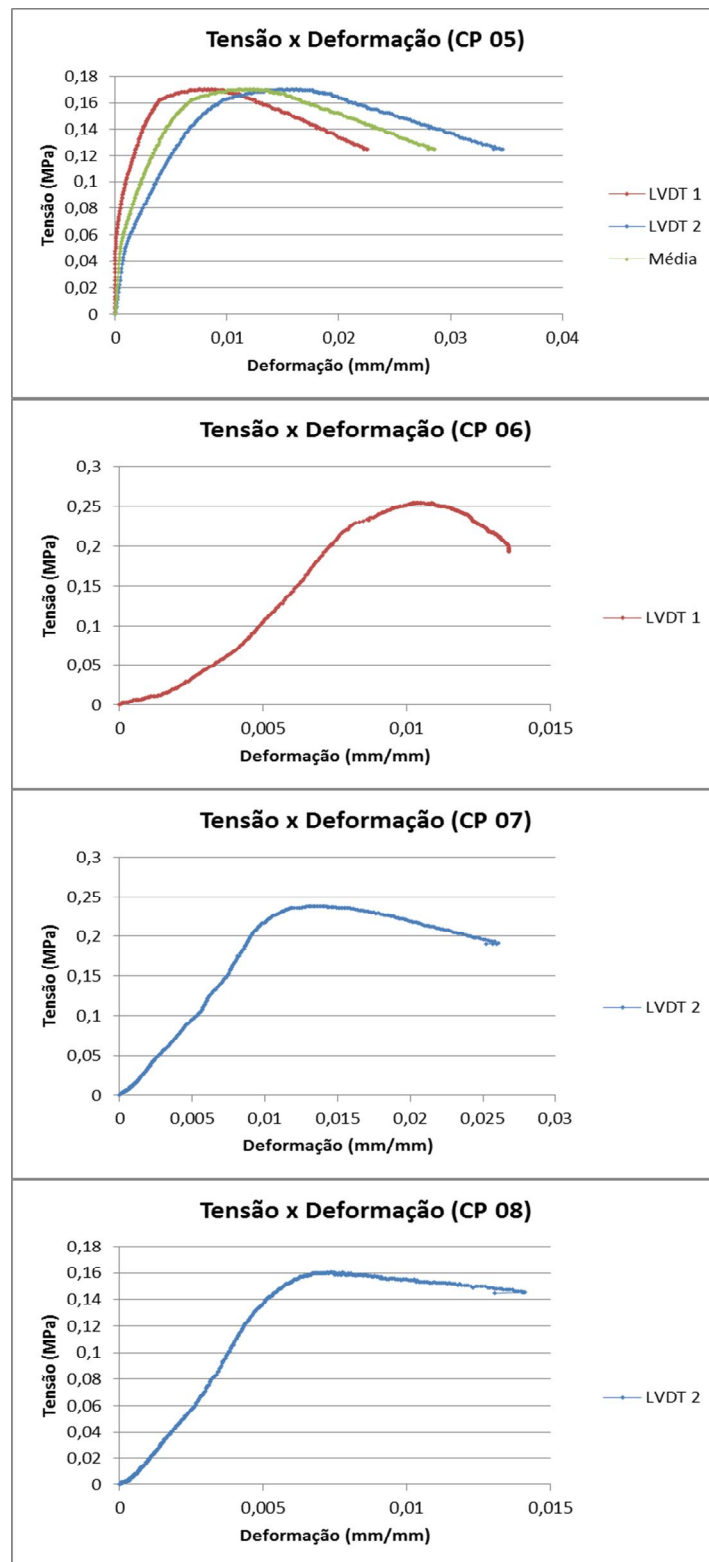
14 dias de cura: 10% sílica e 5% cal



14 dias de cura: 5% silica e 2,5% cal

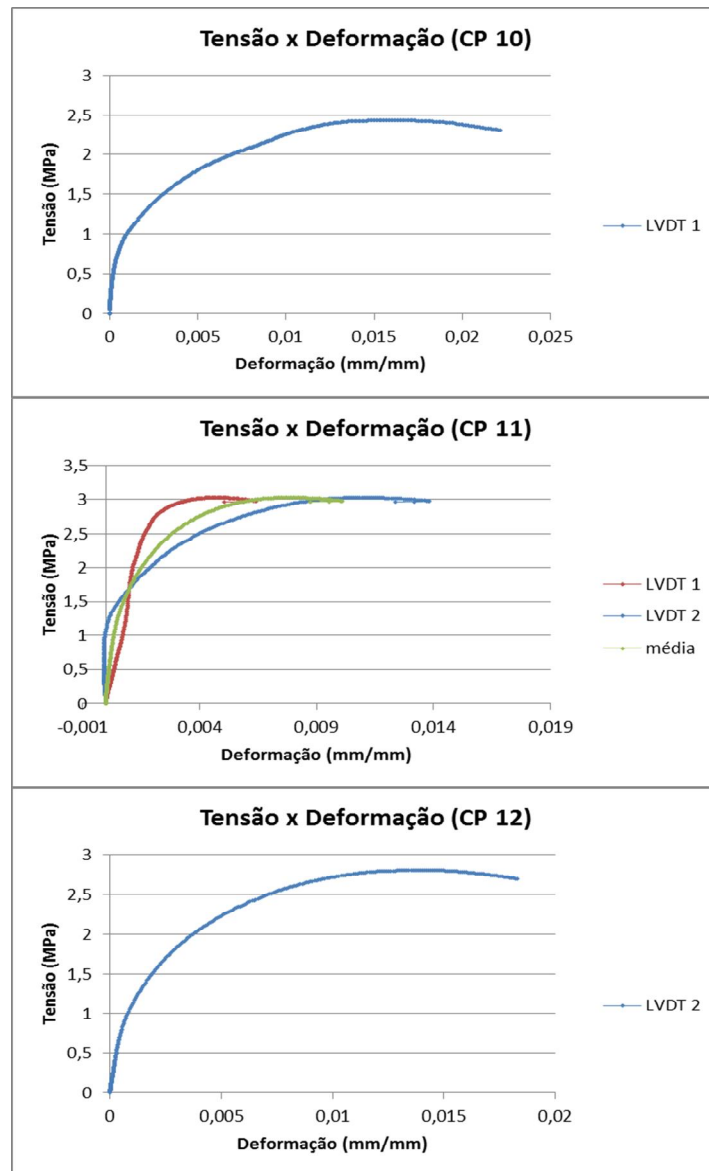


14 dias de cura: 3% de sílica e 1,5 de cal

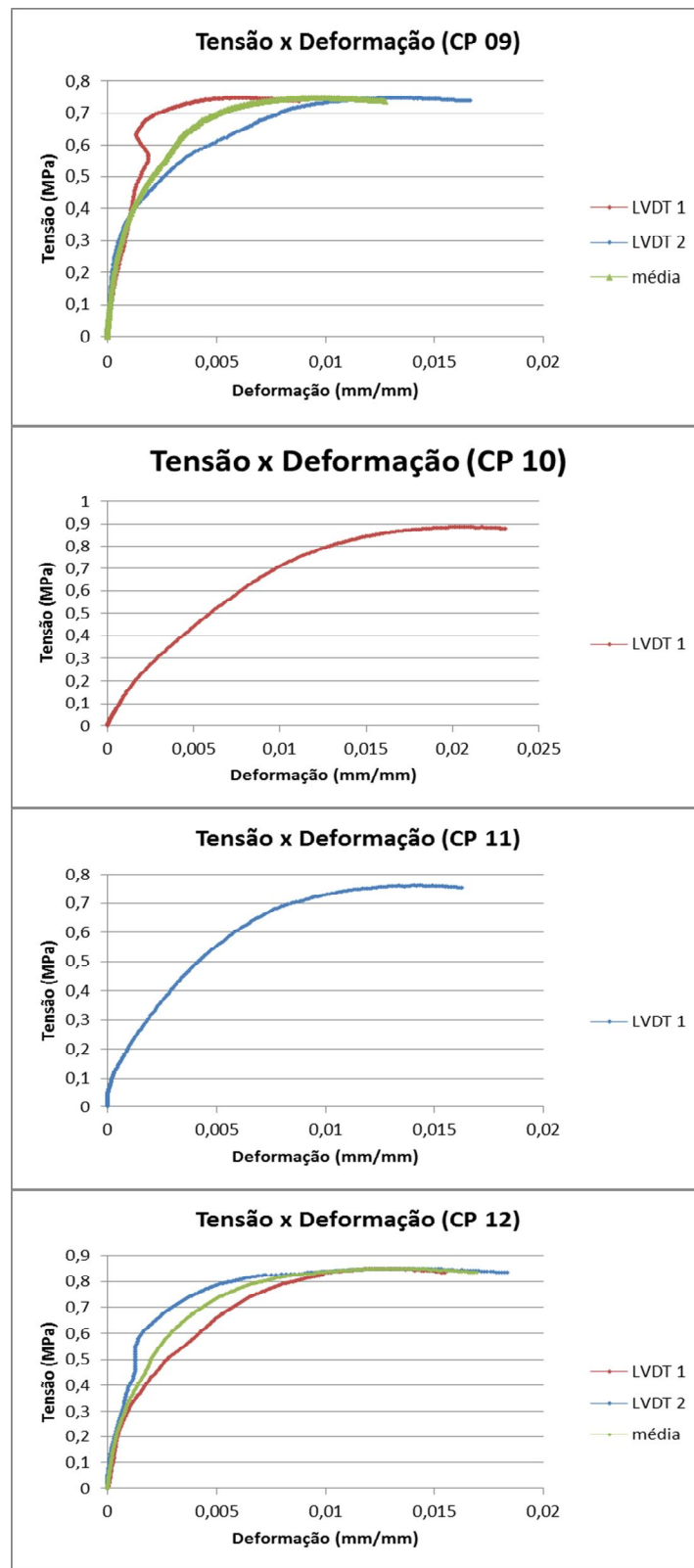


28 dias de cura: 10% sílica e 5% cal

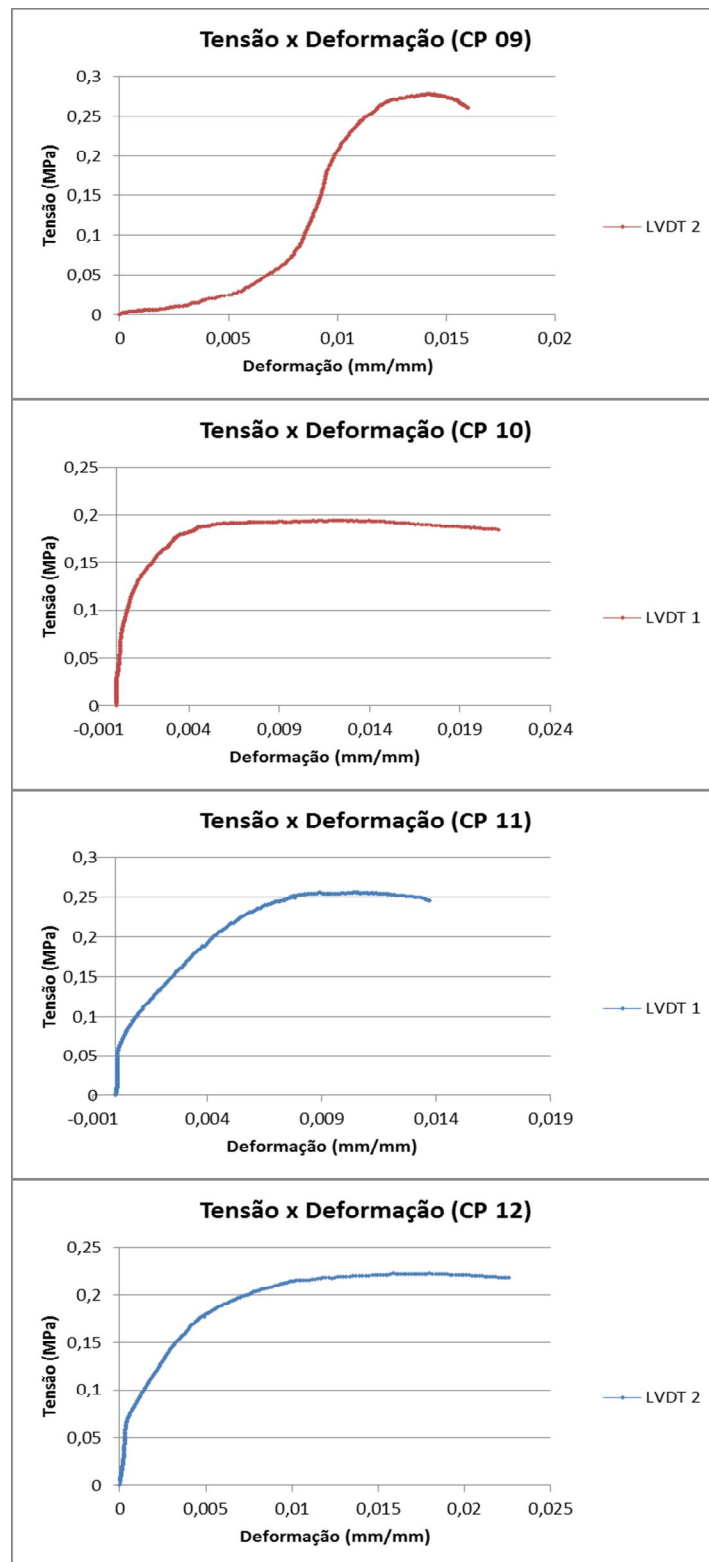
Sem dados CP 09



28 dias de cura: 5% sílica e 2,5% cal



28 dias de cura: 3% de sílica e 1,5 de cal



Fonte: Elaboração Própria