

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

PRISCILLA RODRIGUES FONTOURA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO MATERIAL
FRESADO MISTURADO COM AGLOMERANTES E ADIÇÕES MINERAIS**

Alegrete

2014

PRISCILLA RODRIGUES FONTOURA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO MATERIAL
FRESADO MISTURADO COM AGLOMERANTES E ADIÇÕES MINERAIS**

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

Orientador: Prof. Jaelson Budny

Co-orientador: Prof. Magnos Baroni

Alegrete

2014

PRISCILLA RODRIGUES FONTOURA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO MATERIAL
FRESADO MISTURADO COM AGLOMERANTES E ADIÇÕES MINERAIS**

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

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 12 de Março de
2014.

Banca examinadora:

Prof. Mestre Jaelson Budny
Orientador – Unipampa

Prof. Mestre Magnos Baroni
Co-orientador – Unipampa

Prof. Doutor Ederli Marangon
Unipampa

Prof. Rodrigo Klamt
Unipampa

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por ter me dado saúde e sabedoria para alcançar meu objetivo de possuir uma formação acadêmica e por se fazer presente, por meio das pessoas queridas que me encorajam a seguir, nos momentos em que hesitei.

Agradeço à minha mãe Cláudia, por ter me apoiado em todos os momentos e pelo amor incondicional. Aos meus familiares e meus sogros, por entenderem minha ausência em alguns finais de semana e sempre se interessarem pelos meus estudos. Aos que já partiram Pai, Vó e Vô, espero que estejam orgulhosos.

Agradeço ao meu noivo Marcel, sempre disposto a me ajudar, me apoiando nos momentos mais difíceis e dando força em todas as escolhas que fiz. Um amigo para todas as horas e que posso contar em qualquer situação.

Agradeço ao meu orientador, professor Jaelson, pela ajuda no momento de maior dúvida que tive, a escolha do tema do TCC e por transferir seu conhecimento ao longo da realização deste trabalho. Aos demais professores pela contribuição na minha formação.

Agradeço a Rafaela, pela amizade dedicada a mim, pela ajuda em todas as vezes que precisei, pelas risadas nos dias tensos e pelos esclarecimentos nos assuntos que eu desconhecia, uma pessoa que só veio a acrescentar na minha vida.

Agradeço aos demais colegas que fizeram parte do meu convívio durante a faculdade e, de alguma forma, deram sua contribuição para realização deste trabalho. Aos técnicos de laboratório da Unipampa, Cléber, Clayton e Jarbas, pela ajuda nos ensaios do meu trabalho.

Muito obrigada!

“Deus te colocou no melhor lugar para o teu progresso moral e espiritual. O lar que tens, o trabalho em que te encontras, a cidade onde resides, são oportunidades de treinamento para a tua evolução.”

Joanna de Ângelis

RESUMO

A grande maioria das rodovias brasileiras encontra-se em estado de utilização crítico, não oferecendo segurança e conforto para os usuários e essa realidade mostra o déficit de ações alternativas para devolver a funcionalidade das estradas. Desta maneira surge um cenário positivo para aplicação da reciclagem dos pavimentos, onde se torna adequada a reutilização do material que é retirado das rodovias quando realiza-se a manutenção das mesmas. Este trabalho avaliou o acréscimo na resistência à tração do material fresado com aglomerantes e adições minerais para aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos asfálticos. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação e no Laboratório de Materiais de Construção Civil, ambos da Unipampa – Campus Alegrete. O material fresado é proveniente de um trecho da BR-290 próximo à cidade de Rosário do Sul e foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões 10 x 5 cm para realizar o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. As adições de aglomerantes foram realizadas em diferentes teores. A partir dos resultados definiu-se a mistura que obteve maior resistência, composta de 80% de material fresado, 20% de pó de pedra, 5% de cimento e 5% de sílica da casca de arroz, afirmando a viabilidade da aplicação em camadas de pavimentos.

Palavras-chave: material fresado; adições; tração.

ABSTRACT

The vast majority of Brazilian highways is in critical use, not providing safety and comfort for the users and this fact shows the deficit of alternative actions to restore the functionality of the roads. Thus a positive application for the recycling of pavements scenario where it becomes appropriate reuse of the material that is removed from the highways when carried out their maintenance arises. This study evaluated the increase in tensile strength of the milled material with mineral additions for the application of layers of base and sub-base pavements. Assays were performed in the Laboratory of Geotechnical and Pavement and Materials Laboratory Construction, both of Unipampa – Campus Alegrete. The milled material is from a stretch of the BR-290 near the city of Rosario do Sul and cylindrical specimens were cast with dimensions 10 x 5 cm to perform the test of tensile strength by diametral compression. The additions of binders were performed at different levels. From the results set the mixture with highest resistance, comprising 80% of the milled material, 20% stone powder, 5% cement and 5% of the rice hull silica, asserting the feasibility of applying layers floor.

Keywords: milled material; additions; tension.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas genéricas de um pavimento.....	16
Figura 2 - Esforços na camada de base.....	18
Figura 3 - Máquina fresadora de pequeno porte	20
Figura 4 - Máquina fresadora de médio porte	20
Figura 5 - Máquina fresadora de grande porte	21
Figura 6 - Sentido de rotação do cilindro fresador.....	21
Figura 7 - Reciclagem a quente no local	24
Figura 8 - Reciclagem a quente em usina intermitente	25
Figura 9 - Reciclagem a quente em usina "Drum Mixer"	26
Figura 10 - Reciclagem a frio no local	27
Figura 11 - Reciclagem a frio em usina.....	28
Figura 12 - Peneira utilizada para material fresado.....	35
Figura 13 - Peneira utilizada para solo e pó de pedra.....	35
Figura 14 - Desenvolvimento do ensaio físico-químico	36
Figura 15 - Expansão da mistura durante o ensaio.....	37
Figura 16 – Exemplo dos materiais utilizados nas misturas com solo.....	40
Figura 17 – Exemplo dos materiais utilizados nas misturas com pó de pedra .	41
Figura 18 - Compactador Marshall.....	46
Figura 19 – Quantidade de água adicionada nas misturas, aspecto da mistura com adição de água e material necessário para moldagem de um corpo de prova	47
Figura 20 - Número de golpes utilizado para compactação dos CP's em camada única.....	48
Figura 21 - Macaco hidráulico tipo garrafa utilizado para desmoldagem	49
Figura 22 - Identificação dos corpos de prova.....	49
Figura 23 - Cura dos corpos de prova.....	50
Figura 24 - Esquema de montagem do ensaio.....	51
Figura 25 - Fissuração do CP no momento da ruptura	52
Figura 26 - CP's que desmancharam antes do rompimento	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variação volumétrica do ensaio físico-químico	38
Tabela 2 - Tensões médias de tração indireta dos CP's secos das misturas de fresado e solo.....	53
Tabela 3 - Tensões médias de tração indireta dos CP's submersos das misturas de fresado e solo	54
Tabela 4 - Tensões médias de tração indireta dos CP's secos das misturas de fresado e pó de pedra	56
Tabela 5 - Tensões médias de tração indireta dos CP's submersos das misturas de fresado e pó de pedra.....	56
Tabela 6 - Tabela resumo dos resultados	59
Tabela 7 - Tensões médias de compressão simples dos CP's secos das misturas de fresado e solo	62
Tabela 8 - Tensões médias de compressão simples dos CP's submersos das misturas de fresado e solo	63
Tabela 9 – Tensões médias de compressão simples dos CP's secos das misturas de fresado e pó de pedra.....	64
Tabela 10 – Tensões médias de compressão simples dos CP's submersos das misturas de fresado e pó de pedra.....	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica do solo	33
Gráfico 2 - Curva granulométrica do material fresado e do pó de pedra	33
Gráfico 3 – Comparação da variação do volume	39
Gráfico 4 – Curva de compactação do material fresado com solo	44
Gráfico 5 - Curva de compactação do material fresado com pó de pedra	45
Gráfico 6 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas de material fresado e solo	54
Gráfico 7 – Resistência a tração por compressão diametral das misturas de material fresado e pó de pedra.....	57
Gráfico 8 – Comparação da umidade das misturas de fresado e solo	60
Gráfico 9 – Comparação da umidade das misturas de fresado e pó de pedra	61
Gráfico 10 - Resistência à compressão simples das misturas de fresado e solo	63
Gráfico 11 - Resistência à compressão simples das misturas de fresado e pó de pedra	65

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Delimitação do tema e contextualização do problema de pesquisa	13
1.2 Objetivos	14
1.3 Estrutura do trabalho	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Estrutura dos pavimentos flexíveis	16
2.2 Fresagem de pavimentos asfálticos	18
2.2.1 Tipos de fresagem.....	19
2.2.2 Técnicas de fresagem	19
2.2.3 Equipamentos.....	19
2.2.4 Material fresado.....	22
2.3.1 Tipos de reciclagem de pavimentos flexíveis.....	24
2.4 Estabilização química	28
2.4.1 Estabilização utilizando Cal	29
2.4.2 Estabilização utilizando Cimento.....	29
2.4.3 Estabilização utilizando Sílica da casca de arroz.....	30
2.4.4 Estabilização utilizando Cinza Volante.....	30
3 METODOLOGIA	32
3.1 Materiais.....	32
3.2 Etapas para realização do estudo.....	34
3.2.1 Peneiramento do material fresado, solo e pó de pedra	34
3.2.2 Determinação do teor de cal para máximo aproveitamento da sílica na mistura	35
3.2.3 Separação dos materiais	39
3.2.4 Determinação do teor de umidade.....	43
3.2.5 Moldagem dos corpos de prova	46
3.2.6 Procedimento de cura e rompimento dos corpos de prova	50
4 RESULTADOS	53
4.1 Resistência à tração por compressão diametral	53
4.2 Análise da umidade das misturas.....	60
4.3 Resistência à compressão simples	62

CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
ANEXOS	74

1 INTRODUÇÃO

1.1 Delimitação do tema e contextualização do problema de pesquisa

A malha rodoviária constitui uma infra-estrutura de fundamental importância na economia e desenvolvimento do país, sendo assim é preciso que apresente qualidade satisfatória para o tráfego de veículos. No Brasil, o transporte rodoviário representa mais de 60% das cargas e 90% dos passageiros (SPECHT et al., 2012). A avaliação da Confederação Nacional dos Transportes (CNT) em seu mais recente relatório aponta que 49% dos pavimentos das rodovias brasileiras são classificados como Ótimo, 5,1% Bom, 33,4% Regular, 8,6% Ruim e 3,9% Péssimo (CNT, 2012). Mas é importante “ressaltar que a malha rodoviária brasileira (rodovias federais, estaduais e municipais) tem apenas 10% de sua extensão pavimentada” (SPECHT et al., 2012, p. 4).

As obras de infra-estrutura e habitação ganharam impulso através das políticas públicas no Brasil, o que mostra um cenário positivo para as áreas da Engenharia. Porém esse cenário pode levar a escassez de recursos para obter os materiais ou aumento nos custos. Neste contexto, necessita-se de métodos alternativos que possibilitem a pavimentação a um custo mais baixo ou até mesmo a reciclagem dos materiais, visando reduzir a execução de recapeamentos nas rodovias.

A reciclagem de pavimentos é uma técnica já conhecida e empregada no Brasil desde a década de 80. Ela utiliza o material asfáltico fresado para realizar novas misturas e pode ser aplicada como nova camada de rolamento ou como camada de base reforçada. Apesar de muitas obras já utilizarem esse processo, não é possível afirmar que esta técnica é disseminada no meio rodoviário (SPECHT et al., 2012).

Na região da fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul a técnica de fresagem de pavimentos é bastante utilizada, porém a execução da reciclagem é pouco empregada. Esse fato leva à necessidade de aterros licenciados para depósito do material fresado, porém esses locais são escassos na região.

Então precisa-se resolver a seguinte questão: o que fazer com o material asfáltico fresado que é retirado das rodovias? Este material possui resistência à tração suficiente para ser aplicado em camadas de pavimentos?

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral a avaliação da resistência à tração por compressão diametral do material asfáltico fresado, corrigindo a granulometria com adições de solo e pó de pedra, utilizando os aglomerantes Cimento Portland e Cal Hidratada e adições minerais de Sílica de casca de arroz e Cinza volante, visando possibilitar a aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos.

Como objetivos específicos têm-se:

- Determinar a resistência à tração por compressão diametral das misturas que serão realizadas;
- Avaliar a influência no material fresado das adições minerais de sílica da casca de arroz e cinza volante e de aglomerantes, como cal e cimento;
- Transformar os dados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral em valores para resistência à compressão simples, a fim de compará-los com as exigências mínimas de norma;
- Verificar qual o teor de cal necessário para o máximo aproveitamento da sílica da casca de arroz;
- Estimar a eficiência do método adotado para cura dos corpos de prova.

1.3 Estrutura do trabalho

No Capítulo 1 são apresentadas as considerações sobre a situação da malha rodoviária brasileira, a delimitação do tema e contextualização do problema de pesquisa e os objetivos gerais e específicos.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica que contém: a estrutura dos pavimentos flexíveis, os tipos de reciclagem existentes e os métodos para realizá-la, as técnicas de fresagem e as estabilizações químicas propostas.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia adotada para desenvolvimento do trabalho, com as respectivas etapas.

No Capítulo 4 encontram-se os resultados encontrados referentes à resistência à tração por compressão diametral, análise da umidade e resistência à compressão simples obtidos nos ensaios, e as considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estrutura dos pavimentos flexíveis

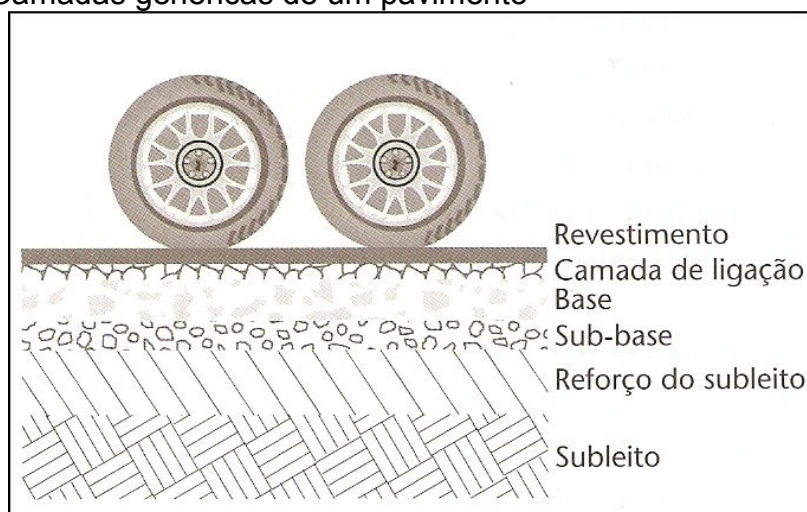
A principal função de um pavimento é assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação de veículos com comodidade e segurança durante sua vida útil, exposto às ações do tráfego e variações climáticas (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2008). Para Bernucci et al. (2006, p.339) “as estruturas de pavimento são projetadas para resistirem a numerosas solicitações de carga, dentro do período de projeto, sem que ocorram danos estruturais fora do aceitável e previsto”.

De acordo com Balbo (2007) a estrutura do pavimento é idealizada para receber e transmitir esforços de modo que ocorra um alívio das pressões nas camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes.

Os tipos de pavimentos existentes apresentam diferenças devido à constituição e modo de funcionamento, dividindo-se basicamente em três tipos: pavimentos flexíveis, rígidos e semi-rígidos (MINHOTO, 2005). Este trabalho irá detalhar a estrutura dos pavimentos flexíveis, tendo em vista que será proposta a aplicação do material fresado estabilizado em camadas de base desse tipo de pavimento.

De acordo com DNIT (2006) o pavimento é constituído por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre o terreno da fundação, chamado de subleito. Essa estrutura de camadas pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 - Camadas genéricas de um pavimento



Fonte: Balbo (2007, p.36)

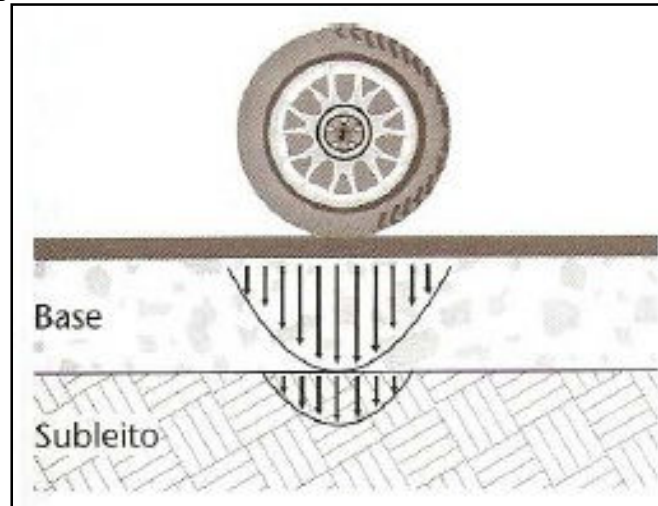
“A fundação é constituída pelo terreno natural” (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2008, p.10). Os esforços que atuam sobre a superfície do subleito são aliviados em sua profundidade, pois normalmente se dispersam no primeiro metro. Ele é constituído de material natural consolidado e compactado (BALBO, 2007).

A camada de reforço do subleito possui espessura constante e características geotécnicas superiores à do material de subleito (DNIT, 2006). Em casos que esse terreno não apresenta capacidade de suporte é necessário um reforço, que é executado com material de melhor qualidade, podendo ser tratado com ligantes (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2008). O emprego de camada de reforço não é obrigatório, no entanto procura-se utilizá-lo por razões econômicas evitando camadas espessas de base e sub-base (BALBO, 2007).

Conforme NBR 7207(ABNT, 1982) a sub-base é uma camada corretiva do subleito quando não é possível construir o pavimento diretamente sobre o mesmo. “O material constituinte da sub-base deve ter características tecnológicas superiores às do material de reforço” (SENÇO, 2007, p. 19).

“O sucesso dos pavimentos rodoviários depende muito do desempenho estrutural da sua camada de base, pois é esta que assegura, em grande parte, a capacidade de carga para suportar o tráfego previsto” (SANTOS, A., 2009, p.3). A camada de base é utilizada para aliviar as pressões sobre as camadas de solo inferiores e também contribui para a drenagem sub-superficial do pavimento (BALBO, 2007). A seleção dos materiais a serem aplicados na camada de base é baseada na pesquisa dos recursos disponíveis para serem empregados na estrutura dos pavimentos (BERNUCCI et al., 2006). Um pavimento flexível sob carregamento apresenta um campo de tensões concentrado, o que exige maior resistência na camada de base (BALBO, 2007) conforme é mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Esforços na camada de base



Fonte: Adaptado de Balbo (2007, p.47)

O revestimento é também conhecido como capa de rolamento, que recebe diretamente as cargas do tráfego e tem como função melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de conforto e segurança (SENÇO, 2007). Os pavimentos brasileiros são geralmente compostos de uma mistura de agregados minerais com ligantes asfálticos, a fim de garantir requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, durabilidade e resistência à derrapagem de acordo com o clima e tráfego previstos (BERNUCCI et al., 2006).

Os métodos de dimensionamento adotam a espessura da camada de revestimento para, em seguida, calcular as espessuras das demais camadas.

Como o revestimento é a camada mais nobre, a adoção da espessura não deve implicar em redução da resistência, pois é a parte do pavimento que possui material mais apto a garantir eficiência. É necessário cuidado ao fixar a espessura da camada de revestimento já que ela possui maior custo unitário. Métodos que resultam em camadas muito espessas não correspondem à realidade econômica brasileira e podem ocasionar a inviabilidade econômica do pavimento (SENÇO, 2007).

2.2 Fresagem de pavimentos asfálticos

No meio rodoviário, o termo fresagem define o corte de uma ou mais camadas do pavimento, utilizando a fresadora, um equipamento que possui um cortador giratório, acionado por processo mecânico contínuo (ARAÚJO, 2004).

2.2.1 Tipos de fresagem

Bonfim (2001) classifica os tipos de fresagem em função da espessura de corte em três categorias: superficial, rasa e profunda.

A fresagem superficial tem como objetivo melhorar a textura do pavimento, aumentar a resistência à derrapagem ou melhorar a aderência a uma nova camada (FRESAR, 2013). Na fresagem rasa a espessura de corte pode chegar a profundidade de 5 cm e atinge geralmente a camada de revestimento. Já na fresagem profunda, podem ser atingidas as camadas de ligação até a sub-base, visando um reforço estrutural (BONFIM, 2001).

2.2.2 Técnicas de fresagem

A fresagem pode ser realizada a frio ou a quente. Na fresagem a frio ocorre um aumento na quebra dos agregados, o que altera a curva granulométrica do material existente. Já na fresagem a quente, é feito um pré-aquecimento do revestimento diminuindo a resistência ao corte do material, não havendo grandes alterações na curva granulométrica do agregado aplicado inicialmente no pavimento (BONFIM, 2001).

2.2.3 Equipamentos

Bonfim (2001) afirma que o mercado oferece máquinas fresadoras que diferem pela largura do cilindro fresador, sendo elas:

- a) De pequeno porte: é utilizada para arremates ou acabamentos em pequenas áreas e a largura do cilindro varia entre 30 e 60 cm (Figura 3).
- b) De médio porte: é aplicada na fresagem tanto de pequenas como grandes áreas, possui correia transportadora para carregar o material removido em caminhões e o cilindro possui largura entre 100 e 150 cm (Figura 4).
- c) De grande porte: empregada para realizar fresagem em grandes áreas já que seu cilindro tem largura entre 200 e 220 cm. É a mais indicada para uso em rodovias (Figura 5).

Figura 3 - Máquina fresadora de pequeno porte



Fonte: Wirtgen (2013, p.5)

Figura 4 - Máquina fresadora de médio porte



Fonte: Wirtgen (2013, p.6)

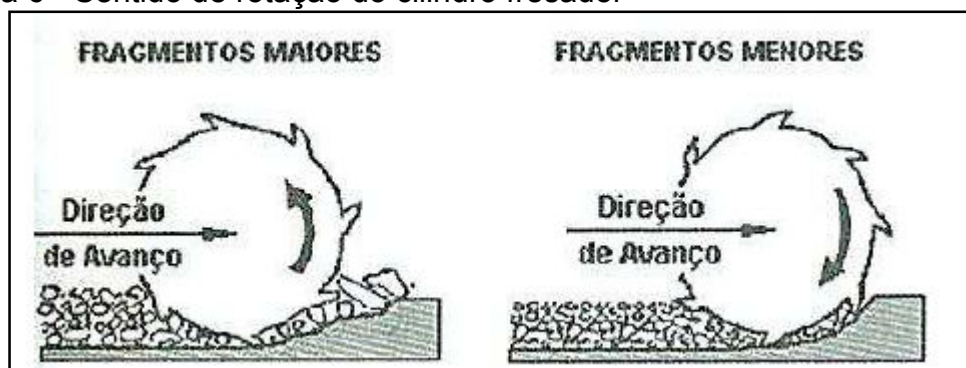
Figura 5 - Máquina fresadora de grande porte



Fonte: Wirtgen (2013, p.8)

O cilindro fresador é um tambor rígido construído em aço, no qual são fixados os dentes de corte, que são dispostos em forma de “v” para facilitar o lançamento do material fresado na correia transportadora. O cilindro pode ter rotações tanto no sentido horário como no anti-horário conforme mostra a Figura 6. O sentido horário de rotação do cilindro resulta em fragmentos menores de material fresado, porém é desfavorável para corte de grandes espessuras de pavimento (BONFIM, 2001).

Figura 6 - Sentido de rotação do cilindro fresador



Fonte: Bonfim (2001, p.35)

Os dentes de corte são peças constituídas por corpo em aço forjado com pontas de material mais duro que agem diretamente no pavimento. A fixação dos dentes é feita em suportes que têm posições e ângulo de ataque definidos a fim de garantir a rugosidade da superfície (BOMFIM, 2001).

A correia transportadora permite o descarregamento do material em caminhões basculantes. Nos equipamentos de pequeno e médio porte está localizada na parte traseira e nos de grande porte encontra-se na parte frontal da máquina fresadora (BOMFIM, 2001).

2.2.4 Material fresado

O material fresado é formado pelo agregado britado e por grumos de cimento asfáltico de petróleo (CAP). Esses grumos aglomeram os finos e alteram a curva granulométrica do material. Nesse sentido, é possível afirmar que a granulometria do material fresado sofre influência da velocidade de operação da máquina fresadora, da técnica de fresagem utilizada e do sentido de giro do cilindro fresador (BONFIM, 2001).

Como é possível corrigir a granulometria do material fresado, pretende-se reutilizá-lo nas camadas de pavimento, incorporando-o em novas misturas como substituição de agregados britados (SANTOS, J., 2010).

As misturas asfálticas contendo material fresado quando comparadas com misturas asfálticas convencionais apresentam propriedades mecânicas com desempenho similar (LIMA, 2003).

A técnica de fresagem gera grandes volumes de um material nobre e é necessário que os serviços sejam aprimorados visando reutilizar o material fresado. Caso o mesmo não seja aproveitado na reciclagem a quente ou a frio, pode gerar um passivo ambiental por ficar depositado no leito das rodovias (ROSA; LORENZO; PACHECO, 2007).

2.3 Reciclagem de pavimentos

A reciclagem de pavimentos resume-se em obter novas misturas betuminosas utilizando material fresado de pavimentos, com adição de agregados e ligantes. A reciclagem pode reabilitar tanto as características superficiais quanto estruturais do pavimento (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2008).

Os agregados fresados são os elementos principais das misturas recicladas, sendo empregados teores variados, podendo inclusive, as misturas serem integralmente compostas por material fresado, sem qualquer adição de material virgem (SILVA et al., 2011, p. 2).

Na reutilização do material fresado na camada de revestimento é realizada a recuperação do asfalto envelhecido com adição de agentes rejuvenescedores e também é possível corrigir a granulometria dos agregados. Em casos que o material fresado é destinado para camadas de base ou sub-base, prefere-se que o material seja utilizado com as características no momento da intervenção (ARAÚJO, 2004).

A reutilização de agregados do pavimento degradado proporciona uma diminuição na demanda de novos materiais e traz benefícios devido às restrições impostas pelas leis de proteção ao meio ambiente. Já a reutilização de ligantes asfálticos permite que o asfalto envelhecido após a mistura recupere suas propriedades originais, podendo ser novamente aplicado no pavimento (DNIT, 2006).

O processo de reciclagem deve seguir o projeto de execução, onde estará especificada a profundidade da reciclagem, a constituição e a espessura das novas camadas (CUNHA, 2010).

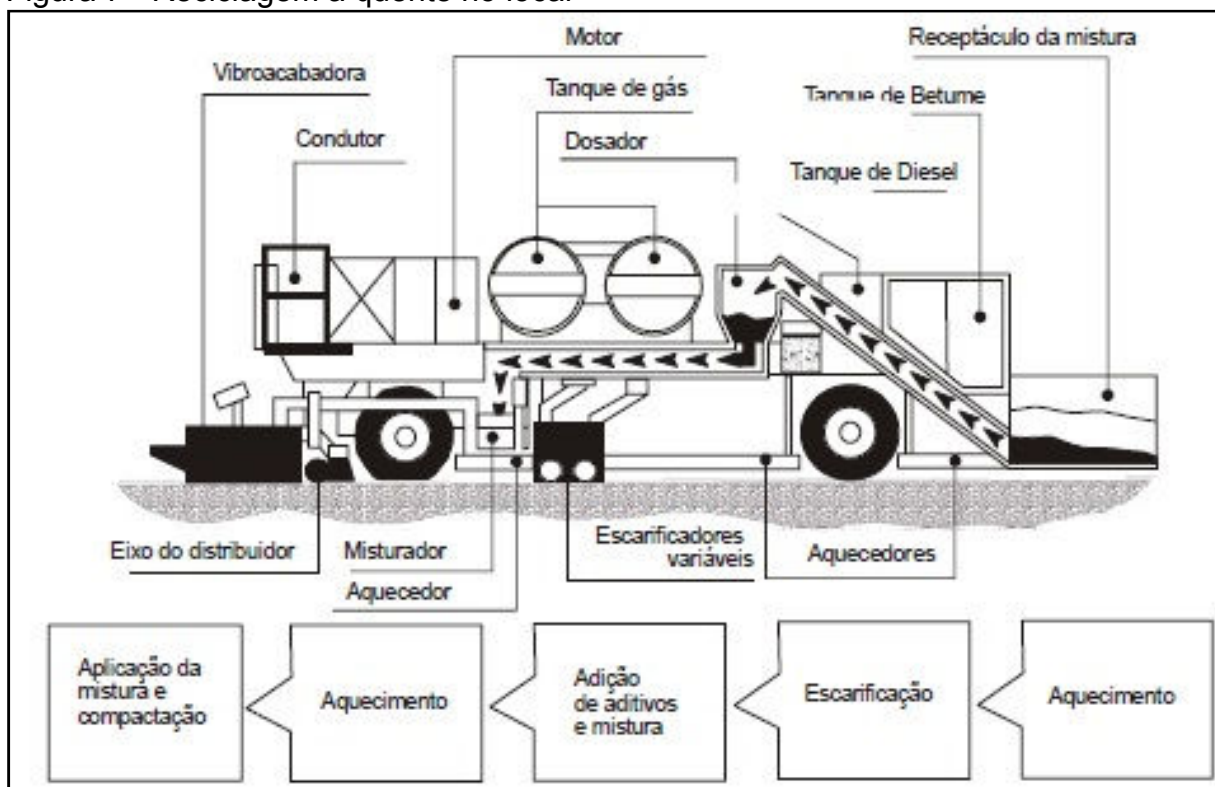
Quando não há projeto de reciclagem, é realizada a fresagem prévia que retira completamente o revestimento antigo e despreza a contribuição estrutural que essa camada poderia oferecer. Também são envolvidos custos com transporte e descarga do material em aterros licenciados. O aproveitamento dos materiais existentes e a redução dos riscos que surgem ao ser aplicado reforço diretamente sobre pavimentos antigos são potencializados pela realização da reciclagem (SILVA et al., 2011).

2.3.1 Tipos de reciclagem de pavimentos flexíveis

O Manual de Restauração (DNIT, 2006) define dois tipos de reciclagem, a quente e a frio.

A reciclagem a quente pode ser feita no local ou em usina estacionária e os procedimentos devem atender às normas ES-033 (DNIT, 2005) e ES-034 (DNIT, 2005). Neste processo o revestimento é removido e misturado a quente, podendo incluir novos agregados e agente rejuvenescedor, sendo que o material resultante deve atender as especificações de misturas asfálticas a quente destinado às camadas de base ou de rolamento (DNIT, 2006). A Figura 7 ilustra o sistema de reciclagem Remixer.

Figura 7 - Reciclagem a quente no local



Fonte: DNIT (2006, p.183)

Na reciclagem Remixer as unidades fresadoras são conjugadas com câmaras de aquecimento que realizam a fresagem a quente. Nesse sistema o revestimento é aquecido e removido em uma única passada pela fresadora, caso sejam necessárias maiores profundidades de fresagem são realizadas múltiplas passadas.

Um misturador do tipo “pug-mill” é acoplado ao equipamento e realiza o processamento do material fresado no local e um sistema distribuidor realiza o lançamento (DNIT, 2006).

O sistema de reciclagem em usina intermitente pode ser realizado com o material sendo introduzido diretamente no receptáculo de pesagem ou com o material sendo armazenado no silo de estocagem, pelo processo dos silos quentes (DNIT, 2006). Na Figura 8 está exemplificado o método com material sendo introduzido no receptáculo de pesagem.

Figura 8 - Reciclagem a quente em usina intermitente



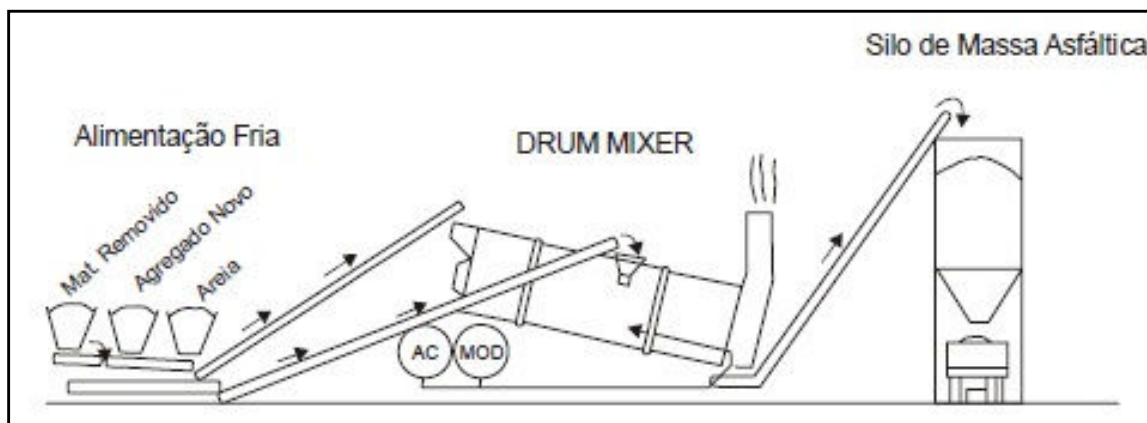
Fonte: DNIT (2006, p.187)

Neste sistema o material removido, já com dimensões reduzidas é transferido por um sistema de correia transportadora para o receptáculo de pesagem na torre de mistura. Então o material é colocado no misturador junto com o agregado virgem superaquecido e a transferência de calor ocorre durante a mistura. O projeto de execução determina as quantidades a serem adicionadas de agente rejuvenescedor e cimento asfáltico e na seqüência é realizada a descarga do material. A utilização de maior quantidade de material removido na mistura implica em maior aquecimento do agregado virgem, o que pode tornar-se anti-econômico (DNIT, 2006).

A reciclagem realizada em usina “Drum Mixer” (Figura 9) pode utilizar o tambor secador convencional com algumas modificações, mas este sistema pode não atender as exigências mínimas de qualidade do ar (DNIT, 2006).

As usinas do tipo "Drum Mixer" possuem cinco componentes principais: depósitos para estocagem dos agregados; tanque de suprimento de asfalto; tambor misturador; silos de armazenagem da mistura pronta e equipamento de controle de emissões poluentes (LIMA, 2003, p. 9).

Figura 9 - Reciclagem a quente em usina "Drum Mixer"



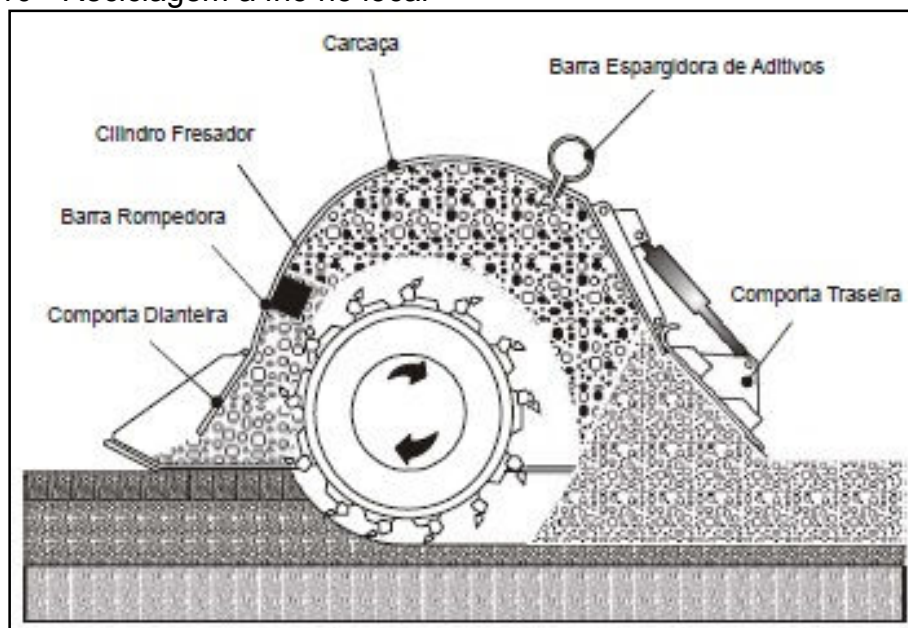
Fonte: DNIT (2006, p.188)

Nessas usinas o agregado novo entra no tambor já aquecido, após passar pela extremidade do maçarico, o material fresado entra em um ponto onde não há aquecimento e a transferência de calor ocorre durante a mistura. Nessa fase são adicionados agente rejuvenescedor e cimento asfáltico, então é realizada a mistura que consegue aproveitamento de até 50% do material fresado (DNIT, 2006).

A reciclagem a frio também pode ser feita no local ou em usina. Em função do tipo de estabilizante que é adicionado ela subdivide-se em reciclagem com adição de material betuminoso e reciclagem com adição de estabilizante químico. Embora os processos sejam semelhantes há alguns fatores que os diferenciam. A adição de material betuminoso envolve somente o revestimento e a base granular, já na adição de agentes químicos geralmente é envolvido o subleito do pavimento, de forma a criar um reforço nas camadas inferiores. A escolha entre os tipos de estabilização deve ser baseada na granulometria do material, principalmente a quantidade de material que passa na peneira 200 (DNIT, 2006).

Na reciclagem a frio no local, após ser fragmentado, o material é misturado com o agente estabilizador e lançado em uma única passada (Figura 10). Geralmente utiliza-se um único equipamento para realizar a fresagem a frio, a estabilização e o espalhamento do material. Quando é realizada adição de estabilizante químico, o aditivo deve ser previamente espalhado na pista de rolamento antes da fresagem e mistura (DNIT, 2006).

Figura 10 - Reciclagem a frio no local



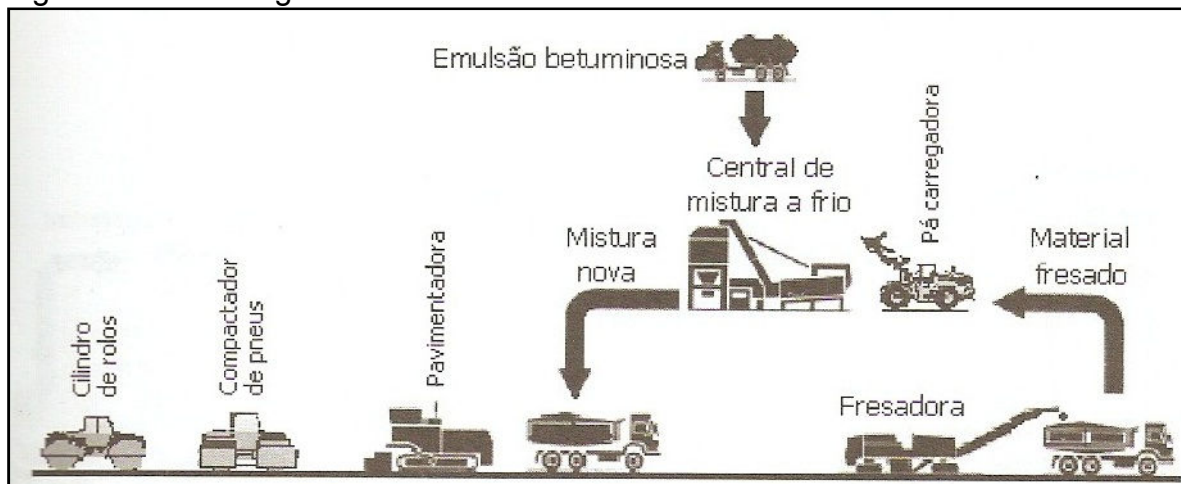
Fonte: DNIT (2006, p.200)

As máquinas de fresagem a frio proporcionaram um avanço na reciclagem, pois possibilitaram aumento na quantidade de material fresado, resultando em trechos maiores de rodovias recuperados e maior aproveitamento deste material, minimizando a utilização de agregados virgens. A reciclagem se justifica em casos que o grau de trincamento é muito elevado e pode se propagar para o reforço a ser construído. Também soluciona problemas em que houve mudança no greide do pavimento devido à recapeamentos sucessivos (MOREIRA; SOARES; MOTTA, 2005). Essa técnica é geralmente utilizada para restauração de rodovias com volume de tráfego reduzido, em acostamentos defeituosos e para utilizar o material reciclado como base estabilizada (DNIT, 2006).

A Figura 11 mostra a reciclagem a frio em usina, em que o material após ser removido é transportado para uma usina misturadora, onde pode ser obtido

alto controle de qualidade na adição do estabilizador, porém apresenta aumento no custo de execução e prazo de construção (DNIT, 2006).

Figura 11 - Reciclagem a frio em usina



Fonte: Branco; Pereira; Santos (2008, p.327)

A escolha entre os dois tipos de reciclagem deve considerar os seguintes aspectos: condição da superfície do pavimento, disponibilidade de equipamentos e avaliação dos custos (DNIT, 2006). A remoção por fresagem é recomendada antes da execução de recapeamento, a fim de reduzir a propagação de trincas existentes no pavimento antigo (BERNUCCI et al., 2006).

2.4 Estabilização química

A estabilização química é utilizada para que o solo tenha condições de resistir a deformações quando aplicado em um pavimento (SENÇO, 2001). A estabilização do material fresado surge como alternativa ao uso de britas, que geralmente são utilizadas em misturas asfálticas. O processo de estabilização proporciona estruturas de pavimentos com bom desempenho e durabilidade, podendo ser realizada por métodos mecânicos (correção granulométrica) quanto por métodos físico-químicos, utilizando aditivos como cal e cimento (LOVATO, 2004). A seguir são apresentados os tipos de estabilização, relacionadas à solos, que serão executadas no trabalho, pois na bibliografia consultada encontrou-se pouco material referente à estabilização em material fresado.

2.4.1 Estabilização utilizando Cal

Araújo (2004) afirma que a adição de cal no solo pode provocar mudanças nas suas propriedades, como por exemplo, melhoria da trabalhabilidade, alteração da plasticidade e aumento da resistência mecânica.

Ainda na visão de Araújo (2004) ao realizar a mistura do solo com a cal acontece a reação de carbonatação, que ocorre entre o dióxido de carbono presente na atmosfera e a cal, resultando em produtos cimentantes muito fracos, que não colaboram com o aumento final de resistência. A reação pozolânica ou cimentação acontece entre a cal, a água e as fontes de sílica, alumina e ferro, dependendo muito do tempo. O acréscimo na resistência mecânica ocorre pelas reações químicas formadas entre silicatos e aluminatos de cálcio.

Após analisar misturas de solo/cal, Rosa, Ferreira e Guimarães (2011) complementam que as misturas com solos não lateríticos foram beneficiadas em algumas propriedades, principalmente a expansão.

O teor de cal a ser adicionado na mistura é determinado realizando várias misturas com diferentes teores e analisando a influência da adição na granulometria, nos limites de consistência e na resistência mecânica (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2008).

2.4.2 Estabilização utilizando Cimento

Para Almeida (2009, p.11) “o processo de estabilização de solos com cimento ocorre a partir do desenvolvimento das reações químicas que são geradas na hidratação do cimento (mistura do cimento com água)”. O mesmo autor ainda afirma que haverá melhora das propriedades no processo de hidratação se a mistura for compactada no teor de umidade ótimo.

A adição de cimento tem por finalidade o incremento de resistência mecânica e a durabilidade quando há presença de água (ARAÚJO, 2004).

Como o material fresado apresenta características granulares, Almeida (2009) considera que estes são mais adequados para mistura, pois atingem maior resistência mecânica com menor teor de cimento. Também é importante distinguir a atuação da adição de cimento nos diferentes tipos de solo, nos solos finos é formado um esqueleto, onde as partículas são envolvidas pela

pasta. Em solos granulares, onde as partículas possuem dimensões maiores, o cimento somente cria ligações pontuais entre elas.

Branco, Pereira e Santos (2008) afirmam que há duas maneiras de utilizar o cimento na estabilização de solos. Na primeira são adicionadas pequenas quantidades visando diminuir a susceptibilidade à água do solo e aumentar a resistência mecânica, sendo o produto dessa mistura chamado de solo tratado com cimento. Na segunda maneira são adicionadas maiores quantidades de cimento, proporcionando resistências à compressão elevadas, resultando no material conhecido como solo-cimento.

Para estabelecer o teor de cimento são realizados estudos experimentais que seguem alguns passos principais como: identificação do solo para estimar o teor de cimento; preparação de misturas com diversos teores de cimento; ensaios de compactação para determinar o teor de umidade ótima e confecção de corpos de prova para submeter a ensaios de resistência à compressão simples em diferentes idades (pelo menos 7 e 28 dias) (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2008).

2.4.3 Estabilização utilizando Sílica da casca de arroz

Behak (2007) afirma que a adição da sílica de casca de arroz em conjunto com outro estabilizante, como cal ou cimento, altera as propriedades físicas e mecânicas de solos arenosos, apresentando melhorias na plasticidade, resistência mecânica e durabilidade. O autor ainda ressalta que as alterações dependem de alguns fatores, entre eles a temperatura de incineração da casca de arroz, a energia de compactação da mistura e as condições de cura.

A utilização desse material como adição se justifica pelas reações que podem ocorrer entre os compostos quimicamente ativos da sílica com o hidróxido de cálcio presente na cal hidratada (MARANGON et. al., 2013).

2.4.4 Estabilização utilizando Cinza Volante

A norma ME – 181 (DNER, 1994, p.2) apresenta a cinza volante como “rejeito industrial com características pozolânicas e proveniente da combustão do carvão vapor pulverizado utilizado em usinas termoeletricas”.

As cinzas oriundas da combustão do carvão mineral apresentam propriedades físico-químicas que são influenciadas por fatores como a composição e o grau de beneficiamento do carvão e o sistema de extração das cinzas. As cinzas volantes quando misturadas com a cal podem desenvolver reações pozolânicas e apresentar características semelhantes à mistura solo/cal (CAMARA; CASAGRANDE; CUNHA, 2011).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo estão expostas todas as etapas realizadas para confecção dos corpos de prova, destinados a realização do ensaio de tração por compressão diametral.

3.1 Materiais

O material fresado utilizado no estudo foi retirado de um trecho da BR – 290, próximo à cidade de Rosário do Sul, sendo que sua extração foi realizada pela técnica de fresagem a frio, acondicionado em sacos plásticos e guardado no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da Unipampa.

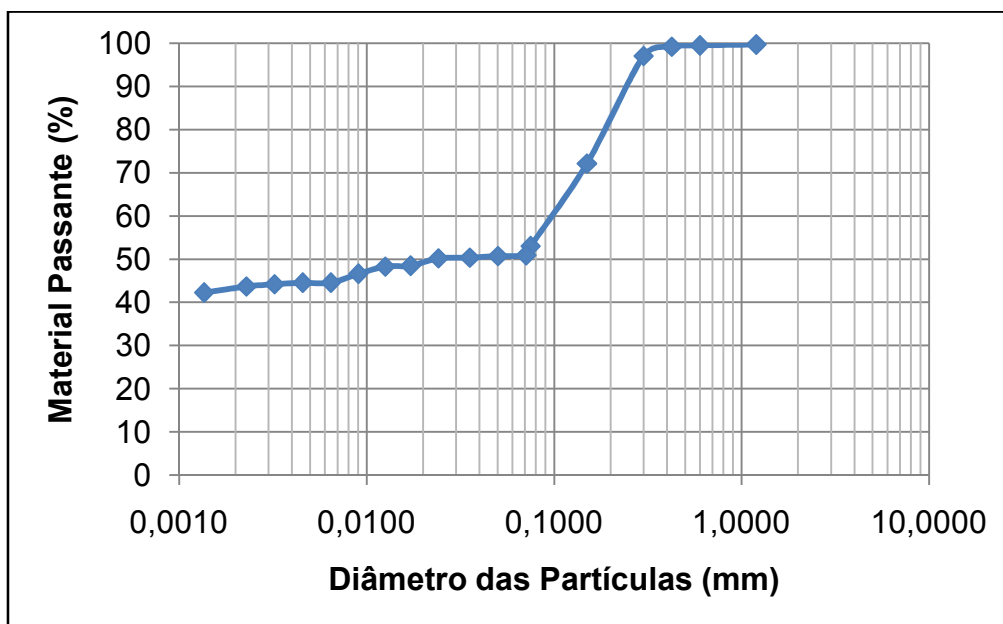
A adição de solo natural e pó de pedra será realizada para preencher os vazios do material fresado, visando beneficiar a resistência da mistura e diminuindo os índices de vazios (PIRES et. al., 2013).

O solo é proveniente da jazida localizada no município de Alegrete na latitude (29°50'13.46") Sul e longitude (55°46'27.01") Oeste. O pó de pedra é oriundo de uma pedreira, que possui rocha de origem basáltica, situada na cidade de Alegrete/RS. Esses dois materiais também encontravam-se em sacos plásticos no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da Unipampa.

Fernandes et. al. (2013) realizou ensaio de compactação com o solo utilizado obtendo a curva de compactação de maior massa específica $\gamma_d=1,69$ g/cm³ e a granulometria apresentada no Gráfico 1, permitiu defini-lo como areia fina à média argilo siltosa e, pelo Sistema Unificado de Classificação definiu-se como uma argila magra arenosa.

Na curva granulométrica do solo há falta de material abaixo de 40%, pois esse trecho refere-se ao material que foi submetido ao ensaio de sedimentação.

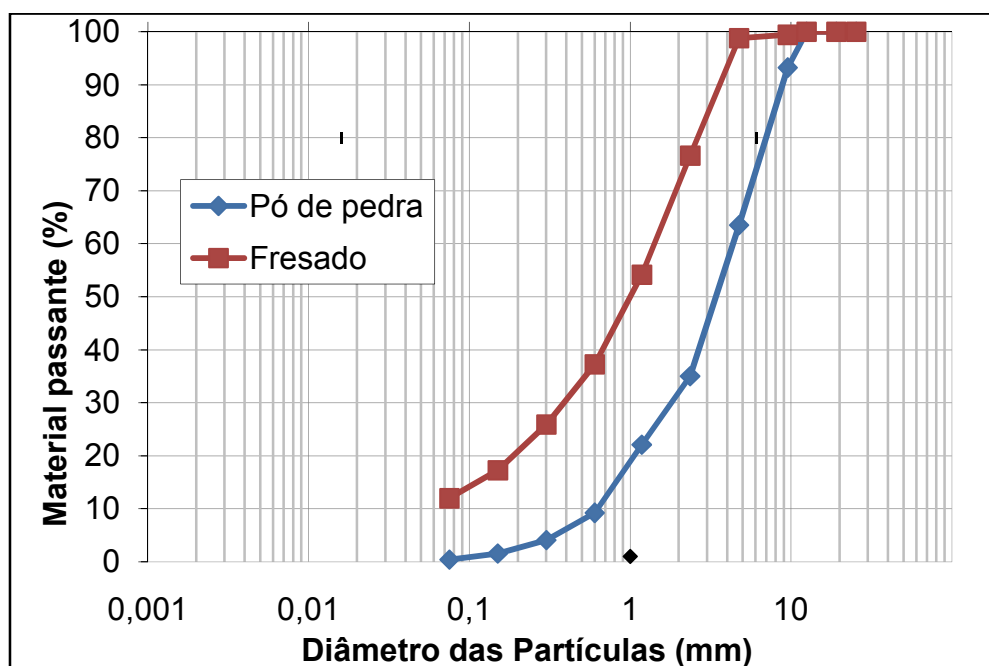
Gráfico 1 - Curva granulométrica do solo



Fonte: Fernandes et. al. (2013, p. 6)

Para o material fresado e pó de pedra foi elaborada a curva granulométrica mostrada no Gráfico 2, seguindo a NBR 7211 (ABNT, 2005). Para a curva do material fresado há um trecho faltante no gráfico, que se refere ao material levado ao ensaio de sedimentação.

Gráfico 2 - Curva granulométrica do material fresado e do pó de pedra



Fonte: Elaboração própria

Os materiais que serviram como aglomerantes foram o Cimento CP IV – 32: Cimento Portland Pozolânico e a Cal hidratada CH-II de origem calcítica, e as adições minerais Sílica da casca de arroz e Cinza Volante. O cimento e a cal foram adquiridos no comércio, a Sílica da casca de arroz foi cedida por uma empresa de beneficiamento de arroz da cidade de Alegrete e a cinza volante é oriunda da cidade de Candiota.

A sílica da casca de arroz utilizada no trabalho foi analisada por Marangon et.al. (2013) e é obtida por um sistema inovador de combustão, que proporciona controle de temperatura, resultando em uma sílica homogênea e altamente amorfa. Os limites de dióxido de silício (SiO_2) que devem ser atendidos para um material ser considerado sílica variam entre 90 e 95% e os ensaios realizados determinaram que esse material possui grande potencial pozolânico por apresentar 91,48% de SiO_2 .

3.2 Etapas para realização do estudo

A presente pesquisa pretende determinar o comportamento de diferentes composições de misturas contendo material fresado e verificar seu acréscimo referente ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral de acordo com as etapas descritas a seguir.

3.2.1 Peneiramento do material fresado, solo e pó de pedra

A primeira etapa consistiu em retirar o material fresado e o pó de pedra dos sacos plásticos e secá-los ao ar para retirar o excesso de umidade. Já o solo encontrava-se com muitos torrões, por isso foi seco em estufa a 105°C antes do peneiramento.

O material fresado foi peneirado e a fração de material utilizada foi a passante na peneira 9,5 mm mostrada na Figura 12. A escolha dessa fração ocorreu uma vez que as dimensões dos moldes são de 10 x 5 cm, e fragmentos maiores de material iriam dificultar a moldagem e compactação dos corpos de prova.

Figura 12 - Peneira utilizada para material fresado



Fonte: Elaboração própria

A fração de solo e pó de pedra utilizada nas misturas foi a passante na peneira 4,8 mm mostrada na Figura 13. As frações utilizadas, tanto para material fresado quanto para solo e pó de pedra, foram escolhidas em função do método adotado para compactação das misturas, que utiliza o compactador Marshall e segue o procedimento indicado na norma ME – 107 (DNER, 1994).

Figura 13 - Peneira utilizada para solo e pó de pedra



Fonte: Elaboração própria

3.2.2 Determinação do teor de cal para máximo aproveitamento da sílica na mistura

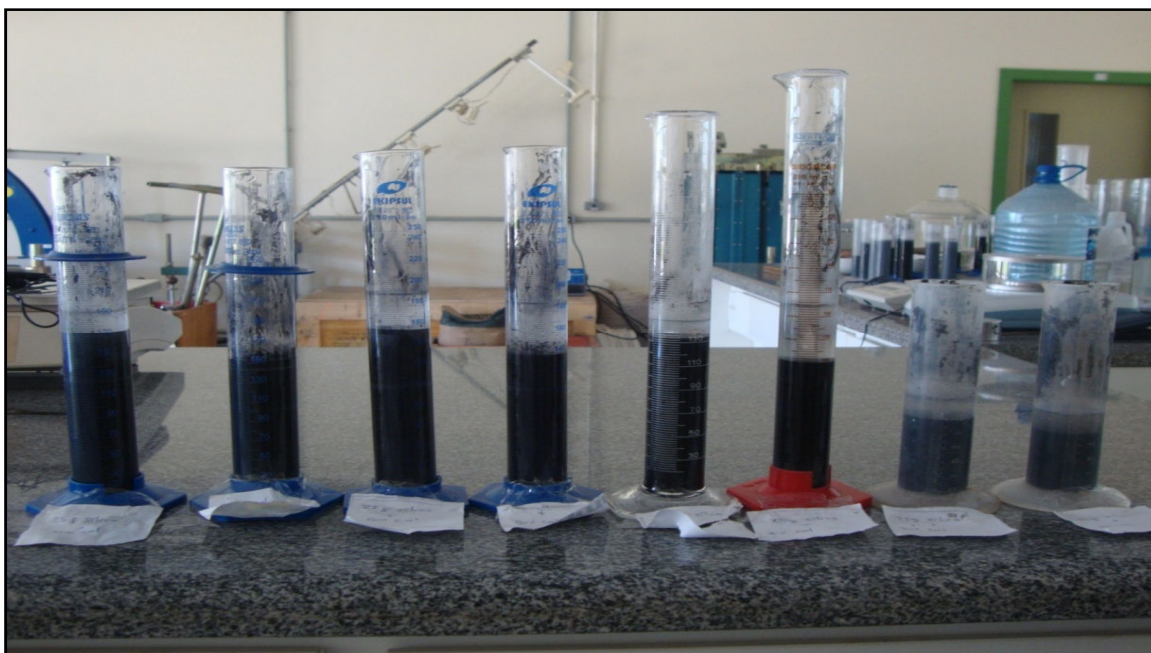
A sílica necessita de um teor mínimo de cal para que ocorram as reações químicas e essas reações irão gerar uma expansão de volume na mistura (BASSO et. al., 2003). A segunda etapa foi realizada a fim de determinar o teor de cal necessário para provocar a maior expansão na mistura com sílica da casca de arroz. Para isso foi realizado o Método Físico-químico

descrito por Casanova et. al. (1992), que consiste nos seguintes procedimentos:

- Primeiramente foi adicionado 25 g de sílica em 8 provetas de 250 ml, após em cada uma foram acrescentadas as seguintes porcentagens de cal: 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80% sobre o peso da sílica e procedeu-se a homogeneização desses materiais;
- Após concluída essa etapa foi acrescentada água destilada até o nível de 150 ml de cada proveta e agitou-se as misturas, deixando em repouso até o dia seguinte;
- Neste momento foi realizada a leitura do volume da mistura de cal e sílica dentro da proveta. Depois de cada leitura agitava-se novamente, com um bastão de vidro em movimentos circulares, até apresentar homogeneidade;
- Essa operação repetiu-se até obter leituras constantes ou decrescentes.

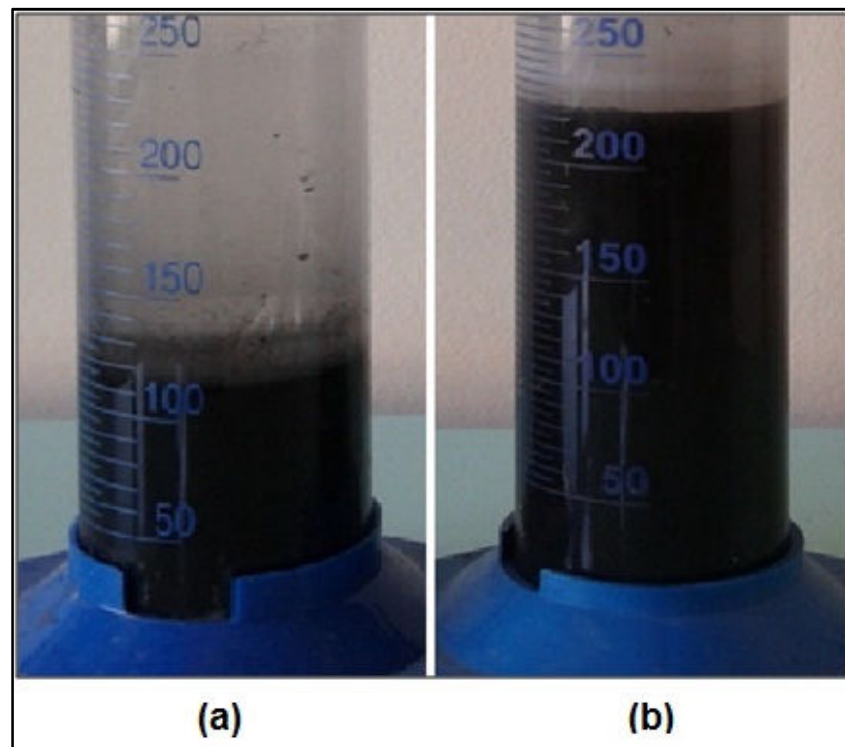
Na Figura 14 encontra-se o desenvolvimento do ensaio no 8º dia e as respectivas misturas. Na Figura 15a é mostrada a expansão no 5º dia de ensaio e na Figura 15b observa-se a expansão no 20º dia.

Figura 14 - Desenvolvimento do ensaio físico-químico



Fonte: Elaboração própria

Figura 15 - Expansão da mistura durante o ensaio



Fonte: Elaboração própria

Para montagem da Tabela 1 que contém a variação volumétrica do sedimento cal-sílica, tomou-se como base a primeira leitura de cada proveta. A Equação 1 foi utilizada para o cálculo dessa variação (BASSO et. al., 2003, p.4).

$$\Delta V_{(\%)teor} = \frac{V_{max(teor)} - V_{max(1^{\circ}dia)}}{V_{max(1^{\circ}dia)}} \quad \dots(1)$$

Sendo:

$\Delta V_{(\%)teor}$ = percentual da variação volumétrica;

$V_{max(teor)}$ = volume máximo para cada teor de cal;

$V_{max(1^{\circ}dia)}$ = volume da leitura no 1º dia de cada mistura.

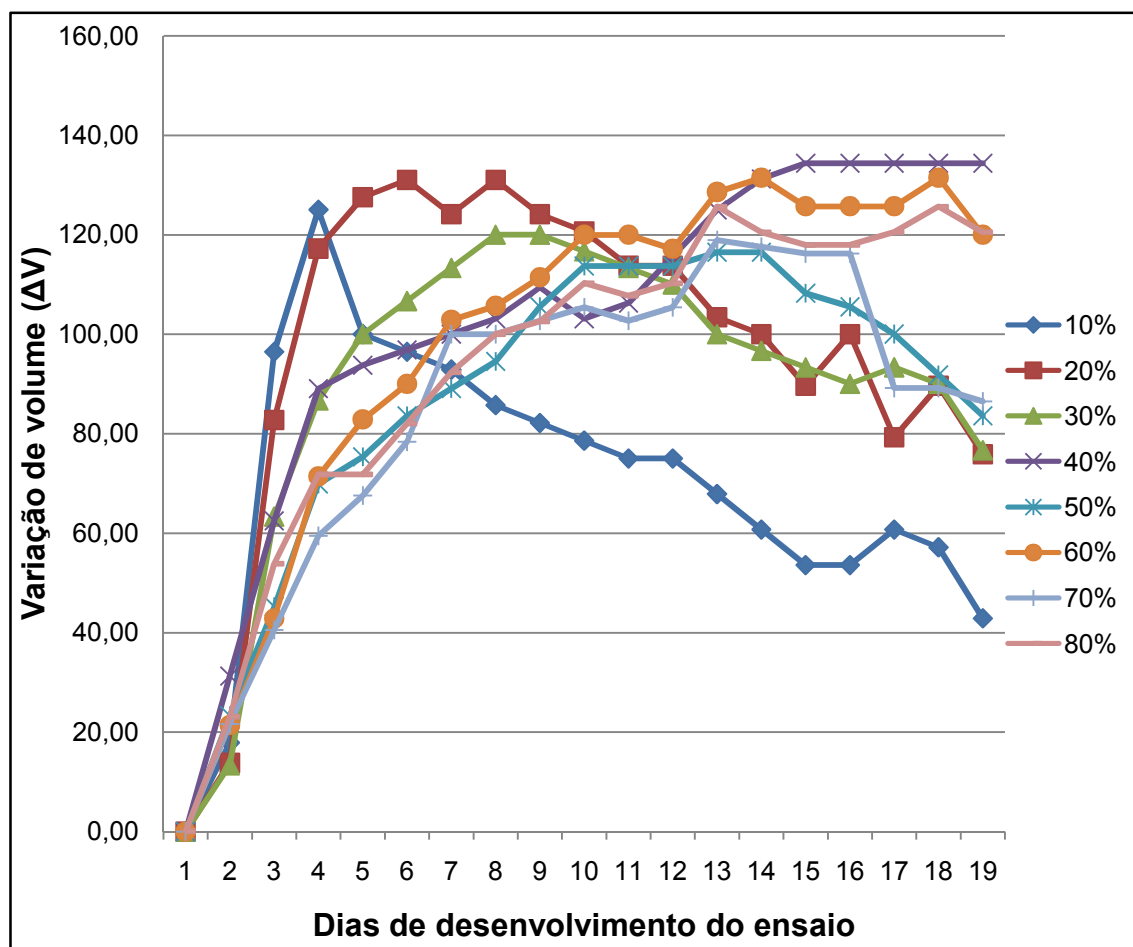
Tabela 1 - Variação volumétrica do ensaio físico-químico

Dia	% de expansão de cada teor com o tempo							
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	17,86	13,79	13,33	31,25	23,29	21,43	21,62	23,08
3	96,43	82,76	63,33	62,50	45,21	42,86	40,54	53,85
4	125,00	117,24	86,67	89,06	69,86	71,43	59,46	71,79
5	100,00	127,59	100,00	93,75	75,34	82,86	67,57	71,79
6	96,43	131,03	106,67	96,88	83,56	90,00	78,38	82,05
7	92,86	124,14	113,33	100,00	89,04	102,86	100,00	92,31
8	85,71	131,03	120,00	103,13	94,52	105,71	100,00	100,00
9	82,14	124,14	120,00	109,38	105,48	111,43	102,70	102,56
10	78,57	120,69	116,67	103,13	113,70	120,00	105,41	110,26
11	75,00	113,79	113,33	106,25	113,70	120,00	102,70	107,69
12	75,00	113,79	110,00	115,63	113,70	117,14	105,41	110,26
13	67,86	103,45	100,00	125,00	116,44	128,57	118,92	125,64
14	60,71	100,00	96,67	131,25	116,44	131,43	117,57	120,51
15	53,57	89,66	93,33	134,38	108,22	125,71	116,22	117,95
16	53,57	100,00	90,00	134,38	105,48	125,71	116,22	117,95
17	60,71	79,31	93,33	134,38	100,00	125,71	89,19	120,51
18	57,14	89,66	90,00	134,38	91,78	131,43	89,19	125,64
19	42,86	75,86	76,67	134,38	83,56	120,00	86,49	120,51

Fonte: Elaboração própria

No Gráfico 3 visualiza-se a expansão volumétrica das misturas e nota-se que a adição que provocou maior expansão corresponde a 40% de cal, sendo que a variação excedeu 130% e caracterizou-se como o valor máximo. Assim, para que a sílica tenha um melhor desempenho, deve ser utilizada a quantidade mínima de 40% de cal.

Gráfico 3 – Comparação da variação do volume



Fonte: Elaboração própria

A realização desse ensaio determinou a composição de quatro misturas a serem utilizadas neste trabalho (M9, M10, M18 e M20) descritas no item 3.2.3, porém foi adotado que a adição teria 50% de cal, pois como 40% é o valor mínimo de cal para que ocorram reações com a sílica, considerou-se que 10% seria consumido pelas reações da cal diretamente com o solo ou pó de pedra.

3.2.3 Separação dos materiais

Visando otimizar o processo de moldagem dos corpos de prova, na terceira etapa os materiais foram separados nas devidas proporções para cada mistura (Figuras 16 e 17) e colocados em sacos plásticos. Tanto para as misturas com solo quanto as com pó de pedra foram separadas as adições que seriam feitas nas devidas proporções.

Para cada mistura as quantidades de adições foram calculadas com base na mistura de 80% de fresado e 20 % de solo/pó de pedra, sendo que dividiu-se 5 kg de material fresado e 1 kg de solo/pó de pedra.

Foram separadas 10 misturas contendo fresado e solo e 10 misturas com fresado e pó de pedra e as adições mantiveram as mesmas proporções.

Figura 16 – Exemplo dos materiais utilizados nas misturas com solo



Fonte: Elaboração própria

As misturas com solo foram identificadas da seguinte forma:

- M1 – Mistura de 80% de material fresado e 20% de solo – F+So (referência);
- M2 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de solo e 5% de cimento – F+So+Ci (5%);
- M3 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de solo e 10% de cal – F+So+C (10%);
- M4 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de solo e 10% de sílica da casca de arroz – F+So+Si (10%);

- M5 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de solo e 10% de cinza volante – F+So+Cv (10%);
- M6 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de solo, 5% de cimento e 5% de cinza volante – F+So+Ci+Cv (5%,5%);
- M7 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de solo, 10% de cal e 5% de cinza volante – F+So+C+Cv (10%,5%);
- M8 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de solo, 5% de cimento e 5% de sílica da casca de arroz – F+So+Ci+Si (5%,5%);
- M9 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de solo, 10% de cal e 5% de sílica da casca de arroz – F+So+C+Si (10%,5%);
- M10 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de solo, 5% de cal e 10% de sílica da casca de arroz – F+So+C+Si (5%,10%).

Figura 17 – Exemplo dos materiais utilizados nas misturas com pó de pedra



Fonte: Elaboração própria

As misturas contendo pó de pedra foram identificadas da seguinte forma:

- M11 – Mistura de 80% de material fresado e 20% de pó de pedra - F+P (referência);
- M12 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de pó de pedra e 5% de cimento – F+P+Ci (5%);
- M13 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de pó de pedra e 10% de cal – F+P+C (10%);
- M14 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de pó de pedra e 10% de sílica da casca de arroz – F+P+Si (10%);
- M15 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de pó de pedra e 10% de cinza volante – F+P+Cv (10%);
- M16 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de pó de pedra, 5% de cimento e 5% de sílica da casca de arroz – F+P+Ci+Si (5%,5%);
- M17 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de pó de pedra, 5% de cimento e 5% de cinza volante – F+P+Ci+Cv (5%,5%);
- M18 - Mistura de 80% de material fresado, 20% de pó de pedra, 10% de cal e 5% de sílica da casca de arroz – F+P+C+Si (10%,5%);
- M19 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de pó de pedra, 10% de cal e 5% de cinza volante – F+P+C+Cv (10%,5%);
- M20 – Mistura de 80% de material fresado, 20% de pó de pedra, 5% de cal e 10% de sílica da casca de arroz – F+P+C+Si (5%,10%).

O Quadro 1 apresenta um resumo com as nomenclaturas adotadas para as misturas e os materiais componentes das mesmas.

Quadro 1 - Nomenclatura das misturas

M1	F+So
M2	F+So+Ci (5%)
M3	F+So+C (10%)
M4	F+So+Si (10%)
M5	F+So+CV (10%)
M6	F+So+Ci+CV (5%,5%)
M7	F+So+C+CV (10%,5%)
M8	F+So+Ci+Si (5%,5%)
M9	F+So+C+Si (10%,5%)
M10	F+So+C+Si (5%,10%)
M11	F+P
M12	F+P+Ci (5%)
M13	F+P+C (10%)
M14	F+P+Si (10%)
M15	F+P+CV (10%)
M16	F+P+Ci+Si (5%,5%)
M17	F+P+Ci+CV (5%,5%)
M18	F+P+C+Si (10%,5%)
M19	F+P+C+CV (10%,5%)
M20	F+P+C+Si (5%,10%)

Fonte: Elaboração própria

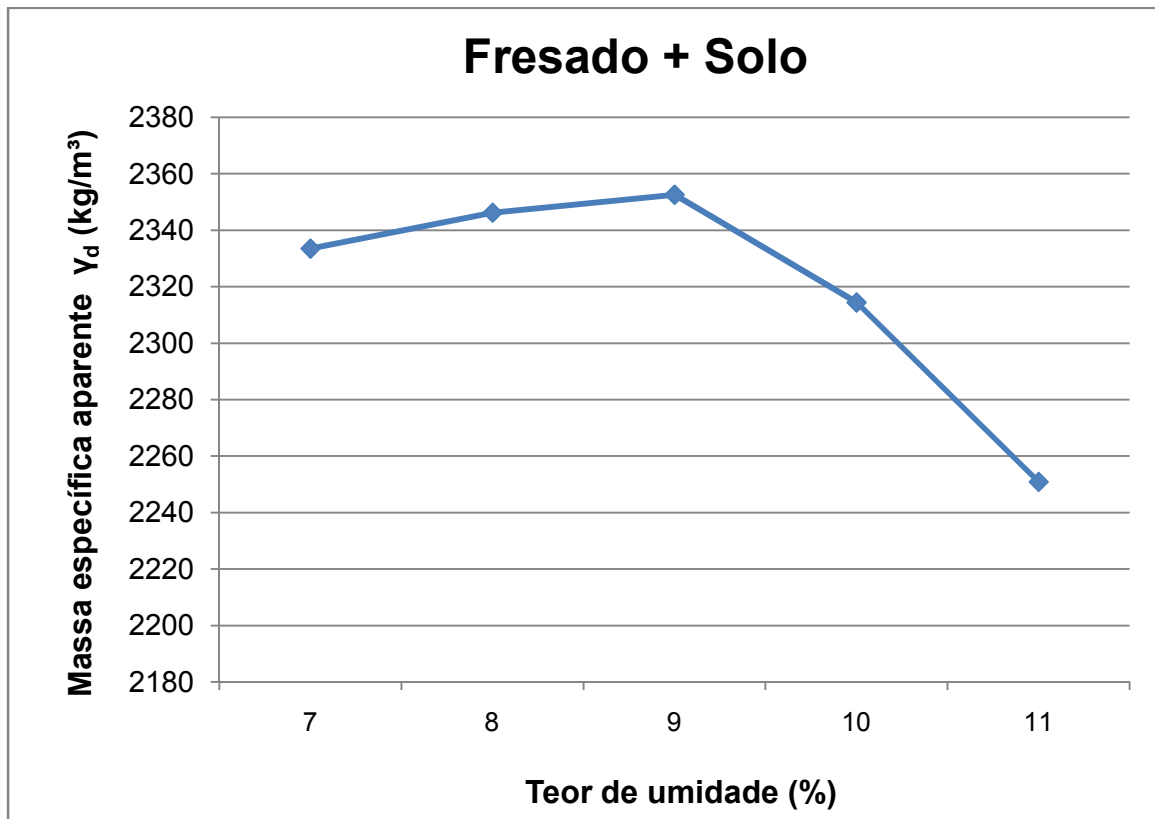
3.2.4 Determinação do teor de umidade

A compactação tem por objetivo a redução de vazios no solo comprimido e aumento da massa específica aparente do solo, por meio da aplicação de energia mecânica. O acréscimo da massa específica implica em maior quantidade de partículas de solo por unidade de volume, resultando em aumento da resistência mecânica e melhoria da impermeabilidade (SENÇO, 2007).

Visando definir a quantidade de água a ser adicionada às misturas, na quarta etapa foi realizado o ensaio de compactação na Metodologia Proctor Modificado segundo as determinações da NBR 7182 (ABNT, 1986), que consiste em determinar a curva de umidade ótima. Devem ser moldados no mínimo 5 corpos de prova em diferentes umidades, sendo compactados em 5 camadas e aplicando-se 55 golpes em cada uma.

O Gráfico 4 mostra a curva de compactação da mistura de 80% de material fresado e 20% de solo, onde é possível observar que a mistura apresentou a maior massa específica $\gamma_d=2352,55 \text{ kg/m}^3$ e a umidade ótima de 9%.

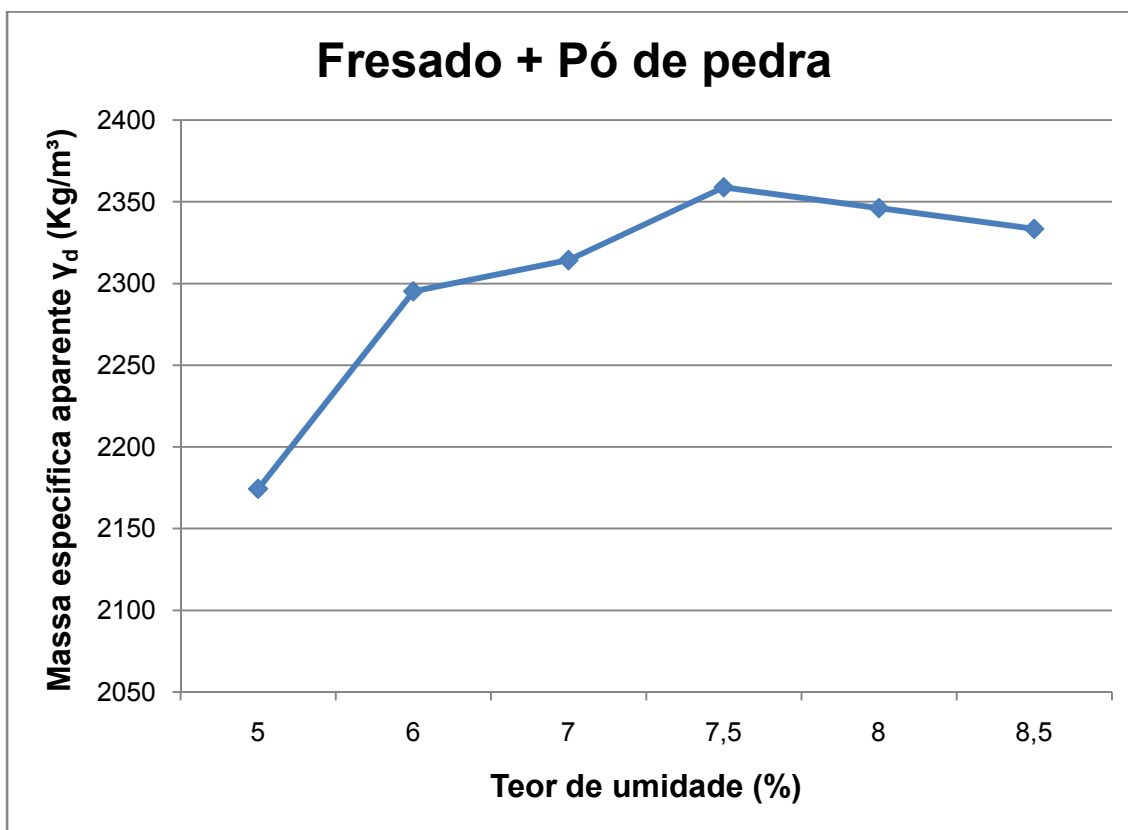
Gráfico 4 – Curva de compactação do material fresado com solo



Fonte: Elaboração própria

Para a mistura de 80% de material fresado e 20% de pó de pedra foi encontrada a maior massa específica $\gamma_d=2358,91 \text{ kg/m}^3$ e a umidade ótima de 7,5%, conforme pode ser observado no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Curva de compactação do material fresado com pó de pedra



Fonte: Elaboração própria

Para as misturas que continham adições minerais e de aglomerantes não foi realizado o ensaio do Proctor Modificado, pois como o objetivo da pesquisa é realizar varias adições com diferentes teores e definir a mistura que apresenta melhor desempenho no ensaio de resistência à tração por compressão diametral, a realização do ensaio de Proctor para todas as misturas propostas exigiria um maior tempo de execução. Com o resultado deste trabalho serão definidas as adições que proporcionam maior aumento na resistência à tração por compressão diametral, e então será possível realizar os ensaios que definam as particularidades desta mistura.

3.2.5 Moldagem dos corpos de prova

Na quinta etapa seguiu-se o exposto na ME – 180 (DNER, 1994), onde primeiramente realizou-se a mistura a seco dos materiais que haviam sido separados, até que houvesse a homogeneização dos mesmos e então se executou a mistura úmida, adicionando o teor de umidade ótimo definido pela curva de compactação e procedeu-se a compactação dos corpos de prova (CP's), utilizando o compactador Marshall (Figura 18) disponível no Laboratório de Solos e Geotecnia da Unipampa. O número de golpes do compactador Marshall foi definido de forma a apresentar a mesma energia de compactação do ensaio Proctor Modificado.

Figura 18 - Compactador Marshall



Fonte: Elaboração própria

As misturas de material fresado com solo e pó de pedra possuíam massa de 6 kg suficiente para moldar 6 corpos de prova para cada mistura e a quantidade de água a ser adicionada foi calculada com base nesse valor, resultando que para a mistura de fresado e solo necessitou-se de 540 g de água e para a mistura de fresado e pó de pedra de 450 g.

A norma ME – 136 (DNIT, 2010) determina que o CP destinado ao ensaio de tração deve apresentar forma cilíndrica, com altura entre 3,5 cm e 6,5 cm e diâmetro de 10 +/- 2 cm. Visando atingir as dimensões especificadas, calculou-se pela Equação 2 a massa necessária para obter um CP com altura

de 5 cm e diâmetro de 10 cm, utilizando os dados da curva de compactação, o que resultou em uma massa de 950 g para moldar um CP.

$$M = V_{molde} \times \gamma_d \quad \dots (2)$$

Sendo:

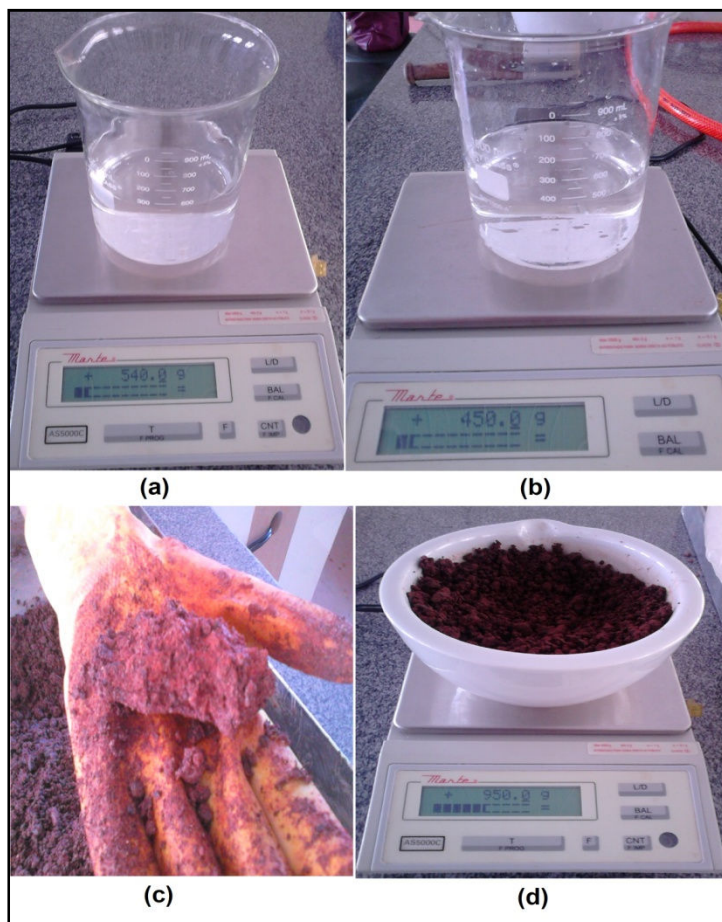
M = quantidade de material para moldagem de um CP (g);

V_{molde} = volume desejado do corpo de prova (m^3);

γ_d = máxima massa específica aparente (g/m^3).

A Figura 19a demonstra a quantidade de água das misturas de fresado e solo, a Figura 19b a quantidade para as contendo fresado e pó de pedra, na Figura 19c é mostrado o aspecto da massa após a mistura e na Figura 19d exemplifica-se a quantidade de material utilizado na moldagem de cada CP, a fim de obter as dimensões mínimas especificadas em norma.

Figura 19 – Quantidade de água adicionada nas misturas, aspecto da mistura com adição de água e material necessário para moldagem de um corpo de prova



Fonte: Elaboração própria

Para compactar os CP's adotou-se a energia de compactação modificada, então foi determinado o número de golpes necessários utilizando a Equação 3, que pode ser encontrada na norma ME – 181 (DNER, 1994):

$$n = \frac{E \times V}{9,8 \times P \times H \times Nc} \quad \dots (3)$$

Sendo:

n = número de golpes por camada;

E = energia de compactação (N.m/m³);

V = volume do material compactado (m³);

P = massa do soquete (kg);

H = altura de queda do soquete (m);

Nc = número de camadas.

Para este estudo os dados da fórmula são: E = 2690000 N.m/m³; V=3,3 x 10⁻⁴ m³; P = 4,54 kg; H = 0,46 m e Nc = 1, resultando em um número de golpes igual a 52, porém no momento da compactação foi observado que o soquete era levantado um pouco acima da altura de queda previamente analisada, dessa forma como houve alteração na altura de queda do soquete, foi feita uma correção do número de golpes para manter a energia estabelecida, assim foram adotados 50 golpes para compactação dos CP's em uma única camada como observa-se na Figura 20.

Figura 20 - Número de golpes utilizado para compactação dos CP's em camada única



Fonte: Elaboração própria

Efetua-se a retirada dos CP's dos moldes 24 horas após a moldagem dos mesmos. Seguindo o procedimento especificado na norma ME 181 (DNER,1994), a desmoldagem foi realizada utilizando-se um macaco hidráulico tipo garrafa, tendo-se o cuidado de apoiar o CP sobre uma superfície lisa e plana para evitar fratura ou deformação. Os CP's foram identificados e tiveram sua altura medida com paquímetro conforme o prescrito pela norma ME 107 (DNER, 1994). A Figura 21 mostra o macaco hidráulico utilizado para desmoldagem dos CP's e a Figura 22 ilustra os CP's identificados.

Figura 21 - Macaco hidráulico tipo garrafa utilizado para desmoldagem



Fonte: Elaboração própria

Figura 22 - Identificação dos corpos de prova



Fonte: Elaboração própria

3.2.6 Procedimento de cura e rompimento dos corpos de prova

Na sexta etapa realizou-se a cura úmida dos corpos de prova em ambiente com temperatura controlada de 22 °C. Utilizou-se uma caixa d'água com capacidade de 500 litros, onde foram montados dois níveis utilizando chapas de madeira e adicionou-se água até aproximadamente 30 cm, a fim de evitar a perda de umidade, como pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 - Cura dos corpos de prova



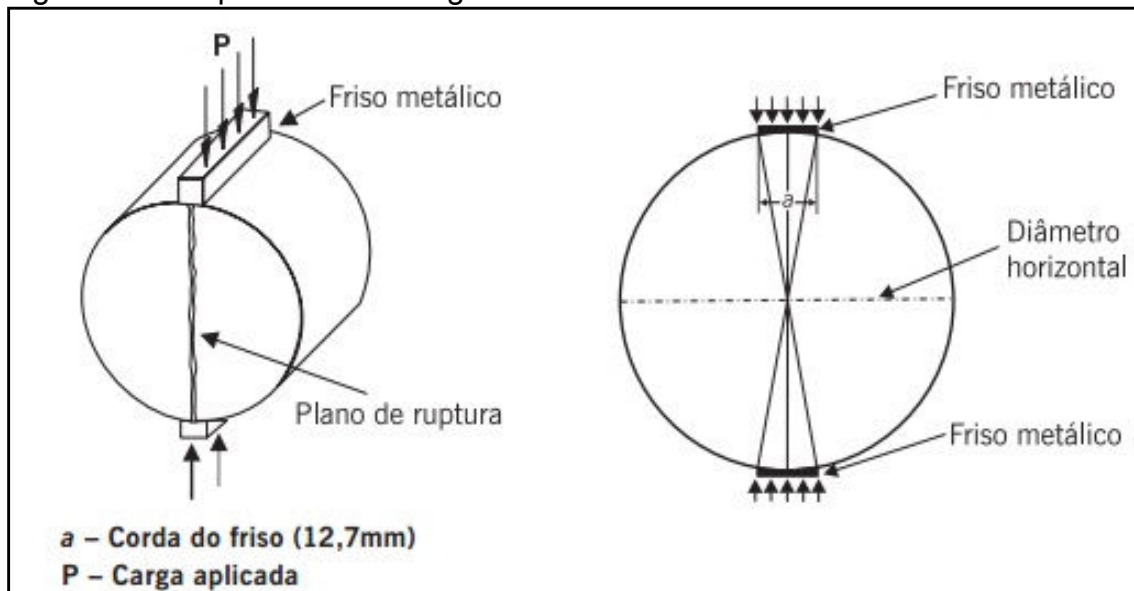
Fonte: Elaboração própria

A ruptura foi realizada aos 28 dias, pois esse período é considerado suficiente para que a maioria das reações químicas tenha ocorrido entre as adições minerais e os aglomerantes. Então realizou-se o ensaio de compressão diametral, seguindo a orientação da norma ME 181 (DNER, 1994). Três CP's foram colocados submersos em água 24 horas antes da execução do ensaio, a fim de tentar reproduzir uma situação de projeto, como por exemplo, durante a execução de uma estrada em períodos de chuva intensa, onde a camada poderia se encontrar saturada e, dispendo-os submersos buscou-se avaliar o comportamento de cada mistura nessa situação.

A análise da resistência à tração por compressão diametral ou tração indireta é obtida pela realização do ensaio brasileiro de compressão diametral desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro. Adotou-se a aplicação do mesmo para misturas asfálticas a partir de 1972, já que seu desenvolvimento inicial foi para concreto de cimento Portland, porém com a diferença de que a transmissão das forças seria através de frisos com 1,27 cm de largura e curvatura adequada ao corpo de prova cilíndrico (BERNUCCI et. al., 2006). A

Figura 24 exibe o esquema de montagem para realização do ensaio de acordo com o especificado pela norma ME 136 (DNIT, 2010).

Figura 24 - Esquema de montagem do ensaio



Fonte: Bernucci et. al. (2006, p.309)

A realização dos ensaios ocorreu no Laboratório de Materiais de Construção Civil. Foi utilizada uma Máquina Universal de Ensaio da marca EMIC, com capacidade máxima de 200 kN, modelo DL20.000MF e a velocidade de aplicação da carga de 0,8 mm/s. O programa que acompanha a máquina é o software Tesc, o qual fornece os dados da força máxima de ruptura. Para calcular a resistência à tração por compressão diametral empregou-se a Equação 4, que consta na norma ME 181 (DNER, 1994).

$$R_{cd} = \frac{2 \times F}{\pi \times d \times h} \quad \dots (4)$$

Sendo:

R_{cd} = Resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = carga máxima obtida do ensaio (N);

d = diâmetro do corpo de prova (mm);

h = altura do corpo de prova (mm).

A Figura 25 mostra a fissura durante a ruptura ocorrendo no sentido vertical, o que indica que a deformação crítica é perpendicular ao diâmetro solicitado (FALCÃO; SOARES, 2002).

Figura 25 - Fissuração do CP no momento da ruptura



Fonte: Elaboração própria

Executado o ensaio de compressão diametral, eram separadas amostras dos CP's que não ficaram submersos (CP seco) e dos que ficaram submersos (CP submerso) de cada mistura, que eram pesadas e então colocadas na estufa a 105°C. Após 3 dias, as amostras eram retiradas da estufa e tinham novamente seu peso medido, a fim de determinar a umidade que se encontravam logo após o ensaio.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para avaliar quais misturas apresentam maior resistência à tração por compressão diametral, visando sua aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos. As tensões de tração apresentadas são tensões médias dos valores obtidos nos ensaios, em que foram utilizadas as tabelas constantes nos Anexos.

Também estão expostos os valores aproximados da resistência à compressão simples obtidos com base nos dados da resistência à tração por compressão diametral, visando comparação com o valor mínimo exigido pela norma ES 305 (DNER, 1997).

4.1 Resistência à tração por compressão diametral

Na Tabela 2 e na Tabela 3 são apresentados os valores das tensões médias dos CP's secos das misturas de fresado e solo e dos CP's submersos, respectivamente, e no Gráfico 6 as comparações.

Tabela 2 - Tensões médias de tração indireta dos CP's secos das misturas de fresado e solo

Fresado + Solo		
Mistura	Aglomerante Adição mineral	Tensão (MPa)
M1	-	0,12
M2	Cimento (5%)	0,77
M3	Cal (10%)	0,40
M4	Sílica (10%)	0,35
M5	Cinza volante (10%)	0,43
M6	Cimento (5%); Cinza volante (5%)	0,83
M7	Cal (10%); Cinza volante (5%)	0,71
M8	Cimento(5%); Sílica (5%)	1,09
M9	Cal (10%); Sílica (5%)	0,93
M10	Cal (5%); Sílica (10%)	1,00

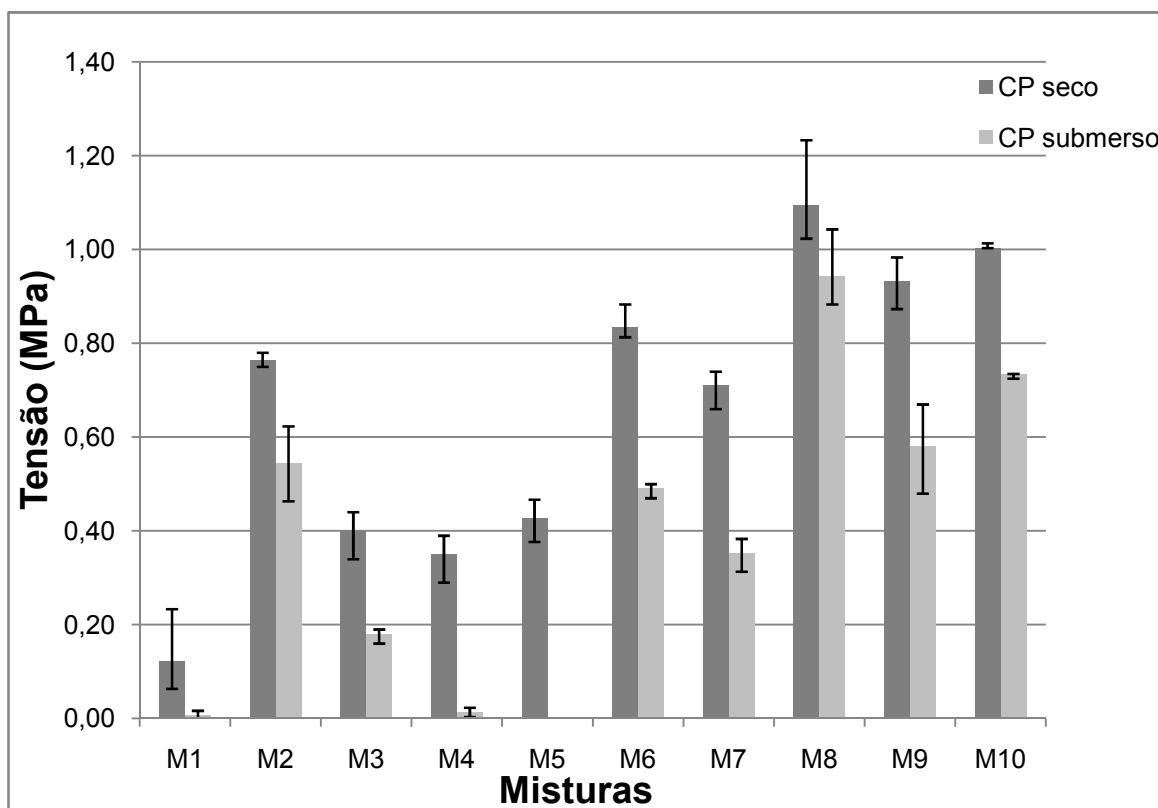
Fonte: Elaboração própria

Tabela 3 - Tensões médias de tração indireta dos CP's submersos das misturas de fresado e solo

Fresado + Solo		
Mistura	Aglomerante Adição mineral	Tensão (MPa)
M1	-	0,01
M2	Cimento (5%)	0,54
M3	Cal (10%)	0,18
M4	Sílica (10%)	0,01
M5	Cinza volante (10%)	-
M6	Cimento (5%); Cinza volante (5%)	0,49
M7	Cal (10%); Cinza volante (5%)	0,35
M8	Cimento(5%); Sílica (5%)	0,94
M9	Cal (10%); Sílica (5%)	0,58
M10	Cal (5%); Sílica (10%)	0,74

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 6 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas de material fresado e solo



Fonte: Elaboração própria

Pode-se observar que dentre das misturas de fresado e solo a que demonstrou maior resistência à tração por compressão diametral foi a mistura denominada M8, que tem como adição 5% de cimento e 5% de sílica da casca de arroz. Mas é importante ressaltar a amplitude da barra de erros nessa mistura, que torna o resultado menos confiável, então levando-se em conta uma menor variação nesta barra, seria considerada a mistura M10 como a melhor, que possui adições de 5% de cal e 10% de sílica da casca de arroz.

Também é possível visualizar o decréscimo nas tensões dos CP's que ficaram submersos antes do rompimento, sendo que os valores nulos referem-se aos casos em que não foi possível levar os CP's para romper, já que encontravam-se “desmanchados”, como mostra a Figura 25. As misturas que ficaram nessa condição não possuíam aglomerantes.

Figura 26 - CP's que desmancharam antes do rompimento



Fonte: Elaboração própria

Para as misturas de fresado e pó de pedra visualiza-se a Tabela 4 e Tabela 5 que apresenta os valores das tensões médias dos CP's secos e dos CP's submersos, respectivamente, e no Gráfico 7 as mesmas são comparadas.

Tabela 4 - Tensões médias de tração indireta dos CP's secos das misturas de fresado e pó de pedra

Fresado + Pó de pedra		
Mistura	Aglomerante Adição mineral	Tensão (MPa)
M11	-	0,05
M12	Cimento (5%)	0,36
M13	Cal (10%)	0,21
M14	Sílica (10%)	0,06
M15	Cinza volante (10%)	0,06
M16	Cimento(5%); Sílica (5%)	1,15
M17	Cimento (5%); Cinza volante (5%)	0,59
M18	Cal (10%); Sílica (5%)	0,88
M19	Cal (10%); Cinza volante (5%)	0,42
M20	Cal (5%); Sílica (10%)	0,90

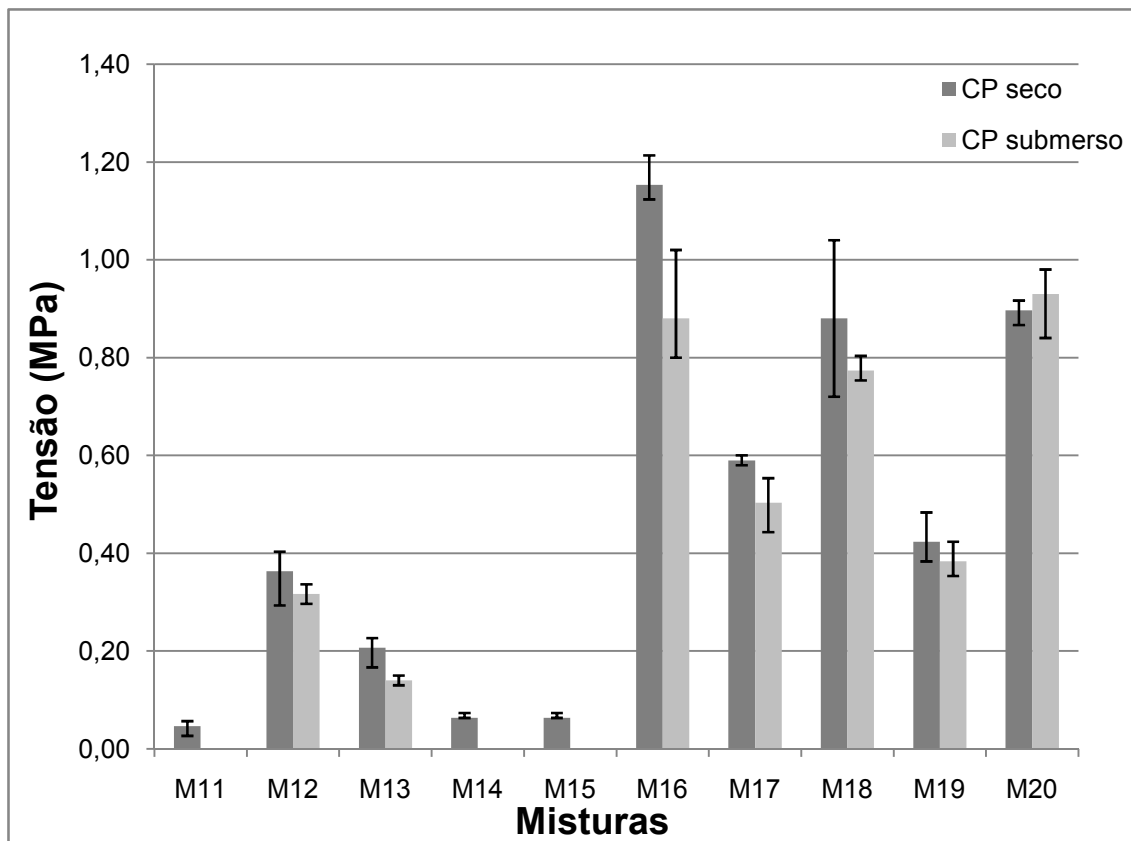
Fonte: Elaboração própria

Tabela 5 - Tensões médias de tração indireta dos CP's submersos das misturas de fresado e pó de pedra

Fresado + Pó de pedra		
Mistura	Aglomerante Adição mineral	Tensão (MPa)
M11	-	-
M12	Cimento (5%)	0,32
M13	Cal (10%)	0,14
M14	Sílica (10%)	-
M15	Cinza volante (10%)	-
M16	Cimento(5%); Sílica (5%)	0,88
M17	Cimento (5%); Cinza volante (5%)	0,50
M18	Cal (10%); Sílica (5%)	0,77
M19	Cal (10%); Cinza volante (5%)	0,38
M20	Cal (5%); Sílica (10%)	0,93

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 7 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas de material fresado e pó de pedra



Fonte: Elaboração própria

Nota-se que entre as misturas de fresado e pó de pedra a que manifestou maior valor de tensão resistente foi a mistura denominada M16, que contém como adição 5% de cimento e 5% de sílica da casca de arroz. Mas considerando-se que a abrangência da barra de erros dessa mistura é maior que a da M20, contendo adições de 5% de cal e 10% de sílica da casca de arroz, pode-se dizer que esta também se trata de uma boa opção para aplicação em camadas de pavimentos.

Os valores nulos das resistências dos CP's submersos também se devem ao fato dos mesmos terem “desmanchados” quando submersos em água.

Comparando-se as adições de cimento e cal, tanto para as misturas de fresado e solo (M2 e M3) quanto para as misturas de fresado e pó de pedra (M12 e M13), é possível afirmar que as contendo solo apresentaram maior variação, quando comparadas as tensões dos CP's secos e dos CP's submersos, enquanto que para as misturas com pó de pedra, essa diferença é menor. Isso se deve ao fato que o solo quando exposto à água apresenta uma diminuição da resistência, conforme afirma Cunha, Vieira e Magalhães (2002).

As adições de cinza volante e sílica tiveram melhor desempenho junto às misturas de fresado e solo (M4 e M5) quando compara-se as mesmas adições nas misturas de fresado e pó de pedra (M14 e M15).

Analisando as misturas de fresado e solo que foram colocadas submersas, o maior valor obtido entre as tensões foi o correspondente à mistura M8, que contém 5% de cimento e 5% de sílica da casca de arroz. Entre as misturas de fresado e pó de pedra, nota-se que a mistura que mostrou a maior tensão foi a M20, que recebeu adição de 5% de cal e 10% de sílica da casca de arroz.

A Tabela 6 apresenta um resumo das tensões médias obtidas e das umidades, sendo que todas as amostras tiveram a sua umidade medida após a etapa de rompimento do corpo de prova.

Tabela 6 - Tabela resumo dos resultados

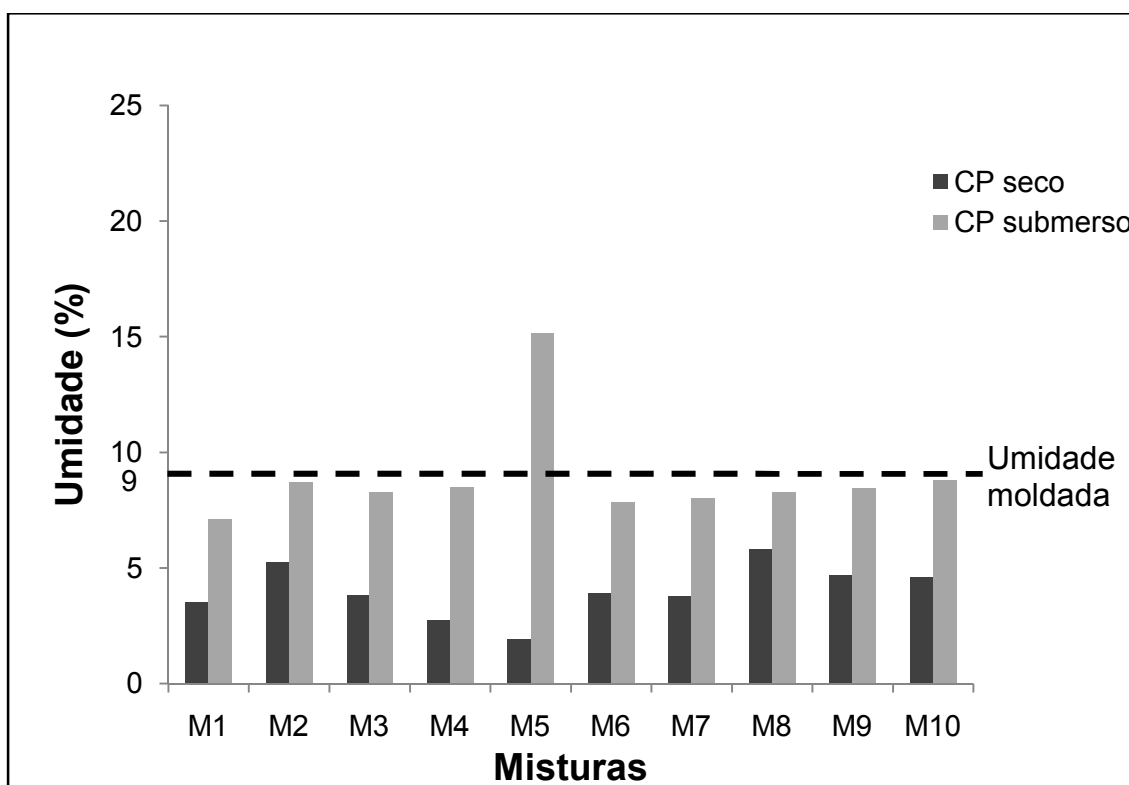
	Mistura	Tensão Média (MPa)	Umidade moldada (%)	Umidade ensaiada (%)
M1	CP seco	0,12	9	3,54
	CP submerso	0,01	9	7,10
M2	CP seco	0,77	9	5,25
	CP submerso	0,54	9	8,71
M3	CP seco	0,40	9	3,83
	CP submerso	0,18	9	8,28
M4	CP seco	0,35	9	2,76
	CP submerso	0,01	9	8,49
M5	CP seco	0,43	9	1,93
	CP submerso	-	9	15,16
M6	CP seco	0,83	9	3,93
	CP submerso	0,49	9	7,85
M7	CP seco	0,71	9	3,78
	CP submerso	0,35	9	8,01
M8	CP seco	1,09	9	5,83
	CP submerso	0,94	9	8,27
M9	CP seco	0,93	9	4,69
	CP submerso	0,58	9	8,46
M10	CP seco	1,00	9	4,62
	CP submerso	0,74	9	8,81
M11	CP seco	0,05	7,5	2,01
	CP submerso	-	7,5	21,17
M12	CP seco	0,36	7,5	3,01
	CP submerso	0,32	7,5	8,33
M13	CP seco	0,21	7,5	2,12
	CP submerso	0,14	7,5	8,12
M14	CP seco	0,06	7,5	3,16
	CP submerso	-	7,5	18,29
M15	CP seco	0,06	7,5	1,71
	CP submerso	-	7,5	14,33
M16	CP seco	1,15	7,5	5,16
	CP submerso	0,88	7,5	7,78
M17	CP seco	0,59	7,5	4,08
	CP submerso	0,50	7,5	7,82
M18	CP seco	0,88	7,5	4,78
	CP submerso	0,77	7,5	9,53
M19	CP seco	0,42	7,5	3,19
	CP submerso	0,38	7,5	7,98
M20	CP seco	0,90	7,5	4,90
	CP submerso	0,93	7,5	9,15

Fonte: Elaboração própria

4.2 Análise da umidade das misturas

O dado da perda de umidade deixa claro que a forma adotada para cura dos corpos de prova não foi a ideal, pois como citado anteriormente, colocando os CP's submersos esperava-se que os mesmos atingissem um nível de saturação, mesmo sabendo que isso acarretaria em uma menor resistência. O Gráfico 8 apresenta a comparação da umidade ensaiada com a umidade que foram moldados os CP's das misturas de fresado e solo.

Gráfico 8 – Comparação da umidade das misturas de fresado e solo

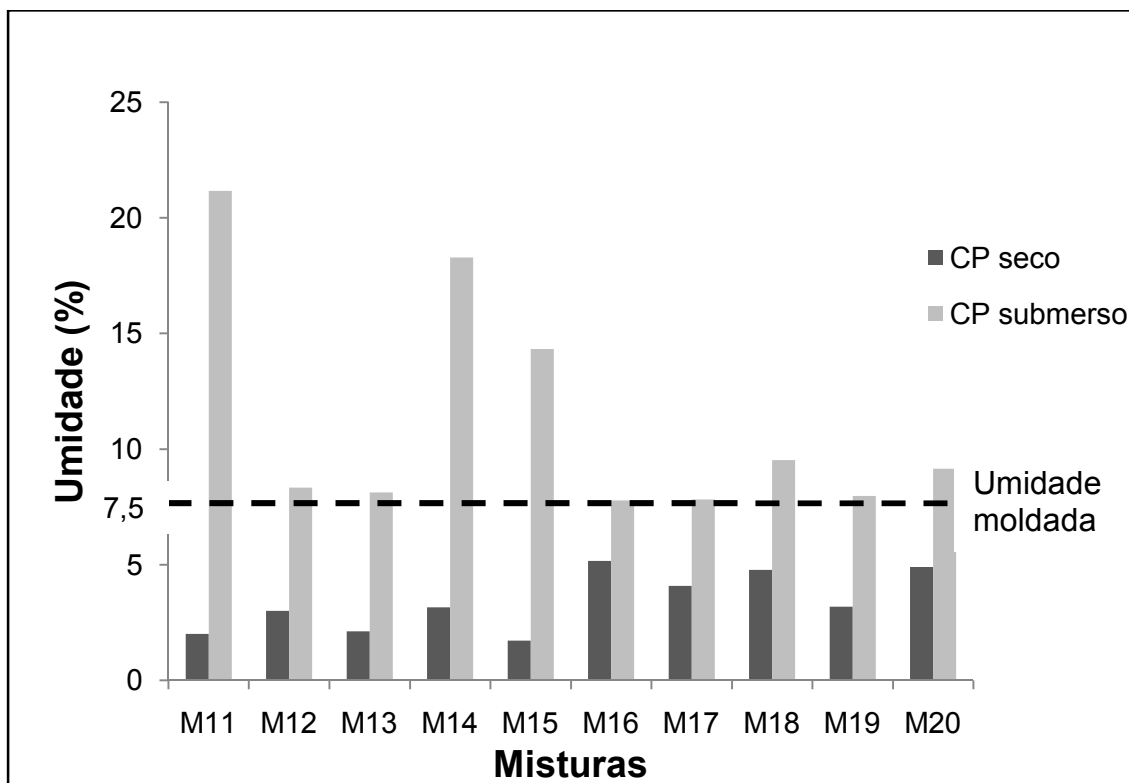


Fonte: Elaboração própria

É visível que a umidade presente nos CP's secos após o tempo de cura era muito menor que a umidade com que foram moldados. Nos CP's submersos a umidade aproximou-se à de moldagem, mas a maioria das misturas ainda encontrava-se com valores menores, sendo que o valor máximo corresponde à mistura M5 que desmanchou, a qual possuía adição de 10% de cinza volante. Talvez seja possível afirmar que essa mistura atingiu seu nível máximo de saturação.

No Gráfico 9 são comparadas a umidade ensaiada com a umidade de moldagem dos CP's das misturas de fresado e pó de pedra.

Gráfico 9 – Comparação da umidade das misturas de fresado e pó de pedra



Fonte: Elaboração própria

Ao analisar esses dados nota-se que os CP's secos estavam com a umidade mais próxima à moldada se comparados com os dados das misturas de fresado e solo. Quanto aos CP's submersos conseguiu-se atingir a umidade utilizada na moldagem dos mesmos, com alguns ficando acima deste valor.

Os valores mais elevados correspondem aos casos em que os CP's desmancharam, sendo que a mistura M11 é a referência, composta apenas de fresado e solo, a mistura M14 com adição de 10% de sílica e a mistura M15 contendo 10% de cinza volante. A ausência de agentes cimentantes nessas misturas explica a desagregação das mesmas na presença de umidade.

4.3 Resistência à compressão simples

Os resultados obtidos no ensaio de compressão diametral referem-se ao comportamento das misturas submetidas à tração, porém estudos existentes sobre materiais destinados ao uso em pavimentação avaliam a resistência à compressão simples, pelo fato da norma ES 305 (DNER, 1997) exigir um valor mínimo de resistência aos 7 dias de 2,1 MPa em camadas de base em solo cimento.

Tratando-se de concreto, a norma NBR 6118 (2003, p.22) afirma que “a resistência à tração indireta f_{ct} pode ser considerada igual a $0,9 f_{ct,sp}$ ”, sendo $f_{ct,sp}$ a resistência à compressão. Com base nisso pode-se afirmar que a resistência à tração corresponde aproximadamente à 10% da resistência à compressão. Essa transformação é válida e apresenta um fator de segurança, pois conforme apresentado por Pires et. al. (2013) uma mistura contendo 5,37% de adição de cimento atinge 2,1 MPa de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura, enquanto que para o mesmo teor de adição, a resistência à tração por compressão diametral apresentou acréscimo de 51,3% entre as curas de 7 e 28 dias.

Baseado nessa relação, os dados de resistência à tração por compressão diametral das misturas de fresado e solo foram transformados para compressão simples. Os mesmos estão apresentados nas Tabelas 7 e 8 e no Gráfico 10.

Tabela 7 - Tensões médias de compressão simples dos CP's secos das misturas de fresado e solo

Fresado + Solo		
Mistura	Aglomerante Adição mineral	Tensão (MPa)
M1	-	1,23
M2	Cimento (5%)	7,65
M3	Cal (10%)	4,00
M4	Sílica (10%)	3,50
M5	Cinza volante (10%)	4,27
M6	Cimento (5%); Cinza volante (5%)	8,33
M7	Cal (10%); Cinza volante (5%)	7,10
M8	Cimento(5%); Sílica (5%)	10,93
M9	Cal (10%); Sílica (5%)	9,33
M10	Cal (5%); Sílica (10%)	10,03

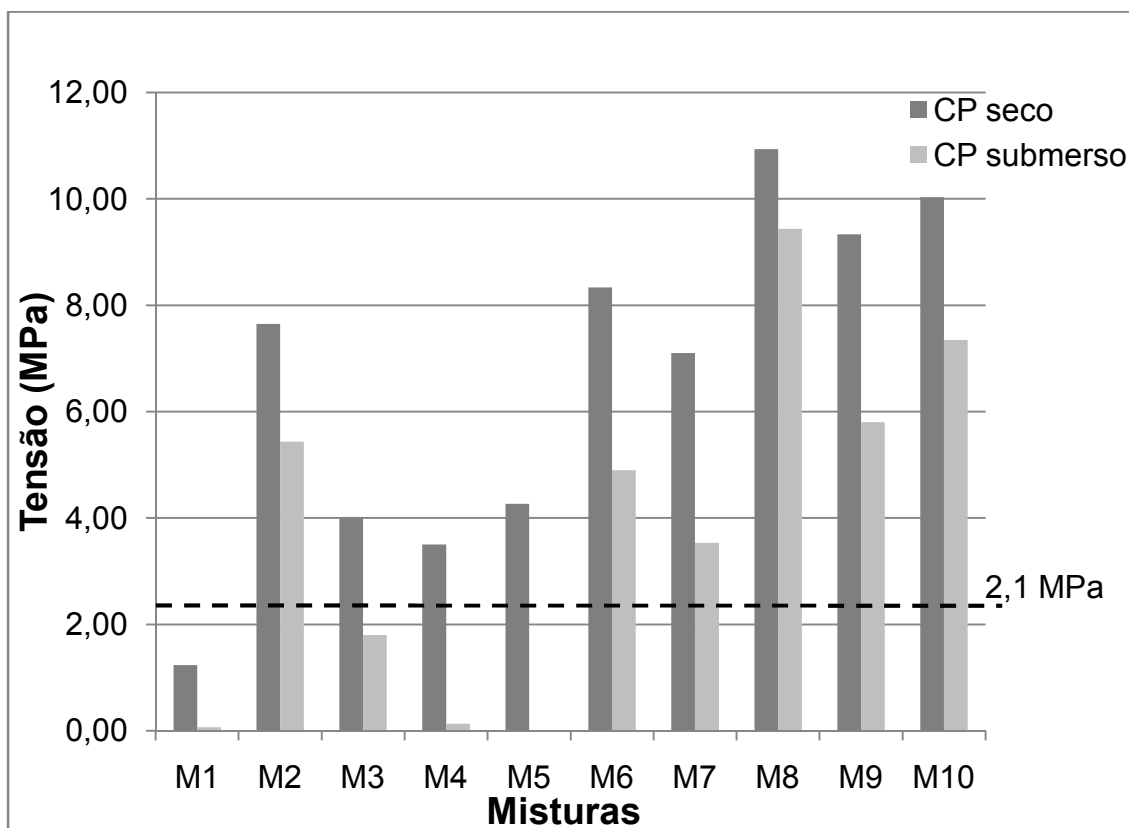
Fonte: Elaboração própria

Tabela 8 - Tensões médias de compressão simples dos CP's submersos das misturas de fresado e solo

Fresado + Solo		
Mistura	Aglomerante Adição mineral	Tensão (MPa)
M1	-	0,07
M2	Cimento (5%)	5,43
M3	Cal (10%)	1,80
M4	Sílica (10%)	0,13
M5	Cinza volante (10%)	-
M6	Cimento (5%); Cinza volante (5%)	4,90
M7	Cal (10%); Cinza volante (5%)	3,53
M8	Cimento(5%); Sílica (5%)	9,43
M9	Cal (10%); Sílica (5%)	5,80
M10	Cal (5%); Sílica (10%)	7,35

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 10 - Resistência à compressão simples das misturas de fresado e solo



Fonte: Elaboração própria

Visualizando o Gráfico 10 é possível notar que a grande maioria das misturas atendem o valor mínimo para resistência à compressão simples prescrito na norma ES 305 (DNER, 1997) de 2,1 MPa, ficando abaixo desse valor apenas as misturas M1 (80% fresado; 20% solo) e os CP's submersos da mistura M3 (80% fresado; 20% solo; 10% cal). Para a mistura M1 o comportamento explica-se por não haver aglomerantes na mistura, já para a mistura M3 pode-se basear no exposto por Azevêdo (2010, p.23) que “a água é apenas o meio onde ocorrem as reações, torna-se evidente que um excesso de água irá atrapalhar as reações, pois afastará fisicamente as partículas”. O mesmo ainda considera que a água utilizada para estabilizar solos com adição de cal deve ser aumentada, pois haverá consumo de água para viabilizar as reações entre a cal e o solo e, também para alcançar a umidade ótima de compactação. Assim, como foram os CP's submersos da mistura M3 que não atenderam ao valor mínimo da tensão, considera-se que a situação submersa alterou as reações existentes entre a cal e o solo, prejudicando a resistência da mistura.

A transformação das tensões de tração por compressão diametral para compressão simples também foi realizada para as misturas de fresado e pó de pedra. Os dados estão apresentados nas Tabelas 9 e 10 e no Gráfico 11.

Tabela 9 – Tensões médias de compressão simples dos CP's secos das misturas de fresado e pó de pedra

Fresado + Pó de pedra		
Mistura	Aglomerante Adição mineral	Tensão (MPa)
M11	-	0,47
M12	Cimento (5%)	3,63
M13	Cal (10%)	2,07
M14	Sílica (10%)	0,63
M15	Cinza volante (10%)	0,63
M16	Cimento(5%); Sílica (5%)	11,53
M17	Cimento (5%); Cinza volante (5%)	5,90
M18	Cal (10%); Sílica (5%)	8,80
M19	Cal (10%); Cinza volante (5%)	4,23
M20	Cal (5%); Sílica (10%)	8,97

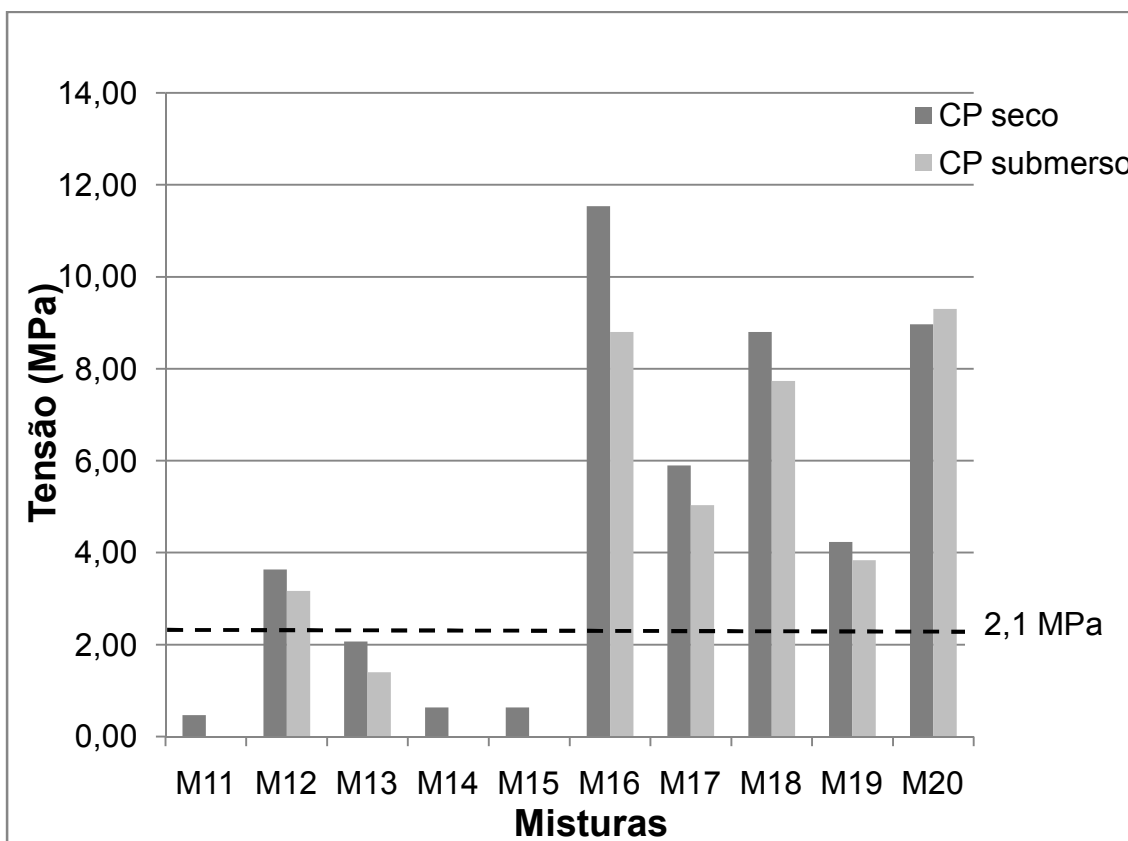
Fonte: Elaboração própria

Tabela 10 – Tensões médias de compressão simples dos CP's submersos das misturas de fresado e pó de pedra

Fresado + Pó de pedra		
Mistura	Aglomerante Adição mineral	Tensão (MPa)
M11	-	-
M12	Cimento (5%)	3,17
M13	Cal (10%)	1,40
M14	Sílica (10%)	-
M15	Cinza volante (10%)	-
M16	Cimento(5%); Sílica (5%)	8,80
M17	Cimento (5%); Cinza volante (5%)	5,03
M18	Cal (10%); Sílica (5%)	7,73
M19	Cal (10%); Cinza volante (5%)	3,83
M20	Cal (5%); Sílica (10%)	9,30

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 11 - Resistência à compressão simples das misturas de fresado e pó de pedra



Fonte: Elaboração própria

As misturas que possuíam apenas um aglomerante ou adição mineral (M11, M12, M13, M14 e M15) não apresentaram bom desempenho em relação à resistência de 2,1 MPa, enquanto as que possuíam um aglomerante mais uma adição mineral (M16, M17, M18, M19, M20) atenderam muito bem, e poderiam ser utilizadas em camadas de base e sub-base de pavimentos.

Tanto no Gráfico 10 como no Gráfico 11 é possível perceber que as misturas que atenderam ao valor mínimo exigido pela norma ES 305 (DNER, 1997), tiveram valores muito superiores a 2,1 MPa, o que indica que deve ser estudada a utilização de teores menores de adição que atendam ao valor mínimo da resistência à compressão simples e também venham a diminuir os custos de uma possível execução das misturas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no exposto fica evidente que houveram várias misturas que apresentaram melhor resposta às adições, apresentando acréscimo na resistência à tração por compressão diametral.

No grupo de misturas contendo fresado e solo, as misturas que obtiveram melhores resultados foram a M6 com adição de 5% de cimento e 5% de cinza volante, a M8 com adição de 5% de cimento e 5% de sílica, a M9 com adição de 10% de cal e 5% de sílica e a M10 com adição de 5% de cal e 10% de sílica.

Dentre as misturas compostas de fresado e pó de pedra, as que demonstraram acréscimo significativo no valor da resistência à tração por compressão diametral foram a mistura M16, contendo adição de 5% de cimento e 5% de sílica da casca de arroz, a M18 com 10% de cal e 5% de sílica e a M20 com 5% de cal e 10% de sílica.

Sendo que uma das composições que obteve melhor resultado na avaliação da resistência à tração por compressão diametral encontra-se no grupo de misturas com fresado e pó de pedra, a aplicação da pesquisa em outras regiões torna-se viável já que o pó de pedra é um elemento de fácil acesso, independente da região, enquanto que para solo seria mais difícil, já que o solo aplicado teria que possuir características semelhantes ao da região de Alegrete.

Nas misturas com adição de cal e sílica, foi possível observar que na composição contendo 5% de cal e 10% de sílica foram obtidos melhores resultados quando comparados com a mistura de 10% de cal e 5% de sílica. Pode-se explicar que a mistura contendo 5% de cal e 10% de sílica teve melhor resultado, pois a quantidade de cal existente na mistura foi suficiente para a sílica reagir e provocar acréscimo na resistência à tração por compressão diametral. Também é importante ressaltar a importância do uso da cal em conjunto com adições minerais, já que a maioria das reações que ocorrem entre esses compostos são formadas na presença do hidróxido de cálcio.

A adição de 5% de cimento e 5% de sílica da casca de arroz desempenhou acréscimo na resistência à tração por compressão diametral, sendo esse aumento de 786% para as misturas contendo fresado e solo e

1164% para as compostas de fresado e pó de pedra, se comparado com as misturas M1 e M11, respectivamente.

A adição de sílica e cinza volante, sem outro aglomerante, não apresentou melhora na resistência à tração por compressão diametral nas misturas de fresado e solo, assim como nas misturas de fresado e pó de pedra, afirmando o exposto na revisão bibliográfica deste trabalho. E nas misturas que tiveram a cinza volante misturada com algum aglomerante (cal ou cimento) não se observou grande aumento na resistência à tração por compressão diametral, então pode-se afirmar que não houveram reações químicas entre essa adição mineral e os aglomerantes.

Considerando a resistência à compressão simples, é possível observar que entre as misturas de fresado e solo, 9 das 10 misturas atenderam a resistência mínima de 2,1 MPa e entre as contendo fresado e pó de pedra, 6 das 10 misturas atenderam a mesma resistência.

A determinação do teor de cal necessário para o máximo aproveitamento da sílica da casca de arroz resultou no valor de 40% e foi de grande importância para obtenção de quatro misturas (M9, M10, M18, M20), que desenvolveram melhora na resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova.

A tentativa de avaliar a saturação das misturas foi prejudicada pela grande perda de umidade que os CP's sofreram durante a cura, deixando claro que o método de cura deve ser aprimorado.

Enfim, entende-se que esta pesquisa proporcionou um maior conhecimento na aplicação do material fresado em camadas de pavimentos e as adições que demonstram um acréscimo na resistência à tração por compressão diametral.

Para trabalhos futuros é importante que sejam aprofundados os estudos para as misturas que apresentaram melhor desempenho na avaliação da resistência a tração por compressão diametral e sejam realizados ensaios caracterizando todos os componentes da mesma. Não foram encontrados estudos que avaliem as reações que podem ocorrer entre as adições minerais e o material fresado, havendo assim necessidade de continuar a pesquisa nesse sentido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R. M. S. **Estabilização de areias monogranulares para fins rodoviários – estudo aplicado à região de Mira**. Dissertação de mestrado. Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

ARAÚJO, L. M. D. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. Tese de doutorado em geotecnia. Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207 - Terminologia e classificação de pavimentação**. Rio de Janeiro, 1982, 3 p.

_____. **NBR 7182 - Solo: Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 1986, 10 p.

_____. **NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto: Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003, 221 p.

_____. **NBR 7211 – Agregados para concreto - especificação**. Rio de Janeiro, 2005, 11 p.

AZEVÊDO, A. L. C. **Estabilização de solos com adição de cal: Um estudo sobre a reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**, 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BASSO, R. V.; FERRAZ, R. L.; BELINCANTA, A.; RAMOS, F. dos S. Aplicação do método físico-químico de dosagem de misturas solo-cimento aos solos típicos do noroeste do Paraná. In: ENCONTRO TECNOLÓGICO DA ENGENHARIA CIVIL E ARQUITETURA, 4., 2003, Maringá, PR. **Anais...** Maringá, PR: ENTECA, 2003, p. 348.

BEHAK, L. **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2006.

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. São Paulo: Editora Fazendo Arte, 2001.

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS, L. P. **Pavimentos rodoviários**. Coimbra: Almedina, 2008.

CAMARA, L. D. de O.; CASAGRANDE, M. D. T.; CUNHA, P. O. **Estudo do comportamento de materiais alternativos e suas aplicações na Engenharia Geotécnica**. Projeto de iniciação científica. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro: 2011.

CASANOVA, F. J.; CERATTI, J. A.; RODRIGUES, M. G. M. Procedimento para dosagem físico-química do solo-cimento. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 26., Aracaju, 1992, **Anais...** Aracaju: ABPV, p. 82-86.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de rodovias 2012: Relatório gerencial**. Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2012.

CUNHA, C. M. **Reciclagem de pavimentos rodoviários flexíveis: Diferentes tipos de reciclagem**. Dissertação de mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2010.

DAVID, D. de. **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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall**, DNER-ME 107/94. Rio de Janeiro, 1994, 9p.

_____. **Solos – análise granulométrica por peneiramento**, DNER-ME 080/94. Rio de Janeiro, 1994, 4p.

_____. **Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples**, DNER- ME 180/94. Rio de Janeiro, 1994, 11p.

_____. **Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral**, DNER- ME 181/94. Rio de Janeiro, 1994, 7p.

_____. **Pavimentação – base de solo-cimento**, DNER-ES 305/97. Rio de Janeiro, 1997, 10p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente em usina – Especificação de serviço**, DNIT 033/2005 – ES. Rio de Janeiro, 2005, 13 p.

_____. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local – Especificação de serviço**, DNIT 034/2005 – ES. Rio de Janeiro, 2005, 13 p.

_____. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**, 2 ed. Rio de Janeiro, 2006 , 310 p.

_____. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**, DNIT 136/2010 – ME. Rio de Janeiro, 2010, 6 p.

FALCÃO, M. F. B.; SOARES, J. B. Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação. In: CONGRESSO DE ENSINO E PESQUISA EM TRANSPORTES, 16., 2002, Natal, RN. **Anais...** Natal, RN: ANPET, 2002, v.I. p. 169-181.

FERNANDES, W. D.; BIANCHINI, M. K.; BUDNY, J.; BARONI, M. **Verificação da resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes de um solo natural e melhorado com cimento, cal e cinza da casca de arroz**. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 42.; ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 16., Gramado, 2013.

FRESAR: Tecnologia de pavimentos. **Fresagem fina**. Belo Horizonte, 2013.

LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MARANGON, E.; MARTON, L. F. M.; SOARES, E. L.; MENDES, G. G.; MARTINS, R. P.; SILVA, D. M. G. Atividade Pozolânica da Sílica da Casca de Arroz por combustão em leito fluidizado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55., 2013, Gramado, RS. **Anais...** Gramado, RS: IBRACON, 2013, p. 135.

MINHOTO, M. J. da C. **Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos rodoviários flexíveis**. Tese de doutorado. Universidade do Minho, Braga 2005.

MOREIRA, H. S.; SOARES, J. B.; MOTTA, L. M. G. Comparação do comportamento mecânico de misturas asfálticas a frio com diferentes teores de fresado incorporado. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, ANPET, XIX, 2005, Recife. **Anais...** Recife: ANPET, 2005, v. II. p. 1283-1293.

PIRES, G. M.; SPECHT, L. P.; PINHEIRO, R. J. B.; PEREIRA, D. da S.; CONCEIÇÃO, B. M. **Estudo do material fresado estabilizado química e granulometricamente para aplicação em bases de pavimentos**. In: Congresso Ibero-Latinoamericano de Asfalto, 17., CILA: Guatemala, 2013.

ROSA, J. B.; FERREIRA, C. J.; GUIMARÃES, R. C. **Estabilização de solos com cal para uso em pavimentação**. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UEG, 4., Goiânia, 2011.

ROSA, P.; LORENZO, C.; PACHECO, A. **Material fresado – De problema à solução econômica em obras de pavimentação**. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 38.; ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 12., Manaus, 2007.

SANTOS, A. G. B. **Bases granulares de agregados reciclados**. Dissertação de mestrado. Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

SANTOS, J. M. R. dos. **Materiais utilizados na construção de pavimentos rodoviários**. Dissertação de mestrado. Universidade de Aveiro, Aveiro, 2010.

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação**, volume II, 1ª ed. São Paulo: PINI, 2001.

_____. **Manual de técnicas de pavimentação**, volume I, 2ª ed. São Paulo: PINI, 2007.

SPECHT, L. P.; HIRSCH, F.; CRONST, F.; TIECKER, E. **Reciclagem de pavimentos: Alternativas de utilização de material fresado como camada de base e sub-base – Relatório 2**. Porto Alegre: Concepa, 2012.

SILVA, A. M.; BERNUCCI, L.; FERRI, S.; SUZUKI, C. Y.; CHAVES, J. M. **Avaliação dos parâmetros de projeto de restauração de pavimentos asfálticos utilizando misturas recicladas com 100% de agregados fresados**. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 17., Porto Alegre, 2011.

WIRTGEN. **O mundo das fresadoras a frio Wirtgen**. Windhagen, 2013. 43 p. il.

ANEXOS

Tabelas utilizadas para coleta dos dados obtidos nos ensaios de avaliação da resistência à tração por compressão diametral.

Data Rompimento			19/fev					
Mistura M1			F+So					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade (%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm)=	100	582	0,08	0,12	1319,3	1274,2	3,54
	h (mm)=	51						
CP2	d (mm)=	100	443	0,06				
	h (mm)=	52						
CP3	d (mm)=	100	1870	0,23				
	h (mm)=	53						
CP4 submerso	d (mm)=	100	97	0,02	0,01	793,2	740,6	7,10
	h (mm)=	49						
CP5 submerso	d (mm)=	100	-	-				
	h (mm)=	51						
CP6 submerso	d (mm)=	100	-	-				
	h (mm)=	50						

Data Rompimento			16/jan									
Mistura M2			F+So+Ci (5%)									
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade (%)				
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)					
CP1	d(mm)=	100	5740	0,75	0,77	1801,9	1712	5,25				
	h(mm)=	49										
CP2	d(mm)=	100	6309	0,78								
	h(mm)=	52										
CP3 submerso	d(mm)=	100	4854	0,62					0,54	1396,2	1284,3	8,71
	h(mm)=	50										
CP4 submerso	d(mm)=	100	4342	0,55								
	h(mm)=	51										
CP5 submerso	d(mm)=	100	3442	0,46								
	h(mm)=	48										

Data Rompimento			17/jan					
Mistura M3			F+So+C (10%)					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade (%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d(mm)=	100	3227	0,42	0,4	1344,6	1295	3,83
	h(mm)=	50						
CP2	d(mm) =	100	2534	0,34				
	h(mm)=	48						
CP3	d(mm) =	100	3421	0,44				
	h(mm)=	50						
CP4 submerso	d(mm) =	100	1226	0,16	0,18	1329,6	1227,9	8,28
	h(mm)=	50						
CP5 submerso	d(mm) =	100	1371	0,19				
	h(mm)=	48						
CP6 submerso	d(mm) =	100	1489	0,19				
	h(mm)=	52						

Data Rompimento			20/jan					
Mistura M4			F+So+Si (10%)					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade (%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm) =	100	2306	0,29	0,35	1737,8	1691	2,76
	h (mm)=	51						
CP2	d (mm) =	100	3012	0,39				
	h (mm)=	50						
CP3	d (mm) =	100	2929	0,37				
	h (mm)=	51						
CP4 submerso	d (mm) =	100	110	0,02	0,01	1788	1648	8,49
	h (mm)=	47						
CP5 submerso	d (mm) =	100	104	0,02				
	h (mm)=	47						
CP6 submerso	d (mm) =	100	-	-				
	h (mm)=	47						

Data Rompimento			23/jan					
Mistura M5			F+So+CV (10%)					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade (%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm) =	100	2825	0,38	0,43	1322,7	1297,7	1,93
	h (mm)=	48						
CP2	d (mm) =	100	3684	0,47				
	h (mm)=	50						
CP3	d (mm) =	100	3372	0,43				
	h (mm)=	50						
CP4 submerso	d (mm) =	100	-	-				
	h (mm)=	51						
CP5 submerso	d (mm) =	100	-	-	-	1223,8	1062,7	15,16
	h (mm)=	48						
CP6 submerso	d (mm) =	100	-	-				
	h (mm)=	51						

Data Rompimento			24/jan					
Mistura M6			F+So+Ci+CV (5%,5%)					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade(%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm) =	100	6572	0,81	0,83	1296,9	1247,9	3,93
	h (mm)=	52						
CP2	d (mm) =	100	6440	0,81				
	h (mm)=	51						
CP3	d (mm) =	100	7140	0,88				
	h (mm)=	52						
CP4 submerso	d (mm) =	100	3788	0,47				
	h (mm)=	52						
CP5 submerso	d (mm) =	100	3746	0,5	0,49	1408,4	1305,9	7,85
	h (mm)=	48						
CP6 submerso	d (mm) =	100	3795	0,5				
	h (mm)=	49						

Data Rompimento			27/jan					
Mistura M7			F+So+C+CV (10%,5%)					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade(%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm) =	100	5374	0,66	0,71	1339,9	1291,1	3,78
	h (mm)=	52						
CP2	d (mm) =	100	5685	0,74				
	h (mm)=	49						
CP3	d (mm) =	100	5681	0,73				
	h (mm)=	50						
CP4 submerso	d (mm) =	100	3088	0,38				
	h (mm)=	52						
CP5 submerso	d (mm) =	100	2992	0,37	0,35	1391,3	1288,1	8,01
	h (mm)=	52						
CP6 submerso	d (mm) =	100	2500	0,31				
	h (mm)=	53						

Data Rompimento			30/jan					
Mistura M8			F+So+Ci+Si (5%,5%)					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade(%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm) =	100	8192	1,03	1,09	1312,8	1240,5	5,83
	h (mm)=	51						
CP2	d (mm) =	100	7839	1,02				
	h (mm)=	49						
CP3	d (mm) =	100	9445	1,23				
	h (mm)=	49						
CP4 submerso	d (mm) =	100	7223	0,91	0,94	1391,5	1285,2	8,27
	h (mm)=	51						
CP5 submerso	d (mm) =	100	7008	0,88				
	h (mm)=	51						
CP6 submerso	d (mm) =	100	8455	1,04				
	h (mm)=	52						

Data Rompimento			31/jan					
Mistura M9			F+So+C+Si (10%,5%)					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade(%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm) =	100	7534	0,98	0,93	1367,3	1306	4,69
	h (mm)=	49						
CP2	d (mm) =	100	7700	0,95				
	h (mm)=	52						
CP3	d (mm) =	100	7209	0,87				
	h (mm)=	53						
CP4 submerso	d (mm) =	100	4079	0,48				
	h (mm)=	55						
CP5 submerso	d (mm) =	100	5526	0,67	0,58	1403,2	1294	8,46
	h (mm)=	53						
CP6 submerso	d (mm) =	100	4757	0,59				
	h (mm)=	52						

Data Rompimento			03/fev					
Mistura M10			F+So+C+Si (5%,10%)					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade(%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm) =	100	8102	1	1,00	1249,5	1194,3	4,62
	h (mm)=	52						
CP2	d (mm) =	100	8102	1				
	h (mm)=	52						
CP3	d (mm) =	100	8331	1,01				
	h (mm)=	53						
CP4 submerso	d (mm) =	100	6010	0,73	0,74	911,2	837,4	8,81
	h (mm)=	53						
CP5 submerso	d (mm) =	100	5554	0,74				
	h (mm)=	48						

Data Rompimento			19/fev					
Mistura M11			F+P					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade (%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm) =	100	450	0,06	0,05	1197,7	1174	2,01
	h (mm)=	55						
CP2	d (mm) =	100	242	0,03				
	h (mm)=	56						
CP3	d (mm) =	100	429	0,05				
	h (mm)=	57						
CP4 submerso	d (mm) =	100	-	-	-	738,3	609,3	21,17
	h (mm)=	58						
CP5 submerso	d (mm) =	100	-	-				
	h (mm)=	54						

Data Rompimento			04/fev					
Mistura M12			F+P+Ci (5%)					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade(%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm) =	100	3192	0,4	0,36	1318,4	1279,9	3,01
	h (mm)=	51						
CP2	d (mm) =	100	2465	0,29				
	h (mm)=	56						
CP3	d (mm) =	100	3255	0,4				
	h (mm)=	53						
CP4 submerso	d (mm) =	100	2534	0,3	0,32	1442,2	1331,3	8,33
	h (mm)=	55						
CP5 submerso	d (mm) =	100	2694	0,34				
	h (mm)=	51						
CP6 submerso	d (mm) =	100	2583	0,31				
	h (mm)=	54						

Data Rompimento			05/fev					
Mistura M13			F+P+C (10%)					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade(%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm) =	100	1336	0,17	0,21	1327,5	1299,9	2,12
	h (mm)=	53						
CP2	d (mm) =	100	1904	0,23				
	h (mm)=	53						
CP3	d (mm) =	100	1849	0,22				
	h (mm)=	54						
CP4 submerso	d (mm) =	100	1212	0,15				
	h (mm)=	53						
CP5 submerso	d (mm) =	100	1136	0,14	0,14	1433,4	1325,7	8,12
	h (mm)=	52						
CP6 submerso	d (mm) =	100	1080	0,13				
	h (mm)=	54						

Data Rompimento			06/fev					
Mistura M14			F+P+Si (10%)					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade (%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm) =	100	575	0,07	0,06	1236	1198,2	3,16
	h (mm)=	53						
CP2	d (mm) =	100	506	0,06				
	h (mm)=	56						
CP3	d (mm) =	100	478	0,06				
	h (mm)=	56						
CP4 submerso	d (mm) =	100	-	-	-	592,5	500,9	18,29
	h (mm)=	55						
CP5 submerso	d (mm) =	100	-	-				
	h (mm)=	54						
CP6 submerso	d (mm) =	100	-	-				
	h (mm)=	52						

Data Rompimento			07/fev					
Mistura M15			F+P+CV (10%)					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade(%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm) =	100	499	0,06	0,06	1198,5	1178,3	1,71
	h (mm)=	54						
CP2	d (mm) =	100	499	0,07				
	h (mm)=	50						
CP3	d (mm) =	100	464	0,06				
	h (mm)=	55						
CP4 submerso	d (mm) =	100	-	-				
	h (mm)=	55						
CP5 submerso	d (mm) =	100	-	-	600	524,8	14,33	
	h (mm)=	52						
CP6 submerso	d (mm) =	100	-	-				
	h (mm)=	50						

Data Rompimento			10/fev					
Mistura M16			F+P+Si+Ci (5%,5%)					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade(%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm) =	100	9425	1,21	1,15	1381,3	1314	5,16
	h (mm)=	50						
CP2	d (mm) =	100	9162	1,13				
	h (mm)=	52						
CP3	d (mm) =	100	9480	1,12				
	h (mm)=	54						
CP4 submerso	d (mm) =	100	8635	1,02				
	h (mm)=	54						
CP5 submerso	d (mm) =	100	7001	0,82	0,88	1408,2	1307	7,78
	h (mm)=	55						
CP6 submerso	d (mm) =	100	6717	0,8				
	h (mm)=	54						

Data Rompimento			11/fev					
Mistura M17			F+P+Ci+CV (5%,5%)					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade(%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm) =	100	5111	0,6	0,59	1349,1	1296,2	4,08
	h (mm)=	55						
CP2	d (mm) =	100	5138	0,59				
	h (mm)=	56						
CP3	d (mm) =	100	4570	0,58				
	h (mm)=	51						
CP4 submerso	d (mm) =	100	3836	0,44				
	h (mm)=	56						
CP5 submerso	d (mm) =	100	4515	0,52	0,50	1427	1323,5	7,82
	h (mm)=	56						
CP6 submerso	d (mm) =	100	4342	0,55				
	h (mm)=	51						

Data Rompimento			12/fev					
Mistura M18			F+P+C+Si (10%,5%)					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade (%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm) =	100	8137	1,04	0,88	1338,4	1277,3	4,78
	h (mm)=	50						
CP2	d (mm) =	100	7430	0,88				
	h (mm)=	54						
CP3	d (mm) =	100	6052	0,72				
	h (mm)=	54						
CP4 submerso	d (mm) =	100	6863	0,8	0,77	1458,8	1331,9	9,53
	h (mm)=	55						
CP5 submerso	d (mm) =	100	6288	0,75				
	h (mm)=	54						
CP6 submerso	d (mm) =	100	6592	0,77				
	h (mm)=	55						

Data Rompimento			13/fev					
Mistura M19			F+P+C+CV (10%,5%)					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade(%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm) =	100	4016	0,48	0,42	1300	1259,8	3,19
	h (mm)=	54						
CP2	d (mm) =	100	3075	0,38				
	h (mm)=	52						
CP3	d (mm) =	100	3428	0,41				
	h (mm)=	54						
CP4 submerso	d (mm) =	100	3241	0,42	0,38	1407	1302,7	7,98
	h (mm)=	50						
CP5 submerso	d (mm) =	100	3102	0,38				
	h (mm)=	53						
CP6 submerso	d (mm) =	100	2957	0,35				
	h (mm)=	55						

Data Rompimento			14/fev					
Mistura M20			F+P+C+Si (5%,10%)					
						Antes estufa	Após estufa	Perda de umidade(%)
			Força (N)	Tensão (Mpa)	Tensão média	Peso (g)	Peso (g)	
CP1	d (mm) =	100	7444	0,87	0,90	1395	1329,9	4,90
	h (mm)=	55						
CP2	d (mm) =	100	7901	0,92				
	h (mm)=	55						
CP3	d (mm) =	100	7901	0,9				
	h (mm)=	56						
CP4 submerso	d (mm) =	100	7049	0,84	0,93	1424,8	1305,4	9,15
	h (mm)=	54						
CP5 submerso	d (mm) =	100	8234	0,98				
	h (mm)=	54						
CP6 submerso	d (mm) =	100	8054	0,97				
	h (mm)=	53						

Fonte: Elaboração própria