



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

LUIZ FERNANDO TRINDADE GOMES

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DE MATERIAL FRESADO COM
ADIÇÃO DE CIMENTO COMO OPÇÃO DE BASE E SUB-BASE EM PAVIMENTOS**

**ALEGRETE/RS
2015**

LUIZ FERNANDO TRINDADE GOMES

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DE MATERIAL FRESADO COM
ADIÇÃO DE CIMENTO COMO
OPÇÃO DE BASE E SUB-BASE EM PAVIMENTOS**

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

Orientador: Me. Magnos Baroni

**ALEGRETE/RS
2015**

LUIZ FERNANDO TRINDADE GOMES

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DE MATERIAL FRESADO COM
ADIÇÃO DE CIMENTO COMO
OPÇÃO DE BASE E SUB-BASE EM PAVIMENTOS**

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

Trabalho de Conclusão de Curso II defendido
e aprovado em: 26 de janeiro de 2015.

Banca examinadora:



Prof. Me. Magnos Baroni

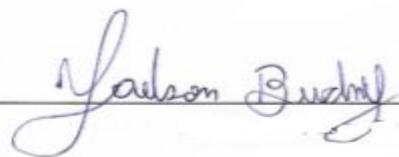
Orientador

UNIPAMPA



Prof. Dr. Ederli Marangon

UNIPAMPA



Prof. Me. Jaelson Budny

UNIPAMPA

Dedico este trabalho aos meus pais, irmãos, esposa e filha que está por nascer. Sei que mesmo estando em dificuldade poderei contar com essas pessoas. A todos, o meu muito obrigado.

AGRADECIMENTO

Muitas pessoas contribuíram para a realização deste trabalho de conclusão de curso e não poderia deixar de manifestar meu profundo agradecimento a todas elas.

Aos funcionários, alunos e professores da UNIPAMPA pela convivência, amizade e experiências compartilhadas ao longo do curso Engenharia Civil.

Aos professores Ederli Marangon e Jaelson Budny, que gentilmente aceitaram participar e colaborar com este trabalho fazendo parte da banca de avaliação.

Ao meu orientador e amigo professor Magnos Baroni, pelo constante incentivo, pela dedicação e paciência. Agradeço, principalmente, por confiar em mim e no meu trabalho.

Agradeço a todos os meus amigos pessoais que, de alguma forma, me incentivaram e contribuíram para esta vitória.

A toda a minha família que sempre me ofereceu suporte e acreditou em mim. Aos meus irmãos Tanara Gomes Zappe, Nei Gomes Filho e Gabriel Trindade Gomes pela amizade e carinho. Aos meus pais Isabel de Fátima Trindade Gomes e Nei Gomes pelo estímulo, confiança e amor. A minha mulher Aline Vieira de Mello, que sei o quanto acredita em mim, e a nossa filha que está por chegar, que são minhas estruturas nessa caminhada.

Muito Obrigado.

“que os vossos esforços desafiem as possibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

(Charles Chaplin)

RESUMO

A malha rodoviária brasileira possui uma extensão com mais de 212.000 Km pavimentados. Estas rodovias possuem uma vida útil de 10 a 20 anos e necessitam de manutenções periódicas. A fresagem de pavimentos asfálticos é uma das técnicas constantemente aplicada no processo de manutenção e restauração do sistema rodoviário. A fresagem consiste na remoção do revestimento antigo e o material resultante é geralmente descartado, sendo um dos maiores poluentes das obras de manutenção. Existem estudos para a reutilização desse material em obras, como: a camada de rolamento, base e/ou sub-bases. Com este processo de reciclagem fica possível mitigar o impacto causado ao meio ambiente. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é analisar a viabilidade do uso de material fresado de rodovias com adição de cimento para aplicação em base e sub-base, visando o reaproveitamento do material fresado e assim reduzindo os impactos ambientais e aumentando a resistência da base e sub-base. Os ensaios realizados demonstraram que a resistência à compressão aumenta em função do aumento do percentual de adição de cimento. No entanto, os percentuais de adição de cimento adotados neste trabalho (3%, 5% e 7%) não atingiram a meta de 2,1 MPa de resistência aos 7 dias de cura, inviabilizando o uso desses traços para base de pavimentos flexíveis. Contudo é possível a utilização de tais misturas em sub-base.

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

ABSTRACT

The Brazilian road network has an extension of more than 212,000 Km paved. These roads have a lifetime of 10 to 20 years and require period maintenance. The milling of asphalt pavement is one of the techniques applied constantly in the process of restoration and maintenance of the road system. The milling involves the removal of old coating and the resulting material is usually discarded, being one of the major pollutants from roads maintenance. There are studies to reuse the milled material in works, as: the bearing layer, base and/or sub-bases. With the recycling process becomes possible to mitigate the impact on the environment. In this context, the main objective of this study is to analyze the feasibility of using milled material of roads with addition of cement for use in base or sub-base, in order to reuse the milled material and thus reducing the environmental impacts and increasing the resistance of the base and sub-base. The experiments showed that the compressive strength increases with the increase of cement addition percentage. However, the cement addition percentages adopted in this study (3%, 5% and 7%) did not reach the goal of 2.1 MPa strength after 7 days of curing, making unfeasible to use these mixtures as base flexible pavements. Nevertheless, it is possible to use these mixtures as sub-base.

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema das camadas do pavimento rígido	30
Figura 2 – Comportamento das camadas dos pavimentos flexíveis.....	31
Figura 3 – Esquema das camadas do pavimento flexível	32
Figura 4 – Aplicação da imprimação entre as camadas.....	34
Figura 5 – Máquina fresadora	35
Figura 6 – Cilindro fresador a frio.....	35
Figura 7 – Processo de fresagem.....	36
Figura 8 – Material fresado depositado da BR-290.....	37
Figura 9 – Detalhe do material bruto no momento da coleta.....	38
Figura 10 – Peneira #3/4.....	38
Figura 11 - Pó de pedra da pedreira Pedra Rosada	39
Figura 12 – Cimento CP IV	40
Figura 13 – Jogo de peneiras utilizadas para determinar a granulometria	42
Figura 14 – Betoneira utilizada nos experimentos.....	44
Figura 15 – Material pronto para a moldagem.....	44
Figura 16 – Compactador mecânico Marshall	45
Figura 17 – CPs embalados a vácuo e identificados	46
Figura 18 – Quantidade de CPs necessários para a análise de um traço	47
Figura 19 – Prensa hidráulica EMIC modelo DL 20000.....	49
Figura 20 – CP preparado com os LVDTs.....	52
Figura 21 – CP na Máquina Universal de Ensaios da marca EMIC.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação de massa com 7 dias de cura.....	50
Tabela 2 – Variação de massa com 14 dias de cura.....	50
Tabela 3 – Variação de massa com 28 dias de cura.....	51
Tabela 4 – CPs com 7 dias de cura.....	53
Tabela 5 – C Ps com 14 dias de cura.....	53
Tabela 6 – CPs com 28 dias de cura.....	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica do material fresado e do pó de pedra.....	42
Gráfico 2 – Umidade ótima do material fresado + pó de pedra.....	43
Gráfico 3 – Variação de umidade em relação ao tempo de cura	51
Gráfico 4 – Valores RCS agrupadas por tempo de cura	54
Gráfico 5 – Valores RCS agrupadas por teor de adição	55
Gráfico 6 – Tensão x Deformação com adição de 3% de cimento	56
Gráfico 7 - Tensão Deformação com adição de 5% de cimento	56
Gráfico 8 - Tensão Deformação com adição de 7% de cimento	57
Gráfico 9 – Resistência à compressão com adição de sílica de casca de arroz.....	58
Gráfico 10 – Resistência à compressão com adição de cimento	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARRA	- The Asphalt Recycling and Reclaiming Association
BR	- Rodovia Federal
CAP	- Concreto Asfáltico de Petróleo
<i>cm</i>	- Centímetro
CP	- Corpo de Prova
DER	- Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
<i>Kgf</i>	- quilograma força
<i>KPa</i>	- QuiloPascal
LVDTs	- Transformadores Lineares Diferenciais Variáveis
<i>MPa</i>	- MegaPascal
<i>mm</i>	- Milímetro
NBR	- Normas Brasileiras Regulamentadoras
RCS	- Resistência à Compressão Simples
RF	- Mistura de referência
RS	- Rio Grande do Sul
UNIPAMPA	- Universidade Federal do Pampa

LISTA DE SÍMBOLOS

- σ – tensão à compressão simples
- $^{\circ}\text{C}$ – graus Celsius
- F – carga de ruptura, em kgf
- r – raio do corpo de prova, em cm.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Objetivos.....	27
	Objetivos Específicos	27
1.2	Justificativa	28
1.3	Organização do Trabalho	28
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	Tipos de Pavimentos.....	29
2.1.1	Pavimentos Rígidos.....	29
2.1.2	Pavimentos Semirrígidos	30
2.1.3	Pavimentos Flexíveis.....	30
2.1.4	Camadas dos Pavimentos	31
2.1.5	Fresagem dos Pavimentos	34
2.1.6	Reutilização do Material Fresado	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1	Materiais.....	37
3.1.1	Material Fresado.....	37
3.1.2	Pó de Pedra.....	38
3.1.3	Cimento Portland Pozolâmico CP IV	39
3.1.4	Água.....	40
3.2	Metodologia	40
3.2.1	Coleta e Preparação do Material Fresado	40
3.2.2	Moldagem dos Corpos de Prova.....	41
3.2.3	Tempo de Cura.....	45
3.2.4	Corpo de Prova	46
3.2.5	Ensaio de Resistência à Compressão Simples	48
4	ENSAIOS E RESULTADOS	50

4.1	Roteiro dos ensaios	50
4.2	Resistência à compressão simples (RCS)	53
4.3	Tensão x Deformação	55
4.4	Comparação entre Adição de Cimento e Adição de Sílica de Casca de Arroz	57
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	60
5.1	Trabalhos Futuros	62
6	REFERÊNCIAS.....	64
	APÊNDICE A	66

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o transporte tanto de carga como passeio é predominantemente rodoviário. A malha rodoviária brasileira possui uma extensão com mais de 212.000 km pavimentados. Sabendo que as rodovias possuem uma vida útil de 10 a 20 anos e que necessitam de manutenções periódicas, aliado à preocupação atual com a preservação dos recursos naturais, é cada vez mais necessário apresentar novas técnicas de construção, manutenção e diminuição de custos em vários fatores, como: disponibilidade de material no local, preservação de jazidas e facilidade de obtenção de materiais (RESPLANDES e REZENDE, 2005).

A fresagem de pavimentos asfálticos é uma das técnicas constantemente aplicada no processo de manutenção e restauração do sistema rodoviário, em especial com o objetivo de solucionar problemas frequentemente encontrados, tais como: a elevação do greide das estradas, a propagação de trincas, o alteamento dos dispositivos de drenagem, entre outros (BONFIN, 2007). A fresagem consiste na remoção do revestimento antigo e o material resultante é geralmente descartado, sendo um dos maiores poluentes das obras rodoviárias de manutenção. Existem estudos para a reutilização desse material em obras, como: a camada de rolamento, base e/ou sub-bases. Com este processo de reciclagem, fica possível mitigar o impacto causado ao meio ambiente.

Na reciclagem dos pavimentos o uso de materiais adicionais pode ser necessário, como agregado, concreto asfáltico de petróleo (CAP), cimento Portland, emulsões asfálticas, espuma de asfalto e agentes rejuvenescedores.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal analisar a viabilidade do uso de material fresado de rodovias com adição de cimento para aplicação em base e sub-base, visando o reaproveitamento do material fresado e assim reduzindo os impactos ambientais e aumentando a resistência da base e sub-base.

Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo principal, este trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- apresentar as características físicas de materiais fresados;

- determinar a caracterização e variabilidade do material fresado;
- identificar a granulometria mais adequada de material fresado para ser aplicado em base e sub-base;
- testar a aplicação de material fresado natural com adição de pó de pedra em base e sub-base;
- determinar as resistências à compressão simples (RCS) do material fresado com e sem adição de cimento Portland;
- comparar resultados de RCS entre material fresado mais cimento Portland e fresado mais sílica de casca de arroz mais cal hidráulica;
- analisar a viabilidade da aplicação de material fresado com adição de cimento Portland;

1.2 Justificativa

A fresagem é uma das atividades que mais poluem, em obras de manutenção rodoviárias, por conter o cimento asfáltico de petróleo - CAP. O reaproveitamento do material fresado permite que não apenas as jazidas locais sejam preservadas como também fontes de combustíveis fósseis, melhorando a qualidade de vida tanto da geração atual quanto das futuras. Adicionalmente, o reuso desses recursos antes desperdiçados pode reduzir o custo e aumentar a resistência da base e sub-base.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho se encontra estruturado em cinco capítulos. O presente Capítulo traz a contextualização, os objetivos e as justificativas para a realização deste trabalho.

O Capítulo 2 introduz os assuntos que servem como fundamentação teórica para elaboração deste trabalho.

Os materiais e os métodos utilizados nos ensaios que dão sustentação ao desenvolvimento do trabalho são definidos no Capítulo 3.

O Capítulo 4 apresenta o roteiro dos ensaios, os resultados obtidos nos mesmos, assim como sua análise e discussão.

As conclusões e considerações finais são apresentadas no Capítulo 5.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este Capítulo tem como objetivo abordar, de forma sucinta, os assuntos que servem como base para a elaboração desta pesquisa.

2.1 Tipos de Pavimentos

Por definição pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, com constituições diferentes e sobrepostas, apoiada na camada final de terraplanagem. Cada uma das camadas do pavimento possui uma ou mais funções específicas, sendo que o conjunto das mesmas deve proporcionar aos veículos as condições de suporte e rolamento em qualquer condição climática (BALBO, 2007). Adicionalmente, um pavimento deve fornecer ao longo de sua vida útil o máximo de conforto e segurança ao usuário (requisitos funcionais) e resistir a esforços verticais e horizontais devido ao tráfego (requisitos estruturais).

Na rede rodoviária brasileira existem basicamente três tipos de pavimentos: os pavimentos rígidos, semirrígidos e flexíveis, sendo em sua maioria os flexíveis. Os vários tipos de pavimentos diferem entre si, essencialmente, na sua constituição e no modo de funcionamento.

A seguir os tipos de pavimentos serão descritos, detalhando o pavimento flexível que é o foco deste trabalho.

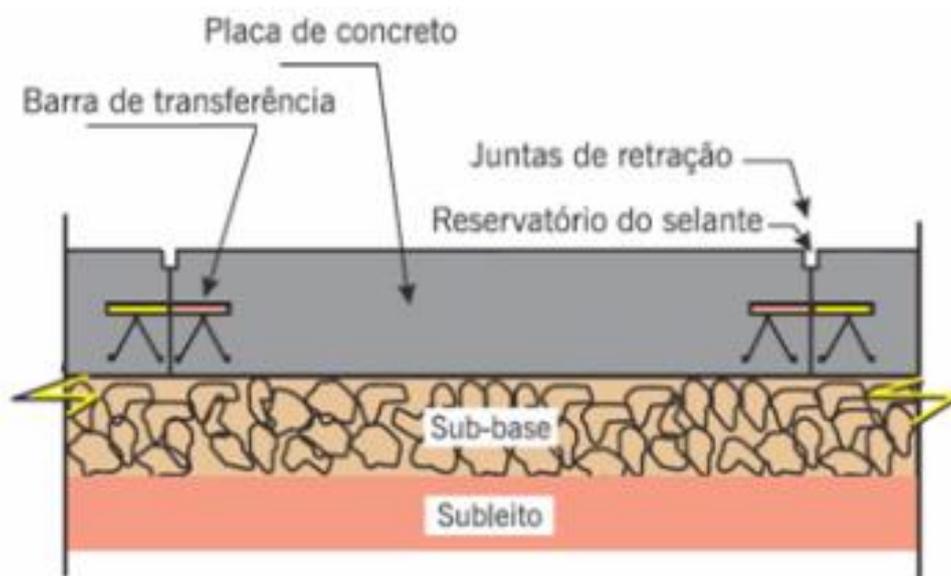
2.1.1 Pavimentos Rígidos

Os pavimentos rígidos caracterizam-se pela camada de desgaste ser constituída por uma laje de concreto de cimento Portland de elevada resistência (NUNO, 2009). Nesses pavimentos a espessura é fixada em relação da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas a subjacentes.

As camadas de um pavimento rígido são mostradas na Figura 1. A laje ou placa de concreto pode ser colocada diretamente sobre a fundação ou sobre uma ou mais camadas de suporte (base e sub-base) que pode(m) ser ou não aglutinadas com ligante. Embora teoricamente a laje possa ser aplicada diretamente sobre a fundação, isto não é desejável, uma vez que é essencial o fato da laje ter um apoio relativamente uniforme e resistente à erosão para garantir a durabilidade do pavimento.

São muitos os fatores a serem levados em consideração para a utilização dos pavimentos de concreto de cimento Portland. Embora seu custo inicial seja mais elevado que os pavimentos flexíveis, sua vida útil e sua resistência são maiores, gerando um custo de manutenção menor e proporcionando economia em longo prazo.

Figura 1 – Esquema das camadas do pavimento rígido



Fonte: BIANCHI (2008)

2.1.2 Pavimentos Semirrígidos

Os pavimentos semirrígidos resultam da combinação dos pavimentos rígidos e flexíveis. A camada superior constituída por materiais betuminosos e camadas subjacentes normalmente constituídas por materiais hidráulicos, tendo o conjunto deformabilidade reduzida (MINHOTO, 2005). Nesses tipos de pavimentos é a camada de base que suporta, maioritariamente, as cargas induzidas pelo tráfego, tendo, em certos casos, as camadas betuminosas uma contribuição estrutural importante, em função das respectivas espessuras (PICANTO-SANTOS et. al., 2006).

2.1.3 Pavimentos Flexíveis

Os pavimentos flexíveis são formados por quatro camadas principais: base, sub-base, reforço do subleito e revestimento asfáltico, este último podendo ser subdividido em camada de rolamento e de ligação. Estas camadas são constituídas de betume (obtido geralmente a partir da destilação fracionada de petróleo bruto) e agregados.

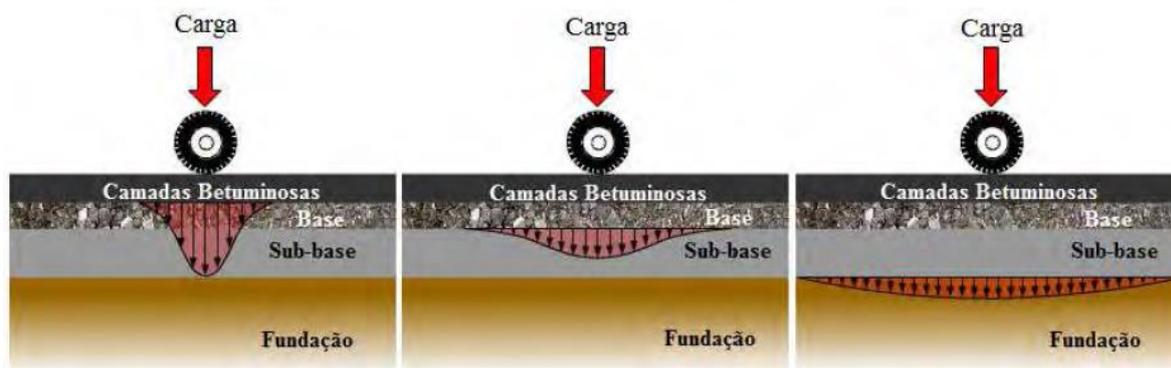
As camadas betuminosas são constituídas por duas ou três camadas: a camada de desgaste e a camada de regularização constituem o revestimento superficial do pavimento,

enquanto a terceira camada betuminosa, quando existe, constitui uma camada de base. As camadas granulares são constituídas por materiais não ligados, estabilizados por meio mecânico, apresentando apenas resistência à compressão e de maior espessura que as betuminosas, formando uma camada de base ou sub-base, sendo esta última assenta diretamente na fundação (BALBO, 2007).

Hoje em dia é comum às camadas serem constituídas por solos tratados de forma a aumentar a suas características mecânicas, podemos, no entanto, a camada de base ser constituída por materiais granulares ou betuminosos (MINHOTO, 2005; PEREIRA e MIRANDA, 1999; PICANTO-SANTOS et. al., 2006).

Na Figura 2 podemos observar o comportamento de cada uma das camadas dos pavimentos flexíveis, notando que a deformação diminui conforme passa de uma camada para outra, fator que ocorre devido absorção dos carregamentos pela camada anterior, assim gerando uma carga menor para as camadas seguintes.

Figura 2 – Comportamento das camadas dos pavimentos flexíveis

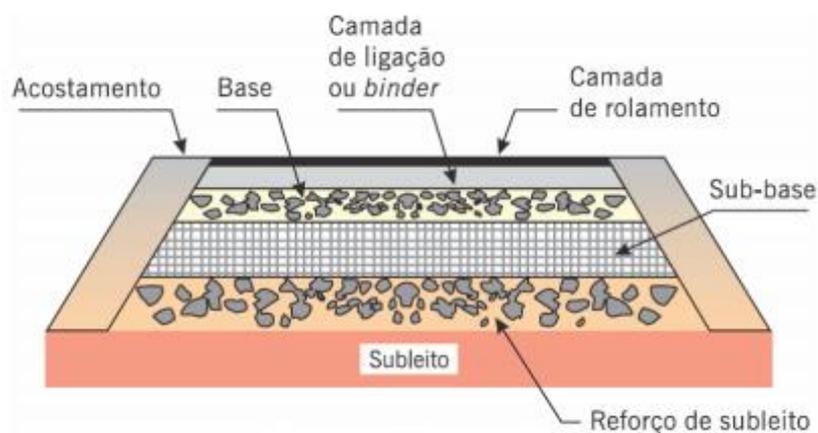


Fonte: SANTOS (2009).

2.1.4 Camadas dos Pavimentos

Como pode ser observado na Figura 3, a estrutura de um pavimento flexível é constituída por varias camadas: subleito (terreno natural); regularização (corrige falhas); reforço de subleito (camada adicional); sub-base (camada complementar); base (suporte estrutural); revestimento (capa de rolamento). A seguir as mesmas são detalhadas.

Figura 3 – Esquema das camadas do pavimento flexível



Fonte: BIANCHI (2008)

2.1.4.1 Subleito

Os esforços impostos sobre a superfície do subleito serão aliviados em sua profundidade (normalmente se dispersam no primeiro metro), portanto, ter maior preocupação com os estratos superiores onde os esforços solicitantes são maiores. O subleito será constituído de material natural consolidado e compactado (BALBO, 2007).

2.1.4.2 Reforço de Subleito

Quando o subleito apresenta uma pequena ou medíocre resistência aos esforços verticais, que ocorrem sobre sua superfície, nesse caso é necessário aplicar sob esse solo uma camada de melhor qualidade, servindo de reforço, de maneira que a fundação subjacente a esse reforço receba pressões menores e mais compatíveis com a sua resistência.

O emprego de camada de reforço de subleito não é obrigatório, pois espessuras maiores de camadas superiores poderiam, em tese, aliviar as pressões sobre um subleito de pouca resistência. Com tudo seu uso visa razões econômicas, sendo em geral menos custoso o emprego de solos de reforços, que camadas mais espessas de base e sub-base (BALBO, 2007).

Esta camada é construída se o subleito não atender aos critérios de resistência de projeto. A espessura da camada é constante e possui capacidade de suporte superior a da regularização e inferior a da camada imediatamente superior, no caso a sub-base (SENÇO, 2007).

2.1.4.3 Base e Sub-bases

Para aliviar pressões sobre camadas de solos inferiores, surge a camada de base, que quando é muito espessa para tal função é dividida por razões estruturais e econômicas, assim criando a camada de sub-base, que geralmente possui menor custo. As bases podem ser constituídas de solos estabilizados naturalmente, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente com ligante asfáltico, concreto, entre outros. Para as sub-bases podem ser utilizados os mesmos materiais acima citados, porém no caso de solos estabilizados quimicamente o consumo de agentes aglomerantes é pequeno (BALBO, 2007).

Quando não for aconselhável construir a estrutura da base sobre a regularização, ou reforço do subleito, faz-se a aplicação de uma camada intermediária, que possui características melhores em relação às camadas iniciais e menores em relação à base (SENÇO, 2007).

2.1.4.4 Imprimações de Camadas

Entre muitas das camadas de pavimento mencionadas, faz-se necessária à execução de um filme asfáltico que será denominado “pintura de ligação”, com a função de aderir uma camada a outra, ou imprimação impermeabilizante, com a função de impermeabilizar o solo ou granular antes do lançamento da camada superior. Entre quaisquer camadas de revestimento asfáltico sempre é aplicada uma pintura de ligação. As pinturas de ligação são aplicadas com emulsões asfálticas e as imprimações impermeabilizantes com asfalto diluído (BALBO, 2007).

A Figura 4 apresenta um exemplo de imprimação de uma das camadas do pavimento. A imprimação pode ser usada para evitar a evaporação da água superficial no caso de solo-cimento, dando melhores condições para a cura da base (SENÇO, 1980).

Figura 4 – Aplicação da imprimação entre as camadas



Fonte: BIANCHI (2008)

2.1.4.5 Revestimentos

O revestimento asfáltico é uma superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentados sobre um semi-espço considerado teoricamente como finito (infraestrutura ou terreno de fundação) a qual é designado de subleito (DNIT, 2006).

Muitas vezes é subdividido em duas ou mais camadas por razões técnicas, construtivas e de custo. Assim é comum encontrar expressões como “camada de rolamento” e “camada de ligação” (do inglês *binder*) para descrever um revestimento dividido em duas camadas de diferentes materiais (BALBO, 2007).

2.1.5 Fresagem dos Pavimentos

A fresagem em pavimentos é uma técnica que consiste na remoção mecânica de uma ou mais camadas do pavimento flexível, com o uso do equipamento denominado fresadora (Figura 5), dotado de cortador giratório, para recuperar desgastes e fendas por onde ocorre infiltração para o interior do pavimento, causando ruína estrutural prematura, ondulações no pavimento, entre outros problemas.

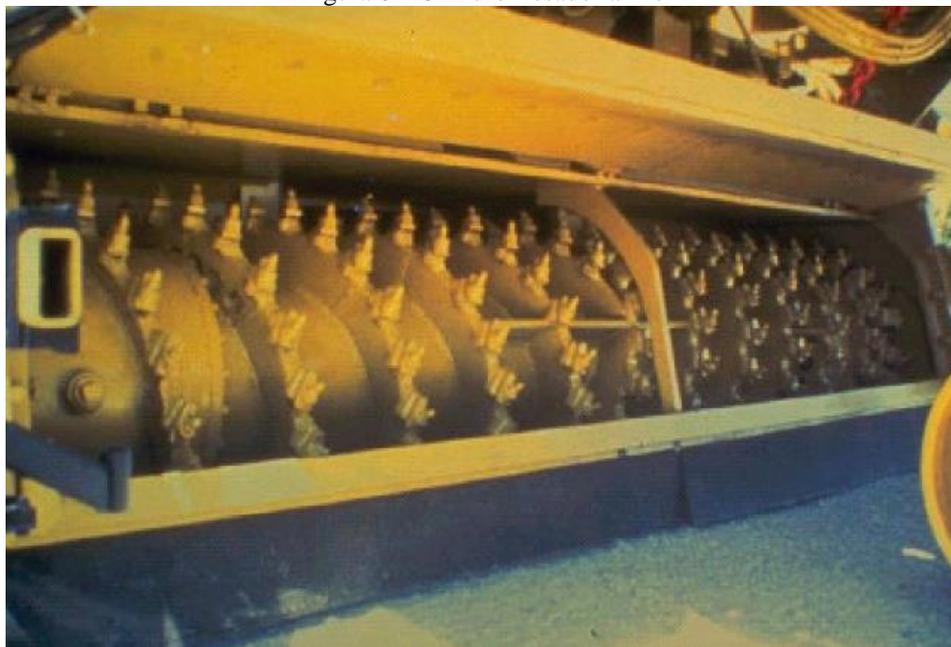
Figura 5 – Máquina fresadora



Fonte: BERNUCCI et. al. (2006)

Uma máquina fresadora deve atender a alguns itens, tais como: ter capacidade de triturar uma espessura mínima de 30 cm de revestimento asfáltico e material de base e possuir tambor fresador (Figura 6) com controle manual e/ou automático de profundidade de corte, que possibilite diferentes velocidades de rotação e ferramentas de corte substituíveis (ARRA, 2001).

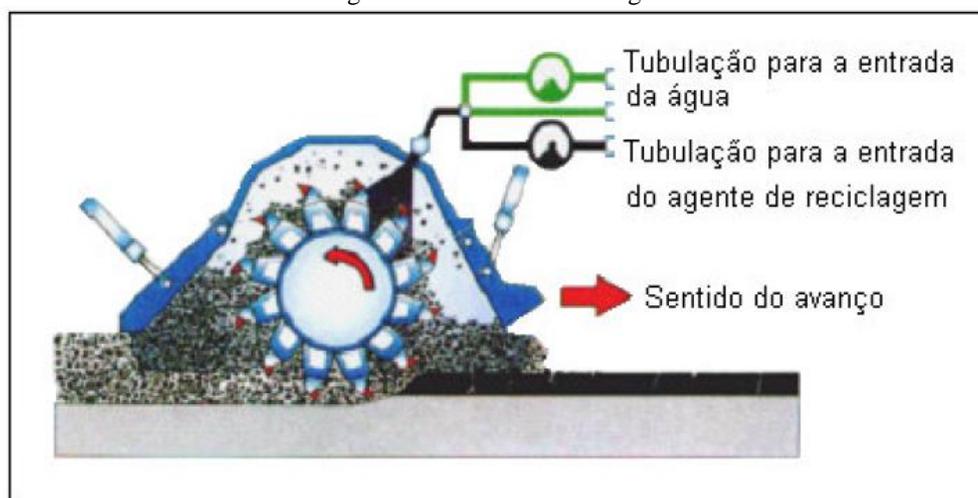
Figura 6 – Cilindro fresador a frio



Fonte: KANDHAL e MALLICK (1997)

A norma técnica DNIT 159 (DNIT, 2011) descreve o processo de fresagem, apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Processo de fresagem



Fonte: WIRTGEN (2004)

2.1.6 Reutilização do Material Fresado

Os primeiros registros significativos que se tem notícia acerca de serviços de fresagem de revestimento asfáltico, com estudos de reaproveitamento do material fresado, datam do início da década de 60, na Europa, na Alemanha Ocidental (ALVIM, 2001).

Para garantir eficiência ao processo e qualidade ao material reciclado, a adoção do equipamento adequado é de grande importância. Um dos maiores motivos pelo crescente interesse em reciclagem de pavimentos é a economia gerada de custo que pode chegar 40 % a 50 % em relação a métodos convencionais (KANDHAL e MALLICK, 1997).

Na reciclagem dos pavimentos, o uso de materiais adicionais pode ser necessário, como: agregado, concreto asfáltico de petróleo (CAP), cimento Portland, emulsões asfálticas, espuma de asfalto e agentes rejuvenescedores.

Existem duas maneiras principais de reciclagem dos pavimentos, uma consiste em reciclagem a quente do material fresado e a outra em reciclagem a frio, sendo a última abordada e desenvolvida ao longo deste trabalho.

Segundo (MOMM e DOMINGUES, 1995), os agentes de reciclagem a frio consistem em materiais que são adicionados a mistura reciclada com a função de conceder características físicas apropriadas à transformação da camada deteriorada em uma nova camada com qualidade adequada para seu novo emprego.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este Capítulo tem por finalidade expor quais são os materiais e os métodos usados na execução dos ensaios que dão sustentação ao desenvolvimento deste trabalho.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados para a realização do presente trabalho estão descritos a seguir.

3.1.1 Material Fresado

Conforme a norma técnica DNIT 159 (DNIT, 2011), material fresado é o produto resultante da fresagem dos pavimentos flexíveis. Como mencionado na Seção 2.1.5, este material é obtido através do corte ou desbaste de uma ou mais camada(s) do pavimento asfáltico por processo mecânico a frio (DNIT, 2011). A Figura 8 mostra como é depositado o material após a remoção da pista e a coleta do mesmo para realização dos ensaios desta pesquisa. A Figura 9 exhibe o aspecto do material bruto.

Figura 8 – Material fresado depositado da BR-290



Fonte: elaboração própria

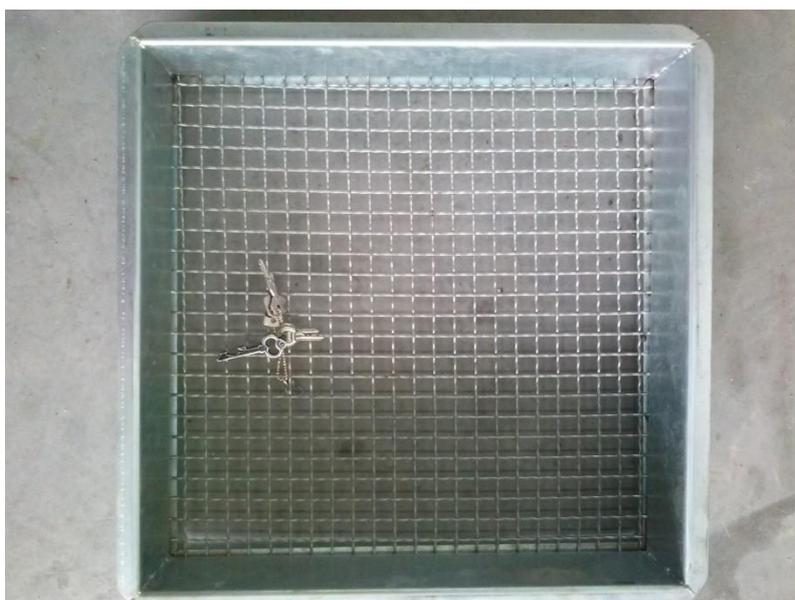
Figura 9 – Detalhe do material bruto no momento da coleta



Fonte: elaboração própria

Como pode ser notado o material apresenta uma granulometria muito variada contendo grumos de agregados com ligantes inadequados para os ensaios, tendo a necessidade de um peneiramento para a remoção desses grumos de diâmetro superiores a 2 cm. A Figura 10 ilustra a peneira utilizada nesse processo.

Figura 10 – Peneira #3/4



Fonte: elaboração própria

3.1.2 Pó de Pedra

O pó de pedra é considerado um material fino por apresentar diâmetro menor 8,5 mm e resistente por ser proveniente da britagem de rocha.

A fim de obter uma curva granulométrica com melhor uniformidade, o pó de pedra foi adicionado ao material fresado. A Figura 11 mostra o pó de pedra adquirido na Pedreira Pedra Rosada, que possui uma rocha de origem basáltica e está localizada na cidade de Alegrete/RS. Observa-se na Figura 11 que o pó de pedra está úmido, pois está armazenado em local aberto.

Figura 11 - Pó de pedra da pedreira Pedra Rosada



Fonte: elaboração própria

3.1.3 Cimento Portland Pozolâmico CPIV

O cimento empregado deve atender à especificação de materiais DNER EM 036 (DNER, 1995). Podem ser empregados:

- a) NBR 5732 – cimento Portland comum;
- b) NBR 5735 – cimento Portland de alto-forno;
- c) NBR 5736 – cimento Portland pozolânico.

Neste trabalho foi adotado o Cimento Portland Pozolâmico CP IV (apresentado na Figura 12) devido às suas características, como: baixo calor de hidratação, material pozolânico cerca de 50% em sua composição, sabendo que esses materiais não reagem com água, o que é positivo para a aplicação devido a possibilidade de exposição contínua a umidade nas rodovias, sua resistência aos 7 dias segundo o fabricante é de 20 MPa e aos 28 dias chegando a 32 MPa.

Figura 12 – Cimento CP IV



Fonte: elaboração própria

3.1.4 Água

Para os ensaios em geral foi utilizada água limpa proveniente do sistema de abastecimento urbano da cidade de Alegrete/RS. Esta água deve estar isenta de matéria orgânica ou outras substâncias prejudiciais à hidratação do cimento, atendendo aos estabelecimentos da NBR NM 137 (DER, 2005).

3.2 Metodologia

Os métodos utilizados para realização deste trabalho estão descritos a seguir.

3.2.1 Coleta e Preparação do Material Fresado

Para o desenvolvimento desse trabalho foi necessário em torno de 300 quilos de material fresado que foram extraídos de diferentes trechos da BR 290, aumentando a diversidade do material coletado e, conseqüentemente, a representatividade desse trabalho.

Para a extração do material fresado foi utilizada a fresagem a frio. Um dos grandes problemas deste tipo de fresagem é o aparecimento de grumos de asfalto-agregado (BONFIM, 2001). Por esta razão, foi feito um peneiramento inicial fracionado na peneira de abertura #3/4. Adicionalmente, no momento da coleta se buscou amostras livres de materiais indesejáveis, como: madeira, plástico e terra.

Após a fase de coleta foi feita a homogeneização, ou seja, a mistura do material fresado obtido nos diferentes trechos da BR 290, assim obteve-se um material de melhor

representatividade da rodovia com seus diferentes processos de manutenção e restauração ao longo de sua extensão.

3.2.2 Moldagem dos Corpos de Prova

Foi utilizado o soquete Marshall para misturas asfálticas, normalizado pelo DNER ME 107 (DNER, 1994). Foram moldados doze corpos de prova (CPs) para cada tipo de traço. Os procedimentos para a moldagem dos corpos de prova são descritos a seguir.

3.2.2.1 Secagem da Amostra

As amostras foram secas em estufa a 60 °C com um período mínimo de 24 horas (DNER 080,1994). A utilização de 60 °C assegura que não há modificação nas propriedades do material fresado, evitando a reativação do mesmo (LEE et. al., 2002).

3.2.2.2 Caracterização granulométrica

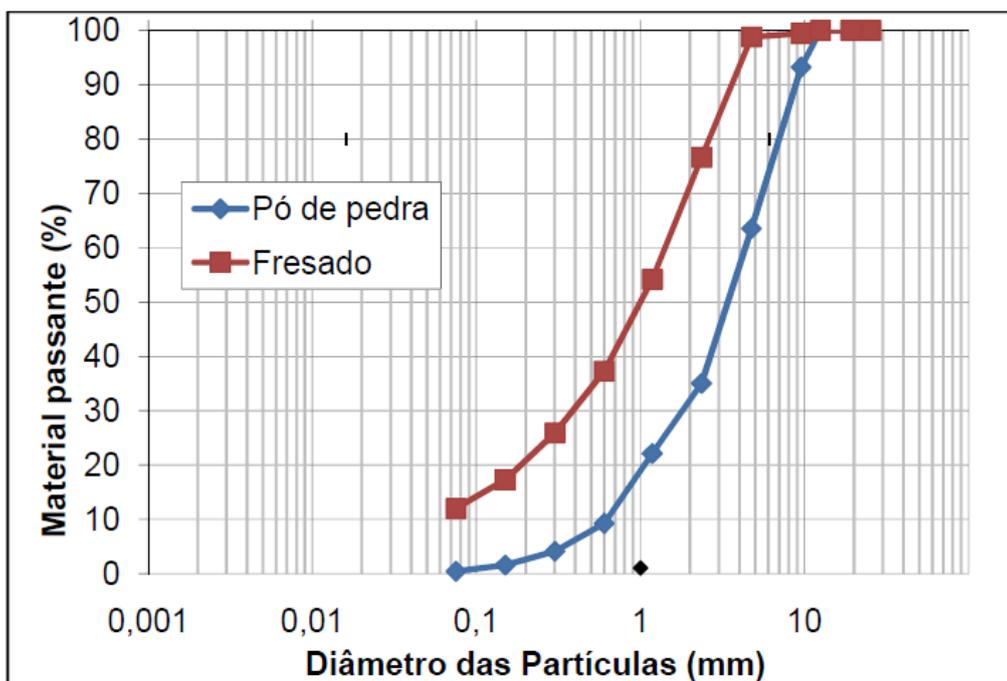
Após a secagem, as amostras foram fracionadas utilizando as peneiras de #3/4 à #200 apresentadas na Figura 13. Esse fracionamento visou determinar a curva granulométrica do material fresado e permitiu determinar a adição adequada de pó de pedra. O Gráfico 1 mostra as curvas granulométricas do material fresado e do pó de pedra. Com base nestas curvas, decidiu-se adicionar 20% de pó de pedra aos 100% de material fresado, formando um traço de material fresado: pó de pedra igual a 1: 0,2.

Figura 13 – Jogo de peneiras utilizadas para determinar a granulometria



Fonte: elaboração própria

Gráfico 1 – Curva granulométrica do material fresado e do pó de pedra

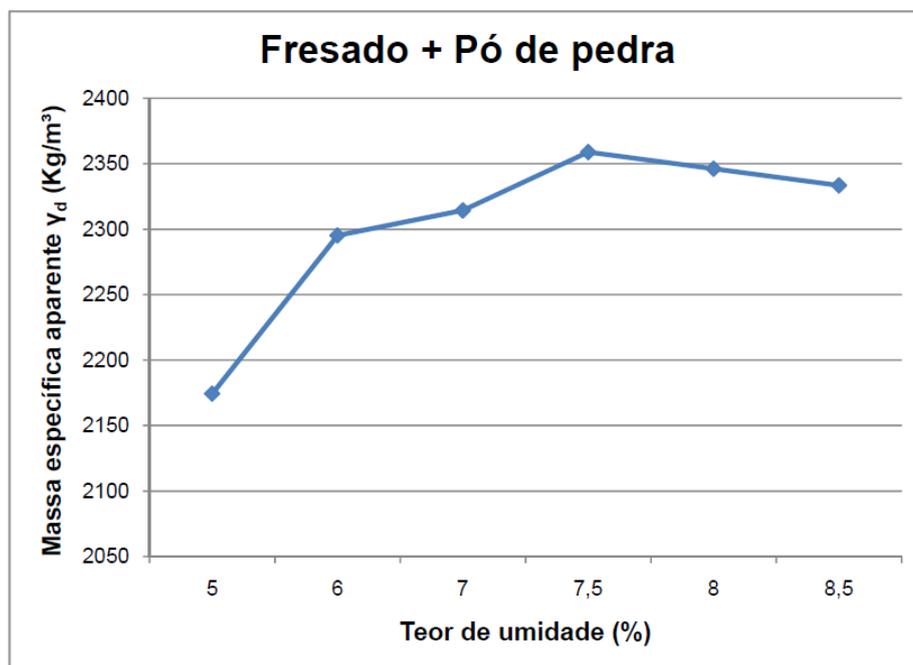


Fonte: elaboração própria

3.2.2.3 Determinação do teor de umidade

O teor de umidade ótima do material foi determinado seguindo a NBR-7182/1982 Ensaio de Compactação Proctor na energia modificada, começando com umidade em 5% aumentando em 1% para cada ponto da curva que foi traçada. Observa-se no Gráfico 2 que a umidade ótima do fresado + 20% pó de pedra foi obtida com 7,5% de umidade. Sabendo que a adição de cimento aumenta o percentual de finos e, conseqüentemente, a absorção de água, decidiu-se utilizar um teor de umidade de 8% em relação ao material fresado + 20% pó de pedra.

Gráfico 2 – Umidade ótima do material fresado + pó de pedra



Fonte: elaboração própria

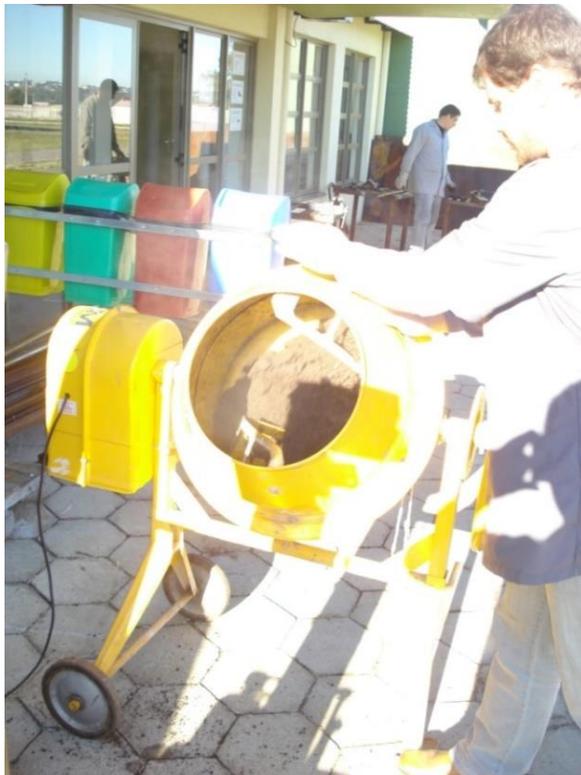
3.2.2.4 Mistura

A mistura foi feita com uso de betoneira (Figura 14) para garantir uma melhor homogeneização, sendo adotado os seguintes passos:

1. Adicionar todo o material fresado e o pó de pedra (1 : 0,2), rodando a betoneira até garantir que está bem homogeneizado;
2. Adicionar todo o aglomerante, também rodando a betoneira até garantir a homogeneização;
3. Adicionar a água gradativamente com a betoneira em movimento até que toda a água seja integrada à mistura;

4. Bater a mistura por cerca de 1 a 2 minutos;
5. Analisar o material para garantir que está uniforme dentro da betoneira, como apresentado na Figura 15. Caso contrário, retornar ao passo 4.

Figura 14 – Betoneira utilizada nos experimentos.



Fonte: elaboração própria

A Figura 15 mostra como ficou o material após ser homogeneizado.

Figura 15 – Material pronto para a moldagem



Fonte: elaboração própria (2014)

3.2.2.5 Compactação

O método adotado para a compactação foi o de energia de compactação modificada, procedendo em temperatura ambiente e utilizando compactador mecânico Marshall, com aplicação de 55 golpes por camada seguindo a norma DNER ME 107 (DNER, 1994). A Figura 16 mostra o compactador que foi utilizado. É importante mencionar que este trabalho foi o primeiro a utilizar o compactador mecânico disponível na UNIPAMPA com algumas adaptações necessárias para a fixação dos CPs.

Figura 16 – Compactador mecânico Marshall



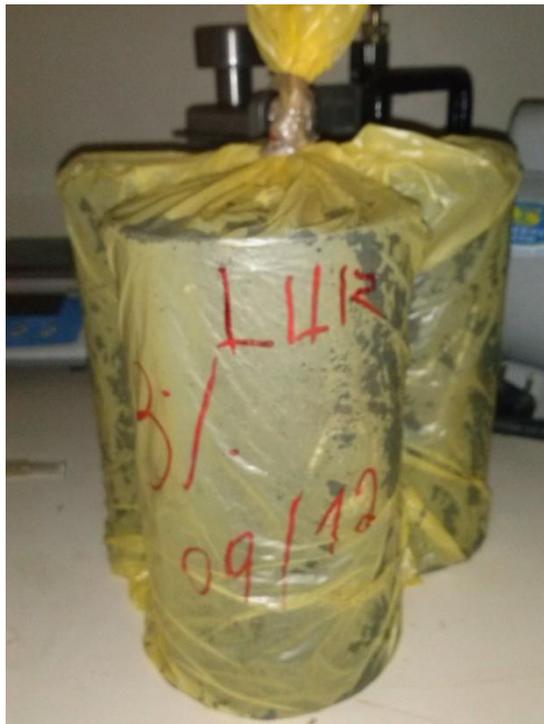
Fonte: Elaboração própria

3.2.3 Tempo de Cura

Após moldados, os corpos de prova foram desmoldados 24 horas depois e embalados a vácuo em sacos plásticos resistentes, assim minimizando a perda de umidade e o contato com o meio. A idade dos corpos de prova foi identificada por sua data de moldagem. A Figura 17 mostra os CPs embalados para a cura e identificados. No tempo de cura, os CPs foram conservados em sala com temperatura constante de 22 °C.

Foram adotadas três idades diferentes para o rompimento dos corpos de prova: 7, 14 e 28.

Figura 17 – CPs embalados a vácuo e identificados



Fonte: elaboração própria

3.2.4 Corpo de Prova

Para os ensaios de compressão, os corpos de prova foram moldados em laboratório de forma cilíndrica, com medidas de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura (10 x 20 cm). Foram rompidos três corpos de prova, obtendo-se três forças (F_1 , F_2 e F_3) para o rompimento de cada um. O resultado final da força aplicada em cada ensaio é a média destas forças. No entanto, caso ocorra discrepância de alguma das forças, a mesma foi descartada, não participando do cálculo da média.

Os corpos de prova foram moldados com quatro combinações de materiais distintas, totalizando 36 CPs, como apresentado a seguir.

3.2.4.1 Fresado + 20% Pó de Pedra

Foram moldados corpos de prova com apenas material fresado + 20% pó de pedra, sem nenhum tipo de aglomerante, assim estabelecendo o parâmetro de referência para comparar a diferença de comportamento em relação aos traços com adição de cimento. Conforme apresentado na Seção 3.2.3, os corpos de prova foram rompidos com três idades distintas. Como em cada análise foram rompidos três corpos de prova, portanto foram necessários 9 CPs, como exibido na Figura 18.

Figura 18 – Quantidade de CPs necessários para a análise de um traço



Fonte: Elaboração própria

3.2.4.2 Fresado + 20% Pó de Pedra + Adição de Cimento

Nestes corpos de prova foi adicionado cimento ao material fresado e ao pó de pedra. Segundo (SPECHT et. al., 2012), o teor adicionado de cimento varia ao redor de 3%. No Brasil é prática determinar o teor de cimento baseando-se na resistência à compressão simples aos 7 dias de cura (que deve superar os 2,1MPa para o caso de bases). Deve-se mencionar que elevados teores de cimentos enrijecem o material tornando-o suscetível à fadiga.

Tendo como base (SPECHT et. al., 2012), foram adotados três percentuais distintos de adição de cimento: 3, 5, 7 %, visando encontrar a porcentagem que apresenta o melhor comportamento. Esses percentuais geram os seguintes traços (material fresado: pó de pedra: cimento):

- M1 → 1: 0,2 : 0,07
- M2 → 1: 0,2 : 0,05
- M3 → 1: 0,2 : 0,03

Como calculado para o fresado + 20% pó de pedra, foram necessários 9 corpos de prova para cada porcentagem, totalizando 27 corpos de prova de fresado + pó de pedra com adição de cimento.

3.2.5 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

A resistência à compressão simples (RCS) ou resistência à compressão não-confinada é largamente utilizada para dosagem e controle de qualidade de concreto de cimento Portland e de solo-cimento. Após um determinado tempo de cura, as amostras de 10x20cm são submetidas a um esforço de compressão até sua ruptura (SPECHELT et. al., 2012).

A resistência à compressão simples do corpo de prova é calculada dividindo a carga de ruptura pela seção transversal do corpo de prova sendo o resultado expresso com aproximação de 10 kPa, conforme apresentado na Equação 1.

$$\sigma = \frac{F}{\pi * r^2} \quad (1)$$

Onde: σ – tensão; F – força; r – raio do corpo de prova.

De acordo com a norma DNER ME 201 (DNER, 1994), na execução do ensaio coloca-se o corpo de prova (CP) sobre o prato fixo da máquina de ensaio, de forma que o eixo vertical do cilindro alinhe-se com o centro de carga do prato rotulado móvel. Faz-se com que este encoste suavemente no corpo de prova, ajeitando-o manualmente até que o contato entre o prato de carga e a base do corpo de prova seja uniforme e completo. O carregamento é então iniciado, continuamente e sem choques, durante todo o decorrer do ensaio sendo submetidas à velocidade constante de ruptura igual a 0,5 mm/min.

A Figura 19 ilustra o equipamento que é utilizado no ensaio de compressão simples.

Figura 19 – Prensa hidráulica EMIC modelo DL 20000



Fonte: Elaboração própria (2014)

4 ENSAIOS E RESULTADOS

Neste Capítulo é apresentado o roteiro dos ensaios realizados para analisar o comportamento das misturas a serem aplicadas em base e sub-base, assim como os resultados obtidos nos mesmos.

4.1 Roteiro dos ensaios

Os CPs eram moldados e 24 horas após desmoldados e pesados em uma balança de precisão de 0,01 gramas. Os primeiros ensaios de RCS e deformação foram realizados colocando os CPs submersos em água 24 horas antes do dia do ensaio. Esses ensaios permitiram constatar que a massa dos CPs não alterava significativamente, apresentando diferença de gramas originada pela própria reação do aglomerante. Portanto, constatou-se que a perda de umidade entre a moldagem e o dia do ensaio era mínima, não necessitando submergi em água para sua saturação. A Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3 apresentam a variação de massa entre a data de desmoldagem e a do ensaio para as 3 idades de cura: 7, 14 e 28 dias, respectivamente, mostrando essa pequena perda de umidade pela variação da sua massa. O Gráfico 3 apresenta a variação de umidade durante o tempo de cura.

Tabela 1 – Variação de massa com 7 dias de cura

M3 - 7 dias	CP 1	CP 2	CP 3
desmoldagem (gramas)	3044,8	3049,5	3065,9
ensaio (gramas)	3031,0	3037,1	3058,0
M2 - 7 dias	CP 1	CP 2	CP 3
desmoldagem (gramas)	3042,4	3031,2	3012,3
ensaio (gramas)	3020,1	2996,2	2988,5
M1 - 7 dias	CP 1	CP 2	CP 3
desmoldagem (gramas)	3041,2	3031,7	3039,3
ensaio (gramas)	3023,9	3017,8	3017,4

Fonte: elaboração própria

Tabela 2 – Variação de massa com 14 dias de cura

M3 - 14 dias	CP 1	CP 2	CP 3
desmoldagem (gramas)	3015,1	3055	3047,6
ensaio (gramas)	2995,4	3031,8	3032
M2 - 14 dias	CP 1	CP 2	CP 3
desmoldagem (gramas)	3061,3	3055,6	3054
ensaio (gramas)	3044,3	3041,6	3040,1
M1 - 14 dias	CP 1	CP 2	CP 3
desmoldagem (gramas)	3073	3047,4	4062,9
ensaio (gramas)	3058,6	3032,6	3043

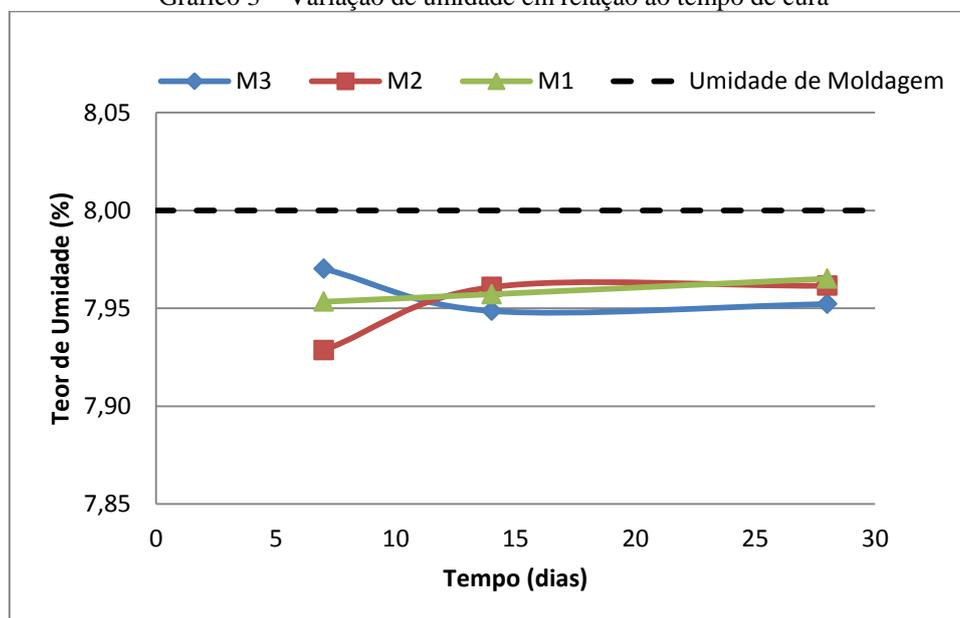
Fonte: elaboração própria

Tabela 3 – Variação de massa com 28 dias de cura

M3 - 28 dias	CP 1	CP 2	CP 3
desmoldagem (gramas)	2992	3036	3029,1
ensaio (gramas)	2972	3013	3018
M2 - 28 dias	CP 1	CP 2	CP 3
desmoldagem (gramas)	3056,6	3051,6	3043,8
ensaio (gramas)	3042	3036	3030
M1 - 28 dias	CP 1	CP 2	CP 3
desmoldagem (gramas)	3055,6	3047,7	3059,6
ensaio (gramas)	3041	3035	3047

Fonte: elaboração própria

Gráfico 3 – Variação de umidade em relação ao tempo de cura



Fonte: elaboração própria

Após o tempo de cura, os CPs foram pesados e preparados com os Transformadores Lineares Diferenciais Variáveis (LVDTs, do Inglês *Linear Variable Differential Transform*) para medir sua variação no comprimento, como apresentado na Figura 20. A seguir os CPs foram levados para a Máquina Universal de Ensaio da marca EMIC modelo DL20000 (apresentada na Figura 21) para aplicação de carga e obtenção dos resultados de tensão e deformação.

Figura 20 – CP preparado com os LVDTs



Fonte: elaboração própria

Figura 21 – CP na Máquina Universal de Ensaio da marca EMIC



Fonte: elaboração própria

4.2 Resistência à compressão simples (RCS)

RCS é dos parâmetros mais utilizados em cálculo de projetos na engenharia, mesmo onde não é o principal esforço solicitante pela estrutura. As Tabelas 4 a 6 apresentam os valores obtidos de RCS (média e desvio padrão) dos traços adotados para tempo de cura de 7, 14 e 28 dias.

Tabela 4 – CPs com 7 dias de cura

7 dias						
Mistura	Composição	CP 1	CP 2	CP 3	Média (MPa)	Desvio padrão
RF	Fresado + pó	0,15	0,19	0,26	0,20	0,06
M3	fresado + pó + cimento	0,64	0,92	0,84	0,80	0,14
M2	fresado + pó + cimento	1,11	1,25	0,95	1,10	0,15
M1	fresado + pó + cimento	1,73	1,6	1,66	1,66	0,07

Fonte: elaboração própria

Analisando a Tabela 4 (7 dias de cura), nota-se que existe uma grande variação de resistência entre os traços. Como esperado, o menor valor é da mistura referência (RF) de 0,20 MPa e o maior valor é da mistura com 7% de adição de cimento de 1,66 MPa. Comparando a mistura com adição de cimento de menor resistência com a de maior, podemos notar um acréscimo de 107,5%. Também pode ser notado que todas as misturas apresentaram diferenças entre suas resistências, podendo concluir que todos os teores de adições resultaram em benefício a mistura referência (RF).

Tabela 5 – CPs com 14 dias de cura

14 dias						
Mistura	Composição	CP 1	CP 2	CP 3	Média (MPa)	Desvio padrão
RF	fresado+pó	0,18	0,19	0,25	0,21	0,04
M3	fresado + pó + cimento	0,73	0,88	Perdido	0,805	0,11
M2	fresado + pó + cimento	1,15	1,23	1,31	1,23	0,08
M1	fresado + pó + cimento	perdido	1,983	1,88	1,93	0,07

Fonte: elaboração própria

Na Tabela 5 (14 dias de cura) notar-se que as resistências continuaram aumentando, como esperado, mas ainda não chegaram a valores almeçados. Observa-se que a média da mistura com 3% foi pouco alterada. Adicionalmente, um CP foi perdido por causa da incoerência de dados gerados. Já os CPs com mistura de 7% apresentaram um acréscimo de resistência satisfatório, de 16% em relação aos ensaios de 7 dias. Houve também perda de um CP com defeito ocorrido no equipamento na hora do ensaio, onde foi aplicando cargas sem gerar resultados, tanto de força como deformação.

Tabela 6 – CPs com 28 dias de cura

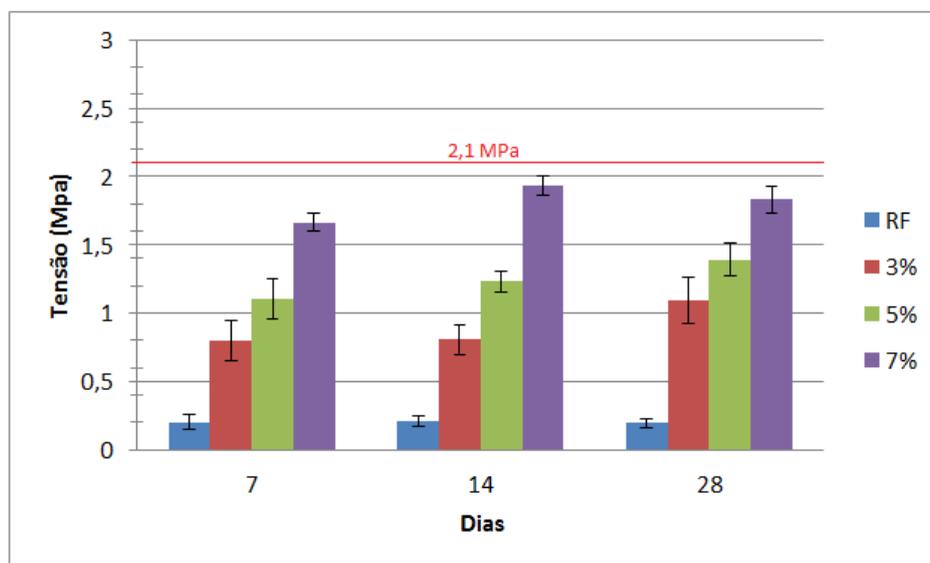
28 dias						
Mistura	Composição	CP 1	CP 2	CP 3	Média (MPa)	Desvio padrão
RF	fresado+pó	0,17	0,23	0,18	0,193	0,03
M3	fresado + pó + cimento	0,899	1,219	1,15	1,089	0,17
M2	fresado + pó + cimento	1,255	1,435	1,479	1,390	0,12
M1	fresado + pó + cimento	1,809	1,94	1,742	1,830	0,10

Fonte: elaboração própria

Na Tabela 6 temos os resultados do tempo de cura de 28 dias. Observa-se que tanto para a mistura de 3% como a de 5% obtivemos um aumento de resistência em relação aos 14 dias de 35% e 7% respectivamente. Com esses resultados ficamos otimistas para saber os resultados da mistura com 7%, porque esperava-se um aumento de resistência. No entanto, os resultados obtidos não atenderam as nossas expectativas, pois ao invés do aumento de resistência esperado ocorreu um decréscimo ou estabilização. Ocorreu um atraso de 2 dias nos ensaios de 28 dias para M3, este atraso fez com que os CPs fossem submetidos: (1) a variação de temperatura pois foram retirados da sala climatizada; (2) a perda de umidade por não estarem mais no vácuo; desta forma, os resultados dos ensaios de 28 dias foram comprometidos e não são confiáveis, necessitando uma repetição dos mesmos para uma confirmação. Essa confirmação não foi realizada nesse trabalho por questões temporais.

O Gráfico 4 apresenta os valores médios de resistências para cada idade de cura, permitindo uma melhor visualização dos resultados e a comparação de resistência entre as misturas.

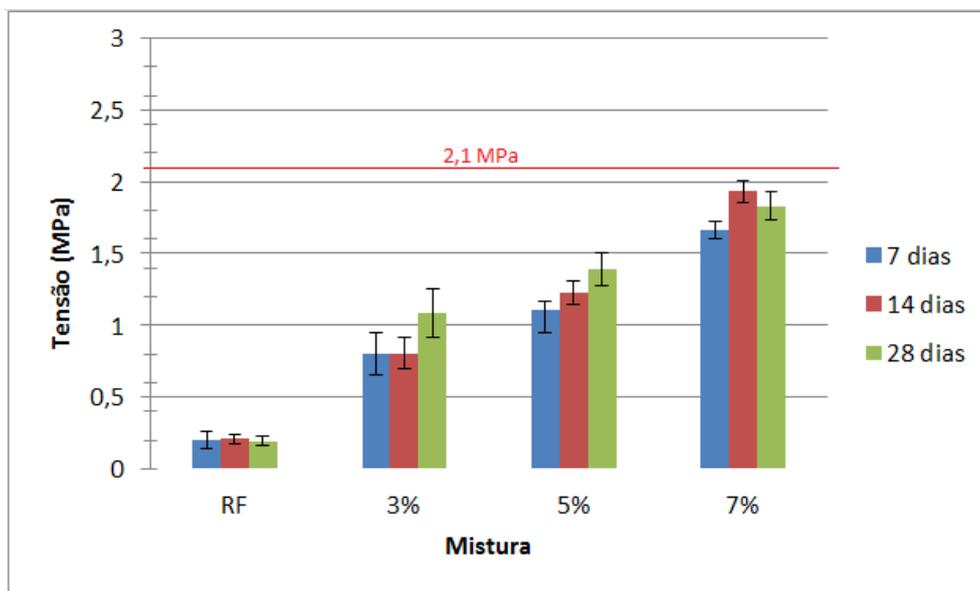
Gráfico 4 – Valores RCS agrupadas por tempo de cura



Fonte: elaboração própria

O Gráfico 5 apresenta valores médios das resistências para as misturas com percentuais distintos de adições, podendo assim melhor visualizar a variação entre cada traço.

Gráfico 5 – Valores RCS agrupadas por teor de adição

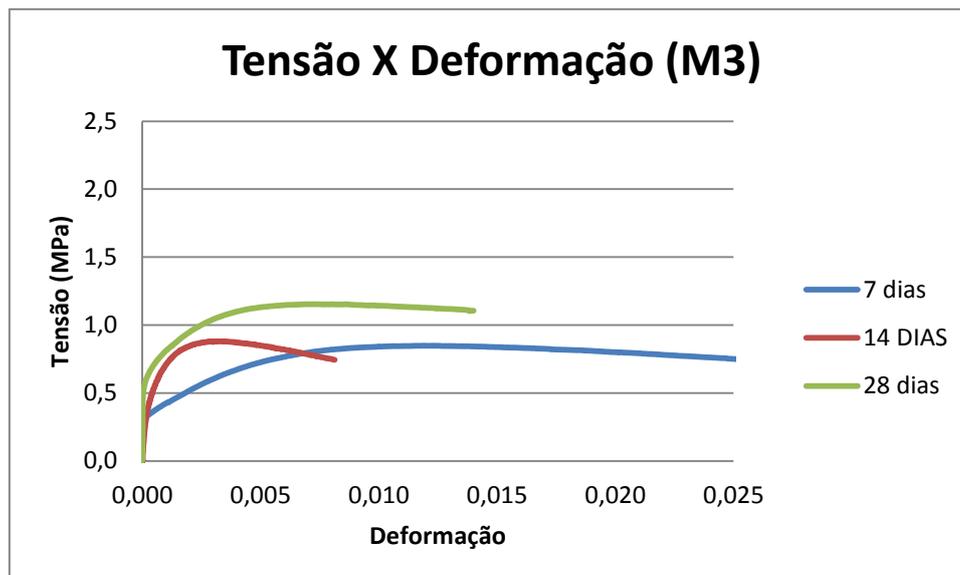


Fonte: elaboração própria

4.3 Tensão x Deformação

O Gráfico 6 mostra o comportamento de tensão x deformação dos CPs com 3% de adição, permitindo a análise do comportamento dos CPs durante o ensaio. As curvas apresentadas nesse gráfico mostram que, por mais que ocorram tensões similares, as deformações são distintas para os diferentes dias de cura. Com 7 dias de cura observa-se resistência similar a de 14 dias, no entanto os CPs com 7 dias tem uma maior deformação com as mesma cargas aplicadas. Os CPs com 28 dias apresentam uma maior resistência e uma menor deformação quando comparado aos demais.

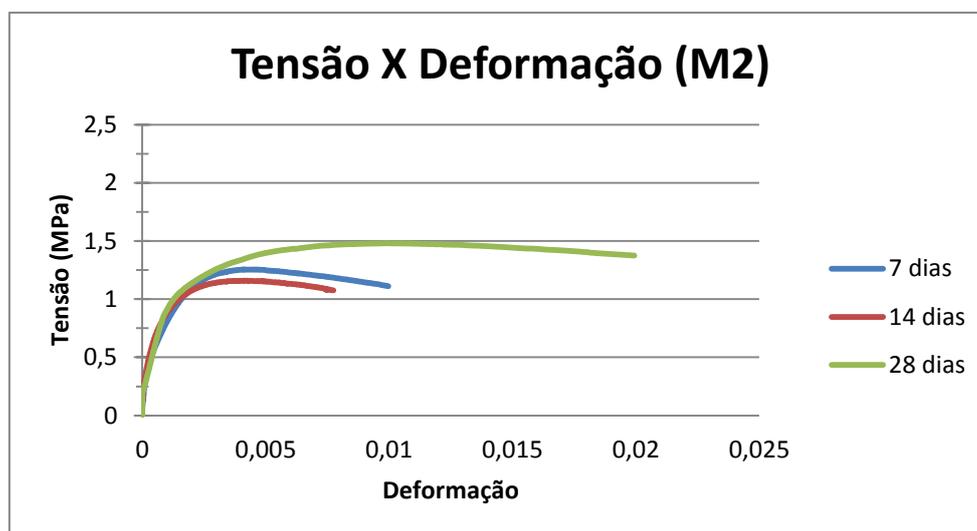
Gráfico 6 – Tensão x Deformação com adição de 3% de cimento



Fonte: elaboração própria

O Gráfico 7 apresenta o comportamento dos CPs com 5% de adição de cimento. Pode-se notar que, independente do tempo de cura, o comportamento dos CPs é similar nos carregamentos iniciais, apresentando diferença apenas na resistência aos carregamentos. Quando comparamos o Gráfico 7 ao Gráfico 6, observa-se um comportamento padrão das curvas em relação à deformação para a adição de 5% de cimento.

Gráfico 7 - Tensão Deformação com adição de 5% de cimento

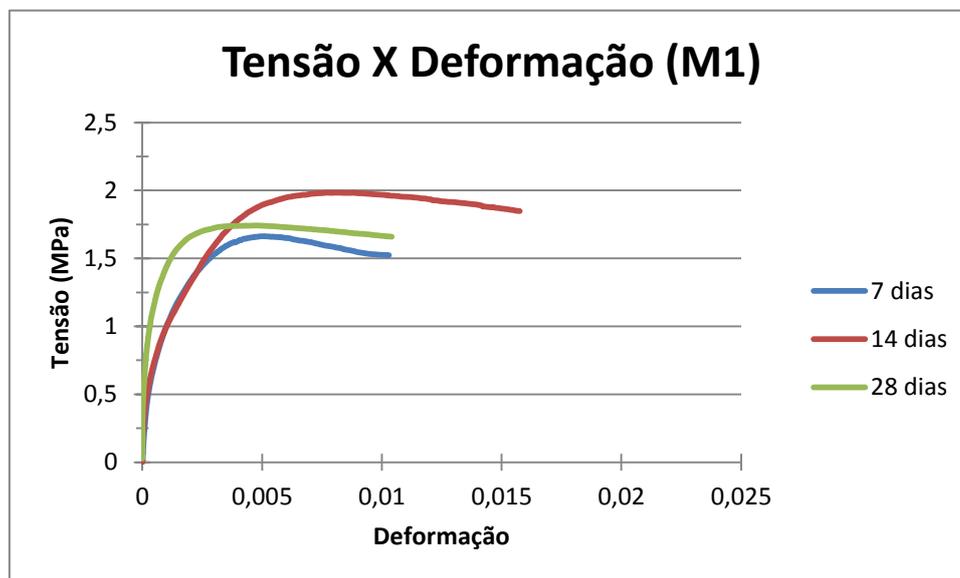


Fonte: elaboração própria

O Gráfico 8 mostra as curvas de tensão e deformação do CPs com adição de 7% de cimento. Observa-se que os CPs com 7 dias de cura são os com menor deformação, seguidos dos CPs de 14 e 28 dias, padrão inverso ao apresentado no Gráfico 6.

Adicionalmente, nota-se maior resistência da adição com 7% de cimento quando comparada com as adições de 3 e 5%. Contudo, a resistência obtida ainda é inferior à desejada de 2,1 MPa aos 7 dias tornando-a insatisfatória para aplicação em base, no entanto podendo ser utilizada em sub-base.

Gráfico 8 - Tensão Deformação com adição de 7% de cimento



Fonte: elaboração própria

4.4 Comparação entre Adição de Cimento e Adição de Sílica de Casca de Arroz

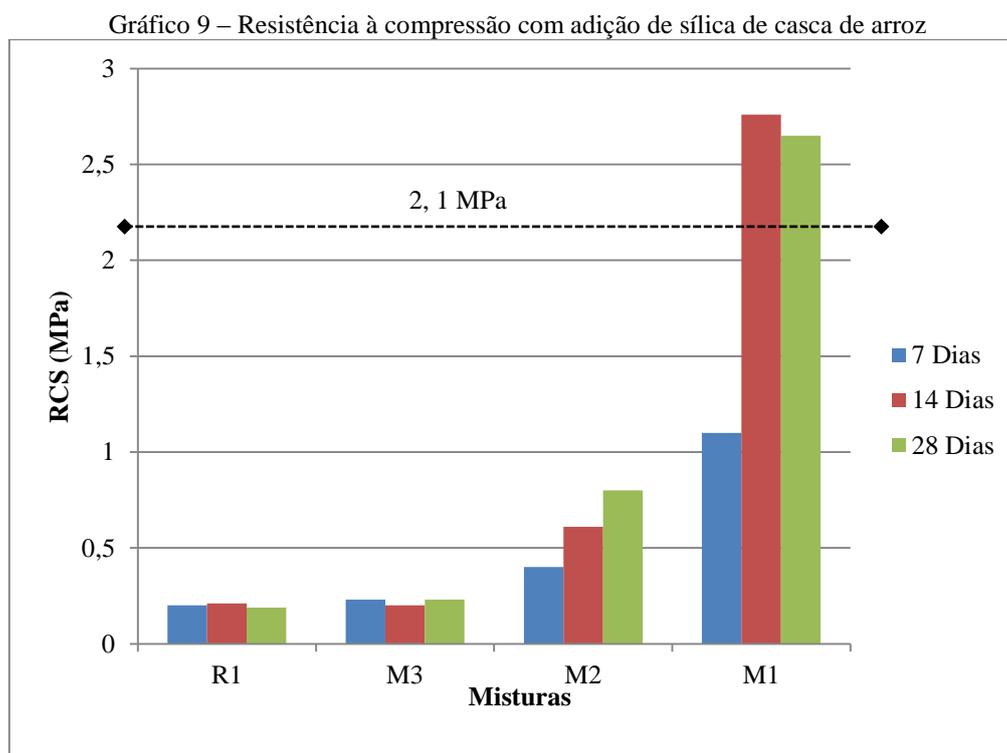
Os resultados referentes à adição de sílica de casca de arroz foram extraídos do Trabalho de Conclusão de Curso II intitulado “Reutilização do resíduo oriundo de serviços de restauração asfáltica em sua forma natural e com adições como alternativa de base e sub-base de pavimentos”, defendido por Felipe Fernandes Desconsi para obter o grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa (DESCONSI, 2014).

No trabalho de Desconsi, ele analisou três misturas para aplicação em base e sub-base:

- M1 = fresado + pó de pedra (20%) + sílica (10%) + cal (5%)
- M2 = fresado + pó de pedra (20%) + sílica (5%) + cal (2,5%)
- M3 = fresado + pó de pedra (20%) + sílica (3%) + cal (1,5%)

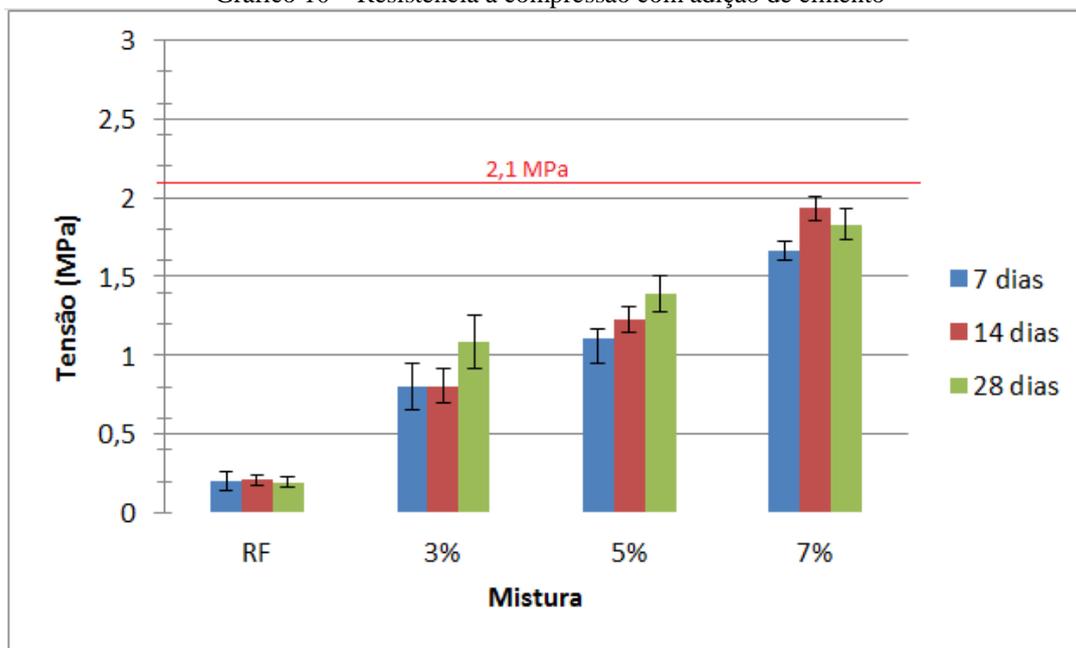
No trabalho de Desconsi 2014 e no presente trabalho foram utilizados os mesmos dados de referência e teores de adição de 3% e 5%, diferenciando apenas o maior teor, que em Desconsi 2014 é 10% enquanto nesse trabalho é 7%.

O Gráfico 9 apresenta os resultados de resistência à compressão obtidos por Desconsi, 2014. Quando esses resultados são comparados aos obtidos no presente trabalho (Gráfico 10), nota-se que as adições de 3% e 5% de cimento apresentam melhores resultados do que as adições de mesmo percentual de sílica de casca de arroz e cal. Na adição de 7% de cimento, os valores de resistência para tempo de cura de 7 dias também são melhores, mesmo quando comparados à adição de 10% de sílica de casca de arroz + 5% de cal. Entretanto, os valores de resistência para essa mesma adição com tempo de cura de 14 e 28 dias são inferiores aos da adição de 10% de sílica de casca de arroz + 5% de cal, não atingindo a meta de 2,1 MPa.



Fonte: DESCONSI, 2014

Gráfico 10 – Resistência à compressão com adição de cimento



Fonte: elaboração própria

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste Capítulo são apresentadas as conclusões e considerações finais desse trabalho que teve como objetivo analisar a viabilidade do uso de material fresado de rodovias com adição de cimento para aplicação em base e sub-base, visando o reaproveitamento do material fresado e assim reduzindo os impactos ambientais e aumentando a resistência da base e sub-base.

A seguir são retomados os objetivos específicos e apresentadas às conclusões obtidas através da análise dos resultados gerados pelos ensaios desenvolvidos ao longo desse trabalho:

- determinar a caracterização e variabilidade do material fresado;

A caracterização granulométrica foi obtida pelo ensaio de peneiramento com peneiras de aberturas de #3/4 à #200 mm, apresentando uma faixa muito boa com curva bem graduada.

- identificar a granulometria mais adequada de material fresado para ser aplicado em base e sub-base;

Através da caracterização nota-se que a melhor faixa granulométrica é obtida com o material passante na peneira com abertura 3/4 #, que permite a remoção de partículas com diâmetro superior a 2 centímetros e, conseqüentemente não apresenta vazios nos CPs e necessidade de adicionar outro material além do pó de pedra para a composição granulométrica.

- testar a aplicação de material fresado natural com adição de pó de pedra em base e sub-base;

Os ensaios realizados com as misturas referências não apresentaram valores satisfatórios de resistência. Desta forma, podemos concluir que o material fresado natural com adição de pó de pedra não deve ser utilizado como base ou sub-base.

- determinar as resistências a compressão simples (RCS) do material fresado com e sem adição de cimento Portland.

Os ensaios realizados demonstraram que a deformação apresentou um comportamento bom ou seja ficando bem distinto cada estágio de deformação, para M2 e M3 conforme o esperado devido a adição de aglomerante e os resultados anteriores obtidos; com a maior

adição M1 as curvas apresentam um comportamento não característico, assim para garantir a confiança do ensaio seria necessário refazer e comparar novos experimentos. Estas misturas que apresentaram uma discrepância entre as curvas tensão vs deformação e também obtiveram um comportamento não esperado conforme o tempo de cura, algum erro de procedimento ou calibração é um hipótese uma vez que o tempo de cura deveria reduzir a deformação mesmo acreditando não ter erro pois todas as misturas geraram gráficos padronizados entre o teor de 7% de adição de cimento.

Os ensaios realizados demonstraram que a resistência à compressão aumenta em função do aumento do percentual de adição de cimento. No entanto, mesmo o maior percentual adotado (7%) não atingiu a resistência esperada (2,1 MPa), tornando inviável seu uso para aplicação em base. Contudo é possível a utilização de tais misturas em sub-base.

- Comparar resultados de RCS entre material fresado mais cimento Portland e fresado mais sílica de casca de arroz.

Os resultados de RCS obtidos no presente trabalho foram comparados aos valores médios RCS das misturas com adição de sílica de casca de arroz extraídos do trabalho desenvolvido por Desconsi (DESCONSI, 2014). Essa comparação permitiu observar que as M2 e M3 apresentam melhores resultados do que as adições de mesmo percentual de sílica de casca de arroz. Na M1, os valores de resistência para tempo de cura de 7 dias também são melhores, mesmo quando comparados a adição de 10% de sílica de casca de arroz + 5% de cal. Entretanto, os valores de resistência para essa mesma adição com tempo de cura de 14 e 28 dias são inferiores aos da adição de 10% de sílica de casca de arroz + 5% de cal, não atingindo a meta de 2,1 MPa.

- analisar a viabilidade da aplicação de material fresado com adição de cimento Portland;

Os resultados fornecidos pelos ensaios realizados nesse trabalho mostram que a adição de cimento com teores de 3%, 5% e 7% não atingem a meta de 2,1 MPa de resistência aos 7 dias de cura, inviabilizando o uso desses traços para base de pavimentos flexíveis.

Com base nos resultados obtidos, concluímos que é necessário realizar ensaios com teores maiores de adição de cimento, visando obter uma resistência suficiente para a sua aplicação em base de pavimentos flexíveis. Com a análise do ganho de resistência obtido com os teores adotados, estima-se que a resistência de 2,1 MPa com 7 dias de cura seja obtida com adição de 9% de cimento.

5.1 Trabalhos Futuros

Como sugestões de trabalhos futuros, para que a mistura apresente a resistências almejada de 2,1 MPa aos 7 dias de cura, se propõe:

- Adicionar um teor maior de cimento em torno de 9%;
- Adicionar cal hidráulica aos traços realizados neste trabalho;
- Analisar os custos benefício, da adição de cimento ao material fresado;
- Realizar Ensaio de Rotarex para determinar o teor de ligante contido no matéria fresado;

6 REFERÊNCIAS

ABCP. **Associação Brasileira de Cimento Portland**. Disponível em: <www.abcp.org.br>. Acessado em: 13 Mar 2013.

ALVIM, I. M. **Fresagem e Reciclagem de Pavimentos e suas Aplicações na Restauração de Rodovias**, 1999. Disponível em: <www.fresar.com.br>. Acessado em: 15 fev 2013.

ARRA, Asphalt Reclaiming and Recycling Association. **Basic Asphalt Recycling Manual**, 2001, 269p.

BALBO, J. **Pavimentação Asfáltica: Materiais Projeto e Restauração**. São Paulo: oficina de textos, 2007, 558p.

BERNUCCI, L. et. al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BIANCHI, F. et. Al. **Estudo Comparativo entre Pavimento Rígido e Flexível**. Associação de Ensino Superior Unificado do Centro Leste. 2008.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**. Ed. Fazendo arte, São Paulo, SP, 2001.

DER, Departamento de Estradas de Rodagem. **Água para Amassamento e Cura de Argamassa e Concreto de Cimento Portland**. NBR NM 137, Rio de Janeiro, 1991.

DESCONSI, F. F. **Reutilização do Resíduo Oriundo de Serviços de Restauração Asfáltica em Sua Forma Natural e Com Adições como Alternativa de Base e Sub-Base de Pavimentos**. Trabalho de Conclusão do Curso, Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2014, 87 p.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Cimento Portland – Recebimento e Aceitação**. Norma DNER-EM 036/95, 1995, 10p.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Mistura Betuminosa à Frio, com Emulsão Asfálticas – Ensaio Marshall**. Norma DNER-ME 107/94, 1994, 9p.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Pavimentos Asfálticos – Fresagem à Frio – Especificação de Serviço**. Norma DNIT 159/2011-ES, 2011, 7p.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

KANDHAL, P. S.; MALLICK, R. B. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments**. Federal highway Administration, U. S. Department of Transportatio. FHWA-SA-98-042. Washington, 1997.

LEE, K. W.; BRYTON, T. E; HUSTON, M. **Development of Performance based Mix Design for Cold in-place Recycling (CIR) of Bituminous Pavements based Fundamental Properties**. Federal Highway Administration, U. S. department of Transportation. FHWA-IF05-014. Washington, 2002.

MINHOTO, M. **Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2005.

MOMM, L.; DOMINGUES, F. A. A. **Reciclagem de Pavimentos à Frio in Cito Superficial e Profunda**. In: 29º Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá, 1995, 601p.

NUNO, R. S. F. **Análise Estrutural de Pavimentos Rodoviários Aplicação a um Pavimento Reforçado com Malha de Aço**. Dissertação de Mestrado Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009, 119 p.

PEREIRA, P.; MIRANDA, C. **Gestão de Conservação dos Pavimentos Rodoviários**. Universidade de Braga, 1999.

PICANTO-SANTOS, L. et. al. **Pavimentos Rodoviários**. Ed. Almeida, Coimbra, 2006, 388p.

REIS, N. **Análise Estrutural de Pavimentos Rodoviários: Aplicação a um Pavimento Reforçado com Malha de Aço**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2009, 119 p.

RESPLANDES, H.; REZENDE, L. **Estudo da Reutilização do Material Betuminoso Fresado nas Camadas de Sub-base e Base de Pavimentos**. In: Congresso de pesquisa, ensino e extensão da UFG – CONPEEX, 2., 2005, Goiânia,3p.

SANTOS, M. **Dimensionamento de Camadas de Reforço de Pavimentos Rodoviários Flexíveis**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 2009, 203p.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**, São Paulo, 2007.

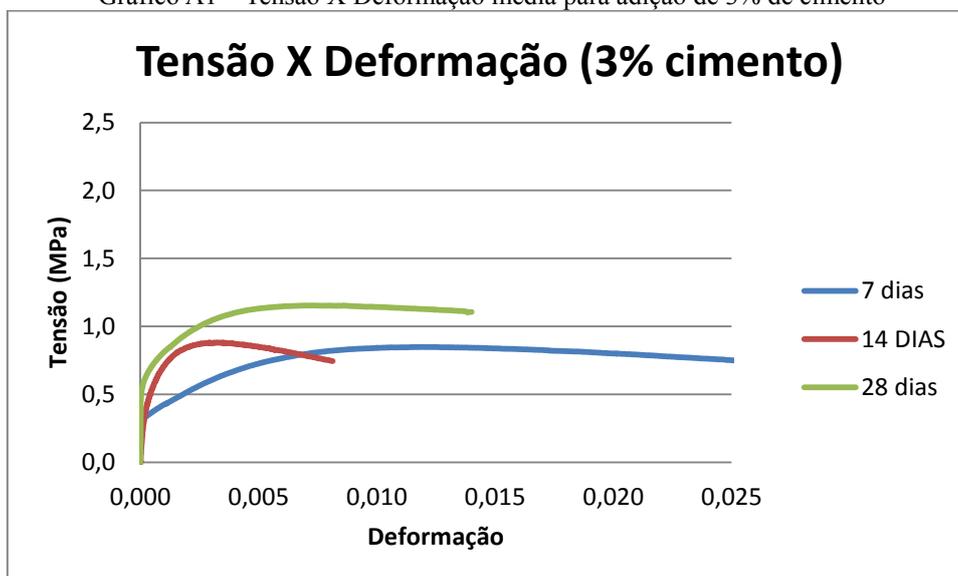
SENÇO, W. **Pavimentação**, São Paulo, 1980.

WIRTGEN GmbH. **Misturas de Materiais a Frio: Preparação e Processos**. Windhagen, 2004, 18p.

APÊNDICE A

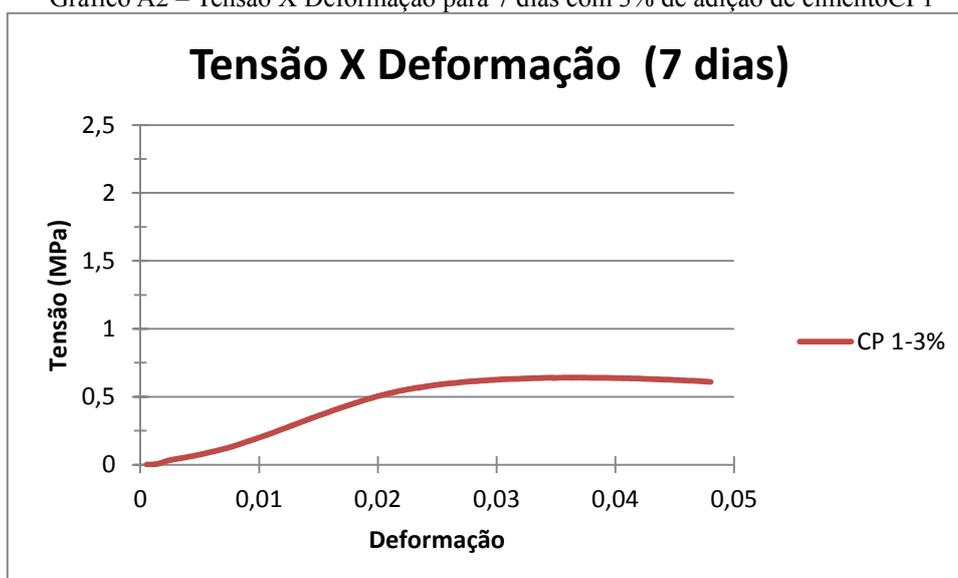
Neste apêndice são apresentados os gráficos de tensão e deformação de cada corpo de prova (CP), variando o percentual de adição de cimento (3%, 5% e 7%) e a idade de cura (7, 14 e 28 dias). Ao todo foram moldados 27 CPs (3 CPs x 3 percentuais de adição de cimento x 3 idades de cura), no entanto durante os ensaios alguns CPs foram perdidos, como apresentado nas Tabelas 4 a 6. Os gráficos dos CPs perdidos não são apresentados.

Gráfico A1 – Tensão X Deformação média para adição de 3% de cimento



Fonte: elaboração própria

Gráfico A2 – Tensão X Deformação para 7 dias com 3% de adição de cimento CP1



Fonte: elaboração própria

Gráfico A3 – Tensão X Deformação para 7 dias com 3% de adição de cimento CP2

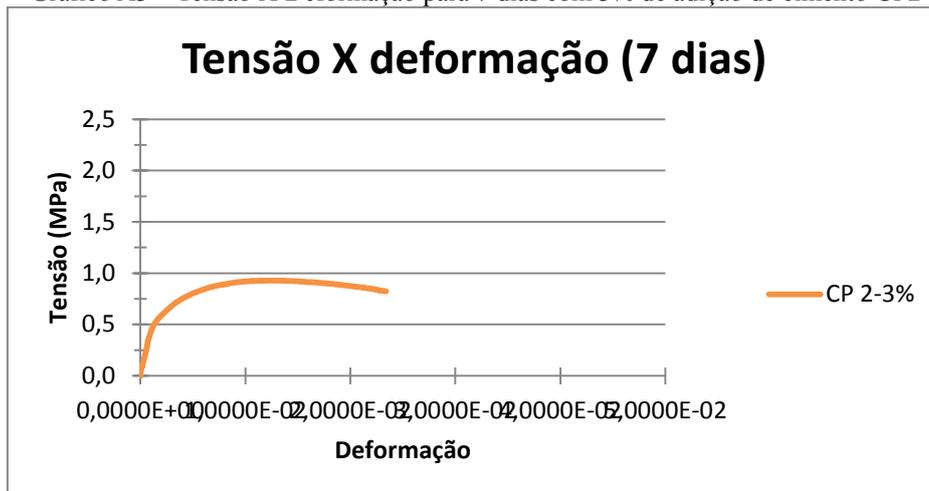


Gráfico A4 – Tensão X Deformação para 7 dias com 3% de adição de cimento CP3

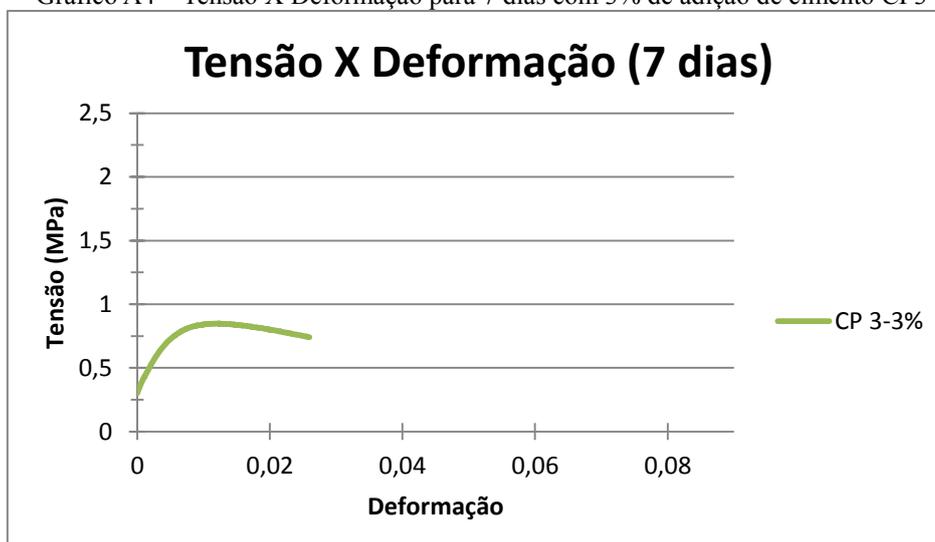


Gráfico A5 - Tensão X Deformação para 14 dias com 3% de adição de cimento CP4

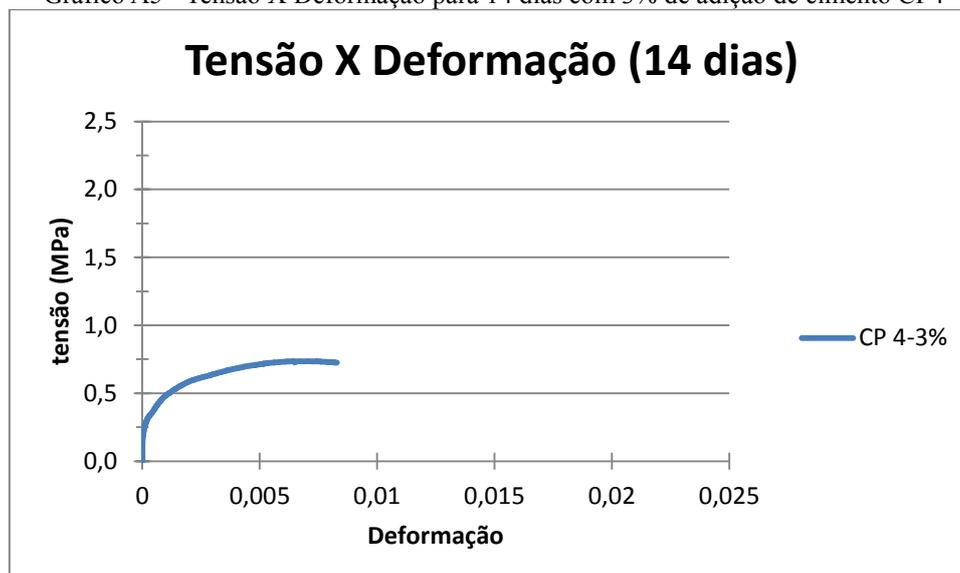
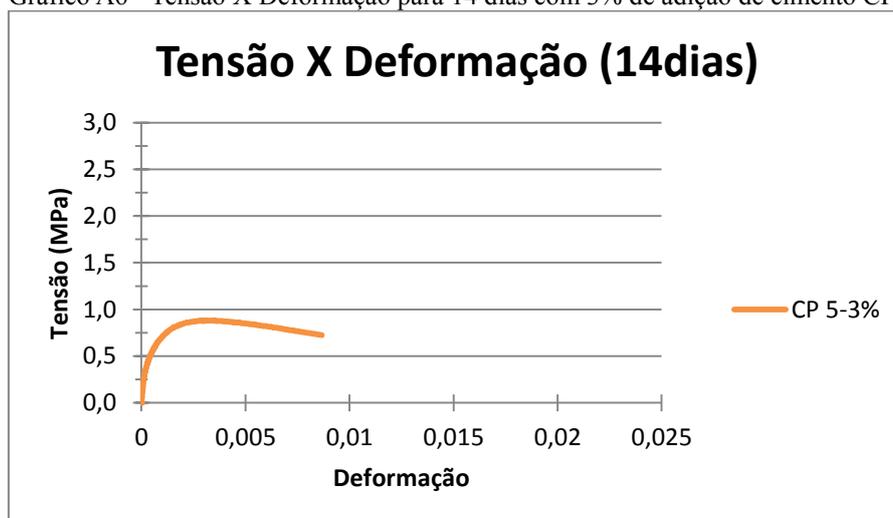
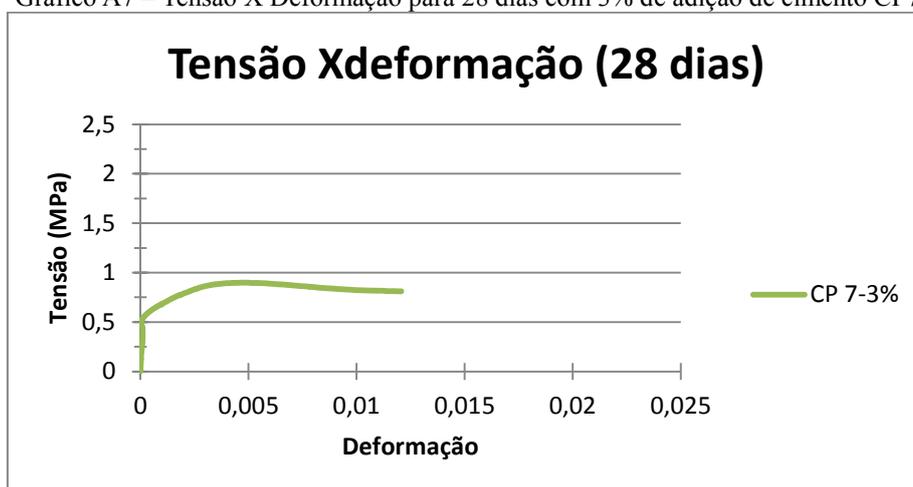


Gráfico A6 - Tensão X Deformação para 14 dias com 3% de adição de cimento CP5



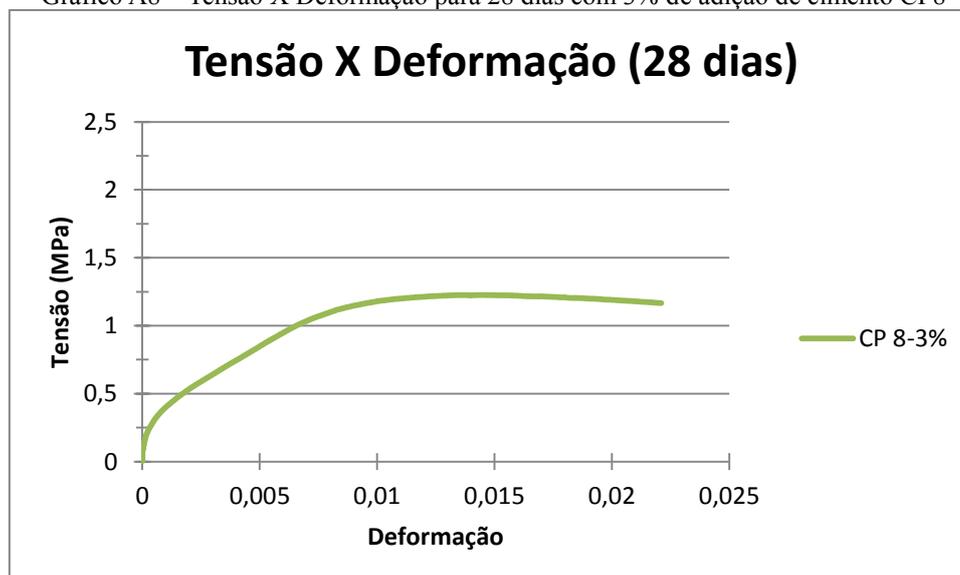
Fonte: elaboração própria

Gráfico A7 – Tensão X Deformação para 28 dias com 3% de adição de cimento CP7



Fonte: elaboração própria

Gráfico A8 – Tensão X Deformação para 28 dias com 3% de adição de cimento CP8



Fonte: elaboração própria

Gráfico A9 – Tensão X Deformação para 28 dias com 3% de adição de cimento CP9

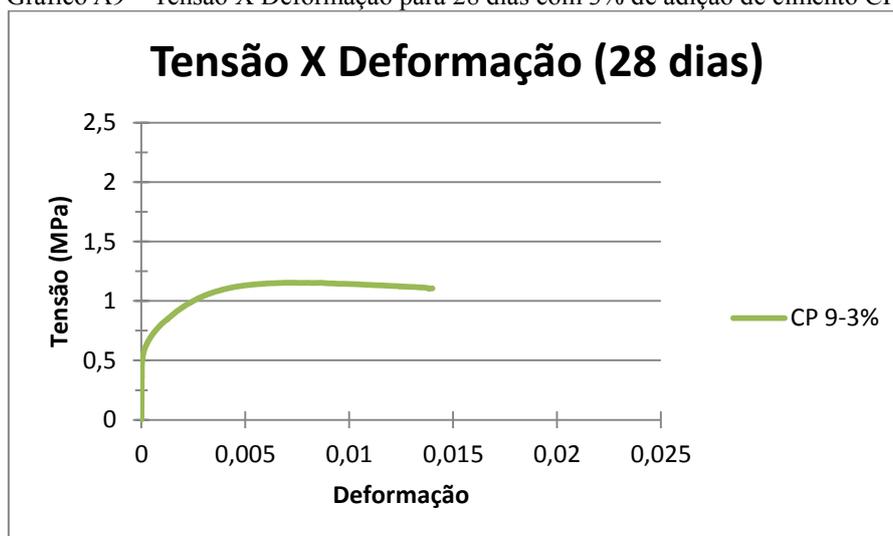


Gráfico A10 – Tensão X Deformação média para adição de 5% de cimento

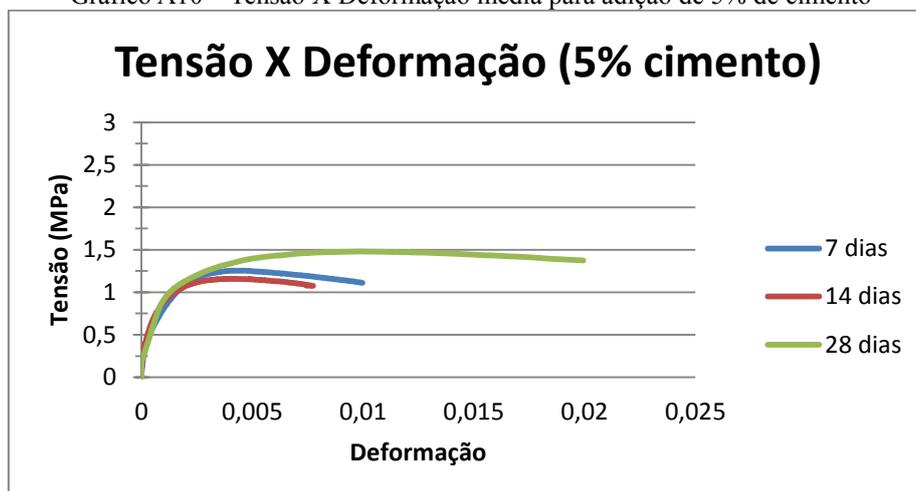
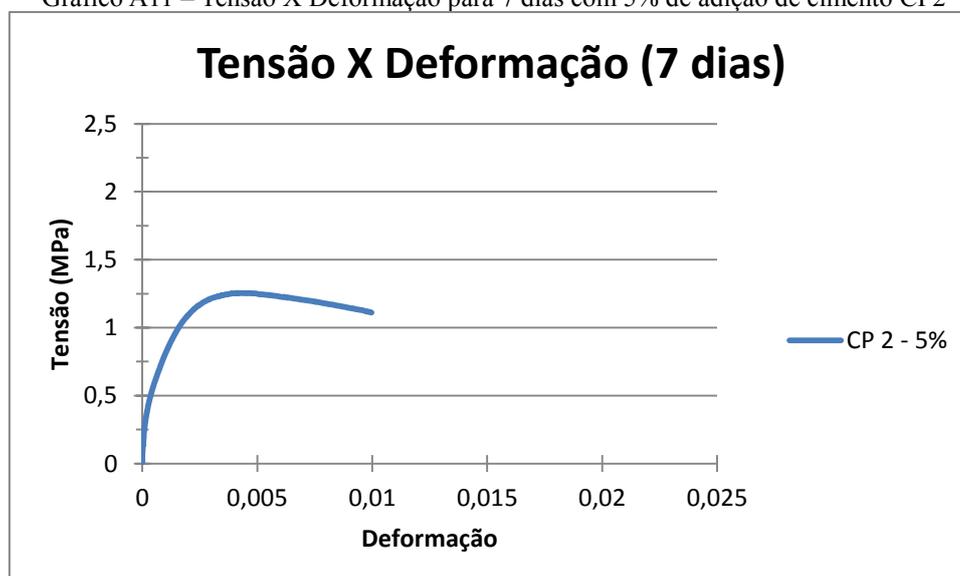
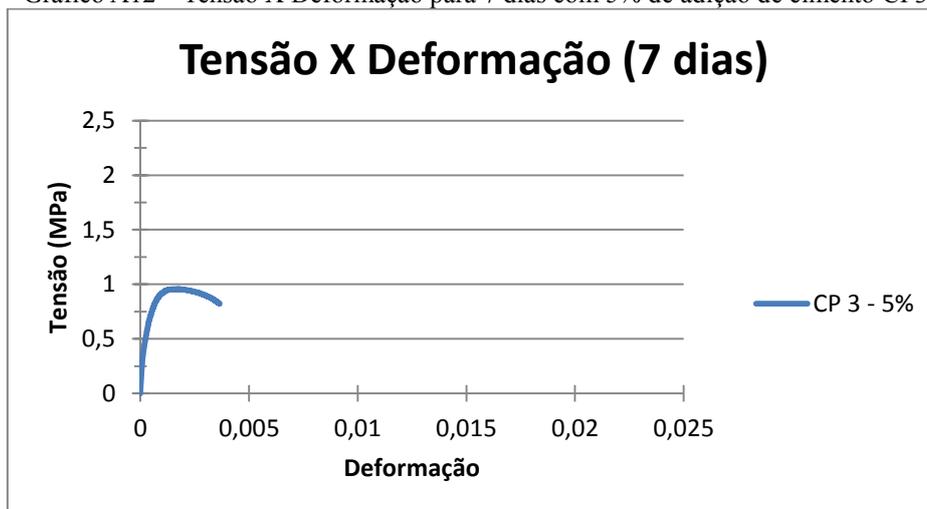


Gráfico A11 – Tensão X Deformação para 7 dias com 5% de adição de cimento CP2



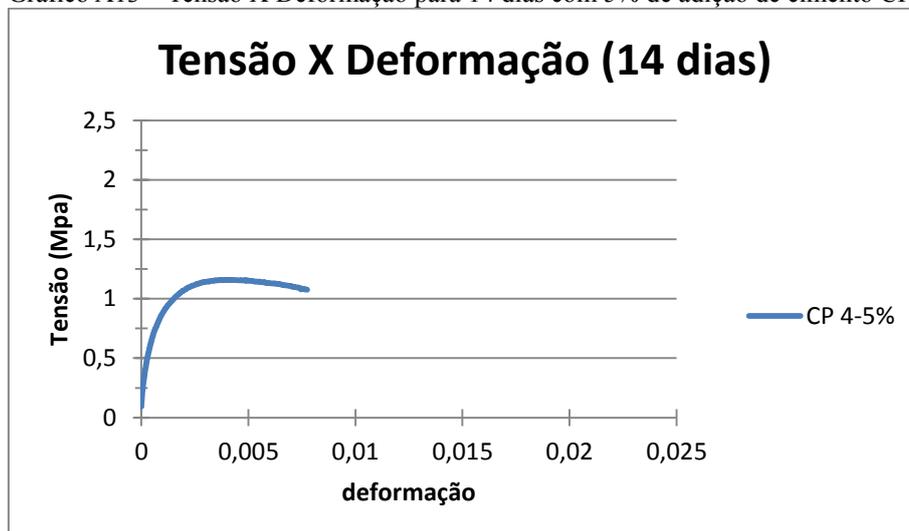
Fonte: elaboração própria

Gráfico A12 – Tensão X Deformação para 7 dias com 5% de adição de cimento CP3



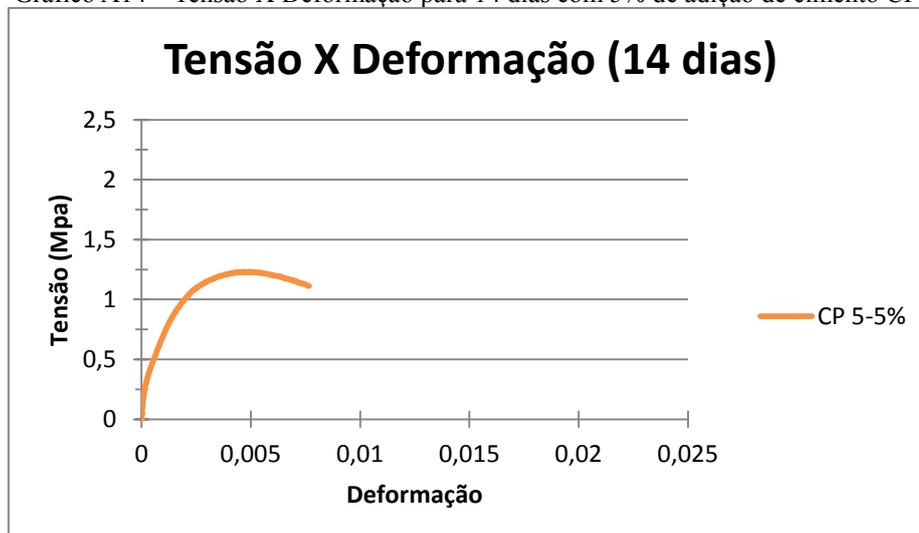
Fonte: elaboração própria

Gráfico A13 – Tensão X Deformação para 14 dias com 5% de adição de cimento CP4



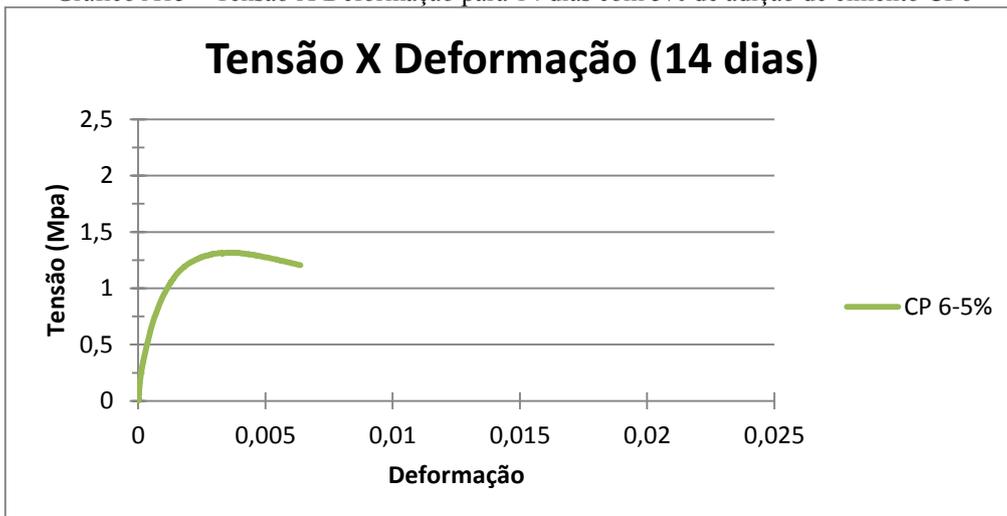
Fonte: elaboração própria

Gráfico A14 – Tensão X Deformação para 14 dias com 5% de adição de cimento CP5



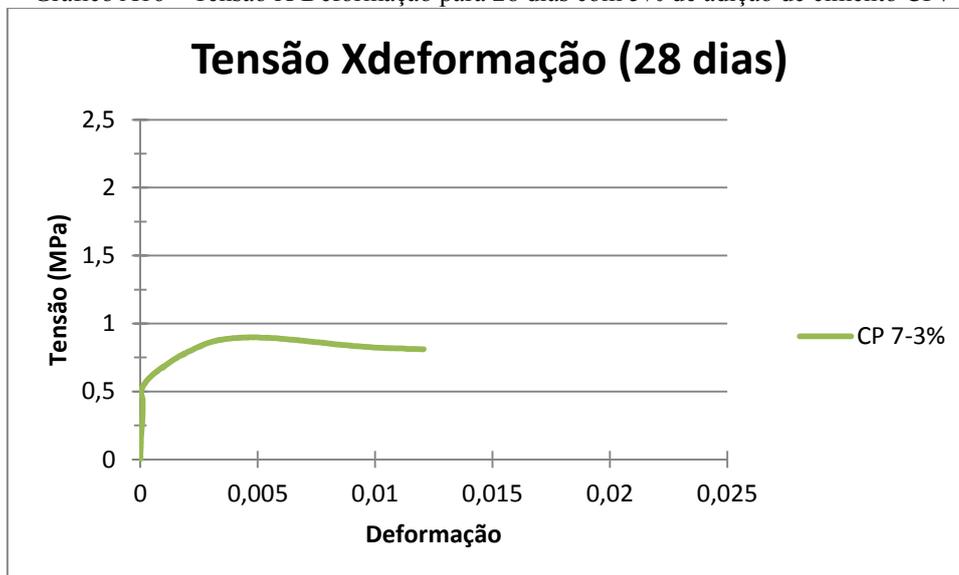
Fonte: elaboração própria

Gráfico A15 – Tensão X Deformação para 14 dias com 5% de adição de cimento CP6



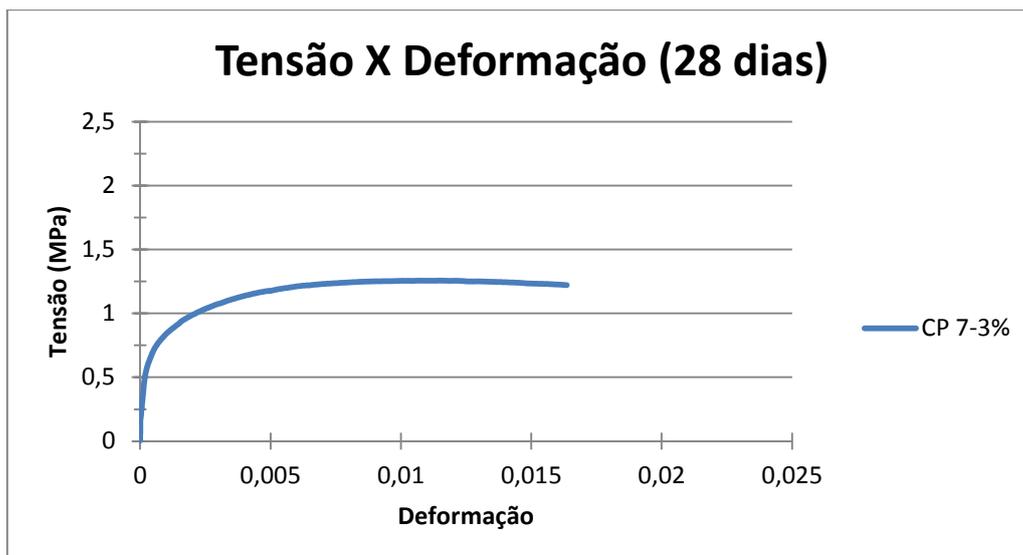
Fonte: elaboração própria

Gráfico A16 – Tensão X Deformação para 28 dias com 5% de adição de cimento CP7



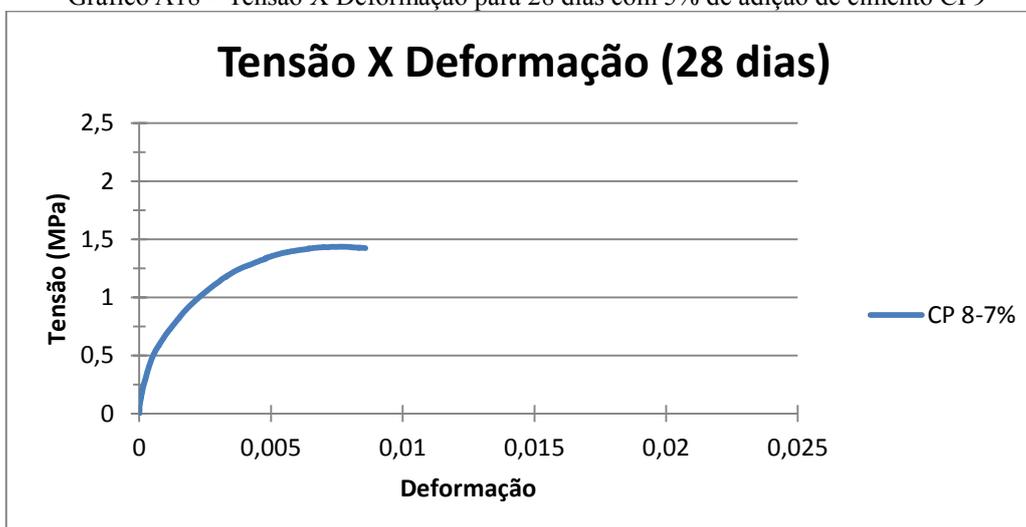
Fonte: elaboração própria

Gráfico A17 – Tensão X Deformação para 28 dias com 5% de adição de cimento CP8



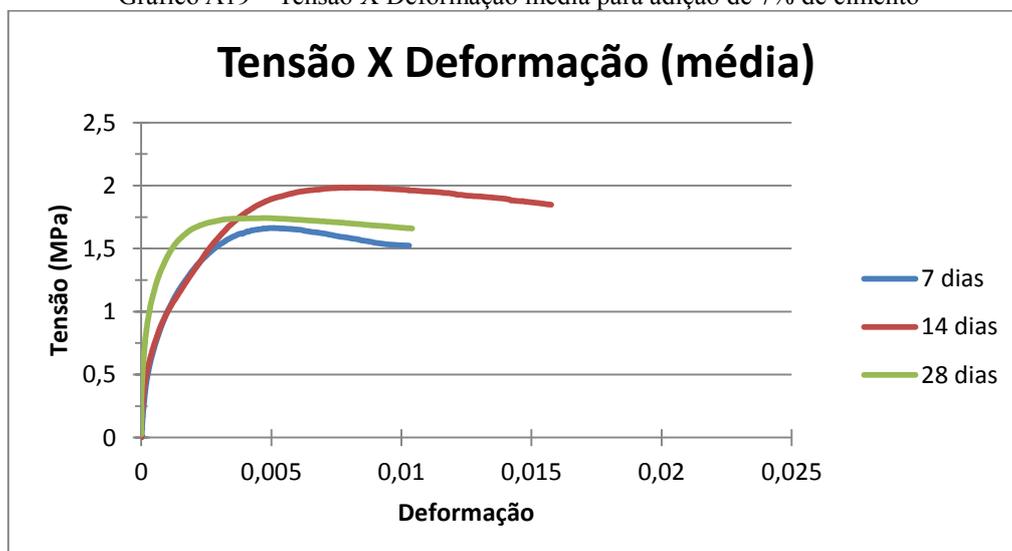
Fonte: elaboração própria

Gráfico A18 – Tensão X Deformação para 28 dias com 5% de adição de cimento CP9



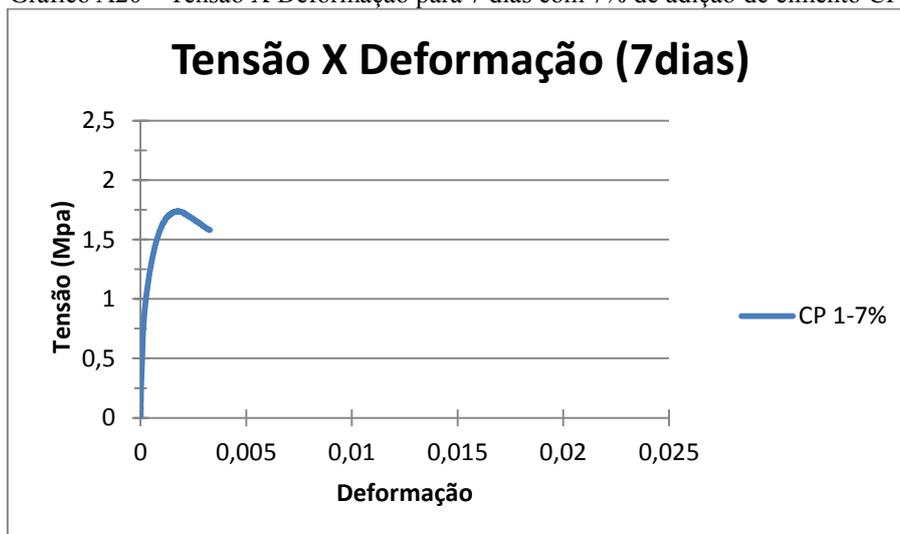
Fonte: elaboração própria

Gráfico A19 – Tensão X Deformação média para adição de 7% de cimento



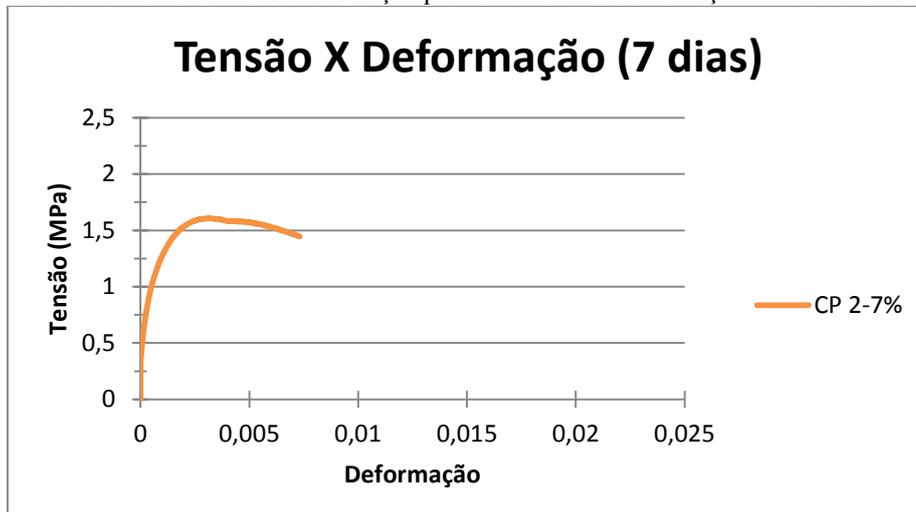
Fonte: elaboração própria

Gráfico A20 – Tensão X Deformação para 7 dias com 7% de adição de cimento CP1



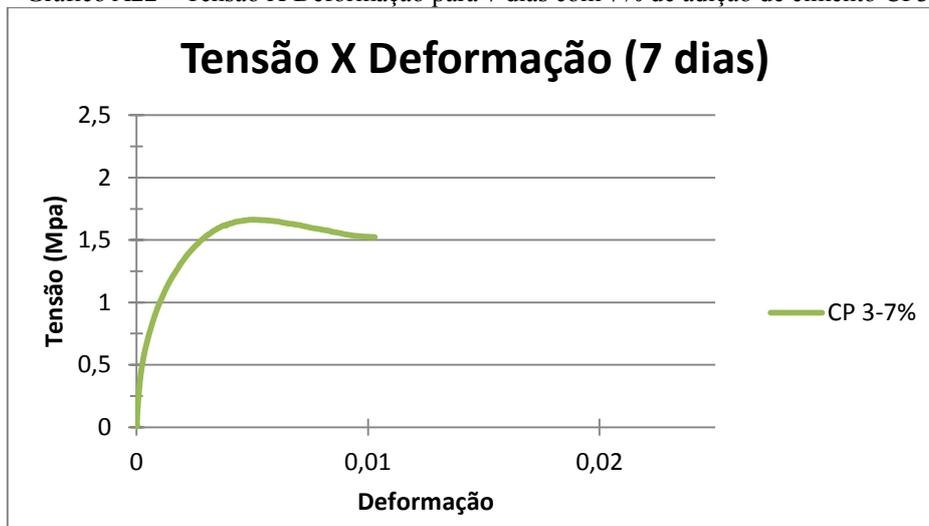
Fonte: elaboração própria

Gráfico A21 – Tensão X Deformação para 7 dias com 7% de adição de cimento CP2



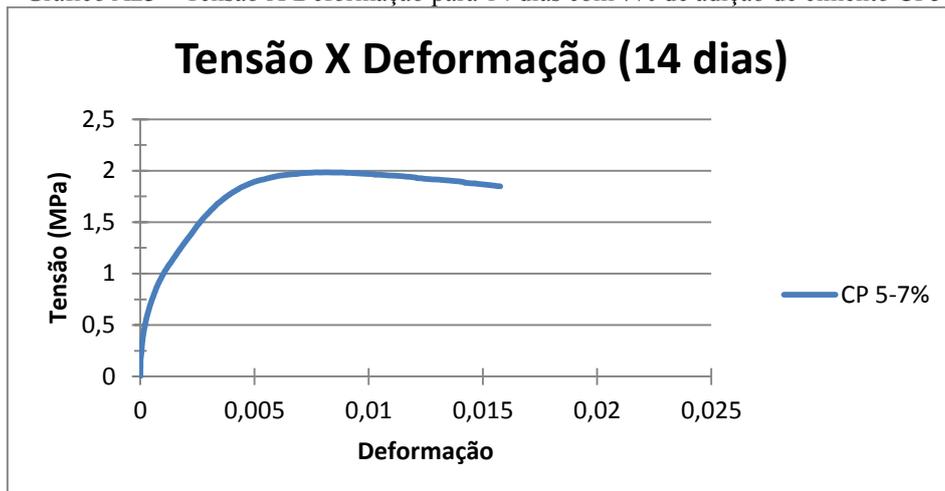
Fonte: elaboração própria

Gráfico A22 – Tensão X Deformação para 7 dias com 7% de adição de cimento CP3



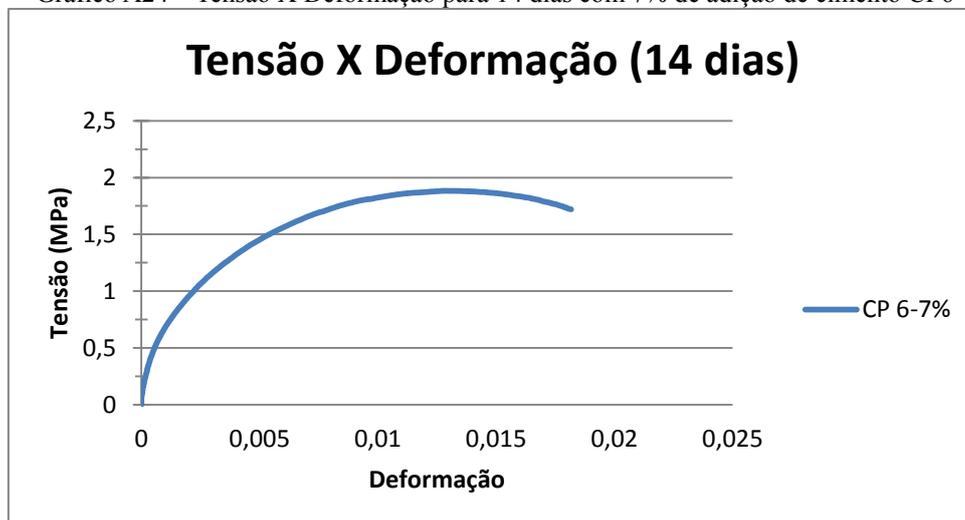
Fonte: elaboração própria

Gráfico A23 – Tensão X Deformação para 14 dias com 7% de adição de cimento CP5



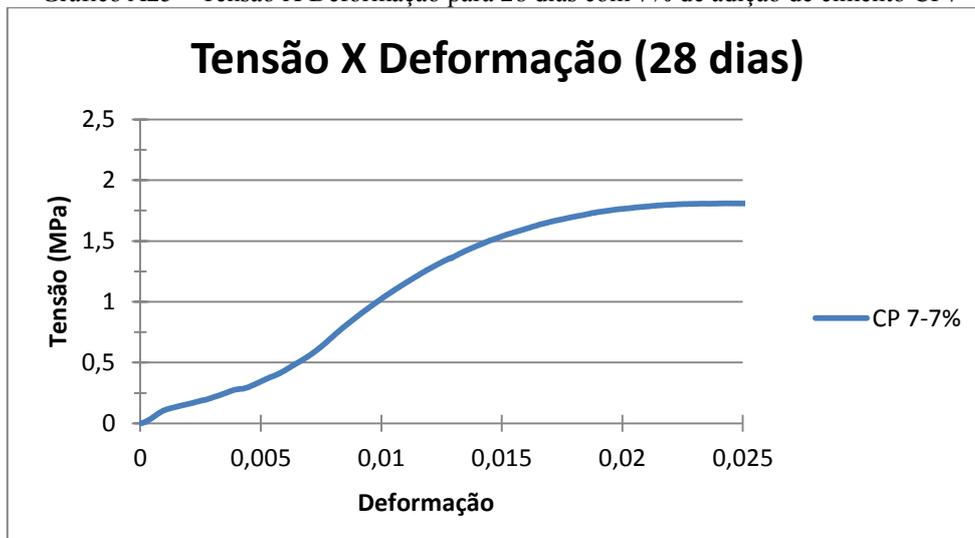
Fonte: elaboração própria

Gráfico A24 – Tensão X Deformação para 14 dias com 7% de adição de cimento CP6



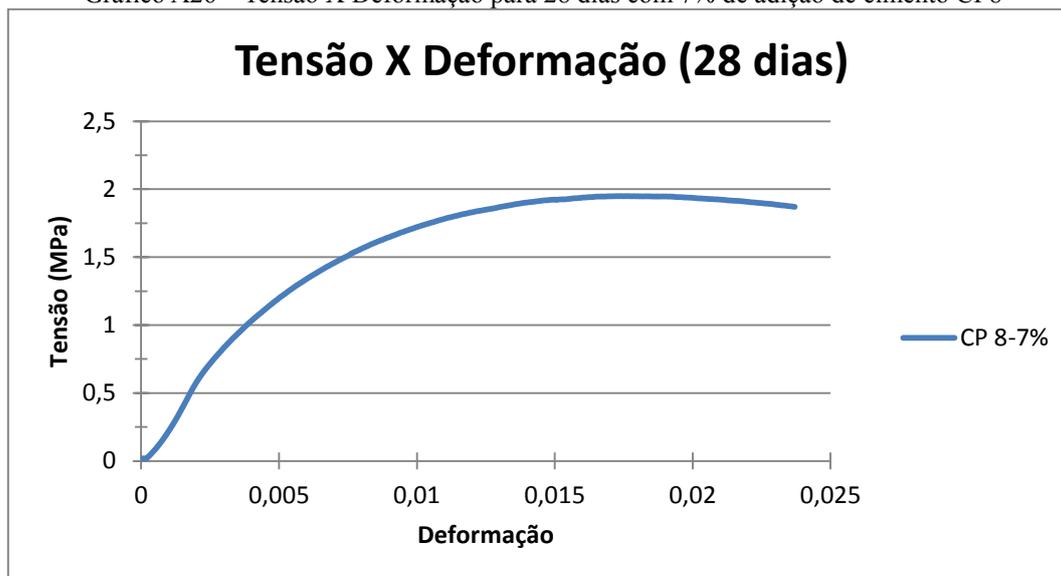
Fonte: elaboração própria

Gráfico A25 – Tensão X Deformação para 28 dias com 7% de adição de cimento CP7



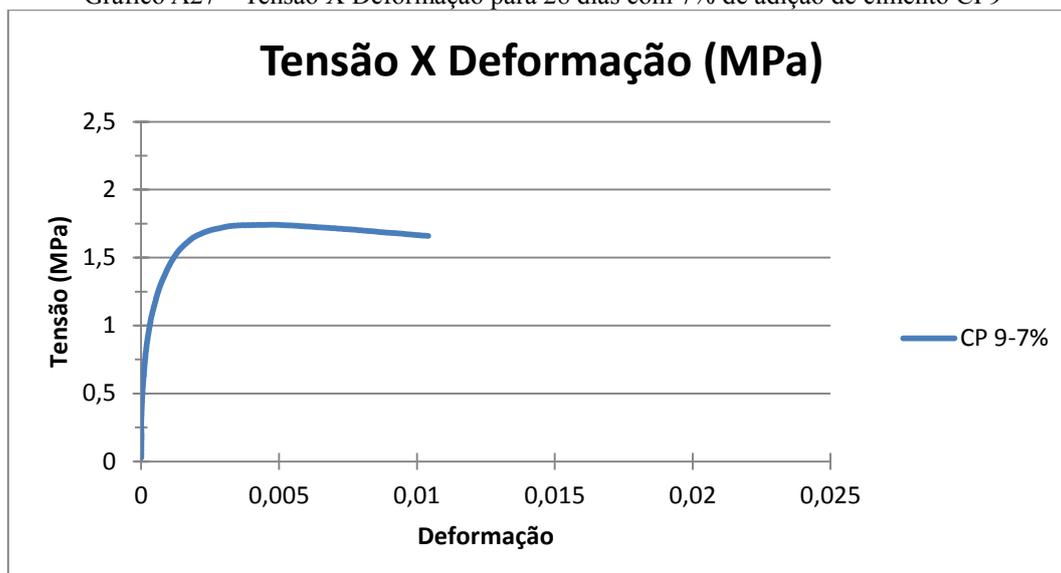
Fonte: elaboração própria

Gráfico A26 – Tensão X Deformação para 28 dias com 7% de adição de cimento CP8



Fonte: elaboração própria

Gráfico A27 – Tensão X Deformação para 28 dias com 7% de adição de cimento CP9



Fonte: elaboração própria