

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**EVOLUÇÃO TEMPORAL DA RESISTÊNCIA MECÂNICA
EM LABORATÓRIO, DE MISTURAS SIMULANDO A
RECICLAGEM DE PAVIMENTO ASFÁLTICO COM
ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND**

Cláudia Betine Gusmão

Campinas

2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

Cláudia Betine Gusmão

**EVOLUÇÃO TEMPORAL DA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM
LABORATÓRIO, DE MISTURAS SIMULANDO A RECICLAGEM DE
PAVIMENTO ASFÁLTICO COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND**

Dissertação apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. João Virgílio Merighi

Campinas, SP

2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

G972e Gusmão, Cláudia Betine
Evolução temporal da resistência mecânica em laboratório, de misturas simulando a reciclagem de pavimento asfáltico com adição de cimento portland / Cláudia Betine Gusmão. --Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientador: João Virgílio Merighi.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Pavimento de concreto asfáltico. 2. Cimento portland. 3. Resistência dos materiais. 4. Reciclagem. I. Merighi, João Virgílio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Temporal evolution of mechanical resistance in laboratory, of mixtures simulating asphalt pavement recycling with portland cement additions

Palavras-chave em Inglês: Asphalt concrete pavements, Portland cement, Strength of materials

Área de concentração: Engenharia de Transportes

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Cássio Eduardo Lima de Paiva, Carlos Yukio Suzuki

Data da defesa: 12/12/2008

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

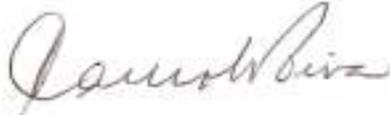
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

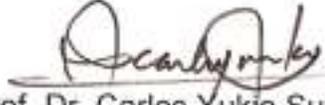
**EVOLUÇÃO TEMPORAL DA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM
LABORATÓRIO, DE MISTURAS SIMULANDO A RECICLAGEM DE
PAVIMENTO FLEXÍVEL COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND**

Cláudia Betine Gusmão

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:


Prof. Dr. João Virgílio Merighi
Presidente e Orientador/ Universidade de Campinas


Prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva
Universidade de Campinas


Prof. Dr. Carlos Yukio Suzuki
Universidade de São Paulo

Dedicatória

*Aos meus pais, pela ajuda durante
todo o trabalho.*

Agradecimento

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre me guiou e me deu forças na luta pela conquista de meus objetivos.

A minha família e ao meu esposo que sempre me ajudaram e incentivaram durante toda essa jornada com todo o carinho, amor e compreensão.

Ao Prof. Dr. João Virgílio Merighi, a quem dedico meu profundo reconhecimento e admiração, pela orientação durante todo o meu trabalho, pelos ensinamentos dados, por todo apoio e amizade.

Ao Eng.^o Valmir Bonfim, pela receptividade, pelo incentivo e pelos conhecimentos compartilhados e fornecimento de materiais para a execução de ensaios laboratoriais.

Ao Eng.^o Osvaldo Tchumantel Junior, da Betunel, pelo apoio e pela transmissão de conhecimentos técnicos.

Aos Eng.^{os} Ismael Mendes Alvim e Paulo César A. Oliveira, da Pavisan Construtora, pela cordialidade e pelos esclarecimentos técnicos, fundamentais para a execução desse trabalho.

A toda equipe de laboratório, que me ajudou durante a execução dos ensaios laboratoriais, bem como aos eng.^{os} Álvaro Sérgio Barbosa Junior e Rita Moura Fortes,

por ceder o laboratório da Lenc (Laboratório de Engenharia e Consultoria) para fins de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva, pelo apoio e sugestões que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Sr. Osmar Alves, pelos conhecimentos transmitidos e pela ajuda na realização dos ensaios feitos no laboratório da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Ao Engenheiro Cleiton, Diretor Regional do DER de Campinas, pela disponibilidade de suas equipes nas coletas dos solos utilizados nos ensaios.

E finalmente, ao Prof. Dr. João Virgílio Merighi, pela orientação, compreensão, paciência e conhecimentos transmitidos, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

GUSMÃO, C. B.; *“Evolução Temporal da Resistência Mecânica em Laboratório, de Misturas Simulando a Reciclagem de Pavimento Asfáltico com Adição de Cimento Portland”*. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP, 2008. 147p. Dissertação – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2008.

O presente trabalho visa estudar o processo de reciclagem de pavimento asfáltico com cimento Portland, através da análise de método de reciclagem, equipamentos utilizados, procedimentos empregados em campo, além do estudo das vantagens e desvantagens do uso da reciclagem em pavimentos asfálticos. O trabalho trata ainda de uma forma detalhada o pavimento asfáltico com adição de cimento Portland, através de ensaios tecnológicos simulando em laboratório, para diferentes dosagens o comportamento mecânico em função do tempo do material obtido em campo.

Palavras-Chave: pavimento de concreto asfáltico; cimento Portland.

ABSTRACT

GUSMÃO, C. B.; “Temporal Evolution of Mechanical Resistance in Laboratory, of Mixtures Simulating Asphalt Pavement Recycling with Portland Cement Additions”. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP, 2008. 147p. Dissertação – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2008.

This work studies the process of asphalted pavement recycling with cement Portland additive through the analysis of recycling method, equipments and procedures used in the field, in addition to studying the advantages and disadvantages of the use of recycling in asphalted pavement. The work also approaches in detail the recycled asphalt pavement with Portland cement additive, through technological tests through laboratory simulation, to different dosage and the analysis of mechanical behavior through time of that material obtained in field.

Key Words: asphalt concrete pavements; portland cement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Pavimento deteriorado com trincas em blocos (BR 459- trecho Pouso Alegre- MG- Congonhal- MG).	11
Figura 2.2- Depósito de brita e pó de pedra- Pedreira de Embu, em São Paulo.....	12
Figura 2.3- Depósito de areia do Rio Grande.....	12
Figura 2.4- Pedreira de Embu, em São Paulo.....	13
Figura 2.5- Recicladora <i>in situ</i> a quente- Remixer 4500- Wirtgen.....	14
Figura 2.6- Recicladora <i>in situ</i> a quente- AR 2000- Martec.....	15
Figura 2.7- Equipamentos em reciclagem com espuma de asfalto.	20
Figura 2.8- Material reciclado no processo com espuma de asfalto.....	21
Figura 2.9- Aplicação de cimento Portland (BR 459- trecho Pouso Alegre- MG Congonhal- MG).	23
Figura 2.10- Distribuição de água. Portland (BR 459- trecho Pouso Alegre- MG- Congonhal- MG).	23
Figura 2.11- Recicladora abastecida pelo caminhão tanque na reciclagem (BR 459- trecho Pouso Alegre- MG- Congonhal- MG).	24
Figura 2.12- Mistura do material reciclado ao cimento. (BR 459- trecho Pouso Alegre- MG- Congonhal- MG).	25
Figura 2.13- Usina fixa tipo <i>Batch Plant</i>	29
Figura 2.14 Usina <i>Drum Mixer</i> RD 110- Cifali.	29
Figura 2.15- Usina <i>Drum Mixer</i> – Cifali.	30
Figura 2.16- <i>Mobile mixing plant</i> KMA 200.....	31
Figura 2.17- Reciclagem a frio com recicladora BG-260, Martec.	32
Figura 2.18- Vista detalhada- 2200 CR- Wirtgen.....	33
Figura 2.19- Processo de reciclagem com o equipamento- 2200 CR	34

Figura 2.20- Equipamento de pequeno porte- W 35- Wirtgen	37
Figura 2.21- Tambor de corte do equipamento Raco 350.....	38
Figura 2.22- Câmara de trabalho e do bico para aspergir água ou emulsão Asfáltica- Raco 350- Wirtgen.	39
Figura 2.23- Fresagem superficial. (Vila Prudente- São Paulo- SP).	41
Figura 2.24-. Recicladora com caminhão tanque de água em operação. Cedido por Oliveira (2003).....	42
Figura 3.1- Amostra de brita graduada passada na peneira 0,0048 m.	49
Figura 3.2- Preparo da mistura para moldagem dos corpos de prova.	51
Figura 3.3- Corpo de prova sendo desmoldado em um extrator hidráulico.	51
Figura 3.4- Curva de compactação da BGS.....	54
Figura 3.5- Corpos de prova envolvidos com papel-toalha umedecido.....	55
Figura 3.6- Corpos de prova no recipiente com pó de serragem úmido.....	55
Figura 3.7- Recipiente com os corpos de prova, envolvido com plástico.	56
Figura 3.8- CP-02- Corpo de prova de BGS após ruptura.	57
Figura 3.9- Curva de resistência (resistência x teor de umidade).	58
Figura 3.10- Material fresado usado para o peneiramento grosso.....	60
Figura 3.11- Material fresado usado para o peneiramento fino.....	60
Figura 3.12- Mistura de BGS com material fresado e cimento Portland.....	61
Figura 3.13- Curva de compactação.	63
Figura 3.14- Ruptura do corpo de prova na prensa.....	63
Figura 3.15- Equipamento rotarex durante o ensaio.	65
Figura 3.16- Corpo de prova moldados no ensaio de compactação.	68
Figura 3.17- Curva de compactação- mistura de dosagem 60% BGS e 40% material fresado, com 3% de cimento.....	69

Figura 3.18- Curva de compactação- mistura de dosagem 50% BGS e 50% material fresado, com 3% de cimento.....	70
Figura 3.19- Curva de compactação- mistura de dosagem 40% BGS e 60% material fresado, com 3% de cimento.....	71
Figura 3.20- Corpo de prova na prensa após ruptura no ensaio de resistência à compressão simples.....	73
Figura 3.21- Curva de resistência- mistura de dosagem 60% BGS e 40% material fresado, com 3% de cimento.....	75
Figura 3.22- Curva de resistência- mistura de dosagem 50% BGS e 50% material fresado, com 3% de cimento.....	75
Figura 3.23- Curva de resistência- mistura de dosagem 40% BGS e 60% material fresado, com 3% de cimento.....	76
Figura 3.24- Corpos de prova após desmoldagem.....	78
Figura 3.25- Corpos de prova capeados.....	79
Figura 3.26- Resultado do ensaio de resistência à compressão simples para dosagem 60% BGS e 40% material fresado.....	85
Figura 3.27- Resultado do ensaio de resistência à compressão simples para dosagem 50% BGS e 50% material fresado.....	85
Figura 3.28- Resultado do ensaio de resistência à compressão simples para dosagem 40% BGS e 60% material fresado.....	86
Figura 3.29- Resultado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para dosagem 60% BGS e 40% material fresado.....	86
Figura 3.30- Resultado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para dosagem 50% BGS e 50% material fresado.....	87
Figura 3.31- Resultado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para dosagem 40% BGS e 60% material fresado.....	87

Figura 3.32- Resumo dos resultados do ensaio de resistência à compressão simples.	90
Figura 3.33- Resumo dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	92
Figura 4.1- Proposta de dosagem na reciclagem de pavimento asfáltico com cimento Portland.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Tipos de reciclagem.	8
Tabela 2.2- Classificação de reciclagem.....	9
Tabela 2.3- Escolha de método de reciclagem..	10
Tabela 2.4- Vantagens e desvantagens- Reciclagem com emulsão asfáltica.....	18
Tabela 2.5- Vantagens e desvantagens- Reciclagem com espuma de asfalto.	21
Tabela 2.6- Vantagens e desvantagens- Reciclagem com cimento Portland	27
Tabela 2.7- Vantagens e desvantagens da Reciclagem de Pavimentos Asfálticos	43
Tabela 3.1- Determinação de Equivalente Areia	50
Tabela 3.2- Ensaio de compactação da BGS.....	53
Tabela 3.3- Resultados ensaio de resistência à compressão simples.	58
Tabela 3.4- Ensaio de compactação	62
Tabela 3.5- Ensaio de resistência à compressão simples.....	64
Tabela 3.6- Determinação do teor de betume do material fresado.	66
Tabela 3.7- Ensaio de compactação- mistura de dosagem 60% BGS e 40% material fresado, com 3% de cimento.	69
Tabela 3.8- Ensaio de compactação- mistura de dosagem 50% BGS e 50% material fresado, com 3% de cimento.	70
Tabela 3.9- Ensaio de compactação- mistura de dosagem 40% BGS e 60% material fresado, com 3% de cimento.	71
Tabela 3.10- Comparativo do teor de umidade ótimo na mistura.....	72
Tabela 3.11- Ensaio de resistência à compressão simples- corpos de prova ensaio de compactação.	74
Tabela 3.12- Plano de ensaios para os corpos de prova	77

Tabela 3.13-Resultados ensaio de resistência à compressão simples para dosagem 60% BGS e 40% material fresado.....	81
Tabela 3.14- Resultados ensaio de resistência à compressão simples para dosagem 50% BGS e 50% material fresado.....	82
Tabela 3.15- Resultados ensaio de resistência à compressão simples para dosagem 40% BGS e 60% material fresado.....	82
Tabela 3.16- Resultados ensaio de resistência à tração por compressão diametral para dosagem 60% BGS e 40% material fresado.	83
Tabela 3.17- Resultados ensaio de resistência à tração por compressão diametral para dosagem 50% BGS e 50% material fresado.	83
Tabela 3.18- Resultados ensaio de resistência à tração por compressão diametral para dosagem 40% BGS e 60% material fresado.	84
Tabela 3.19- Resumo dos resultados ensaio de resistência à compressão simples.....	89
Tabela 3.20- Resumo dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	91
Tabela 3.21- Simulação de tensão para módulo de resiliência do revestimento de 5.884,20 MPa.....	94
Tabela 3.22- Simulação de tensão para módulo de resiliência do revestimento de 4.903,50 MPa.....	95
Tabela 3.23- Simulação de tensão para módulo de resiliência do revestimento de 3.922,80 MPa.....	96

LISTA DE SÍMBOLOS

N	Volume de tráfego
\geq	Maior ou igual
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BGS	Brita Graduada Simples
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado à Quente
CP	Corpo de prova
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
G	Grama
Kg	Quilograma
kN	Quilonewton
M	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
Mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PMF	Pré Misturado a Frio
PMQ	Pré Misturado a Quente

SUMÁRIO

1.- INTRODUÇÃO	1
1.1- Generalidades.....	1
1.2- Metodologia da Pesquisa.....	2
1.3- Estrutura do Trabalho	2
1.4- Objetivos	3
1.4.1- Objetivo geral	3
1.4.2- Objetivo específico	3
1.5- Justificativa.....	3
2.1- Reciclagem de Pavimento	5
2.2- Reciclagem <i>in situ</i> a Quente de Revestimento Asfáltico.....	13
2.3- Reciclagem <i>in situ</i> a Frio	15
2.3.1- Reciclagem com emulsão asfáltica.....	16
2.3.2- Reciclagem com espuma de asfalto	19
2.3.3- Reciclagem com cimento Portland	22
2.4- Reciclagem em Usina.....	27
2.4.1- Tipos de usinas	27
2.4.1.1- Usinas fixas	28
2.4.1.2- Usinas móveis	30
2.4.2- Reciclagem em usina a frio	31
2.4.3- Reciclagem em usina a quente	34

2.5- Equipamentos de Fresagem.....	36
2.5.1- Equipamentos de fresagem de pequeno porte	36
2.5.2- Equipamentos de fresagem de médio porte	37
2.5.3- Equipamentos de fresagem de grande porte.....	39
2.6- Procedimentos de Reciclagem.....	40
2.6.1- Reciclagem superficial.....	40
2.6.2- Reciclagem profunda.....	41
2.7- Vantagens e Desvantagens do Processo de Reciclagem de Pavimento Asfáltico	42
2.8- Discussão	45
3.- ESTUDO DA DOSAGEM NA RECICLAGEM COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND	47
3.1- Considerações Iniciais.....	47
3.2- BGS com Adição de Cimento Portland.....	48
3.3- BGS com Material Fresado e Adição de Cimento Portland.....	59
3.4- Simulação de Tensões	92
3.5- Análise de Resultados	97
3.6- Discussão	99
4.- PROPOSTA DE DOSAGEM	101
4.1- Considerações.....	101
4.2- Critério de Dosagem de Acordo com a Resistência	103
4.3- Discussão	104

5.- CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS.....	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
BIBLIOGRAFIAS DE APOIO.....	114
ANEXO	117

1.- INTRODUÇÃO

1.1- Generalidades

A reciclagem de pavimento asfáltico visa reconstruir um pavimento deteriorado com o uso dos materiais provenientes do pavimento antigo, reduzindo ou até mesmo eliminando a necessidade de novos agregados e de uso de bota-fora colaborando dessa forma com a sustentabilidade do planeta. Uma reconstrução total, sem uso do pavimento antigo, é uma alternativa a desconsiderar, visto que o meio ambiente e a sociedade não permitem mais esta filosofia.

O trabalho trata da reciclagem de pavimento asfáltico, enumerando desde os tipos de reciclagem mais usados, equipamentos utilizados na fresagem às vantagens e desvantagens da reciclagem de pavimento asfáltico, dando um enfoque à reciclagem com adição de cimento Portland,

Os ensaios procuram analisar, por meio dos resultados obtidos a evolução da resistência mecânica em função do tempo para misturas recicladas com adição de cimento Portland, simulando o processo da reciclagem de pavimento asfáltico com cimento Portland em campo a fim de verificar quando o pavimento reciclado suportará a ação das cargas do tráfego de veículos de carga, sem comprometer a estrutura do mesmo.

Os resultados poderão contribuir ainda na análise das resistências mecânicas, através de ensaios de resistência a compressão simples e a tração por compressão diametral para diferentes dosagens de mistura.

Dessa forma os resultados poderão contribuir para o meio rodoviário na prática da reciclagem com adição de cimento Portland.

1.2- Metodologia da Pesquisa

O trabalho foi realizado através de estudos da literatura disponível tanto nacional, quanto internacional, além da utilização de normas técnicas para a execução dos ensaios laboratoriais e simulações de tensões por meio do programa computacional *Elsym 5*.

Os ensaios laboratoriais foram realizados conforme preconizado nas normas técnicas específicas para cada caso, como preconizado nas normas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), etc.

1.3- Estrutura do Trabalho

No capítulo 2 são mencionados os métodos de reciclagem de pavimento flexível, tipos de equipamentos e procedimentos empregados na reciclagem, assim como os procedimentos empregados na reciclagem e as vantagens e desvantagens do uso da reciclagem em pavimentos asfálticos.

O estudo da reciclagem com adição de cimento Portland está no capítulo 3, onde são apresentados ensaios realizados, desde caracterização dos materiais empregados a ensaios de resistência mecânica à compressão simples e à tração por compressão diametral, simulando a reciclagem de pavimento flexível com adição de cimento Portland para diferentes teores de BGS e material fresado, mostrando a evolução da resistência mecânica do material conforme o período de cura e os resultados de simulações de tensões no programa *Elsym 5*.

O capítulo 4 cita algumas considerações a respeito da dosagem na reciclagem de pavimento asfáltico e, o capítulo 5 conclui o trabalho, tratando das análises sobre os resultados dos ensaios realizados.

1.4- Objetivos

1.4.1- Objetivo geral

O objetivo do trabalho é apresentar um estudo sobre o comportamento mecânico de materiais provenientes da reciclagem de pavimento flexível, abordando os tipos de reciclagem e processos de execução, dando enfoque à reciclagem de pavimento flexível com adição de cimento Portland através da análise da evolução da resistência mecânica em função do tempo.

1.4.2- Objetivo específico

Determinar a evolução temporal da resistência mecânica à compressão simples e tração por compressão diametral do material obtido em laboratório, simulando a reciclagem de pavimento flexível, envolvendo revestimento e base granular com adição de cimento Portland, através da moldagem de corpos de prova (CP's).

Para o estudo laboratorial foram utilizados corpos de prova de Brita Graduada Simples (BGS) com acréscimo de cimento Portland e corpos de prova com material fresado, BGS e cimento Portland, obtendo curvas de resistência mecânica à compressão simples e à tração por compressão diametral para diferentes dosagens de BGS e material fresado e tempos de ruptura.

1.5- Justificativa

Existem diversos aspectos a considerar na reciclagem de pavimento flexível sendo o primeiro a manutenção do meio ambiente e sustentabilidade do planeta, já que a reabilitação de pavimento através da reutilização de materiais provenientes do

pavimento antigo, por meio do processo da reciclagem, preserva o meio ambiente da degradação dada pela exploração para obtenção de novos agregados.

Outro ponto importante vem a ser o fator econômico, visto que a preservação do material já utilizado no pavimento antigo evita os custos com transportes e bota-fora do material fresado, além de gastos com novos agregados para a construção de um novo pavimento. Uma forma de ilustrar as dimensões de tais custos está numa estimativa de reconstrução de 2 mil quilômetros por ano.

Na reciclagem de pavimento asfáltico deve-se considerar que existe um tempo mínimo necessário entre a execução da reciclagem do pavimento e a liberação do mesmo para o tráfego, lembrando que o pavimento no momento da liberação para o tráfego deverá ter condições de receber e suportar as tensões geradas pelos veículos de carga.

O estudo em questão analisou o procedimento de reciclagem de pavimento flexível com o acréscimo de cimento Portland, visto que uma camada reciclada com aglutinante hidráulico tende a suportar esforços de tração quando utilizada como base de um revestimento em concreto asfáltico, cabendo a questão de quanto tempo após a execução da base é possível liberar o tráfego sem que haja dano aparente para a estrutura do pavimento.

Para avaliar os resultados obtidos em ensaios laboratoriais foram realizadas simulações através do programa computacional *Elsym 5* a fim de verificar as tensões de tração na fibra inferior da camada no pavimento reciclado com cimento Portland.

Dessa forma, foi obtido um conjunto de informações sobre a evolução da resistência mecânica de pavimentos flexíveis reciclados com cimento Portland em função do tempo.

2.- TIPOS DE RECICLAGEM APLICADA A PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

2.1- Reciclagem de Pavimento

Para Yoder (1975), historicamente o objetivo inicial da pavimentação de estradas e ruas era de melhorar as estradas de terra, protegendo-as da ação da água, do desprendimento de poeira e pedras tornando-as mais cômodas e seguras ao tráfego além de mais duráveis. Dessa forma, as primeiras estradas de rodagem em solo argiloso, que enlameavam em razão das chuvas, passaram a ser cascalhadas e ensaibradas.

Para o mesmo autor, somente mais tarde, ainda no século XIX, as estradas passaram a serem revestidas com macadame ou pedra britada, sendo esse tipo de revestimento chamado de revestimento primário, visto que não exercia todas as funções de um pavimento como hoje se entende.

Sendo assim, para Yoder (1975) foi durante o período entre 1920 e 1940, com o aumento de conhecimentos na mecânica dos solos é que a engenharia passou a conhecer melhor o pavimento e que o desempenho deste está diretamente ligado ao tipo de solo onde é construído e também na influência da estabilização e do tipo de base na durabilidade do pavimento.

Na mesma linha de raciocínio, Medina (1997), diz que o pavimento é uma estrutura construída sobre o terraplenagem destinada a resistir aos esforços verticais e horizontais provenientes do tráfego e melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança, sendo que a estrutura do pavimento deve ser concebida de modo a se obter a máxima qualidade pelo menor custo durante todo o período de vida útil para qual foi projetado sob qualquer condição climática.

Ainda para Medina (1997), são diversos os fatores externos que podem contribuir para o desgaste e degradação do pavimento, sendo que os principais agentes

responsáveis são os fatores climáticos e a carga dos veículos, principalmente quando excessivas gerando deformações permanentes. O principal fator responsável pela ruptura do pavimento é a falha nas condições de drenagem, visto que predispõe o pavimento à ação dos fatores climáticos, que são: sol, chuva, temperatura e efeito do congelamento.

A preocupação sobre a vida do pavimento é traduzida por Yoder (1975), através de uma análise da degradação do mesmo, visto que o sol atua no pavimento reduzindo o teor de umidade das camadas de solo, contribuindo para o endurecimento e perda de elasticidade do mesmo, este pavimento endurecido torna-se mais propício à formação de fissuras, que permitem a entrada de água de chuva, gerando um comprometimento da estrutura, que se deteriora com o bombeamento dos finos provocados pelo tráfego.

Yoder (1975) diz ainda que como o pavimento possui uma vida útil para o qual foi projetado, chega um determinado momento em que uma recuperação do pavimento faz-se necessária. Nesse momento a reciclagem de pavimento é uma excelente alternativa.

A reciclagem de pavimento não é um processo recente. Historicamente, conforme Motta, Pinto e Guarçoni (2002), há relatos de execução de reciclagem com Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ) nos Estados Unidos no ano de 1915, com procedimentos e equipamentos bem primitivos.

Segundo Tuchumantel (1999), durante muitos anos, os órgãos responsáveis pela manutenção de estradas, em todo o mundo, usavam como manutenção das estradas a adição de camadas sucessivas de concretos asfálticos sobre vias de concreto de cimento Portland ou concreto asfáltico, a fim de estender ao maior tempo possível a vida útil das mesmas, com os recapeamentos periódicos. Na técnica da adição subsequente de camadas de recapeamento surgem problemas com relação à altura útil em túneis, sob viadutos, eliminação de degrau na altura de meio-fio, no encontro do pavimento com as defensas, bem como problemas de drenagem.

Com o intuito de se aproveitar o material que foi retirado da pista e dessa forma evitar a exploração de reservas de agregados, objetivando reduzir a agressão do meio ambiente, essa nova camada pode ser constituída parte pelo material existente na via, tratado de maneira adequada para que atenda as características físicas e de desempenho necessários, constituindo assim o que é denominado como reciclagem.

De acordo com Motta, Pinto e Guarçoni (2002), inicialmente a reciclagem era realizada com equipamentos manuais com dispositivos de lâminas para a retirada do material da via e também escarificadores. Atualmente utilizam-se máquinas fresadoras. O princípio básico ainda é o mesmo, que consiste em fragmentar, triturar e remover a camada degradada do pavimento e assim reutilizá-la através da combinação com novos materiais, obtendo-se uma nova camada. Hoje em dia utilizam-se modernas máquinas que fresam e reciclam simultaneamente.

Para os mesmos autores, quando se fala em reciclagem de pavimentos, são diversas as alternativas de materiais a empregar no processo, sendo que nem todas as soluções apresentam compatibilidade financeira com o retorno esperado, devendo ser analisado cada caso separadamente.

Historicamente, conforme a Petrobrás (2005), no Brasil a utilização da técnica de reciclagem a frio teve início nos anos 80, com a chegada das primeiras máquinas recicladoras. A primeira experiência foi na rodovia Anhanguera, rodovia de pista dupla que liga as cidades de São Paulo a Campinas, num trecho total de 90 quilômetros.

A importância do meio ambiente quando se fala em reciclagem, para Beligni (1995), têm gerado o aumento do interesse de centros de pesquisa na utilização de material fresado, já que vem ocorrendo diminuição da disponibilidade de matéria prima para a construção de rodovias.

Com relação aos tipos de reciclagem, Bonfim (1999) classifica as técnicas de reciclagem de pavimentos asfálticos em dois tipos; reciclagem a quente ou a frio, que

por sua vez podem ser processadas no próprio local, ou seja, *in situ*, ou em usina apropriada, conforme apresentado na tabela 2.1.

Tabela 2.1- Tipos de reciclagem. Fonte: Bonfim (1999).

Quanto ao local de processamento	Em usina	A frio	Usina Móvel
		A quente	Usina Fixa
	"In situ"	A frio	Emulsão Asfáltica
			Espuma de Asfalto
			Cimento Portland
		A quente	
Procedimentos de reciclagem quanto a profundidade de corte	Superficial		Somente da camada de revestimento
	Profunda		Camada de revestimento, base e até sub-base

Segundo a LENC (Laboratório de Engenharia e Consultoria) (2004), a reciclagem *in situ* é constituída a partir da fresagem do pavimento existente, que pode ser de forma superficial ou profunda, sem adição de aglomerantes em bases estabilizadas granulometricamente ou com a adição de aglomerantes transformando o material em base ou sub-base reciclada a frio e *in situ* ou ainda, através da reciclagem do revestimento asfáltico, que tanto pode ser a quente como a frio, com adição de emulsões rejuvenescedoras.

Conforme Domingues e Beligni (1994), os procedimentos de construção de pavimentos reciclados *in situ* envolvem as etapas de: drenagem, fresagem, redução de tamanho, distribuição, compactação e tratamento do pavimento asfáltico (superfície).

Bonfim (1999), na tabela 2.2, demonstra a classificação dos processos de reciclagens conforme a geometria, local de processamento, profundidade de corte, mistura, material a ser adicionado durante o processo.

Tabela 2.2- Classificação de reciclagem. Fonte: Bonfim (1999).

Quanto à geometria	Sem modificação	Quando se mantém as cotas do greide
	Com modificação	
Quanto ao local de processamento	Em usina	Fixa ou móvel, a quente ou a frio
	"In situ"	
	"In situ" com usinado	Reciclagem "in situ" da base e aplicação de material reciclado a quente, processado em usina com material fresado
Quanto à fresagem do material	A frio	Realizada na temperatura ambiente
	A quente	Realizada com pré-aquecimento do pavimento
Quanto à profundidade do corte	Superficial	Somente da camada de revestimento
	Profunda	Camada de revestimento, base e até sub-base
Quanto à mistura reciclada	Mistura a Frio	PMF
	Mistura a Quente	CAUQ, PMQ
Quanto ao uso da mistura	Como base reciclada	
	Como camada de ligação	
	Como revestimento	
Quanto aos materiais adicionados	Agregados	Correção granulométrica
	Cimento Portland	Aumento da capacidade estrutural
	Emulsão asfáltica, CAP, Polímeros	Rejuvenescimento
	Mistura asfáltica	Adição de material fresado

De acordo com Motta, Pinto e Guarçoni (2002), na escolha da técnica de reciclagem, os fatores condicionantes são:

- Tipo e idade do revestimento;
- A espessura da camada de revestimento;
- O estágio de conservação do revestimento e porcentagem de área remendada;
- Condição estrutural do pavimento;
- Tipo de material de base e sua condição estrutural;
- Tráfego futuro estimado;
- Disponibilidade de materiais a serem adicionados, custos de aquisição, disponibilidade de equipamentos e distância de transporte.

A tabela 2.3 demonstra uma proposta de análise das condições do pavimento ao selecionar tipo de reciclagem a ser aplicada, seja usinado a quente, *in situ* a quente ou *in situ* a frio.

Tabela 2.3- Escolha de método de reciclagem. Fonte: Federal Highway Administration apud Motta, Pinto e Guarçoni (2002).

Condição de Pavimento		Reciclagem a quente em usina	Reciclagem a quente "in situ"	Reciclagem "in situ"
Defeitos de superfície				
	Desagregação	X	X	
	Exsudação	X	X	
	Empolamento	X	X	
Deformação				
	Corrugações	X	X	
	Afundamento de trilha de roda	X	X	
	Depressões	X		X
Trincamento (associado a carga)				
	Trincas em blocos	X		X
	Trincas longitudinais na trilha de roda	X	X	
	Trinca de borda	X		
	Trincamento parabólico			
Trincamento (não associado a carga)				
	Blocos de retração	X		X
	Trincas longitudinais nas juntas	X	X	
	Trincas transversais por origem térmica	X		X
Reflexão de trincas		X		X
Remendos de manutenção		X		X
Qualidade de rolamento				
	Desnível generalizado	X	X	
	Adensamentos	X	X	
	Afundamentos localizados	X	X	

Existem diversas formas de se executar o processo de reciclagem do pavimento, inclusive considerando as alternativas de reabilitação e a constante evolução dos equipamentos e das usinas que têm ampliado o número de opções quanto à aplicabilidade.

Conforme Motta, Pinto e Guarçoni (2002), a reciclagem deve ser usada quando as avaliações estruturais e funcionais indicam um grau de trincamento acentuado, que possam gerar reflexão de trincas no reforço convencional. Na figura 2.1 pode-se

observar um pavimento com trincas em blocos, caso típico de degradação estrutural, sendo um forte indicativo para o uso da técnica da reciclagem, conforme já apresentado na tabela 2.3.



Figura 2.1- Pavimento deteriorado com trincas em blocos (BR 459- trecho Pouso Alegre- MG- Congonhal- MG).

Para os mesmos autores, quando há um problema geométrico a ser corrigido, tais como limitação de gabarito dos viadutos e dos meio-fios de calçadas; assim como quando há somente uma faixa danificada, há que se atentar para não ficar desnível entre faixas.

Um aspecto também importante passa a ser a questão do meio ambiente que se preserva com menos exploração de depósitos de areia e pedreiras, além de usar menos bota fora de material retirado do pavimento a ser refeito. Nas figuras 2.2, 2.3 e 2.4 podem ser observados depósito de brita e pó de pedra, de areia e vista de uma pedreira, frutos da degradação do meio ambiente para extração de agregado. Nota-se ao fundo da figura 2.2 um pequeno trecho da mata Atlântica ainda sem a intervenção humana.



Figura 2.2- Depósito de brita e pó de pedra- Pedreira de Embu, em São Paulo.



Figura 2.3- Depósito de areia do Rio Grande. Fonte: Departamento de Estradas e Rodagem de São Paulo (DER- SP) (2006).



Figura 2.4- Pedreira de Embu, em São Paulo.

Fazendo uma análise da figura 2.1 que ilustra um pavimento deteriorado, resultante do término de sua vida útil, associado às figuras 2.2, 2.3 e 2.4, que mostram a degradação do meio ambiente para a exploração de jazidas de agregados, conclui-se que a adoção da técnica da reciclagem vem a ser uma solução para a reabilitação do pavimento de uma forma ambientalmente sustentável.

2.2- Reciclagem *in situ* a Quente de Revestimento Asfáltico

Conforme o Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT) (1998), a reciclagem a quente *in situ* de pavimentos é um processo em que parte ou todo o revestimento asfáltico é removido e reduzido a dimensões apropriadas para depois ser misturado a quente no próprio local. A técnica pode utilizada tanto numa operação de passagem única, que associa a mistura reciclada como um material novo, como numa operação de duas passagens, onde a mistura reciclada é recompactada e a aplicação de uma nova camada de desgaste é efetuada após um período de espera.

Para Hall, Correa, Carpenter e Elliot (2001), a reciclagem *in situ* a quente do revestimento asfáltico normalmente não é utilizada para reciclagem somente da superfície, visto que o rejuvenescimento somente da superfície pode ocasionar em reflexão de trincas da base na superfície.

De acordo com Nunn, Carswell e Merrill (2005), há diversas variações nas técnicas de reciclagem *in situ* a quente da mistura asfáltica, muito estudada por diversos especialistas. A reciclagem a quente pode ainda contribuir para uma redução no consumo de energia, quando executada a uma temperatura inferior a temperatura usada nos métodos convencionais de execução de misturas betuminosas a quente.

Segundo a Wirtgen América (2006), no processo de reciclagem a quente do revestimento asfáltico, é muito empregado o equipamento Remixer 4500, figura 2.5 (modelo da Wirtgen) e para a Martec (2006), o equipamento AR 2000, figura 2.6 (modelo da Martec), sendo que ambos tratam-se de um conjuntos constituídos de duas unidades: um equipamento para pré-aquecimento do revestimento e uma unidade de reciclagem *in situ*.



Figura 2.5- Recicladora *in situ* a quente- Remixer 4500- Wirtgen. Fonte: Wirtgen América (2006).



Figura 2.6- Recicladora *in situ* a quente- AR 2000- Martec. Fonte: Martec (2006).

2.3- Reciclagem *in situ* a Frio

Conforme Susuki, Pereira, Tsu, Azevedo, Diaz e Tuchumantel (2005), a reciclagem a frio *in situ* é uma boa alternativa para a reabilitação do pavimento, aplicada principalmente em áreas urbanas e com o uso exclusivo de materiais existentes no próprio local, tornando desnecessária a exploração de jazidas e depósitos para materiais excedentes.

De acordo com Castro (2003), quando a reciclagem a frio é executada em rodovias de baixo volume de tráfego, com um pavimento uniforme, o material reciclado pode se portar bem como camada de rolamento após a aplicação de uma capa selante. Já para tráfegos maiores ($N \geq 5 \times 10^6$), o material reciclado funciona melhor como camada de base ou de ligação, principalmente quando o revestimento da rodovia estiver muito ruim, a qualidade do material reciclado cairá sensivelmente, não sendo o seu uso adequado como camada de rolamento para rodovias que apresentem tráfego mais elevado.

Quanto às vantagens Bonfim (1999) expõe que uma das grandes vantagens para o meio ambiente na reciclagem *in situ* está na redução no consumo de energia, já que não há necessidade de aquecimento de materiais.

Para o mesmo autor, outra vantagem está na redução do tempo de construção ao comparar com métodos a quente, visto que não ocorre a remoção, para posterior lançamento de nova camada de pavimento. Essa redução no tempo também traz um aumento da segurança, já que o tempo em que o tráfego é interrompido diminui. Além destas, destacam-se ainda uma significativa melhora estrutural, resistência à derrapagem é melhorada e o trincamento por deflexão pode ser eliminado se a profundidade de homogeneização e reprocessamento for adequada.

Como desvantagens, Bonfim (1999) aponta que para adoção do método, estão: necessidade freqüente de reparos no equipamento de pulverização, com conseqüente diminuição da produção; impossibilidade de reciclagem *in situ* a frio de pavimentos de concreto de cimento Portland; aumento de resistência e limitação dos procedimentos de construção pelas condições climáticas, incluindo temperatura e umidade; além de um menor controle de qualidade dos serviços realizados *in situ* que dos realizados em usinas.

Essa dificuldade no controle tecnológico deve-se ao fato do processo ser realizado simultaneamente: fresagem, pulverização do agente rejuvenescedor, mistura e aplicação na pista, podendo acarretar em uma capacidade estrutural reduzida, quando comparada com processos convencionais ou mesmo com o processo de reciclagem a quente.

2.3.1- Reciclagem com emulsão asfáltica

De acordo com a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (ABEDA) (2001), a emulsão asfáltica é uma dispersão coloidal de uma fase asfáltica em

uma fase aquosa, ou de uma fase aquosa dispersa em uma fase asfáltica, com ajuda de um agente emulsificante, obtida misturando o asfalto aquecido junto com água em um meio agitado (moinho coloidal) com agentes emulsificantes.

Para a Wirtgen Gmbh (2001), a maioria das emulsões usadas como agentes estabilizadores têm um componente de asfalto residual de 60%, o que significa que 60% do volume da emulsão é composto de asfalto disperso em 40% do volume de água. Depois da mistura do material, a água se perde e as partículas de asfalto são reunidas em uma película contínua depositada na superfície do agregado.

Conforme a Petrobrás (2005), as emulsões estão sendo muito difundidas na reciclagem como aglomerante asfáltico, devido à facilidade na trabalhabilidade à temperatura ambiente.

Segundo a Wirtgen Gmbh (2001), a decisão pela utilização de emulsão asfáltica leva em consideração uma análise criteriosa da superfície do pavimento, análise mecânica das deflexões recuperáveis, tipo de tráfego e via e material empregado no pavimento. Assim, no controle tecnológico de um processo de reciclagem envolvendo o uso de emulsão asfáltica o controle do teor de umidade do material reciclado é um dos fatores mais importantes.

Uma grande vantagem, de acordo com Susuki, Pereira, Tsu, Azevedo, Diaz e Tuchumantel (2005) ocorre quando os serviços de reabilitação são concluídos, já que não existe desperdício de materiais, pois toda estrutura do pavimento é reutilizada, sendo que na maioria dos casos não há necessidade de outras fontes de material.

Outras vantagens mencionadas pela Petrobrás (2005) são: o total reaproveitamento do material fresado, um menor consumo de derivados de petróleo e agregados minerais, a não necessidade de bota-fora, além de poderem ser utilizadas tanto em usinas convencionais de pré-misturado a frio como em equipamento destinados à reciclagem *in situ* de pavimentos.

Como desvantagem, a Wirtgen Gmbh (2001), explica que é um processo no qual a emulsão deve ser formulada para ser compatível com o material reciclado, com o tempo de ruptura adequado a proporcionar mistura e compactação correta.

Pode ser problemático o uso quando o teor de umidade no local for mais elevado que o teor de umidade ótimo, já que a mistura tenderá a ter o teor de umidade elevado a acima do teor ótimo, prejudicando a camada reciclada. As vantagens e desvantagens do processo de reciclagem de pavimento asfáltico com adição de emulsão asfáltica podem ser observadas tabela 2.4.

Tabela 2.4- Vantagens e desvantagens- Reciclagem com emulsão asfáltica. Fonte: Wirtgen Gmbh (2001).

EMULSÃO ASFÁLTICA	
Vantagens	Desvantagens
<p>Pavimento flexível: a estabilização com o asfalto cria um material visco-elástico com propriedades superiores de fadiga.</p> <p>Facilidade de aplicação: a recicladora é acoplada ao carro tanque para aplicação através de uma barra de aspersão.</p> <p>Aceitação: as emulsões asfálticas são razoavelmente conhecidas na indústria da construção. Encontram-se disponíveis métodos padrões de especificações.</p>	<p>Custo: as emulsões asfálticas normalmente não são fabricadas no local, sendo que o processo requer um rigoroso controle de qualidade. Agentes emulsificantes são onerosos e requerem além de transporte de asfalto, transporte de água.</p> <p>O teor de umidade do material no pavimento existente é muitas vezes bastante elevado, tornando o material saturado, quando adicionado à emulsão.</p> <p>A cura pode levar muito tempo, visto que o material adquire resistência com a perda de umidade.</p> <p>Disponibilidade: é possível que a formulação necessária para o trabalho de reciclagem possa não ser obtida.</p>

2.3.2- Reciclagem com espuma de asfalto

Para a Wirtgen (2006), o processo de reciclagem com o uso de espuma de asfalto é uma forma bastante econômica, visto que não há necessidade de aquecimento de agregados, além de não haver custos na produção, visto que o processo utiliza somente asfalto e água. A espuma de asfalto é obtida através da adição de água quente na mistura betuminosa, reduzindo a viscosidade original da mistura.

A espuma de asfalto é descrita por Castro (2003), como a mistura de asfalto, aquecida a uma temperatura de aproximadamente 180°C e água à temperatura ambiente. Tal mistura proporciona ao asfalto uma expansão de seu volume original. Sendo assim a espuma de asfalto pode ser usada como um agente estabilizador para uma variedade de materiais que vão desde a pedra britada de boa qualidade até solos com plasticidade relativamente alta e também para reciclar materiais asfálticos provenientes de fresagem.

Para a Wirtgen Gmbh (2001), quando uma quantidade de água fria, cuidadosamente medida, é introduzida no asfalto quente, uma espuma é formada, aumentando seu volume e energia de superfície e em contrapartida, diminuindo sua viscosidade e possibilitando a mistura do asfalto com agregado frio e úmido sem ajuda de solventes ou emulsificantes. Tal fato é consequência da diminuição da tensão superficial do asfalto devido ao aumento da temperatura.

Quanto às vantagens do processo de reciclagem com espuma de asfalto, a Wirtgen Gmbh (2001), declara que são muito semelhantes com o processo de reciclagem com emulsão asfáltica, visto que possui a mesma facilidade na aplicação (através de barra de aspersão) e excelentes propriedades de resistência à deformação e fadiga, tendo ainda vantagens com relação à emulsão asfáltica, que são: redução de cimento asfáltico, gerando uma redução no custo da mistura e ainda uma mistura que apresenta uma maior facilidade de compactação na execução, gerando uma abertura

imediate ao tráfego. Já, como desvantagens, o mesmo autor menciona a necessidade do aquecimento do asfalto e exige uma boa qualidade do asfalto, que deve ser saturado e com poucos agregados finos, para um bom material estabilizado.

As figuras 2.7 e 2.8 mostram os equipamentos de reciclagem composto da recicladora e os tanques de água e espuma de asfalto e o material reciclado no processo de reciclagem com espuma de asfalto e na tabela 2.5, a Wirtgen GmbH (2001), mostra as vantagens e desvantagens no uso do processo de reciclagem de pavimento asfáltico com espuma de asfalto.



Figura 2.7- Equipamentos em reciclagem com espuma de asfalto.

Fonte: Wirtgen GmbH (2006).



Figura 2.8- Material reciclado no processo com espuma de asfalto.

Fonte: Wirtgen Gmbn (2001).

Tabela 2.5- Vantagens e desvantagens- Reciclagem com espuma de asfalto.

Fonte: Wirtgen GmbH (2001).

ESPUMA DE ASFALTO	
Vantagens	Desvantagens
Facilidade na aplicação: da mesma forma que a emulsão asfáltica, é aplicada através de uma barra de aspersão especial, depois de acoplado o carro-tanque de suprimento.	O processo de espumação requer que o asfalto esteja quente, geralmente a 170°C, o que exige instalações especiais para aquecimento e precauções de segurança.
Pavimento flexível e resistente: o material tratado com espuma de asfalto forma uma massa flexível, que liga as partículas mais espessas, apresentando superior resistência à deformação e à fadiga.	Qualidade do asfalto: a qualidade do material estabilizado é determinada pelas características de espumação, que dependem principalmente da qualidade do asfalto.
Custo: a espuma de asfalto utiliza um asfalto com grau de penetração padrão. Não há custos de fabricação.	Tipo e condição do material: material saturado e material deficiente de agregados finos não podem ser tratados com espuma de asfalto.
Taxa de ganho de resistência: o material pode ser submetido ao tráfego imediatamente após aplicado.	A cura da camada deve ser cuidadosa.

2.3.3- Reciclagem com cimento Portland

Segundo a Federal Highway Administration (FHWA) (2000), nos EUA, desde 1915, mais de 160 mil quilômetros de rodovias com largura equivalente a 7,50 m de bases de pavimentos têm sido construídas usando a estabilização com cimento. Em São Paulo, conforme Merighi e Fortes (2005), este número é maior que 10 mil quilômetros, aproximadamente 50% do total de rodovias pavimentadas no Estado.

Historicamente, para Sufian, Aziz e Hussain (2005), a reciclagem a frio *in situ* com adição de cimento Portland foi inicialmente usada em um estudo na Malásia em 1985 gerando bons resultados. Segundo Merighi e Fortes (2005), desde 1950 foram construídas no Estado de São Paulo mais de dez mil quilômetros de estradas com bases de cimento Portland foram construídas usando esta tecnologia com um desempenho excelente por mais de 30 anos. Considerando esta experiência, há forte motivação para o uso de bases recicladas com cimento Portland.

Para Oliveira, Sant'anna e Souza (2005), um exemplo bem sucedido de reabilitação com adição de cimento Portland está na estrada SP-351, onde foi utilizado asfalto quente sobre uma base granular com adição de cimento Portland e pedra britada em uma extensão total de 21.916,00 quilômetros, cuja largura de 7,00 m e profundidade de reciclagem de 0,18 m, gerando um volume total de 27.614,16 m³ de material reciclado.

Visando a economia, para Sufian, Aziz e Hussain (2005), o desenvolvimento do processo da reciclagem é de fundamental importância para a otimização no orçamento de manutenção, assegurando que as estradas sejam mantidas eficazmente em um nível aceitável do serviço, visto que com o rápido crescimento da economia houve um aumento considerável no transporte dos bens e o produto, sujeitando a rede de estrada aos volumes e aos carregamentos de tráfego mais pesado, tendo por resultado a deterioração acelerada do pavimento.

Na figura 2.9 pode ser observada a distribuição do cimento Portland na pista no processo de reciclagem.



Figura 2.9- Aplicação de cimento Portland (BR 459- trecho Pouso Alegre- MG Congonhal- MG).

A execução da distribuição de água em campo e o caminhão tanque que abastece a recicladora, pode-se notar nas figuras 2.10 e 2.11.



Figura 2.10- Distribuição de água. Portland (BR 459- trecho Pouso Alegre- MG- Congonhal- MG).



Figura 2.11- Recicladora abastecida pelo caminhão tanque na reciclagem (BR 459- trecho Pouso Alegre- MG- Congonhal- MG).

Para Oliveira, Sant'anna e Souza (2005), a quantidade de cimento a ser adicionada ao volume é pré-determinada e o cimento é uniformemente distribuído por toda superfície fresada.

Após a distribuição do cimento Portland e água, uma única passagem do misturador é suficiente para homogeneizar a mistura, garantindo a estabilidade à mistura reciclada. A recicladora fazendo a mistura do material pode-se notar na figura 2.12.



Figura 2.12- Mistura do material reciclado ao cimento. (BR 459- trecho Pouso Alegre- MG- Congonhal- MG).

Para a compactação, Jofre, Kraeme e Minguela (1999), salientam que deve ser ensaiado o número de passadas dos equipamentos, que são normalmente um compactador com rolo vibratório e um compactador pneumático, previamente em um trecho experimental. A compactação deve ser feita num menor prazo o possível a fim de garantir a manutenção do teor de umidade do material e também antes do endurecimento do cimento (que inicia por volta de 2 a 3 horas após a aplicação).

São inúmeras as vantagens no uso do cimento Portland no processo de reciclagem de pavimentos, sendo que uma das grandes vantagens apontada por Jofre, Kraeme e Minguela (1999), está na facilidade na aplicação, além de garantir um aumento da resistência do material à umidade. Gulyas, Boromisza e Torocsik (2006), complementam que outra grande vantagem está na economia na reciclagem com cimento Portland, pois não requer acréscimo de material asfáltico na mistura. Ainda a Wirtgen Gmbh (2001) frisa que o cimento é o agente estabilizador mais comum, já que o cimento é produzido em mais países do que outros agentes estabilizadores, sendo esta mais uma vantagem para o uso da técnica.

Para Oliveira, Sant'anna e Souza (2005), outra vantagem do processo de reciclagem com adição de cimento Portland vem a ser a garantia de resistências elevadas em um curto período de cura, além de possibilitar reciclagem em profundidades superiores às alcançadas com adição de emulsão asfáltica, tratando-se de um processo aconselhável quando há necessidade de um grande incremento na capacidade de suporte do pavimento com acréscimo reduzido de novas espessuras nas camadas.

De acordo com a Wirtgen Gmbh (2001), o processo de reciclagem com cimento Portland apresenta ainda como vantagem uma boa aceitação, visto que o material é conhecido no ramo da construção e a melhora da resistência à ação da água na degradação do material.

Entretanto, para Jofre, Kraeme e Minguela (1999), a reciclagem de pavimento com cimento Portland, apresenta a desvantagem de requerer atenção a certos cuidados, já que todo e qualquer material tratado com cimento, inclusive o concreto, é suscetível a rompimento com a formação de trincas, que podem aumentar ao longo das juntas longitudinais e transversais.

Para a Wirtgen Gmbh (2001), existem ainda outras desvantagens na reciclagem com cimento Portland, como a suscetibilidade ao trincamento e cuidados na cura, como já mencionado, há um aumento da rigidez do material, reduzindo a deformabilidade.

Segundo Merighi e Fortes (2005), apresenta ainda a desvantagem da demora à abertura ao tráfego, que só pode ocorrer após um período de cura de 7 dias. Esse inconveniente é um obstáculo grande para o uso da técnica, já que é praticamente impossível fechar uma estrada por 7 dias. A tabela 2.6, da Wirtgen Gmbh (2001), apresenta algumas vantagens e desvantagens do processo de reciclagem de pavimento asfáltico com cimento Portland.

Tabela 2.6- Vantagens e desvantagens- Reciclagem com cimento Portland-. Fonte: Wirtgen Gmbh (2001).

CIMENTO PORTLAND	
Vantagens	Desvantagens
Disponibilidade: o cimento pode ser obtido em quase todo o mundo, ensacado ou a granel.	O trincamento por contração é inevitável, porém pode ser minimizado.
Custo: comparado com asfalto, o cimento é normalmente mais econômico.	Aumento da rigidez do material, reduzindo às características de fadiga.
Facilidade de aplicação: o cimento pode ser sempre espalhado manualmente, na falta de equipamentos como espalhadores e misturadores de suspensão.	Requer cura de forma adequada, sendo que o tráfego antes da cura pode causar danos à superfície.
Aceitação: o cimento é bastante conhecido na indústria da construção. Geralmente encontra-se métodos e especificações padrões no uso e controle do material.	
Melhora significativamente as propriedades de resistência à compressão simples quando adicionado a maioria dos materiais.	
Melhora da resistência do material à água.	

2.4- Reciclagem em Usina

Conforme a LENC (Laboratório de Engenharia e Consultoria) (2004), a reciclagem em usina é feita através da remoção da camada asfáltica, transporte até a usina que irá beneficiar o material, adição de agente rejuvenescedor e aplicação da mistura na pista, que pode ser o local de origem do material fresado ou outra via.

2.4.1- Tipos de usinas

Quanto à reciclagem em usina, a mistura reciclada, pode ser executada a quente ou a frio, ou seja, com aquecimento dos materiais ou na temperatura ambiente. Com relação às instalações, as usinas podem ser fixas ou móveis.

2.4.1.1- Usinas fixas

Conforme BONFIM, as usinas podem ser usadas na reciclagem para misturas a quente ou misturas a frio. Para misturas a quente, são utilizadas usinas tipo *Drum Mixer* ou *Batch Plant*. Na figura 2.13 pode-se observar o processo de reciclagem na usina do tipo *Batch Plant*, que ocorre a partir da elevação dos materiais devidamente dosados para o misturador e após a mistura, o material reciclado é transportado para uso na obra.

Para Beligni (1995), a usina *Batch Plant* trabalha a quente, de tal forma que o pavimento asfáltico fresado é conduzido na temperatura ambiente de estocagem através de empilhadeiras e correias mecânicas até o misturador da usina, enquanto os agregados naturais necessários à mistura são superaquecidos.

Dessa forma, os agregados naturais transferem o calor para o material fresado adicionado à mistura, sendo o processo chamado de método de transferência de calor, processo que evita a poluição do ar e problemas relacionados com a segregação do material pelo fato de o material proveniente do pavimento asfáltico não passar pelo secador e nem ser transportado pelos elevadores da usina.

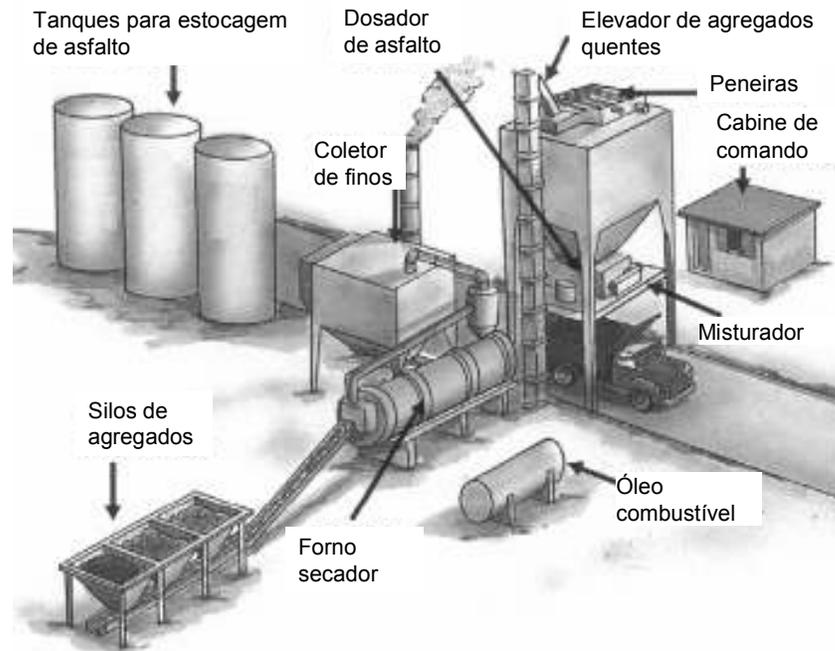


Figura 2.13- Usina fixa tipo *Batch Plant*- Fonte: Lima (2003).

Na usina tipo *Drum Mixer*, os agregados novos entram no início do cilindro junto ao maçarico, enquanto o material fresado entra, na temperatura ambiente, à frente dos agregados novos superaquecidos, evitando-se sua queima e juntando-se com o ligante no final do misturador cilíndrico. A usina *Drum Mixer* pode ser observada nas figuras 2.14 e 2.15,



Figura 2.14 Usina *Drum Mixer* RD 110- Cifali. Fonte: Cotril (2006).



Figura 2.15- Usina *Drum Mixer* – Cifali. Fonte Trimak (2006).

Uma desvantagem na utilização da técnica para Castro (2003) ocorre quando a reciclagem a quente de mistura asfáltica é executada em larga escala envolve a utilização de material com uma perda das características originais muito elevadas, quando comparada ao processamento de mistura a quente convencional com material novo em usina.

Para o mesmo autor, os projetos de reciclagem a quente de mistura asfáltica em usina requerem cuidadosa avaliação do pavimento, rigorosa caracterização dos materiais em laboratório e rígido controle do processo de produção para que se garanta a qualidade do material reciclado.

2.4.1.2- Usinas móveis

Segundo a Wirtgen América (2006), a usina móvel, foi introduzida no mercado para o processo de reciclagem de misturas a frio. Para tal, pode ser empregada a *Mobile Mixing Plant KMA 200*, fabricada e distribuída pela empresa Wirtgen, conforme apresentado na figura 2.16.

Uma vantagem no método, para a Wirtgen América (2006) está na facilidade da

usina em ser transportada, visto que é apoiada sobre uma prancha rebocável, sendo ainda muito versátil, possibilitando a execução de uma variedade de misturas a frio, incorporando diversos tipos de aditivos e materiais.



Figura 2.16- *Mobile mixing plant* KMA 200. Fonte: Wirtgen América (2006).

Para Bonfim (2001) o processo tem a vantagem de reutilizar 100% do material fresado e de metodologia não agressiva ao meio ambiente e ainda possibilita a execução de misturas de alta qualidade que podem ser utilizadas inclusive nos casos de pistas de tráfego pesado.

2.4.2- Reciclagem em usina a frio

Conforme a Wirtgen Gmbn (2001), o processo de reciclagem de pavimento em usina a frio é uma a técnica muito utilizada, sendo que o índice de reaproveitamento do material fresado proveniente das pistas em manutenção atinge até 90%. O método de

reciclagem em usina a frio é simples e similar à reciclagem *in situ* a frio.

Na figura 2.17 pode ser observada a recicladora BG-260, da empresa Martec, em atividade de reciclagem *in situ* a frio.



Figura 2.17- Reciclagem a frio com recicladora BG-260, Martec. Fonte: Martec.

Conforme Bonfim (1999), o controle de todo o processo é acompanhado pelo microprocessador, que é o componente onde se entram com os dados necessários para a determinação do volume de material fresado, como largura e profundidade de corte. Já a bomba de controle é responsável pela manutenção da porcentagem exata de água ou emulsão estabelecida em projeto para a mistura.

Na figura 2.18 é apresentado um desenho esquemático do mesmo equipamento, onde podem ser observados os componentes, que são: microprocessador, bomba de controle de entrada de água e emulsão, barra de injeção de espuma de asfalto, rotor de fresagem (tambor), rosca senfim e régua de nivelamento com vibroacabadora.

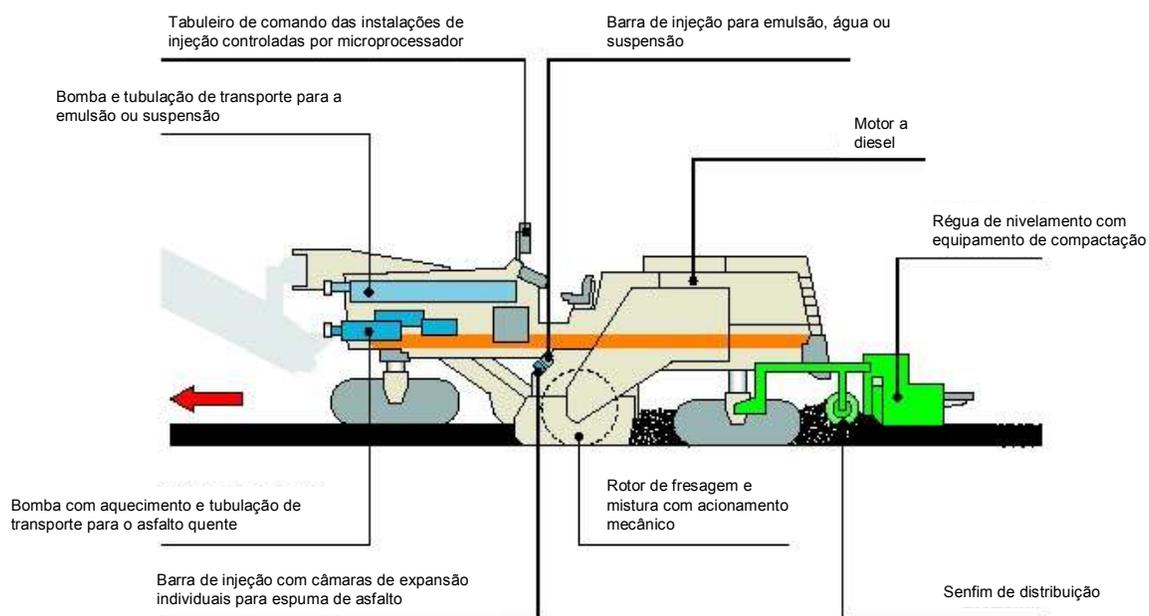
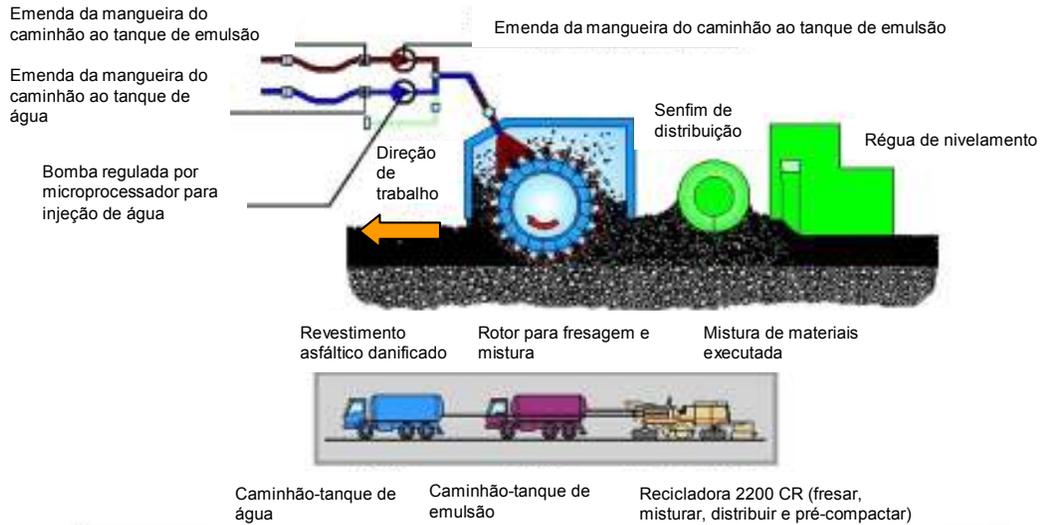


Figura 2.18- Vista detalhada- 2200 CR- Wirtgen. Fonte: Wirtgen América (2006).

Na figura 2.19, pode-se observar os dois tipos de processo de reciclagem com o equipamento 2200 CR (Wirtgen), sendo que no tipo 1, as mangueiras para injeção de água e emulsão asfáltica (cada uma acoplada ao respectivo caminhão tanque e sendo ambas reguladas por microprocessador na injeção de água e emulsão) se unem numa única barra de injeção para aspersão da água com emulsão dentro do tambor para a mistura com o material fresado.

Já no tipo 2, há duas barras de injeção, sendo a primeira para injeção de emulsão e a segunda (resultado da união de duas mangueiras, sendo uma para a injeção de água e outra para espuma asfáltica ou cimento) ambas acopladas ao tambor, para como no tipo 1 injetar sobre o material fresado a ser misturado.

Tipo 1 - Injetar de forma dosada água e emulsão por meio da recicladora 2200CR



Tipo 2 - Injetar emulsão asfáltica e espuma asfáltica através de duas barras de injeção

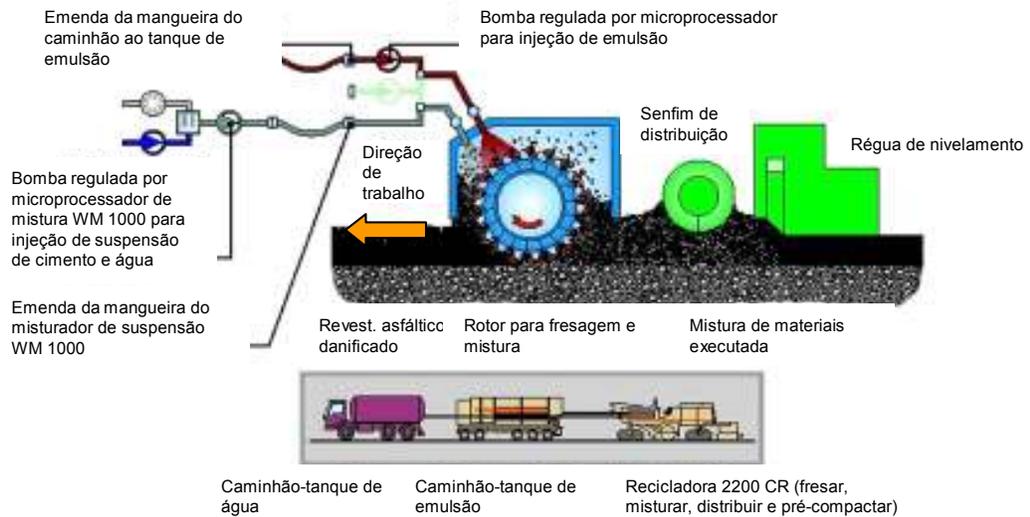


Figura 2.19- Processo de reciclagem com o equipamento- 2200 CR.

Fonte: Wirtgen América (2006).

2.4.3- Reciclagem em usina a quente

Conforme DNIT (1998), a reciclagem a quente em usina estacionária é um processo pelo qual uma parte ou toda a estrutura do revestimento é removida e

reduzida, geralmente mediante fresagem a frio, e posteriormente transportada para ser misturada e recuperada em usina de asfalto.

Uma vantagem da reciclagem a quente de misturas asfálticas em usina para Castro (2003) está no fato de que o método normalmente permite a sua correção deficiente e é vantajosa porque permite a reutilização de material que seria descartado e causaria prejuízo ambiental.

Conforme Castro (2003), para execução de misturas asfálticas a quente, utiliza-se usinas do tipo *Drum Mixer* ou *Batch Plant*.

Quanto ao processo de execução, Bonfim (1999), explica que na usina do tipo *Drum Mixer* os agregados novos entram no início do cilindro, junto ao maçarico, enquanto o material fresado entra, na temperatura ambiente, à frente dos agregados novos superaquecidos, evitando-se sua queima e juntando-se com o ligante no final do misturador cilíndrico.

Para o mesmo autor, na usina do tipo *Batch Plant* o pavimento asfáltico fresado é encaminhado na temperatura ambiente de estocagem através de empilhadeiras e correias mecânicas até o misturador da usina, enquanto os agregados naturais necessários à mistura são aquecidos, tomando o devido cuidado no controle das temperaturas de usinagem e aplicação, para o ligante não “queimar” perdendo parte das propriedades do ligante asfáltico.

As etapas da reciclagem de revestimento asfáltico a quente em usina são enumeradas por Gotijo (2000), conforme a seguinte seqüência:

- Fresagem a frio das camadas betuminosas existentes: concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) ou pré misturado a frio (PMF);
- Transporte do material fresado para usina;
- Reciclagem do material na usina com a incorporação ao material fresado, de

agregados complementares (brita, areia) e material asfáltico;

- Aquecimento e mistura do material na usina;
- Transporte do CAUQ reciclado até a pista;
- Espalhamento (vibroacabadora convencional), compressão e acabamento.

2.5- Equipamentos de Fresagem

Conforme Bonfim (1999) existem diversos fabricantes de equipamentos de fresagem em todo o mundo. Atualmente no Brasil, existem muitos equipamentos de fresagem de diversos fabricantes, de vários tamanhos e modelos, alguns deles sendo fabricados no país há alguns anos, capazes de atender a todas as necessidades do mercado, sendo subdivididos quanto ao seu tamanho, como: de pequeno, médio e grande porte ou especiais.

2.5.1- Equipamentos de fresagem de pequeno porte

Segundo Bonfim (1999), os equipamentos de fresagem de pequeno porte são destinados exclusivamente à execução de pequenas intervenções em pontos localizados como remendos, acabamentos ao redor de tampões de ferro, junto a sarjetas, entre outros.

São alguns equipamentos de pequeno porte: 300 C (Wirtgen); W 350 (Wirtgen); SF 500 O (Wirtgen); 500 DC (Wirtgen); W 35 (Wirtgen) e SF 515 (Weber). Na figura 2.20 observa-se o equipamento W 35, da Wirtgen em operação.



Figura 2.20- Equipamento de pequeno porte- W 35- Wirtgen.

Fonte: Wirtgen Gmbn (2001).

2.5.2- Equipamentos de fresagem de médio porte

De acordo com Bonfim (1999), os equipamentos de fresagem de médio porte são destinados tanto na execução de fresagem pode ser usado em pequenas ou grandes áreas, sendo que em termos de produtividade, quanto à fresagem de grandes áreas, o seu desempenho é modesto e não é apropriado para a execução de arremates; apresentando, porém um bom desempenho em se tratando de fresagem de áreas contínuas e em ruas estreitas, por sua maior versatilidade nas manobras.

Bonfim (1999) relaciona alguns exemplos de equipamentos de médio porte: 1000 C (Wirtgen); SF 1000 (Wirtgen); SF 1300 VC (Wirtgen); 1300 DC (Wirtgen) e 1500 DC (Wirtgen).

Conforme a Wirtgen América (2006), o equipamento Raco 350 foi projetado para trabalhar com plataformas de 2,40 m, podendo atingir uma profundidade de corte de 0,45 m. Para obter um melhor desempenho, o equipamento possui um tambor com porta-ferramenta dispostos em “V”, para que a substituição das ferramentas de corte sejam feitas facilmente, conforme pode ser visto na figura 2.21.



Figura 2.21- Tambor de corte do equipamento Raco 350.

Fonte: Wirtgen América (2006).

A caixa do tambor de corte possui dois dispositivos que podem lançar água ou emulsão na caixa de mistura. Observa-se que se a profundidade de corte for pequena pode-se utilizar uma câmara de mistura pequena caso contrário, deve-se utilizar uma câmara grande.

A figura 2.22 apresenta uma visão geral de trabalho do equipamento estabilizador Raco 350. Pode-se observar a câmara misturadora para grande e pequena profundidade da fresagem do material a ser reciclado.

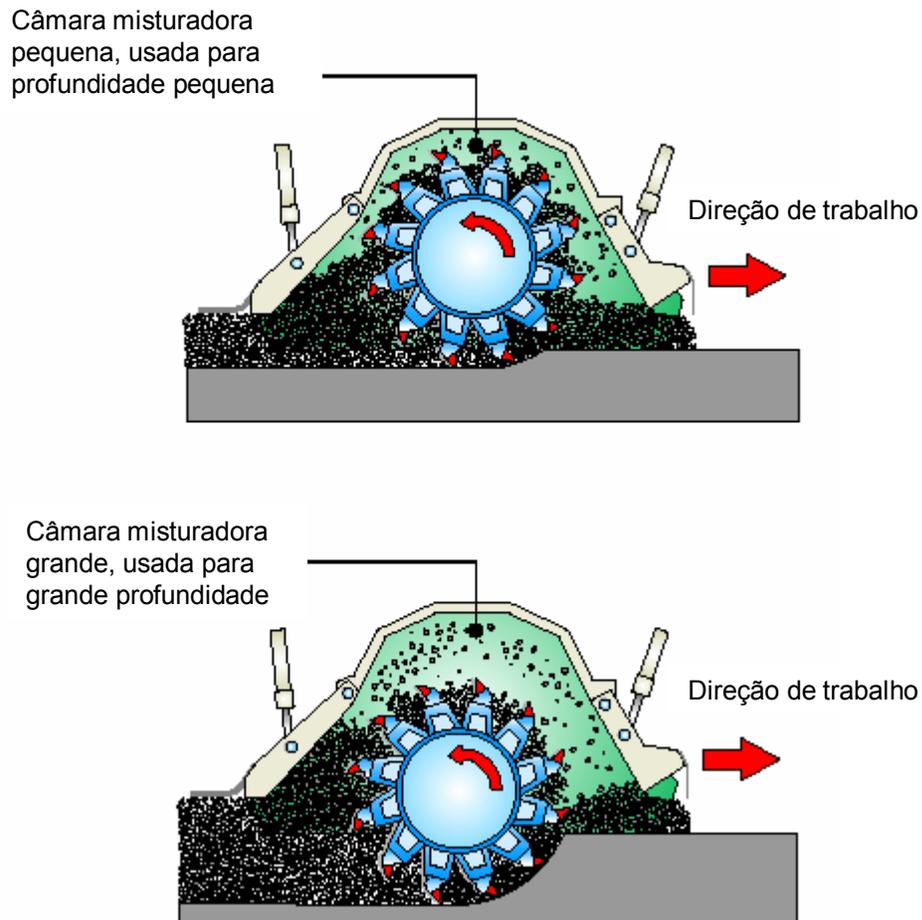


Figura 2.22- Câmara de trabalho e do bico para aspergir água ou emulsão Asfáltica- Raco 350- Wirtgen. Fonte: Wirtgen América (2006).

2.5.3- Equipamentos de fresagem de grande porte

De acordo com Bonfim (1999), são equipamentos destinados à fresagem de grandes áreas, por tratar-se de equipamentos com cilindro fresador com larguras maiores que as dos anteriormente citados, sendo usados em locais que oferecem boas condições para o perfeito desenvolvimento dos trabalhos, sem muitas interferências, como em ruas largas, em grandes avenidas e principalmente em rodovias.

Para o mesmo autor, em função do seu tamanho, deve-se evitar a realização de muitas manobras com o equipamento, o que seria prejudicial tanto do ponto de vista da produtividade quanto dos problemas que podem vir a causar ao trânsito local, apesar da evolução dos mesmos quanto ao sistema de manobras.

Segue relação de alguns equipamentos de grande porte são expostas por Bonfim (1999): SF 1900 VC (Wirtgen); 2000 DC (Wirtgen); 2000 VC (Wirtgen); 2000 VCR (Wirtgen); WR 2000 DCR (Wirtgen); 2100 DC (Wirtgen); 2100 DOR (Wirtgen); PM-465 (Caterpillar); PM-565 (Caterpillar); RM 250 C (Caterpillar) e RM 350 C (Caterpillar).

2.6- Procedimentos de Reciclagem

2.6.1- Reciclagem superficial

Segundo Bonfim (1999), considera-se a reciclagem superficial, com espessura compreendida entre 0,05 m e 0,08 m de profundidade, contemplando apenas as camadas superficiais do pavimento asfáltico.

Para o mesmo autor, o processo de reciclagem superficial a frio pode ser usado através da aplicação de agentes estabilizadores (agentes rejuvenescedores ou regeneradores) na camada de revestimento asfáltica para melhorar as condições originais do ligante asfáltico e posterior recobrimento com concreto asfáltico.

Segundo a Wirtgen GmbH (2001), a fresagem é feita em uma única operação que ocupa somente a largura de uma faixa, como pode ser observado na figura 2.23, executada em São Paulo na área urbana.



Figura 2.23- Fresagem superficial. (Vila Prudente- São Paulo- SP).

2.6.2- Reciclagem profunda

Segundo Bonfim (1999), a reciclagem é considerada profunda, quando atinge, além das camadas de revestimento, a base, sub-base e até parte do subleito do pavimento, sendo que no caso de reciclagem profunda, o procedimento é executar a homogeneização do material, e perfilar parte do mesmo ao lado da pista, para que a compactação seja executada em camadas delgadas, de forma a possibilitar atingir o grau de compactação necessário.

Para a Arra (2001), os principais defeitos que podem ser tratados com a reciclagem com fresagem profunda são: trincas em blocos, transversais, trincas de bordo, trincas por fadiga, trincas por reflexão ou pelo envelhecimento do ligante; irregularidades no pavimento devido à empolamentos, afundamentos e depressões; deformações permanentes em trilha de roda, corrugações e escorregamento; perda de aderência entre as camadas do pavimento; perda da integridade do pavimento devido à exsudação; desnível excessivo do acostamento e capacidade estrutural insuficiente.

Com relação à granulometria resultante da mistura reciclada, Oliveira (2003) menciona que é em grande parte influenciada pela velocidade de rotação do tambor fresador. A adequação da granulometria tende a ser mais fácil quando a máquina possui maior número de opções de ajuste de velocidades.

Na figura 2.24 pode ser observada recicladora com caminhão tanque acoplado durante reciclagem para adicionar água à mistura e atingir o teor de umidade ótimo e grau de compactação desejado.



Figura 2.24-. Recicladora com caminhão tanque de água em operação. Cedido por Oliveira (2003).

2.7- Vantagens e Desvantagens do Processo de Reciclagem de Pavimento Asfáltico

Já em 1980, Finn (1980) afirmava que o processo de reciclagem de pavimentos tinha inúmeras vantagens, dentre elas: a conservação dos materiais do pavimento antigo, proteção do meio ambiente e economia na construção e reabilitação do pavimento. Também Bonfim (1999), considera que no Brasil, apesar de possuir grande

extensão e uma imensa riqueza de recursos naturais, com exceção a bacia amazônica, onde geralmente são encontrados sedimentos rochosos em grandes espessuras antes do manto rochoso, a principal vantagem da reciclagem está no reaproveitamento de agregados e ligantes, o que promove a proteção do meio ambiente.

Para Finn (1980), já citado, a reciclagem ainda possui outras vantagens, além da conservação do agregado, já que reutiliza na mistura agregado já existente, conservação também de asfalto e energia, além de ser uma alternativa na seleção de reabilitação de pavimento.

Na tabela 2.7 estão dispostas às vantagens e desvantagens entre processos de reciclagem de pavimento.

Tabela 2.7- Vantagens e desvantagens da Reciclagem de Pavimentos Asfálticos.

Fonte: Lahue (1980).

Reciclagem	Vantagens	Desvantagens
Reciclagem superficial	<ul style="list-style-type: none"> 1- Reduz a reflexão de trincas na superfície 2- Promove a melhora do pavimento antigo com o pavimento reciclado 3- Reduz tendência de ocorrência de defeitos 4- Corrige diversos tipos de defeitos em diversos graus de severidade 5- É um processo alternativo para reabilitação 	<ul style="list-style-type: none"> 1- Limitações na melhoria estrutural 2- Potencial problemas de poluição do ar (poeira e fumaça)
Reciclagem "in situ"	<ul style="list-style-type: none"> 1- Significante melhoria estrutural 2- Corrige diversos tipos de defeitos em diversos graus de severidade 3- É um processo alternativo para reabilitação 	<ul style="list-style-type: none"> 1- Problemas de controle de qualidade 2- Alguns parâmetros de projeto desconhecidos
Reciclagem com usina central	<ul style="list-style-type: none"> 1- Aumento da melhora da capacidade estrutural de projeto 2- Corrige diversos tipos de defeitos em diversos graus de severidade 3- Melhoria do controle de qualidade quando comparada com a reciclagem superficial e a reciclagem "in situ" 4- É um processo alternativo para reabilitação 	<ul style="list-style-type: none"> 1- Melhora improvável do controle de qualidade requerido 2- Alguns parâmetros de projeto de reabilitação questionáveis 3- Potencial problemas de poluição do ar

Segundo Jofre, Kraeme e Minguela (1999), a reciclagem *in situ* de um pavimento, tanto com emulsão como com cimento Portland, apresenta em geral as seguintes vantagens:

- Aproveitamento dos materiais envelhecidos, contaminados ou com características inadequadas com o pavimento existente;
- Eliminação ou redução das trincas e diminuição de perda de agregado;
- Possibilidade de reabilitar uma faixa de tráfego por vez, não necessitando da interdição total da via;
- Redução dos transtornos causados ao tráfego por obras, assim como redução na possibilidade de causar desgaste nas vias adjacentes, devido ao volume reduzido de material a ser transportado para a obra;
- Melhores custos na reabilitação de antigas rodovias deterioradas;
- Permite manter o greide original, reduzindo o incremento de degraus nas bordas do pavimento.

Por outro lado, para Jofre, Kraeme e Minguela (1999), a reciclagem de um pavimento pode apresentar algumas desvantagens, como:

- Maior heterogeneidade do material ao comparar com uma mistura nova;
- Execução por trechos, possibilitando a formação de degraus longitudinais, caso não se tenha o cuidado para garantir uma adequada união entre os materiais dos trechos adjacentes;
- Execução mais lenta que um simples reforço do pavimento com aplicação de camadas de concreto asfáltico (quando não necessária a fresagem para remoção do material existente).

2.8- Discussão

Historicamente, antes do desenvolvimento do processo de reciclagem de pavimento, a manutenção do pavimento era dada pelo emprego da aplicação de camadas sucessivas de concreto asfáltico sobre o pavimento deteriorado, gerando problemas de perda de altura útil em túneis e viadutos, além de problemas de drenagem, já que a adição de camadas sucessivas de pavimento diminuía o desnível do meio fio com a via. Um exemplo vivo desse procedimento de recapeamento sucessivo é a Marginal Tietê, em São Paulo.

A utilização do processo de reciclagem contribui para eliminar os problemas gerados pela adição de camadas sucessivas sobre o pavimento antigo, e ainda para a aplicação de novas tecnologias, através de desenvolvimento de equipamentos para fresagem e de usinas recicladoras (móveis ou fixas).

Na reciclagem de pavimento, o material deteriorado é reaproveitado e reprocessado com novos materiais a fim de gerar novas misturas para aplicação, cuidando para que o pavimento atenda as necessidades de qualidade.

A grande importância da reciclagem de pavimento é que o processo evita o desperdício de materiais já existentes na pista e a deposição desnecessária em botafora. Cabe ressaltar que como agregados são escassos na natureza, existe uma grande importância na reutilização destes, visando à sustentabilidade do meio ambiente.

Fazendo uma análise entre os métodos de reciclagem com emulsão asfáltica e espuma de asfalto com o método de reciclagem com cimento Portland, ambos possuem facilidade na aplicação, porém a reciclagem com cimento Portland tem a grande vantagem de ser mais econômica, visto que não necessita de acréscimo de material asfáltico na mistura. Apresenta ainda velocidade de liberação ao tráfego, pois o material ganha resistência rapidamente, além da possibilidade de reciclagem de profundidades superiores às alcançadas nas reciclagens com emulsão asfáltica e espuma de asfalto.

O método garante ainda um aumento da resistência do material à compressão simples, à deformabilidade e à ação da água, aumentando o período de vida útil do mesmo.

Ainda que não tenha sido comentado pelos autores das referências bibliográficas citadas, a reciclagem com cimento Portland apresenta também um aumento da resistência do material à tração ao longo do tempo, que será apontado no capítulo 4, através de resultados de ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

A disponibilidade do cimento Portland no mercado torna ainda o método ainda mais vantajoso. Apesar de diversas vantagens, a reciclagem com cimento Portland apresenta a suscetibilidade de trincamento por contração, exigindo uma cura adequada.

Quanto às vantagens e desvantagens na reciclagem de pavimento asfáltico, tanto para Finn (1980), na década de 80, quanto para Bonfim (1999), a grande vantagem do processo de reciclagem de pavimento está no reaproveitamento do material deteriorado, protegendo o meio ambiente da degradação pela exploração de novos agregados, sendo ainda a rapidez na execução, manutenção do greide original e economia outras importantes vantagens, quando comparada a reciclagem com a reconstrução do pavimento.

Apesar das vantagens, existem também desvantagens no processo da reciclagem de pavimento, como execução mais lenta do que um simples reforço de pavimento e ainda a possibilidade de formação de juntas longitudinais, porém as vantagens são superiores às desvantagens, tornando a reciclagem ainda uma excelente alternativa.

3.- ESTUDO DA DOSAGEM NA RECICLAGEM COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

3.1- Considerações Iniciais

Para um estudo da evolução da resistência mecânica ao longo do tempo, simulando em laboratório o processo da reciclagem de pavimento flexível com adição de cimento Portland executado em campo, foram executados ensaios de acordo com normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e do Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT).

Os ensaios seguiram a moldagem de corpos de prova em três etapas distintas; sendo na primeira etapa moldados corpos de prova de BGS com acréscimo de cimento Portland, na segunda e terceira etapas, os corpos de prova, para simular a reciclagem em campo, foram moldados com BGS, material fresado e cimento Portland. Dessa forma, a segunda e terceira etapas mostram resultados da simulação da reciclagem de pavimento asfáltico com acréscimo de cimento Portland.

A simulação da reciclagem de pavimento asfáltico com cimento Portland visou verificar para diferentes dosagens de BGS e material fresado a evolução da resistência mecânica em função do tempo.

Em todas as três séries de ensaios foram realizadas as caracterizações dos materiais presentes nas misturas. Ainda em todas as séries de ensaios foram realizados ensaios de compactação, a fim de determinar os teores de umidade ótimo e máximas massa específica aparente seca para cada mistura.

O objetivo dos ensaios foi avaliar a resistência do material quando submetido à compressão simples e ensaios de resistência à tração por compressão diametral, sendo analisada a resistência da mistura para diferentes tempos de cura, diferentes teores de cimento e dosagem de BGS e material fresado, dentro da mistura.

Com relação aos valores das tensões que surgem na fase da aplicação da carga, foi feita uma simulação com programa computacional *Elsym 5*, que se baseia na aplicação da teoria da elasticidade na análise de um sistema elástico de camadas.

Os resultados poderão contribuir para o meio rodoviário quanto a características das misturas para cada teor de cimento Portland, tanto em termos de resistência para a dosagem como também para o tempo de liberação do tráfego, uma vez que foram estudadas as resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral, esforços estes que solicitam a estrutura de uma base.

3.2- BGS com Adição de Cimento Portland

Na primeira série de ensaios foram moldados corpos de prova de BGS com cimento Portland em diferentes teores de umidade para execução de ensaio de compactação, a fim de determinar o teor de umidade ótimo da mistura.

Como ponto de partida, antes da moldagem dos corpos de prova para o ensaio de compactação, foram realizados ensaios para a caracterização da BGS a ser utilizada nas misturas para execução dos corpos de prova.

O primeiro ensaio de caracterização realizado foi o de granulometria, feito conforme NBR 7181/84, onde a amostra foi dividida em duas partes: a primeira, cujos grãos apresentavam diâmetro menor que 0,000075 m (0,075 mm) e a segunda, cujos grãos apresentavam diâmetro maior que 0,000075 m (0,075 mm).

Para os grãos com diâmetro maior que 0,000075 m (0,075 mm), foram realizados os peneiramentos grosso e fino. Os grãos de diâmetro menor que 0,000075 m (0,075 mm), foram descartados. Conforme Souza (2001) e Vasconcelos e Soares (2004), a BGS usada foi classificada como dentro da faixa B do DNIT.

Na seqüência, a brita graduada simples foi submetida ao ensaio de equivalente areia, realizado conforme norma DNER-ME 054/97.

Dessa forma, inicialmente foi seguido o procedimento para o preparo da solução defloculante. A amostra de brita passada no peneiramento na peneira de diâmetro de abertura de 0,0048 m (4,80 mm) pode ser observada na figura 3.1.



Figura 3.1- Amostra de brita graduada passada na peneira 0,0048 m.

Em seguida foi montada a aparelhagem para a realização do ensaio, onde o garrafão com a solução defloculante, dotado de um sifão com rolha e um tubo de borracha foi colocado sobre um pedestal, de modo a ficar a uma altura de 0,90 m da mesa de trabalho.

No ensaio de determinação de equivalente areia foram realizadas duas determinações, para cálculo do valor médio. A fórmula mostra o cálculo do valor do equivalente areia e a tabela 3.1 ilustra o resultado obtido.

$$Ea = \frac{Areia}{Argila} \times 100$$

Onde:

Ea = Equivalente areia, expresso em %;

Areia = altura de areia da amostra na proveta, expresso em m;

Argila = altura da argila da amostra na proveta, expresso em m;

Fórmula - Cálculo de Equivalente Areia. Fonte: DNER-ME 054/97.

Tabela 3.1- Determinação de Equivalente Areia.

Equivalente Areia		
	Amostra 1	Amostra 2
Altura de argila (m)	0,124	0,120
Altura de areia (m)	0,078	0,079
Equivalente areia (%)	62,90	65,82
Valor médio (%)	64,36	

Após os ensaios de granulometria e equivalente areia foram moldados os corpos de prova para ensaio de compactação. Os corpos de prova foram moldados com BGS acrescida de cimento Portland e água em diversos teores, sendo o teor de cimento fixado em 5% em massa para todos os corpos de prova usados no ensaio de compactação, realizado de acordo com NBR 7182/86. Na moldagem foi seguida a NBR 12024/90.

A figura 3.2 mostra a amostra sendo preparada através do acréscimo de água sobre a brita graduada já misturada com cimento Portland.



Figura 3.2- Preparo da mistura para moldagem dos corpos de prova.

Os corpos de prova foram moldados no cilindro Proctor, na energia intermediária, em três camadas com 21 golpes em cada uma das camadas.

Os teores de umidade adotados para a mistura foram: 4%, 5%, 6%, 7% e 8%. Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram colocados sobre o prato de um extrator hidráulico para a desmoldagem, conforme observado na figura 3.3.



Figura 3.3- Corpo de prova sendo desmoldado em um extrator hidráulico.

Para a determinação do teor de umidade e da massa específica aparente seca das misturas usadas na compactação dos corpos de prova, para cada corpo de prova foi separada parte da amostra e colocado em um recipiente para secagem em estufa.

As fórmulas a seguir mostram os cálculos para determinação teor de umidade, da massa específica aparente e da massa específica aparente seca da amostra.

$$h = \frac{m_{bu} - m_{bs}}{m_{bs} - m} \times 100$$

Onde:

h = teor de umidade da amostra compactada, expresso em %.

m = massa da cápsula, expresso em kg.

m_{bu} = massa da cápsula mais amostra úmida, expresso em kg.

m_{bs} = massa da cápsula mais amostra seca, expresso em kg.

Fórmula- Determinação do teor de umidade da amostra.

Fonte: NBR 12023/92.

$$\gamma = \frac{M_h}{V}$$

Onde:

γ = massa específica aparente da amostra compactada, expressa em kg/m³;

M_h = massa da amostra compactada, expresso em kg;

V = volume do molde, expresso em m³.

Fórmula- Determinação da massa específica aparente da amostra. Fonte: NBR 12023/92.

$$\gamma_s = \left(\frac{\gamma}{h} + 100 \right) \times 100\%$$

Onde:

γ_s = massa específica aparente seca da amostra compactada, expresso em kg/m^3 ;

h = teor de umidade da amostra compactada, expresso em %.

γ = massa específica aparente da amostra compactada, expressa em kg/m^3 ;

Fórmula- Determinação da massa específica aparente seca da amostra. Fonte:
NBR 12023/92.

Na tabela 3.2 pode ser observada a massa específica aparente seca dos corpos de prova moldados, enquanto na figura 3.4, pode ser observada a curva de compactação da BGS com cimento Portland.

Tabela 3.2- Ensaio de compactação da BGS.

Compactação		
Material:	BGS	
Teor de cimento (%):	5,00	
Energia:	intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)	
Corpos de Prova	Teor de Umidade (%)	Massa específica aparente seca CP (kg/m^3)
CP 4	4,00	2.119,03
CP 2	5,00	2.135,27
CP 3	6,00	2.190,53
CP 1	7,00	2.234,20
CP 5	8,00	2.222,52

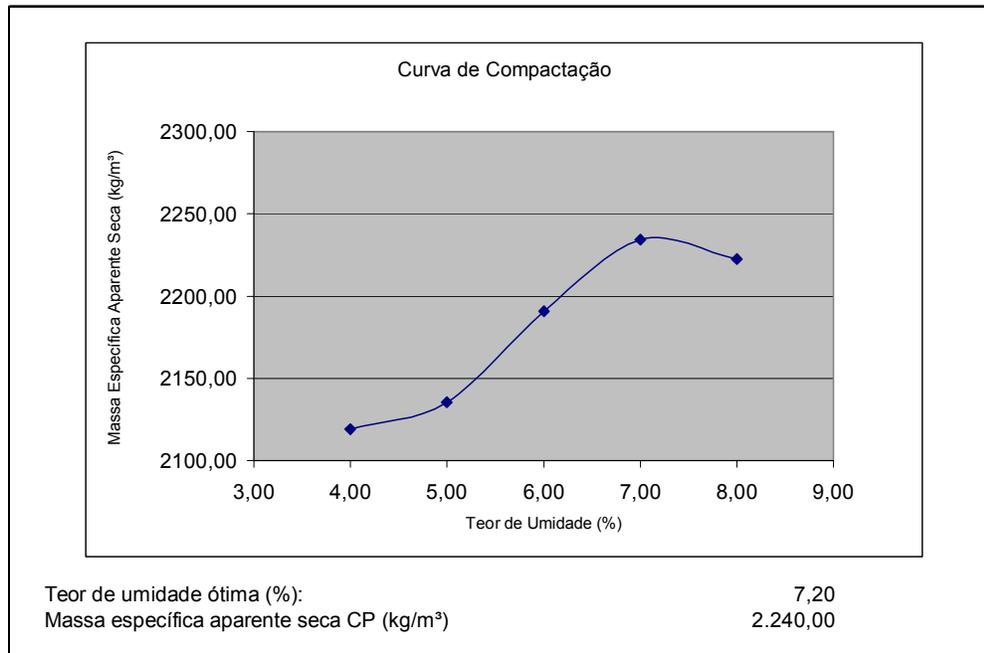


Figura 3.4- Curva de compactação da BGS

Para obter uma análise da variação da resistência à compressão simples de acordo com a variação do teor de umidade presente na mistura, os corpos de prova moldados para o ensaio de compactação foram usados para ensaio de resistência à compressão simples. Foi adotado um período de cura de 3 dias, por ser um período adotado de praxe na liberação da via para tráfego.

Para manter o teor de umidade dos corpos de prova nas condições originais, estes foram envolvidos com papel-toalha umedecido e colocados em um recipiente forrado com pó de serragem umedecido, conforme se pode notar nas figuras 3.5 e 3.6.



Figura 3.5- Corpos de prova envolvidos com papel-toalha umedecido.



Figura 3.6- Corpos de prova no recipiente com pó de serragem úmido.

O recipiente com os corpos foram cobertos com pó de serragem úmido até a cobertura total de todos os corpos de prova.

Para assegurar que não houvesse ainda perda no teor de umidade do conjunto o recipiente foi envolvido por um plástico, como mostra a figura 3.7.



Figura 3.7- Recipiente com os corpos de prova, envolvido com plástico.

Após o período de cura, os corpos de prova foram rompidos através de ensaio de compressão simples, realizado conforme NBR 12025/90.

Ao colocar os corpos de prova na prensa, para conseguir uma melhor distribuição da carga nas faces superior e inferior dos corpos de prova, foram colocadas folhas de papelão entre a face superior dos corpos de prova e o pistão da prensa e entre a face inferior e o prato da prensa.

Na figura 3.8 está apresentado o corpo de prova após a ruptura, a fim de observar as fissuras decorrentes da ruptura, enquanto que os resultados do ensaio de resistência à compressão simples podem ser observados na tabela 3.3 e figura 3.9.



Figura 3.8- CP-02- Corpo de prova de BGS após ruptura.

O cálculo para a determinação do valor da tensão no ensaio de resistência à compressão simples segue a fórmula.

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Onde:

σ = tensão de resistência à compressão simples, expresso em MPa;

P = força de resistência à compressão simples, expresso em N;

A = área da superfície sujeita à aplicação da carga do corpo de prova, expresso em m².

Fórmula- Cálculo da tensão de resistência à compressão simples. Fonte: NBR 12025/90.

Na norma NBR 12025/90 as unidades sugeridas são: tensão em kg/cm², força em kg e área em cm². As unidades da fórmula foram alteradas para o Sistema Internacional de Unidades.

Tabela 3.3- Resultados ensaio de resistência à compressão simples.

Ensaio de Resistência à Compressão Simples			
Material: BGS			
Teor de cimento para todos o: 5,00			
Energia: intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)			
Tempo de cura: 3 dias			
Corpo de Prova	Teor de umidade (%)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
CP 4	4,00	26.968,29	3,43
CP 2	5,00	27.458,62	3,50
CP 3	6,00	37.265,27	4,74
CP 1	7,00	38.736,27	4,93
CP 5	8,00	36.873,00	4,69

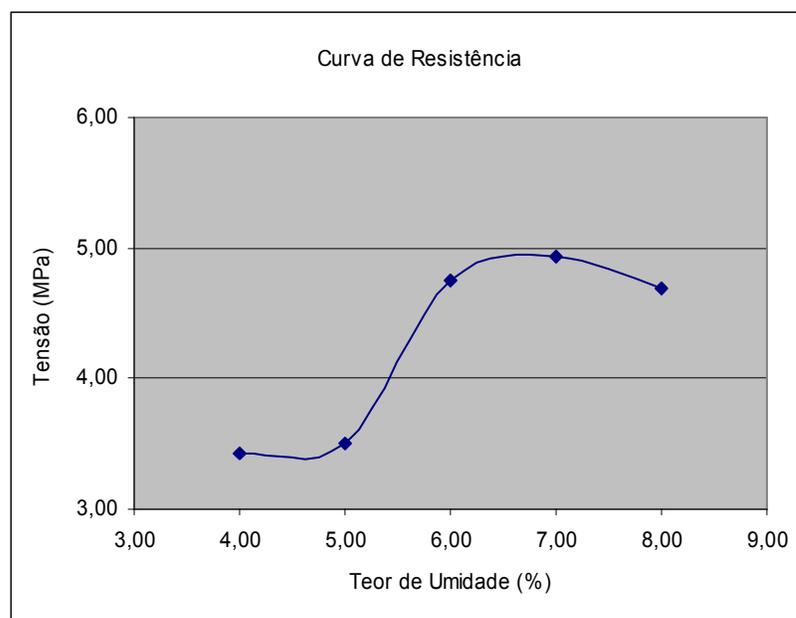


Figura 3.9- Curva de resistência (resistência x teor de umidade).

O resultado do ensaio de resistência à compressão simples conclui que em misturas de BGS com cimento Portland, à medida que o teor de umidade presente na mistura se aproxima do teor de umidade ótimo da mesma, há um ganho na resistência mecânica, logo, na execução de uma via em BGS com cimento Portland, é de fundamental importância o controle tecnológico, para assegurar que a umidade do material fique o mais próximo do teor de umidade ótimo.

3.3- BGS com Material Fresado e Adição de Cimento Portland

Na segunda série de ensaios, visando simular o processo de reciclagem de pavimento asfáltico com cimento Portland que ocorre em campo, o material usado para a fabricação da mistura foi a BGS com material fresado e cimento Portland.

Assim como na primeira série de ensaios, foi realizada inicialmente a caracterização dos materiais. A BGS usada nesta série de ensaios foi a mesma da primeira série de ensaios, logo o ensaio de granulometria não foi repetido.

Quanto ao material fresado, proveniente de fresagem do revestimento em CAUQ com 0,05 m (5 cm) de espessura, de um trecho de pavimento deteriorado da Vila Prudente, em São Paulo, foi realizado o ensaio de granulometria, conforme NBR 7181/84.

Para o início do ensaio de granulometria o material fresado foi dividido em duas partes: sendo que na primeira, os grãos apresentavam o diâmetro menor que 0,000075 m (0,075 mm) e na segunda, os grãos apresentavam diâmetro maior que 0,000075 m (0,075 mm), sendo realizados os peneiramentos grosso e fino para os grãos com diâmetro maior que 0,000075 m (0,075 mm), sendo os grãos com diâmetro menor que 0,000075 m, descartados do ensaio.

O material retido na peneira de diâmetro de 0,002 m (2,00 mm) foi usado no peneiramento grosso, enquanto que o material passado na peneira de diâmetro 0,002 m (2,00 mm) foi usado no peneiramento fino.

As figuras 3.10 e 3.11 mostram os materiais passado e retido na peneira de 0,002 m (2,00 mm). Conforme Souza (2001) e Vasconcelos e Soares (2004), o material fresado foi classificado estando na faixa B, do DNIT.



Figura 3.10- Material fresado usado para o peneiramento grosso.



Figura 3.11- Material fresado usado para o peneiramento fino.

Na sequência foram moldados corpos de prova para realização de ensaio de compactação. Para a fabricação da mistura foi adotada a seguinte dosagem: 60% de BGS, 40% de material fresado, em massa, e um teor de 5% cimento Portland sobre o total da mistura (BGS + material fresado). O ensaio de compactação foi realizado de acordo com a NBR 7182/86.

A energia adotada na moldagem dos corpos de prova para o ensaio de compactação foi a energia intermediária, aplicada em três camadas compactadas com 21 golpes cada camada, conforme se pode notar na figura 3.12.



Figura 3.12- Mistura de BGS com material fresado e cimento Portland.

Após a moldagem, realizada de acordo com a NBR 12024/90, os corpos de prova foram pesados nos cilindros e em seguida extraídos dos cilindros para nova pesagem. Com os valores de massa e volume interno dos cilindros, foram obtidos todos os dados para a determinação da massa específica aparente úmida de cada corpo de prova.

Para a determinação da massa específica aparente seca e do teor de umidade de cada corpo de prova, foram coletadas amostras de cada mistura e pesadas antes e depois de 24 horas de secagem dentro da estufa.

Os resultados do ensaio de compactação podem ser observados na tabela 3.4 e figura 3.13.

Tabela 3.4- Ensaio de compactação.

Ensaio de Compactação		
Dosagem: 60% BGS 40% Material fresado		
Teor de cimento para todos os CP's (%): 5,00		
Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)		
Corpo de Prova	Teor de Umidade (%)	Massa específica aparente seca CP (kg/m³)
CP 4	5,96	1.978,00
CP 1	7,32	2.060,00
CP 2	8,95	2.107,00
CP 3	10,29	2.074,00
CP 5	11,50	1.984,00

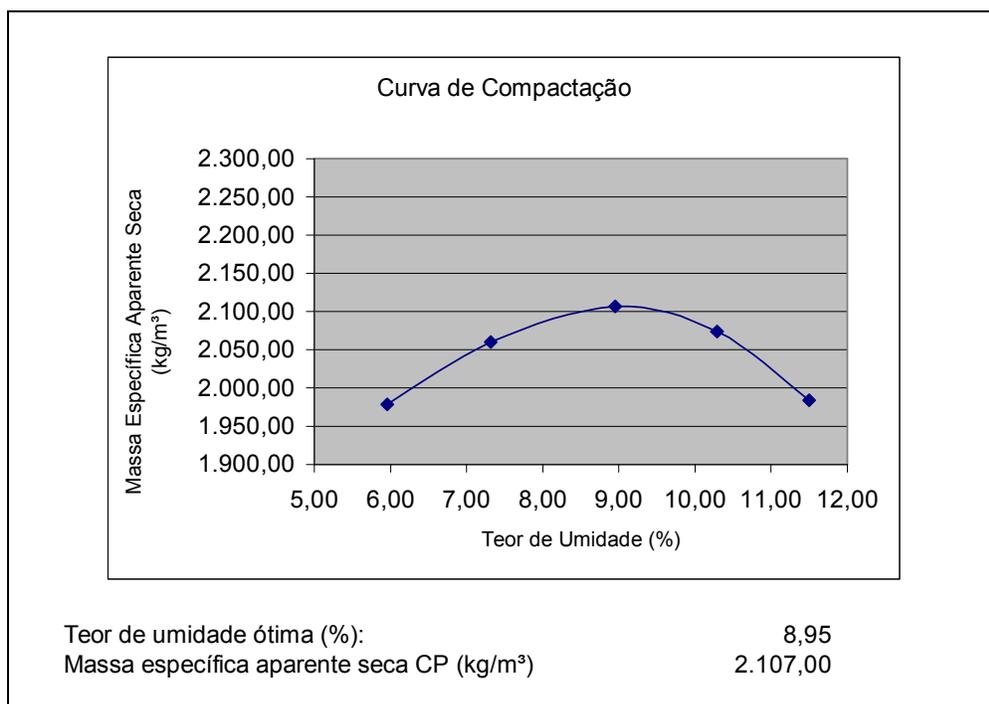


Figura 3.13- Curva de compactação.

A seguir foi executado o ensaio de resistência à compressão simples, conforme a NBR 12025/90. Para a realização deste ensaio foram moldados dois corpos de prova.

A execução da mistura seguiu a mesma dosagem adotada na execução da mistura para o ensaio de compactação, ou seja, 60% de BGS, 40% de material fresado e 5% de cimento Portland (em massa, em função do total da mistura). O teor de umidade adotado foi o teor de umidade ótimo, determinado no ensaio de compactação.

O cilindro utilizado na moldagem foi o cilindro Proctor com o soquete grande, na energia intermediária. Os corpos de prova foram moldados em três camadas com aplicação de 21 golpes em cada uma delas.

O tempo de cura dos corpos de prova adotado, assim como na 1ª série de ensaios, foi de 3 dias, período em que os corpos de prova ficaram na câmara úmida.

Na figura 3.14 pode ser observada a ruptura de um dos corpos de prova na prensa.



Figura 3.14- Ruptura do corpo de prova na prensa.

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão simples podem ser observados na tabela 3.5.

Tabela 3.5- Ensaio de resistência à compressão simples.

Ensaio de Resistência a Compressão Simples		
Dosagem:	60% BGS 40% Material fresado	
Teor de cimento para todos os CP's (%):	5,00	
Energia:	Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)	
Tempo de cura:	3 dias	
Corpo de Prova	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
CP 1	22.888,72	2,91
CP 2	24.506,82	3,12

Com a finalidade de redução de custos com cimento Portland na execução da obra, além da redução da suscetibilidade do material à formação de trincas de retração, na terceira série de ensaios foi adotado o teor de cimento Portland de 3% na compactação dos corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral para misturas com diferentes dosagens de BGS e material fresado, com o uso.

Na terceira série de ensaios, inicialmente foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, sendo, granulometria da BGS e do material fresado e determinação do teor de betume através do método rotarex para o material fresado.

Inicialmente, foi executado o ensaio de determinação do teor de betume do material fresado, por meio do rotarex, de acordo com DNER-ME 053/94. As amostras utilizadas foram nomeadas como amostras 1 e 2.

Neste ensaio foi determinada inicialmente a massa inicial de cada amostra (massa com o betume). Após esta determinação, a amostra foi colocada no recipiente do rotarex e acrescida de tricloroetileno, para a remoção do betume.

A partir de então, a amostra foi submetida à rotação, por meio do equipamento rotarex e ao acréscimo repetido de tricloroetileno até que a amostra estivesse totalmente sem betume, fato evidenciado quando o tricloroetileno passado pelo material sai sem vestígios de betume, ou seja, transparente.

Após o ensaio, o material foi levado à estufa, por 24 horas, para a secagem total do tricloroetileno. A nova pesagem foi realizada na seqüência, determinando assim, através da diferença de massas, inicial e final, o teor de betume do material.

Na figura 3.15 observa-se respectivamente: a amostra de material fresado no recipiente do rotarex durante o ensaio de determinação do teor de betume.



Figura 3.15- Equipamento rotarex durante o ensaio.

O cálculo usado para a determinação do teor de betume do material fresado pode ser observado na fórmula, enquanto que os resultados do teor de betume do material fresado estão apresentados na tabela 3.6.

$$\text{Teor de asfalto} = \frac{\text{material solúvel}}{\text{amostra}} \times 100$$

Onde:

Teor de asfalto= teor de betume da amostra, expresso em %;

Material solúvel = material betuminoso presente na amostra, expresso em kg;

Amostra = concreto asfáltico, expresso em kg.

Fórmula- Determinação do teor de ligante. Fonte: Norma DNER-ME 053/94.

Tabela 3.6- Determinação do teor de betume do material fresado.

Teor de Asfalto			
Material Fresado			
		Amostra 1	Amostra 2
Massa (g)	Amostra (kg)	1,00	0,98
	Insol. (kg)	0,91	0,91
	Solúvel (kg)	0,08	0,07
Teor de Asfalto (%)		8,51	6,80

Na sequência, para cada um dos materiais; BGS e material fresado, foram realizados dois ensaios de granulometria, a fim de checar eventuais desvios nos resultados.

O material fresado utilizado no ensaio de determinação do teor de betume, após secagem em estufa durante 24 horas, foi usado para o ensaio de granulometria, visto que o material precisa estar isento de betume para o ensaio.

Tanto para a BGS, quanto para o material fresado, o ensaio de granulometria foi realizado de acordo com a NBR 7181/84. Dessa forma, de acordo com Souza (2001) e Vasconcelos e Soares (2004), a BGS foi classificada como faixa B e o material fresado como faixa C, do DNIT.

Após as caracterizações dos materiais, foram realizados ensaios de compactação, de acordo com NBR 7182/86, a fim de determinar os teores de umidade ótima e massa específica aparente seca das misturas.

As misturas seguiram as seguintes dosagens: 60% BGS com 40% de material fresado, 50% BGS com 50% de material fresado e 40% BGS com 60% de material fresado. Estas misturas inicialmente foram submetidas ao ensaio de granulometria, estando todas dentro da faixa C do DNIT.

O teor de cimento foi fixado em 3% do total de massa da mistura, um teor mínimo adotado na execução de pavimentos, estando conforme o DER (2007) dentro de valores usados na reciclagem com cimento Portland nas obras das BR-163 e BR-277, que foram entre 2 e 3%.

Dessa forma, foi realizado um ensaio de compactação para cada dosagem, totalizando três ensaios de compactação, visto que são três dosagens distintas.

A energia de compactação adotada para compactação dos corpos de prova foi a energia intermediária, em 3 camadas com 21 golpes cada, com o uso do soquete grande no cilindro proctor. Na seqüência, os corpos de prova foram desmoldados através do extrator hidráulico e colocados sobre uma bandeja metálica.

Na figura 3.16 podem ser observados os corpos de prova moldados no ensaio de compactação, já extraídos dos cilindros proctor.

Para uma análise da variação da resistência à compressão simples de acordo com a variação do teor de umidade presente na mistura, os corpos de prova resultantes do ensaio de compactação foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples.

O período de cura adotado foi de 3 dias, sendo por todo o período de cura os corpos de prova mantidos em câmara úmida.



Figura 3.16- Corpo de prova moldados no ensaio de compactação.

Na tabela 3.7 e figura 3.17 estão apresentados os resultados do ensaio de compactação para a mistura de dosagem 60% BGS e 40% de material fresado.

Já a tabela 3.8 e figura 3.18 apresentam os resultados do ensaio de compactação para a mistura de dosagem 50% BGS e 50% de material fresado.

Os resultados do ensaio de compactação para a mistura de dosagem 40% BGS e 60% de material fresado podem ser observados na tabela 3.9 e figura 3.19.

Tabela 3.7- Ensaio de compactação- mistura de dosagem 60% BGS e 40% material fresado, com 3% de cimento.

Ensaio de Compactação		
Dosagem: 60% BGS 40% Material fresado		
Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00		
Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)		
Corpo de Prova	Teor de Umidade (%)	Massa específica aparente seca CP (kg/m ³)
CP 1	3,94	1.934,75
CP 2	6,62	1.996,26
CP 3	9,21	2.007,76
CP 4	11,57	1.989,47

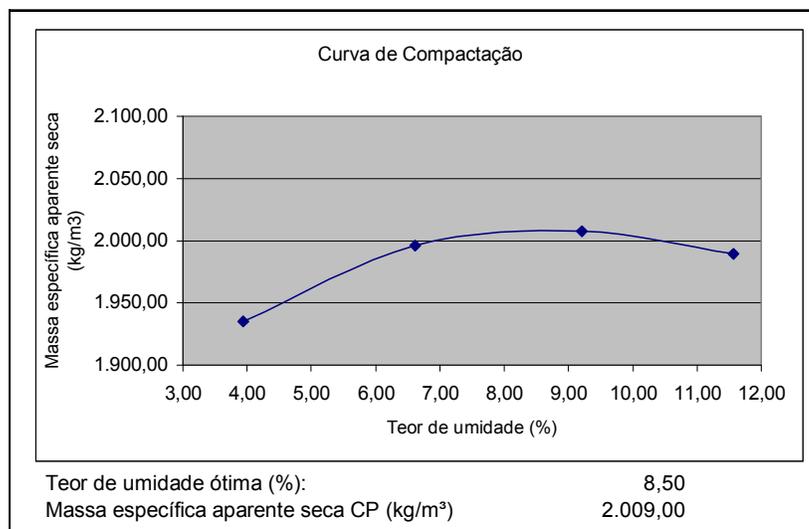


Figura 3.17- Curva de compactação- mistura de dosagem 60% BGS e 40% material fresado, com 3% de cimento.

Tabela 3.8- Ensaio de compactação- mistura de dosagem 50% BGS e 50% material fresado, com 3% de cimento.

Ensaio de Compactação		
Dosagem: 50% BGS 50% Material fresado		
Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00		
Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)		
Corpo de Prova	Teor de Umidade (%)	Massa específica aparente seca CP (kg/m ³)
CP 4	4,77	1.958,70
CP 1	6,12	1.983,00
CP 2	7,36	1.990,04
CP 3	8,62	1.953,89

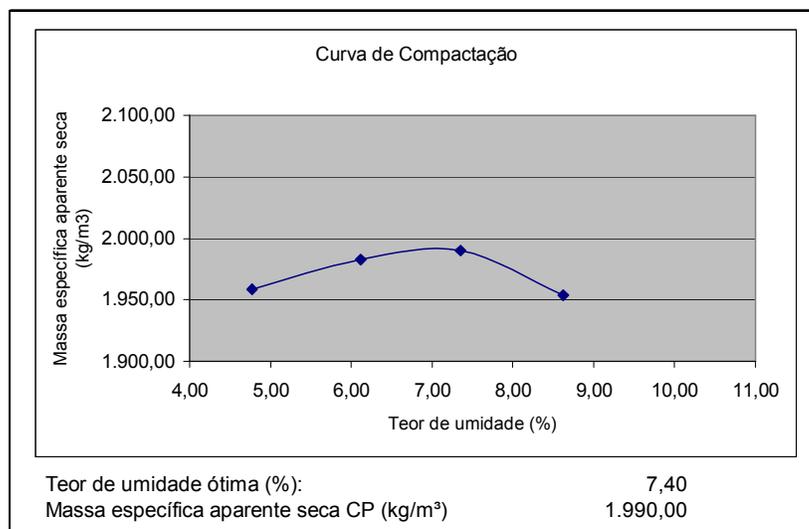


Figura 3.18- Curva de compactação- mistura de dosagem 50% BGS e 50% material fresado, com 3% de cimento.

Tabela 3.9- Ensaio de compactação- mistura de dosagem 40% BGS e 60% material fresado, com 3% de cimento.

Ensaio de Compactação		
Dosagem: 40% BGS 60% Material fresado		
Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00		
Energia: Intermediária (3 camadas de 21		
Corpo de Prova	Teor de Umidade (%)	Massa específica aparente seca CP (kg/m ³)
CP 4	3,44	1.948,05
CP 1	4,64	1.964,11
CP 2	6,90	1.946,03
CP 3	10,77	1.933,28

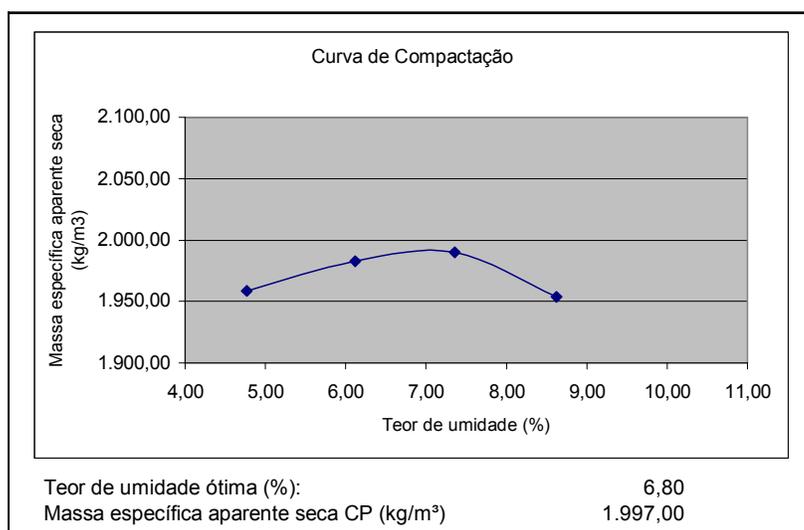


Figura 3.19- Curva de compactação- mistura de dosagem 40% BGS e 60% material fresado, com 3% de cimento.

No ensaio de compactação observou-se que ao comparar os corpos de prova, à medida que o percentual de BGS dentro da mistura aumenta, o valor do teor de

umidade ótimo também aumenta. Sendo assim, em misturas com 60% de BGS em massa, o teor de umidade ótimo é maior do que em misturas com 40% de BGS em massa.

Isto ocorre, pois como na BGS existe grande presença de finos, misturas com teor de BGS superiores, também possuem superiores níveis de finos, resultando na absorção de mais água para adquirirem o teor de umidade ótimo.

Esta análise, do percentual de BGS com relação ao teor de umidade ótimo, pode ser observada na tabela 3.10 de uma forma mais detalhada.

Tabela 3.10- Comparativo do teor de umidade ótimo na mistura.

Comparativo- Teor de Umidade Ótimo			
Dosagem da mistura			Teor de Umidade Ótimo (%)
BGS, em massa (%)	Material fresado, em massa (%)	Cimento, em massa (%)	
60	40	3	8,50
50	50	3	7,40
40	60	3	6,80

Para uma análise de resistência conforme o teor de umidade e dosagem, os corpos de prova moldados no ensaio de compactação foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, conforme NBR 12025/90.

Sendo assim, os corpos de prova ficaram em câmara úmida para uma cura adequada durante 3 dias.

A figura 3.20 mostra o corpo de prova na prensa, logo após a ruptura no ensaio de resistência à compressão simples.



Figura 3.20- Corpo de prova na prensa após ruptura no ensaio de resistência à compressão simples.

Na tabela 3.11 e figuras 3.21, 3.22 e 3.23, podem ser observados os resultados do ensaio de resistência à compressão simples e as curvas de resistência conforme a dosagem da mistura e o teor de umidade de cada corpo de prova.

Tabela 3.11- Ensaio de resistência à compressão simples- corpos de prova ensaio de compactação.

Ensaio de Resistência à Compressão Simples			
Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00			
Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)			
Tempo de cura: 3 dias			
Dosagem: 60% BGS 40% Material fresado			
Teor de umidade ótimo (%): 8,50			
Corpo de Prova	Teor de Umidade (%)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
CP 1	3,94	7.466,49	0,95
CP 2	6,62	8.281,62	1,05
CP 3	9,21	10.002,68	1,27
CP 4	11,57	6.259,29	0,80
Dosagem: 50% BGS 50% Material fresado			
Teor de umidade ótimo (%): 7,40			
Corpo de Prova	Teor de Umidade (%)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
CP 4	4,77	8.565,52	1,09
CP 1	6,12	8.947,69	1,14
CP 2	7,36	9.441,35	1,20
CP 3	8,62	5.681,09	0,72
Dosagem: 40% BGS 60% Material fresado			
Teor de umidade ótimo (%): 6,80			
Corpo de Prova	Teor de Umidade (%)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
CP 4	3,44	7.304,19	0,93
CP 1	4,64	7.922,99	1,01
CP 2	6,90	6.238,99	0,79
CP 3	10,77	5.569,49	0,71

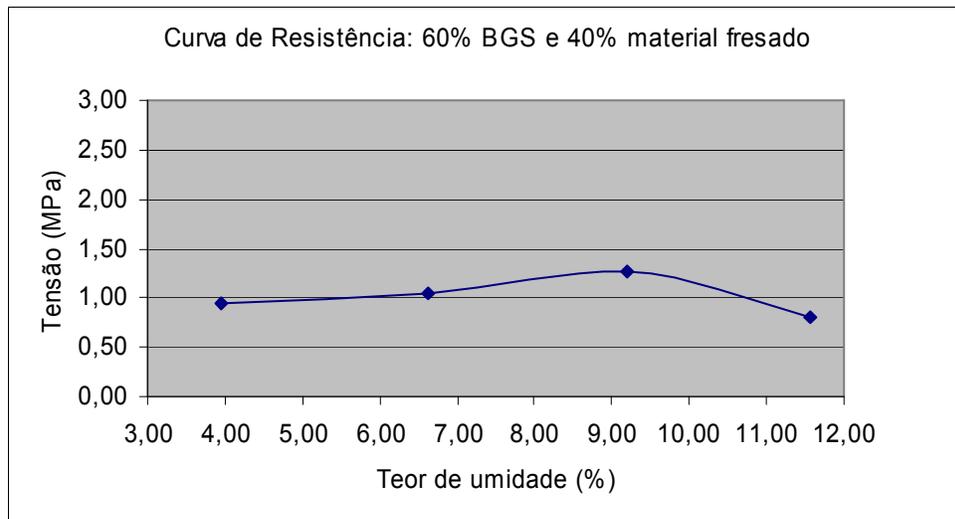


Figura 3.21- Curva de resistência- mistura de dosagem 60% BGS e 40% material fresado, com 3% de cimento.

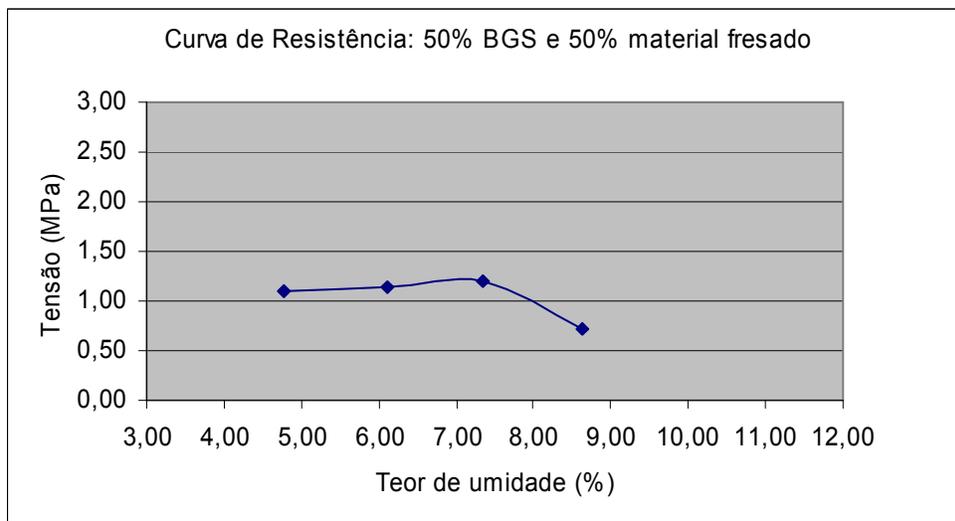


Figura 3.22- Curva de resistência- mistura de dosagem 50% BGS e 50% material fresado, com 3% de cimento.

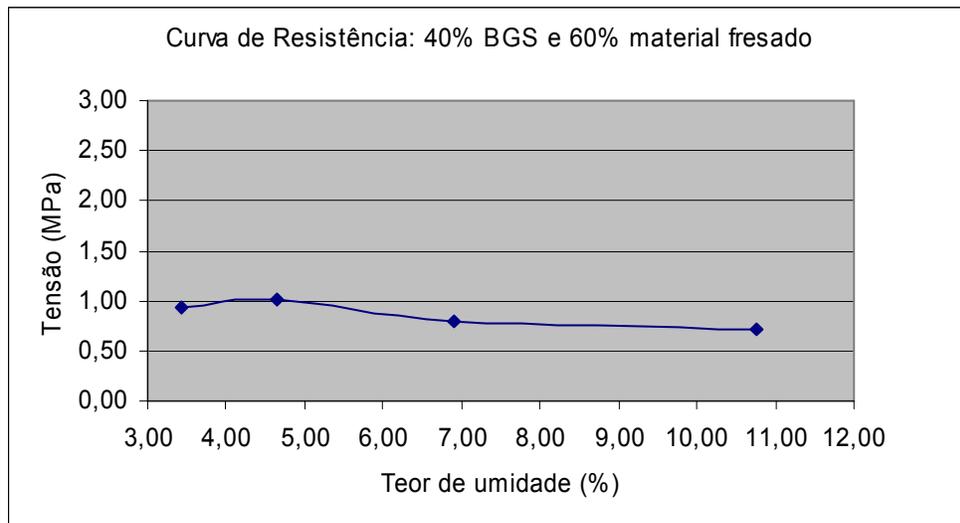


Figura 3.23- Curva de resistência- mistura de dosagem 40% BGS e 60% material fresado, com 3% de cimento.

Nota-se que para as três dosagens as resistências à compressão simples máximas foram obtidas com teores de umidade próximos aos teores de umidade ótimo, assim como o que ocorreu com os corpos de prova de BGS com cimento Portland.

Após o ensaio de resistência à compressão simples dos corpos de prova moldados para ensaio de compactação, foram iniciadas as moldagens de corpos de prova no teor de umidade ótimo para cada uma das três dosagens: 60% BGS com 40% de material fresado, 50% BGS com 50% de material fresado e 40% BGS com 60% de material fresado, sendo o teor de cimento de 3% acrescido do valor total de massa da mistura, para ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral.

Os corpos de prova foram moldados na energia intermediária, em 3 camadas de 21 golpes cada, com o soquete grande. Quanto ao tempo de cura, foram moldados corpos de prova para períodos de cura de 1 dia (24 horas), 3 dias (72 horas) e 28 dias.

A tabela 3.12 ilustra o plano de ensaios, sendo que para cada tipo de ensaio, dosagem e tempo de cura foram moldados dois corpos de prova, a fim de aferir os resultados.

Tabela 3.12- Plano de ensaios para os corpos de prova.

Plano de ensaios	Ensaio	
Dosagem da mistura	Resistência à Compressão Simples	Resistência à tração por Compressão Diametral
60% BGS, 40% Material fresado e 3% cimento	2 CP's com 1 dia de cura	2 CP's com 1 dia de cura
	2 CP's com 3 dias de cura	2 CP's com 3 dias de cura
	2 CP's com 28 dias de cura	2 CP's com 28 dias de cura
50% BGS, 50% Material fresado e 3% cimento	2 CP's com 1 dia de cura	2 CP's com 1 dia de cura
	2 CP's com 3 dias de cura	2 CP's com 3 dias de cura
	2 CP's com 28 dias de cura	2 CP's com 28 dias de cura
40% BGS, 60% Material fresado e 3% cimento	2 CP's com 1 dia de cura	2 CP's com 1 dia de cura
	2 CP's com 3 dias de cura	2 CP's com 3 dias de cura
	2 CP's com 28 dias de cura	2 CP's com 28 dias de cura

Para a moldagem de cada corpo de prova, inicialmente a mistura foi preparada. Para tal, foi depositado sobre uma bandeja o material composto por BGS, material fresado e cimento Portland, já pesados. Somente após a mistura manual da BGS, material fresado e cimento Portland é que foi acrescentada a água para nova mistura manual, obtendo assim, uma boa homogeneidade na mistura e hidratação do cimento Portland.

A compactação foi feita após a colocação de papel filtro no fundo do cilindro Proctor. Como mencionado anteriormente, a compactação foi realizada na energia intermediária, através em 3 camadas de 21 golpes cada com o soquete grande.

Para verificação do teor de umidade das misturas usadas para a moldagem dos corpos de prova, foram coletadas amostras de cada mistura, pesadas úmidas e, após secagem por 24 horas em estufa, pesadas novamente.

Após a moldagem, os corpos de prova dentro do cilindro foram pesados, para posterior determinação da massa específica aparente úmida, e, com os teores de umidade de cada mistura, determinar a massa específica aparente úmida.

Em seguida, os corpos de prova foram desmoldados com o auxílio de um extrator hidráulico. Para facilitar a extração dos corpos de prova foi aplicada vaselina no interior do cilindro Proctor antes da compactação. Em seguida os corpos de prova foram colocados na câmara úmida. O teor de umidade dentro da câmara úmida oscilou entre 98% e 99%.

Para controle para os ensaios de resistência dos corpos de provas, estes foram identificados com o número de CP, dosagem da mistura e data de moldagem, a fim de localizar cada corpo de prova dentro da câmara úmida conforme o tempo de cura para as rupturas. Na figura 3.24 podem ser observados quatro corpos de prova com a identificação, apoiados sobre bandeja, antes de serem colocados na câmara úmida.



Figura 3.24- Corpos de prova após desmoldagem.

Passado o tempo de cura previsto para cada corpo de prova, os mesmos foram submetidos aos ensaios de resistências, seja à compressão simples (NBR 12025/90) ou à tração por compressão diametral (NBR 7222/94).

Os corpos de prova usados para ensaio de resistência à compressão simples foram capeados, a fim de nivelar as superfícies inferiores e superiores, melhorando a distribuição da carga na prensa sobre os corpos de prova.

Para adequada aderência do material usado no capeamento, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e, somente após a secagem da superfície, ou seja, cerca de aproximadamente uma hora depois de retirados da câmara úmida, é que foram capeados. Antes dos corpos de prova serem colocados no prato da prensa para ruptura, todos foram medidos para determinar os valores de diâmetro e altura.

A figura 3.25 mostra corpos de prova capeados usados no ensaio de resistência à compressão simples, antes de serem colocados na prensa para ruptura.



Figura 3.25- Corpos de prova capeados.

Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, realizado conforme a norma NBR 7222, foram colocadas duas talas no sentido longitudinal aos corpos de prova e paralelos entre si, de modo a distribuir a carga uniformemente no sentido longitudinal aos corpos de prova. As talas usadas foram de madeira, visto que, estas se moldam ao corpo de prova, fazendo com que a carga incida homogeneamente por todo o corpo de prova, evitando erros nos resultados do ensaio.

Assim como no ensaio de resistência à compressão simples, os corpos de prova no ensaio de resistência à tração por compressão diametral foram medidos para determinar os valores de diâmetro e altura. Para o cálculo da tensão de resistência à tração por compressão diametral foi usada a fórmula.

$$\sigma = \frac{2 \times P}{\pi \times D \times L}$$

Onde:

σ = tensão de resistência à tração por compressão diametral, expresso em MPa;

P= força de resistência à tração por compressão diametral, expresso em N;

D= diâmetro do corpo de prova, expresso em m;

L= altura do corpo de prova, expresso em m.

Fórmula- Cálculo da tensão de resistência à tração por compressão diametral.

As unidades adotadas na norma NBR 7222/94 são de tensão em kg/m² e força em kg, porém estes foram alterados para o Sistema Internacional de Unidades.

Após a medição do diâmetro e altura dos corpos de prova, estes foram colocados na prensa deitados, para que a aplicação da carga fosse distribuída longitudinalmente ao eixo dos corpos de prova. Os resultados dos ensaios de

resistência à compressão simples estão apresentados nas tabelas 3.13, 3.14 e 3.15, enquanto os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral estão nas tabelas 3.16, 3.17 e 3.18.

Tabela 3.13-Resultados ensaio de resistência à compressão simples para dosagem 60% BGS e 40% material fresado.

Ensaio de Resistência à Compressão Simples					
Dosagem: 60% BGS 40% Material fresado					
Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00					
Teor de umidade ótima (%): 8,50					
Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)					
Tempo de Cura	Corpo de Prova	Teor de Umidade (%)	Massa específica aparente úmida CP (kg/m³)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
1 dia	CP 27	7,96	2.195,69	7.111,49	0,91
	CP 28	7,96	2.213,14	7.760,69	0,99
3 dias	CP 23	7,54	2.221,87	8.805,59	1,12
	CP 24	7,54	2.200,30	8.646,72	1,10
28 dias	CP 33	7,04	2.104,51	16.261,39	2,07
	CP 34	7,04	2.147,04	16.870,67	2,15

Tabela 3.14- Resultados ensaio de resistência à compressão simples para dosagem 50% BGS e 50% material fresado.

Ensaio de Resistência à Compressão Simples					
Dosagem: 50% BGS 50% Material fresado					
Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00					
Teor de umidade ótima (%): 7,40					
Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)					
Tempo de Cura	Corpo de Prova	Teor de Umidade (%)	Massa específica aparente seca CP (kg/m ³)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
1 dia	CP 19	7,39	2.023,61	4.504,29	0,57
	CP 20	7,39	2.015,30	6.208,59	0,79
3 dias	CP 11	7,20	1.965,94	7.831,69	1,00
	CP 12	7,34	2.004,99	7.909,46	1,01
28 dias	CP 15	7,73	1.967,93	16.455,56	2,12
	CP 16	7,67	1.971,14	16.210,39	2,07

Tabela 3.15- Resultados ensaio de resistência à compressão simples para dosagem 40% BGS e 60% material fresado.

Ensaio de Resistência à Compressão Simples					
Dosagem: 40% BGS 60% Material fresado					
Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00					
Teor de umidade ótima (%): 6,80					
Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)					
Tempo de Cura (dias)	Corpo de Prova	Teor de Umidade (%)	Massa específica aparente seca CP (kg/m ³)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
1,00	CP 1	6,93	1.896,02	3.712,99	0,47
	CP 2	6,71	1.935,47	4.057,89	0,52
3,00	CP 3	5,86	1.945,45	7.472,67	0,95
	CP 4	6,19	1.919,44	8.227,78	1,05
28,00	CP 7	6,98	1.966,72	16.190,98	2,08
	CP 8	6,89	1.970,18	16.341,21	2,10

Tabela 3.16- Resultados ensaio de resistência à tração por compressão diametral para dosagem 60% BGS e 40% material fresado.

Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral					
Dosagem:		60% BGS 40% Material fresado			
Teor de cimento para todos os CP's (%):		3,00			
Teor de umidade ótima (%):		8,50			
Energia:		Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)			
Tempo de Cura	Corpo de Prova	Teor de Umidade (%)	Massa específica aparente seca CP (kg/m ³)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
1 dia	CP 29	7,79	2.055,21	1.542,00	0,08
	CP 30	7,79	2.036,14	1.339,10	0,07
3 dias	CP 25	8,47	2.015,64	2.806,76	0,14
	CP 26	8,47	2.046,90	2.772,93	0,14
28 dias	CP 35	8,23	1.971,65	8.474,22	0,42
	CP 36	8,23	1.985,53	8.403,22	0,41

Tabela 3.17- Resultados ensaio de resistência à tração por compressão diametral para dosagem 50% BGS e 50% material fresado.

Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral					
Dosagem:		50% BGS 50% Material fresado			
Teor de cimento para todos os CP's (%):		3,00			
Teor de umidade ótima (%):		7,40			
Energia:		Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)			
Tempo de Cura	Corpo de Prova	Teor de Umidade (%)	Massa específica aparente seca CP (kg/m ³)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
1 dia	CP 21	6,84	2.015,36	1.146,40	0,06
	CP 22	6,84	2.077,89	1.439,62	0,07
3 dias	CP 13	7,06	2.012,31	2.647,80	0,13
	CP 14	7,76	1.979,70	2.530,12	0,12
28 dias	CP 31	7,75	1.934,09	7.787,75	0,39
	CP 32	7,98	1.932,34	7.777,65	0,39

Tabela 3.18- Resultados ensaio de resistência à tração por compressão diametral para dosagem 40% BGS e 60% material fresado.

Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral					
Dosagem:		40% BGS 60% Material fresado			
Teor de cimento para todos os CP's (%):		3,00			
Teor de umidade ótima (%):		6,80			
Energia:		Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)			
Tempo de Cura	Corpo de Prova	Teor de Umidade (%)	Massa específica aparente seca CP (kg/m³)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
1 dia	CP 17	6,90	1.997,58	984,00	0,05
	CP 18	6,90	1.987,07	903,09	0,04
3 dias	CP 5	6,81	1.937,73	2.392,82	0,12
	CP 6	6,55	1.930,75	2.412,44	0,12
28 dias	CP 9	7,10	1.937,21	7.334,59	0,37
	CP 10	7,72	1.943,46	7.700,18	0,39

As figuras 3.26, 3.27 e 3.28 ilustram os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples conforme o período de cura, para as dosagens de 60% BGS e 40% material fresado, 50% BGS e 50% material fresado e 40% BGS e 60% material fresado respectivamente.

Nota-se que conforme aumenta o período de cura, independente da dosagem, ocorre um aumento também da resistência, tanto à compressão simples, quanto à tração por compressão diametral.

As figuras ilustram o ganho de resistência, seja para o ensaio de resistência à compressão simples ou para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral em função do tempo.

Há um acréscimo nas resistências, de duas a três vezes a resistência obtida com 1 dia de cura, no período de 3 dias e ainda um aumento considerável da resistência no período de 3 a 28 dias.

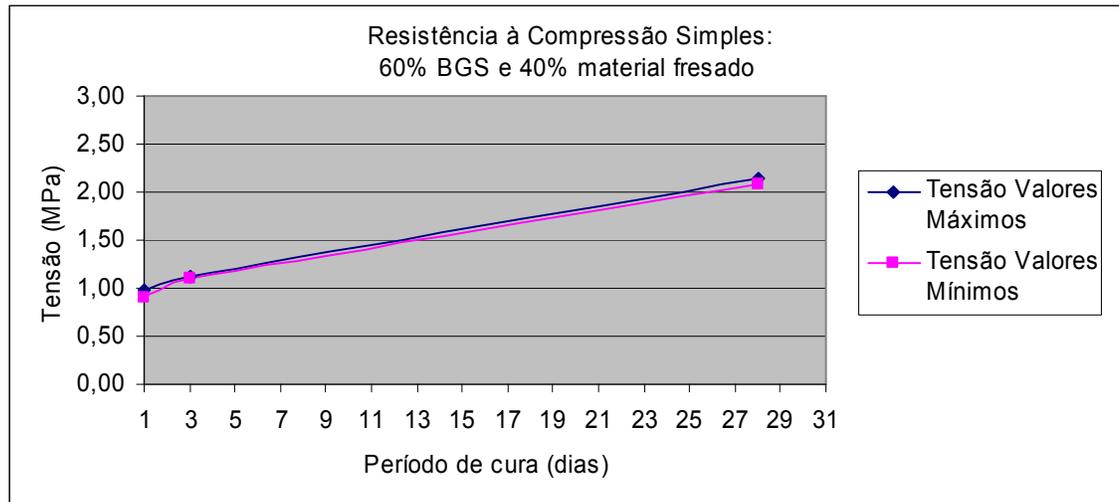


Figura 3.26- Resultado do ensaio de resistência à compressão simples para dosagem 60% BGS e 40% material fresado.

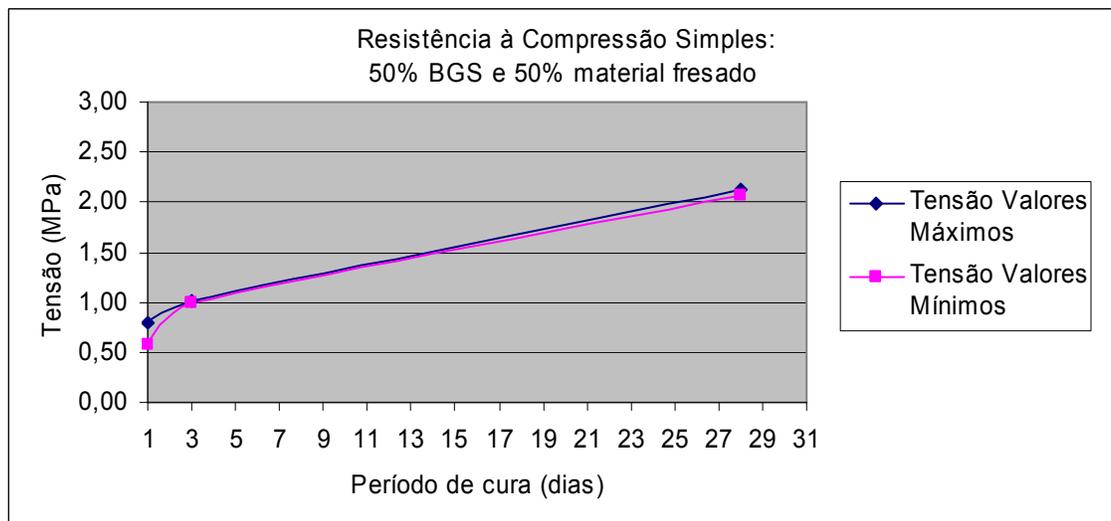


Figura 3.27- Resultado do ensaio de resistência à compressão simples para dosagem 50% BGS e 50% material fresado.

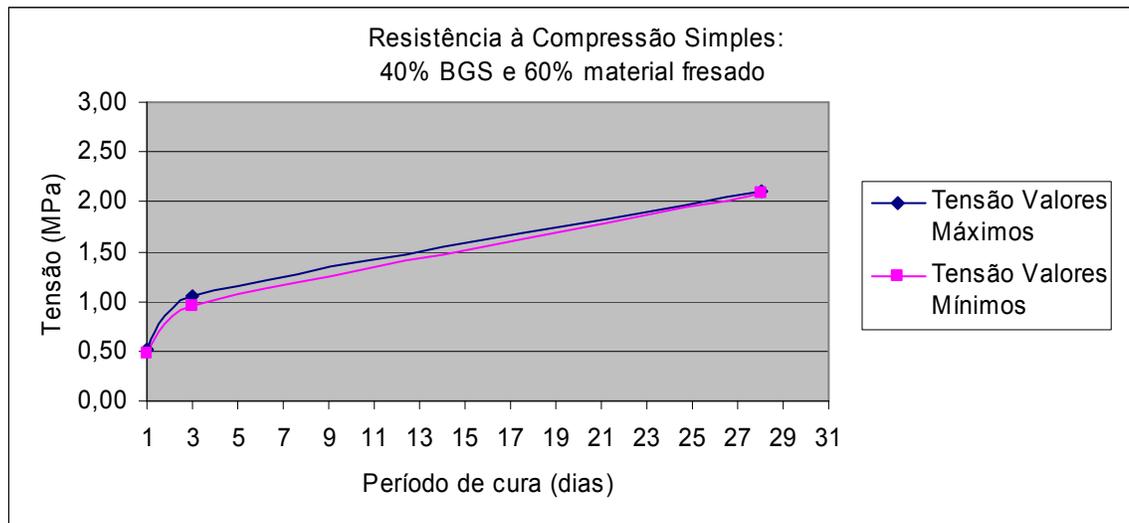


Figura 3.28- Resultado do ensaio de resistência à compressão simples para dosagem 40% BGS e 60% material fresado.

As figuras 3.29, 3.30 e 3.31 mostram os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, conforme a dosagem.

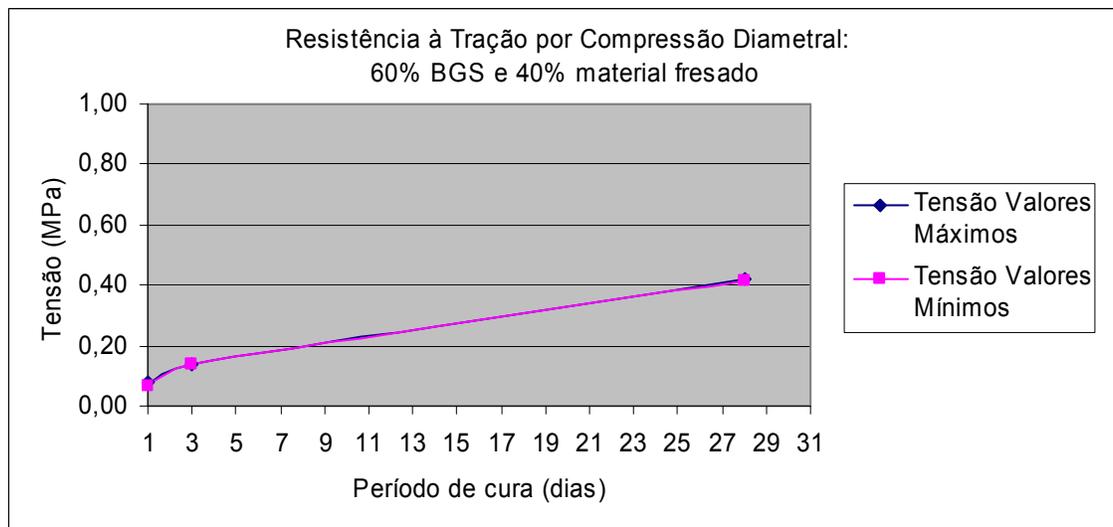


Figura 3.29- Resultado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para dosagem 60% BGS e 40% material fresado.

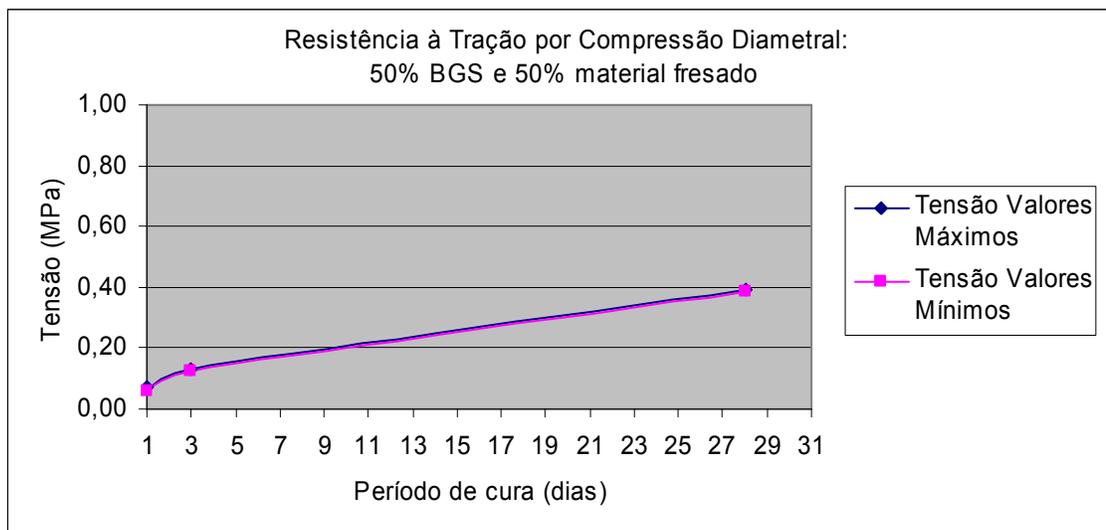


Figura 3.30- Resultado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para dosagem 50% BGS e 50% material fresado.

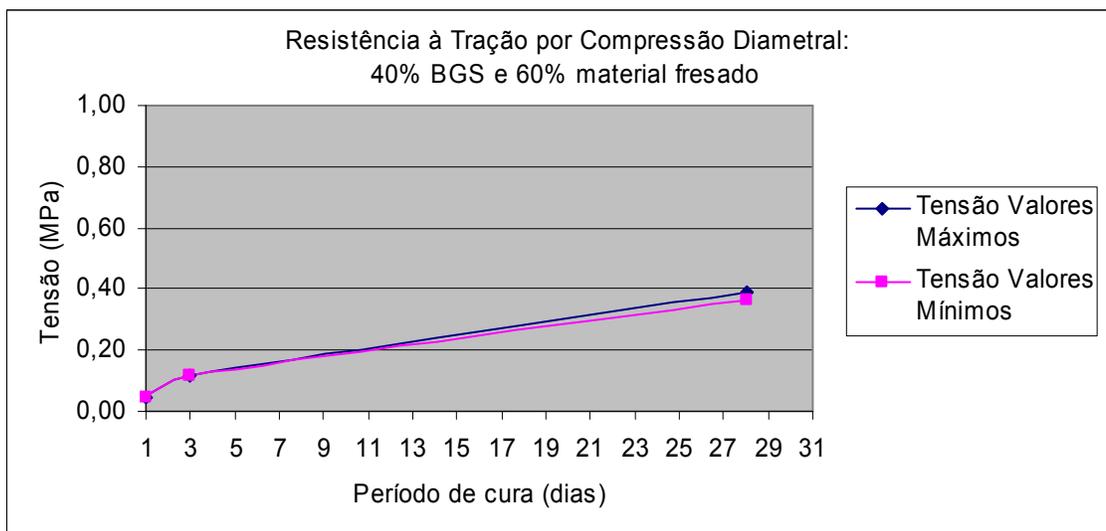


Figura 3.31- Resultado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para dosagem 40% BGS e 60% material fresado.

Na tabela 3.19 e figura 3.32 pode-se observar um resumo dos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples de forma a comparar a tensão de resistência na ruptura de acordo com as diferentes dosagens e períodos de cura.

Além do aumento da resistência mecânica à compressão simples e à tração por compressão diametral com o aumento do período de cura, já mencionado, outro ponto observado é que, à medida que aumenta o teor de BGS dentro da mistura, aumenta também o valor da resistência.

Isso mostra que, misturas com dosagem de 60% BGS e 40% material fresado possuem resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral superiores às misturas com dosagem de 40% BGS e 60% material fresado, estando a dosagem de 50% BGS e 50% material fresado, com resistências entre as duas primeiras.

A perda de resistência à medida que se aumenta o teor de material fresado, com relação à BGS, ocorre pois para uma adequada reação do cimento e ganho de resistência da mistura a presença de agregado bem graduado, como a BGS, permite um melhor preenchimento dos vazios dentro da mistura. Sendo assim, quanto maior o percentual de BGS com relação ao material fresado, obtém-se maiores resistências.

Tabela 3.19- Resumo dos resultados ensaio de resistência à compressão simples.

Resumo: Ensaio de Resistência à Compressão Simples				
Teor de cimento para todos os CP's (%):		3,00		
Tempo de Cura	Dosagem	Corpo de Prova	Carga Ruptura (kg)	Tensão Ruptura (MPa)
1 dia	60% BGS e 40% Material fresado	CP 27	725,17	0,91
		CP 28	791,37	0,99
	50% BGS e 50% Material fresado	CP 19	459,31	0,57
		CP 20	633,10	0,79
	40% BGS e 60% Material fresado	CP 1	378,62	0,47
		CP 2	413,79	0,52
Tempo de Cura	Dosagem	Corpo de Prova	Carga Ruptura (kg)	Tensão Ruptura (MPa)
3 dias	60% BGS e 40% Material fresado	CP 23	897,92	1,12
		CP 24	881,72	1,10
	50% BGS e 50% Material fresado	CP 11	798,61	1,00
		CP 12	806,54	1,01
	40% BGS e 60% Material fresado	CP 3	762,00	0,95
		CP 4	839,00	1,05
Tempo de Cura	Dosagem	Corpo de Prova	Carga Ruptura (kg)	Tensão Ruptura (MPa)
28 dias	60% BGS e 40% Material fresado	CP 33	1.658,20	2,07
		CP 34	1.720,33	2,15
	50% BGS e 50% Material fresado	CP 15	1.678,00	2,12
		CP 16	1.653,00	2,07
	40% BGS e 60% Material fresado	CP 7	1.651,02	2,08
		CP 8	1.666,34	2,10

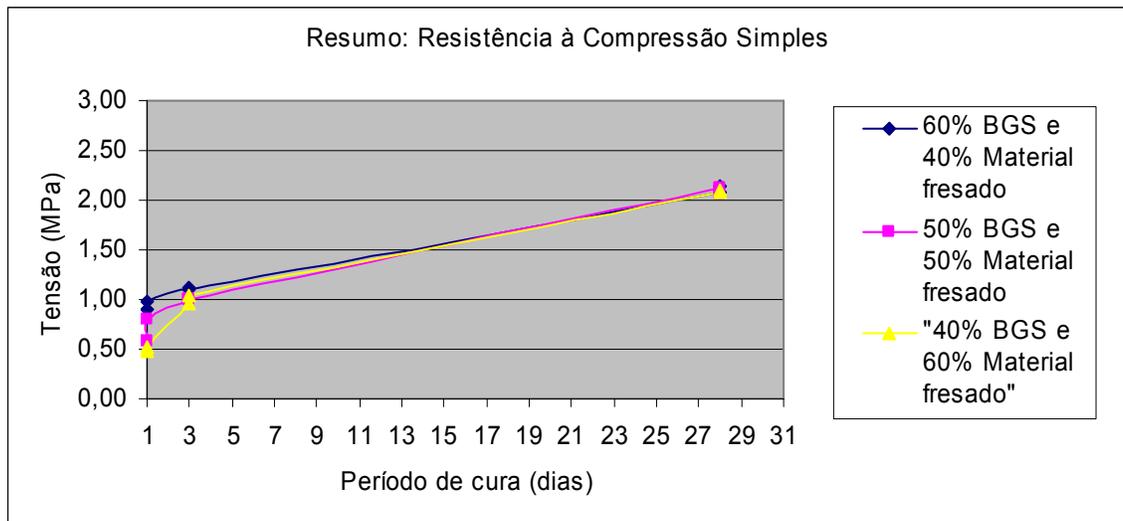


Figura 3.32- Resumo dos resultados do ensaio de resistência à compressão simples.

Na seqüência, é apresentado na tabela 3.20 e figura 3.33, o resumo dos resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, possibilitando comparar a tensão de resistência na ruptura para as diferentes dosagens e períodos de cura na ruptura.

Tabela 3.20- Resumo dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Resumo: Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00

Tempo de Cura	Dosagem	Corpo de Prova	Carga Ruptura (kg)	Tensão Ruptura (MPa)
1 dia	60% BGS e 40% Material fresado	CP 29	157,24	0,08
		CP 30	136,55	0,07
	50% BGS e 50% Material fresado	CP 21	116,90	0,06
		CP 22	146,80	0,07
	40% BGS e 60% Material fresado	CP 17	100,34	0,05
		CP 18	92,09	0,04

Tempo de Cura	Dosagem	Corpo de Prova	Carga Ruptura (kg)	Tensão Ruptura (MPa)
3 dias	60% BGS e 40% Material fresado	CP 25	286,21	0,14
		CP 26	282,76	0,14
	50% BGS e 50% Material fresado	CP 13	270,00	0,13
		CP 14	258,00	0,12
	40% BGS e 60% Material fresado	CP 5	244,00	0,12
		CP 6	246,00	0,12

Tempo de Cura	Dosagem	Corpo de Prova	Carga Ruptura (kg)	Tensão Ruptura (MPa)
28 dias	60% BGS e 40% Material fresado	CP 35	864,13	0,42
		CP 36	856,89	0,41
	50% BGS e 50% Material fresado	CP 31	794,13	0,39
		CP 32	793,10	0,39
	40% BGS e 60% Material fresado	CP 9	747,92	0,37
		CP 10	785,20	0,39

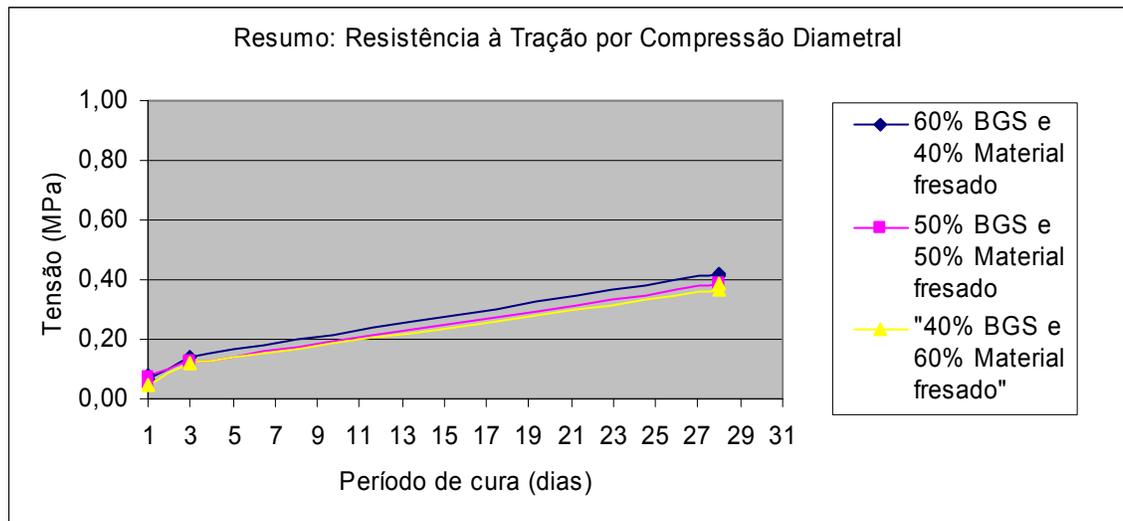


Figura 3.33- Resumo dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

3.4- Simulação de Tensões

Para verificar as tensões de tração no pavimento geradas pelo tráfego, comparando os resultados obtidos nos ensaios de tração por compressão diametral, foram realizadas simulações através do programa computacional *Elsym 5*.

A análise dos resultados obtidos nos ensaios de tensão de ruptura do ensaio de tração por compressão diametral através do *Elsym 5*, buscou verificar a capacidade de suporte da camada da base reciclada com cimento Portland, visto que esta base deve suportar as tensões geradas pelo tráfego.

O Programa *Elsym 5* é bastante utilizado no meio rodoviário nacional e internacional no desenvolvimento do seu procedimento de dimensionamento.

De maneira resumida, o programa *Elsym 5* determina as tensões, os deslocamentos e as deformações atuantes na estrutura do pavimento constituído por determinadas camadas, sob uma condição de carregamento pré estabelecida.

Com relação à carga a que o pavimento foi sujeito nas simulações, foi adotado a aplicação da carga de um eixo padrão de 82 kN.

Para as simulações foi previsto um pavimento com revestimento em CAUQ, base em material reciclado com cimento Portland, sub-base em BGS e subleito. Como foi prevista a liberação do pavimento ao tráfego após a execução do revestimento, para a proteção da base reciclada, este foi considerado no estudo das tensões no *Elsym 5*.

Para as espessuras das camadas foram adotados valores de praxe utilizados em campo: espessura do revestimento de 0,075 m, espessura da base de 0,17 m e espessura da sub-base de 0,15 m. De acordo com o material adotado para cada camada, foram usados os correspondentes coeficientes de Poisson.

Os módulos de resiliência dos materiais empregados no revestimento, sub-base e subleito foram adotados dentro de limites máximos e mínimos, de acordo com Balbo (1998) e Franco (2004). Devido à falta de dados quanto ao módulo de resiliência do material da camada de base, reciclada com cimento Portland, foram adotados valores de módulo de resiliência comumente utilizados. Dessa forma, as tensões no pavimento foram simuladas, para diferentes valores de módulos de resiliência.

As tensões determinadas foram as de tração, sempre na interface entre camadas. Dessa forma, foram determinadas as tensões de tração entre as camadas de revestimento e base, entre a base e a sub-base e finalmente, entre a sub-base e o subleito.

Na tabela 3.21 podem ser observados resultados da simulação, onde foi fixado o módulo de resiliência da camada de revestimento em 5.884,20 MPa.

Já na tabela 3.22 foi fixado o módulo de resiliência do revestimento de 4.903,50 MPa, enquanto que na tabela 3.23, fixado o módulo de resiliência do revestimento de 3.922,80 MPa.

Como o estudo laboratorial trata de reciclagem de pavimento flexível com adição de cimento Portland, o objetivo das simulações foi de analisar em especial as tensões de tração geradas pela ação da carga, na camada da base, na interface entre a mesma e a sub-base.

Tabela 3.21- Simulação de tensão para módulo de resiliência do revestimento de 5.884,20 MPa.

Camadas	Módulo de Resiliência (MPa)	Coeficiente de Poison	Descrição da Profundidade de Análise	Profundidade de Análise (m)	Tensão de Tração Gerada (MPa)
Revestimento	5884	0,35	Interface entre revestimento e base	0,075	0,13
Base	1471	0,25	Interface entre base e subbase	0,245	0,16
Subbase	588	0,40	Interface entre subbase e subleito	0,395	0,09
Subleito	98	0,45	—	—	—

Camadas	Módulo de Resiliência (MPa)	Coeficiente de Poison	Descrição da Profundidade de Análise	Profundidade de Análise (m)	Tensão de Tração Gerada (MPa)
Revestimento	5884	0,35	Interface entre revestimento e base	0,075	0,16
Base	1373	0,25	Interface entre base e subbase	0,245	0,15
Subbase	588	0,40	Interface entre subbase e subleito	0,395	0,10
Subleito	98	0,45	—	—	—

Camadas	Módulo de Resiliência (MPa)	Coeficiente de Poison	Descrição da Profundidade de Análise	Profundidade de Análise (m)	Tensão de Tração Gerada (MPa)
Revestimento	5884	0,35	Interface entre revestimento e base	0,075	0,13
Base	1471	0,25	Interface entre base e subbase	0,245	0,15
Subbase	686	0,40	Interface entre subbase e subleito	0,395	0,11
Subleito	98	0,45	—	—	—

Tabela 3.22- Simulação de tensão para módulo de resiliência do revestimento de 4.903,50 MPa.

Camadas	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poison	Descrição da Profundidade de Análise	Profundidade de Análise (m)	Tensão de Tração Gerada (MPa)
Revestimento	4904	0,35	Interface entre revestimento e base	0,075	0,06
Base	1471	0,25	Interface entre base e subbase	0,245	0,15
Subbase	686	0,40	Interface entre subbase e subleito	0,395	0,11
Subleito	98	0,45	–	–	–

Camadas	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poison	Descrição da Profundidade de Análise	Profundidade de Análise (m)	Tensão de Tração Gerada (MPa)
Revestimento	4904	0,35	Interface entre revestimento e base	0,075	0,09
Base	1373	0,25	Interface entre base e subbase	0,245	0,15
Subbase	588	0,40	Interface entre subbase e subleito	0,395	0,10
Subleito	98	0,45	–	–	–

Camadas	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poison	Descrição da Profundidade de Análise	Profundidade de Análise (m)	Tensão de Tração Gerada (MPa)
Revestimento	4904	0,35	Interface entre revestimento e base	0,075	0,08
Base	1373	0,25	Interface entre base e subbase	0,245	0,14
Subbase	686	0,40	Interface entre subbase e subleito	0,395	0,11
Subleito	98	0,45	–	–	–

Camadas	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poison	Descrição da Profundidade de Análise	Profundidade de Análise (m)	Tensão de Tração Gerada (MPa)
Revestimento	4904	0,35	Interface entre revestimento e base	0,075	0,11
Base	1275	0,25	Interface entre base e subbase	0,245	0,14
Subbase	588	0,40	Interface entre subbase e subleito	0,395	0,10
Subleito	98	0,45	–	–	–

Tabela 3.23- Simulação de tensão para módulo de resiliência do revestimento de 3.922,80 MPa.

Camadas	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poison	Descrição da Profundidade de Análise	Profundidade de Análise (m)	Tensão de Tração Gerada (MPa)
Revestimento	3923	0,35	Interface entre revestimento e base	0,075	0,04
Base	1275	0,25	Interface entre base e subbase	0,245	0,14
Subbase	588	0,40	Interface entre subbase e subleito	0,395	0,10
Subleito	98	0,45	–	–	–

Camadas	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poison	Descrição da Profundidade de Análise	Profundidade de Análise (m)	Tensão de Tração Gerada (MPa)
Revestimento	3923	0,35	Interface entre revestimento e base	0,075	0,03
Base	1275	0,25	Interface entre base e subbase	0,245	0,13
Subbase	686	0,40	Interface entre subbase e subleito	0,395	0,12
Subleito	98	0,45	–	–	–

Camadas	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poison	Descrição da Profundidade de Análise	Profundidade de Análise (m)	Tensão de Tração Gerada (MPa)
Revestimento	3923	0,35	Interface entre revestimento e base	0,075	0,06
Base	1177	0,25	Interface entre base e subbase	0,245	0,13
Subbase	588	0,40	Interface entre subbase e subleito	0,395	0,10
Subleito	98	0,45	–	–	–

Camadas	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poison	Descrição da Profundidade de Análise	Profundidade de Análise (m)	Tensão de Tração Gerada (MPa)
Revestimento	3923	0,35	Interface entre revestimento e base	0,075	0,05
Base	1177	0,25	Interface entre base e subbase	0,245	0,12
Subbase	686	0,40	Interface entre subbase e subleito	0,395	0,12
Subleito	98	0,45	–	–	–

3.5- Análise de Resultados

Para análise dos resultados obtidos nos ensaios, cabe frisar as limitações dos ensaios realizados na simulação em laboratório de uma base de pavimento asfáltico reciclada com cimento Portland.

Dentre estas estão: o teor de cimento, visto que foi adotado 3% da massa total da mistura; faixa granulométrica, sendo BGS dentro da faixa B do DNIT, material fresado entre as faixas B e C do DNIT e nas misturas, faixa C do DNIT; dosagens de BGS e material fresado variando no teor de BGS em 60%, 50% e 40% da massa total da mistura e tempos de cura de 1, 3 e 28 dias.

Para simular o comportamento mecânico do material resultante da reciclagem de pavimento asfáltico com acréscimo de cimento Portland, foram moldados corpos de prova de BGS, material fresado e cimento Portland, com diferentes teores de BGS e de material fresado, analisando a evolução das resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral ao longo do tempo.

No ensaio de compactação pode-se observar que nas misturas de BGS, material fresado e cimento Portland, à medida que se aumenta o teor de BGS dentro da mistura, aumenta o teor de umidade ótimo da mistura, visto que a presença de finos da BGS faz com que necessite de uma maior hidratação para chegar à umidade ótima. Dessa forma, nas misturas com dosagem de 60% BGS e 40% material fresado possuem um teor de umidade ótimo superior às misturas com dosagem de 40% BGS e 60% material fresado.

Na realização dos ensaios para reciclagens de pavimento asfáltico com cimento Portland, chegou-se a algumas conclusões quanto às resistências mecânicas, sendo as mesmas tanto nos ensaios de resistência a compressão simples, quanto nos ensaios de tração por compressão diametral.

Dessa forma, as maiores resistências mecânicas foram obtidas para: teores elevados de BGS dentro da mistura reciclada, visto que as misturas com teor de BGS de 60% chegaram a resistências maiores que misturas com 40% de BGS; valores de umidade da mistura mais próximos do teor de umidade ótimo, havendo dessa forma um paralelismo entre a resistência mecânica e a densidade máxima.

O ganho de resistência mecânica conquistado com teor de umidade próximo ao teor de umidade ótimo da mistura sugere a necessidade de um adequado controle tecnológico no campo, assegurando que a compactação do pavimento seja feita no teor de umidade ótimo para obtenção da massa específica aparente seca máxima, e dessa forma maior resistência mecânica.

Analisando ainda a evolução da resistência do pavimento asfáltico reciclado com adição de cimento Portland ao longo do tempo, obteve-se a conclusão de que quanto maior o tempo de cura adotado, maior o ganho de resistência, e conseqüentemente, maior o tempo de vida útil deste pavimento. Esse ganho da resistência é ainda mais evidente após 3 dias de cura.

Isso, pois ao analisar os resultados de corpos de prova, tanto em ensaio de resistência à compressão simples, quanto em ensaio de resistência à tração por compressão diametral, para as três dosagens em estudo, conclui-se que entre um pavimento onde foi adotado 1 dia de cura e outro onde foram adotados 3 dias de cura, há um ganho de resistência razoável, porém, entre um pavimento onde foram adotados 3 dias de cura e outro onde foram adotados 28 dias de cura, as resistências foram triplicadas, logo, para a conquista de um pavimento apto a suportar os esforços do tráfego, há que se priorizar a adoção de um tempo de cura adequado.

E finalmente, através dos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral e das simulações obtidas através do *Elsym 5*, observou-se que os resultados laboratoriais aos 3 dias de cura se aproximam das tensões de tração na interface da base com a sub-base obtidos nas simulações, logo, há que se fazer uma análise de

valores de tensão de tração, de acordo com o módulo de resiliência do material e tempo de cura do pavimento para que o projeto seja feito de uma forma realista.

Com isso, pode-se dizer que na reciclagem de pavimento asfáltico com adição de cimento Portland, pode ser considerada a liberação ao tráfego aos 3 dias de cura, devendo fazer uma análise para cada caso.

Dessa forma, sugere-se que sempre, na prática seja feita uma análise dos valores de tensão de tração, com valores de módulo de resiliência e tempo de cura do pavimento para liberação ao tráfego.

3.6- Discussão

Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais e das misturas para as dosagens usadas durante os ensaios a fim de determinar as curvas granulométricas para a classificação conforme o DNIT e teores de umidade ótimos para usar na moldagem dos corpos de prova a serem usados nos ensaios de resistência mecânica.

Dentro dos ensaios de resistência mecânica foram realizados ensaios de resistência a compressão simples e a tração por compressão diametral, visando determinar, para diferentes dosagens e tempos de cura os valores de tensão de ruptura e comparar os resultados entre si.

Os valores de tensão de ruptura obtidos nos ensaios de tração por compressão diametral foram ainda comparados com os valores de tensão gerados na camada da base reciclada, dados pela simulação de tensões através do programa computacional *Elsym 5*. Essa comparação foi feita para avaliar se os valores de tensão de ruptura estavam dentro dos valores de tensões geradas.

Dentro de ensaios não foram realizados ensaios de fadiga de pavimento para as dosagens adotadas, visto que não foi o objetivo do trabalho, porém seria ainda um

complemento para análise da resistência do pavimento asfáltico reciclado com cimento Portland.

4.- PROPOSTA DE DOSAGEM

4.1- Considerações

Conforme Jofre, Kraeme e Minguela (1999), o material reciclado a ser aplicado deve corresponder ao estudo específico da dosagem para cada pavimento, devendo-se atentar aos seguintes fatores: granulometria, teor de água, massa específica, tipo e teor de cimento.

A obtenção da granulometria tem como objetivo determinar se a granulometria do material fresado está aceitável ou se será necessária adição de material granular ao material fresado.

Para os mesmos autores, se a curva obtida necessita de uma correção, o acréscimo de uma determinada quantidade de agregado numa determinada fração não é a única solução, ainda que seja a mais usada.

Também pode-se eliminar elementos de granulometria grossa ou realizar uma quebra destes, visto que algumas recicladoras permitem reduzir a granulometria do material fresado através de ajustes no tambor. Lembrando que a presença de materiais formados pela união de materiais finos entre si ou com outras partículas mais grossas unidas pelo betume pode fazer com que a curva granulométrica varie de forma considerável.

Para os mesmos autores, ainda com relação à granulometria, deve-se atentar que a profundidade de reciclagem também pode influenciar notavelmente na curva granulométrica, pois quanto maior a profundidade fresada, maior é a porcentagem de camadas fresadas sem material asfáltico frente às camadas superiores, que normalmente são misturas betuminosas com granulometria diferentes.

Ainda para os mesmos autores, quanto ao teor de água a ser acrescentado na mistura, é o teor de água para se obter o teor de umidade ótimo na mistura para uma compactação do material mínima de 97% da massa específica aparente seca máxima, do ensaio de compactação.

Conforme Jofre, Kraeme e Minguela (1999), o teor de cimento a ser acrescentado na mistura pode ser estabelecido como o teor mínimo para simular a resistência de um solo-cimento. Porém, conforme as características do material a reciclar, e de acordo com a porcentagem de cimento a ser adicionada à mistura, podem-se obter resistências bastante elevadas, podendo chegar a resistências similares a uma Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC).

Para Balbo (1993), o emprego do cimento na estabilização de uma mistura é feito a fim de se obter um aumento da qualidade ou mudança do comportamento de materiais de pavimentação, abrangendo uma variada gama de solos, incluindo os materiais granulares (agregados), sejam naturais ou britados, e misturas de solos com agregados, entre outros.

Ainda para o mesmo autor, a adição do cimento ocasiona a formação de um esqueleto, onde as partículas de solo ficam envolvidas pela pasta de tal forma a criar uma matriz que se fixa às demais partículas não aderidas. Como as partículas possuem pequena resistência ao cisalhamento, a formação deste esqueleto é fundamental para o aumento da resistência do material e diminuição da suscetibilidade à água no caso de solos argilosos.

Em agregados, a adição de cimento como a pasta de cimento não é suficiente para preencher totalmente os espaços vazios entre os grãos, já que os grãos são maiores do que as partículas de cimento.

Dessa forma, de acordo com Balbo (1993), a ação do cimento fica restrita a fazer ligações pontuais entre os grãos, aumentando a resistência do material, porém não contribuindo com a diminuição da suscetibilidade da mistura à água.

Esse aumento de resistência é ainda mais significativo quando em uma granulometria desuniforme (bem graduada) dos agregados presentes, ocasionando um maior preenchimento dos espaços vazios.

4.2- Critério de Dosagem de Acordo com a Resistência

Estudos com relação ao comportamento de misturas de BGTC foram realizados por Balbo (1993), esses estudos tiveram como objetivo definir os valores típicos de resistência e módulo de elasticidade das misturas, pesquisar conseqüências na variação do teor de umidade para a resistência e módulo de elasticidade do material, além de estudar a relação entre as tensões de tração aplicadas e número de repetição de cargas que, associado às tais tensões, no processo de fadiga do material.

Com relação a cada um dos materiais usados nas misturas para a fabricação das amostras, Balbo (1993), não contemplou análise sobre a variação do teor de cimento, que foi fixado por toda a série de ensaios e quanto ao teor de umidade, foi tomado como ponto de partida o teor de umidade ótimo (teor adotado conforme NBR,1991). Já com relação à brita graduada, foram usadas amostras de britas bem graduadas.

No trabalho, Balbo (1993) aponta que, a relação água/cimento que leva a mistura ao maior nível de resistência é inferior a relação água/cimento definida pelo teor de umidade ótimo de compactação, sendo que, para quaisquer agregados a umidade ideal de compactação, na hipótese de se adotar o critério da máxima resistência para a mistura, o teor de umidade deve estar entre 1,50 e 2,00 % abaixo do teor de umidade ótimo de compactação.

Dessa forma, para o mesmo autor, o teor de umidade ótimo, a massa específica aparente seca não será a máxima, sendo em torno de 99% da mesma. Sendo assim, deve-se optar por uma mistura com a máxima resistência ou por uma mistura que atinge a máxima massa específica aparente seca, ou seja, optar entre máxima resistência ou máxima densidade.

Também Jofre, Kraeme e Minguela (1999), adotam o mesmo critério da utilização do teor de cimento para a máxima resistência, visto que o teor de cimento é determinado através de um ensaio onde são moldados três corpos de provas com diferentes teores de cimento, compactados na densidade mínima exigida em campo e teor de umidade ótimo (de acordo com ensaio de compactação no cilindro Proctor na energia intermediária) e rompidos aos sete dias de cura, onde o teor de cimento adequado é o teor em que se obter a maior resistência mecânica.

Para os mesmos autores, após essa determinação é realizada análise de sensibilidade do teor de cimento sobre os corpos de prova compactados a densidades que diferirem da densidade adotada anteriormente em mais ou menos dois pontos a fim de se determinar o teor mínimo de cimento para garantir a resistência à compressão exigida em campo considerando possíveis dispersões encontradas em campo.

4.3- Discussão

Com relação à dosagem na fabricação de misturas de materiais reciclados de pavimento flexível com adição de cimento Portland, ambos os autores; Balbo (1993) e Jofre, Kraeme e Minguela (1999), são adeptos ao critério de que o teor de cimento ideal a ser adicionado é aquele em que o material reciclado adquire a maior resistência mecânica.

Quanto ao teor de umidade a adotar na reciclagem de pavimento flexível com cimento Portland, para garantir a máxima resistência mecânica, existe uma divergência de opiniões entre os autores Balbo (1993) e Jofre, Kraeme e Minguela (1999).

Para Jofre, Kraeme e Minguela (1999), o teor de umidade a adotar para garantir a adotar a máxima resistência mecânica do material é o teor de umidade ótimo, visando uma compactação mínima de 97% da massa específica aparente seca máxima para garantir as máximas resistências, concluindo que a máxima resistência é obtida na densidade máxima.

Já Para Balbo (1993), o teor de umidade para garantir a adotar a máxima resistência mecânica é entre 1,50 e 2,00 % abaixo do teor de umidade ótimo de compactação.

Dessa forma, para Balbo (1993) a máxima resistência mecânica não ocorre na máxima massa específica aparente seca, devendo-se optar pela máxima resistência ou pela densidade máxima.

No estudo laboratorial realizado, chegou-se à mesma conclusão que Jofre, Kraeme e Minguela (1999), visto que, conforme mencionado anteriormente foi observado que as maiores resistências mecânicas, tanto para o ensaio de compressão simples, quanto para o ensaio de tração por compressão diametral foram obtidas quando os corpos de prova estavam com teores de umidade próximos ao teor de umidade ótimo.

Com relação à dosagem de misturas para o emprego em reciclagem de pavimento asfáltico com cimento Portland é apresentada na figura 4.1 uma proposta preliminar.

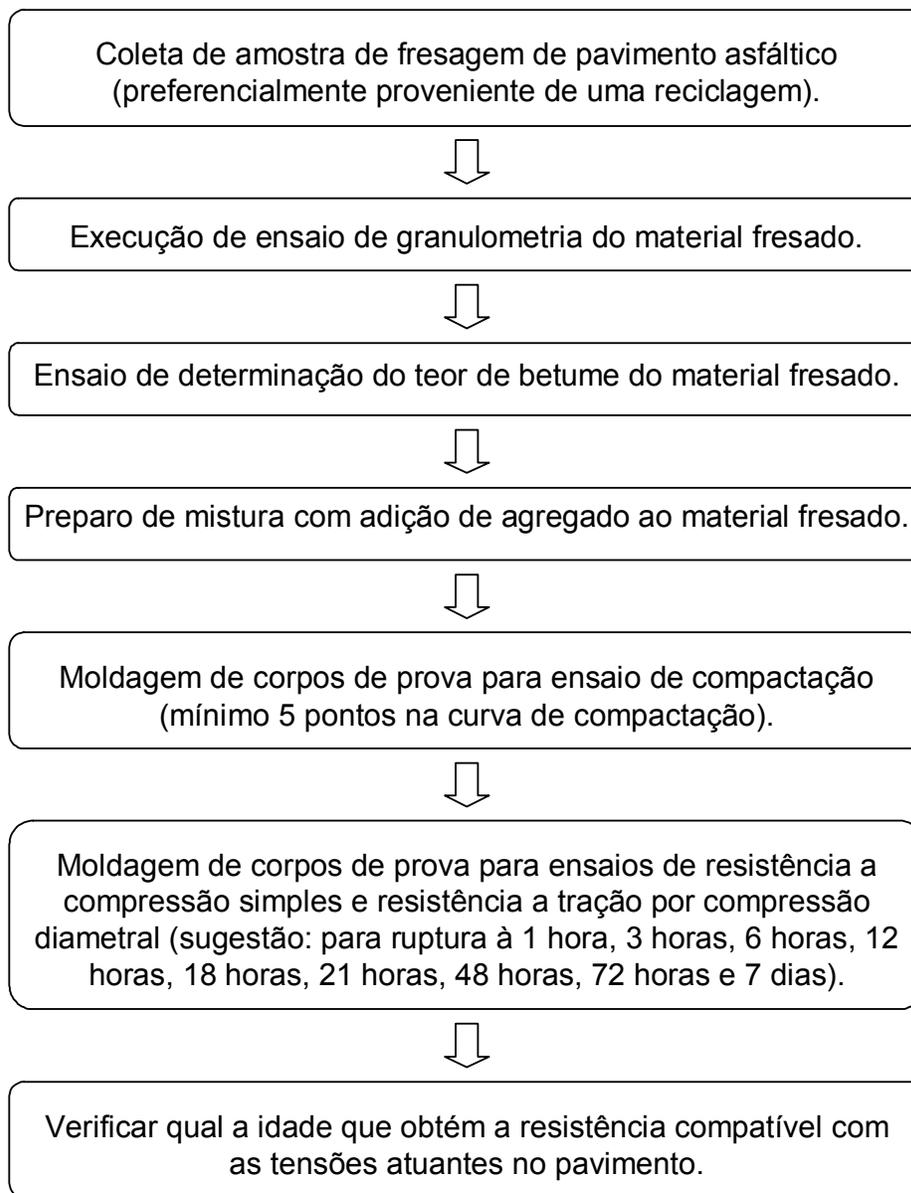


Figura 4.1- Proposta de dosagem na reciclagem de pavimento asfáltico com cimento Portland.

5.- CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS.

Na necessidade da reconstrução de um pavimento asfáltico há que se considerar a alternativa da reciclagem do pavimento. Dentre as inúmeras vantagens do uso da reciclagem de pavimento flexível, cabe ressaltar a sustentabilidade do planeta, já que a reconstrução de pavimento envolve desde a exploração do meio ambiente para a extração de novos agregados à degradação do meio ambiente dada pela necessidade de bota-fora, o que hoje em dia já pode ser considerado como uma tratativa inviável.

O trabalho em questão procurou abranger os tipos de reciclagem mais utilizados no mercado ultimamente e, dando um enfoque especial à reciclagem de pavimento asfáltico com adição de cimento Portland, procurou através de ensaios laboratoriais simular o comportamento mecânico deste material em função do tempo obtido em campo.

A análise temporal visou verificar o tempo necessário entre a execução da reciclagem de pavimento asfáltico com cimento Portland e a liberação do mesmo para o tráfego, lembrando que para a liberação, o pavimento deverá suportar a ação das cargas dadas pelos veículos de carga, sem gerar danos à estrutura do pavimento.

Nos ensaios laboratoriais executados, simulando o processo da reciclagem de pavimento com adição de cimento Portland para estudo da evolução da resistência mecânica através dos ensaios de resistência a compressão simples e a tração por compressão diametral foi adotado o teor de cimento de 3%, podendo ser realizados estudos futuros para outros teores.

Quanto às dosagens, foram adotadas nas misturas três dosagens distintas, que foram; 60% de BGS e 40% de material fresado, 50% de BGS e 50% material fresado e, 40% de BGS e 60% material fresado. Dessa forma, estudos para outras dosagens também são sugeridos.

E, finalmente adotar tempos de cura superiores aos usados, ou seja; 1, 3 e 28 dias, poderiam visualizar as resistências também a longo prazo, podendo ainda agregar o ensaio de fadiga em outros trabalhos complementando os estudos do comportamento mecânico do pavimento asfáltico reciclado com cimento Portland.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRA- ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION. **Basic Asphalt Recycling Manual**. Annapolis, Maryland, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS-ABEDA. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas - Soluções para pavimentar sua Cidade**. Rio de Janeiro, 2001.

BALBO, José Tadeu. **Estudo das Propriedades Mecânicas das Misturas de Brita e Cimento e sua Aplicação aos Pavimentos Semi-rígidos**. 181p. Dissertação (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

BALBO, José Tadeu. **Uma Interpretação Geométrica e Elástica dos Coeficientes Estruturais Empregados em Projetos de Pavimentos Asfálticos**. Laboratório de Mecânica dos Pavimentos– Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

BELIGNI, Mauro. **Estudo do Desempenho de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente e a Frio Utilizadas em Bases de Pavimentos**. 141p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

BONFIM, Valmir. **Estudo da Granulometria Resultante da Fresagem de Revestimentos Asfálticos com Vistas à Reciclagem in situ a Frio**. 179p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

BONFIM, Valmir. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**- Fazendo Arte Editorial- 2ª Edição- São Paulo. 2001.

CASTRO, Luciana Nogueira de. **Reciclagem a Frio in situ com Espuma de Asfalto..** 183p. Dissertação (Mestrado) – COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro- Rio de Janeiro, 2003

CATERPILLAR- **Products Machine**- Disponível em:

<http://cmms.cat.com/cmms/servlet/cat.dcs.cmms.servlet.GetFamilyFull?classid=406&langid=en&rgnid=NACD&view=html&familyid=474&dsfFlag=0>

[Acesso em 29 de Junho de 2006].

COTRIL MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS- **Drum Mixer**- Disponível em:

<http://www.cotril.com.br/cusina.html> [acesso em 04 de Julho de 2006]

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES- DNIT **Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos.** Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES- DNIT, **Pavimentação- Reciclagem de Pavimento a Frio in situ com Espuma de Asfalto.** Rio de Janeiro, ES 405, 2000.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM- DER PR. **Reciclagem a Frio com Adição de Cimento.** 4º Encontro Técnico. 2007.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM- DER SP. **Reciclagem de Pavimentos Flexíveis com Cimento Portland**- Relatório, 2006.

DOMINGUES, Felipe A.; BELIGNI, Mauro. PTR-777. **Patologia e Auscultação de Pavimentos**, 1994.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Recycled Materials In European Highway Environments, Uses, Technologies, and Policies**- FHWA-PL-00-25, 2000.

FINN, Fred N. **Seminar on Asphalt Pavement Recycling Overview of Project Selection**. Transportation Research Record 780- Commission on Sociotechnical Systems – National Academy of Sciences. Washigton D.C., 1980.

FRANCO, Mauricio Luiz de Oliveira. **Estudo do Efeito de Intervenções Sobre o Comportamento de Pavimentos de um Grupo de Rodovias do Estado do Paraná**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

GONTIJO, Paulo Romeu A., **A Técnica da reciclagem à Quente Empregando Materiais Oriundos da fresagem de Camadas Asfálticas - Procedimentos Essenciais**. Reunião Anual de Pavimentação, 32^a, ABPV, Brasília, 2000.

GULYAS, Andras; BOROMISZA, Tibor; Torocsik, Frigyes. **Experience of Cold In-place Recycling in Hungary**. Transportation Research Board- Washington D.C.,2006.

HALL, Kathleen T.; CORREA, Carlos E.; CARPENTER, Samuel H.; ELLIOT, Robert P. **Rehabilitation Strategies for Highway Pavements**. National Cooperative Highway Research Program- Transportation Research Board National Council. Maio, 2001.

JOFRÉ, Carlos; KRAEMER, Carlos; MINGUELA, Jesús Díaz. **Manual de Firmes Reciclados in situ com Cimento**. Instituto Espanol del Cemento y sus Aplicaciones- Espanha, 1999.

LAHUE, Sanford P. **Procedings of the Nacional Semiar on Asphalt Pavement Recycling- Economics of Recycling**. Transportation Research Record 780- Commission on Sociotechnical Systems – National Academy of Sciences. Washigton D.C., 1980.

LENC- LABORATÓRIO DE ENGENHARIA E CONSULTORIA S/C- **Relatório de Estudo de Reciclagem de Pavimentos**, 2004.

LIMA, André Theophilo. **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente**. 117p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, 2003.

MARTEC TECHNOLOGY. **Asphalt Recycling Techniques**- Disponível em: http://www.martec.ca/technology/asphalt_recycling_techniques.htm [acesso em 10 de Abril de 2006].

MEDINA, Jacques de. **Mecânica dos Pavimentos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1997.

MERIGHI, João Virgílio; FORTES, Rita Moura. **Some Aspects Resistance's Effect in the Flexible Pavements Recycled with Cement Portland**- International Symposium on Pavement Recycling. São Paulo, 2005.

MOTTA, Laura Maria Goretti da; PINTO, Salomão; GUARÇONI, Dilma S. **Trecho de Reciclagem a Frio na BR 393- Avaliação após 8 anos da Implantação**. IBP03102, 2002.

NUNN, M.; CARSWELL, I.; MERRILL, D. **Sustainable Maintenance of Roads using Cold Recycling Techniques (Smart Project)**- International Symposium on Pavement Recycling. São Paulo, 2005.

OLIVEIRA, Paulo César. **Contribuição ao Estudo da Técnica de Reciclagem Profunda na Recuperação de Pavimentos Flexíveis**. 157p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

OLIVEIRA, Paulo César Arriero de; SANT'ANNA, Fernando Márcio Guimarães; SOUZA, Firmino Sávio Vasconcellos de. **Pavement Rehabilitation Through Recycling with the Addition of Portland Cement on Highway SP-351**- International Symposium on Pavement Recycling. São Paulo, 2005.

PETROBRÁS PETRÓLEO BRASILEIRO AS. **Emulsão Rejuvenescedora**. Disponível em: <<http://www2.petrobras.com.br/minisite/refinarias/portugues/six/produtos/er.html>> [acesso em 28 de Junho de 2005].

SUFIAN, Zulakmal; AZIZ, Nafisah; Hussain, Mat Zin. **Cold in-Place Pavement Recycling in Malaysia**- International Symposium on Pavement Recycling. São Paulo, 2005.

SUZUKI, Carlos Yukio; PEREIRA, Antonio Carlos Oquendo; TSU, Bruna Suzanne Aiello; AZEVEDO, Angela Martins; DIAZ, Patricio Hurtado; TUCHUMANTEL, Osvaldo. **Structural Analysis of a Test Section Using Cold in Place Recycling**- International Symposium on Pavement Recycling. São Paulo, 2005.

TUCHUMANTEL, JR. Osvaldo, **Reciclagem de Pavimentos - Conceitos, Interpretações e Controle**. Betunel Indústria e Comércio LTDA, 1999.

WIRTGEN AMERICA. **Recycling e Estabilization**- Disponível em: <<https://www.wirtgenamerica.com/flash.html>> [acesso em 16 de Abril de 2006].

BIBLIOGRAFIAS DE APOIO

ARRIERO, Paulo César. **Controles Construtivos Utilizados em Obras de Reciclagem Profunda**. Pavisan. Campinas, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Amostras de Solo-Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização**- NBR 6457. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e Concreto-Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos-de-prova Cilíndricos**- NBR 7222. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Dosagem de Brita Graduada Tratada com Cimento**. NBR 12261. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Informação e Documentação- Citações em Documentos – Apresentação**. NBR 10520. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Informação e documentação- Referências- Elaboração**. NBR 6023. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais Betuminosos - Determinação da Solubilidade em Tricloroetileno**- NBR 14855. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais para Sub-base ou Base de Brita Graduada Tratada com Cimento**- NBR 11803. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo- Análise Granulométrica**- NBR 7181. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo-cimento- Moldagem e Cura de Corpos-de-prova Cilíndricos**: NBR 12024. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo- Ensaio de Compactação**- NBR 7182. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo-cimento- Ensaio de Compressão Simples de Corpos-de-prova**: NBR 12025. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sub-base ou Base de Brita Graduada**- NBR 12264. Rio de Janeiro, 1991.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis- Procedimento A**- DNER- PRO 010/79. Rio de Janeiro, 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis- Procedimento B**- DNER- PRO 011/79. Rio de Janeiro, 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Defeitos nos Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos- Terminologia**- DNIT- 005/2003-TER. Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Ensaio de Equivalente Areia**. DNER-ME 054/97. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos**- DNER- PRO 159/85. Rio de Janeiro, 1985.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Misturas Betuminosas- Percentagem de Betume**. DNER-ME 053/94. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Solos- Análise Granulométrica por Peneiramento**. DNER-ME 080/94. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Reciclagem de Pavimento Asfáltico *in situ* com Cimento e Brita**. DNER- ET-DE P00-035. Rio de Janeiro, 2006.

LAKATOS, EVA MARIA; MARCONI, MORINA DE ANDRADE. **Metodologia do Trabalho Científico**. Atlas- 2ª Edição, 1997.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: Pini. 871p. vol.2., 2001.

SILVA, Patricia Barbosa da; FORTES, Rita Moura. **Estudos Comparativos entre os ensaios Rotarex, Soxlfex e Mufla na Determinação do Teor de Betume de uma Massa Asfáltica**- Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control. Alabama. USA, 2001.

SOUZA, Antonio Carlos Valle de. **Uma Análise de Custos Rodoviários como Função da Capacidade das Estradas e do Módulo de Resiliência dos Revestimentos Asfálticos**. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 2001.

VASCONCELOS, Kamilla Lima; SOARES, Jorge Barbosa. **Projeto de Misturas de Concreto Betuminoso Reciclado a Quente com Diferentes Teores de Material Fresado**. Universidade Federal do Ceará, 2004.

ANEXO

Tabela- Granulometria da BGS- 1ª e 2ª série de ensaios.

Granulometria									
Interessado(a): Cláudia Betine Gusmão- BGS					Data: 28/07/05				
Determinação de Unidade			Peneiramento Grosso (peso em gramas)						
Cápsula	Nº		A) Amostra total úmida:						
Ph + T	g		B) Solo seco retido #10:						
Ps + T	g		C) Solo úmido passado #10 (A - B):						
Água	g		D) Solo seco Peneirado #10 (A - B) / (1 + h):						
Tara	g		E) Amostra total seca (b + d):				1059,10 g		
P. Seco	g		Peneiramento fino e sedimentação (peso em gramas)						
Umidade	%		Peso da amostra úmida:						
h média	%		Peso da amostra seca:				104,20 g		
Densidade dos Grãos									
Picnômetro		Temp. °C			Picnômetro		Temp. °C		
Solo úmido		cps.:			Solo úmido		cps.:		
(A) Solo Seco		g			(A) Solo Seco		g		
(B) Picnômetro + Água		g			(B) Picnômetro + Água		g		
(A) + (B)		g			(A) + (B)		g		
(C) Picnômetro + Água + Solo		g			(C) Picnômetro + Água + Solo		g		
(A) + (B) - (C)		g			(A) + (B) - (C)		g		
Densidade dos Grãos		g/cm ³			Densidade dos Grãos		g/cm ³		
Peneiramento Grosso					Peneiramento Fino				
Peneria Nº	Diâmetro Φ (mm)	Peso da amostra seca		% < Φ	P / D Φ (mm)	Peso da Amostra Seca		% < Φ Parcial	% < Φ
		Retido	Passado			Retido	Passado		
	50								
	38				16 / 1,2	27,30			24,54
	25			100,00	30 / 0,60	49,00			17,61
	19	9,10		99,14	40 / 0,42	59,90			14,13
	9,5	172,50		83,71	50 / 0,30	65,40			12,38
4	4,8	480,20		54,66	100 / 0,15	75,90			9,03
10	2,0	706,70		33,25	200 / 0,075	85,40			6,00
Sedimentação									
Temp. °C	Intervalo de Tempo	Hora	Leitura	Altura de Queda	Correção (ΔL)	L. Corrigida (Lc)	μ	Diâmetro dos Grãos Φ (mm)	Q (% < Φ)
	30 seg.								
	1 min.								
	2 min.								
	4 min.								
	8 min.								
	15 min.								
	30 min.								
	1 hora								
	2 hora								
	4 hora								
	8 hora								
	24 hora								
Densímetro		Cor do menisco		Densidade dos grãos		(a) % Mat. Passado		$Q = \frac{\delta}{\delta - \gamma_a} \times \frac{a}{P_s} \times L_c$	
Nº:				(δ) =		#10 =			
Caracterização táctil visual:									

Tabela- Ensaio de compactação da BGS- 1ª série de ensaios.

Compactação						
Material:	BGS					
Teor de cimento (%):	5,00					
Cilindro Proctor:	Diâmetro (m):	0,10				
	Altura (m):	0,13				
	Volume (m³):	0,001				
	Massa (kg):	2,39				
Energia:	intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)					
Corpos de Prova	Teor de Umidade (%)	Massa Total: Cilindro + CP (kg)	Massa Úmida: CP (kg)	Massa Seca: CP (kg)	Volume CP (m³)	Massa específica aparente seca CP (kg/m³)
CP 4	4,00	4,62	2,23	2,12	0,001	2.119,03
CP 2	5,00	4,64	2,25	2,14	0,001	2.135,27
CP 3	6,00	4,69	2,31	2,19	0,001	2.190,53
CP 1	7,00	4,74	2,35	2,24	0,001	2.234,20
CP 5	8,00	4,73	2,34	2,22	0,001	2.222,52

Tabela- Resultados ensaio de resistência à compressão simples- 1ª série de ensaios.

Ensaio de Resistência à Compressão Simples			
Material:	BGS		
Teor de cimento para todos o:	5,00		
Energia:	intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)		
Tempo de cura:	3 dias		
Massa do cilindro (kg):	2,39		
Diâmetro do cilindro (m):	0,10		
Altura do cilindro (m):	0,13		
Área do cilindro (m²):	0,01		
Volume do cilindro (m³):	0,001		
Corpo de Prova	Teor de umidade (%)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
CP 4	4,00	26.968,29	3,43
CP 2	5,00	27.458,62	3,50
CP 3	6,00	37.265,27	4,74
CP 1	7,00	38.736,27	4,93
CP 5	8,00	36.873,00	4,69

Tabela- Granulometria do material fresado- 2ª série de ensaios.

Granulometria										
Interessado(a): Cláudia Betine Gusmão- Material Fresado						Data: 09/08/06				
Determinação de Unidade			Peneiramento Grosso (peso em gramas)							
Cápsula	Nº		A) Amostra total úmida:							
Ph + T	g		B) Solo seco retido #10:							
Ps + T	g		C) Solo úmido passado #10 (A - B):							
Água	g		D) Solo seco Peneirado #10 (A - B) / (1 + h):							
Tara	g		E) Amostra total seca (b + d):			980,63 g				
P. Seco	g		Peneiramento fino e sedimentação (peso em gramas)							
Umidade	%		Peso da amostra úmida:							
h média	%		Peso da amostra seca:			92,49 g				
Densidade dos Grãos										
Picnômetro		Temp. °C		Picnômetro		Temp. °C				
Solo úmido		cps.:		g Solo úmido		cps.:		g		
(A) Solo Seco				g (A) Solo Seco				g		
(B) Picnômetro + Água				g (B) Picnômetro + Água				g		
(A) + (B)				g (A) + (B)				g		
(C) Picnômetro + Água + Solo				g (C) Picnômetro + Água + Solo				g		
(A) + (B) - (C)				g (A) + (B) - (C)				g		
Densidade dos Grãos				g/cm³ Densidade dos Grãos				g/cm³		
Peneiramento Grosso					Peneiramento Fino					
Peneria	Nº	Diâmetro Φ (mm)	Peso da amostra seca		% < Φ	P / D Φ (mm)	Peso da Amostra Seca		% < Φ Parcial	% < Φ
			Retido	Passado			Retido	Passado		
		50								
		38				16 / 1,2	41,81			5,60
		25				30 / 0,60	68,65			2,63
		19			100,00	40 / 0,42	79,11			1,48
		9,5	383,45		60,89	50 / 0,30	83,17			1,03
	4	4,8	691,39		29,49	100 / 0,15	88,49			0,44
	10	2,0	880,45		10,22	200 / 0,075	90,70			0,20
Sedimentação										
Temp. °C	Intervalo de Tempo	Hora	Leitura	Altura de Queda	Correção (ΔL)	L. Corrigida (Lc)	μ	Diâmetro dos Grãos Φ (mm)	Q (% < Φ)	
	30 seg.									
	1 min.									
	2 min.									
	4 min.									
	8 min.									
	15 min.									
	30 min.									
	1 hora									
	2 hora									
	4 hora									
	8 hora									
	24 hora									
Densímetro		Cor do menisco		Densidade dos grãos		(a) % Mat. Passado		$Q = \frac{\delta}{\delta - \gamma_a} \times \frac{a}{P_s} \times L_c$		
Nº:				(δ) =		#10 =				
Caracterização táctil visual:										

Tabela- Ensaio de compactação. 2ª série de ensaios

Ensaio de Compactação

Dosagem: 60% BGS
40% Material fresado

Teor de cimento para todos os CP's (%): 5,00

Cilindro
Proctor: Diâmetro (m): 0,10
Altura (m): 0,13
Volume (m³): 0,001
Massa (kg): 2,39

Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)

Corpo de Prova	Cilindro	Massa Total: Cilindro + CP (kg)	Massa Úmida: CP (kg)	Massa Seca: CP (kg)	Volume CP (m³)	Massa específica aparente seca CP (kg/m³)
CP 4	1	4,47	2,09	1,96	0,001	1.978,00
CP 1	1	4,58	2,20	2,03	0,001	2.060,00
CP 2	4	4,74	2,35	2,14	0,001	2.107,00
CP 3	6	4,71	2,33	2,09	0,001	2.074,00
CP 5	4	4,65	2,26	2,00	0,001	1.984,00

Determinação do teor de umidade

Corpo de Prova	Recipiente	Massa Recipiente (kg)	Massa Úmida: Recipiente + amostra (kg)	Massa Úmida: Amostra (kg)	Massa Seca: Recipiente + Amostra (kg)	Massa Seca: Amostra (kg)	Teor de Umidade (%)
CP 4	27	0,05	0,45	0,40	0,43	0,38	5,96
CP 1	20	0,06	0,41	0,36	0,39	0,33	7,32
CP 2	18	0,05	0,45	0,40	0,42	0,37	8,95
CP 3	37	0,05	0,51	0,46	0,47	0,42	10,29
CP 5	30	0,05	0,49	0,44	0,45	0,39	11,50

Tabela- Ensaio de resistência à compressão simples- 2ª série de ensaios.

Ensaio de Resistência a Compressão Simples

Dosagem: 60% BGS
40% Material fresado

Teor de cimento para todos os CP's (%): 5,00
Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)
Tempo de cura: 3 dias

Corpo de Prova	Área do cilindro (m ²)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
CP 1	0,01	22.888,72	2,91
CP 2	0,01	24.506,82	3,12

Determinação do teor de umidade

Corpo de Prova	Recipiente	Massa Recipiente (kg)	Massa Úmida: Recipiente + amostra (kg)	Massa Úmida: Amostra (kg)	Massa Seca: Recipiente + Amostra (kg)	Massa Seca: Amostra (kg)	Teor de Umidade (%)
CP 1	24	0,05	0,54	0,49	0,51	0,46	6,72
CP 2	5	0,05	0,59	0,54	0,55	0,50	6,63

Tabela- Granulometria da BGS- 3ª série de ensaios.

Granulometria										
Interessado(a): Cláudia Betine Gusmão- BGS						Data: 04/02/08				
Determinação de Unidade			Peneiramento Grosso (peso em gramas)							
Cápsula	Nº				A) Amostra total úmida:					
Ph + T	g				B) Solo seco retido #10:					
Ps + T	g				C) Solo úmido passado #10 (A - B):					
Água	g				D) Solo seco Peneirado #10 (A - B) / (1 + h):					
Tara	g				E) Amostra total seca (b + d):		1230,60 g			
P. Seco	g		Peneiramento fino e sedimentação (peso em gramas)							
Umidade	%				Peso da amostra úmida:					
h média	%				Peso da amostra seca:					
Densidade dos Grãos										
Picnômetro	Temp. °C		Picnômetro	Temp. °C						
Solo úmido	cps.:		g	Solo úmido	cps.:		g			
(A) Solo Seco			g	(A) Solo Seco			g			
(B) Picnômetro + Água			g	(B) Picnômetro + Água			g			
(A) + (B)			g	(A) + (B)			g			
(C) Picnômetro + Água + Solo			g	(C) Picnômetro + Água + Solo			g			
(A) + (B) - (C)			g	(A) + (B) - (C)			g			
Densidade dos Grãos			g/cm ³	Densidade dos Grãos			g/cm ³			
Peneiramento Grosso					Peneiramento Fino					
Peneria	Nº	Diâmetro Φ (mm)	Peso da amostra seca		% < Φ	Peneria No	Peso da Amostra Seca		% < Φ Parcial	% < Φ
			Retido	Passado			Retido	Passado		
		50								
		38				16	-			-
3/4"		25	0		100,00	30	-			-
1/2"		19	-		-	40	994,00			19,23
3/8"		9,5	256,30		79,17	80	-			-
4		4,8	434,10		64,72	100	-			-
10		2,0	692,60		43,72	200	1200,70			2,43
Sedimentação										
Temp. °C	Intervalo de Tempo	Hora	Leitura	Altura de Queda	Correção (ΔL)	L. Corrigida (Lc)	μ	Diâmetro dos Grãos Φ (mm)	Q (% < Φ)	
	30 seg.									
	1 min.									
	2 min.									
	4 min.									
	8 min.									
	15 min.									
	30 min.									
	1 hora									
	2 hora									
	4 hora									
	8 hora									
	24 hora									
Densímetro	Cor do menisco	Densidade dos grãos		(a) % Mat. Passado		$Q = \frac{\delta}{\delta - \gamma_a} \times \frac{a}{P_s} \times L_c$				
Nº:		(δ) =		#10 =						
Caracterização táctil visual:										

Tabela- Granulometria do material fresado- amostra 1- 3ª série de ensaios.

Granulometria										
Interessado(a): Cláudia Betine Gusmão- Material Fresado						Data: 19/01/08				
Determinação de Unidade			Peneiramento Grosso (peso em gramas)							
Cápsula	Nº			A) Amostra total úmida:						
Ph + T	g			B) Solo seco retido #10:						
Ps + T	g			C) Solo úmido passado #10 (A - B):						
Água	g			D) Solo seco Peneirado #10 (A - B) / (1 + h):						
Tara	g			E) Amostra total seca (b + d):			985,10 g			
P. Seco	g			Peneiramento fino e sedimentação (peso em gramas)						
Umidade	%			Peso da amostra úmida:						
h média	%			Peso da amostra seca:						
Densidade dos Grãos										
Picnômetro	Temp. °C			Picnômetro	Temp. °C					
Solo úmido	cps.:			Solo úmido	cps.:					
(A) Solo Seco				(A) Solo Seco						
(B) Picnômetro + Água				(B) Picnômetro + Água						
(A) + (B)				(A) + (B)						
(C) Picnômetro + Água + Solo				(C) Picnômetro + Água + Solo						
(A) + (B) - (C)				(A) + (B) - (C)						
Densidade dos Grãos				g/cm ³	Densidade dos Grãos				g/cm ³	
Peneiramento Grosso					Peneiramento Fino					
Peneria	Nº	Diâmetro Φ (mm)	Peso da amostra seca		% < Φ	Peneria No	Peso da Amostra Seca		% < Φ Parcial	% < Φ
			Retido	Passado			Retido	Passado		
		50								
		38				16	-			-
3/4"		25	0		100,00	30	-			-
1/2"		19	35,10		96,44	40	721,70			26,74
3/8"		9,5	77,30		92,15	80	839,90			14,74
4		4,8	209,70		78,71	100	-			-
10		2,0	393,10		60,10	200	941,80			4,40
Sedimentação										
Temp. °C	Intervalo de Tempo	Hora	Leitura	Altura de Queda	Correção (ΔL)	L. Corrigida (Lc)	μ	Diâmetro dos Grãos Φ (mm)	Q (% < Φ)	
	30 seg.									
	1 min.									
	2 min.									
	4 min.									
	8 min.									
	15 min.									
	30 min.									
	1 hora									
	2 hora									
	4 hora									
	8 hora									
	24 hora									
Densímetro	Cor do menisco		Densidade dos grãos			(a) % Mat. Passado		$Q = \frac{\delta}{\delta - \gamma_a} \times \frac{a}{P_s} \times L_c$		
Nº:			(δ) =			#10 =				
Caracterização táctil visual:										

Tabela- Granulometria do material fresado- amostra 2- 3ª série de ensaios.

Granulometria										
Interessado(a): Cláudia Betine Gusmão- Material Fresado						Data: 19/01/08				
Determinação de Unidade			Peneiramento Grosso (peso em gramas)							
Cápsula	Nº				A) Amostra total úmida:					
Ph + T	g				B) Solo seco retido #10:					
Ps + T	g				C) Solo úmido passado #10 (A - B):					
Água	g				D) Solo seco Peneirado #10 (A - B) / (1 + h):					
Tara	g				E) Amostra total seca (b + d):		947,70 g			
P. Seco	g		Peneiramento fino e sedimentação (peso em gramas)							
Umidade	%				Peso da amostra úmida:					
h média	%				Peso da amostra seca:					
Densidade dos Grãos										
Picnômetro	Temp. °C		Picnômetro	Temp. °C						
Solo úmido	cps.:		g	Solo úmido	cps.:				g	
(A) Solo Seco			g	(A) Solo Seco					g	
(B) Picnômetro + Água			g	(B) Picnômetro + Água					g	
(A) + (B)			g	(A) + (B)					g	
(C) Picnômetro + Água + Solo			g	(C) Picnômetro + Água + Solo					g	
(A) + (B) - (C)			g	(A) + (B) - (C)					g	
Densidade dos Grãos			g/cm ³	Densidade dos Grãos					g/cm ³	
Peneiramento Grosso					Peneiramento Fino					
Peneria	Nº	Diâmetro Φ (mm)	Peso da amostra seca		% < Φ	Peneria No	Peso da Amostra Seca		% < Φ Parcial	% < Φ
			Retido	Passado			Retido	Passado		
		50								
		38				16	-			-
3/4"		25	0		100,00	30	-			-
1/2"		19	14,30		98,49	40	727,50			23,24
3/8"		9,5	43,40		95,42	80	821,70			13,30
4		4,8	184,00		80,58	100	-			-
10		2,0	365,70		61,41	200	868,40			8,37
Sedimentação										
Temp. °C	Intervalo de Tempo	Hora	Leitura	Altura de Queda	Correção (ΔL)	L. Corrigida (Lc)	μ	Diâmetro dos Grãos Φ (mm)	Q (% < Φ)	
	30 seg.									
	1 min.									
	2 min.									
	4 min.									
	8 min.									
	15 min.									
	30 min.									
	1 hora									
	2 hora									
	4 hora									
	8 hora									
	24 hora									
Densímetro		Cor do menisco		Densidade dos grãos		(a) % Mat. Passado		$Q = \frac{\delta}{\delta - \gamma_a} \times \frac{a}{P_s} \times L_c$		
Nº:				(δ) =		#10 =				
Caracterização táctil visual:										

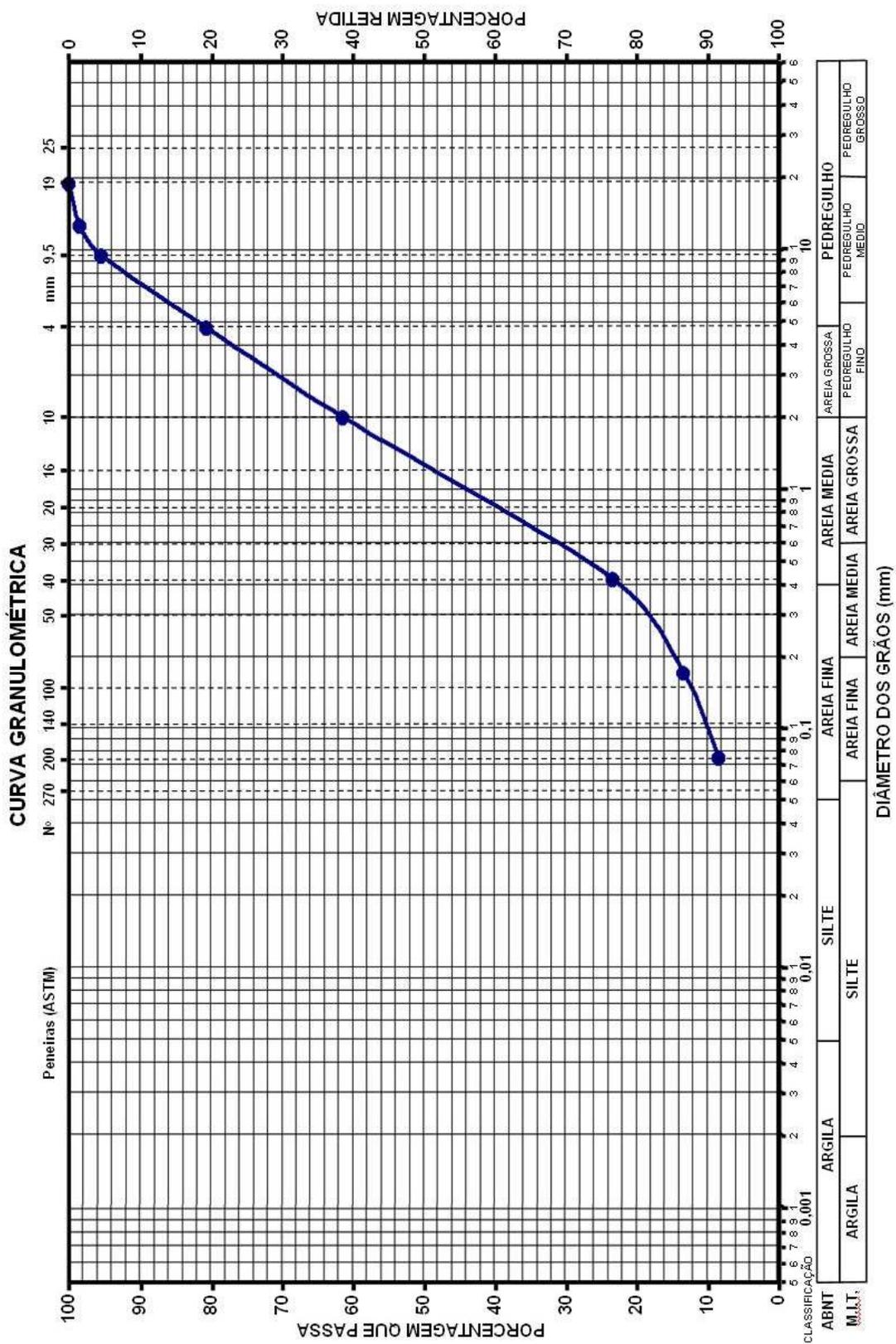


Figura- Curva granulométrica do material fresado- amostra 2- 3ª série de ensaios.

Tabela- Granulometria da mistura 60% BGS e 40% Material Fresado
3ª série de ensaios.

Granulometria										
Interessado(a): Cláudia Betine Gusmão- 60% BGS e 40% Fresado					Data: 04/02/08					
Determinação de Unidade			Peneiramento Grosso (peso em gramas)							
Cápsula	Nº		A) Amostra total úmida:							
Ph + T	g		B) Solo seco retido #10:							
Ps + T	g		C) Solo úmido passado #10 (A - B):							
Água	g		D) Solo seco Peneirado #10 (A - B) / (1 + h):							
Tara	g		E) Amostra total seca (b + d):			1117,44 g				
P. Seco	g		Peneiramento fino e sedimentação (peso em gramas)							
Umidade	%		Peso da amostra úmida:							
h média	%		Peso da amostra seca:							
Densidade dos Grãos										
Picnômetro		Temp. °C			Picnômetro		Temp. °C			
Solo úmido		cps.:			Solo úmido		cps.:			
(A) Solo Seco		g			(A) Solo Seco		g			
(B) Picnômetro + Água		g			(B) Picnômetro + Água		g			
(A) + (B)		g			(A) + (B)		g			
(C) Picnômetro + Água + Solo		g			(C) Picnômetro + Água + Solo		g			
(A) + (B) - (C)		g			(A) + (B) - (C)		g			
Densidade dos Grãos		g/cm ³			Densidade dos Grãos		g/cm ³			
Peneiramento Grosso					Peneiramento Fino					
Peneria	Nº	Diâmetro Φ (mm)	Peso da amostra seca		% < Φ	Peneria No	Peso da Amostra Seca		% < Φ Parcial	% < Φ
			Retido	Passado			Retido	Passado		
		50								
		38				16	-			-
3/4"		25	0,00		100,00	30	-			-
1/2"		19	-		-	40	887,40			20,83
3/8"		9,5	171,14		85,67	80	-			-
4		4,8	334,06		71,07	100	-			-
10		2,0	561,84		50,80	200	1067,78			4,81
Sedimentação										
Temp. °C	Intervalo de Tempo	Hora	Leitura	Altura de Queda	Correção (ΔL)	L. Corrigida (Lc)	μ	Diâmetro dos Grãos Φ (mm)	Q (% < Φ)	
	30 seg.									
	1 min.									
	2 min.									
	4 min.									
	8 min.									
	15 min.									
	30 min.									
	1 hora									
	2 hora									
	4 hora									
	8 hora									
	24 hora									
Densímetro		Cor do menisco		Densidade dos grãos		(a) % Mat. Passado		$Q = \frac{\delta}{\delta - \gamma_a} \times \frac{a}{P_s} \times L_c$		
Nº:				(δ) =		#10 =				
Caracterização táctil visual:										

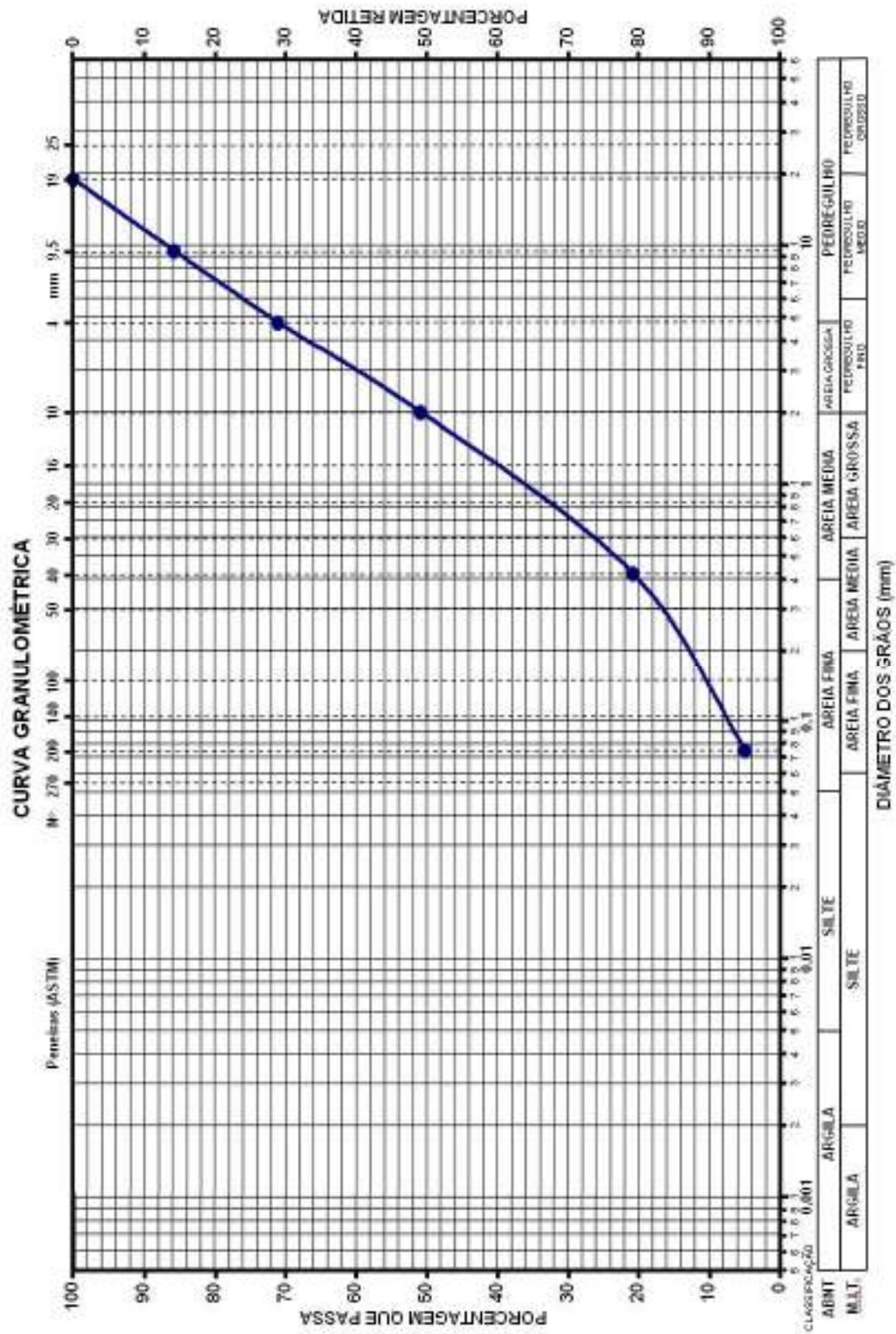


Figura- Curva granulométrica da mistura 60% BGS e 40% Material Fresado.
3ª série de ensaios.

Tabela- Granulometria da mistura 50% BGS e 50% Material Fresado
3ª série de ensaios.

Granulometria									
Interessado(a): Cláudia Betine Gusmão- 50% BGS e 50% Fresado					Data: 04/02/08				
Determinação de Unidade			Peneiramento Grosso (peso em gramas)						
Cápsula	Nº		A) Amostra total úmida:						
Ph + T	g		B) Solo seco retido #10:						
Ps + T	g		C) Solo úmido passado #10 (A - B):						
Água	g		D) Solo seco Peneirado #10 (A - B) / (1 + h):						
Tara	g		E) Amostra total seca (b + d):			1089,15			
P. Seco	g		Peneiramento fino e sedimentação (peso em gramas)						
Umidade	%		Peso da amostra úmida:						
h média	%		Peso da amostra seca:						
Densidade dos Grãos									
Picnômetro		Temp. °C			Picnômetro		Temp. °C		
Solo úmido		cps.:			Solo úmido		cps.:		
(A) Solo Seco		g			(A) Solo Seco		g		
(B) Picnômetro + Água		g			(B) Picnômetro + Água		g		
(A) + (B)		g			(A) + (B)		g		
(C) Picnômetro + Água + Solo		g			(C) Picnômetro + Água + Solo		g		
(A) + (B) - (C)		g			(A) + (B) - (C)		g		
Densidade dos Grãos		g/cm ³			Densidade dos Grãos		g/cm ³		
Peneiramento Grosso					Peneiramento Fino				
Peneria Nº	Diâmetro Φ (mm)	Peso da amostra seca		% < Φ	Peneria No	Peso da Amostra Seca		% < Φ Parcial	% < Φ
		Retido	Passado			Retido	Passado		
	50								
	38				16	-			-
3/4"	25	0,00		100,00	30	-			-
1/2"	19	-		-	40	860,75			21,23
3/8"	9,5	149,85		87,30	80	-			-
4	4,8	309,05		72,65	100	-			-
10	2,0	529,15		52,57	200	1034,55			5,40
Sedimentação									
Temp. °C	Intervalo de Tempo	Hora	Leitura	Altura de Queda	Correção (ΔL)	L. Corrigida (Lc)	μ	Diâmetro dos Grãos Φ (mm)	Q (% < Φ)
	30 seg.								
	1 min.								
	2 min.								
	4 min.								
	8 min.								
	15 min.								
	30 min.								
	1 hora								
	2 hora								
	4 hora								
	8 hora								
	24 hora								
Densímetro		Cor do menisco		Densidade dos grãos		(a) % Mat. Passado		$Q = \frac{\delta}{\delta - \gamma_a} \times \frac{a}{P_s} \times L_c$	
Nº:				(δ) =		#10 =			
Caracterização táctil visual:									

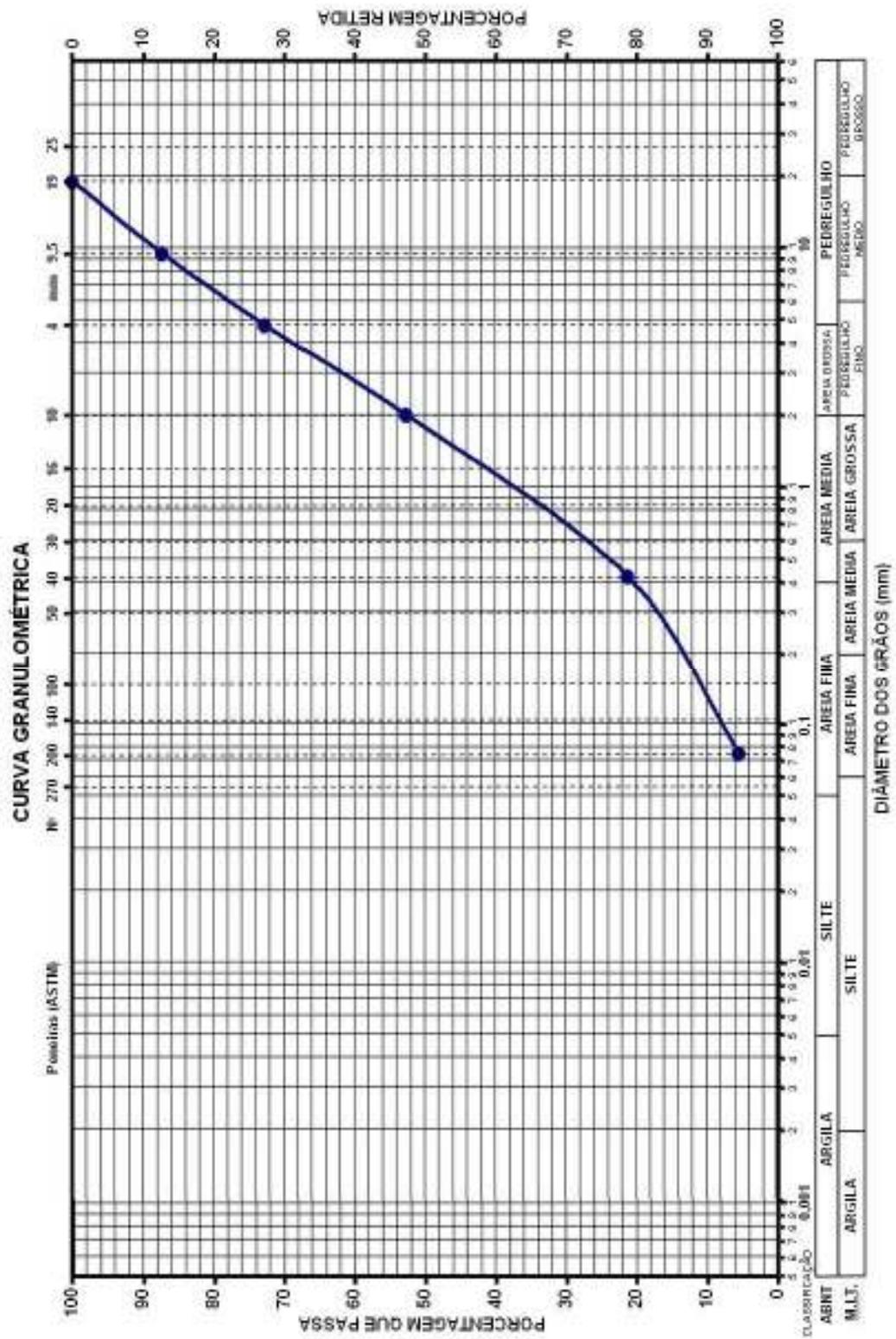


Figura- Curva granulométrica da mistura 50% BGS e 50% Material Fresado.
3ª série de ensaios.

Tabela- Granulometria da mistura 40% BGS e 60% Material Fresado
3ª série de ensaios.

Granulometria									
Interessado(a): Cláudia Betine Gusmão- 40% BGS e 60% Fresado					Data: 04/02/08				
Determinação de Unidade			Peneiramento Grosso (peso em gramas)						
Cápsula	Nº		A) Amostra total úmida:						
Ph + T	g		B) Solo seco retido #10:						
Ps + T	g		C) Solo úmido passado #10 (A - B):						
Água	g		D) Solo seco Peneirado #10 (A - B) / (1 + h):						
Tara	g		E) Amostra total seca (b + d):			1060,86 g			
P. Seco	g		Peneiramento fino e sedimentação (peso em gramas)						
Umidade	%		Peso da amostra úmida:						
h média	%		Peso da amostra seca:						
Densidade dos Grãos									
Picnômetro		Temp. °C		Picnômetro		Temp. °C			
Solo úmido		cps.:		Solo úmido		cps.:		g	
(A) Solo Seco				(A) Solo Seco				g	
(B) Picnômetro + Água				(B) Picnômetro + Água				g	
(A) + (B)				(A) + (B)				g	
(C) Picnômetro + Água + Solo				(C) Picnômetro + Água + Solo				g	
(A) + (B) - (C)				(A) + (B) - (C)				g	
Densidade dos Grãos		g/cm ³		Densidade dos Grãos		g/cm ³			
Peneiramento Grosso					Peneiramento Fino				
Peneria Nº	Diâmetro Φ (mm)	Peso da amostra seca		% < Φ	Peneria No	Peso da Amostra Seca		% < Φ Parcial	% < Φ
		Retido	Passado			Retido	Passado		
	50								
	38				16	-			-
3/4"	25	0,00		100,00	30	-			-
1/2"	19	-		-	40	834,10			21,63
3/8"	9,5	128,56		88,92	80	-			-
4	4,8	284,04		74,24	100	-			-
10	2,0	496,46		54,34	200	1001,32			5,99
Sedimentação									
Temp. °C	Intervalo de Tempo	Hora	Leitura	Altura de Queda	Correção (ΔL)	L. Corrigida (Lc)	μ	Diâmetro dos Grãos Φ (mm)	Q (% < Φ)
	30 seg.								
	1 min.								
	2 min.								
	4 min.								
	8 min.								
	15 min.								
	30 min.								
	1 hora								
	2 hora								
	4 hora								
	8 hora								
	24 hora								
Densímetro		Cor do menisco		Densidade dos grãos		(a) % Mat. Passado		$Q = \frac{\delta}{\delta - \gamma_a} \times \frac{a}{P_s} \times L_c$	
Nº:				(δ) =		#10 =			
Caracterização táctil visual:									

Tabela- Ensaio de compactação- mistura de dosagem 60% BGS e 40% material fresado, com 3% de cimento- 3ª série de ensaios.

Ensaio de Compactação

Dosagem: 60% BGS

40% Material fresado

Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00

Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)

Corpo de Prova	Cilindro	Massa Cilindro (kg)	Massa Total: Cilindro + CP (kg)	Volume Cilindro (m³)	Massa específica aparente úmida CP (kg/m³)	Massa específica aparente seca CP (kg/m³)
CP 1	4	2,42	4,42	0,001	2.011,03	1.934,75
CP 2	4	2,42	4,54	0,001	2.128,39	1.996,26
CP 3	4	2,42	4,60	0,001	2.192,58	2.007,76
CP 4	4	2,42	4,63	0,001	2.219,66	1.989,47

Determinação do teor de umidade

Corpo de Prova	Recipiente	Massa Recipiente (kg)	Massa Úmida: Recipiente + amostra (kg)	Massa Úmida: Amostra (kg)	Massa Seca: Recipiente + Amostra (kg)	Massa Seca: Amostra (kg)	Teor de Umidade (%)
CP 1	13	0,05	0,50	0,46	0,49	0,44	3,94
CP 2	49	0,06	0,53	0,47	0,50	0,44	6,62
CP 3	20	0,05	0,54	0,49	0,50	0,45	9,21
CP 4	250	0,06	0,47	0,42	0,43	0,37	11,57

Tabela- Ensaio de compactação- mistura de dosagem 50% BGS e 50% material fresado, com 3% de cimento- 3ª série de ensaios.

Ensaio de Compactação

Dosagem: 50% BGS

50% Material fresado

Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00

Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)

Corpo de Prova	Cilindro	Massa Cilindro (kg)	Massa Total: Cilindro + CP (kg)	Volume Cilindro (m³)	Massa específica aparente úmida CP (kg/m³)	Massa específica aparente seca CP (kg/m³)
CP 4	4	2,42	4,46	0,001	2.052,16	1.958,70
CP 1	4	2,42	4,52	0,001	2.104,31	1.983,00
CP 2	4	2,42	4,55	0,001	2.136,41	1.990,04
CP 3	4	2,42	4,53	0,001	2.122,37	1.953,89

Determinação do teor de umidade

Corpo de Prova	Recipiente	Massa Recipiente (kg)	Massa Úmida: Recipiente + amostra (kg)	Massa Úmida: Amostra (kg)	Massa Seca: Recipiente + Amostra (kg)	Massa Seca: Amostra (kg)	Teor de Umidade (%)
CP 4	14	0,05	0,36	0,30	0,34	0,29	4,77
CP 1	9	0,05	0,50	0,44	0,47	0,42	6,12
CP 2	18	0,05	0,45	0,39	0,42	0,37	7,36
CP 3	68	0,05	0,48	0,43	0,45	0,40	8,62

Tabela- Ensaio de compactação- mistura de dosagem 40% BGS e 60% material fresado, com 3% de cimento- 3ª série de ensaios.

Ensaio de Compactação

Dosagem: 40% BGS
60% Material fresado

Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00

Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)

Corpo de Prova	Cilindro	Massa Cilindro (kg)	Massa Total: Cilindro + CP (kg)	Volume Cilindro (m³)	Massa específica aparente úmida CP (kg/m³)	Massa específica aparente seca CP (kg/m³)
CP 4	4	2,42	4,43	0,001	2.015,05	1.948,05
CP 1	4	2,42	4,47	0,001	2.055,17	1.964,11
CP 2	4	2,42	4,49	0,001	2.080,24	1.946,03
CP 3	4	2,42	4,55	0,001	2.141,42	1.933,28

Determinação do teor de umidade

Corpo de Prova	Recipiente	Massa Recipiente (kg)	Massa Úmida: Recipiente + amostra (kg)	Massa Úmida: Amostra (kg)	Massa Seca: Recipiente + Amostra (kg)	Massa Seca: Amostra (kg)	Teor de Umidade (%)
CP 4	5	0,05	0,47	0,42	0,45	0,40	3,44
CP 1	360	0,07	0,48	0,41	0,46	0,39	4,64
CP 2	250	0,06	0,51	0,46	0,48	0,43	6,90
CP 3	37	0,05	0,44	0,39	0,40	0,35	10,77

Tabela- Ensaio de resistência à compressão simples- corpos de prova ensaio de compactação- 3ª série de ensaios.

Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00

Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)

Tempo de cura: 3 dias

Dosagem: 60% BGS
40% Material fresado

Teor de umidade ótimo (%): 8,50

Corpo de Prova	Diâmetro do corpo de prova (m)	Altura do corpo de prova (m)	Área do corpo de prova (m ²)	Teor de Umidade (%)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
CP 1	0,10	0,0131	0,01	3,94	7.466,49	0,95
CP 2	0,10	0,0130	0,01	6,62	8.281,62	1,05
CP 3	0,10	0,0134	0,01	9,21	10.002,68	1,27
CP 4	0,10	0,0132	0,01	11,57	6.259,29	0,80

Dosagem: 50% BGS
50% Material fresado

Teor de umidade ótimo (%): 7,40

Corpo de Prova	Diâmetro do corpo de prova (m)	Altura do corpo de prova (m)	Área do corpo de prova (m ²)	Teor de Umidade (%)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
CP 4	0,10	0,0127	0,01	4,77	8.565,52	1,09
CP 1	0,10	0,0130	0,01	6,12	8.947,69	1,14
CP 2	0,10	0,0126	0,01	7,36	9.441,35	1,20
CP 3	0,10	0,0128	0,01	8,62	5.681,09	0,72

Dosagem: 40% BGS
60% Material fresado

Teor de umidade ótimo (%): 6,80

Corpo de Prova	Diâmetro do corpo de prova (m)	Altura do corpo de prova (m)	Área do corpo de prova (m ²)	Teor de Umidade (%)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
CP 4	0,10	0,0131	0,01	3,44	7.304,19	0,93
CP 1	0,10	0,0130	0,01	4,64	7.922,99	1,01
CP 2	0,10	0,0134	0,01	6,90	6.238,99	0,79
CP 3	0,10	0,0132	0,01	10,77	5.569,49	0,71

Tabela- Resultados ensaio de resistência à compressão simples para dosagem 60% BGS e 40% material fresado- 3ª série de ensaios.

Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Dosagem: 60% BGS
40% Material fresado

Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00
Teor de umidade ótima (%): 8,50

Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)

Tempo de Cura	Corpo de Prova	Diâmetro do corpo de prova (m)	Altura do corpo de prova (m)	Área do corpo de prova (m ²)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
1 dia	CP 27	0,10	0,1325	0,01	7.111,49	0,91
	CP 28	0,10	0,1325	0,01	7.760,69	0,99
3 dias	CP 23	0,10	0,1280	0,01	8.805,59	1,12
	CP 24	0,10	0,1270	0,01	8.646,72	1,10
28 dias	CP 33	0,10	0,1310	0,01	16.261,39	2,07
	CP 34	0,10	0,1310	0,01	16.870,67	2,15

Determinação da massa específica aparente seca

Corpo de Prova	Cilindro	Massa Cilindro (kg)	Massa Total: Cilindro + CP (kg)	Volume Cilindro (m ³)	Massa específica aparente úmida CP (kg/m ³)	Massa específica aparente seca CP (kg/m ³)
CP 27	4	2,42	4,61	0,001	2.195,69	2.033,72
CP 28	4	2,42	4,62	0,001	2.213,14	2.049,89
CP 23	4	2,42	4,63	0,001	2.221,87	2.066,02
CP 24	4	2,42	4,61	0,001	2.200,30	2.045,97
CP 33	4	2,42	4,52	0,001	2.104,51	1.966,12
CP 34	4	2,42	4,56	0,001	2.147,04	2.005,85

Determinação do teor de umidade

Corpo de Prova	Recipiente	Massa Recipiente (kg)	Massa Úmida: Recipiente + amostra (kg)	Massa Úmida: Amostra (kg)	Massa Seca: Recipiente + Amostra (kg)	Massa Seca: Amostra (kg)	Teor de Umidade (%)
CP 27	20	0,05	0,30	0,24	0,28	0,22	7,96
CP 28	20	0,05	0,30	0,24	0,28	0,22	7,96
CP 23	350	0,05	0,31	0,27	0,30	0,25	7,54
CP 24	350	0,05	0,31	0,27	0,30	0,25	7,54
CP 33	20	0,05	0,28	0,23	0,26	0,21	7,04
CP 34	20	0,05	0,28	0,23	0,26	0,21	7,04

Tabela- Resultados ensaio de resistência à compressão simples para dosagem 50% BGS e 50% material fresado- 3ª série de ensaios.

Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Dosagem: 50% BGS
50% Material fresado

Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00
Teor de umidade ótima (%): 7,40

Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)

Tempo de Cura	Corpo de Prova	Diâmetro do corpo de prova (m)	Altura do corpo de prova (m)	Área do corpo de prova (m ²)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
1 dia	CP 19	0,10	0,1300	0,01	4.504,29	0,57
	CP 20	0,10	0,1310	0,01	6.208,59	0,79
3 dias	CP 11	0,10	0,1300	0,01	7.831,69	1,00
	CP 12	0,10	0,1310	0,01	7.909,46	1,01
28 dias	CP 15	0,10	0,1310	0,01	16.455,56	2,12
	CP 16	0,10	0,1350	0,01	16.210,39	2,07

Determinação da massa específica aparente seca

Corpo de Prova	Cilindro	Massa Cilindro (kg)	Massa Total: Cilindro + CP (kg)	Volume Cilindro (m ³)	Massa específica aparente úmida CP (kg/m ³)	Massa específica aparente seca CP (kg/m ³)
CP 19	4	2,42	4,58	0,001	2.173,22	2.023,61
CP 20	4	2,42	4,57	0,001	2.164,29	2.015,30
CP 11	1	2,36	4,48	0,001	2.107,56	1.965,94
CP 12	1	2,36	4,53	0,001	2.152,24	2.004,99
CP 15	1	2,36	4,49	0,001	2.120,10	1.967,93
CP 16	1	2,36	4,50	0,001	2.122,39	1.971,14

Determinação do teor de umidade

Corpo de Prova	Recipiente	Massa Recipiente (kg)	Massa Úmida: Recipiente + amostra (kg)	Massa Úmida: Amostra (kg)	Massa Seca: Recipiente + Amostra (kg)	Massa Seca: Amostra (kg)	Teor de Umidade (%)
CP 19	14	0,05	0,32	0,27	0,30	0,25	7,39
CP 20	14	0,05	0,32	0,27	0,30	0,25	7,39
CP 11	55	0,05	0,38	0,32	0,36	0,30	7,20
CP 12	13	0,05	0,42	0,37	0,39	0,35	7,34
CP 15	350	0,05	0,35	0,30	0,33	0,28	7,73
CP 16	50	0,05	0,37	0,32	0,35	0,30	7,67

Tabela- Resultados ensaio de resistência à compressão simples para dosagem 40% BGS e 60% material fresado- 3ª série de ensaios.

Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Dosagem: 40% BGS
60% Material fresado

Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00
Teor de umidade ótima (%): 6,80

Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)

Tempo de Cura (dias)	Corpo de Prova	Diâmetro do corpo de prova (m)	Altura do corpo de prova (m)	Área do corpo de prova (m ²)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
1,00	CP 1	0,10	0,1320	0,01	3.712,99	0,47
	CP 2	0,10	0,1310	0,01	4.057,89	0,52
3,00	CP 3	0,10	0,1310	0,01	7.472,67	0,95
	CP 4	0,10	0,1310	0,01	8.227,78	1,05
28,00	CP 7	0,10	0,1310	0,01	16.190,98	2,08
	CP 8	0,10	0,1310	0,01	16.341,21	2,10

Determinação da massa específica aparente seca

Corpo de Prova	Cilindro	Massa Cilindro (kg)	Massa Total: Cilindro + CP (kg)	Volume Cilindro (m ³)	Massa específica aparente úmida CP (kg/m ³)	Massa específica aparente seca CP (kg/m ³)
CP 1	4	2,42	4,44	0,001	2.027,48	1.896,02
CP 2	4	2,42	4,48	0,001	2.065,30	1.935,47
CP 3	4	2,42	4,47	0,001	2.059,48	1.945,45
CP 4	4	2,42	4,45	0,001	2.038,31	1.919,44
CP 7	1	2,36	4,48	0,001	2.104,08	1.966,72
CP 8	1	2,36	4,48	0,001	2.105,87	1.970,18

Determinação do teor de umidade

Corpo de Prova	Recipiente	Massa Recipiente (kg)	Massa Úmida: Recipiente + amostra (kg)	Massa Úmida: Amostra (kg)	Massa Seca: Recipiente + Amostra (kg)	Massa Seca: Amostra (kg)	Teor de Umidade (%)
CP 1	13	0,05	0,42	0,37	0,40	0,35	6,93
CP 2	55	0,05	0,40	0,35	0,38	0,33	6,71
CP 3	38	0,05	0,48	0,42	0,45	0,40	5,86
CP 4	5	0,05	0,46	0,41	0,43	0,38	6,19
CP 7	38	0,05	0,40	0,34	0,38	0,32	6,98
CP 8	5	0,05	0,43	0,38	0,40	0,35	6,89

Tabela- Resultados ensaio de resistência à tração por compressão diametral para dosagem 60% BGS e 40% material fresado- 3ª série de ensaios.

Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Dosagem: 60% BGS
40% Material fresado

Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00
Teor de umidade ótima (%): 8,50

Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)

Tempo de Cura	Corpo de Prova	Diâmetro do corpo de prova (m)	Altura do corpo de prova (m)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
1 dia	CP 29	0,10	0,1280	1.542,00	0,08
	CP 30	0,10	0,1285	1.339,10	0,07
3 dias	CP 25	0,10	0,1290	2.806,76	0,14
	CP 26	0,10	0,1270	2.772,93	0,14
28 dias	CP 35	0,10	0,1280	8.474,22	0,42
	CP 36	0,10	0,1300	8.403,22	0,41

Determinação da massa específica aparente seca

Corpo de Prova	Cilindro	Massa Cilindro (kg)	Massa Total: Cilindro + CP (kg)	Volume Cilindro (m³)	Massa específica aparente úmida CP (kg/m³)	Massa específica aparente seca CP (kg/m³)
CP 29	4	2,42	4,63	0,001	2.215,35	2.055,21
CP 30	4	2,42	4,61	0,001	2.194,78	2.036,14
CP 25	4	2,42	4,60	0,001	2.186,46	2.015,64
CP 26	4	2,42	4,63	0,001	2.220,36	2.046,90
CP 35	4	2,42	4,56	0,001	2.133,93	1.971,65
CP 36	4	2,42	4,58	0,001	2.148,96	1.985,53

Determinação do teor de umidade

Corpo de Prova	Recipiente	Massa Recipiente (kg)	Massa Úmida: Recipiente + amostra (kg)	Massa Úmida: Amostra (kg)	Massa Seca: Recipiente + Amostra (kg)	Massa Seca: Amostra (kg)	Teor de Umidade (%)
CP 29	350	0,05	0,39	0,35	0,37	0,32	7,79
CP 30	350	0,05	0,39	0,35	0,37	0,32	7,79
CP 25	20	0,05	0,33	0,28	0,31	0,25	8,47
CP 26	20	0,05	0,33	0,28	0,31	0,25	8,47
CP 35	350	0,05	0,46	0,41	0,42	0,38	8,23
CP 36	350	0,05	0,46	0,41	0,42	0,38	8,23

Tabela- Resultados ensaio de resistência à tração por compressão diametral para dosagem 50% BGS e 50% material fresado- 3ª série de ensaios.

Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Dosagem: 50% BGS
50% Material fresado

Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00
Teor de umidade ótima (%): 7,40

Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)

Tempo de Cura	Corpo de Prova	Diâmetro do corpo de prova (m)	Altura do corpo de prova (m)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
1 dia	CP 21	0,10	0,1300	1.146,40	0,06
	CP 22	0,10	0,1300	1.439,62	0,07
3 dias	CP 13	0,10	0,1300	2.647,80	0,13
	CP 14	0,10	0,1310	2.530,12	0,12
28 dias	CP 31	0,10	0,1280	7.787,75	0,39
	CP 32	0,10	0,1270	7.777,65	0,39

Determinação da massa específica aparente seca

Corpo de Prova	Cilindro	Massa Cilindro (kg)	Massa Total: Cilindro + CP (kg)	Volume Cilindro (m³)	Massa específica aparente úmida CP (kg/m³)	Massa específica aparente seca CP (kg/m³)
CP 21	4	2,42	4,56	0,001	2.153,16	2.015,36
CP 22	4	2,42	4,63	0,001	2.219,96	2.077,89
CP 13	1	2,36	4,51	0,001	2.154,36	2.012,31
CP 14	1	2,36	4,49	0,001	2.133,40	1.979,70
CP 31	4	2,42	4,51	0,001	2.084,08	1.934,09
CP 32	4	2,42	4,51	0,001	2.086,57	1.932,34

Determinação do teor de umidade

Corpo de Prova	Recipiente	Massa Recipiente (kg)	Massa Úmida: Recipiente + amostra (kg)	Massa Úmida: Amostra (kg)	Massa Seca: Recipiente + Amostra (kg)	Massa Seca: Amostra (kg)	Teor de Umidade (%)
CP 21	350	0,05	0,36	0,32	0,34	0,30	6,84
CP 22	350	0,05	0,36	0,32	0,34	0,30	6,84
CP 13	58	0,05	0,47	0,42	0,44	0,39	7,06
CP 14	4	0,05	0,36	0,31	0,34	0,29	7,76
CP 31	55	0,05	0,25	0,20	0,24	0,18	7,75
CP 32	58	0,05	0,31	0,26	0,29	0,24	7,98

Tabela- Resultados ensaio de resistência à tração por compressão diametral para dosagem 40% BGS e 60% material fresado- 3ª série de ensaios.

Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Dosagem: 40% BGS
60% Material fresado

Teor de cimento para todos os CP's (%): 3,00
Teor de umidade ótima (%): 6,80

Energia: Intermediária (3 camadas de 21 golpes cada)

Tempo de Cura	Corpo de Prova	Diâmetro do corpo de prova (m)	Altura do corpo de prova (m)	Carga Ruptura (N)	Tensão Ruptura (MPa)
1 dia	CP 17	0,10	0,1310	984,00	0,05
	CP 18	0,10	0,1290	903,09	0,04
3 dias	CP 5	0,10	0,1300	2.392,82	0,12
	CP 6	0,10	0,1310	2.412,44	0,12
28 dias	CP 9	0,10	0,1285	7.334,59	0,37
	CP 10	0,10	0,1280	7.700,18	0,39

Determinação da massa específica aparente seca

Corpo de Prova	Cilindro	Massa Cilindro (kg)	Massa Total: Cilindro + CP (kg)	Volume Cilindro (m³)	Massa específica aparente úmida CP (kg/m³)	Massa específica aparente seca CP (kg/m³)
CP 17	4	2,42	4,55	0,001	2.135,51	1.997,58
CP 18	4	2,42	4,53	0,001	2.124,27	1.987,07
CP 5	1	2,36	4,44	0,001	2.069,75	1.937,73
CP 6	1	2,36	4,43	0,001	2.057,21	1.930,75
CP 9	1	2,36	4,45	0,001	2.074,73	1.937,21
CP 10	1	2,36	4,47	0,001	2.093,53	1.943,46

Determinação do teor de umidade

Corpo de Prova	Recipiente	Massa Recipiente (kg)	Massa Úmida: Recipiente + amostra (kg)	Massa Úmida: Amostra (kg)	Massa Seca: Recipiente + Amostra (kg)	Massa Seca: Amostra (kg)	Teor de Umidade (%)
CP 17	20	0,05	0,44	0,39	0,42	0,36	6,90
CP 18	20	0,05	0,44	0,39	0,42	0,36	6,90
CP 5	350	0,05	0,47	0,42	0,44	0,39	6,81
CP 6	34	0,05	0,43	0,38	0,40	0,35	6,55
CP 9	55	0,05	0,32	0,26	0,30	0,25	7,10
CP 10	13	0,05	0,48	0,43	0,45	0,40	7,72

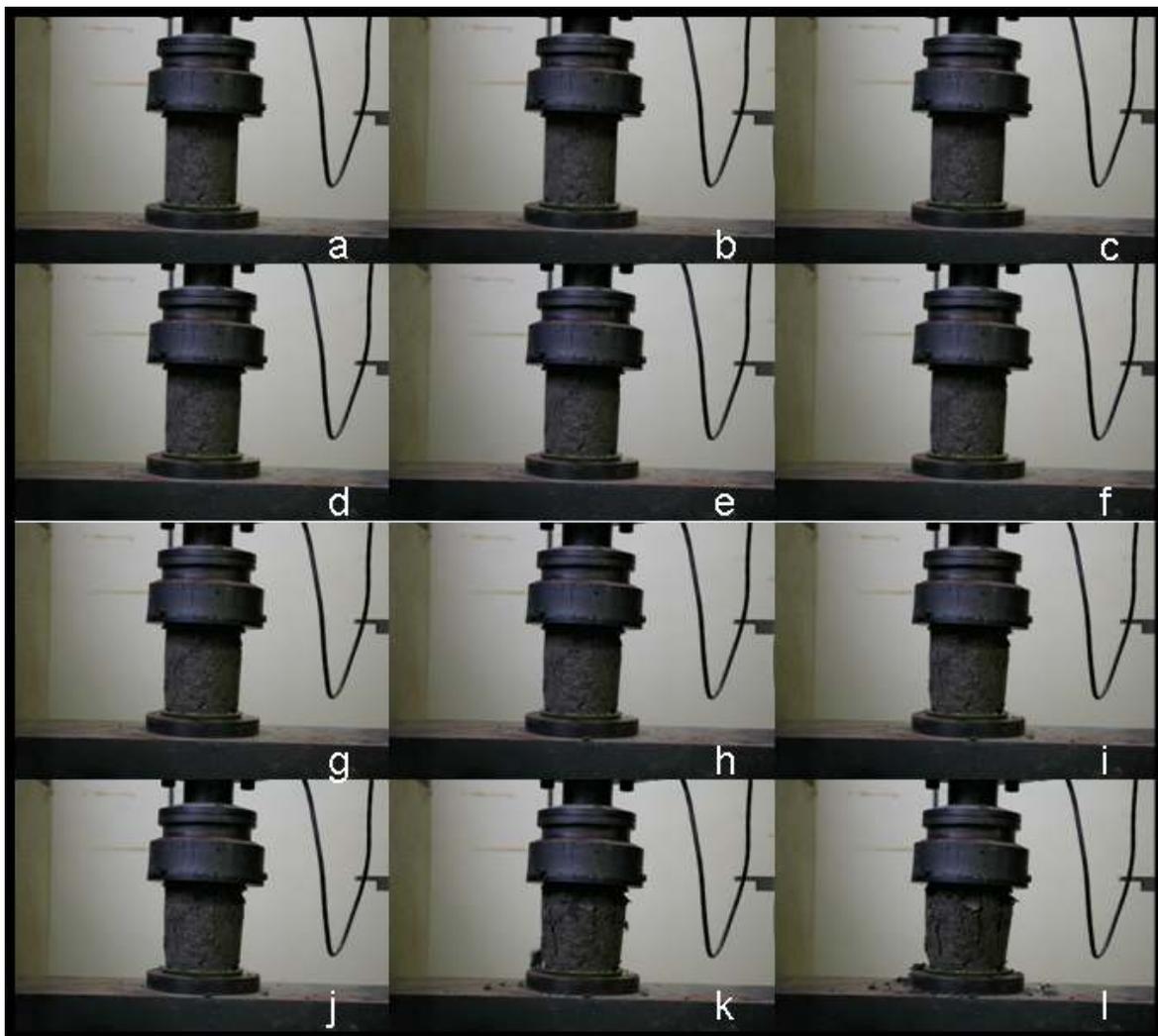


Figura- Seqüência de ruptura de corpo de prova no ensaio de resistência à compressão simples- 3ª série de ensaios.

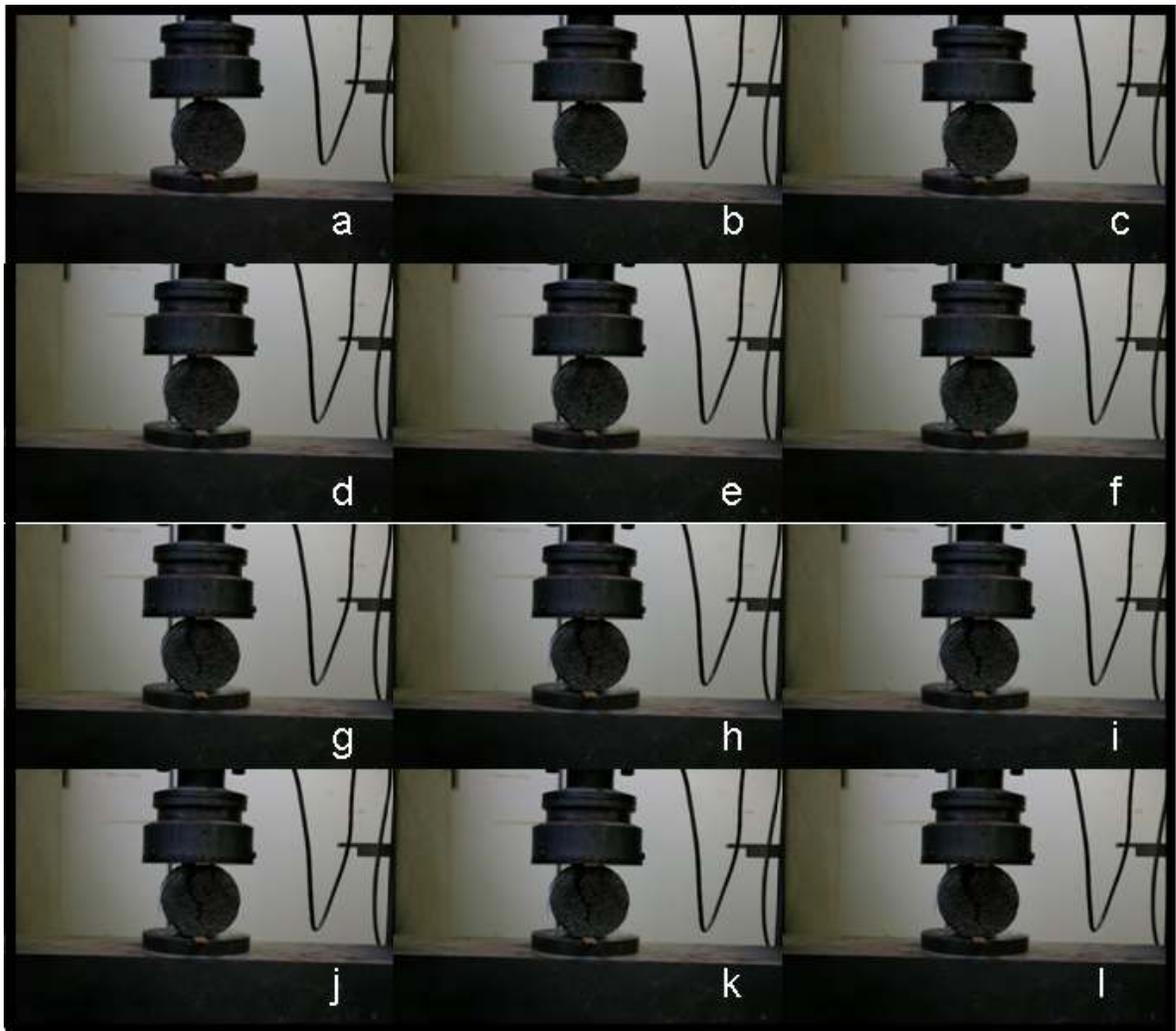


Figura- Seqüência de ruptura de corpo de prova no ensaio de tração por compressão diametral- 3ª série de ensaios.